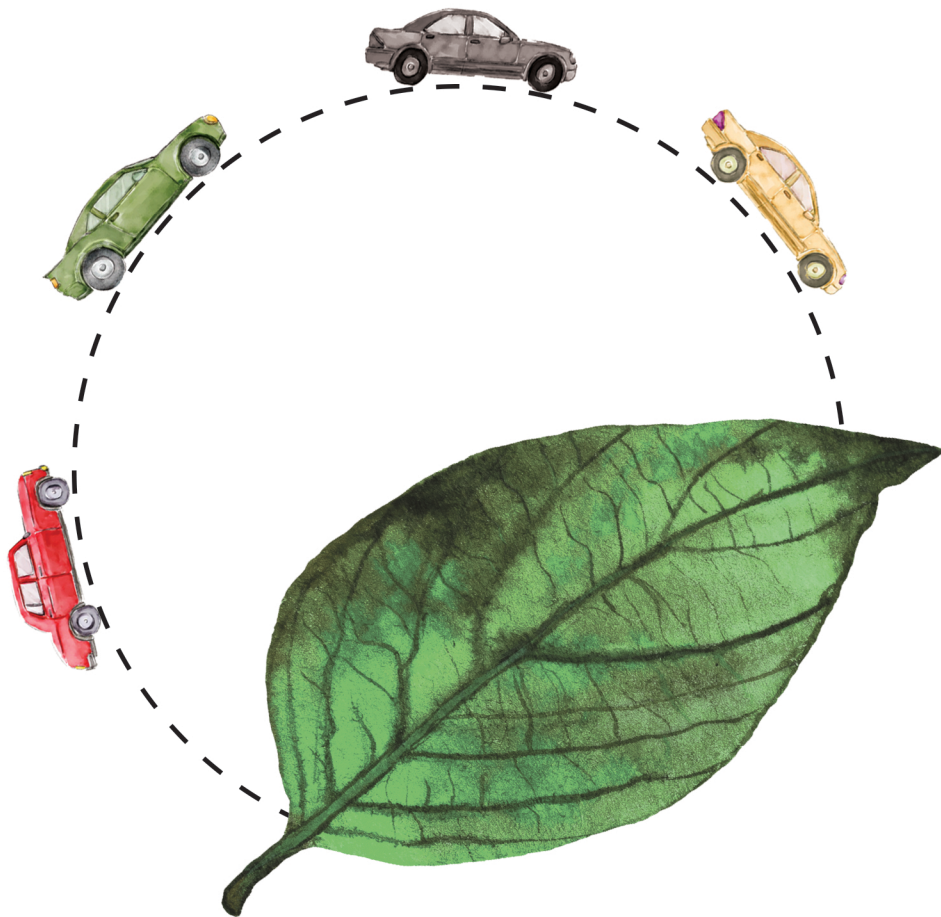




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Διερεύνηση των επιδράσεων προτύπων οικολογικής και
απότομης οδήγησης στα μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής και
στις εκπομπές ρύπων



Φίλιππος Αδαμίδης

Επιβλέπουσα: Ε.Ι. Βλαχογιάννη

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

Ένας στόχος χωρίς σχέδιο είναι απλά μια ευχή.

*Antoine de Saint-Exupéry,
Γάλλος συγγραφέας και αεροπόρος*

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους με βοήθησαν και με στήριξαν σε αυτή τη πενταετή προσπάθειά μου στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα Καθηγήτριά μου, κυρία Ελένη Βλαχογιάννη, η οποία δέχτηκε να επιβλέψει τη διπλωματική μου εργασία και με στήριξε καθ' όλη τη διάρκεια της διερεύνησης του θέματος και συγγραφής του παρόντος τεύχους. Ιδιαίτερα, ωστόσο, θέλω να την ευχαριστήσω επειδή μπόρεσε να αφυπνίσει το ενδιαφέρον μου πάνω στις τελευταίες εξελίξεις σχετικά με θέματα κυκλοφοριακής ροής, αστικής κινητικότητας και οδηγικής συμπεριφοράς, συμβάλλοντας καθοριστικά στην αγάπη που έχω αναπτύξει για το αντικείμενο του συγκοινωνιολόγου μηχανικού.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα του ΕΜΠ, κύριο Εμμανουήλ Μπαρμπουνάκη, ο οποίος ήταν έτοιμος να απαντήσει στις ερωτήσεις μου κάθε φορά που χρειάστηκε. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω και στους λοιπούς υποψήφιους διδάκτορες του Εργαστηρίου Κυκλοφοριακής Τεχνικής. Σε αυτούς βρήκα έναν πολύτιμο σύμμαχο, τη στιγμή που τον χρειάστηκα.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου προς τους φίλους και τους συμφοιτητές μου, για τη στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Μα, πιο πολύ θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράστασή της, ηθική και υλική, από τα πρώτα μου βήματα, μέχρι τώρα και για πάντα.

«Διερεύνηση των επιδράσεων προτύπων οικολογικής και απότομης οδήγησης στα μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής και στις εκπομπές ρύπων»

Φίλιππος Αδαμίδης

Επιβλέπουσα: Ελένη Ι. Βλαχογιάννη, Επίκουρη Καθηγήτρια ΕΜΠ

Σύνοψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των επιδράσεων προτύπων οικολογικής και απότομης οδήγησης στα μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής και στις εκπομπές ρύπων από επιβατικά οχήματα. Για τη συλλογή των δεδομένων οδήγησης χρησιμοποιήθηκε εφαρμογή για έξυπνα κινητά τηλέφωνα (smartphones) και δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων με 4156 αστικές διαδρομές. Η εξαγωγή των προτύπων επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων βασίστηκε στην ομαδοποίηση Κ-μέσων, ενώ η προσομοίωση της κυκλοφορίας οχημάτων έγινε με το μικροσκοπικό προσομοιωτή SUMO. Η διερεύνηση των επιπτώσεων στους ρύπους βασίστηκε σε τρία διακριτά σενάρια: το πρώτο αφορά σε ροή οχημάτων σε μη σηματοδοτούμενη αστική οδό, το δεύτερο σε ροή οχημάτων που διακόπτεται από φωτεινό σηματοδότη και το τρίτο σε προσομοίωση ενός ολόκληρου δικτύου με πραγματικά δεδομένα προέλευσης-προορισμού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η απότομη οδήγηση προκαλεί αύξηση των ρύπων, ενώ η πιο ομαλή οδήγηση προκαλεί μείωση των ρύπων, η οποία είναι στατιστικά σημαντική και δεν οφείλεται στη τυχαιότητα. Συμπεραίνεται ότι οι οδηγοί που περιορίζουν τις επιταχύνσεις και τις επιβραδύνσεις των οχημάτων τους συμβάλλουν θετικά στη μείωση των εκπομπών ρύπων, δηλαδή πραγματοποιούν οικολογική οδήγηση.

Λέξεις κλειδιά: επιτάχυνση, επιβράδυνση, οδηγική συμπεριφορά, πρότυπο, ομαδοποίηση, Κ-μέσων, προσομοίωση, κυκλοφορία οχημάτων, ρύποι, οικολογική οδήγηση

Impact investigation of driving behaviour profiles on traffic flow properties and emissions of air pollutants

Filippos Adamidis

Supervisor: Eleni I. Vlahogianni, Assistant Professor NTUA

Abstract

The aim of this diploma thesis is to assess the impact of ecological and harsh acceleration and deceleration profiles on the main properties of traffic flow and on the emissions of air pollutants. In order to collect the essential driving data, a mobile phone application was used as part of a previous study. The resulting database contains a total of 4156 urban trips originating from 100 distinct drivers. The extraction of the acceleration and deceleration profiles was based on k-means clustering, which resulted in the separation of the database in three clusters using some of the included variables, whereas the traffic simulation was done using the SUMO microscopic simulation software. The investigation of the impacts was based on three different scenarios; the first one concerns traffic simulation on a non-signalised urban arterial, the second one a simulation on a signalised urban arterial and the third one the simulation of an urban network with real O/D data (Luxembourg SUMO Traffic). The results showed that driving harshly leads to an increase in emissions, whereas driving smoothly leads to a statistically significant reduction in the emissions of air pollutants. Therefore, drivers who endorse a smoother accelerating and decelerating behaviour contribute positively to the reduction of air pollution from passenger cars, which means that they perform eco-driving.

Keywords: acceleration, deceleration, driving behaviour, profile, clustering, k-means, simulation, traffic flow, modeling, emissions, eco-driving

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, η ραγδαία βιομηχανική και οικονομική ανάπτυξη των ασιατικών χωρών είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση των οχημάτων ΙΧ σε παγκόσμιο επίπεδο. Αυτό είχε ως συνέπεια την επιδείνωση των περιβαλλοντικών φαινομένων που σχετίζονται με τις εκπομπές αέριων ρύπων από οχήματα (CO₂, CO, PM_x, NO_x). Στη προσπάθειά τους να συμβάλλουν στο περιορισμό των αρνητικών επιπτώσεων, πολλοί ερευνητές πρότειναν την οικολογική (ή οικονομική) οδήγηση ως μια μέθοδο περιορισμού των ρύπων που μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα και χωρίς να απαιτούνται επενδύσεις σε νέα οχήματα. Η οικολογική οδήγηση αποτελείται από μερικές βασικές οδηγίες, οι οποίες αφορούν στη συντήρηση και στη χρήση του οχήματος.

Ωστόσο, οι έρευνες για τα οφέλη της οικολογικής οδήγησης που ακολούθησαν δεν μπόρεσαν να καταλήξουν σε κάποιο σαφές αποτέλεσμα, τόσο σχετικά με ό,τι αφορά στη μείωση στις εκπομπές ρύπων, όσο και σε ό,τι αφορά στις αρνητικές επιπτώσεις στα μεγέθη της κυκλοφορίας οχημάτων. Σκοπός, λοιπόν, της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να εφαρμόσει μια νέα μέθοδος για το προσδιορισμό των προτύπων οικολογικής ή, αντίθετα, απότομης οδήγησης, η οποία να βασίζεται σε δεδομένα που μέχρι στιγμής δεν είχαν χρησιμοποιηθεί σε παρόμοια ερευνητική εργασία.

Για τη συλλογή δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν έξυπνα κινητά τηλέφωνα (smartphones), τα οποία είχαν εγκατεστημένη μια εφαρμογή καταγραφής των δυναμικών και κινηματικών δεδομένων του οχήματος. Έτσι, αυτά τα δεδομένα φυσικής οδήγησης μπόρεσαν να δώσουν επαρκείς πληροφορίες για τις επιταχύνσεις και τις επιβραδύνσεις των οχημάτων, οι οποίες μάλιστα συνοδεύονταν και από δείκτες αξιολόγησης της συμπεριφοράς του οδηγού (π.χ. απότομη ή ομαλή, οικολογική ή λιγότερο οικολογική κλπ.). Η συλλογή των δεδομένων έγινε στα πλαίσια προηγούμενων ερευνητικών εργασιών.

Το επόμενο βήμα ήταν η εξαγωγή των προτύπων επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων. Η ομαδοποίηση των δεδομένων βασίστηκε στην μέθοδο ομαδοποίησης K-μέσων με τον αλγόριθμο του Lloyd, από την οποία προέκυψαν τρία πρότυπα (ή προφίλ) με την ονομασία DAU (Drive As Usual), HARSH και ECO. Δημιουργήθηκε, επιπλέον, το πρότυπο MIX ως άθροισμα των ποσοστών των τριών προηγούμενων ομάδων. Η αξιολόγηση της ομαδοποίησης έδειξε ότι ο συνολικός δείκτης Silhouette είναι 0.38, δηλαδή ικανοποιητικός λαμβάνοντας υπόψη ότι οι μεταβλητές ήταν συνεχείς και όχι διακριτές. Επίσης, αποδείχτηκε ότι αυξανόμενων των επιταχύνσεων και των επιβραδύνσεων επιδεινώνονται και οι δείκτες οικολογικής οδήγησης.

Στη συνέχεια, διερευνήθηκαν οι επιπτώσεις των τριών αυτών προτύπων χρησιμοποιώντας το μικροσκοπικό προσομοιωτή SUMO. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκαν τρία διαφορετικά σενάρια: το πρώτο αφορά σε προσομοίωση σε οδό χωρίς σηματοδότηση, το δεύτερο σε οδό με σηματοδότη που διακόπτει τη

ροή των οχημάτων και το τρίτο σε προσομοίωση του δικτύου μιας ολόκληρης πόλης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το πρότυπο HARSH οδηγεί σε αύξηση των εκπομπών ρύπων, ενώ το πρότυπο ECO οδηγεί σε στατιστικά σημαντική μείωση των ρύπων σε σύγκριση με το πρότυπο MIX, χωρίς να επιδρά αρνητικά στα θεμελιώδη μακροσκοπικά μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής (πρώτο και δεύτερο σενάριο). Για την επίδραση της οικολογικής οδήγησης δεν προέκυψε κάποιο σίγουρο συμπέρασμα, ωστόσο υπάρχουν ενδείξεις ότι επιδρά αρνητικά αυξάνοντας τους ολικούς χρόνους μετακίνησης και αναμονής των οχημάτων (τρίτο σενάριο).

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα συνολικά, φάνηκε πως η οδήγηση με περιορισμένη επιτάχυνση και επιβράδυνση έχει ως θετικό αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων CO₂, CO, PM_x και NO_x. Θα μπορούσε, συνεπώς, να ειπωθεί ότι οι οδηγοί που περιορίζουν τις επιταχύνσεις και τις επιβραδύνσεις των οχημάτων τους στις τιμές του προτύπου ECO ($a = 1.79 \text{ m/s}^2, b = 2.42 \text{ m/s}^2$) πραγματοποιούν οικολογική οδήγηση.

Μελλοντικά, το θέμα που εξετάστηκε στη διπλωματική εργασία θα μπορούσε να επεκταθεί ώστε να προσθέσει περισσότερους παράγοντες αβεβαιότητας, όπως για παράδειγμα ομαδοποίηση Κ-μέσων χρησιμοποιώντας περισσότερες μεταβλητές, προσομοίωση χρησιμοποιώντας άλλα πρότυπα ακολουθώντας οχήματος, χρησιμοποίηση κόμβων, κλίσεων και άλλων γεωμετρικών στοιχείων κ.ο.κ. Βέβαια, για να ενισχυθούν τα σχετικά με το eco-driving συμπεράσματα θα πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω οι επιπτώσεις του στους χρόνους μετακίνησης και αναμονής και στη δημιουργία ουρών. Τέλος, απαραίτητη είναι η επαλήθευση των αποτελεσμάτων και η διερεύνηση της αποδοχής της οικολογικής οδήγησης από τους οδηγούς.

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενική Ανασκόπηση.....	3
1.1.1 Το φαινόμενο της αναπήδησης.....	3
1.1.2 Οι αρχές της οικολογικής οδήγησης.....	5
1.1.3 Οι βασικοί ρύποι από οχήματα.....	6
1.1.4 Τα οικονομικά οφέλη της οικολογικής οδήγησης.....	6
1.2 Στόχος της διπλωματικής εργασίας.....	7
1.3 Μεθοδολογίας ανάπτυξης της διπλωματικής εργασίας.....	7
1.4 Δομή της διπλωματικής εργασίας.....	8
2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	11
2.1 Εισαγωγή στη βιβλιογραφία.....	13
2.2 Επιπτώσεις της οδηγικής συμπεριφοράς στη κατανάλωση καυσίμων.....	13
2.3 Προσπάθειες προσδιορισμού των οφελών της οικολογικής οδήγησης.....	15
2.4 Αμφισβήτηση της αποτελεσματικότητας της οικολογικής οδήγησης ..	17
2.5 Εφαρμογή των αρχών του eco-driving σε αυτόνομα οχήματα.....	18
2.6 Ελλείψεις και αδυναμίες της υπάρχουσας βιβλιογραφίας.....	18
2.7 Συμπεράσματα βιβλιογραφικής ανασκόπησης.....	19
3 Μεθοδολογική προσέγγιση & θεωρητικό υπόβαθρο.....	21
3.1 Εισαγωγή στη μεθοδολογική προσέγγιση.....	23
3.2 Ομαδοποίηση Κ-μέσων.....	24
3.3 Αξιολόγηση των επιπτώσεων των προτύπων στη κυκλοφοριακή ροή και τους ρύπους.....	24
3.3.1 Ροή σε οδό χωρίς σηματοδότηση.....	24
3.3.2 Ροή σε οδό με σηματοδοτούμενο κόμβο.....	25
3.3.3 Αξιολόγηση σε επίπεδο δικτύου.....	25
3.3.4 Έλεγχος στατιστικής σημαντικότητας.....	25
3.4 Εξαγωγή συμπερασμάτων.....	26
3.5 Εισαγωγή στο θεωρητικό υπόβαθρο.....	27
3.6 Βασικά στοιχεία ομαδοποίησης.....	27
3.6.1 Ορισμός και στάδια της ομαδοποίησης.....	27
3.6.2 Ομαδοποίηση Κ-μέσων.....	27
3.6.3 Αλγόριθμος υλοποίησης Κ-μέσων του Lloyd.....	28
3.6.4 Παράδειγμα ομαδοποίησης Κ-μέσων με τον αλγόριθμο του Lloyd.....	31
3.6.5 Ευκλείδεια απόσταση.....	32

3.6.6	Μειονεκτήματα ομαδοποίησης Κ-μέσων	32
3.6.7	Δείκτες εγκυρότητας ομαδοποίησης Κ-μέσων.....	33
3.6.7.1	Δείκτης Silhouette	33
3.6.7.2	Δείκτης Davies-Bouldin	34
3.7	Διεργασίες επεξεργασίας των μεταβλητών	34
3.7.1	Κανονικοποίηση μεταβλητών	34
3.7.2	Ανάπτυξη στατιστικών προτύπων.....	35
3.7.3	Ο συντελεστής προσαρμογής R^2	35
3.8	Μαθηματικά πρότυπα κυκλοφοριακής ροής.....	36
3.8.1	Μακροσκοπικά χαρακτηριστικά κυκλοφοριακής ροής.....	36
3.8.2	Θεμελιώδη διαγράμματα κυκλοφοριακής ροής	37
3.8.3	Μικροσκοπικά πρότυπα ακολουθούστος οχήματος	39
3.8.4	Πρότυπο ακολουθούστος οχήματος του Krauss.....	40
3.9	Ο μικροσκοπικός προσομοιωτής SUMO.....	41
3.9.1	Εισαγωγικά στοιχεία για το προσομοιωτή	41
3.9.1.1	Induction loops detector (ελεγκτής επαγωγικού βρόχου).....	43
3.9.1.2	Edge-based traffic measures (δεδομένα εξόδου ακμής)	43
3.9.1.3	Edge-based emission output (δεδομένα εκπομπής ρύπων).....	44
3.9.2	Μοντέλο ρύπων PHEM.....	45
4	Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων.....	49
4.1	Εισαγωγή στη συλλογή και στην επεξεργασία δεδομένων.....	51
4.2	Συλλογή δεδομένων.....	51
4.2.1	Η καινοτομία συλλογής δεδομένων με smartphone	51
4.2.2	Σύστημα συλλογής, μετάδοσης και ανατροφοδότησης δεδομένων	51
4.2.2.1	Καταγραφή δεδομένων	51
4.2.2.2	Αλγόριθμος δυναμικής αναπροσαρμογής του συστήματος συντεταγμένων για smartphones	52
4.2.2.3	Μετάδοση και αποθήκευση δεδομένων.....	54
4.2.2.4	Ανάπτυξη προτύπων οδηγικής συμπεριφοράς	54
4.3	Επεξεργασία της βάσης δεδομένων.....	55
4.3.1	Η βάση δεδομένων της διπλωματικής εργασίας	55
4.3.2	Οι μεταβλητές της ομαδοποίησης Κ-μέσων	56
5	Ανάλυση και αποτελέσματα.....	59
5.1	Εισαγωγή στην ανάλυση και τα αποτελέσματα	61
5.2	Ομαδοποίηση Κ-μέσων.....	62

5.2.1 Δημιουργία προτύπων επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων	62
5.2.2 Εξέταση εγκυρότητας της ομαδοποίησης Κ-μέσων.....	67
5.2.3 Σύνοψη των αποτελεσμάτων της ομαδοποίησης.....	69
5.3 Προσομοίωση κυκλοφορίας οχημάτων	69
5.3.1 Ροή σε οδό χωρίς σηματοδότηση	70
5.3.1.1 Πρότυπο DAU	71
5.3.1.2 Πρότυπο HARSH	73
5.3.1.3 Πρότυπο ECO	74
5.3.1.4 Πρότυπο MIX	74
5.3.1.5 Επεξεργασία δεδομένων εξόδου.....	75
5.3.1.6 Αποτελέσματα	75
5.3.2 Ροή σε οδό με σηματοδοτούμενο κόμβο.....	86
5.3.2.1 Πρότυπο DAU	88
5.3.2.2 Πρότυπο HARSH	89
5.3.2.3 Πρότυπο ECO	90
5.3.2.4 Πρότυπο MIX	90
5.3.2.5 Επεξεργασία δεδομένων εξόδου.....	90
5.3.2.6 Αποτελέσματα	91
5.3.3 Αξιολόγηση σε επίπεδο δικτύου	99
5.3.3.1 Πρότυπο MIX*	100
5.3.3.2 Πρότυπο ECO.....	101
5.3.3.3 Προσομοίωση και αθροιστικά αποτελέσματα σε επίπεδο δικτύου	101
5.3.3.4 Επιπτώσεις και αποτελέσματα του προτύπου ECO κατά μήκος μιας οδού.....	104
5.3.4 Έλεγχος στατιστικά σημαντικής μεταβολής ρύπων.....	106
6 Συμπεράσματα	109
6.1 Σύνοψη μεθοδολογικής προσέγγισης	111
6.2 Βασικά συμπεράσματα	112
6.3 Συνολικά συμπεράσματα	114
6.4 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	115
7 Βιβλιογραφία.....	117

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακες 3.1(α)-(β): Μεταβλητές εισόδου και εξόδου ελεγκτή επαγωγικού βρόχου.....	43
Πίνακες 3.2(α)-(β): Μεταβλητές εισόδου και εξόδου δεδομένων ακμής	43
Πίνακες 3.3 (α)-(β) Μεταβλητές εισόδου και εξόδου δεδομένων εκπομπής ρύπων.....	44
Πίνακας 4.1: Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στην ομαδοποίηση K-μέσων	56
Πίνακας 5.1: Αντιστοίχιση των ομάδων στα πρότυπα επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων.....	66
Πίνακας 5.2 Αντιστοίχιση των μη κανονικοποιημένων κεντροειδών στα τρία πρότυπα	66
Πίνακας 5.3: Μέγιστες μέσες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις ανά πρότυπο.	66
Πίνακας 5.4: Ποσοστά των επιμέρους προτύπων στο σύνολο του δείγματος	67
Πίνακας 5.5 Σύνοψη των προτύπων.....	69
Πίνακας 5.6: Το πρότυπο MIX* του project LuST	101
Πίνακας 5.7: Αθροιστικά αποτελέσματα προσομοίωσης στο δίκτυο	102
Πίνακες 5.8(α)-(γ): Αποτελέσματα των t-tests	107
Πίνακες 5.9(α)-(γ): Αποτελέσματα των U-tests	107

Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 1.1: Εκπομπές CO ₂ παγκοσμίως και ανά περιοχή, 1990-2012 [4].....	4
Σχήμα 2.1: Κατανάλωση καυσίμων συναρτήσει της συμπεριφοράς του οδηγού-πλατφόρμα DrivingStyles για κινητά τηλέφωνα [8].....	14
Σχήμα 2.2(α): Διάγραμμα πραγματικών επιταχύνσεων – ταχύτητας [16].....	16
Σχήμα 2.2(β): Προσαρμογές των επιταχύνσεων για το περιορισμό του φόρτου του κινητήρα του οχήματος (STP) και την εξοικονόμηση καυσίμου [16].....	16
Σχήμα 2.3: Ρύποι σε αστική σηματοδοτούμενη οδό δύο λωρίδων ανά κατεύθυνση χρησιμοποιώντας το προσομοιωτή VISSIM [17].....	17
Σχήμα 3.1: Ταξινόμηση των αλγορίθμων ομαδοποίησης σε ιεραρχικούς και διαμεριστικούς [29].....	28
Σχήμα 3.2: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ομαδοποίησης K-μέσων.....	29
Σχήματα 3.3(α)-(δ): Παράδειγμα εξέλιξης της ομαδοποίησης K-μέσων με τρία κεντροειδή (K=3) [32].....	31
Σχήμα 3.4: Τα θεμελιώδη διαγράμματα κυκλοφοριακής ροής κατά Greenshields [38].....	37
Σχήμα 3.5: Εμπειρική καμπύλη ταχύτητας – φόρτου [35]	38
Σχήμα 3.6: Η τυπική μορφή της σχέση φόρτου – πυκνότητας [36]	38
Σχήμα 3.7: Παραδείγματα εφαρμογής καμπύλης σε δεδομένα που σχηματίζουν «νέφος» μετρήσεων [40].....	39
Σχήμα 3.8: Συμβολισμοί στα πρότυπα ακολουθούντος οχήματος [41]	40
Σχήμα 3.9: Η αρχιτεκτονική του μοντέλου ρύπων PHEM [46].....	46
Σχήμα 4.1: Οι τρεις γωνίες Euler που προσδιορίζουν την ακριβή περιστροφή του οχήματος στο χώρο σε σχέση με ένα σταθερό σύστημα συντεταγμένων	53
Σχήμα 4.2: Δυναμική αναπροσαρμογή συστήματος συντεταγμένων του smartphone στη κατεύθυνση κίνησης του οχήματος.....	54
Σχήμα 5.1: Σχέσεις μεταξύ κανονικοποιημένων μεταβλητών, όπου φαίνονται οι τρεις ομάδες (clusters) που δημιουργήθηκαν από την ομαδοποίηση K-μέσων με τον αλγόριθμο του Lloyd.....	63
Σχήματα 5.2(α)-(β): Τα αποτελέσματα της ομαδοποίησης των κανονικοποιημένων μεταβλητών <i>norm_avaccel</i> και <i>norm_avdecel</i>	64
Σχήμα 5.3: CLUSPLOT των κανονικοποιημένων μεταβλητών της ομαδοποίησης, που βασίζεται στην ανάλυση κύριων συνιστωσών (PCA).....	65
Σχήμα 5.4: Δείκτες Silhouette για κάθε στοιχείο ξεχωριστά, για κάθε ομάδα και συνολικά (GS _U)	68
Σχήμα 5.5: Το κυκλικό, δεκαγωνικό δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε στη προσομοίωση χωρίς σηματοδότηση.....	71

Σχήματα 5.6(α)-(β): Διαγράμματα φόρτου – πυκνότητας σε μη σηματοδοτούμενη αστική οδό	76
Σχήματα 5.7(α)-(β): Διαγράμματα ταχύτητας – φόρτου σε μη σηματοδοτούμενη αστική οδό.....	77
Σχήματα 5.8(α)-(β): Διαγράμματα ταχύτητας – πυκνότητας σε μη σηματοδοτούμενη αστική οδό	78
Σχήματα 5.9(α)-(β): Διαγράμματα εκπομπών CO ₂ -πυκνότητας.....	80
Σχήματα 5.10(α)-(β): Διαγράμματα εκπομπών CO	82
Σχήματα 5.11(α)-(β): Διαγράμματα εκπομπών PM _x	83
Σχήματα 5.12(α)-(β): Διαγράμματα εκπομπών NO _x - πυκνότητας	84
Σχήμα 5.13: Μείωση εκπομπών ρύπων στο πρότυπο ECO σε σχέση με το πρότυπο MIX	85
Σχήμα 5.14: Η μείωση των εκπομπών ρύπων στο πρότυπο ECO σε σχέση με το πρότυπο MIX συναρτήσει του φόρτου.....	86
Σχήμα 5.15: Το κλειστό, τετραγωνικό δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε στη προσομοίωση ροής με σηματοδότηση.....	87
Σχήμα 5.16: Η συνάρτηση averageifs στο Excel.....	91
Σχήματα 5.17(α)-(β): Θεμελιώδη διαγράμματα φόρτου – πυκνότητας της ακμής 1 (πριν το φωτεινό σηματοδότη)	92
Σχήμα 5.18: Σχέση φόρτου – κατάληψης στον ελεγκτή επαγωγικού βρόχου της ακμής 2	93
Σχήματα 5.19(α)-(β): Διαγράμματα εκπομπών CO ₂ – πυκνότητας	94
Σχήμα 5.20: Διάγραμμα εκπομπών CO	95
Σχήμα 5.21: Διάγραμμα εκπομπών PM _x	95
Σχήματα 5.22(α)-(β): Διαγράμματα εκπομπών NO _x – πυκνότητας.....	96
Σχήμα 5.23: Μείωση των εκπομπών ρύπων στο πρότυπο ECO σε σχέση με το πρότυπο MIX	97
Σχήμα 5.24: Διαφορά μεταξύ των προτύπων ECO και MIX συναρτήσει του φόρτου	97
Σχήμα 5.25: Ποσοστιαίες μεταβολές της μεταβλητής travelTime συναρτήσει της πυκνότητας	98
Σχήμα 5.26: Το δίκτυο του LuST [25].....	99
Σχήμα 5.27: Σενάρια ζήτησης. Χρησιμοποιήθηκε το DUA w Routing – Static [25].....	100
Σχήμα 5.28: Ποσοστιαία διαφορά στους ρύπους σε επίπεδο δικτύου ανά ώρα	102

Σχήμα 5.29: Η λεωφόρος Boulevard Royal στη κατεύθυνση κίνησης ΒΑ προς Ν	103
Σχήματα 5.30(α)-(β): Διαγράμματα CO ₂ – πυκνότητας σε αστική οδό τριών λωρίδων ανά κατεύθυνση	104
Σχήμα 5.31: Ποσοστιαία διαφορά στους ρύπους σε επίπεδο λεωφόρου ανά ώρα.....	105

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενική Ανασκόπηση

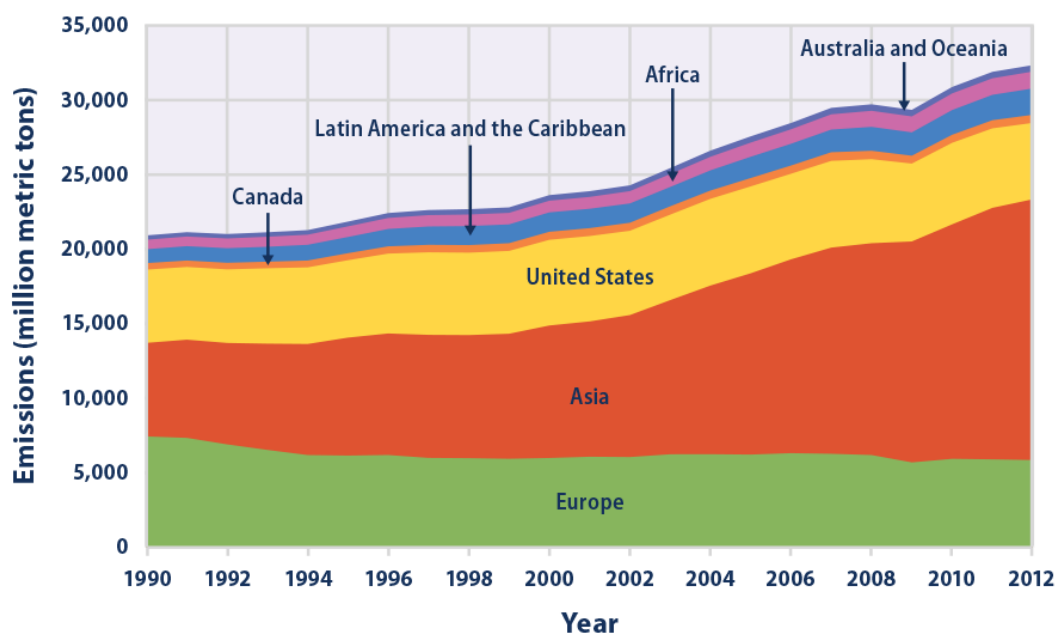
1.1.1 Το φαινόμενο της αναπήδησης

Το 1865, ο Άγγλος οικονομολόγος William Stanley Jevons στο βιβλίο του «*The Coal Question*» παρατηρεί ότι η κατανάλωση κάρβουνου στην Αγγλία αυξήθηκε ραγδαία μετά την εφεύρεση της ατμομηχανής του Watt, η οποία είχε υψηλότερη ενεργειακή απόδοση από τους προκατόχους της. Η ατμομηχανή του Watt κατέστησε το κάρβουνο μια πιο φθηνή πηγή ενέργειας και έτσι άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής κατανάλωσης κάρβουνου, παρότι η κατανάλωση ανά μονάδα ατμομηχανής είχε μειωθεί. Τότε ο Jevons ισχυρίστηκε ότι η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης έχει τη τάση να αυξάνει τη κατανάλωση καυσίμων παρά να τη μειώνει.

Το φαινόμενο αυτό, το οποίο έκτοτε ονομάστηκε παράδοξο του Jevons, βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς τομείς της καθημερινής ζωής, ένας από τους οποίους είναι και οι μετακινήσεις. Η τεχνολογική πρόοδος αυξάνει την αποδοτικότητα της χρήσης των φυσικών πόρων μειώνοντας τη κατανάλωση ανά μονάδα, ωστόσο είναι υπαίτια και για την αύξηση της συνολικής ζήτησης, η οποία τελικά οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού που καταναλώνονται οι φυσικοί πόροι. Το παράδοξο του Jevons αποτελεί μια ακραία περίπτωση του φαινομένου της αναπήδησης (rebound effect), όπου για παράδειγμα η βελτίωση της αποδοτικότητας ενός οχήματος κατά 5% έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 2% μόνο, αφού το υπόλοιπο 3% δαπανάται είτε για την οδήγηση σε υψηλότερη ταχύτητα είτε για την αύξηση των αποστάσεων που καλύπτονται με το όχημα. Αυτό οδηγεί αναπόφευκτα στο ερώτημα : τελικά, οι ρύποι από τα οχήματα αυξάνονται ή μειώνονται;

Η Ευρώπη έχει θέσει πολύ φιλόδοξους στόχους για τη μείωση των ρύπων από τα ΙΧ. Ο επίσημος στόχος που είχε τεθεί για το 2015 ήταν 130 γραμμάρια διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) ανά χιλιόμετρο για κάθε νέο όχημα που πωλείται, ενώ το 2021 ο στόχος είναι η μείωση αυτού του μεγέθους στα 95 γραμμάρια ανά χιλιόμετρο, μια μείωση που αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό 18% περίπου σε σχέση με το 2015. Τα δεδομένα μέχρι τώρα είναι ενθαρρυντικά, αφού το 2016 τα νέα οχήματα εξέπεμπαν κατά μέσο όρο 118.1 γραμμάρια CO₂ ανά χιλιόμετρο, υπερκαλύπτοντας σε μεγάλο βαθμό το στόχο του 2015 [1]. Παράλληλα, η Ευρώπη στοχεύει στο περιορισμό της αύξησης του αριθμού των οχημάτων από τα 251 εκατομμύρια ΙΧ το 2015 στα μόλις 258 εκατομμύρια το 2030 [2], γεγονός που αναμένεται να έχει θετικό αντίκτυπο στις εκπομπές CO₂, οι οποίες θα μειωθούν κατά 30% περίπου από τους 770 εκατομμύρια τόνους ανά έτος στους 539 εκατομμύρια τόνους ανά έτος. Έτσι, στην ιδανική περίπτωση η Ευρώπη θα μπορέσει να μειώσει τους ρύπους από τις μετακινήσεις με το αυτοκίνητο, καταρρίπτοντας το παράδοξο του Jevons.

Ωστόσο, τα δεδομένα σε άλλες ηπείρους είναι εντελώς διαφορετικά. Η βιομηχανική ανάπτυξη στην Ασία και η συνεπακόλουθη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου των κατοίκων της είχε ως δικαιολογημένη συνέπεια την αύξηση των ενεργειακών αναγκών στις χώρες της Ανατολής. Στη Κίνα ο αριθμός των ΙΧ αναμένεται να αυξηθεί από τα 48 εκατομμύρια το 2010 στα 240 εκατομμύρια το 2030 [3], μια αύξηση της τάξης του 400% σε διάστημα 20 ετών, και αυτό χωρίς να συνυπολογίζεται η αύξηση των δίκυκλων και των φορτηγών που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά εμπορευμάτων. Αντίστοιχα ποσοστά ανάπτυξης του αριθμού των ΙΧ αναμένεται να παρατηρηθούν και σε άλλες ταχέως αναπτυσσόμενες οικονομίες της Ασίας, όπως για παράδειγμα η Ινδία, η Ινδονησία κλπ. Σε αυτή τη περίπτωση, ακόμα και η βελτίωση των εκπομπών ρύπων ανά όχημα δεν φαίνεται να οδηγεί σε μείωση του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος των οδικών μεταφορών, επιβεβαιώνοντας το παράδοξο του Jevons.



Σχήμα 1.1: Εκπομπές CO₂ παγκοσμίως και ανά περιοχή, 1990 – 2012. Πηγή: EPA [4]

Έτσι, είναι αμφίβολο τελικά αν η βελτίωση των κινητήρων των οχημάτων θα οδηγήσει αυτόματα στο περιορισμό των ρύπων από τις μετακινήσεις και τις μεταφορές εμπορευμάτων. Η βελτίωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των μετακινήσεων γίνεται, βέβαια, πιο αισθητή όταν συνοδεύεται και από τη βελτίωση της οδηγικής συμπεριφοράς των ανθρώπων, όπως θα φανεί και στο δεύτερο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, το οποίο ασχολείται με τη βιβλιογραφική ανασκόπηση και την ανασκόπηση ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια πάνω στο θέμα της ρύπανσης της ατμόσφαιρας συναρτήσει της οδηγικής συμπεριφοράς. Προς αυτή τη κατεύθυνση, επιστήμονες, εθνικοί και υπερεθνικοί οργανισμοί πρότειναν το eco-driving

1.1.2 Οι αρχές της οικολογικής οδήγησης

Η οικολογική ή οικονομική οδήγηση (energy-efficient driving ή eco-driving) είναι μια στρατηγική συντήρησης και χρήσης του οχήματος που στοχεύει στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και στην ενεργειακά αποδοτική λειτουργία του οχήματος. Ο όρος πρωτοεμφανίστηκε στη πολιτική συζήτηση προς τα τέλη της δεκαετίας του 1970, ενώ από το 2000 και μετά αποτελεί μέρος της θεωρητικής εκπαίδευσης των νέων οδηγών. Το βασικό πλεονέκτημα του eco-driving είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα και δεν απαιτεί επενδύσεις σε νέα οχήματα και νέες υποδομές. Σύμφωνα με την ένωση αυτοκινητιστών του Ηνωμένου Βασιλείου (Automobile Association) [5] η οικολογική οδήγηση συνοψίζεται σε μέτρα τριών διαφορετικών κατηγοριών: συντήρηση, προετοιμασία και οδήγηση.

1. Συντήρηση
 - 1.1. Τακτική συντήρηση του οχήματος, σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή.
 - 1.2. Τακτικός έλεγχος της πίεσης των ελαστικών και της στάθμης του λαδιού στη μηχανή.
2. Προετοιμασία
 - 2.1. Μείωση του περιττού βάρους και των παραγόντων που δημιουργούν αεροδυναμική αντίσταση (π.χ. εσχάρες οροφής).
 - 2.2. Σχεδιασμός ταξιδιού, ώστε να αποφεύγεται η άσκοπη περιπλάνηση κατά την αναζήτηση της σωστής διαδρομής.
 - 2.3. Συνδυασμός πολλών σύντομων διαδρομών σε μία μεγαλύτερη.
 - 2.4. Αποφυγή οδήγησης για διαδρομές μικρής απόστασης. Το περπάτημα βελτιώνει, εκτός από την ατμόσφαιρα, και την υγεία.
3. Οδήγηση
 - 3.1. Ομαλή οδήγηση, περιορισμός των απότομων επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων, επιβράδυνση κάνοντας χρήση του συστήματος μετάδοσης της κίνησης του οχήματος.
 - 3.2. Πρόβλεψη των φωτεινών σηματοδοτών και εκκίνηση πέδησης όσο το δυνατόν νωρίτερα. Μείωση ταχύτητας πριν το φωτεινό σηματοδότη και αποφυγή σταματήματος.
 - 3.3. Αλλαγή ταχύτητας στο κιβώτιο στις 2000 με 3000 στροφές (εξαρτάται από τον κατασκευαστή).
 - 3.4. Στις χαμηλές ταχύτητες μείωση της χρήσης του κλιματιστικού. Στις υψηλές ταχύτητες αποφυγή ανοικτών παραθύρων (λειτουργούν σαν αερόστατο). Το καλοκαίρι στις μεγάλες ταχύτητες συμφέρει περισσότερο η οδήγηση με κλιματισμό παρά με ανοικτά παράθυρα
 - 3.5. Τήρηση ορίων ταχύτητας και ασφαλούς απόστασης μεταξύ των οχημάτων.

Σε δοκιμές στις οποίες συμμετείχαν 50 άτομα που εφάρμοσαν τις παραπάνω συμβουλές, η Automobile Association παρατήρησε κατά μέσο όρο 10% μείωση στη κατανάλωση καυσίμων. Η υψηλότερη μείωση που καταγράφηκε ήταν της τάξης του 33%. Ωστόσο, όπως θα διαπιστωθεί στη βιβλιογραφική ανασκόπηση, υπάρχουν σοβαρές αμφιβολίες για τη δυνατότητα διατήρησης αυτού του ποσοστού στην εξοικονόμηση καυσίμων.

1.1.3 Οι βασικοί ρύποι από οχήματα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία διερευνώνται οι εκπομπές ρύπων συναρτήσει προτύπων επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων. Οι ρύποι που περιλαμβάνονται στην ανάλυση είναι το διοξείδιο του άνθρακα, το μονοξείδιο του άνθρακα, τα οξείδια του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια.

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) αποτελεί υποπροϊόν όλων των καύσεων ορυκτών καυσίμων (βενζίνης, πετρελαίου, φυσικού αερίου, κάρβουνου κλπ.) αλλά παράγεται και κατά την αποσύνθεση οργανικών ενώσεων. Σε πολύ μεγάλες ποσότητες το ατμοσφαιρικό διοξείδιο του άνθρακα είναι τοξικό για τον άνθρωπο και προκαλεί αρρυθμίες. Επιπλέον, είναι υπεύθυνο σε μεγάλο βαθμό για το φαινόμενο του θερμοκηπίου και την υπερθέρμανση του πλανήτη.

Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) παράγεται από μηχανές εσωτερικής καύσης όταν δεν υπάρχει αρκετό οξυγόνο για να παραχθεί διοξείδιο του άνθρακα, όπως συμβαίνει συχνά σε υπόγειους χώρους στάθμευσης. Αν και παγκοσμίως η μεγαλύτερη ποσότητα μονοξειδίου του άνθρακα παράγεται φυσικά, το αέριο είναι τοξικό για τον άνθρωπο και η εισπνοή του σε μεγάλες ποσότητες προκαλεί δηλητηρίαση και θάνατο, καθώς εμποδίζει τη μεταφορά οξυγόνου από τα ερυθρά αιμοσφαίρια του αίματος.

Με τον όρο οξείδια του αζώτου (NO_x) γίνεται αναφορά σε ένα μίγμα αερίου μονοξειδίου του αζώτου (NO) και αερίου διοξειδίου του αζώτου (NO_2). Αν και τα οξείδια του αζώτου υπάρχουν φυσικά στην ατμόσφαιρα, σχηματίζονται και από τη καύση ορυκτών καυσίμων. Η επίδρασή τους στην υγεία του ανθρώπου κρίνεται ιδιαίτερα αρνητική, καθώς συμβάλλουν στη δημιουργία ασθματικών καταστάσεων και αναπνευστικών προβλημάτων. Είναι, επίσης, υπαίτια για την όξινη βροχή, η οποία καταστρέφει υδατικά οικοσυστήματα και ανθρώπινες κατασκευές από μάρμαρο και ασβέστη.

Τέλος, τα αιωρούμενα σωματίδια (PM_x) είναι ύλη μικροσκοπικού μεγέθους που βρίσκεται διασκορπισμένη στην ατμόσφαιρα της γης. Παράγονται από φυσικές (σκόνη, θαλάσσια άλατα) ή ανθρωπογενείς αιτίες (βιομηχανία, μεταφορές) και ανάλογα με τη διάμετρό τους μεταβάλλεται ο δείκτης x . Τα $\text{PM}_{2.5}$ και PM_{10} , τα οποία έχουν διάμετρο μικρότερη από 2.5 μm και 10 μm αντίστοιχα, επιδρούν ιδιαίτερα αρνητικά στην ανθρώπινη υγεία, αφού ενδέχεται να προκαλέσουν καρδιακή προσβολή, άσθμα ή καρκίνο του πνεύμονα.

1.1.4 Τα οικονομικά οφέλη της οικολογικής οδήγησης

Η συμπεριφορά του οδηγού στο δρόμο επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό, εκτός από τις εκπομπές ρύπων, και την οδική ασφάλεια, πάνω στην οποία τα τελευταία χρόνια πραγματοποιούνται διεθνώς πολλές έρευνες. Φαίνεται ότι η υιοθέτηση μιας ομαλούς, μετριοπαθούς οδηγικής συμπεριφοράς δεν ωφελεί μόνο στη μείωση των ρύπων από τα οχήματα, αλλά έχει και θετικές επιπτώσεις στη

μείωση των ατυχημάτων [6]. Έτσι, όπως το κράτος καλείται να φορολογήσει τα οχήματα ανάλογα με τις εκπομπές ρύπων, οι ασφαλιστικές εταιρείες φέρνουν σιγά σιγά στην αγορά τη τιμολόγηση ανάλογα με τη συμπεριφορά του οδηγού. Στο πλαίσιο αυτό εμφανίστηκαν τα προγράμματα PHYD (Pay how you drive) [7], τα οποία «τιμωρούν» τους οδηγούς που υιοθετούν επιθετική οδηγική συμπεριφορά και «επιβραβεύουν» τους οδηγούς που οδηγούν ομαλά, μειώνοντας το ύψος των ασφαλίσεων τους. Έτσι, είναι σαφές ότι η οικολογική οδήγηση δεν προσφέρει οικονομία μόνο σε επίπεδο καυσίμων αλλά θα μπορούσε στο μέλλον να αποδειχτεί οικονομική και στο σκέλος των τελών κυκλοφορίας και των ασφαλίσεων.

1.2 Στόχος της διπλωματικής εργασίας

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η **διερεύνηση της επίδρασης προτύπων οικολογικής και απότομης οδήγησης στα μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής και στις εκπομπές ρύπων.**

Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται το πώς τα μεγέθη των επιταχύνσεων και των επιβραδύνσεων επηρεάζουν τους ρύπους που εκπέμπονται από οχήματα ΙΧ και αν η επίδρασή τους στη κυκλοφορία των οχημάτων είναι θετική ή αρνητική. Αρχικά, δημιουργούνται τρία πρότυπα επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων εφαρμόζοντας της μέθοδο της ομαδοποίησης Κ-μέσων στη βάση δεδομένων. Το πρώτο πρότυπο, το οποίο ονομάζεται **DAU** (Drive As Usual) αντιστοιχεί σε ενδιάμεσες τιμές επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων, δηλαδή σε οδηγούς που ακολουθούν μια μετριοπαθή οδηγική συμπεριφορά. Το δεύτερο πρότυπο ονομάζεται **HARSH** και αντιστοιχεί στις υψηλές τιμές επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων, δηλαδή σε οδηγούς που επιταχύνουν και επιβραδύνουν απότομα. Το τρίτο πρότυπο ονομάζεται **ECO** και αντιστοιχεί στις χαμηλές τιμές των επιταχύνσεων και των επιβραδύνσεων. Όπως θα αποδειχθεί στο κεφάλαιο της ανάλυσης, το πρότυπο ECO έχει ως θετικό αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών ρύπων. Τέλος, ως άθροισμα των ποσοστών των προτύπων DAU, HARSH και ECO προκύπτει το πρότυπο **MIX**, το οποίο αντιπροσωπεύει το συνολικό μίγμα των οδηγών.

Η διερεύνηση των επιπτώσεων βασίζεται σε δεδομένα φυσικής οδήγησης, τα οποία συλλέχθηκαν μέσω κινητών τηλεφώνων, και περιλαμβάνουν 4156 διαδρομές. Σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι δεν δόθηκαν οδηγίες στους οδηγούς και, συνεπώς, τα δεδομένα αντιστοιχούν σε πραγματικές συνθήκες οδήγησης.

1.3 Μεθοδολογία ανάπτυξης της διπλωματικής εργασίας

Σε αυτή τη παράγραφο περιγράφεται συνοπτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά την ανάπτυξη του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Σε πρώτη φάση καθορίστηκε το αντικείμενο που θα εξεταστεί καθώς και ο επιδιωκόμενος στόχος. Στη συνέχεια, προκειμένου να υλοποιηθεί αυτός ο στόχος και να αποκτηθεί γνώση σχετική με το θέμα, πραγματοποιήθηκε η **βιβλιογραφική ανασκόπηση**. Αυτό σημαίνει ότι αναζητήθηκαν συναφείς έρευνες κυρίως σε διεθνή περιοδικά, πρακτικά διεθνών συνεδρίων, επιστημονικά βιβλία κ.α. Λαμβάνοντας υπόψη την υπάρχουσα έρευνα, αναζητήθηκε μια μέθοδος ανάλυσης που μέχρι εκείνη τη στιγμή δεν είχε εφαρμοστεί σε παρόμοια εργασία.

Ύστερα, παρατέθηκε μια σύνοψη της διαδικασίας που ακολουθήθηκε στο κεφάλαιο της ανάλυσης (**μεθοδολογική προσέγγιση**). Ακολούθησε μια συνοπτική αναδρομή στις γνώσεις που είναι απαραίτητες ώστε ο αναγνώστης να μπορεί να κατανοήσει το αντικείμενο και τον τρόπο της ανάλυσης (**θεωρητικό υπόβαθρο**). Προκειμένου να υλοποιηθεί η διπλωματική εργασία αναζητήθηκε η κατάλληλη βάση δεδομένων, η οποία έπρεπε να περιέχει δεδομένα και δείκτες οικολογικής και απότομης οδήγησης (**συλλογή και επεξεργασία δεδομένων**). Όλη η ανάλυση βασίστηκε σε αυτή τη βάση δεδομένων.

Την μεθοδολογική προσέγγιση διαδέχτηκαν η **ανάλυση** και τα **αποτελέσματα**. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύσσεται η διαδικασία της ανάλυσης, όπου αρχικά χρησιμοποιείται η γλώσσα προγραμματισμού R και έπειτα η προσομοίωση με μικροσκοπικά πρότυπα ακολουθώντας οχήματος και πρότυπα εκπομπών ρύπων. Στη συνέχεια, διαμορφώθηκαν τα **συμπεράσματα**, οι **παρατηρήσεις** και οι **προτάσεις για περαιτέρω έρευνα**.

Τέλος, στο κεφάλαιο της **βιβλιογραφίας** συγκεντρώνονται όλες οι αναφορές που αξιοποιήθηκαν για τη συγγραφή του παρόντος τεύχους.

1.4 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζεται η δομή της διπλωματικής εργασίας, σύμφωνα με την οποία αναπτύσσεται το περιεχόμενο των κεφαλαίων της.

Στο **κεφάλαιο 1** γίνεται μια εισαγωγή στο θέμα της διπλωματικής εργασίας και προσδιορίζεται ο στόχος της. Αρχικά, παρατίθενται ορισμένα γενικά στοιχεία σχετικά με το θέμα της οικολογικής και της απότομης οδήγησης, τους ρύπους και τις αρνητικές επιπτώσεις τους στο περιβάλλον και στον άνθρωπο. Ύστερα, παρουσιάζεται η μεθοδολογία ανάπτυξης της διπλωματικής εργασίας και περιγράφονται τα στάδια εκτέλεσης της εργασίας. Τέλος, παρουσιάζεται η δομή του παρόντος τεύχους.

Στο **κεφάλαιο 2** παρατίθενται τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, η οποία βασίστηκε σε έρευνες που ανακτήθηκαν από διεθνή επιστημονικά περιοδικά, πρακτικά συνεδρίων και επιστημονικά βιβλία. Επίσης,

πραγματοποιείται παράθεση δύο έως τριών εργασιών για κάθε υποενότητα που αντιστοιχεί σε ένα ξεχωριστό θέμα, σχετικό όμως με το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας, και παρουσιάζονται η μεθοδολογία, οι τρόποι συλλογής δεδομένων και τα σημαντικότερα αποτελέσματα. Το κεφάλαιο κλείνει με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, όπου διατυπώνονται τα συμπεράσματα και υπογραμμίζεται η σημασία ορισμένων παραμέτρων στις εκπομπές ρύπων από οχήματα.

Στο **κεφάλαιο 3**, αρχικά παρουσιάζεται η μεθοδολογική προσέγγιση στην οποία βασίστηκε η ανάπτυξη του κεφαλαίου της ανάλυσης και των αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της διπλωματικής εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται μια συνοπτική ανασκόπηση στη θεωρία της ομαδοποίησης με τη μέθοδο K-μέσων, η οποία υλοποιείται από τον αλγόριθμο του Lloyd. Έπειτα, εξηγούνται ορισμένες βασικές αρχές της κυκλοφοριακής ροής και πιο συγκεκριμένα οι θεμελιώδεις σχέσεις μεταξύ των μακροσκοπικών μεγεθών και τα μικροσκοπικά πρότυπα ακολουθώντας οχήματος. Τέλος, γίνεται εισαγωγή στη προσομοίωση κυκλοφορίας οχημάτων και εκπομπών ρύπων.

Στο **κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται η διαδικασία συλλογής δεδομένων με έξυπνα κινητά τηλέφωνα (smartphones). Στη συνέχεια, επεξηγούνται οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στην ομαδοποίηση καθώς και η επεξεργασία που έχουν υποστεί, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους αλγορίθμους της διπλωματικής εργασίας.

Το **κεφάλαιο 5** είναι ίσως το σημαντικότερο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, καθώς περιλαμβάνει την εφαρμογή της μεθοδολογίας για την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων. Περιγράφονται τα βήματα ανάπτυξης της διπλωματικής εργασίας, τα δεδομένα εισόδου και εξόδου και τα σχετικά διαγράμματα που προκύπτουν μέσω της ανάλυσης. Έπειτα, παρατίθενται τα σχετικά αποτελέσματα, τα οποία στη συνέχεια θα χρησιμεύσουν για τη μόρφωση των συμπερασμάτων της ανάλυσης.

Το **κεφάλαιο 6** είναι το προτελευταίο κεφάλαιο του παρόντος τεύχους. Σε αυτό περιλαμβάνονται τα συνολικά συμπεράσματα που προέκυψαν ύστερα από την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Επιπλέον, γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα, είτε με διαφορετικές μεθόδους είτε αξιοποιώντας διαφορετικές μεταβλητές. Οι προτάσεις αυτές μπορούν να αξιοποιηθούν στα πλαίσια άλλων διπλωματικών εργασιών.

Στο **κεφάλαιο 7** συγκεντρώνονται οι βιβλιογραφικές αναφορές που αξιοποιήθηκαν για τη συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Οι πηγές αυτές προέρχονται κυρίως από εργασίες που έχουν δημοσιευθεί σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά και πρακτικά συνεδρίων, τα οποία αναζητήθηκαν και προσπελάστηκαν μέσω του παγκόσμιου ιστού (internet).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Εισαγωγή στη βιβλιογραφία

Τα τελευταία χρόνια, οι αρνητικές ενδείξεις για την επιτάχυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου είχαν ως αποτέλεσμα την αύξηση των προειδοποιήσεων σχετικά με την ολοένα αυξανόμενη εκπομπή αέριων ρύπων από μηχανές εσωτερικής καύσης και την εντατικοποίηση των προσπαθειών στη κατεύθυνση της ευαισθητοποίησης του κοινού για το περιορισμό της κατανάλωσης καυσίμων. Ως αποτέλεσμα, πολλοί ερευνητές στο τομέα των μεταφορών, των φυσικών επιστημών και της πληροφορικής αποφάσισαν να ασχοληθούν πιο εντατικά με θέματα οικονομικής οδήγησης, τόσο για να εξετάσουν τους παράγοντες που συνιστούν μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (greenhouse gases – GHG), όσο και για να διερευνήσουν τη συμπεριφορά των οδηγών απέναντι στις νέες οδηγίες που στοχεύουν στην εξοικονόμηση καυσίμων. Στις επόμενες ενότητες του παρόντος κεφαλαίου γίνεται προσπάθεια να παρουσιαστούν αντιπροσωπευτικά δείγματα της έρευνας που έχει γίνει πάνω στο ζήτημα της οικολογικής οδήγησης.

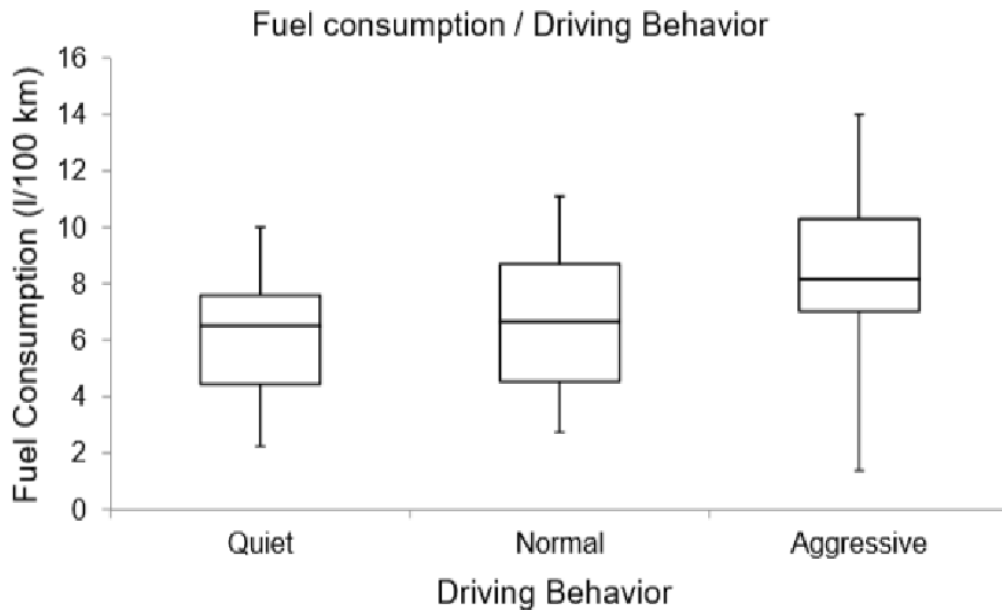
2.2 Επιπτώσεις της οδηγικής συμπεριφοράς στη κατανάλωση καυσίμων

Οι «επιθετικοί» οδηγοί πραγματοποιούν εκκινήσεις με ιδιαίτερα υψηλή επιτάχυνση, συνηθίζουν να οδηγούν στις υψηλές στροφές του κινητήρα και αλλάζουν τη ταχύτητα κίνησης του οχήματος τους συχνά και με πολύ γρήγορο ρυθμό. Αντίθετα, οι οδηγοί που επιδεικνύουν μια πιο «μετριοπαθή» συμπεριφορά αποφεύγουν απότομες ή συχνές αλλαγές της ταχύτητας κίνησης.

Οι Meseguer et al. [8] δημιούργησαν τη πλατφόρμα DrivingStyles με σκοπό τον χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς των οδηγών και της κατανάλωσης καυσίμου. Χρησιμοποιώντας τεχνικές εξόρυξης δεδομένων (data mining) οι χρήστες της εφαρμογής DrivingStyles ταξινομούνται βάσει της ανάλυσης δεδομένων οδήγησης που συλλέγονται μέσω του υποδοχέα OBD-II (On-board diagnostics) του οχήματός τους και αποστέλλονται μέσω Bluetooth στο «έξυπνο» κινητό τηλέφωνό τους (smartphone), το οποίο στη συνέχεια τα ανεβάζει σε μια κεντρική βάση δεδομένων. Εκτός από τη ταχύτητα, την επιτάχυνση, τις στροφές του κινητήρα και τη τοποθεσία του οχήματος, το OBD-II συλλέγει και τα δεδομένα του αισθητήρα ροής καυσίμου (Mass Flow Sensor- MAF) και του αισθητήρα θερμοκρασίας εισαγωγής αέρα (Air Intake Temperature – AIT). Συνεπώς, η πλατφόρμα DrivingStyles αποτελείται από ένα smartphone, έναν υποδοχέα OBD-II και μια βάση δεδομένων.

Η επεξεργασία των δεδομένων βασίζεται στα νευρωνικά δίκτυα (neural networks). Ωστόσο, επειδή υπάρχει ο κίνδυνος ένα νευρωνικό δίκτυο να μετατραπεί σε «αποθήκη δεδομένων», αν οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται είναι πολλές σε αριθμό, χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις της ταχύτητας, της επιτάχυνσης και των στροφών του κινητήρα. Τα υπόλοιπα δεδομένα ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν σε μια μεταγενέστερη έρευνα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η κατανάλωση καυσίμου αυξάνεται, όσο αυξάνεται και η επιθετικότητα του οδηγού. Οι επιθετικοί οδηγοί καίνε κατά μέσο όρο 8 λίτρα ανά 100 χιλιόμετρα, ενώ αυτοί που υιοθετούν μια πιο ομαλή οδηγική συμπεριφορά μόλις 6.6 λίτρα ανά 100 χιλιόμετρα. Αντίστοιχα, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) αυξήθηκαν

από τα 10 kg στα 15 kg ανά 100 km, ανάλογα με το αν ο οδηγός οδηγεί ομαλά ή επιθετικά αντίστοιχα.



Σχήμα 2.1: Κατανάλωση καυσίμων συναρτήσει της συμπεριφοράς του οδηγού - πλατφόρμα *DrivingStyles* για κινητά τηλέφωνα. Πηγή: *Meseguer et al.* [8]

Ένα από τα βασικά προβλήματα των προτύπων συμπεριφοράς οικολογικής οδήγησης είναι η αναγνώριση των παραγόντων που επηρεάζουν τη κατανάλωση ενέργειας. Οι Fomunung et al. [9] δημιούργησαν ένα στατιστικό μοντέλο εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x) συναρτήσει της απαιτούμενης αδρανειακής ισχύος (επιτάχυνση \times ταχύτητα) και της απαιτούμενης ισχύος για την υπερνίκηση της τριβής (επιτάχυνση \times ταχύτητα²). Ωστόσο, η Ericsson [VA3] αναφέρει ότι στη πραγματικότητα πολλές από τις παραμέτρους που έχουν χρησιμοποιηθεί σε σχετικές έρευνες έχουν υψηλή αλληλοσυσχέτιση (correlation). Αυτό προκαλεί προβλήματα αφενός στο μοντέλο εκπομπών, επειδή για παράδειγμα μια μεταβλητή έχει την ακριβώς αντίθετη επίδραση από μια άλλη, και αφετέρου επειδή η ερμηνεία του μοντέλου δεν είναι δυνατή.

Σκοπός της έρευνας της Ericsson (2001) [10] ήταν να βρεθούν ανεξάρτητα μεγέθη που να περιγράφουν τις εκπομπές αερίων οχημάτων και τη κατανάλωση καυσίμου ανά χιλιόμετρο, ανά τύπο οδού, σε οδήγηση εντός πόλης ή περιφερειακά κλπ. Από τις 62 συνολικά παραμέτρους που καταγράφηκαν, χρησιμοποιώντας παραγοντική ανάλυση μειώθηκαν σε μόλις 16. Βρέθηκε ότι ο παράγοντας συνδυασμός υψηλής επιτάχυνσης με υψηλές ενεργειακές ανάγκες (π.χ. σε οχήματα μεγάλου βάρους) και ο παράγοντας συχνότητα στάσεων έχουν την υψηλότερη συσχέτιση με τη κατανάλωση καυσίμου, τις εκπομπές CO_2 και NO_x . Αντίθετα, οι υψηλές ταχύτητες δεν φαίνεται να επιδρούν αρνητικά στο περιβάλλον, οπότε στο μέλλον, κατά την άποψη της Ericsson, ο περιορισμός των ταχυτήτων θα πρέπει να αφορά μόνο σε θέματα οδικής ασφάλειας και όχι σε θέματα επιβάρυνσης του περιβάλλοντος με αέριους ρύπους.

2.3 Προσπάθειες προσδιορισμού των οφελών της οικολογικής οδήγησης

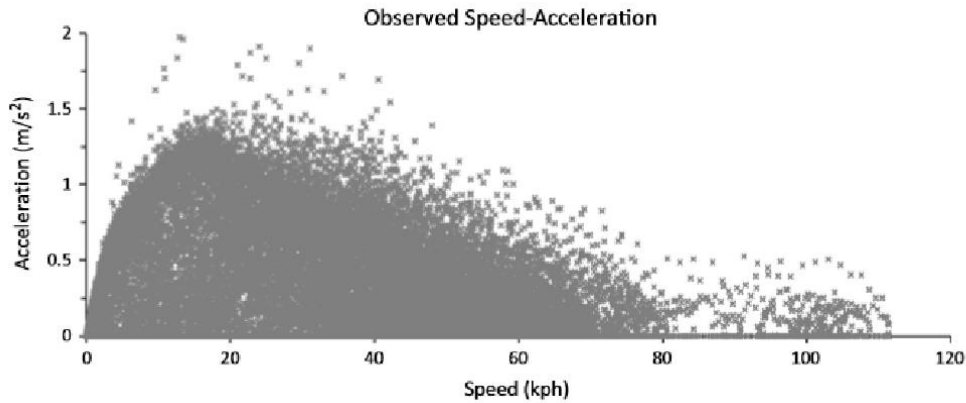
Πολλοί ερευνητές υποστήριξαν ότι το eco-driving είναι ένας άμεσος, φθηνός και αποδοτικός τρόπος για τη μείωση των εκπομπών αερίων από οχήματα, χωρίς να απαιτείται η ανανέωση του στόλου οχημάτων στα πλαίσια μιας πόλης ή μιας χώρας. Επιπλέον, έχει και παράπλευρα οφέλη, όπως τη μείωση του θορύβου που εκλύεται από τα οχήματα καθώς και τη μείωση του κόστους συντήρησης ανά όχημα, λόγω της πιο ομαλής και με λιγότερες αλλαγές στις στροφές λειτουργίας του κινητήρα.

Οι Ho et al. [11] αναφέρουν ότι τα οφέλη του eco-driving διαφέρουν από χώρα σε χώρα και από έρευνα σε έρευνα. Στις ΗΠΑ η αναμενόμενη εξοικονόμηση καυσίμου βρέθηκε περίπου μεταξύ του 5% και του 33%, υπό την προϋπόθεση ότι η επιθετική οδηγική συμπεριφορά αντικαταστάθηκε από μια πιο μετριοπαθή (US Department of Energy, 2012a, 20102b)[12][13]. Μια έρευνα της Ford στη Γερμανία απέδειξε ότι τα αναμενόμενα οφέλη αγγίζουν το 25%, τόσο ως προς την εξοικονόμηση καυσίμου όσο και ως προς τη μείωση των εκπομπών CO₂ (Hennig, 2004)[14]. Στην Ελλάδα μια έρευνα στην οποία συμμετείχαν οδηγοί λεωφορείων έδειξε ότι η εξοικονόμησή καυσίμου είναι 10.2% κατά μέσο όρο, όσο διαρκούσε η εκπαίδευση των οδηγών. Ωστόσο, η εξοικονόμηση μειώθηκε στο 4.35% δύο μήνες μετά την εκπαίδευση (Zarkadoula, Zoidis & Tritoroulou, 2007)[15].

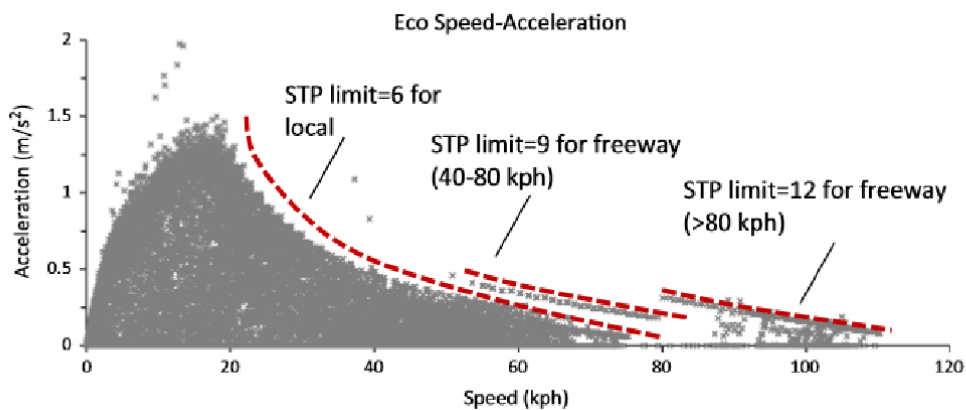
Σκοπός της έρευνας των Ho et al. [11] ήταν να αποδειχθεί ότι το eco-driving επιτυγχάνει, όντως, εξοικονόμηση καυσίμου και άρα μειώνει τις εκπομπές άνθρακα. Οι δοκιμές έγιναν στα πλαίσια του προγράμματος Volkswagen Singapore: Think Blue. Η διαδικασία εκπαίδευσης των οδηγών αποτελούνταν από τρία στάδια: αρχικά, έλαβαν χώρα μαθήματα οικονομικής οδήγησης και στη συνέχεια οι οδηγοί ακολούθησαν μια προκαθορισμένη διαδρομή δύο φορές, πρώτα χωρίς να εφαρμόζουν τις αρχές της οικονομικής οδήγησης (κύκλος 1) και έπειτα εφαρμόζοντας τις παραπάνω αρχές (κύκλος 2). Τα αποτελέσματα της έρευνας των Ho et al. έδειξαν ότι η κατανάλωση καυσίμου μειώθηκε από τα 12.43 km/L στα 10.79 km/L (μέσες τιμές), ενώ ταυτόχρονα η μέση ταχύτητα παρέμεινε πρακτικά η ίδια (36.13 km/h στο κύκλο 1 και 36.10 km/h στο κύκλο 2).

Οι Xu et al. [16] αναφέρουν ότι στις δημόσιες συγκοινωνίες η μείωση της κατανάλωσης καυσίμων μπορεί να επιτευχθεί είτε αντικαθιστώντας τα υπάρχοντα καύσιμα με νέα, όπως για παράδειγμα με συμπιεσμένο φυσικό αέριο (Compressed Natural Gas – CNG), είτε εφαρμόζοντας τις αρχές της οικονομικής οδήγησης. Επίσης, υπογραμμίζουν το κενό που υπάρχει ανάμεσα στη προσομοίωση μοντέλων eco-driving και στη πραγματική εξοικονόμηση που είναι δυνατό να επιτευχθεί. Συγκρίνοντας πραγματικά δεδομένα από διαδρομές λεωφορείων εντός (local transit) και εκτός πόλης (express service), οι Xu et al. (2017) εφάρμοσαν τρία διαφορετικά σενάρια: στο πρώτο οι οδηγοί ακολούθησαν τις αρχές του eco-driving, περιορίζοντας τις απότομες επιταχύνσεις στις υψηλές ταχύτητες και άρα μειώνοντας το φόρτο της μηχανής (Scaled Tractive power – STP), στο δεύτερο αντικατέστησαν τον υπάρχοντα στόλο οχημάτων diesel από νέα οχήματα CNG, ενώ το τρίτο σενάριο ήταν συνδυασμός των δύο προηγούμενων. Στο πρώτο σενάριο οι εκπομπές CO₂

μειώθηκαν κατά 5% (local transit) και 7% (express service), ενώ στο δεύτερο η κατανάλωση φυσικού αερίου αυξήθηκε σε σχέση με το diesel και η μείωση εκπομπών CO₂ συντελέστηκε μόνο στις υπεραστικές διαδρομές. Στο σενάριο 3 οι εκπομπές μειώθηκαν κατά 4% στις αστικές και κατά 17% στις υπεραστικές διαδρομές. Αυτό αποδεικνύει ότι η μείωση των εκπομπών CO₂ δεν απαιτεί απαραίτητα επενδύσεις σε νέα οχήματα.



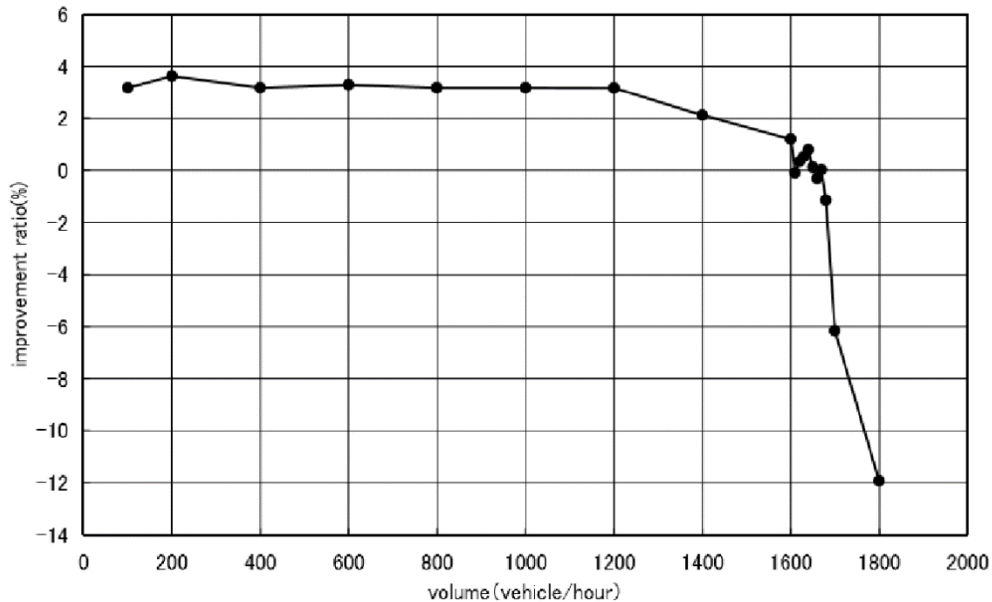
Σχήμα 2.2(α): Διάγραμμα πραγματικών επιταχύνσεων - ταχύτητας. Πηγή: Xu et al. [16]



Σχήμα 2.2(β): Προσαρμογές των επιταχύνσεων για το περιορισμό του φόρτου του κινητήρα του οχήματος (STP) και την εξοικονόμηση καυσίμου. Πηγή: Xu et al. [16]

Οι Kobayashi et al. [17] ακολούθησαν μια διαφορετική προσέγγιση για τη ποσοτικοποίηση των πλεονεκτημάτων του eco-driving. Χρησιμοποίησαν δεδομένα επιτάχυνσης και ταχύτητας από «κανονικές» (normal) και «οικολογικές» (eco-driving) οδηγικές συμπεριφορές, τα οποία συλλέχθηκαν από πραγματικές διακριτές διαδρομές που πραγματοποίησαν 18 οδηγοί σε διάστημα 1.2 έτους. Από αυτά, εξήγαγαν μοντέλα επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων συναρτήσει της ταχύτητας, τα οποία είχαν πολυωνυμική μορφή τετάρτου βαθμού. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας προσομοίωση κυκλοφορίας οχημάτων σε μικροσκοπικό επίπεδο με το πρόγραμμα VISSIM σε μια σηματοδοτούμενη οδό δύο λωρίδων ανά κατεύθυνση, μπόρεσαν να υπολογίσουν τη ποσοστιαία μεταβολή των εκπομπών CO₂. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, μέχρι φόρτο 1600 οχημάτων ανά ώρα, το eco-driving επιτυγχάνει μείωση ρύπων γύρω στο 3.5%. Σε μεγαλύτερους φόρτους, η μείωση της επιτάχυνσης έχει ως συνέπεια την αύξηση του χρόνου μετακίνησης και, ως εκ

τούτου, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου αυξάνονται, επειδή τα οχήματα αναγκάζονται να πραγματοποιήσουν περισσότερους κύκλους επιτάχυνσης και επιβράδυνσης (stop and go) μέχρι να περάσουν από το φωτεινό σηματοδότη, ενώ ταυτόχρονα αυξάνονται οι ουρές αναμονής.



Σχήμα 2.3: Ρύποι σε αστική σηματοδοτούμενη οδό δύο λωρίδων ανά κατεύθυνση χρησιμοποιώντας το μικροσκοπικό προσομοιωτή VISSIM. Πηγή: Kobayashi et al [17]

Για να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα που προαναφέρθηκε, οι Kobayashi et al. (2007) εφάρμοσαν έναν αλγόριθμο ενεργοποίησης και απενεργοποίησης του eco-driving, ο οποίος στη πραγματικότητα θα μπορούσε να υλοποιηθεί με μια πινακίδα μεταβλητών μηνυμάτων. Όταν η ταχύτητα των οχημάτων V είναι μικρότερη από τη $V_1 = 45.2$ km/h, η οποία αντιστοιχεί σε φόρτο 1600 οχημάτων ανά ώρα, τότε οι οδηγοί θα πρέπει να εγκαταλείψουν το eco-driving. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μείωση των εκπομπών CO₂ γύρω στο 2% μέχρι τα 2700 οχήματα ανά ώρα σε σηματοδοτούμενη οδό δύο λωρίδων ανά κατεύθυνση. Η εφαρμογή των προτύπων επιτάχυνσης και επιβράδυνσης σε αστικό κόμβο με πραγματικά δεδομένα κυκλοφορίας έδειξε ότι τα θετικά αποτελέσματα της οικολογικής οδήγησης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη σύνθεση της κυκλοφορίας.

2.4 Αμφισβήτηση της αποτελεσματικότητας της οικολογικής οδήγησης

Η πληθώρα των διαφορετικών απόψεων και η έλλειψη μη συγκεκριμένων αποτελεσμάτων είχε ως συνέπεια να τεθούν υπό αμφισβήτηση οι αρχές του eco-driving. Οι Alam et al. [18] αναφέρουν ότι οι πρακτικές αυτές ενδέχεται να προκαλούν αύξηση της πιθανότητας πρόκλησης ατυχημάτων και αύξηση των αερίων ρύπων σε επίπεδο δικτύου. Η μείωση της ταχύτητας και της επιτάχυνσης από τη μία μειώνει τις εκπομπές άνθρακα ανά όχημα, αλλά από την άλλη σε επίπεδο δικτύου μπορεί να προκαλέσει αύξηση, καθώς τα οχήματα παραμένουν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στην οδό (Wang, Daamen, Hoogedoorn & Arem, 2012)[19]. Επιπλέον, η χωρητικότητα των

σηματοδοτούμενων κόμβων μειώνεται, αφού λιγότερα οχήματα διέρχονται σε κάθε φάση, οπότε μειώνεται και το επίπεδο εξυπηρέτησης.

Μια άλλη παράμετρος που πρέπει να συνυπολογιστεί είναι η επιτυχία της εκπαίδευσης των οδηγών. Η έρευνα των Beusen et al. [20] έδειξε ότι οι περισσότεροι οδηγοί μείωσαν τη κατανάλωση καυσίμων στα οχήματά τους αμέσως μετά την εκπαίδευση. Μερικοί από αυτούς μπόρεσαν να διατηρήσουν αυτή τη μείωση, ενώ άλλοι επανήλθαν στα επίπεδα κατανάλωσης πριν την εκπαίδευση. Επιπλέον, η χρήση συσκευών που παρέχουν σχετικές συμβουλές εντός του οχήματος αυξάνει τη πιθανότητα πρόκλησης ατυχήματος, ιδιαίτερα σε οδήγηση με υψηλό φόρτο ενασχόλησης, όπως π.χ. σε αστικό περιβάλλον (Liu & Lee, 2006)[21].

2.5 Εφαρμογή των αρχών του eco-driving σε αυτόνομα οχήματα

Ένας τρόπος για να μεγιστοποιηθούν τα οφέλη του eco-driving, σύμφωνα με τους Iglinski et al. [22], είναι τα σημερινά, συμβατικά οχήματα να αντικατασταθούν από πλήρως αυτόνομα (5th level of autonomy). Η κίνηση των αυτόνομων οχημάτων σε σταθερή ταχύτητα μειώνει την ανάγκη για συχνές επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις και, συνεπώς, μειώνει τις εκπομπές CO₂ και άλλων αερίων του θερμοκηπίου. Επιπρόσθετα, η κίνηση οχημάτων σε φάλαγγα, σε μικρή απόσταση μεταξύ τους και, αν αυτό είναι δυνατό, πίσω από φορτηγά, μειώνει την αεροδυναμική αντίσταση και ως εκ τούτου και τη κατανάλωση καυσίμου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σε σχετικό πρόγραμμα που πραγματοποιήθηκε στην Ευρώπη με δύο φορτηγά ακολουθούμενα από τρία επιβατικά οχήματα, η κατανάλωση μειώθηκε κατά μέσο όρο 8% στο πρώτο ΙΧ και 16% στο δεύτερο και στο τρίτο ΙΧ σε ταχύτητα 90 km/h και αποστάσεις 4 m μεταξύ των οχημάτων (SARTRE, 2012) [23].

2.6 Ελλείψεις και αδυναμίες της υπάρχουσας βιβλιογραφίας

Παρότι η βιβλιογραφία σχετικά με την οικολογική οδήγηση και τη συμπεριφορά των οδηγών στο δρόμο είναι αρκετά εκτενής, υπάρχουν πεδία που μέχρι στιγμής δεν έχουν διερευνηθεί. Ένα βασικό πλεονέκτημα των νέων τεχνολογιών είναι η δυνατότητα καταγραφής δεδομένων με κινητά τηλέφωνα (smartphones). Μέσω των αισθητήρων, που εξοπλίζουν όλες τις σύγχρονες συσκευές, και σε συνδυασμό με την ευρεία χρήση και διάδοση του internet είναι δυνατή πλέον η συλλογή δεδομένων κατά την οδήγηση με πολύ χαμηλό κόστος και υψηλή ακρίβεια. Οι έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί βασίζονται στη συντριπτική πλειοψηφία τους σε πειραματικά δεδομένα, τα οποία έχουν προκύψει από οδήγηση πριν και μετά από εκπαίδευση, σε συγκεκριμένες διαδρομές και υπό προκαθορισμένες συνθήκες οδήγησης, χωρίς να έχουν εκμεταλλευτεί τις νέες δυνατότητες που προσφέρει η τεχνολογία. Είναι, όμως, εξαιρετικά αμφίβολο αν τα πειράματα αυτού του είδους αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές συνθήκες κατά την οδήγηση. Επιπλέον, οι περισσότερες έρευνες που περιλαμβάνουν προσομοίωση κυκλοφορίας οχημάτων σε Η/Υ βασίστηκαν σε μεμονωμένα στοιχεία ενός δικτύου, όπως είναι για παράδειγμα μία οδός ή ένας κόμβος. Καμία έρευνα ως τώρα δεν είχε ασχοληθεί με τη προσομοίωση ενός ολόκληρου δικτύου, με πραγματικά δεδομένα προέλευσης – προορισμού,

τα οποία θα μπορούσαν να προσεγγίσουν με μεγάλη ακρίβεια τις συνθήκες που επικρατούν σε μια πόλη κατά τη διάρκεια της ημέρας.

2.7 Συμπεράσματα βιβλιογραφικής ανασκόπησης

Η συμπεριφορά του οδηγού επηρεάζει τη κατανάλωση καυσίμου και, κατά συνέπεια, τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και άλλων ρύπων. Οι απότομες μεταβολές της ταχύτητας συνεπάγονται αύξηση της απαιτούμενης ισχύος του κινητήρα. Μερικές έρευνες υποστηρίζουν ότι η υψηλή ταχύτητα συμβάλλει αρνητικά στις εκπομπές CO₂ και άλλων αερίων, ενώ άλλες έρευνες αγνοούν την επίδραση της ταχύτητας. Σχεδόν όλες, ωστόσο, συγκλίνουν στο γεγονός ότι η ένταση της επιτάχυνσης έχει άμεση σχέση με την αύξηση των εκπομπών ρύπων.

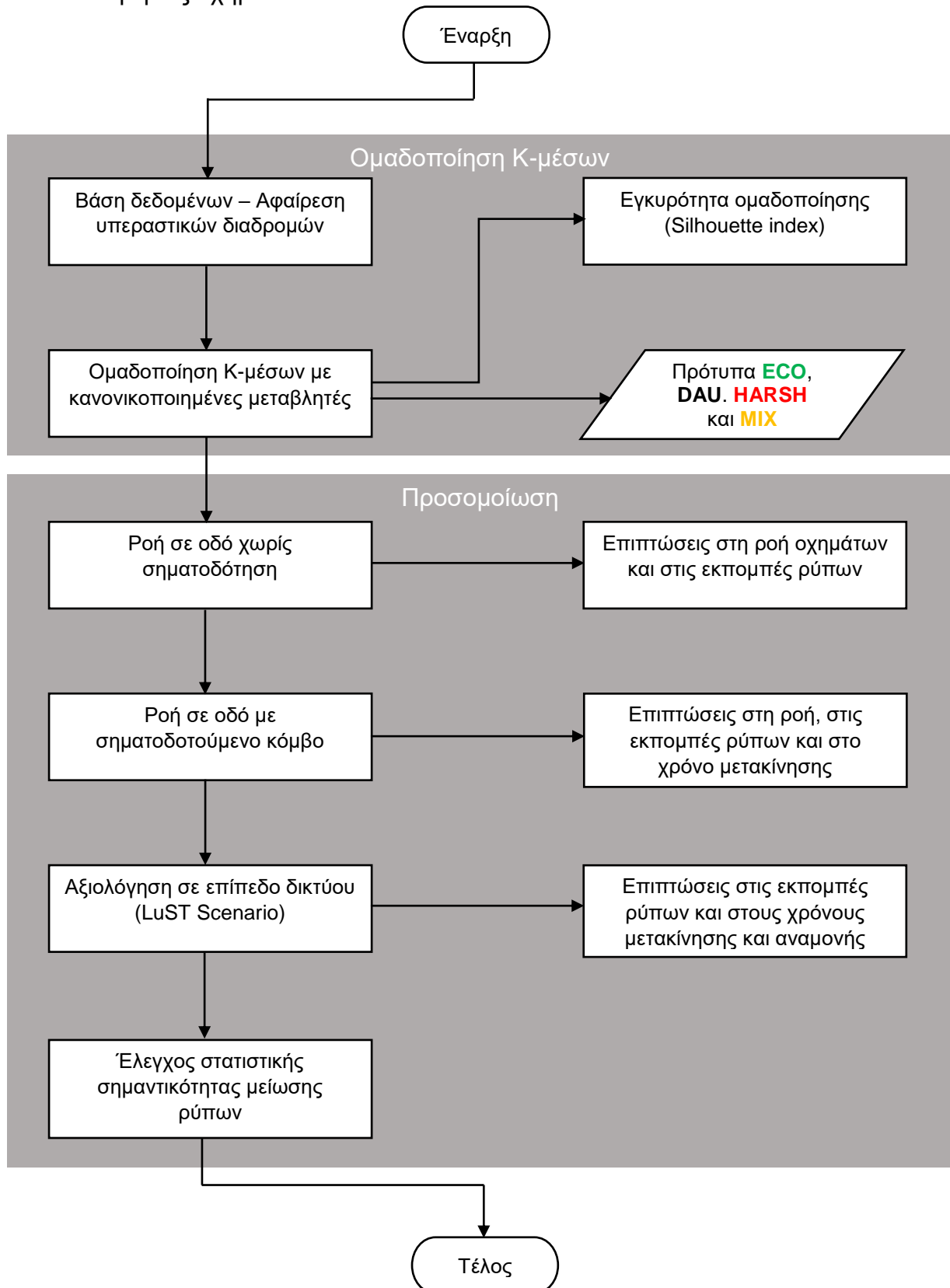
Τα οφέλη του eco-driving διαφέρουν σε πολύ μεγάλο βαθμό από έρευνα σε έρευνα, ανάλογα με τη μεθοδολογία που ακολουθεί κάθε ερευνητής. Ωστόσο, οι έρευνες που έχουν γίνει καλύπτουν ένα μεγάλο αριθμό διαφορετικών σεναρίων, όπως μαθήματα οικονομικής οδήγησης, εναλλακτικά καύσιμα, εξαγωγή μοντέλων επιτάχυνσης συναρτήσεως της ταχύτητας, προσομοίωση σε μικροσκοπικό επίπεδο κ.α.

Παρ' όλα αυτά, έχει υποστηριχθεί ότι τα οφέλη του eco-driving εμφανίζονται σε επίπεδο οχήματος και όχι σε επίπεδο δικτύου, καθώς σε περιοχές με υψηλό φόρτο φαίνεται ότι οι χαμηλές επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις μειώνουν βραχυπρόθεσμα τη χωρητικότητα των σηματοδοτούμενων κόμβων. Οι μελλοντικές εξελίξεις στα αυτόνομα οχήματα ενδέχεται να αποτελέσουν σημείο καμπής όσον αφορά τη πιστή εφαρμογή των αρχών της οικονομικής οδήγησης σε μεγάλη κλίμακα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ
&
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

3.1 Εισαγωγή στη μεθοδολογική προσέγγιση

Η διπλωματική εργασία χωρίζεται σε δύο διακριτά μέρη: το πρώτο αφορά την ομαδοποίηση Κ-μέσων, ενώ το δεύτερο αφορά τις προσομοιώσεις κυκλοφορίας οχημάτων.



3.2 Ομαδοποίηση Κ-μέσων

Πριν από την επεξεργασία της βάσης δεδομένων, η οποία θα εξηγηθεί στο επόμενο κεφάλαιο, αξίζει να γίνει μια πρώτη προσέγγιση στη μεθοδολογία της ομαδοποίησης Κ-μέσων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένας από τους επιμέρους στόχους της διπλωματικής εργασίας είναι η εξαγωγή 3 προτύπων για τις επιταχύνσεις και τις επιβραδύνσεις των οδηγών. Τα πρότυπα αυτά, τα οποία ονομάζονται **DAU**, **HARSH** και **ECO**, προκύπτουν από την ομαδοποίηση χρησιμοποιώντας τις μεταβλητές *avaccel*, *avdecel*, *smooth_eco*, *hapermin* και *hbpermin* μέσω του αλγορίθμου του Lloyd σε κανονικοποιημένες μεταβλητές. Το πρότυπο **ECO** αντιστοιχεί σε χαμηλές επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις, το **DAU** αντιστοιχεί στις ενδιάμεσες τιμές και το **HARSH** σε υψηλές τιμές. Επειδή στο προσομοιωτή SUMO ως επιτάχυνση και επιβράδυνση ορίζονται οι μέγιστες τιμές τους (acceleration/deceleration ability), ως επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις για κάθε ομάδα χρησιμοποιούνται οι μέγιστες μέσες τιμές της κάθε ομάδας. Επιπλέον, δημιουργείται το πρότυπο **MIX** ως άθροισμα των ποσοστών των τριών επιμέρους προτύπων.

Στη συνέχεια, ακολουθεί η αξιολόγηση της εγκυρότητας της ομαδοποίησης Κ-μέσων. Αρχικά, αξιολογούνται οι αποστάσεις των σημείων από τα κεντροειδή των ομάδων τους και στη συνέχεια χρησιμοποιείται ο δείκτης Silhouette. Η αξιολόγηση βασίζεται στο διάγραμμα του δείκτη, τόσο για τα επιμέρους πρότυπα **DAU**, **HARSH** και **ECO**, όσο και για το σύνολο του δείγματος (GS_u). Η ομαδοποίηση Κ-μέσων και η αξιολόγηση της εγκυρότητας γίνονται στην εφαρμογή RStudio χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού R. Στη συνέχεια, θα γίνει η αξιολόγηση των επιπτώσεων των προτύπων στη κυκλοφοριακή ροή και τις εκπομπές ρύπων.

3.3 Αξιολόγηση των επιπτώσεων των προτύπων στη κυκλοφοριακή ροή και τους ρύπους

Χρησιμοποιώντας τα πρότυπα που προέκυψαν από την ομαδοποίηση Κ-μέσων, εκτιμώνται οι επιπτώσεις των επιταχύνσεων και των επιβραδύνσεων στη κυκλοφοριακή ροή και στις εκπομπές ρύπων. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται ο μικροσκοπικός προσομοιωτής SUMO. Η αξιολόγηση εφαρμόζεται σε τρία σενάρια: στο πρώτο σενάριο διερευνώνται οι επιπτώσεις στην ελεύθερη ροή σε οδό χωρίς σηματοδότηση. Στο δεύτερο σενάριο επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία σε οδό με σηματοδοτούμενο κόμβο και στο τρίτο σενάριο γίνεται αξιολόγηση των επιπτώσεων σε επίπεδο δικτύου με πραγματικά δεδομένα προέλευσης – προορισμού. Τέλος, εξετάζεται αν η μεταβολή των εκπομπών ρύπων είναι στατιστικά σημαντική, χρησιμοποιώντας Student's t-tests και Mann-Whitney U-tests στη διαφορά μεταξύ των προτύπων **ECO** και **MIX**.

3.3.1 Ροή σε οδό χωρίς σηματοδότηση

Η προσομοίωση στο πρώτο σενάριο βασίζεται σε μια κλειστή (κυκλική) διαδρομή. Χρησιμοποιώντας την εφαρμογή NETEDIT του SUMO, σχεδιάζεται ένα δεκαγωνικό κλειστό δίκτυο μίας λωρίδας προς μία κατεύθυνση κίνησης. Η προσομοίωση ξεκινά με μικρή πυκνότητα που σταδιακά αυξάνεται, οπότε

μειώνεται σταδιακά και η ταχύτητα κίνησης των οχημάτων. Ως αποτέλεσμα της προσομοίωσης προκύπτουν δύο αρχεία, δηλαδή ένα από τα δεδομένα εξόδου ακμής (edge-based traffic measures) και ένα από τα δεδομένα εκπομπής ρύπων (edge-based emission output).

Στη συνέχεια, αξιοποιώντας τα δύο προαναφερθέντα αρχεία, γίνεται η συγκριτική αξιολόγηση των προτύπων επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργούνται τα θεμελιώδη μακροσκοπικά διαγράμματα της κυκλοφοριακής ροής (ταχύτητας – πυκνότητας, φόρτου – πυκνότητας και ταχύτητας-φόρτου) και τα διαγράμματα εκπομπών ρύπων CO₂, CO, NO_x και PM_x. Από αυτά τα διαγράμματα διατυπώνονται τα σχετικά συμπεράσματα για κάθε πρότυπο.

3.3.2 Ροή σε οδό με σηματοδοτούμενο κόμβο

Στο δεύτερο σενάριο επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία όπως και στην ελεύθερη ροή χωρίς σηματοδότηση, μόνο που αυτή τη φορά η κυκλοφορία στην οδό διακόπτεται από έναν φωτεινή σηματοδότη. Σκοπός σε αυτό το στάδιο είναι η δημιουργία του θεμελιώδους διαγράμματος φόρτου – πυκνότητας και των διαγραμμάτων εκπομπών ρύπων CO₂, CO, NO_x και PM_x. Επιπλέον, διερευνάται η επίδραση των επιταχύνσεων και των επιβραδύνσεων στους χρόνους μετακίνησης επί της σηματοδοτούμενης οδού.

3.3.3 Αξιολόγηση σε επίπεδο δικτύου

Το τελευταίο σενάριο του κεφαλαίου της ανάλυσης περιλαμβάνει τη προσομοίωση ενός αληθινού δικτύου με δεδομένα ζήτησης που βασίζονται σε πραγματικά στοιχεία προέλευσης – προορισμού. Η προσομοίωση χρησιμοποιεί το Luxembourg SUMO Traffic (LuST) Scenario [24][25], το οποίο είναι ένα ολοκληρωμένο project προσομοίωσης της κίνησης οχημάτων με δεδομένα για τις μετακινήσεις ΙΧ οχημάτων και αστικών λεωφορείων. Αξιοποιώντας δεδομένα εξόδου ακμής, δεδομένα εκπομπής ρύπων και ελεγκτές επαγωγικού βρόχου, αξιολογείται η επίδραση των προτύπων **ECO** και **MIX** στους χρόνους μετακίνησης και τις εκπομπές ρύπων αθροιστικά, αλλά και σε επίπεδο μιας μεμονωμένης κεντρικής οδού. Σημειώνεται ότι σε αυτό το σενάριο το πρότυπο **MIX** αντιστοιχεί στα πραγματικά δεδομένα του LuST, ενώ το πρότυπο **ECO** είναι αυτό που είχε προκύψει από την ομαδοποίηση Κ-μέσων.

3.3.4 Έλεγχος στατιστικής σημαντικότητας

Προκειμένου να αποδειχθεί ότι το eco-driving οδηγεί σε στατιστικά σημαντική μείωση των ρύπων, πραγματοποιούνται t-tests και U-tests στην RStudio. Οι έλεγχοι εστιάζουν στα πρότυπα **MIX** και **ECO**, τα οποία θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν τη πραγματική σύνθεση της κυκλοφορίας και την οικολογική οδήγηση αντίστοιχα, και περιλαμβάνουν όλους τους ρύπους που εξετάζονται στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας (CO₂, CO, PM_x και NO_x).

3.4 Εξαγωγή συμπερασμάτων

Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης των τριών σεναρίων, εξάγονται τα σχετικά συμπεράσματα. Πιο συγκεκριμένα, αξιολογείται η επίδραση των επιταχύνσεων και των επιβραδύνσεων στη κυκλοφοριακή ροή και στις εκπομπές των ρύπων. Σκοπός είναι να αποδειχθεί αν τα διάφορα πρότυπα οικολογική οδήγησης οδηγούν σε μείωση των ρύπων και υπό ποιες προϋποθέσεις συμβαίνει αυτό και, αντίστοιχα, αν η απότομη οδήγηση έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση ή την επιδείνωση των κυκλοφοριακών μεγεθών.

3.5 Εισαγωγή στο θεωρητικό υπόβαθρο

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει προσπάθεια να εξηγηθούν περιεκτικά και συνοπτικά όλα εκείνα τα θεωρητικά στοιχεία, στα οποία βασίζεται η ανάπτυξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αρχικά, επεξηγούνται οι τεχνικές ομαδοποίησης και πιο συγκεκριμένα η ομαδοποίηση K-μέσων. Έπειτα, παρατίθενται ορισμένα βασικά στοιχεία της κυκλοφοριακής ροής σε συνδυασμό με το πρότυπο ακολουθούντος οχήματος του Krauss και το προσομοιωτή μικροσκοπικού επιπέδου SUMO. Τέλος, γίνεται μια σύντομη αναφορά σε μοντέλα και βάσεις δεδομένων για τον υπολογισμό ρύπων, όπως αυτά χρησιμοποιήθηκαν στο στάδιο της ανάλυσης της διπλωματικής εργασίας.

3.6 Βασικά στοιχεία ομαδοποίησης

3.6.1 Ορισμός και στάδια της ομαδοποίησης

Ομαδοποίηση ή συσταδοποίηση (clustering) ονομάζεται η διαδικασία σύμφωνα με την οποία ένα σύνολο αντικειμένων διαχωρίζεται σε λογικές ομάδες ή συστάδες (clusters), όπου τα μέλη μιας ομάδας είναι παρόμοια μεταξύ τους σύμφωνα με ένα ή περισσότερα κοινά χαρακτηριστικά. Τα αντικείμενα που ανήκουν σε μια ομάδα είναι όμοια, ενώ αντίθετα τα αντικείμενα που ανήκουν σε διαφορετικές ομάδες είναι ανόμοια. Η τεχνική της ομαδοποίησης υπάγεται στη κατηγορία των μη επιβλεπόμενων τεχνικών μηχανικής μάθησης (unsupervised machine learning).

Παρακάτω δίνεται η μαθηματική έκφραση του προβλήματος της ομαδοποίησης:

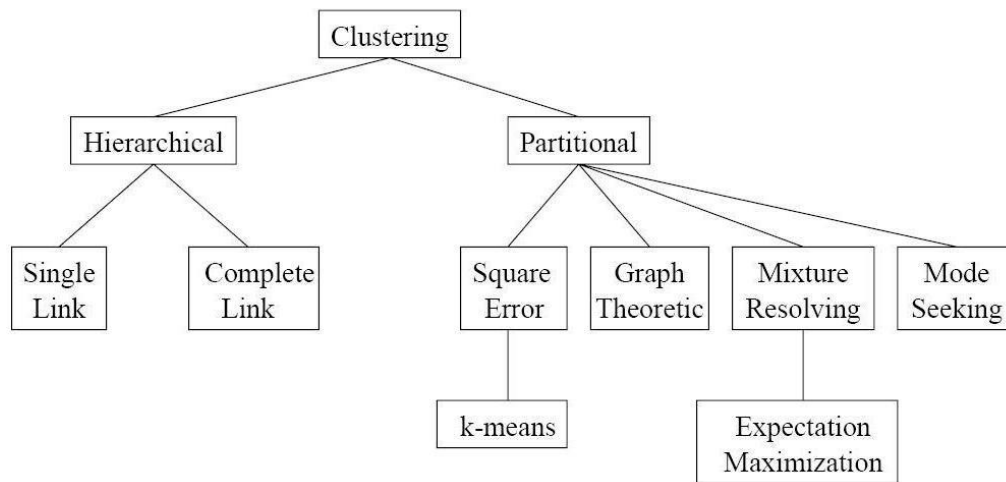
Δοθέντος ενός συνόλου δεδομένων $X = \{x_i \in \mathbb{R}^d, d = 1, 2, \dots \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ και ενός συνόλου ομάδων $C = \{c_j \mid j = 1, 2, \dots, m\}$, όπου $m > 1$ και $m > n$, κάθε x_i ταξινομείται ώστε να ανήκει σε κάποιο c_j . Σκοπός της ομαδοποίησης είναι να δημιουργηθούν ομάδες που περιέχουν ομοιογενή στοιχεία.

Η διαδικασία της ομαδοποίησης αποτελείται από πέντε βήματα:

- **Επιλογή χαρακτηριστικών γνωρισμάτων.** Επιλέγονται τα πιο βασικά γνωρίσματα του συνόλου δεδομένων στα οποία θα εφαρμοστεί η ομαδοποίηση. Τα στοιχεία αυτά πρέπει να αντιπροσωπεύουν σε ένα μεγάλο βαθμό ιδιότητες των δεδομένων που διαφοροποιούν τα δεδομένα μεταξύ τους.
- **Επιλογή ενός μέτρου γειννίαςσης.** Το μέτρο γειννίαςσης (proximity measure) αναφέρεται στην ομοιότητα δύο αντικειμένων (ή διανυσμάτων χαρακτηριστικών των αντικειμένων) και ορίζει την απόσταση μεταξύ δύο σημείων. Η πιο συνηθισμένη είναι η Ευκλείδεια συνάρτηση απόστασης (Euclidean distance), η οποία υπολογίζει τη τετραγωνική απόσταση μεταξύ δύο σημείων.
- **Επιλογή τεχνικής ομαδοποίησης δεδομένων.** Το στάδιο αυτό αποτελεί το κύριο μέρος της διαδικασίας ομαδοποίησης. Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι ομαδοποίησης, καθένας από τους οποίους μπορεί να έχει διαφορετικό αποτέλεσμα, επειδή στηρίζονται σε διαφορετικές

τεχνικές. Οι αλγόριθμοι αυτοί διακρίνονται σε ιεραρχικούς ή διαμεριστικούς, αυστηρούς ή ασαφείς και αυξητικούς ή μη αυξητικούς.

- **Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.** Στο στάδιο της αξιολόγησης ελέγχεται η εγκυρότητα των ομάδων. Πρακτικά εξετάζεται, αν οι ομάδες είναι αντιπροσωπευτικές σε σχέση με τα σημεία που έπρεπε να ομαδοποιηθούν και αν τα σημεία τοποθετήθηκαν στις ομάδες με τις οποίες παρουσιάζουν τα περισσότερα κοινά χαρακτηριστικά.
- **Ερμηνεία των αποτελεσμάτων.** Στο τελευταίο αυτό στάδιο εξάγεται η γνώση που προκύπτει από τα αποτελέσματα της ομαδοποίησης. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα μπορούν είτε να χρησιμοποιηθούν αυτούσια είτε να υποβληθούν σε περαιτέρω επεξεργασία.



Σχήμα 3.1: Ταξινόμηση των αλγορίθμων ομαδοποίησης σε ιεραρχικούς (hierarchical) και διαμεριστικούς (partitional). Πηγή: Jain et al.[29]

3.6.2 Ομαδοποίηση Κ-μέσων

Η ομαδοποίηση Κ-μέσων (k-means clustering) είναι μέθοδος κβαντοποίησης ενός συνόλου δεδομένων, η οποία χρησιμοποιείται πολύ συχνά σε ανάλυση συστάδων στην εξόρυξη δεδομένων και ανήκει στη κατηγορία των μη επιβλεπόμενων τεχνικών μάθησης. Ο στόχος της ομαδοποίησης Κ-μέσων είναι ο διαχωρισμός n παρατηρήσεων σε k ομάδες (clusters), έτσι ώστε κάθε παρατήρηση να ανήκει στην ομάδα με το κοντινότερο μέσο. Το μέσο αυτής της ομάδας θεωρείται ως το χαρακτηριστικό σημείο της, το οποίο ονομάζεται κεντροειδής (centroid), με αποτέλεσμα ο χώρος να διαμερίζεται σε κελιά Voronoi.

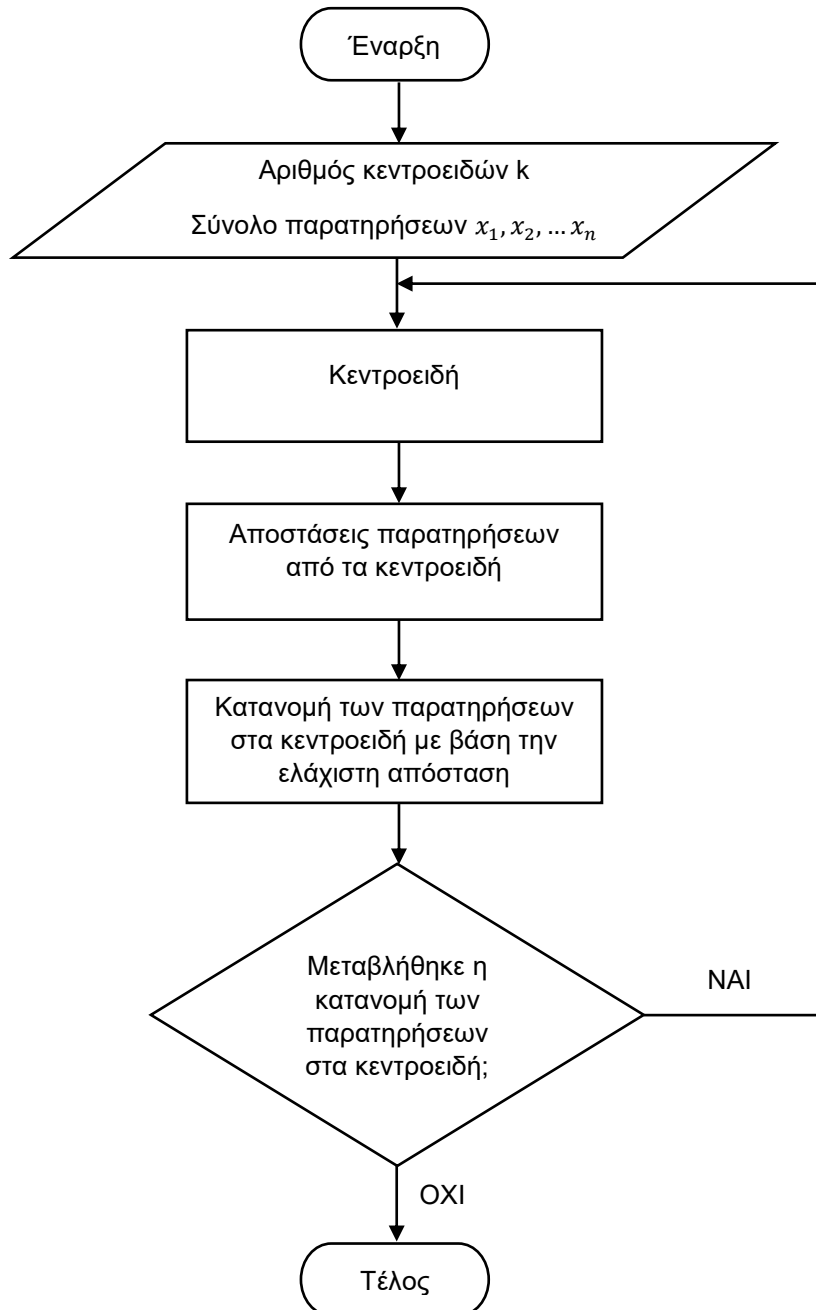
Η μαθηματική έκφραση της ομαδοποίησης Κ-μέσων δίνεται παρακάτω:

Δοθέντος ενός συνόλου παρατηρήσεων $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, όπου η κάθε παρατήρηση είναι ένα πραγματικό διάνυσμα d διαστάσεων, η ομαδοποίηση Κ-μέσων στοχεύει στο διαχωρισμό των n παρατηρήσεων σε k συστάδες $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$ με k κεντροειδή $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$, όπου $k < n$, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η συνάρτηση τετραγωνικού λάθους των παρατηρήσεων ως προς το κεντροειδές της συστάδας που αυτά τελικά ανήκουν, η οποία ορίζεται ως εξής:

$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \|x_i^{(j)} - c_j\|^2 \quad (3.1)$$

όπου $\|x_i^{(j)} - c_j\|^2$ είναι ένα μέτρο απόστασης που υπολογίζει την απόσταση κάθε στοιχείου $x_i^{(j)}$ από το κεντροειδές c_j της κάθε ομάδας.

3.6.3 Αλγόριθμος υλοποίησης K-μέσων του Lloyd



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ομαδοποίησης K-μέσων

Η ομαδοποίηση K-μέσων είναι μια σχετικά απλή διαδικασία, αρκεί να είναι ορισμένος εκ των προτέρων ο αριθμός K των ομάδων. Ο πιο συνηθισμένος αλγόριθμος υλοποίησης της ομαδοποίησης K-μέσων είναι ο αλγόριθμος του Lloyd (Lloyd's algorithm). Πρόκειται για μια επαναληπτική τεχνική βελτιστοποίησης που αποτελείται από δύο βήματα. Παρακάτω δίνεται η μαθηματική έκφραση του αλγορίθμου του Lloyd:

Δοθέντος ενός αρχικού συνόλου K-μέσων m_1, m_2, \dots, m_k , ο αλγόριθμος εκτελεί επαναληπτικά τα βήματα 1 και 2.

- **Βήμα 1 (Ανάθεση):** Ανάθεση κάθε στοιχείου των δεδομένων στο κοντινότερο κεντροειδές βάσει ελαχιστοποίησης της συνάρτησης τετραγωνικού λάθους. Εφόσον χρησιμοποιείται η Ευκλείδεια απόσταση, αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το κάθε στοιχείο συσχετίζεται με το κεντροειδές του οποίου η απόσταση από το στοιχείο είναι η μικρότερη σε σχέση με τα υπόλοιπα. Αυτό έχει ως συνέπεια το διαχωρισμό του χώρου σε τομείς που αντιπροσωπεύονται από ένα σημείο ή διάνυσμα (κεντροειδές), οπότε ουσιαστικά προκύπτει ένα διάγραμμα Voronoi.

$$S_i^{(t)} = \{x_p : \|x_p - m_i^{(t)}\|^2 \leq \|x_p - m_j^{(t)}\|^2 \forall j, 1 \leq j \leq k\}, \quad (3.2)$$

όπου κάθε x_p ανατίθεται σε μία ακριβώς ομάδα $S_i^{(t)}$, ακόμα και αν θεωρητικά θα μπορούσε να ανατεθεί σε δύο ή περισσότερες.

- **Βήμα 2 (Ενημέρωση):** Υπολογίζονται τα νέα κεντροειδή ως η μέση τιμή των παρατηρήσεων εντός της κάθε ομάδας.

$$m_i^{(t+1)} = \frac{1}{|S_i^{(t)}|} \sum_{x_j \in S_i^{(t)}} x_j \quad (3.3)$$

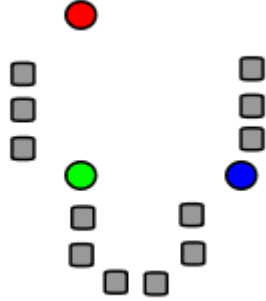
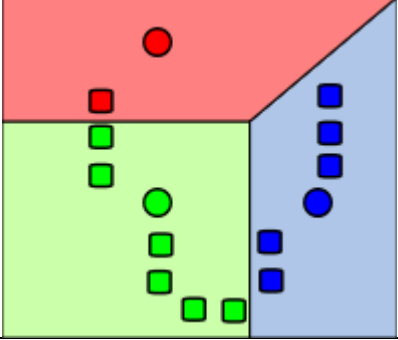
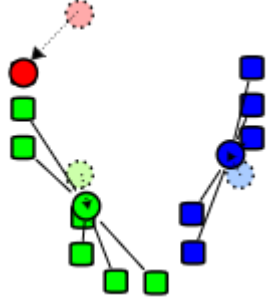
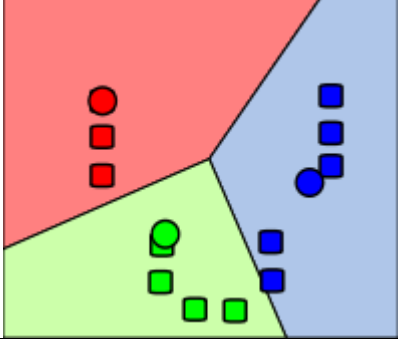
Η διαδικασία εύρεσης του νέου μέσου ελαχιστοποιεί και το άθροισμα των τετραγώνων των αποστάσεων μεταξύ των παρατηρήσεων κάθε ομάδας.

Με απλά λόγια η παραπάνω διαδικασία μπορεί να περιγραφεί ως εξής: Έστω ένα σύνολο n διανυσμάτων x_1, x_2, \dots, x_n ίδιων διαστάσεων και έστω ότι υπάρχουν k ομάδες με $k < n$. Αν m_i είναι το μέσο διάνυσμα της i ομάδας, τότε σε κάθε βήμα θα λέγεται ότι το στοιχείο x ανήκει στην ομάδα i εάν η Ευκλείδεια απόστασή του από το κεντροειδές της i ομάδας είναι μικρότερη σε σχέση με όλες τις άλλες αποστάσεις του από τα κεντροειδή των άλλων ομάδων. Με αυτό τον τρόπο βρίσκονται οι Ευκλείδειες αποστάσεις όλων των στοιχείων και καθένα από αυτά ανατίθεται στην ομάδα με την οποία η Ευκλείδεια απόσταση ελαχιστοποιείται. Έπειτα, υπολογίζονται τα νέα κεντροειδή και οι νέες Ευκλείδειες αποστάσεις όλων των στοιχείων από όλα τα νέα κεντροειδή. Τα στοιχεία μετακινούνται στις ομάδες με τις οποίες ελαχιστοποιούνται οι Ευκλείδειες αποστάσεις τους. Η διαδικασία τερματίζει όταν κανένα στοιχείο δεν μετακινείται (βλ. Σχήμα 3.3(δ)).

Ο αλγόριθμος συγκλίνει, όταν δεν μεταβληθεί η κατανομή των παρατηρήσεων στα κεντροειδή. Η παραπάνω διαδικασία δεν βρίσκει πάντα το ολικό ελάχιστο, αλλά συγκλίνει στο τοπικό ελάχιστο, αφού το αποτέλεσμα επηρεάζεται σε πολύ

μεγάλο βαθμό από τη θέση των αρχικών κεντροειδών. Καλύτερη θεωρείται η επιλογή των κεντροειδών έτσι ώστε να απέχουν μεταξύ τους όσο περισσότερο γίνεται. Συνιστάται, ωστόσο, η εκτέλεσή του πολλές φορές ώστε να μειωθούν οι πιθανότητες σύγκλισης σε τοπικό και όχι ολικό ελάχιστο.

3.6.4 Παράδειγμα ομαδοποίησης K-μέσων με τον αλγόριθμο του Lloyd

<p>1. Τα αρχικά K κεντροειδή ορίζονται τυχαία (εδώ K=3).</p>	
<p>2. Δημιουργούνται K ομάδες, στις οποίες ανατίθεται κάθε στοιχείο των δεδομένων ελαχιστοποιώντας την απόσταση μεταξύ στοιχείου και κεντροειδούς. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ενός διαγράμματος Voronoi.</p>	
<p>3. Υπολογίζονται τα νέα κεντροειδή ως η μέση τιμή των παρατηρήσεων εντός κάθε ομάδας ξεχωριστά.</p>	
<p>4. Τα βήματα 2 και 3 επαναλαμβάνονται μέχρι να επέλθει η σύγκλιση του αλγορίθμου, δηλαδή όταν κανένα στοιχείο δεν μετακινείται από τη μία ομάδα σε μία άλλη.</p>	

Σχήματα 3.3(α)-(δ): Παράδειγμα εξέλιξης της ομαδοποίησης K-μέσων με τρία κεντροειδή (K=3). Πηγή: Wikipedia [32]

3.6.5 Ευκλείδεια απόσταση

Η Ευκλείδεια μετρική είναι μια συνάρτηση $d: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ που υπολογίζει για δύο διανύσματα x, y του n – διάστατου διανυσματικού χώρου \mathbb{R}^n , $x = \{x_1, \dots, x_n\}$, $y = \{y_1, \dots, y_n\}$ την απόσταση:

$$d(x, y) = \sqrt{(y_1 - x_1)^2 + (y_2 - x_2)^2 + \dots + (y_n - x_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (3.4)$$

Η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιεί επανειλημμένα το Πυθαγόρειο θεώρημα για να μετρήσει την απόσταση δύο σημείων στον επίπεδο n – διάστατο χώρο.

Η θέση ενός σημείου σε έναν n – διάστατο διανυσματικό χώρο μπορεί να περιγραφεί από ένα διάνυσμα. Το μέτρο αυτού του διανύσματος μπορεί να περιγραφεί από την Ευκλείδεια απόσταση:

$$\|x\| = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2} = \sqrt{x \cdot x} \quad (3.5)$$

Αν, όμως, το σημείο ορίζεται σε σχέση με κάποιο άλλο σημείο του n – διάστατου διανυσματικού χώρου, τότε η διαφορά των δύο διανυσμάτων είναι προσανατολισμένη και μπορεί να περιγραφεί από ένα άλλο διάνυσμα:

$$y - x = (y_1 - x_1, y_2 - x_2, \dots, y_n - x_n) \quad (3.6)$$

Η απόσταση μεταξύ αυτών των δύο σημείων είναι ίση με την Ευκλείδεια απόσταση του παραπάνω διανύσματος, δηλαδή:

$$\|y - x\| = \sqrt{(y - x) \cdot (y - x)} \quad (3.7)$$

Η απόσταση αυτή ισούται με την απόσταση που προκύπτει από την Ευκλείδεια μετρική. Στις n – διαστάσεις η Ευκλείδεια απόσταση είναι:

$$d(y, x) = \sqrt{(y_1 - x_1)^2 + (y_2 - x_2)^2 + \dots + (y_i - x_i)^2 + \dots + (y_n - x_n)^2} \quad (3.8)$$

Για να προσδοθεί μεγαλύτερο βάρος στα στοιχεία που βρίσκονται μακριά από τα κεντροειδή, χρησιμοποιείται η τετραγωνική Ευκλείδεια απόσταση:

$$d^2(y, x) = (y_1 - x_1)^2 + (y_2 - x_2)^2 + \dots + (y_i - x_i)^2 + \dots + (y_n - x_n)^2 \quad (3.9)$$

3.6.6 Μειονεκτήματα ομαδοποίησης K-μέσων

Η ομαδοποίηση K-μέσων είναι μια διαδικασία η οποία εξ ορισμού μπορεί να δώσει διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με τα δεδομένα εισόδου (π.χ. τον αριθμό των ομάδων), τα οποία πολλές φορές προκύπτουν τυχαία. Ο σοβαρότερος περιορισμός του αλγορίθμου υλοποίησης είναι ότι συγκλίνει σε τοπικό ελάχιστο, το οποίο μπορεί και να μην συμπίπτει με το ολικό ελάχιστο.

Επιπλέον, το αποτέλεσμα που προκύπτει εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των κεντροειδών και την αρχική τους θέση, η οποία συνήθως επιλέγεται με τυχαίο τρόπο. Αν και υπάρχουν πολλοί τρόποι εκτίμησης του αριθμού K , ο αλγόριθμος δεν καταφέρνει να βρει από μόνος του το βέλτιστο αριθμό K των κεντροειδών. Συνεπώς, τα αποτελέσματα εξαρτώνται τις περισσότερες φορές από τη κρίση του μελετητή.

Ένας άλλος παράγοντας που παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα της ομαδοποίησης είναι το μέτρο της απόστασης που χρησιμοποιείται. Τις περισσότερες φορές χρειάζεται να γίνει κανονικοποίηση των στοιχείων του συνόλου δεδομένων, ώστε να εφαρμοστεί κάποια συνάρτηση τετραγωνικού λάθους. Αυτό συμβαίνει, γιατί, για παράδειγμα στην Ευκλείδεια απόσταση οι μεταβλητές μεγαλύτερης τάξης μεγέθους σε σχέση με κάποιες άλλες συμμετέχουν με μεγαλύτερη βαρύτητα στο αποτέλεσμα της ομαδοποίησης. Με άλλα λόγια, τα δεδομένα πρέπει να έχουν σφαιρικό σχηματισμό, συνήθως τιμές από 0 μέχρι 1, και όχι ελλειπτικό σχηματισμό, ο οποίος υποδηλώνει ανομοιομορφία των διαστάσεων του διανυσματικού χώρου ανάλογα με τη διεύθυνση του διανύσματος. Τέλος, ένα άλλο μειονέκτημα της ομαδοποίησης K -μέσων είναι ότι δημιουργεί ομάδες ίδιων περίπου διαστάσεων

3.6.7 Δείκτες εγκυρότητας της ομαδοποίησης K -μέσων

Οι τεχνικές αξιολόγησης της ομαδοποίησης έχουν ως πρωταρχικό στόχο να προσδιορίσουν τον βέλτιστο αριθμό ομάδων. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως δείκτες εγκυρότητας στην ομαδοποίηση K -μέσων, ακόμα και όταν ο ερευνητής έχει θέσει από μόνος του τον αριθμό K των ομάδων που επιθυμεί. Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθεί ο δείκτης Silhouette, ενώ ο δείκτης Davies-Bouldin παρατίθεται για λόγους πληρότητας του θεωρητικού υποβάθρου, παρόλο που δεν θα χρησιμοποιηθεί.

3.6.7.1 Δείκτης Silhouette

Δοθέντων των ομάδων $X_j (j = 1, \dots, c)$, αυτή η μέθοδος αποδίδει σε κάθε στοιχείο της ομάδας X_j την απόσταση Silhouette. Η απόσταση αυτή δίνεται για κάθε i στοιχείο της j ομάδας ως:

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (3.10)$$

όπου $a(i)$ είναι η μέση απόσταση μεταξύ του i στοιχείου και όλων των άλλων στοιχείων που περιέχονται στην ομάδα X_j και $b(i)$ είναι η ελάχιστη μέση απόσταση μεταξύ του i στοιχείου και όλων των άλλων στοιχείων που είναι ομαδοποιημένα στις ομάδες $X_k (k = 1, \dots, c; k \neq j)$. Αυτό σημαίνει ότι $-1 \leq s(i) \leq 1$.

Αν η απόσταση $s(i)$ προσεγγίζει το 1, τότε το στοιχείο είναι ομαδοποιημένο στη σωστή ομάδα. Αν προσεγγίζει το 0, τότε το στοιχείο θα μπορούσε να έχει ομαδοποιηθεί και στη γειτονική ομάδα από την οποία απέχει τη μικρότερη απόσταση. Αν προσεγγίζει το -1, τότε είναι ομαδοποιημένο σε λάθος ομάδα.

Συνεπώς, δοθείσας μιας ομάδας $X_j (j = 1, \dots, c)$, μπορεί να υπολογιστεί ο δείκτης Silhouette για το σύνολο της ομάδας, οποίος ορίζει και το πόσο καλά ορισμένη είναι η ομάδα:

$$S_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s(i) \quad (3.11)$$

όπου m είναι ο αριθμός των στοιχείων της ομάδας X_j . Επιπλέον, ως μέτρο της εγκυρότητας της ομαδοποίησης, είναι δυνατό να υπολογιστεί ένας καθολικός δείκτης Silhouette (Global Silhouette index) GS_u . Δοθείσας μιας ομαδοποίησης $U \leftrightarrow X: X_1 \cup \dots \cup X_i \cup \dots \cup X_c$, τότε:

$$GS_u = \frac{1}{c} \sum_{j=1}^c S_j \quad (3.12)$$

3.6.7.2 Δείκτης Davies-Bouldin

Ο δείκτης αυτός δείχνει αν οι ομάδες είναι συμπαγείς και καλά διαχωρισμένες. Η μαθηματική του έκφραση δίνεται παρακάτω:

$$DB(U) = \frac{1}{c} \sum_{i=1, i \neq j}^c \max \left(\frac{\Delta(X_i) + \Delta(X_j)}{\delta(X_i, X_j)} \right) \quad (3.13)$$

όπου $\delta(X_i, X_j)$ είναι η απόσταση μεταξύ των ομάδων X_i και X_j (intercluster distance), $\Delta(X_k)$ είναι η απόσταση μεταξύ των στοιχείων εντός μίας ομάδας (intracluster distance) και c είναι ο αριθμός των ομάδων της ομαδοποίησης U . Ο δείκτης Davies-Bouldin [34] παίρνει τιμές στο διάστημα $[0, \infty]$. Ο δείκτης υπολογίζεται διαδοχικά για διαφορετικό αριθμό k ομάδων, οπότε τελικά επιλέγεται ο αριθμός k που ελαχιστοποιεί το δείκτη Davies-Bouldin. Υπενθυμίζεται ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσιος για την αξιολόγηση της εγκυρότητας μίας ομαδοποίησης.

3.7 Διεργασίες επεξεργασίας των μεταβλητών

3.7.1 Κανονικοποίηση μεταβλητών

Πολλές φορές ορισμένες μεταβλητές μιας βάσης δεδομένων είναι πολύ μεγαλύτερης τάξης μεγέθους σε σχέση με άλλες μεταβλητές της ίδια βάσης δεδομένων. Προκειμένου η ομαδοποίηση Κ-μέσων να λάβει υπόψη όλες τις μεταβλητές με την ίδια βαρύτητα, προτείνεται να προηγηθεί κανονικοποίηση (normalization ή standardization ή feature scaling) των μεταβλητών πριν την ομαδοποίηση. Στη κανονικοποίηση η μέγιστη τιμή μιας μεταβλητής παίρνει τη τιμή 1, ενώ η ελάχιστη παίρνει τη τιμή 0. Οι ενδιάμεσες τιμές της μεταβλητής παίρνουν τιμές στο διάστημα $(0, 1)$, χωρίς να χάνουν τη μεταξύ τους σχέση που ορίζεται ως η απόσταση μιας τιμής από την επόμενη της ως ποσοστό της τυπικής απόκλισης. Η μαθηματική έκφραση της κανονικοποίησης για μια μεταβλητή X είναι:

$$X_{norm} = \frac{X - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \quad (3.14)$$

3.7.2 Ανάπτυξη στατιστικών προτύπων

Στο πέμπτο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πολλά από τα διαγράμματα που θα προκύψουν θα περιέχουν έναν μεγάλο αριθμό σημείων με τη μορφή «νέφους» σημείων. Για την καλύτερη απεικόνιση των εκάστοτε μεγεθών, τα σημεία αυτά θα αντικατασταθούν από ένα μοντέλο (ή πρότυπο) που περιγράφει την εξαρτημένη σχέση μεταξύ των παρατηρήσεων του άξονα x και του άξονα y . Πιο συγκεκριμένα, θα χρησιμοποιηθούν το γραμμικό, το εκθετικό και το πολυωνυμικό μοντέλο, των οποίων οι εξισώσεις, που προκύπτουν από μεθόδους ανάλυσης παλινδρόμησης, έχουν τις παρακάτω μαθηματικές μορφές:

Γραμμικό μοντέλο:

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \varepsilon_i \quad (3.15)$$

όπου X_i είναι οι εξαρτημένες μεταβλητές, β_i είναι οι συντελεστές παλινδρόμησης και ε_i είναι τα σφάλματα παλινδρόμησης.

Εκθετικό μοντέλο:

$$y = ae^{bx} \quad (3.16)$$

όπου X είναι η εξαρτημένη μεταβλητή και a, b είναι οι συντελεστές του εκθετικού μοντέλου.

Πολυωνυμικό μοντέλο:

$$y = \sum_{i=1}^{n+1} p_i X^{n+1-i} \quad (3.17)$$

όπου X είναι η εξαρτημένη μεταβλητή, n είναι ο βαθμός και p_i οι συντελεστές των όρων του πολυωνύμου.

3.7.3 Ο συντελεστής προσαρμογής R^2

Ο συντελεστής R^2 χρησιμοποιείται ως μέτρο καλής προσαρμογής των δεδομένων στο μοντέλο που έχει προκύψει από την ανάλυση παλινδρόμησης. Λαμβάνει τιμές από 0 μέχρι 1 και εκφράζει το ποσοστό της μεταβλητότητας της εξαρτημένης μεταβλητής y που μπορεί να εξηγηθεί από την ανεξάρτητη μεταβλητή X . Αν και γενικά ο συντελεστής R^2 χρησιμοποιείται συγκριτικά, εντούτοις μπορεί να χρησιμοποιηθεί με προσοχή και ως αυτούσιο κριτήριο, με ιδανικές τις τιμές κοντά στο 1. Η μαθηματική του έκφραση δίνεται παρακάτω:

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.18)$$

όπου \hat{y}_i είναι η εξαρτημένη τιμή που υπολογίζει το πρότυπο για κάποια τιμή x_i της ανεξάρτητης μεταβλητής.

3.8 Μαθηματικά πρότυπα κυκλοφοριακής ροής

3.8.1 Μακροσκοπικά χαρακτηριστικά κυκλοφοριακής ροής

Η κυκλοφοριακή ροή αφορά στη μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ των οδηγών (και των οχημάτων τους) με σκοπό την αποδοτική μετακίνηση ανθρώπων και αγαθών, που συνδέεται άμεσα με την ανάπτυξη ενός δικτύου που ανταποκρίνεται επαρκώς σε αυτές τις ανάγκες για μετακίνηση. Η θεωρία της κυκλοφοριακής ροής έχει ως βασικό στόχο να περιγράψει και να αναλύσει με μαθηματικό τρόπο τις σχέσεις μεταξύ των κυκλοφοριακών μεγεθών.

Η θεμελιώδης σχέση που συνδέει τα μακροσκοπικά μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής είναι:

$$q = k \cdot u_s \quad (3.19)$$

όπου q είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος, k είναι η πυκνότητα και u_s είναι η μέση ταχύτητα χώρου.

Η **πυκνότητα** k ορίζεται ως ο μέσος αριθμός των οχημάτων $N(T)$ που διασχίζουν οδικό τμήμα συνολικού μήκους L κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος T , προς το μήκος L και δίνεται από τη σχέση:

$$k = \frac{N(T)}{L} \quad (3.20)$$

Ως μονάδα μέτρησης της πυκνότητας χρησιμοποιούνται συνήθως τα οχήματα/χλμ.

Ο **κυκλοφοριακός φόρτος** q είναι ο αριθμός των οχημάτων $N(x)$ που περνούν από μια διατομή στη θέση x κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος T , προς το χρονικό διάστημα T και η μαθηματική του έκφραση είναι:

$$q = \frac{N(x)}{T} \quad (3.21)$$

Ο φόρτος μετριέται σε οχήματα/ώρα και η αναγωγή του στον αντίστοιχο αριθμό οχημάτων για μία ώρα δίνει το ρυθμό ροής.

Έστω ότι $N(T)$ οχήματα διανύουν ένα οδικό τμήμα μήκους L σε χρονικό διάστημα T . Αν t_j είναι ο χρόνος που χρειάζεται το όχημα $j \in N(T)$ για να διανύσει το εν λόγω τμήμα, τότε η **μέση ταχύτητα χώρου** u_s ορίζεται ως ο λόγος:

$$u_s = \frac{L}{\sum_{j=1}^{N(T)} \frac{t_j}{N(T)}} = \frac{N(T) \cdot L}{\sum_{j=1}^{N(T)} t_j} \quad (3.22)$$

Η μέση ταχύτητα χώρου μετρείται συνήθως σε χλμ/ώρα.

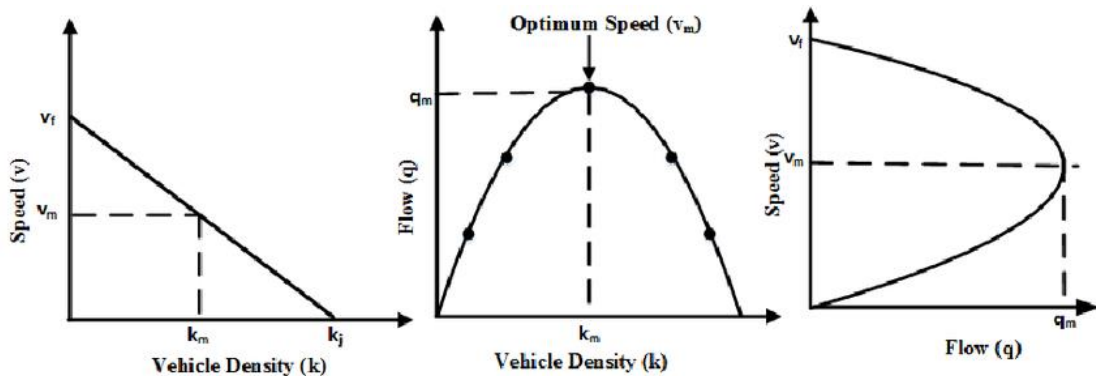
Ένα άλλο μέγεθος που χρησιμοποιείται συχνά στη περιγραφή των κυκλοφοριακών μεγεθών είναι η κατάληψη. Η **κατάληψη O** για ένα χρονικό διάστημα T είναι ίση με το άθροισμα του χρόνου κατά τον οποίο τα οχήματα καλύπτουν μια διατομή στη θέση x , προς το χρονικό διάστημα T . Αν L_i είναι το μήκος και u_i η ταχύτητα του οχήματος όταν περνάει από τη διατομή x , τότε η μαθηματική έκφραση της κατάληψης είναι:

$$O(x) = \frac{\sum_i^{N(x)} \frac{L_i}{u_i(x)}}{T} \quad (3.23)$$

Για τη μέτρηση της κατάληψης χρησιμοποιούνται συνήθως φωρατές και οι μετρήσεις δίνονται ως ποσοστό % του χρόνου.

3.8.2 Θεμελιώδη διαγράμματα κυκλοφοριακής ροής

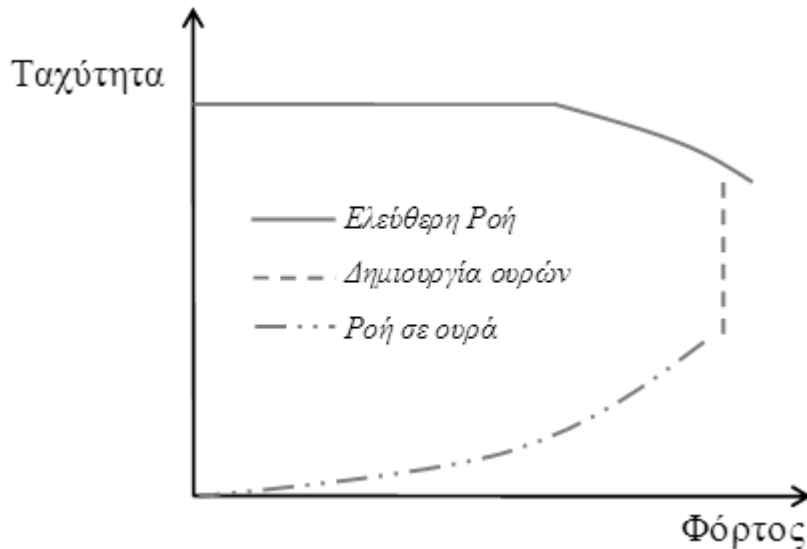
Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις και υποθέτοντας ότι η ταχύτητα χώρου και η πυκνότητα συνδέονται με γραμμική σχέση, ο Greenshields [35] δημιούργησε τις γραφικές παραστάσεις των μακροσκοπικών σχέσεων ταχύτητας – πυκνότητας, φόρτου – πυκνότητας και ταχύτητας-φόρτου, όπως αυτές απεικονίζονται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Τα θεμελιώδη διαγράμματα κυκλοφοριακής ροής κατά Greenshields. Πηγή: Zaidi et al. [38]

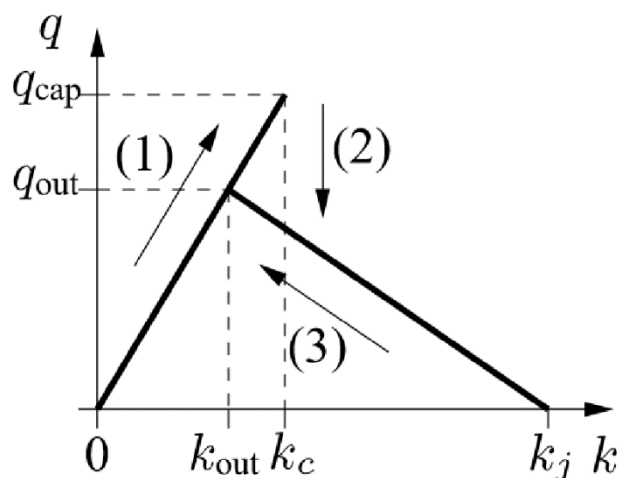
Η θεμελιώδης σχέση που συνδέει τα μακροσκοπικά μεγέθη αναφέρεται κατά βάση σε ομογενή και στάσιμη κυκλοφοριακή ροή. Ωστόσο, αυτές οι δύο συνθήκες δεν ισχύουν πάντα στη πραγματικότητα. Συνεπώς, έγιναν πολλές προσπάθειες ώστε να προσδιοριστεί η πραγματική συμπεριφορά της κυκλοφορίας και να προκύψουν πιο ρεαλιστικές, εμπειρικές σχέσεις μεταξύ των θεμελιωδών μακροσκοπικών χαρακτηριστικών.

Μια από τις πιο συνηθισμένες μορφές καμπύλης ταχύτητας – φόρτου είναι αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5. Αποτελείται από τρία τμήματα που αντιστοιχούν σε συνθήκες ελεύθερης ροής, δημιουργίας ουρών και κορεσμένης ροής.



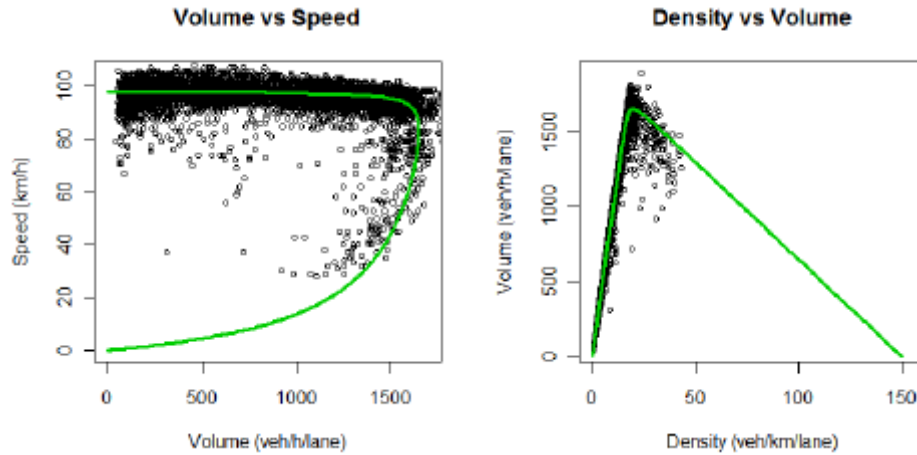
Σχήμα 3.5: Εμπειρική καμπύλη ταχύτητας – φόρτου. Πηγή: Φραντζεσκάκης [35]

Αντίστοιχα, η καμπύλη φόρτου-πυκνότητας που βασίζεται σε εμπειρικά δεδομένα μπορεί να πάρει πολλές μορφές. Μια από τις επικρατέστερες μορφές είναι αυτή που αποτελείται από δύο ευθείες, μία ευθεία που αντιστοιχεί στην ελεύθερη ροή (με χαμηλή πυκνότητα $k < k_c$) και μία που αντιστοιχεί στη κορεσμένη ροή (με υψηλή πυκνότητα $k > k_c$), και αποδίδεται στην έρευνα του Edie [39]. Βασικό χαρακτηριστικό αυτής της μορφής είναι αναπαράσταση του φαινομένου της κυκλοφοριακής υστέρησης, δηλαδή της απότομης πτώσης της κυκλοφοριακής ικανότητας για αύξηση της πυκνότητας πάνω από τη κρίσιμη τιμή της (k_c). Η μορφή της καμπύλης αυτής συνηθίζεται να περιγράφεται ως ένα «ανεστραμμένο λάμδα».



Σχήμα 3.6: Η τυπική μορφή της σχέσης φόρτου – πυκνότητας. Πηγή: Maerivoet et al.[36]

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι οι πραγματικές μετρήσεις μπορούν καλύτερα να χαρακτηριστούν ως ένα «νέφος» σημείων πάνω σε ένα διάγραμμα. Από αυτά τα σημεία, οι μελετητές μπορούν να δημιουργήσουν γραμμικά, εκθετικά ή πολυωνυμικά πρότυπα, τα οποία περιγράφουν με πιο σαφή και κατανοητό τρόπο τις σχέσεις μεταξύ των θεμελιωδών μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής.



Σχήμα 3.7: Παραδείγματα εφαρμογής καμπύλης σε δεδομένα που σχηματίζουν «νέφος» μετρήσεων. Πηγή: Rompis et al. [40]

3.8.3 Μικροσκοπικά πρότυπα ακολουθούντος οχήματος

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες παραγράφους, όπου η κυκλοφοριακή ροή αντιμετωπίζεται ως σύνολο, δηλαδή μακροσκοπικά, μια άλλη προσέγγιση είναι η περιγραφή της κίνησης του κάθε οχήματος ξεχωριστά. Τα πρότυπα που περιγράφουν τη θέση, τη ταχύτητα και την επιτάχυνση του κάθε οχήματος συναρτήσει του χρόνου χαρακτηρίζονται ως μικροσκοπικά πρότυπα. Τα πρότυπα αυτά βασίζονται στην ανανέωση των κυκλοφοριακών μεγεθών με κάποια συχνότητα, ανάλογα με τη κατάσταση των γειτονικών οχημάτων, και μπορούν να είναι συνεχή σε χώρο και χρόνο (π.χ. τα πρότυπα ακολουθούντος οχήματος), διακριτά σε χρόνο αλλά συνεχή σε χώρο (π.χ. πρότυπα προσομοίωσης) ή διακριτά σε χρόνο και χώρο (π.χ. cellular automaton).

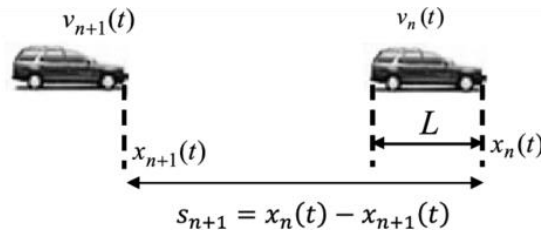
Τα πρότυπα ακολουθούντος οχήματος βασίζονται στη παραδοχή της συνέχειας της κυκλοφοριακής ροής στο χρόνο και στο χώρο. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μια σχέση που συνδέει τη κίνηση του ακολουθούντος οχήματος σε σχέση με το προπορευόμενο. Ο οδηγός του ακολουθούντος οχήματος ανταποκρίνεται στις αλλαγές της συμπεριφοράς του προπορευόμενου οχήματος επιταχύνοντας ή επιβραδύνοντας. Το μέγεθος αυτής της επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης εξαρτάται αφενός, από το μέγεθος της αλλαγής (ή ερέθισμα) στο προπορευόμενο όχημα και αφετέρου από την ευαισθησία (ή αντίδραση) του οδηγού του ακολουθούντος οχήματος στις αλλαγές. Συνεπώς, τα μαθηματικά πρότυπα αυτής της κατηγορίας αποτελούν παραλλαγές του παρακάτω τύπου:

$$\ddot{x}_{n+1}(t + \Delta t) = \lambda[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (3.24)$$

όπου ο παράγοντας λ είναι η ευαισθησία του προτύπου και ορίζεται ως:

$$\lambda = a \frac{\ddot{x}_{n+1}^m(t + \Delta t)}{[x_n(t) - x_{n+a}(t)]^l} \quad (3.25)$$

όπου a είναι η σταθερά ευαισθησίας, m η παράμετρος ευαισθησίας του προτύπου ως προς τη ταχύτητα του προπορευόμενου οχήματος και l η παράμετρος που ελέγχει την ευαισθησία του προτύπου ως προς την απόσταση του οχήματος $n + 1$ από το προπορευόμενο όχημα n .



Σχήμα 3.8: Συμβολισμοί στα πρότυπα ακολουθούντος οχήματος. Πηγή: Boubaker et al.[41]

Υπενθυμίζεται ότι:

n	προπορευόμενο όχημα
$n + 1$	όχημα που ακολουθεί
x_{n+1}	θέση του οχήματος που ακολουθεί
x_n	θέση προπορευόμενου οχήματος
$v_{n+1}(t) = \dot{x}_{n+1}(t)$	ταχύτητα του οχήματος που ακολουθεί
$v_n(t) = \dot{x}_n(t)$	ταχύτητα του προπορευόμενου οχήματος
$\ddot{x}_{n+1}(t + \Delta t)$	επιτάχυνση του οχήματος που ακολουθεί
L	μήκος του προπορευόμενου οχήματος

Κατά καιρούς πολλοί ερευνητές πρότειναν πρότυπα ακολουθούντος οχήματος, όπως οι Pipers (1953), Chandler et al. (1958), Forbes (1963), Gazis et al. (1959, 1961), Herman et al. (1959) και Gipps (1981). Η παρούσα διπλωματική εργασία βασίστηκε στο μοντέλο ακολουθούντος οχήματος του Krauss (1998).

3.8.4 Πρότυπο ακολουθούντος οχήματος του Krauss

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε από τον Krauss το 1998 [42] είναι ένα μικροσκοπικό, συνεχές στο χώρο και στο χρόνο πρότυπο ακολουθούντος οχήματος που βασίζεται στη διατήρηση μιας ασφαλούς ταχύτητας και στην αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ των οχημάτων. Αυτό σημαίνει ότι ο οδηγός του οχήματος που ακολουθεί προσπαθεί να διατηρήσει μια ασφαλή ταχύτητα και απόσταση από το προπορευόμενο όχημα, τέτοια ώστε να έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζει τη ταχύτητα του οχήματός του όποτε το προπορευόμενο όχημα επιβραδύνει. Στο πρότυπο είναι δυνατή η αλλαγή του προεπιλεγμένου χρόνου αντίδρασης του οδηγού, ωστόσο συνιστάται χρόνος αντίδρασης ενός δευτερολέπτου.

Το πρότυπο χρησιμοποιεί τις παραμέτρους που παρατίθενται παρακάτω:

a	μέγιστη επιτάχυνση του οχήματος σε m/s^2
b	μέγιστη επιβράδυνση του οχήματος σε m/s^2
v_{max}	μέγιστη ταχύτητα του οχήματος σε m/s
l	μήκος του οχήματος σε m
ε	ατέλεια του οδηγού στη διατήρηση της επιθυμητής ταχύτητας v_{des} , τιμές στο διάστημα $[0,1]$

Η ασφαλής ταχύτητα υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη παρακάτω σχέση:

$$v_{safe}(t) = v_l(t) + \frac{g(t) - v_l(t)\tau}{\frac{\bar{v}}{b(\bar{v})} + \tau} \quad (3.26)$$

όπου $v_l(t)$ είναι η ταχύτητα του προπορευόμενου οχήματος τη χρονική στιγμή t , $g(t)$ είναι το χρονικό κενό μεταξύ του προπορευόμενου και του ακολουθούντος οχήματος της χρονική στιγμή t και τ είναι ο χρόνος αντίδρασης του οδηγού (συνήθως 1 s).

Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις η v_{safe} μπορεί να είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα της οδού ή μεγαλύτερη από τη ταχύτητα που μπορεί να επιτύχει το όχημα στο αμέσως επόμενο βήμα προσομοίωσης, λόγω περιορισμών που αφορούν τη μέγιστη επιτάχυνση του οχήματος. Για το λόγο αυτό υπολογίζεται η «επιθυμητή» ταχύτητα:

$$v_{des}(t) = \min\{v_{safe}(t), v(t-1) + a, v_{max}\} \quad (3.27)$$

Υποθέτοντας ότι ο οδηγός δεν μπορεί να προσαρμόσει τη ταχύτητα του οχήματός του ακριβώς στη v_{des} , από αυτή τη ταχύτητα αφαιρείται το γινόμενο της ατέλειας του οδηγού επί τη μέγιστη επιτάχυνση του. Επιπλέον, πρέπει να διασφαλιστεί ότι το όχημα δεν κινείται προς τα πίσω. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, προκύπτει τελικά η σχέση:

$$v(t) = \max\{0, rand[v_{des}(t) - \varepsilon a, v_{des}(t)]\} \quad (3.28)$$

Σημειώνεται ότι η συνάρτηση $rand[v_{des}(t) - \varepsilon a, v_{des}(t)]$ επιλέγει ένα τυχαίο αριθμό μεταξύ των δύο ορίων του παραπάνω διαστήματος.

3.9 Ο μικροσκοπικός προσομοιωτής SUMO

3.9.1 Εισαγωγικά στοιχεία για το προσομοιωτή

Το SUMO είναι ένα ακρωνύμιο που προέρχεται από τις λέξεις “Simulation of Urban MObility” [44]. Πρόκειται για έναν μικροσκοπικό, συνεχή στο χώρο και διακριτό στο χρόνο προσομοιωτή κυκλοφορίας οχημάτων που βρίσκεται σε ανάπτυξη από το DLR (Deutsches Luft-und Raumfahrt Zentrum, German Aerospace Center) σε συνεργασία με άλλα εκπαιδευτικά ιδρύματα από το 2001 και μετά. Το SUMO είναι ένα λογισμικό ανοικτού κώδικα, που διατίθεται δωρεάν υπό την άδεια GNU General Public License.

Ο προσομοιωτής επιτρέπει τη δημιουργία και εκτέλεση ενός μεγάλου εύρους σεναρίων διαχείρισης της κυκλοφορίας. Αρχικά, η ομάδα ανάπτυξης του προγράμματος είχε ως στόχο να δημιουργήσει ένα δωρεάν εργαλείο για την εφαρμογή αλγορίθμων σχετικών με τη κυκλοφορία οχημάτων. Ωστόσο, σε βάθος χρόνου το λογισμικό κέρδισε την υποστήριξη περισσότερων φορέων, με αποτέλεσμα να εξελιχθεί σε ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον προσομοίωσης, που περιλαμβάνει ολοκληρωμένες λύσεις για τη δημιουργία δικτύων σε γραφικό περιβάλλον (NETEDIT), για την εισαγωγή δικτύων από ηλεκτρονικούς χάρτες, όπως π.χ. OpenStreetMaps (NETCONVERT), για τον υπολογισμό της βέλτιστης διαδρομής (DUAROUTER), για τη γένεση μετακινήσεων συναρτήσει των σημείων ενδιαφέροντος (ACTIVITYGEN), για τον υπολογισμό των ρύπων (EMISSIONSMAP) κλπ. Επιπλέον, είναι δυνατή η παρέμβαση στη προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο μέσω του περιβάλλοντος TraCI, χρησιμοποιώντας γλώσσες προγραμματισμού όπως οι Python, Java, C++ κ.α.

Στο μικροσκοπικό προσομοιωτή SUMO καθεμία λωρίδα (lane) έχει μία μοναδική «ταυτότητα», δηλαδή έναν μοναδικό αριθμό, ο οποίος αποτελείται από δύο μέρη: πρώτο από τον αριθμό της ακμής (edge) που βρίσκεται αυτή η λωρίδα και δεύτερο από τον αριθμό της λωρίδας εντός της συγκεκριμένης ακμής (0, 1, 2 κλπ.). Η θέση του κάθε οχήματος περιγράφεται από τη λωρίδα στην οποία βρίσκεται το όχημα και από την απόστασή του από την αρχή της λωρίδας. Χρησιμοποιώντας το πρότυπο ακολουθούτος οχήματος του Krauss, που έχει περιγραφεί στην προηγούμενη ενότητα, η θέση του οχήματος ανανεώνεται με συχνότητα ενός δευτερολέπτου, γεγονός που σημαίνει ότι στη παρούσα θέση του οχήματος προστίθεται η ταχύτητα, ώστε να βρεθεί η θέση του στο αμέσως επόμενο βήμα της προσομοίωσης.

Βέβαια, το γεγονός ότι το SUMO στηρίχθηκε στο πρότυπο του Krauss δεν σημαίνει ότι δεν μπορεί να λειτουργήσει και με άλλα πρότυπα ακολουθούτος οχήματος. Μεταξύ αυτών των μοντέλων περιλαμβάνεται το πρότυπο του Wiedemann, το μοντέλο τριών φάσεων του Kerner, το μοντέλο IDM (intelligent driver model) κ.α. Επιπρόσθετα, το γεγονός ότι το SUMO είναι λογισμικό ανοικτού κώδικα σημαίνει ότι ο κάθε ερευνητής που έχει τις απαραίτητες γνώσεις μπορεί να εφαρμόσει ακόμη και ένα δικό του πρότυπο.

Όπως γίνεται σαφές από τις παραπάνω παραγράφους, ο μικροσκοπικός προσομοιωτής SUMO έχει πολύ ισχυρά πλεονεκτήματα. Το σημαντικότερο από αυτά είναι ότι πρόκειται για έναν δωρεάν προσομοιωτή, ο οποίος είναι σχετικά απλός και κατανοητός στη χρήση του για κάποιον ερευνητή που θέλει να εφαρμόσει μια απλή προσομοίωση της κυκλοφοριακής ροής. Ωστόσο, αυτό δεν σημαίνει ότι περιορίζει το χρήστη στο να εφαρμόσει τις δικές του ιδέες. Μέσα από το περιβάλλον TraCI μπορούν να κωδικοποιηθούν νέες εφαρμογές που έχουν να κάνουν με τις τελευταίες εξελίξεις στο τομέα των μεταφορών, όπως για παράδειγμα τα αυτόνομα οχήματα.

Στις επόμενες υποενότητες του παρόντος κεφαλαίου θα παρατεθούν λίγες πληροφορίες σχετικά με τους μετρητές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν εντός της εφαρμογής. Έπειτα, θα γίνει μια σύντομη εισαγωγή στο πρότυπο ρύπων που χρησιμοποιεί το SUMO.

3.9.1.1 Induction loops detector (ελεγκτής επαγωγικού βρόχου)

Ένας ελεγκτής επαγωγικού βρόχου (ή φωρατής) εντός της εφαρμογής είναι μια εικονική συσκευή, η οποία πραγματοποιεί σημειακές μετρήσεις σε μια λωρίδα (lane).

Χαρακτηριστικά εισόδου	
Όνομα χαρακτηριστικού	Περιγραφή
id	Η ονομασία του ελεγκτή
lane	Η «ταυτότητα» της λωρίδας που θα τοποθετηθεί ο ελεγκτής
pos	Η θέση του ελεγκτή στη λωρίδα σε m
freq	Η περίοδος (βήμα) άθροισης των δεδομένων από τον ελεγκτή σε s
file	Το όνομα του αρχείου εξόδου
vTypes	Τα είδη των οχημάτων για τα οποία θα γίνει η συλλογή δεδομένων

Χαρακτηριστικά εξόδου	
Όνομα χαρακτηριστικού	Περιγραφή
begin	Η χρονική στιγμή που ξεκινά η λειτουργία του ελεγκτή σε s
end	Η χρονική στιγμή που σταματά η λειτουργία του ελεγκτή σε s
id	Η ονομασία του ελεγκτή
nVehContrib	Ο αριθμός των οχημάτων που πέρασαν από τον ελεγκτή
flow	Ο αριθμός nVehContrib ανηγμένος σε οχήματα/ώρα
occupancy	Το ποσοστό % του χρόνου που ο ελεγκτής ήταν κατειλημμένος (κατάληψη)
speed	Η μέση ταχύτητα των οχημάτων που διέρχονται από τον ελεγκτή σε m/s
length	Το μέσο μήκος των οχημάτων που διέρχονται από τον ελεγκτή σε m
nVehEntered	Ο αριθμός των οχημάτων που βρέθηκαν στον ελεγκτή, έστω και μερικώς

Πίνακες 3.1(α)-(β): Μεταβλητές εισόδου και εξόδου ελεγκτή επαγωγικού βρόχου

3.9.1.2 Edge-based traffic measures (δεδομένα εξόδου ακμής)

Τα δεδομένα εξόδου ακμής εγγράφονται σε ένα αρχείο εξόδου, εφόσον ο χρήστης έχει πρώτα ορίσει ότι θέλει να λάβει αυτά τα δεδομένα. Πρόκειται κυρίως για μετρήσεις μακροσκοπικών μεγεθών, όπως είναι η μέση ταχύτητα, η μέση πυκνότητα κ.α. που δίνονται αθροιστικά για κάθε βήμα εξόδου (π.χ. 0-3600s, 3600-7200s κλπ.).

Χαρακτηριστικά εισόδου	
Όνομα χαρακτηριστικού	Περιγραφή
id	Η ονομασία του σετ μετρήσεων
file	Το όνομα του αρχείου εξόδου

freq	Η περίοδος (βήμα) άθροισης των δεδομένων του σετ μετρήσεων σε s, που ορίζει το βήμα άθροισης των δεδομένων εξόδου
begin	Η χρονική στιγμή που ξεκινά η εγγραφή του αρχείου εξόδου σε s
end	Η χρονική στιγμή που σταματά η εγγραφή του αρχείου εξόδου σε s
vTypes	Τα είδη των οχημάτων για τα οποία θα γίνει η συλλογή δεδομένων

Χαρακτηριστικά εξόδου	
Όνομα χαρακτηριστικού	Περιγραφή
begin	Η χρονική στιγμή που ξεκινά το βήμα εγγραφής δεδομένων σε s
end	Η χρονική στιγμή που τελειώνει το βήμα εγγραφής δεδομένων σε s
edge@id	Η ονομασία της ακμής
sampledSeconds	Το άθροισμα της χρονικής διάρκειας που κάποιο όχημα βρίσκεται πάνω στην ακμή σε s
travelTime	Ο μέσος χρόνος που χρειάζεται ένα όχημα για να διανύσει την ακμή σε s
density	Η πυκνότητα των οχημάτων στην ακμή σε veh/km
occupancy	Το ποσοστό % του χρόνου που η ακμή ήταν κατειλημμένη (κατάληψη)
waitingTime	Ο συνολικός χρόνος που τα οχήματα ήταν σταματημένα σε s, δηλαδή είχαν ταχύτητα μικρότερη από 0.1 m/s
speed	Η μέση ταχύτητα των οχημάτων στο βήμα εξόδου σε m/s
entered	Ο αριθμός των οχημάτων που εισήλθαν στην ακμή
left	Ο αριθμός των οχημάτων που ολοκλήρωσαν τη διαδρομή τους στην ακμή

Πίνακες 3.2(α)-(β): Μεταβλητές εισόδου και εξόδου δεδομένων εξόδου ακμής

3.9.1.3 Edge-based emission output (δεδομένα εκπομπής ρύπων)

Εάν ο χρήστης του SUMO επιθυμεί να ερευνήσει τις εκπομπές ρύπων από οχήματα, τότε μπορεί να δημιουργήσει ένα αρχείο εξόδου για δεδομένα ρύπων ανά ακμή. Τα δεδομένα αυτά δίνονται και αθροιστικά (abs) και κανονικοποιημένα (normed), δηλαδή εκπομπές ρύπων ανά βήμα εγγραφής και ανά μήκος ακμής.

Χαρακτηριστικά εισόδου	
Όνομα χαρακτηριστικού	Περιγραφή
id	Η ονομασία του σετ μετρήσεων
file	Το όνομα του αρχείου εξόδου
freq	Η περίοδος (βήμα) άθροισης των δεδομένων του σετ μετρήσεων σε s, που ορίζει το βήμα άθροισης των δεδομένων εξόδου
begin	Η χρονική στιγμή που ξεκινά η εγγραφή του αρχείου εξόδου σε s
end	Η χρονική στιγμή που σταματά η εγγραφή του αρχείου εξόδου σε s
vTypes	Τα είδη των οχημάτων για τα οποία θα γίνει η συλλογή δεδομένων

Χαρακτηριστικά εξόδου	
Όνομα χαρακτηριστικού	Περιγραφή
begin	Η χρονική στιγμή που ξεκινά το βήμα εγγραφής δεδομένων σε s
end	Η χρονική στιγμή που τελειώνει το βήμα εγγραφής δεδομένων σε s
edge@id	Η ονομασία της ακμής
samplesSeconds	Το άθροισμα της χρονικής διάρκειας που κάποιο όχημα βρίσκεται πάνω στην ακμή σε s
traveltime	Ο μέσος χρόνος που χρειάζεται ένα όχημα για να διανύσει την ακμή σε s
CO_abs	Το άθροισμα του CO για κάθε βήμα εξόδου σε mg
CO2_abs	Το άθροισμα του CO ₂ για κάθε βήμα εξόδου σε mg
HC_abs	Το άθροισμα του HC για κάθε βήμα εξόδου σε mg
PMx_abs	Το άθροισμα του PM _x για κάθε βήμα εξόδου σε mg
NOx_abs	Το άθροισμα του NO _x για κάθε βήμα εξόδου σε mg
fuel_abs	Η συνολική κατανάλωση καυσίμου για κάθε βήμα εξόδου σε ml
CO_normed	Οι εκπομπές CO ανά χιλιόμετρο και ανά ώρα σε g/km/h
CO2_normed	Οι εκπομπές CO ₂ ανά χιλιόμετρο και ανά ώρα σε g/km/h
HC_normed	Οι εκπομπές HC ανά χιλιόμετρο και ανά ώρα σε g/km/h
PMx_normed	Οι εκπομπές PM _x ανά χιλιόμετρο και ανά ώρα σε g/km/h
NOx_normed	Οι εκπομπές NO _x ανά χιλιόμετρο και ανά ώρα σε g/km/h
fuel_normed	Η κατανάλωση καυσίμου ανά χιλιόμετρο και ανά ώρα σε l/km/h
CO_perVeh	Οι εκπομπές CO ανά όχημα σε κάθε βήμα εξόδου σε mg
CO2_perVeh	Οι εκπομπές CO ₂ ανά όχημα σε κάθε βήμα εξόδου σε mg
HC_perVeh	Οι εκπομπές HC ανά όχημα σε κάθε βήμα εξόδου σε mg
PMx_perVeh	Οι εκπομπές PM _x ανά όχημα σε κάθε βήμα εξόδου σε mg
NOx_perVeh	Οι εκπομπές NO _x ανά όχημα σε κάθε βήμα εξόδου σε mg
fuel_perVeh	Η κατανάλωση καυσίμου ανά όχημα σε κάθε βήμα εξόδου σε ml

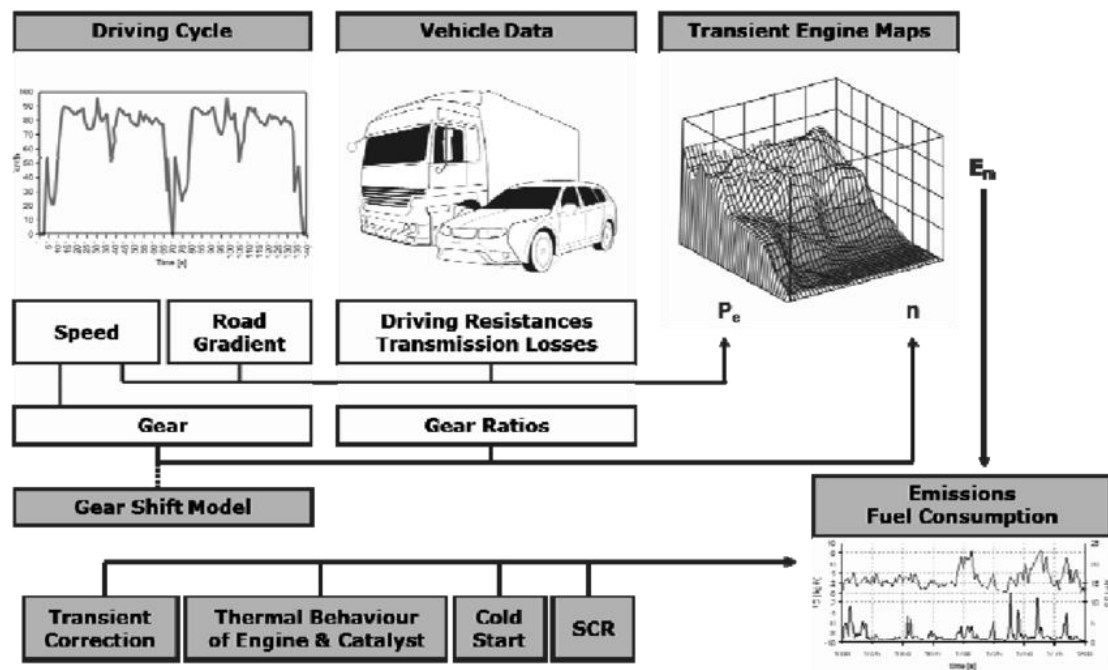
Πίνακες 3.3(α)-(β): Μεταβλητές εισόδου και εξόδου δεδομένων εκπομπής ρύπων

Εκτός των παραπάνω, υπάρχει και η δυνατότητα υπολογισμού της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός που σημαίνει ότι το SUMO μπορεί να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά και για τη προσομοίωση ηλεκτρικών αυτόνομων οχημάτων.

3.9.2 Μοντέλο ρύπων PHEM

Ο προσομοιωτής διαθέτει πολλούς τρόπους για την εκτίμηση των ρύπων που εκλύονται από τα οχήματα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Συνήθως, η εκτίμηση των ρύπων βασίζεται σε πειραματικά δεδομένα, τα οποία βρίσκονται αποθηκευμένα σε μεγάλες βάσεις δεδομένων, συχνά με πολύ υψηλή ανάλυση όσον αφορά το είδος του οχήματος, τη κλίση της οδού, την οδήγηση σε αστικό ή υπεραστικό οδικό δίκτυο, τη ταχύτητα και την επιτάχυνση του οχήματος κ.α. Πιο συγκεκριμένα, το SUMO μπορεί να αξιοποιήσει δεδομένα από τις βάσεις δεδομένων HBEFA 2.1 και HBEFA 3.1 (The European Handbook of Emission Factors for Road Transport), καθώς και το μοντέλο PHEM (Passenger car & Heavy-duty Emission Model).

Στη παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο PHEM, καθώς είναι αυτό που προσφέρεται για ανάλυση ρύπων σε μικροσκοπικό επίπεδο, ακόμα και σε επίπεδο μίας οδού [46]. Το PHEM αναπτύχθηκε από το TU Graz στην Αυστρία και είναι ένα μοντέλο ρύπων με περίοδο ανανέωσης 1 δευτερολέπτου, το οποίο μπορεί να προσομοιώσει τη κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων NO_x, HC, PM_x, CO, CO₂ και HC για οχήματα τεχνολογίας Euro 0 έως Euro 5 και για όλους τους τύπους καυσίμων (αμόλυβδη βενζίνη, πετρέλαιο, φυσικό αέριο και βιοαέριο). Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε πειραματικά σχεδιαγράμματα που συσχετίζουν την απαιτούμενη ισχύ της μηχανής με τους ρύπους και αποτελούν μέρος των βάσεων δεδομένων HBEFA 3.



Σχήμα 3.9: Η αρχιτεκτονική του μοντέλου ρύπων PHEM. Πηγή: TU Graz [46]

Το μοντέλο PHEM υπολογίζει την απαιτούμενη ισχύ του κινητήρα συναρτήσει της ταχύτητας κίνησης του οχήματος, της κλίσης της οδού, των αντιστάσεων στη κίνηση του οχήματος και των απωλειών στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης από το κινητήρα στους τροχούς. Η απαιτούμενη ισχύς του κινητήρα, δηλαδή, είναι το άθροισμα των παρακάτω παραγόντων:

$$P_e = P_R + P_L + P_A + P_S + P_{Transmission} + P_{Auxiliaries} \quad (3.29)$$

όπου P_e είναι η απαιτούμενη ισχύς του κινητήρα, P_R είναι η απαραίτητη ισχύς για την αντιμετώπιση της αντίστασης κύλισης, P_L είναι η απαραίτητη ισχύς για την αντιμετώπιση της αντίστασης του αέρα, P_A είναι η απαραίτητη ισχύς για την επιτάχυνση του οχήματος, P_S είναι η ισχύς λόγω κλίσης της οδού, $P_{Transmission}$ είναι η απώλεια ισχύος στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης και, τέλος, $P_{Auxiliaries}$ είναι διάφορες άλλες απώλειες ισχύος.

Η παράμετρος που αφορά άμεσα αυτή τη διπλωματική εργασία είναι η απαραίτητη ισχύς για την επιτάχυνση του οχήματος. Αυτή δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$P_A = (m_{Vehicle} + m_{Rot} + m_{Load}) \cdot a \cdot v \quad (3.30)$$

όπου a είναι η επιτάχυνση του οχήματος σε m/s^2 και $m_{Vehicle} + m_{Rot} + m_{Load}$ η συνολική μάζα του οχήματος σε kg .

Περισσότερες λεπτομέρειες περιέχονται στην αναλυτική έκθεση του TU Graz [46].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4
ΣΥΛΛΟΓΗ & ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ
ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1 Εισαγωγή στη συλλογή και στην επεξεργασία των δεδομένων

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στη διπλωματική εργασία. Αρχικά, γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στη συλλογή δεδομένων με έξυπνα κινητά τηλέφωνα (smartphones). Έπειτα, περιγράφεται συνοπτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην επεξεργασία της βάσης δεδομένων, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο κεφάλαιο της ανάλυσης για την εξαγωγή των σχετικών συμπερασμάτων, και οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στην ομαδοποίηση Κ-μέσων.

4.2 Συλλογή δεδομένων

4.2.1 Η καινοτομία συλλογής δεδομένων με smartphone

Όλα τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για την εξαγωγή των προτύπων επιτάχυνσης των οχημάτων προέρχονται από δεδομένα φυσικής οδήγησης που συλλέχθηκαν από τα κινητά τηλέφωνα των οδηγών μέσω της εφαρμογής OSeven Telematics. Πρόκειται για μια καινοτομία που μόλις πρόσφατα άρχισε να χρησιμοποιείται σε επίπεδο έρευνας και η οποία κατέστη δυνατή χάρη στις τελευταίες εξελίξεις της κινητής τηλεφωνίας. Αυτή η τεχνολογία έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να λειτουργεί χωρίς να επιβαρύνει το χρήστη, καθώς η σχετική εφαρμογή ενεργοποιείται και απενεργοποιείται αυτόματα, χωρίς τη παρέμβαση του οδηγού, ενώ ταυτόχρονα έχει δυνατότητες συλλογής μεγάλου όγκου δεδομένων, από τα οποία μπορούν να προκύψουν πολύτιμα μεταδεδομένα (metadata) για τη συμπεριφορά του οδηγού.

4.2.2 Σύστημα συλλογής, μετάδοσης και ανατροφοδότησης δεδομένων

Η εφαρμογή της OSeven διαθέτει ένα ολοκληρωμένο σύστημα για τη καταγραφή, τη μετάδοση, την αποθήκευση, την επεξεργασία και την αξιολόγηση δεδομένων οδηγικής συμπεριφοράς. Ο μεγάλος όγκος των δεδομένων που καταγράφονται κατά τη λειτουργία της εφαρμογής δεν υπόκειται σε επεξεργασία εντός του κινητού τηλεφώνου, για λόγους που σχετίζονται με περιορισμούς που θέτει η επεξεργαστική και αποθηκευτική ισχύς του. Αντίθετα, μεταδίδονται σε μια κεντρική βάση δεδομένων όπου γίνεται η αποθήκευση και η επεξεργασία τους. Εκεί, προκύπτουν τα μεταδεδομένα (metadata) που χρησιμοποιήθηκαν στη διπλωματική εργασία, αλλά επίσης και η ανατροφοδότηση (feedback) που λαμβάνει ο χρήστης, η οποία περιλαμβάνει την αξιολόγηση της οδηγικής του συμπεριφοράς και συμβουλές για τη βελτίωση της οδήγησής του σε μελλοντικές διαδρομές.

4.2.2.1 Καταγραφή δεδομένων

Η εφαρμογή της OSeven λειτουργεί με έναν πλήρως αυτοματοποιημένο τρόπο. Η καταγραφή δεδομένων από το smartphone ξεκινά αυτόματα, μόλις

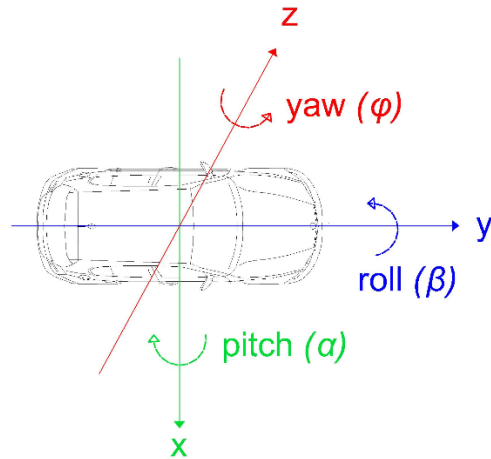
εντοπιστεί μια κατάσταση οδήγησης, και σταματά αυτόματα, μόλις εντοπιστεί μια κατάσταση μη οδήγησης. Μόνη προϋπόθεση είναι ο οδηγός να έχει εγκαταστήσει την εφαρμογή στο κινητό του και να έχει εισέλθει σε αυτή με το όνομα χρήστη (username) και το κωδικό του (password). Η εφαρμογή δίνει στον οδηγό τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει στάσεις λίγων λεπτών, χωρίς να θεωρηθεί ότι ο οδηγός έχει ολοκληρώσει την εκάστοτε διαδρομή.

Για το σκοπό αυτό, τα smartphones χρησιμοποιούν τους ενσωματωμένους αισθητήρες τους και το δέκτη GPS. Όλα τα σύγχρονα smartphones διαθέτουν συστήματα τέτοιου είδους, τα οποία ονομάζονται αδρανειακά συστήματα πλοήγησης (Inertial Navigation Systems – INS). Το INS είναι ένα βοήθημα πλοήγησης που χρησιμοποιεί έναν μικροϋπολογιστή, αισθητήρες κίνησης (επιταχυνσιόμετρα) και αισθητήρες περιστροφής (γυροσκόπια) για την εκτίμηση της θέσης, της κατεύθυνσης και της ταχύτητας ενός σώματος. Κομβικό ρόλο στη καταγραφή δεδομένων με smartphones παίζει ο αλγόριθμος δυναμικής αναπροσαρμογής του συστήματος συντεταγμένων που εξηγείται παρακάτω.

4.2.2.2 Αλγόριθμος δυναμικής αναπροσαρμογής του συστήματος συντεταγμένων για smartphones

Ένα βασικό πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί ώστε να καταστεί δυνατή η συλλογή δεδομένων με κινητά τηλέφωνα, είναι αυτό της τοποθέτησης του smartphone μέσα στο όχημα, δηλαδή της αναπροσαρμογής των δεδομένων ώστε να αντιστοιχούν στη κατεύθυνση κίνησης του οχήματος. Κατά τη διάρκεια της οδήγησης γίνεται συνεχώς επαναπροσδιορισμός του συστήματος συντεταγμένων του smartphone σε σχέση με αυτό του οχήματος. Εμπόδιο αποτελεί το γεγονός ότι οι αισθητήρες που καταγράφουν τη κίνηση της συσκευής πραγματοποιούν πολλές μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο, με συχνότητα από 20 έως 300 Hz όσον αφορά τους αισθητήρες κίνησης (INS) και 1 Hz όσον αφορά το GPS, και, συνεπώς, ενέχουν σφάλματα. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος που αντιμετωπίζει τις παραπάνω δυσκολίες και προσδιορίζει το προσανατολισμό του smartphone σε σχέση με το όχημα.

Η παρακάτω διαδικασία απαιτεί μετρήσεις από το επιταχυνσιόμετρο, το γυροσκόπιο και το GPS, που σχεδόν όλα τα σύγχρονα smartphones διαθέτουν, ανεξάρτητα από το κόστος τους. Σύμφωνα με το θεώρημα του Euler, οποιαδήποτε περιστροφή ενός στερεού στο χώρο μπορεί να περιγραφεί ως επαλληλία των τριών γωνιών Euler ως προς x (pitch), ως προς y (roll) και ως προς z (yaw), εφόσον οι τρεις αυτοί άξονες διέρχονται από ένα κοινό σημείο του στερεού. Οι γωνίες αυτές φαίνονται στο *σχήμα 1* ως α , β και φ αντίστοιχα. Για καθεμία από αυτές τις γωνίες συντάσσεται το αντίστοιχο μητρώο περιστροφής και στη συνέχεια υπολογίζεται η περιστροφή του στερεού ως γινόμενο των μητρώων περιστροφών κατά τους τρεις άξονες.



Σχήμα 4.1: Οι τρεις γωνίες Euler, που προσδιορίζουν την ακριβή περιστροφή του οχήματος στο χώρο σε σχέση με ένα σταθερό σύστημα συντεταγμένων

Μητρώα περιστροφής R_x, R_y, R_z και το γινόμενό τους:

$$\begin{aligned}
 R_x &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \\
 R_y &= \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \\
 R_z &= \begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} R_x \\ R_y \\ R_z \end{aligned}} \right\} R = R_x \cdot R_y \cdot R_z \quad (4.1)$$

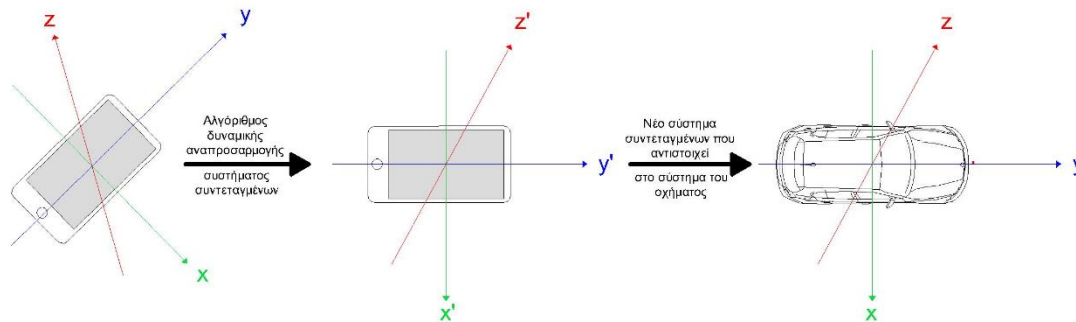
Για να βρεθεί το νέο σύστημα συντεταγμένων του smartphone, που αντιστοιχεί στη κατεύθυνση κίνησης του οχήματος, εφαρμόζεται η παρακάτω σχέση:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Για το προσδιορισμό των γωνιών α (pitch) και β (roll) χρησιμοποιούνται δεδομένα από το γυροσκόπιο και το επιταχυνσιόμετρο του smartphone. Πιο συγκεκριμένα, αξιοποιούνται οι επιταχύνσεις a_x και a_y του smartphone κατά x και κατά y αντίστοιχα, οπότε:

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \sin^{-1}(a_x) \\
 \beta &= \sin^{-1}(a_y)
 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Για τη γωνία φ (yaw) γίνεται συνδυασμός δεδομένων από το GPS και το γυροσκόπιο. Το γυροσκόπιο, το οποίο σε αυτή τη περίπτωση λειτουργεί ως πυξίδα, προσδιορίζει τη διεύθυνση τοποθέτησης του smartphone, η οποία στη συνέχεια διορθώνεται από τη κατεύθυνση κίνησης που προκύπτει από το GPS. Αυτή, όμως, η μέθοδος ενέχει σφάλματα, από τη μία λόγω της υψηλής συχνότητας μετρήσεων από το γυροσκόπιο και από την άλλη λόγω της χαμηλής ακρίβειας του GPS. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, ο αλγόριθμος υπολογίζει τη γωνία φ μία φορά ανά 10 sec, χρησιμοποιώντας τη διάμεσο των γωνιών φ που προκύπτουν από τις μετρήσεις στο διάστημα των 10 δευτερολέπτων.



Σχήμα 4.2: Δυναμική αναπροσαρμογή συστήματος συντεταγμένων του smartphone στη κατεύθυνση κίνησης του οχήματος.

4.2.2.3 Μετάδοση και αποθήκευση δεδομένων

Όταν η εφαρμογή αντιληφθεί κατάσταση μη οδήγησης, μεταδίδει τα δεδομένα στη κεντρική βάση δεδομένων της OSeven μέσω δεδομένων κυψέλης 3G ή 4G ή μέσω Wi-Fi. Για την επίτευξη επικοινωνίας μεταξύ smartphone και βάσης δεδομένων χρησιμοποιείται μια διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών (Application Programming Interface – API), η οποία παρέχει ένα ολοκληρωμένο σύστημα για τη λήψη και την αποστολή δεδομένων μεταξύ ηλεκτρονικών μονάδων και η οποία επιτρέπει τη πρόσβαση στα δεδομένα μέσω του παγκόσμιου ιστού (Internet). Έπειτα, τα δεδομένα αποθηκεύονται σε κρυπτογραφημένη μορφή στη βάση δεδομένων της OSeven.

4.2.2.4 Ανάπτυξη προτύπων οδηγικής συμπεριφοράς

Η επεξεργασία των καταγραφών γίνεται χρησιμοποιώντας τεχνικές εξόρυξης δεδομένων (data mining) και αλγορίθμους μηχανικής μάθησης (machine learning) σε βάσεις δεδομένων μεγάλου μεγέθους (big data). Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης (ομαδοποίηση, ταξινόμηση και φιλτράρισμα) αποσκοπούν στο καθαρισμό και την αναγνώριση σφαλμάτων και επαναλαμβανόμενων μοτίβων μέσα στα δεδομένα. Οι καταγραφές υπόκεινται σε χρονική και χωρική επεξεργασία προκειμένου να προκύψουν δείκτες αξιολόγησης της οδηγικής συμπεριφοράς του χρήστη. Για παράδειγμα, μπορούν να προκύψουν δείκτες επιθετικής οδήγησης, υπέρβασης των ορίων ταχύτητας, χρήσης κινητού τηλεφώνου κατά τη διάρκεια της οδήγησης, οδήγηση σε αστικό ή υπεραστικό περιβάλλον κ.α.

Στη συνέχεια, αυτοί οι δείκτες χρησιμοποιούνται για να δημιουργήσουν μια συγκεντρωτική βάση δεδομένων με οδηγικά χαρακτηριστικά, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν για την ανάπτυξη ενός μοντέλου οδηγικής συμπεριφοράς. Το μοντέλο αυτό, αφού βαθμονομηθεί, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του οδηγού. Τελικά, σύμφωνα με το παραπάνω μοντέλο και βάσει των μετρήσεων που έχουν καταγραφεί, προκύπτει μια αξιολόγηση της συμπεριφοράς του οδηγού για κάθε διαδρομή ξεχωριστά, τόσο συνολικά όσο και για τα επιμέρους χαρακτηριστικά της οδήγησης. Μάλιστα, ο χρήστης λαμβάνει στο κινητό του τηλέφωνο με γραφικό τρόπο την ανατροφοδότηση (feedback) της επεξεργασίας των δεδομένων, γεγονός που συμβάλλει στη προσπάθειά του για βελτίωση της συμπεριφοράς του στο δρόμο.

4.3 Επεξεργασία της βάσης δεδομένων

4.3.1 Η βάση δεδομένων της διπλωματικής εργασίας

Η βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε ήταν σε μορφή ηλεκτρονικού υπολογιστικού φύλλου, το οποίο διέθετε 11485 εγγραφές. Σημειώνεται ότι η κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε μία εγγραφή, δηλαδή σε μία διαδρομή που μπορεί να περιλαμβάνει στάσεις λίγων λεπτών μόνο. Κάθε μία εγγραφή διαθέτει 259 στήλες, οι οποίες αντιστοιχούν σε ισάριθμες μεταβλητές, κάποιες από τις οποίες είναι ακατέργαστα δεδομένα και κάποιες άλλες είναι μεταδεδομένα (metadata). Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από τα smartphones 100 οδηγών μεταξύ Ιουλίου και Δεκεμβρίου του 2016, ανεξάρτητα από την ώρα της ημέρας και από τον τύπο της οδού, ο οποίος καθοριζόταν με τη βοήθεια του GPS.

Σε σχέση με τις προηγούμενες έρευνες που έχουν γίνει πάνω στο θέμα της εκτίμησης ρύπων από δεδομένα συμπεριφοράς επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων κατά την οδήγηση, η παρούσα βάση δεδομένων έχει ένα βασικό πλεονέκτημα. Αυτό είναι ότι δεν δόθηκαν οδηγίες στους οδηγούς όσον αφορά τη συμπεριφορά τους κατά την οδήγηση και, συνεπώς, οι μεταβλητές που συλλέχθηκαν αντιστοιχούν πλήρως σε πραγματικές συνθήκες οδήγησης, σε αντίθεση με άλλες έρευνες που βασίζονται σε πειράματα με σκοπό την εξαγωγή δεδομένων οικολογικής ή απότομης οδήγησης, τα οποία ενδέχεται να μην αντιπροσωπεύουν πραγματικές συνθήκες οδήγησης.

Ωστόσο, επειδή τα μεγέθη ανάμεσα στις αστικές και στις υπεραστικές μετακινήσεις δεν είναι πάντα συγκρίσιμα και επειδή η προσομοίωση της κυκλοφορίας οχημάτων, που θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο, αφορά στη κυκλοφορία σε αστικό περιβάλλον, από τη βάση δεδομένων που αναφέρθηκε προηγουμένως αφαιρέθηκαν όλες οι εγγραφές που αντιπροσωπεύουν μετακινήσεις σε μη αστικές οδούς. Αυτό γίνεται μέσω της λειτουργίας φίλτρου (Filter) του Excel χρησιμοποιώντας τη μεταβλητή *time_rural* (το σύνολο του χρόνου ανά διαδρομή που ο οδηγός βρισκόταν σε υπεραστική οδό), οπότε διατηρούνται στη βάση δεδομένων μόνο οι εγγραφές για τις οποίες ισχύει *time_rural = 0*. Ως αποτέλεσμα της παραπάνω επεξεργασίας προκύπτει μια βάση δεδομένων με 4156 εγγραφές, οι οποίες αντιστοιχούν σε μετακινήσεις αποκλειστικά σε αστικές οδούς.

4.3.2 Οι μεταβλητές της ομαδοποίησης K-μέσων

Από τις 259 μεταβλητές που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων, στην ομαδοποίηση K-μέσων θα χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες 5, οι οποίες, σύμφωνα με τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε στο κεφάλαιο 2, είναι καθοριστικές για την εκτίμηση των εκπομπών ρύπων από οχήματα:

Μεταβλητή	Επεξήγηση	Μονάδα μέτρησης
avaccel	μέση επιτάχυνση ανά διαδρομή	m/s ²
avdecel	μέση επιβράδυνση ανά διαδρομή	m/s ²
smooth_eco	δείκτης αξιολόγησης οικολογικής οδήγησης	m/s ²
hapermin	αριθμός απότομων επιταχύνσεων ανά λεπτό	event/min
hbpermin	αριθμός απότομων επιβραδύνσεων ανά λεπτό	event/min

Πίνακας 4.1: Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στην ομαδοποίηση K-μέσων

Ιδιαίτερα σημαντικές είναι οι μεταβλητές **avaccel** και **avdecel**, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στην ομαδοποίηση K-μέσων για να δώσουν τις τιμές της επιτάχυνσης και της επιβράδυνσης, βάσει των οποίων θα γίνει η προσομοίωση της κυκλοφοριακής ροής. Οι δύο αυτές μεταβλητές αποτελούν μεταδομένα, τα οποία υπολογίζονται από το λόγο της μεταβολής της ταχύτητας προς το χρονικό διάστημα που συμβαίνει η μεταβολή.

- Η μεταβλητή **avaccel** αντιστοιχεί στις μέσες τιμές των επιταχύνσεων που καταγράφονται κατά τη διάρκεια της οδήγησης για κάθε μία διαδρομή.
- Αντίστοιχα, η μεταβλητή **avdecel** δίνει τις μέσες τιμές των επιβραδύνσεων κατά τη διάρκεια μίας διαδρομής.

Οι υπόλοιπες τρεις μεταβλητές είναι αυτές που υποδηλώνουν τη συμπεριφορά του οδηγού. Σε μια διαδρομή που ο οδηγός πραγματοποιεί οικολογική οδήγηση αναμένονται χαμηλές τιμές των μεταβλητών **smooth_eco**, **hapermin** και **hbpermin**. Αντίθετα, όσο η οδήγηση γίνεται πιο επιθετική αναμένονται αυξημένες τιμές των τριών αυτών μεταβλητών.

- Η μεταβλητή **smooth_eco** αποτελεί ένα δείκτη μεταβολής της κινητικής ενέργειας. Ένα ομαλός τρόπος οδήγησης, χωρίς πολλές μεταβολές ταχύτητας, αντιστοιχεί σε μια τιμή της μεταβλητής κοντά στο μηδέν. Για κάθε χρονικό διάστημα που $\frac{dv}{dt} > 0$, αν x είναι η απόσταση που διανύει το όχημα σε μέτρα, τότε:

$$PKE = \frac{\sum(v_i - v_{i-1})^2}{x} \quad (4.4)$$

όπου v_i είναι η ταχύτητα σε m/s τη χρονική στιγμή i [47].

- Η μεταβλητή **hapermin** είναι ο αριθμός των απότομων επιταχύνσεων ανά λεπτό. Ως απότομη ορίζεται μια επιτάχυνση όταν υπερβαίνει ένα ελάχιστο όριο επιτάχυνσης, το οποίο αφορά αφενός στη διαφορά ταχύτητας του οχήματος (μετρήσεις GPS) και αφετέρου στην επιτάχυνση

που προκύπτει από το επιταχυνσιόμετρο. Αποτελεί μεταδεδομένο που προκύπτει από τον αριθμό των απότομων γεγονότων προς τη διάρκεια της διαδρομής σε λεπτά.

- Ομοίως, η μεταβλητή **hbpermin** δίνει τον αριθμό των απότομων επιβραδύνσεων ανά λεπτό, χρησιμοποιώντας δεδομένα από το GPS και το επιταχυνσιόμετρο του smartphone. Αποτελεί μεταδεδομένο που προκύπτει από τον αριθμό των απότομων γεγονότων προς τη διάρκεια της διαδρομής σε λεπτά.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν περισσότερες μεταβλητές στην ομαδοποίηση K-μέσων. Ωστόσο, όσο αυξάνεται ο αριθμός των μεταβλητών, τόσο αυξάνεται ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου του Lloyd και μειώνεται η εγκυρότητα της ομαδοποίησης (δείκτης Silhouette). Σκοπός, λοιπόν, πρέπει να είναι η επιλογή μεταβλητών που είναι ικανές να περιγράψουν λογικά τη συμπεριφορά ενός οδηγού, χωρίς να χρησιμοποιούνται μεταβλητές με υψηλή αλληλοσυσχέτιση. Έτσι, επιλέχθηκε να γίνει ομαδοποίηση χρησιμοποιώντας μόνο τις **avaccel**, **avdecel**, **smooth_eco**, **hapermin** και **hbpermin**.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΝΑΛΥΣΗ & ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Εισαγωγή στην ανάλυση και τα αποτελέσματα

Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει την ανάλυση του θέματος της διπλωματικής εργασίας και τη παρουσίαση των σημαντικότερων αποτελεσμάτων της. Μετά την εισαγωγή, τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, τη παρουσίαση της μεθοδολογικής προσέγγισης και του θεωρητικού υποβάθρου και τη περιγραφή της διαδικασίας συλλογής και επεξεργασίας των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση των δεδομένων, πραγματοποιείται η εφαρμογή της μεθοδολογίας στα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί από αισθητήρες κινητών τηλεφώνων. Έπειτα, παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας, σύμφωνα με τα οποία θα διατυπωθούν τα σχετικά συμπεράσματα στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο.

Υπενθυμίζεται ότι σύμφωνα με το διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας (υποενότητα 3.1) η διπλωματική εργασία αρθρώνεται σε δύο διακριτά μέρη: στο πρώτο γίνεται η ομαδοποίηση Κ-μέσων, ενώ στο δεύτερο πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις κυκλοφορίας οχημάτων, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του πρώτου μέρους, και εξετάζεται η στατιστική σημαντικότητα των μειώσεων στις εκπομπές ρύπων. Πιο συγκεκριμένα, στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των διαδικασιών. Αρχικά, πραγματοποιείται η ομαδοποίηση Κ-μέσων και στη συνέχεια ελέγχεται η εγκυρότητά της. Έτσι, προκύπτουν τα πρότυπα επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων **ECO**, **DAU**, **HARSH** και **MIX**. Στη συνέχεια, εξετάζονται οι επιπτώσεις των προτύπων στις εκπομπές ρύπων και στα μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής. Για το σκοπό αυτό δημιουργούνται τρία σενάρια τα οποία αντιστοιχούν σε ροή σε οδό χωρίς σηματοδότηση, σε οδό με σηματοδοτούμενο κόμβο και σε επίπεδο δικτύου. Από τα σενάρια αυτά εξάγονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

Σημειώνεται ότι στη αρχή κάθε ενότητας θα αναφέρονται συνοπτικά οι παραδοχές που έγιναν προκειμένου να διευκολύνουν την ανάπτυξη του θέματος. Επιπλέον των παραδοχών, τα δεδομένα εισόδου και τα δεδομένα εξόδου θα περιέχονται σε πλαίσια, σύμφωνα με όσα παρατίθενται στο παρακάτω υπόμνημα. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να τονιστεί ότι καταβλήθηκε η μέγιστη δυνατή προσπάθεια έτσι ώστε όλα τα σενάρια να βασίζονται σε όσο το δυνατόν ομοιόμορφες μεταξύ τους παραδοχές.

Υπόμνημα

Παραδοχές

Δεδομένα εισόδου ή εξόδου

5.2 Ομαδοποίηση Κ-μέσων

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η διαδικασία για την ομαδοποίηση των διαδρομών, την εξαγωγή των προτύπων επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων και την εξέταση της εγκυρότητας της ομαδοποίησης.

5.2.1 Δημιουργία προτύπων επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων

- Το δείγμα χωρίζεται σε 3 πρότυπα: **ECO**, **DAU** και **HARSH**.
- Το πρότυπο **ECO** αντιστοιχεί σε οχήματα με χαμηλές επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις.
- Το πρότυπο **DAU** αντιστοιχεί στις ενδιάμεσες τιμές.
- Το πρότυπο **HARSH** αντιστοιχεί στις υψηλές τιμές των επιταχύνσεων και των επιβραδύνσεων.
- Επιπλέον, προκύπτει το πρότυπο **MIX** ως άθροισμα των ποσοστών των επιμέρους προτύπων. Θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει το πραγματικό σύνολο του δείγματος των οδηγών.

Η βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται περιλαμβάνει 4156 διαδρομές, που αντιστοιχούν σε μετακινήσεις αποκλειστικά σε αστικές οδούς. Η εισαγωγή της βάσης δεδομένων στην RStudio γίνεται με τη μορφή υπολογιστικού φύλλου με τιμές διαχωρισμένες με κόμμα (.csv) και η ομαδοποίηση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας την εντολή `kmeans()`.

Η εξαγωγή των προτύπων γίνεται εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο του Lloyd. Η ομαδοποίηση Κ-μέσων βασίζεται στις κανονικοποιημένες τιμές των μεταβλητών, έτσι ώστε όλες να συμμετέχουν με την ίδια βαρύτητα στην ομαδοποίηση. Πιο συγκεκριμένα, κανονικοποιήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν οι μεταβλητές *avaccel*, *avdecel*, *smooth_eco*, *hapermin* και *hbpermin*, οι οποίες έχουν περιγραφεί στη παράγραφο 4.2.2. Οι κανονικοποιημένες μεταβλητές ονομάζονται *norm_avaccel*, *norm_avdecel*, *norm_smooth_eco*, *norm_hapermin* και *norm_hbpermin* αντίστοιχα.

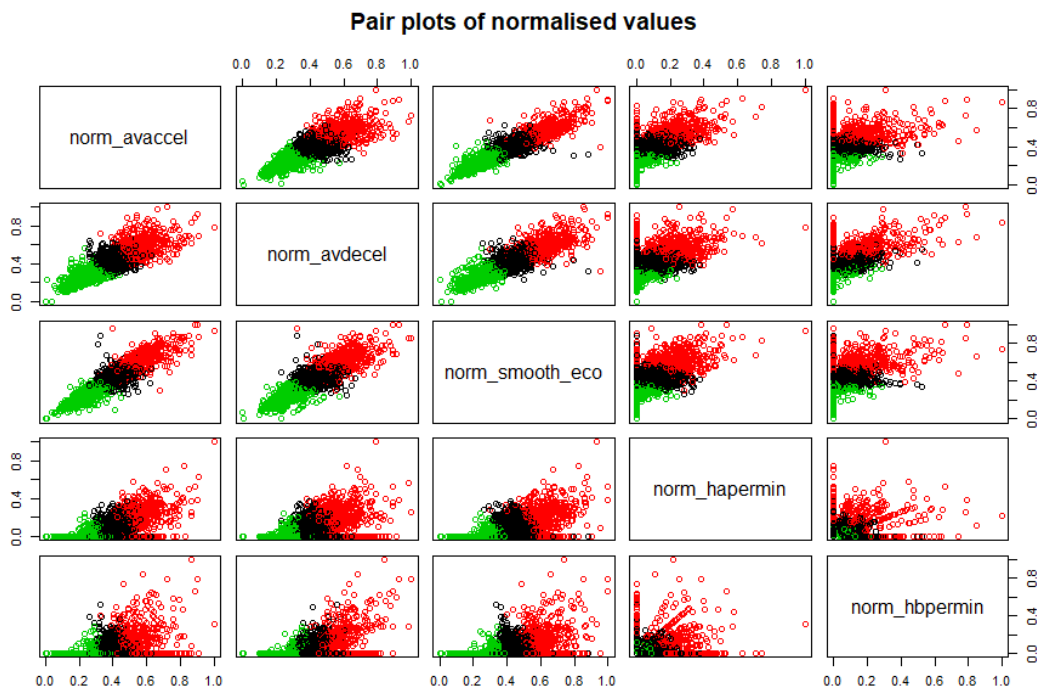
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι δημιουργούνται τρεις ομάδες (clusters), με τη πρώτη ομάδα να περιέχει 1915 διαδρομές, τη δεύτερη 602 διαδρομές και τη τρίτη 1639 διαδρομές. Τα κανονικοποιημένα κεντροειδή της ομαδοποίησης δίνονται συνοπτικά στο παρακάτω πλαίσιο εξόδου:

```
K-means clustering with 3 clusters of sizes 1915, 602, 1639

Cluster means:
  norm_avaccel norm_avdecel norm_smooth_eco norm_hapermin norm_hbpermin
1   0.3990690   0.4162999   0.4407839   0.060069916  0.022220829
2   0.5593458   0.5792178   0.6226791   0.191232308  0.121987825
3   0.2562303   0.2768085   0.2779300   0.007829943  0.003617569
```


Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτή τη φάση οι μεταβλητές είναι ακόμα κανονικοποιημένες. Η μετατροπή τους σε πραγματικές τιμές θα γίνει σε μεταγενέστερο στάδιο.

Επίσης, παρουσιάζονται οι σχέσεις μεταξύ των κανονικοποιημένων μεταβλητών, όπως αυτές προέκυψαν από την ομαδοποίηση. Παρατηρείται, ότι οι μεταβλητές συνδέονται μεταξύ τους με αύξουσες σχέσεις, όπως για παράδειγμα οι μεταβλητές *norm_avaccel* και *norm_smooth_eco*, δηλαδή αύξηση της *smooth_eco* αντιστοιχεί σε αυξημένες τιμές της *avaccel* και αντίστροφα. Εξαιρεση αποτελούν, βέβαια, οι επιβραδύνσεις λόγω κανονικοποίησης του αρνητικού προσήμου, γεγονός όμως που αναμένεται να αντιστραφεί όταν οι κανονικοποιημένες μεταβλητές μετατραπούν σε πραγματικές τιμές. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 5.1 (pair plot), το οποίο έχει παραχθεί αυτοματοποιημένα από την RStudio.

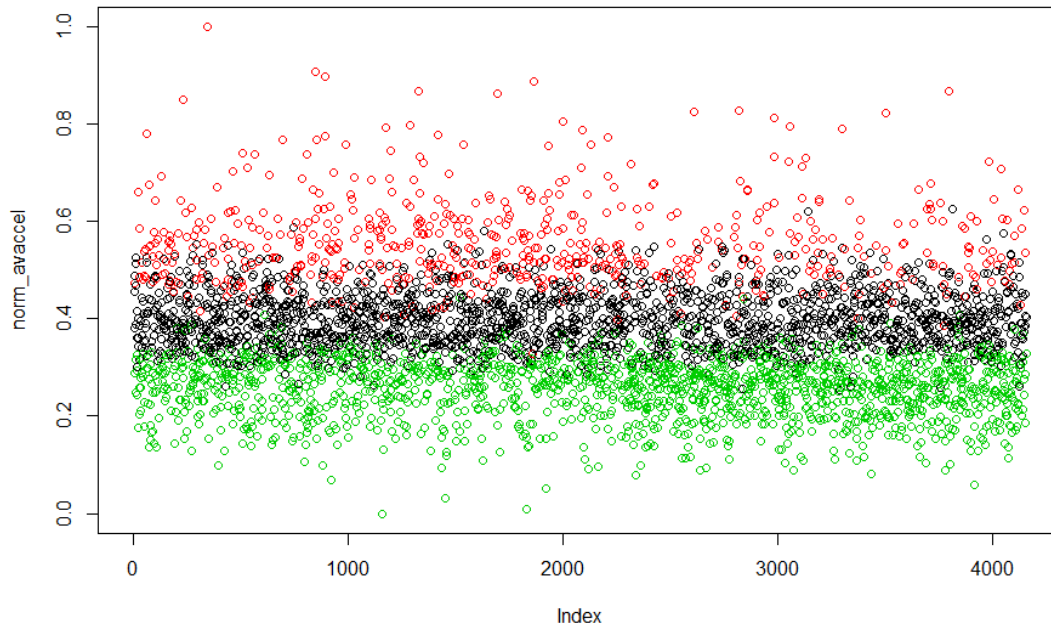


Σχήμα 5.1: Σχέσεις μεταξύ των κανονικοποιημένων μεταβλητών, όπου φαίνονται οι τρεις ομάδες (clusters) που δημιουργήθηκαν από την ομαδοποίηση K-μέσων με τον αλγόριθμο του Lloyd στην RStudio. Πηγή: RStudio

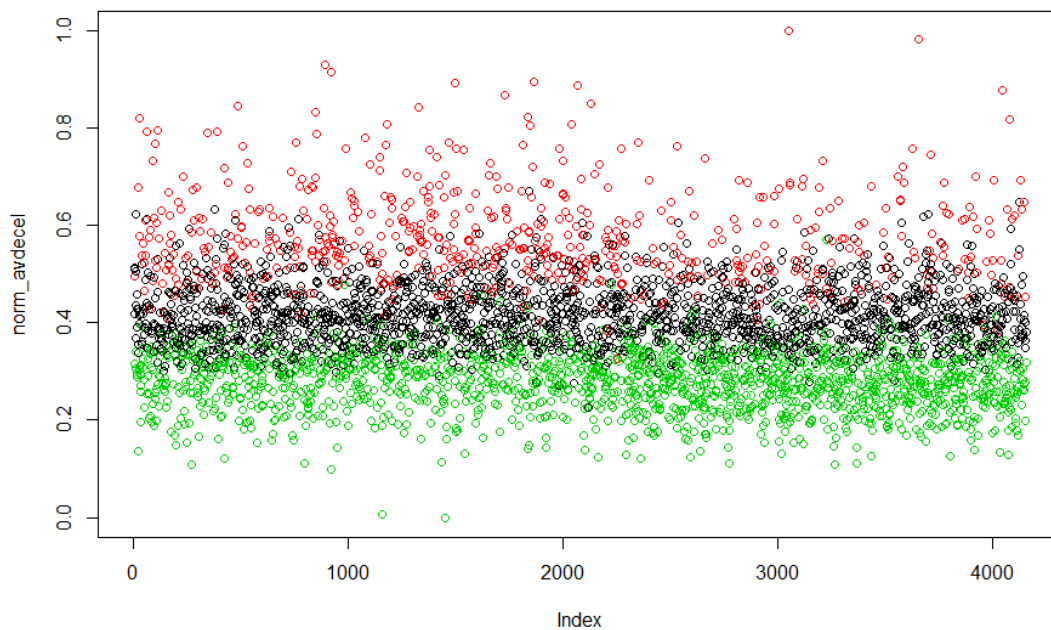
Επιπλέον, είναι δυνατό να παρατηρηθεί μεμονωμένα η ομαδοποίηση συγκεκριμένων μεταβλητών από αυτές που αξιοποιήθηκαν κατά την ομαδοποίηση K-μέσων. Έτσι, δημιουργούνται τα παρακάτω διαγράμματα για τις κανονικοποιημένες μεταβλητές *norm_avaccel* και *norm_avdecel*, που είναι οι μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν σε επόμενη υποενότητα για τη προσομοίωση.

Με μια πρώτη ματιά στα σχήματα 5.2(α)-(β), παρατηρείται ένας καλός διαχωρισμός των ομάδων, τόσο για τη *norm_avaccel*, όσο και για την *norm_avdecel*, χωρίς ωστόσο να λείπουν οι επικαλύψεις. Μια επικάλυψη μπορεί να υποδηλώνει δύο πράγματα: είτε ότι ένα σημείο έχει ομαδοποιηθεί στη λάθος ομάδα, είτε ότι ο χώρος που καταλαμβάνει μια ομάδα συμπίπτει εν μέρει ή πλήρως με το χώρο που καταλαμβάνει μια άλλη ομάδα.

Plot of normalised avaccel after clustering



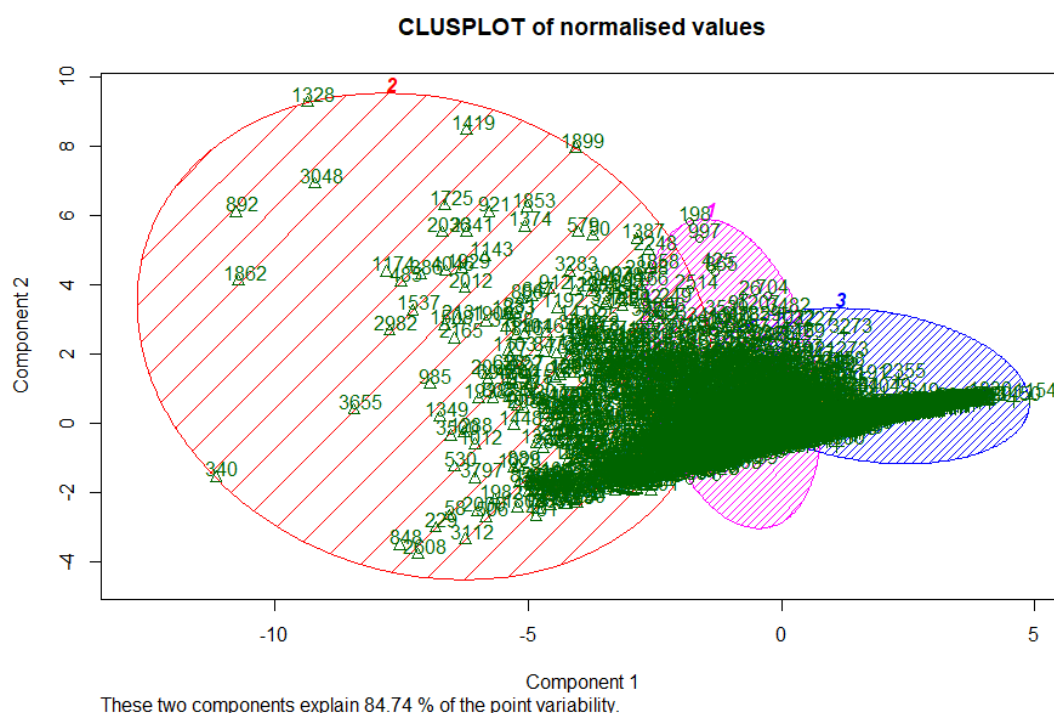
Plot of normalised avdecel after clustering



Σχήματα 5.2(α)-(β): Τα αποτελέσματα της ομαδοποίησης των κανονικοποιημένων μεταβλητών *norm_avaccel* και *norm_avdecel*. Πηγή: RStudio

Ένας άλλος τρόπος παρουσίασης των αποτελεσμάτων βασίζεται στην ανάλυση κύριων συνιστωσών (Principal Component Analysis – PCA). Η μέθοδος PCA είναι μια γραμμική μέθοδος συμπίεσης δεδομένων που συνίσταται από τον επαναπροσδιορισμό των συντεταγμένων ενός συνόλου δεδομένων σε ένα άλλο σύστημα συντεταγμένων, το οποίο κρίνεται καταλληλότερο στην επικείμενη ανάλυση δεδομένων. Το νέο σύστημα συντεταγμένων, που απαρτίζεται από τις κύριες συνιστώσες (principal components), προκύπτει ως γραμμικός συνδυασμός των αρχικών μεταβλητών. Οι κύριες συνιστώσες δεν συσχετίζονται μεταξύ τους και γι' αυτό ενδέχεται να μην εξηγούν το 100% του συνόλου των δεδομένων.

Στο σχήμα 5.3 παρουσιάζεται το CLUSPLOT, δηλαδή ένα διάγραμμα της ομαδοποίησης των παρατηρήσεων που βασίζεται στην ανάλυση κύριων συνιστωσών. Το διάγραμμα αποτελείται από 3 ελλείψεις, όσες δηλαδή ομάδες έχουν επιλεγεί στην ομαδοποίηση K-μέσων. Η κάθε έλλειψη βασίζεται στη μέση τιμή και την συνδιακύμανση της κάθε ομάδας και οι διαστάσεις της ορίζονται έτσι ώστε να περιέχουν όλα τα σημεία που ανήκουν στην εκάστοτε ομάδα. Έτσι εξηγείται και το γεγονός ότι οι ελλείψεις των ομάδων 2 και 3 φαίνεται να καλύπτουν ένα μεγάλο μέρος της έλλειψης της ομάδας 1, ωστόσο αυτή η επικάλυψη ενδέχεται να συμβαίνει λόγω ενός μικρού αριθμού σημείων που έχουν ομαδοποιηθεί λανθασμένα. Επίσης, το χρώμα της κάθε έλλειψης υποδηλώνει τη πυκνότητα των σημείων της κάθε ομάδας. Με σειρά αύξουσας πυκνότητας τα χρώματα είναι: ανοιχτό γαλάζιο, ανοιχτό πράσινο, κόκκινο και μωβ. Οι κύριες συνιστώσες εξηγούν το 84.74% των παρατηρήσεων.



Σχήμα 5.3: CLUSPLOT των κανονικοποιημένων μεταβλητών της ομαδοποίησης, που βασίζεται στην ανάλυση κύριων συνιστωσών (PCA). Πηγή RStudio

Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί στις παραδοχές, δημιουργούνται τρία πρότυπα **ECO**, **DAU** και **HARSH**, τα οποία αντιστοιχούν σε χαμηλές, μέσες και υψηλές τιμές επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων. Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα της ομαδοποίησης, τα οποία φαίνονται συνοπτικά στο πίνακα 5.1, αντιστοιχίζονται το καθένα σε ένα πρότυπο. Η ομάδα 1 αντιστοιχεί στο πρότυπο **DAU**, η ομάδα 2 αντιστοιχεί στο **HARSH** και η ομάδα 3 στο **ECO**.

Ομάδα	norm_avaccel	norm_avdecel	norm_smooth_eco	Μέγεθος	Πρότυπο
1	0.3990690	0.4162999	0.4407839	1915	DAU
2	0.5593458	0.5792178	0.6226791	602	HARSH
3	0.2562303	0.2768085	0.2779300	1639	ECO

Πίνακας 5.1: Αντιστοίχιση των ομάδων στα πρότυπα επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων.

Ωστόσο, τα αποτελέσματα αυτά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη προσομοίωση με τη παρούσα μορφή, δηλαδή κανονικοποιημένα. Αυτό σημαίνει ότι οι κανονικοποιημένες μεταβλητές πρέπει να μετατραπούν σε πραγματικές. Για να γίνει αυτό, η σχέση της κανονικοποίησης (3.14) επιλύεται ως προς X , δηλαδή:

$$X = X_{norm} \cdot [\max(X) - \min(X)] + \min(X) \quad (5.1)$$

Με αυτό τον τρόπο οι κανονικοποιημένες μεταβλητές μετατρέπονται σε μη κανονικοποιημένες, οπότε προκύπτει ο πίνακας 5.2 που αποτελείται από τα μη κανονικοποιημένα κεντροειδή των ομάδων με ακρίβεια δύο δεκαδικών:

Ομάδα	avaccel (m/s ²)	avdecel (m/s ²)	Μέγεθος	Πρότυπο
1	1.62	-1.73	1915	DAU
2	2.21	-2.37	602	HARSH
3	1.09	-1.15	1639	ECO

Πίνακας 5.2: Αντιστοίχιση των μη κανονικοποιημένων κεντροειδών στα τρία πρότυπα.

Σύμφωνα με το θεωρητικό υπόβαθρο (παράγραφος 3.8.4), το πρότυπο ακολουθούστος οχήματος του Krauss δέχεται ως δεδομένο εισόδου τις μέγιστες επιταχύνσεις (a) και επιβραδύνσεις (b) του οχήματος (acceleration, deceleration ability). Για αυτό το λόγο, βρίσκεται η μέγιστη μέση επιτάχυνση (a) και η μέγιστη μέση επιβράδυνση (b) κατ' απόλυτη τιμή σε κάθε ομάδα. Αυτές οι τιμές αντιστοιχούν εκάστη σε μία διαδρομή.

Ομάδα	a (m/s ²)	b (m/s ²)	Μέγεθος	Πρότυπο
1	2.46	-2.82	1915	DAU
2	3.84	-4.15	602	HARSH
3	1.79	-2.42	1639	ECO

Πίνακας 5.3: Μέγιστες μέσες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις ανά πρότυπο

Επιπλέον, θα δημιουργηθεί το πρότυπο **MIX** ως άθροισμα των ποσοστών των επιμέρους προτύπων:

Πρότυπο	Μέγεθος	Ποσοστό επί του συνόλου (%)
DAU	1915	46
HARSH	602	14
ECO	1639	40
Σύνολο	4156	100%

Πίνακας 5.4: Ποσοστά των επιμέρους προτύπων στο σύνολο του δείγματος

Σύμφωνα με το πίνακα 4, το πρότυπο **MIX** αποτελείται κατά 46% από οχήματα του προτύπου **DAU**, 14% από το πρότυπο **HARSH** και 40% από το πρότυπο **ECO** και θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα όσον αφορά τη σύνθεση της κυκλοφορίας.

5.2.2 Εξέταση εγκυρότητας της ομαδοποίησης K-μέσων

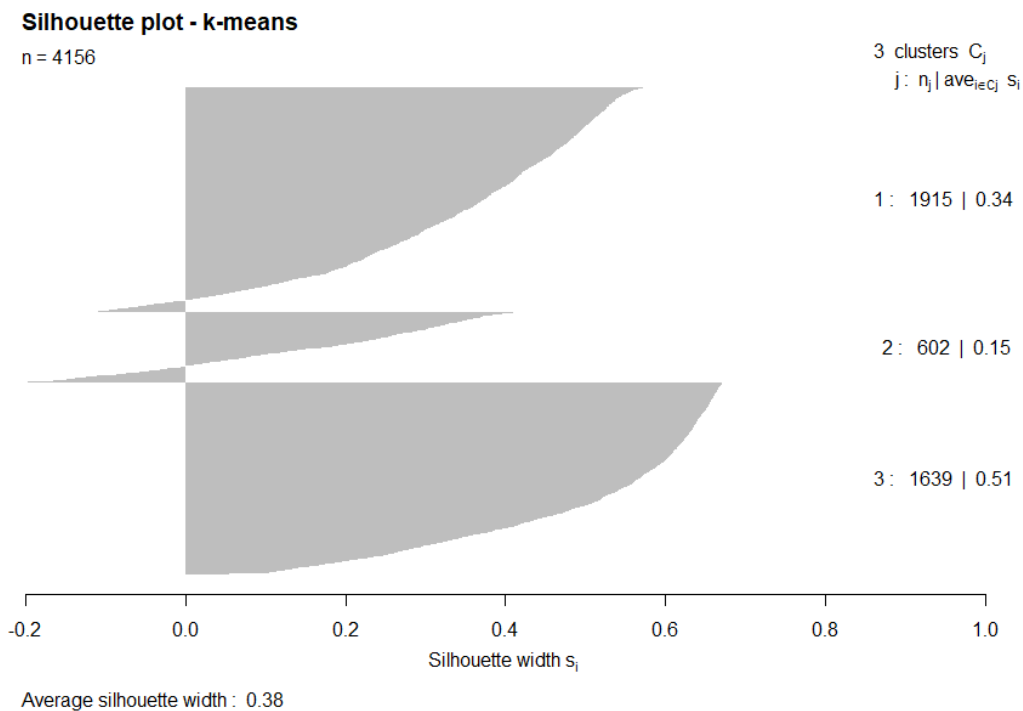
Εκτός από τα κεντροειδή, η RStudio επιστρέφει ως δεδομένα εξόδου και τα δεδομένα που περιέχονται στο παρακάτω πλαίσιο. Έστω ότι έχει υπολογιστεί η μέση τιμή όλων των στοιχείων της βάσης δεδομένων. Το άθροισμα των τετραγώνων των αποστάσεων όλων των στοιχείων από τη μέση τιμή της βάσης δεδομένων είναι η απόσταση `total_SS`. Έστω τώρα ότι υπολογίζονται και οι μέσες τιμές της κάθε ομάδας, το σταθμισμένο (ανάλογα με τον αριθμό των σημείων της κάθε ομάδας) άθροισμα των τετραγώνων των αποστάσεων των μέσων τιμών των ομάδων από τη μέση τιμή της βάσης δεδομένων είναι η απόσταση `between_SS`. Αν η ομαδοποίηση δεν είναι έγκυρη, τότε ο λόγος `between_SS/total_SS` προσεγγίζει το 0 (τα κεντροειδή δεν είναι καλά διαχωρισμένα). Εδώ συμβαίνει το αντίθετο, γεγονός που σημαίνει ότι ο διαχωρισμός του δείγματος σε τρεις ομάδες εξηγεί το 63.0% της διακύμανσης των στοιχείων της βάσης δεδομένων.

```
within cluster sum of squares by cluster:
[1] 35.44506 42.15362 20.12388
(between_SS / total_SS = 63.0 %)
```

Η εξέταση της εγκυρότητας της ομαδοποίησης K-μέσων βασίζεται στο δείκτη Silhouette. Υπενθυμίζεται ότι η ομαδοποίηση K-μέσων έχει γίνει χρησιμοποιώντας κανονικοποιημένες μεταβλητές και, συνεπώς, ο δείκτης Silhouette υπολογίζεται βάσει αυτών των κανονικοποιημένων μεταβλητών. Επιπλέον, λόγω του ότι οι μεταβλητές είναι συνεχείς και όχι διακριτές, δεν αναμένονται ιδιαίτερα υψηλές τιμές του δείκτη Silhouette, όπως βέβαια φαίνεται ήδη και στο σχήμα 3, όπου ορισμένα σημεία φαίνονται να έχουν ομαδοποιηθεί σε λανθασμένη ομάδα ή, εν πάση περιπτώσει, να υπάρχουν αλληλοκαλύψεις μεταξύ των ομάδων. Ο αναγνώστης καλείται να ανατρέξει στη παράγραφο 4.3.2

όπου εξηγούνται οι μεταβλητές **avaccel** και **avdecel** και οι μονάδες μέτρησης τους.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4, για κάθε στοιχείο της κάθε ομάδας υπολογίζεται ο δείκτης Silhouette. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο δείκτης συνολικά για κάθε ομάδα και, τελικά, υπολογίζεται ο καθολικός δείκτης GS_u ως ο μέσος όρος των δεικτών του συνόλου των στοιχείων. Υπενθυμίζεται ότι ο δείκτης Silhouette παίρνει τιμές από -1 μέχρι 1, με το -1 να αντιστοιχεί σε κακή ομαδοποίηση και το 1 σε πλήρως διαχωρισμένες ομάδες. Παρατηρείται, ότι στην ομάδα 1 (πρότυπο **DAU**) ο δείκτης είναι 0.34, στην ομάδα 2 (πρότυπο **HARSH**) ο δείκτης είναι 0.15, ενώ στην ομάδα 3 (πρότυπο **ECO**) ο δείκτης είναι 0.51. Οι δείκτες των ομάδων 1 και 3 κρίνονται ικανοποιητικοί, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν είναι συνεχείς και ακολουθούν τη κανονική κατανομή. Αντίθετα, τα αποτελέσματα της ομαδοποίησης στην ομάδα 2 είναι λιγότερο ικανοποιητικά, όπου φαίνεται ότι ένας σχετικά μεγάλος αριθμός στοιχείων έχει ομαδοποιηθεί λανθασμένα (αρνητικός δείκτης Silhouette), δηλαδή η απόσταση των σημείων από το κεντροειδές στο οποίο έχουν ομαδοποιηθεί είναι μεγαλύτερη από την απόστασή τους από κάποιο άλλο, γειτονικό κεντροειδές. Συνεπώς, είναι εμφανές ότι τα αποτελέσματα της ομαδοποίησης στη παρούσα υποενοότητα είναι ικανοποιητικά, με εξαίρεση ίσως την ομάδα 2 που παρουσιάζει χαμηλό αλλά αποδεκτό δείκτη Silhouette. Το ίδιο ισχύει και για τον καθολικό δείκτη GS_u , ο οποίος είναι ίσος με 0.38, γεγονός που υποδηλώνει μια ικανοποιητική ομαδοποίηση.



Σχήμα 5.4: Το σχήμα που συνοψίζει τους δείκτες Silhouette για κάθε στοιχείο ξεχωριστά, για κάθε ομάδα και συνολικά (GS_u). Πηγή: RStudio

5.2.3 Σύνοψη των αποτελεσμάτων της ομαδοποίησης

Τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει, θα χρησιμοποιηθούν στις επόμενες παραγράφους για την προσομοίωση κυκλοφορίας οχημάτων.

Ομάδα	Πρότυπο	a (m/s ²)	b (m/s ²)	Silhouette index
1	DAU	2.46	-2.82	0.34
2	HARSH	3.84	-4.15	0.15
3	ECO	1.79	-2.42	0.51
-	MIX	Σύνθεση: 46% DAU 14% HARSH 40% ECO		-

Πίνακας 5.5: Σύνοψη των προτύπων

Το a αντιστοιχεί στη μέγιστη επιτάχυνση του οχήματος και το b στην μέγιστη επιβράδυνση του οχήματος. Ο καθολικός δείκτης Silhouette είναι ίσος με 0.38.

5.3 Προσομοίωση κυκλοφορίας οχημάτων

Μια προσομοίωση στο μικροσκοπικό προσομοιωτή SUMO απαιτεί ως δεδομένα εισόδου 4 αρχεία μορφής .xml. Αυτά τα αρχεία είναι τα παρακάτω:

- Το πρώτο αρχείο προκύπτει από την εφαρμογή NETEDIT, η οποία χρησιμοποιείται για τη κατασκευή του δικτύου στο οποίο θα βασιστεί η προσομοίωση, και έχει τη μορφή **name.net.xml**.
- Το δεύτερο αρχείο είναι αυτό που καθορίζει τα οχήματα, τους τύπους των οχημάτων και τη διαδρομή που αυτά τελικά θα ακολουθήσουν. Το αρχείο αυτό έχει τη μορφή **name.rou.xml**.
- Το τρίτο αρχείο είναι αυτό που καθορίζει τα πρόσθετα χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα την τοποθέτηση ελεγκτών επαγωγικού βρόχου (inductions loops detectors) στο δίκτυο, τη δημιουργία αρχείου δεδομένων εξόδου ακμής (edge-based traffic measures), τη δημιουργία αρχείου δεδομένων εκπομπής ρύπων (edge-based emission output), την τοποθέτηση και τον προγραμματισμό φωτεινών σηματοδοτών, το περιορισμό της ταχύτητας κίνησης των οχημάτων υπό συγκεκριμένες συνθήκες, την αλλαγή της διαδρομής των οχημάτων (rerouters) κ.α. Το αρχείο αυτό έχει τη μορφή **name.add.xml**.
- Τα τρία προαναφερθέντα αρχεία συνδυάζονται σε ένα αρχείο της μορφής **name.sumocfg**, που ουσιαστικά είναι το αρχείο που τρέχει τη προσομοίωση.

Ανάλογα με το αν ο χρήστης έχει επιλέξει να λάβει τα δεδομένα εξόδου ακμής και τα δεδομένα εκπομπής ρύπων, δημιουργούνται δύο αρχεία εξόδου, τα οποία είναι και τα δύο της μορφής **name.xml**. Αυτό σημαίνει ότι εκ των προτέρων το όνομα που θα έχει διαλέξει ο χρήστης να αποδοθεί σε καθένα από τα δύο αυτά αρχεία θα πρέπει να διαφέρει, ώστε να μην υπάρξει σύγχυση.

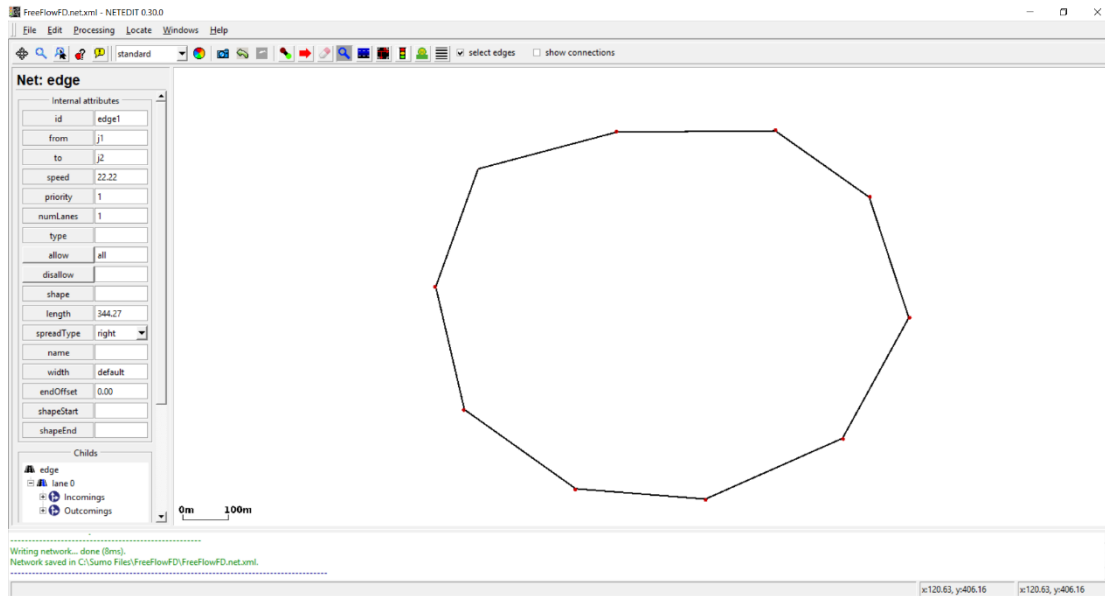
Επιπλέον, υπογραμμίζεται ότι τα αρχεία .xml μπορούν να διαβαστούν από το Excel, γεγονός που διευκολύνει πολύ την επεξεργασία των δεδομένων.

5.3.1 Ροή σε οδό χωρίς σηματοδότηση

- Προσομοίωση σε οδό μίας λωρίδας προς μία κατεύθυνση με όριο ταχύτητας τα 80 km/h.
- Το καθαρό μήκος των οχημάτων είναι 4.5 m.
- Το κενό ασφαλείας μεταξύ των οχημάτων είναι 2.5 m.
- Η ατέλεια του οδηγού στο να διατηρεί σταθερή την ταχύτητα του οχήματός του είναι 0.5. Η τιμή αυτή προτείνεται από το SUMO. Αυτός ο συντελεστής ονομάζεται ϵ στις σχέσεις του μοντέλου του Krauss.
- Τα οχήματα είναι τεχνολογίας κινητήρα Euro 4, αμόλυβδης βενζίνης.
- Τα δεδομένα συγκεντρώνονται αθροιστικά για χρονικά διαστήματα 200 s προκειμένου να μειωθεί ο όγκος τους και να αυξηθεί η ακρίβεια των μετρήσεων.
- Η προσομοίωση έχει διάρκεια 3 ωρών για κάθε πρότυπο.

Σύμφωνα με τις οδηγίες χρήσης του SUMO, ένα συνηθισμένο σενάριο που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των θεμελιωδών μακροσκοπικών διαγραμμάτων της κυκλοφοριακής ροής είναι μια κυκλική διαδρομή όπου η πυκνότητα των οχημάτων αυξάνεται με το χρόνο. Το βασικό πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι ότι η πυκνότητα μπορεί να αυξηθεί μόνο όταν υπάρχει αρκετός χώρος για να εισαχθούν νέα οχήματα στη προσομοίωση. Σε ένα κλειστό σύστημα, όπως είναι μια κυκλική διαδρομή, με τη πάροδο του χρόνου όλος ο χώρος καταλαμβάνεται από τα οχήματα και τις αποστάσεις ασφαλείας μεταξύ τους. Η μόνη λύση είναι να μειωθεί η ταχύτητα σε κάποιες ακμές της κυκλικής διαδρομής, ώστε να μειωθούν τα κενά ασφαλείας μεταξύ των οχημάτων και να δημιουργηθεί χώρος για την εισαγωγή περισσότερων οχημάτων.

Αρχικά, σχεδιάζεται ένα κλειστό, δεκαγωνικό δίκτυο στην εφαρμογή NETEDIT, το οποίο χαρακτηρίζεται ως κυκλικό, αφού δεν έχει αρχή και τέλος. Το δίκτυο αποτελείται από οδό μίας λωρίδας προς μία κατεύθυνση κίνησης, η οποία αποτελείται από 10 ακμές (edges) και 10 κόμβους (junctions). Στις ακμές της οδού αποδίδονται οι ονομασίες edge1 έως edge10 και στους κόμβους οι ονομασίες j1 έως j10. Το όριο ταχύτητας ορίστηκε στα 22.22 m/s (80 km/h) που αντιστοιχεί στη τυπική τιμή σε αστική οδό υψηλής ταχύτητας. Το δίκτυο αποθηκεύεται με το όνομα **FreeFlowFD.net.xml**. Στη παρούσα φάση δεν έχει σημασία το μήκος της κάθε ακμής και το αν οι ακμές είναι ίσες σε μήκος ή όχι, καθώς θα πραγματοποιηθεί αναγωγή όλων των μεγεθών στο χιλιόμετρο. Το δίκτυο παρουσιάζεται στο σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5: Το κυκλικό, δεκαγωνικό δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε στη προσομοίωση ροής χωρίς σηματοδότηση.

5.3.1.1 Πρότυπο DAU

Στη συνέχεια, πρέπει να οριστεί το αρχείο που καθορίζει τα οχήματα και τις διαδρομές που ακολουθούν, το οποίο ονομάζεται **FreeFlowFD.rou.xml** και φαίνεται στο παρακάτω πλαίσιο. Σε αυτό το αρχείο αρχικά (vType) ορίζονται το όνομα του τύπου των οχημάτων **id**, ο τύπος των οχημάτων **type**, το μήκος των οχημάτων **length**, η μέγιστη επιτάχυνση των οχημάτων **accel**, η μέγιστη επιβράδυνση των οχημάτων **decel** κατ' απόλυτη τιμή, η ατέλεια του οδηγού **sigma** (στο μοντέλο του Krauss συμβολίζεται με ϵ), το μοντέλο ακολουθούτος οχήματος που χρησιμοποιήθηκε **carFollowModel** και η κατηγορία των οχημάτων όσον αφορά το μοντέλο PHEM **emissionClass**. Επιπλέον, για την εκάστοτε ροή (flow) ορίζονται το όνομά της **id**, ο τύπος των οχημάτων που αφορά **type**, ο χρόνος έναρξης **begin**, ο χρόνος λήξης **end**, η περίοδος εισαγωγής νέων οχημάτων στο δίκτυο **period**, η θέση εισαγωγής νέων οχημάτων **departPos**, η ταχύτητα των οχημάτων που εισέρχονται στο δίκτυο **departSpeed**, η λωρίδα που εισάγονται τα νέα οχήματα **departLane** και η διαδρομή που ακολουθούν που ορίζεται από τις μεταβλητές **from** και **to**.

FreeFlowFD.rou.xml

```
<routes>
  <vtype id="DAU" type="passenger" length="4.5" accel="2.46"
  decel="2.82" sigma="0.5" carFollowModel="Krauss"
  emissionClass="PHEMlight/PKW_G_EU4" />
  <flow id="DAU" type="DAU" begin="0" end="10800" period="3"
  departPos="last" departSpeed="max" departLane="free" from="edge1"
  to="edge5"/>
</routes>
```

Σύμφωνα με το παραπάνω πλαίσιο, έχουν οριστεί τα οχήματα που ακολουθούν το πρότυπο **DAU**. Τα οχήματα αυτά έχουν μήκος 4.5 m, μέγιστη επιτάχυνση 2.46 m/s^2 , μέγιστη επιβράδυνση 2.82 m/s^2 και είναι τεχνολογίας κινητήρα Euro 4. Τα οχήματα αυτά ξεκινούν τη διαδρομή τους τη χρονική στιγμή 0 και σταματούν τη χρονική στιγμή 10800 s. Κάθε 3 s (**period="3"**) προστίθεται ένα όχημα στο δίκτυο, το οποίο ξεκινάει τη διαδρομή του πίσω από το τελευταίο όχημα που προστέθηκε στη προσομοίωση και έχει τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα που του επιτρέπει το κενό ασφαλείας (**departSpeed="max"**). Τα οχήματα ακολουθούν τη διαδρομή από την ακμή edge 1 μέχρι την edge5.

Ωστόσο, τα οχήματα δεν πρέπει να εγκαταλείψουν το δίκτυο μετά την ολοκλήρωση της διαδρομής τους στην edge5, αλλά πρέπει να παραμείνουν στο δίκτυο και να πραγματοποιήσουν επιπλέον κυκλικές διαδρομές. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιούνται **rerouters**, όπως ορίζονται στο αρχείο **FreeFlowFD.add.xml**. Στο αρχείο αυτό ορίζεται ότι όλα τα οχήματα που φτάνουν στην edge5 θα επαναδρομολογούνται και θα κατευθύνονται στην edge10 και το αντίστροφο. Έτσι, δημιουργείται ένας ατέρμονας βρόχος, όπου τα οχήματα παραμένουν μέσα στο δίκτυο και εκτελούν συνεχώς κυκλικές διαδρομές, ενώ ταυτόχρονα προστίθενται νέα οχήματα τα οποία εκτελούν και αυτά κυκλικές διαδρομές κ.ο.κ.

Βέβαια, για να προστεθούν νέα οχήματα στο δίκτυο πρέπει να μειωθεί η ταχύτητα των οχημάτων. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας εικονικές πινακίδες μεταβαλλόμενου ορίου ταχύτητας (**variable speed signs**), οι οποίες όπως έχουν οριστεί παρακάτω μειώνουν τη ταχύτητα κίνησης των οχημάτων στο 1 m/s στα χρονικά διαστήματα που ορίζονται από τις μεταβλητές **step time**.

Επιπλέον, ο χρήστης ορίζει ότι θέλει να λάβει τα δεδομένα εξόδου ακμής (edge-based traffic measures) και τα δεδομένα εκπομπής ρύπων (edge-based emission output). Για να γίνει αυτό, πρέπει να χρησιμοποιηθεί η εντολή **edgeData**.

Όπως φαίνεται στο παρακάτω πλαίσιο, ορίζονται οι rerouters rerouter_0 στην ακμή 5 και rerouter_1 στην ακμή 10, οι οποίοι ενεργοποιούνται τη χρονική στιγμή 0 και σταματούν τη λειτουργία τους τη χρονική στιγμή 10^9 s. Επιπρόσθετα, στην ακμή 10 έχουν τοποθετηθεί πινακίδες μεταβαλλόμενου ορίου ταχύτητας, που ονομάζονται "disturbance". Τέλος, ορίζονται τα ονόματα των αρχείων εξόδου: το αρχείο δεδομένων εξόδου ακμής ονομάζεται **edgedata.xml** και τα δεδομένα συλλέγονται αθροιστικά για 200 s (μεταβλητή **freq**), ενώ το αρχείο των δεδομένων εκπομπών ρύπων ονομάζεται **emiedgedata.xml**, είναι τύπου (**type**) εκπομπών (**emissions**) και συλλέγεται αθροιστικά για 200 s. Έτσι, ο χρήστης ορίζει ποια αρχεία εξόδου χρειάζεται και με ποιο τρόπο πρέπει αυτά να συλλεχθούν.

```

FreeFlowFD.add.xml
<additional>
  <rerouter id="rerouter_0" edges="edge5">
    <interval end="1e9">
      <destProbReroute id="edge10"/>
    </interval>
  </rerouter>
  <rerouter id="rerouter_1" edges="edge10">
    <interval end="1e9">
      <destProbReroute id="edge5"/>
    </interval>
  </rerouter>
  <variableSpeedSign id="disturbance" lanes="edge10_0">
    <step time="2000" speed="1"/>
    <step time="2100"/>
    <step time="3000" speed="1"/>
    <step time="3100"/>
    <step time="4000" speed="1"/>
    <step time="4100"/>
    <step time="5000" speed="1"/>
    <step time="5200"/>
    <step time="6000" speed="1"/>
    <step time="6200"/>
  </variableSpeedSign>
  <edgeData id="edgedata" file="edgedata.xml" freq="200" />
  <edgeData id="edgedataemi" type="emissions" file="emiedgedata.xml"
    freq="200" />
</additional>

```

Τα τρία αρχεία της μορφής **name.xml** που προαναφέρθηκαν συνδυάζονται στο αρχείο **FreeFlowFD.sumocfg**, με το οποίο ο χρήστης μπορεί να τρέξει τη προσομοίωση.

```

FreeFlowFD.sumocfg
<configuration>
  <input>
    <net-file value="FreeFlowFD.net.xml"/>
    <route-files value="FreeFlowFD.rou.xml"/>
    <additional-files value="FreeFlowFD.add.xml"/>
  </input>
</configuration>

```

5.3.1.2 Πρότυπο HARSH

Προκειμένου να οριστεί το πρότυπο **HARSH** αρκεί να μεταβληθεί το αρχείο **FreeFlowFD.rou.xml**, έτσι ώστε να αντικατοπτρίζει τις αλλαγές των μέγιστων επιταχύνσεων, όπως φαίνεται και στο παρακάτω πλαίσιο.

```

FreeFlowFD.rou.xml
<routes>
  <vtype id="HARSH" type="passenger" length="4.5" accel="3.84"
    decel="4.15" sigma="0.5" carFollowModel="Krauss"
    emissionClass="PHEMlight/PKW_G_EU4" />
  <flow id="HARSH" type="HARSH" begin="0" end="10800" period="3"
    departPos="last" departSpeed="max" departLane="free" from="edge1"
    to="edge5"/>
</routes>

```

5.3.1.3 Πρότυπο ECO

Ομοίως, μεταβάλλεται το αρχείο **FreeFlowFD.rou.xml**, ώστε να περιλαμβάνει τις μέγιστες επιβραδύνσεις και επιταχύνσεις του προτύπου **ECO**.

```
FreeFlowFD.rou.xml

<routes>

  <vType id="ECO" type="passenger" length="4.5" accel="1.79"
  decel="2.42" sigma="0.5" carFollowModel="Krauss"
  emissionClass="PHEMlight/PKW_G_EU4" />

  <flow id="ECO" type="ECO" begin="0" end="10800" period="3"
  departPos="last" departSpeed="max" departLane="free" from="edge1"
  to="edge5"/>

</routes>
```

5.3.1.4 Πρότυπο MIX

Σε αντίθεση με τα προηγούμενα πρότυπα, το **MIX** δεν είναι ένα ομοιογενές πρότυπο, αλλά προκύπτει ως άθροισμα των ποσοστών των επιμέρους προτύπων και θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει την πραγματική σύνθεση της κυκλοφορίας. Έτσι, ορίζονται οι τύποι των οχημάτων (vType) **DAU**, **HARSH** και **ECO**, αλλά ταυτόχρονα προστίθεται και η μεταβλητή **probability** που παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1 και ορίζει την πιθανότητα εισαγωγής ενός οχήματος κάποιου τύπου (vType) στη προσομοίωση. Για παράδειγμα, στο πρότυπο ECO η μεταβλητή **probability** παίρνει τη τιμή 0.40, οπότε για κάθε 10 οχήματα που εισάγονται στη προσομοίωση τα 4 θα έχουν τις επιταχύνσεις και τις επιβραδύνσεις του προτύπου **ECO**. Οι τιμές των μεταβλητών **probability** είναι αυτές που προέκυψαν από τα ποσοστά της σύνθεσης του προτύπου **MIX**, όπως φαίνεται στις παραγράφους 5.2.1 και 5.2.3.

```
FreeFlowFD.rou.xml

  <vType id="DAU" type="passenger" length="4.5" accel="2.46"
  decel="2.82" sigma="0.5" probability="0.46" carFollowModel="Krauss"
  emissionClass="PHEMlight/PKW_G_EU4"/>

  <flow id="DAU" type="DAU" begin="0" end="10800" period="3"
  departPos="last" departSpeed="max" departLane="free" from="edge1"
  to="edge5"/>

  <vType id="HARSH" type="passenger" length="4.5" accel="3.84"
  decel="4.15" sigma="0.5" probability="0.14" carFollowModel="Krauss"
  emissionClass="PHEMlight/PKW_G_EU4"/>

  <flow id="HARSH" type="HARSH" begin="0" end="10800" period="3"
  departPos="last" departSpeed="max" departLane="free" from="edge1"
  to="edge5"/>

  <vType id="ECO" type="passenger" length="4.5" accel="3.84"
  decel="4.17" sigma="0.5" probability="0.40" carFollowModel="Krauss"
  emissionClass="PHEMlight/PKW_G_EU4"/>

  <flow id="ECO" type="ECO" begin="0" end="10800" period="3"
  departPos="last" departSpeed="max" departLane="free" from="edge1"
  to="edge5"/>
```

5.3.1.5 Επεξεργασία δεδομένων εξόδου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στις παραδοχές της παραγράφου 5.3.1, η προσομοίωση έχει διάρκεια τριών ωρών και πραγματοποιείται μία φορά για κάθε πρότυπο. Η επεξεργασία των δεδομένων εξόδου στο παρόν στάδιο συνίσταται στην αναγωγή των μετρήσεων της ροής οχημάτων από οχήματα ανά 200 s σε οχήματα ανά ώρα και στην αναγωγή των εκπομπών ρύπων σε $g/(veh \cdot km)$.

Υπενθυμίζεται ότι τα δεδομένα εξόδου ακμής και τα δεδομένα εκπομπής ρύπων συγκεντρώνονται αθροιστικά για χρονικά διαστήματα 200 s. Αυτό σημαίνει, ότι για να είναι χρήσιμα τα δεδομένα της ροής οχημάτων πρέπει να αναχθούν σε οχήματα/ώρα. Για να γίνει αυτό, οι αθροιστικές μετρήσεις των 200 s πολλαπλασιάζονται επί 3600 s και διαιρούνται δια 200 s, σύμφωνα με τη παρακάτω σχέση:

$$flow \left[\frac{veh}{h} \right] = entered \left[\frac{veh}{200 s} \right] \cdot \frac{3600 s}{200 s} \quad (5.1)$$

Επιπλέον, χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά εξόδου **CO2_normed**, **CO_normed**, **PMx_normed** και **NOx_normed**, που έχουν μονάδα μέτρησης τα $g/(km \cdot h)$, και τη ροή οχημάτων ανά ώρα που υπολογίστηκε παραπάνω, γίνεται η αναγωγή των εκπομπών ρύπων σε $g/(veh \cdot km)$, όπως αποδεικνύεται και από τη μαθηματική σχέση που ακολουθεί.

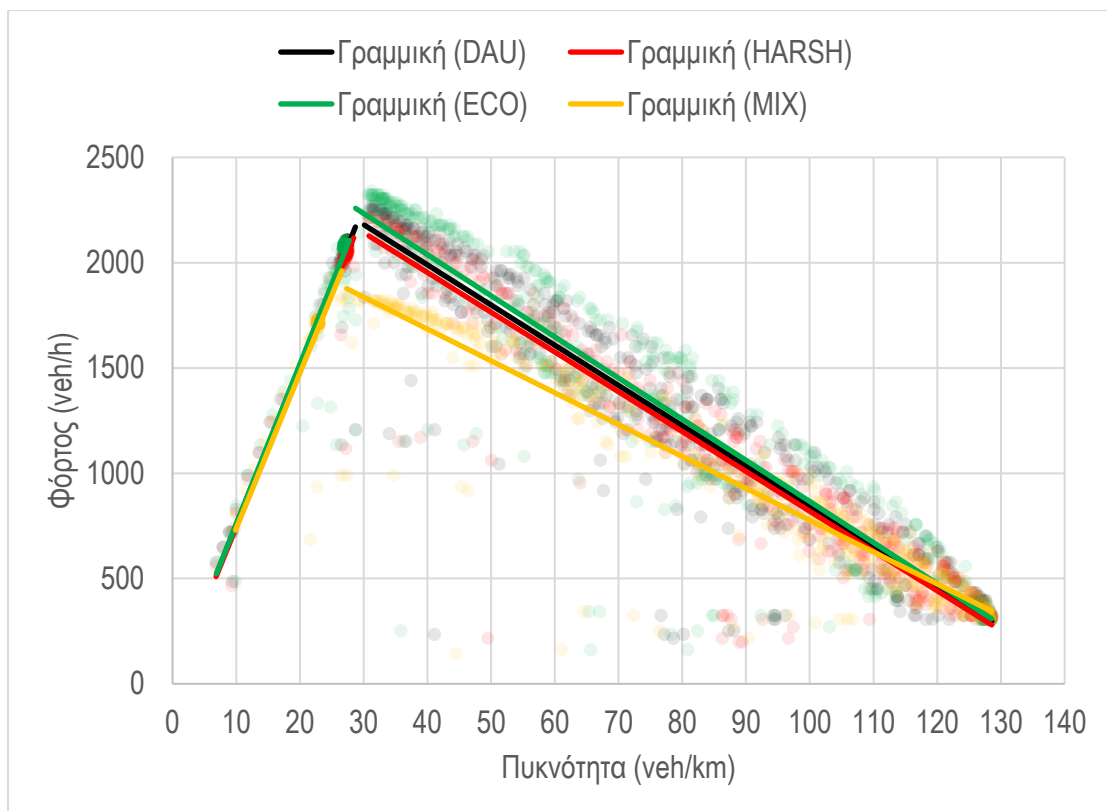
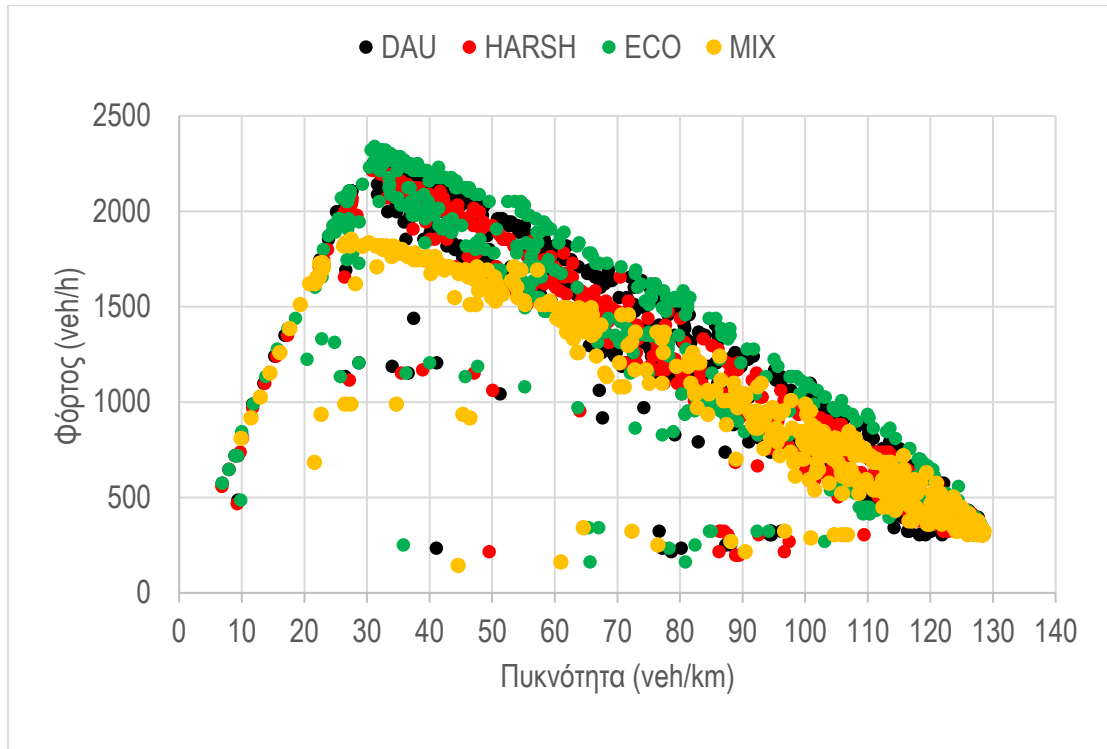
$$\frac{\frac{g}{km \cdot h}}{\frac{veh}{h}} = \frac{g}{veh \cdot km}$$

Τέλος, η ταχύτητα των οχημάτων μετατρέπεται για λόγους διευκόλυνσης του αναγνώστη από m/s σε km/h. Έτσι, προκύπτουν όλα τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για την εξαγωγή των διαγραμμάτων της επόμενης παραγράφου, πάνω στα οποία θα βασιστεί και η διατύπωση των συμπερασμάτων της διπλωματικής εργασίας.

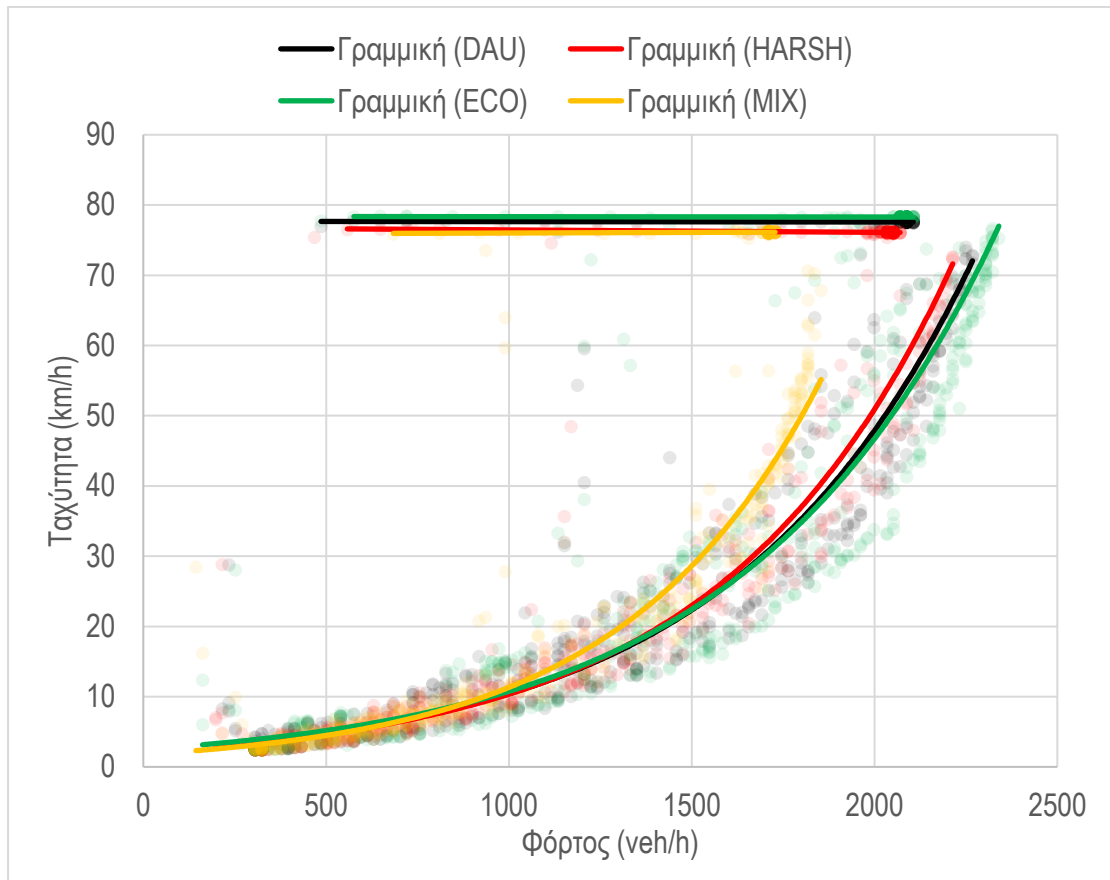
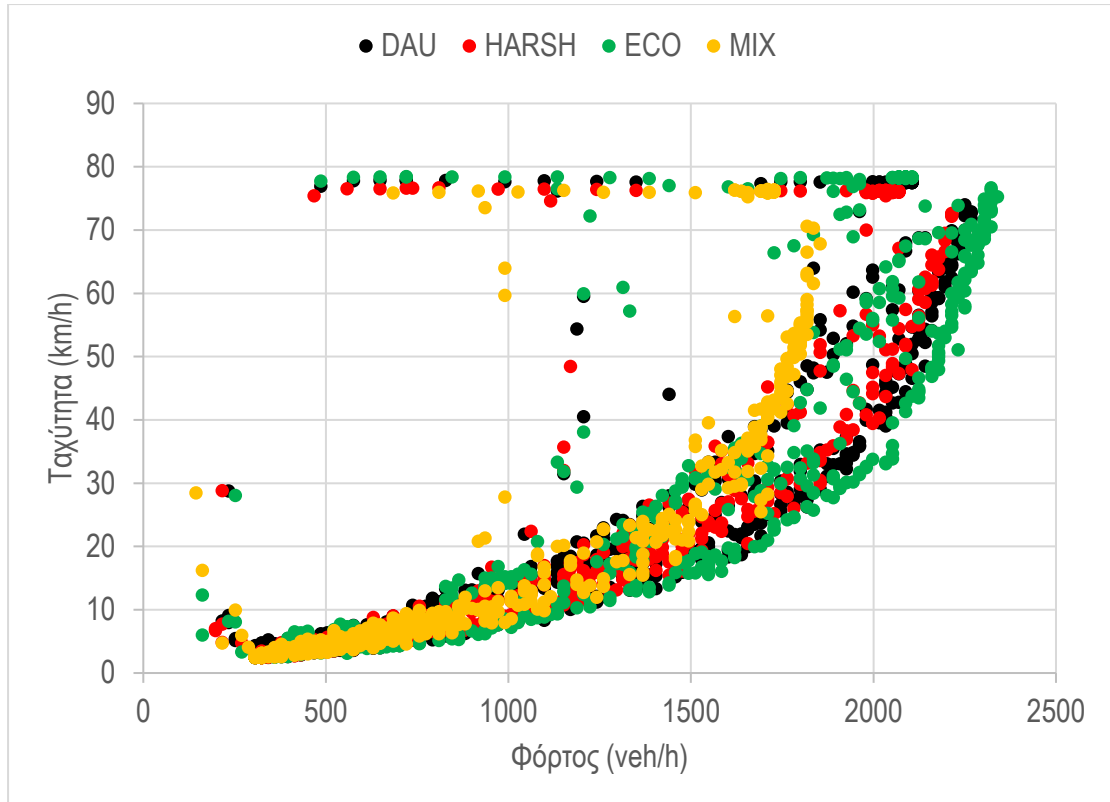
5.3.1.6 Αποτελέσματα

Αρχικά, επιχειρείται η δημιουργία των θεμελιωδών διαγραμμάτων της κυκλοφοριακής ροής προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση των τριών προτύπων **DAU**, **HARSH** και **ECO** στα θεμελιώδη μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής. Σε πρώτο στάδιο σχεδιάζονται τα σημεία των θεμελιωδών μεγεθών στα διαγράμματα φόρτου – πυκνότητας ($q - k$), ταχύτητας – φόρτου ($u_s - q$) και ταχύτητας – πυκνότητας ($u_s - k$). Στη συνέχεια, τα διαγράμματα αυτά προσεγγίζονται με γραμμικά ή εκθετικά μοντέλα προκειμένου να καταστεί

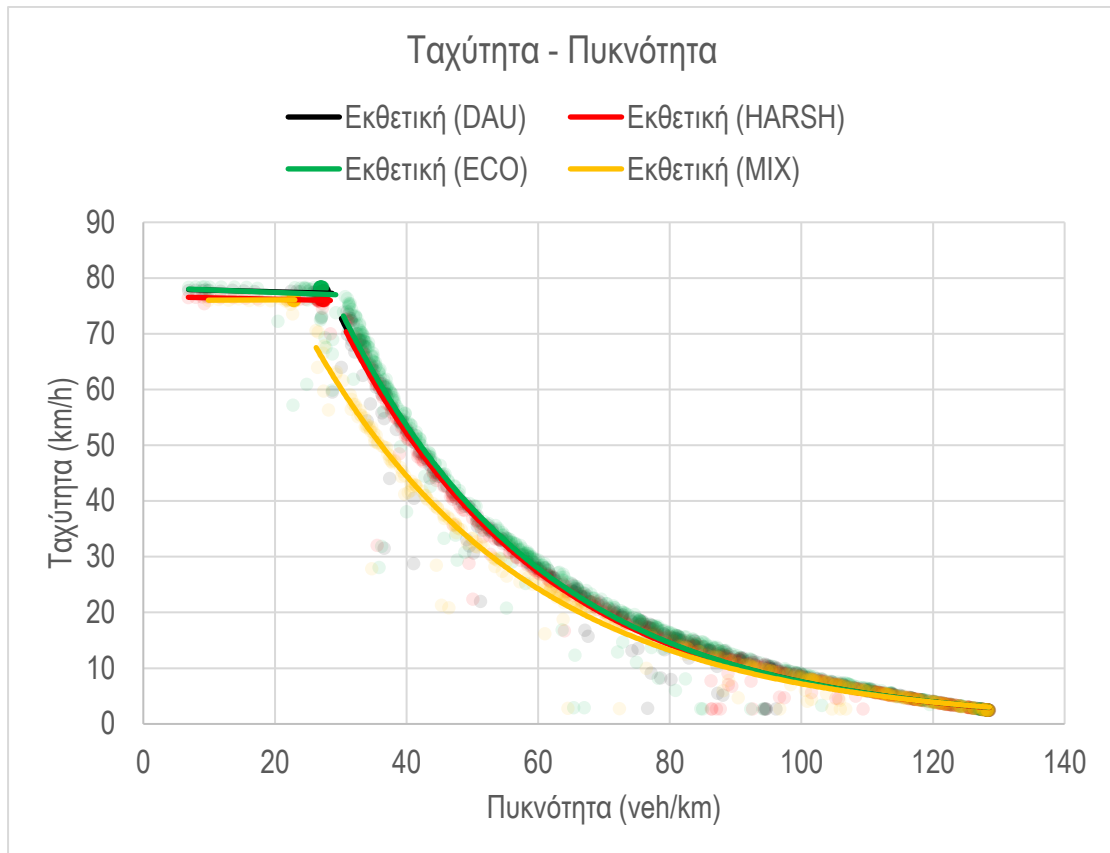
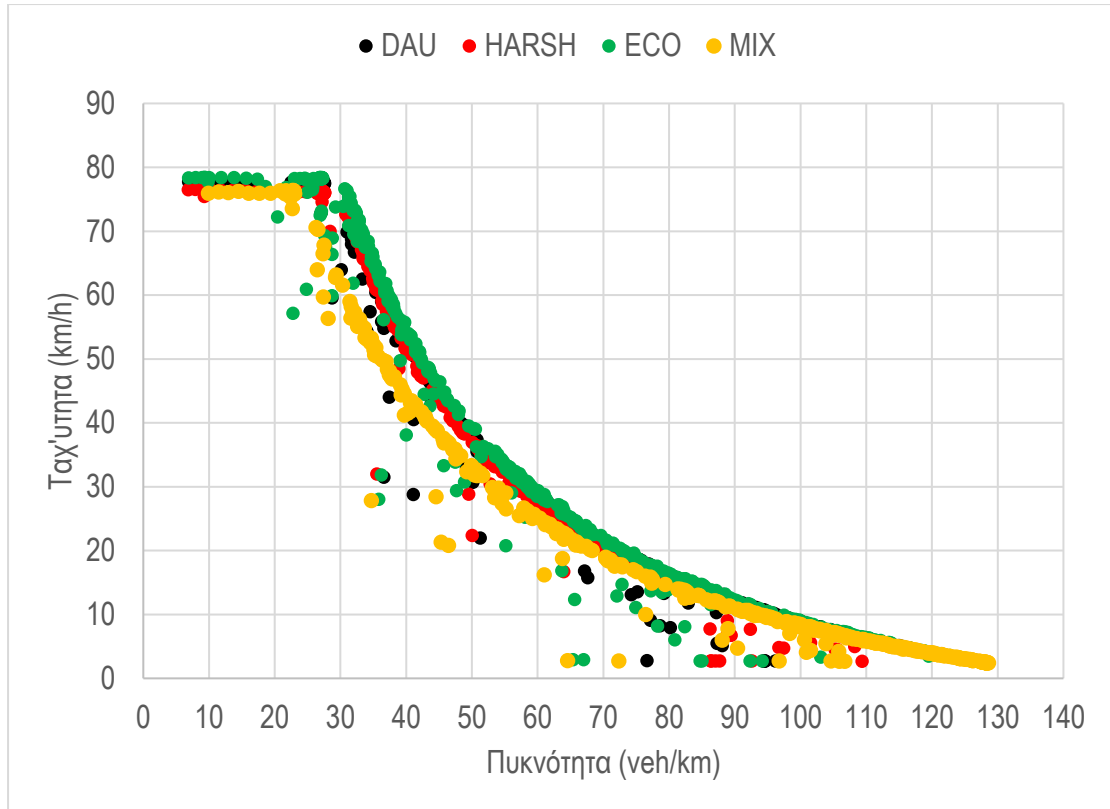
δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση των προτύπων επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων στα θεμελιώδη μεγέθη.



Σχήματα 5.6(α) - (β): Διαγράμματα φόρτου – πυκνότητας σε μη σηματοδοτούμενη αστική οδό.



Σχήματα 5.7(α) - (β): Διαγράμματα ταχύτητας – φόρτου σε μη σηματοδοτούμενη αστική οδό.



Σχήματα 5.8(α) - (β): Διαγράμματα ταχύτητας – πυκνότητας σε μη σηματοδοτούμενη αστική οδό.

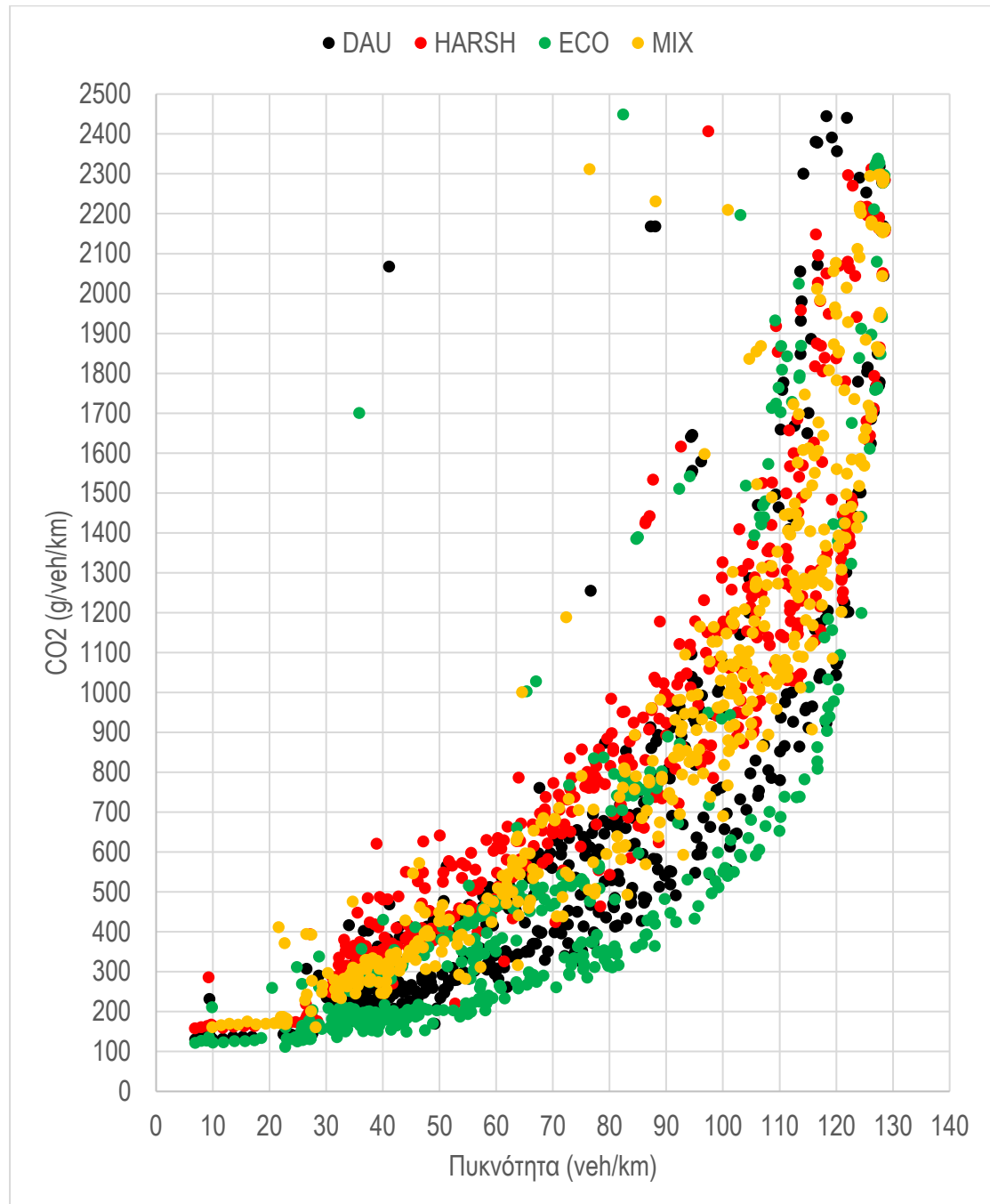
Από τα σχήματα 5.6, 5.7 και 5.8 γίνεται κατανοητό ότι μια ομοιογενής σύνθεση της κυκλοφορίας έχει ως θετικό αποτέλεσμα την αύξηση της ροής οχημάτων. Η προσομοίωση με τα πρότυπα **DAU**, **HARSH** και **ECO** οδήγησε σε όλες τις περιπτώσεις σε αύξηση του αριθμού των οχημάτων που εισέρχονται στη διαδρομή και μάλιστα, όπως γίνεται αντιληπτό ιδιαίτερα στο σχήμα 6, το πρότυπο **ECO** είναι αυτό που είχε τη θετικότερη επίδραση, με τα πρότυπα **DAU** και **HARSH** να ακολουθούν. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι τα οχήματα που έχουν τις ίδιες επιταχύνσεις ουσιαστικά βελτιστοποιούν τις μεταξύ τους αποστάσεις ασφαλείας και, επιπλέον, δεν υπάρχει πιθανότητα κάποιο όχημα με δυνατότητα υψηλών επιταχύνσεων να βρεθεί πίσω από ένα πιο αργό, το οποίο να εμποδίζει τη κίνησή του. Επίσης, τα οχήματα του προτύπου **ECO**, εκτός από το περιορισμό των επιταχύνσεών τους υπόκεινται και σε περιορισμό των επιβραδύνσεών τους. Αυτό σημαίνει ότι πραγματοποιούν λιγότερες μικρομεταβολές της ταχύτητάς τους, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της κυκλοφοριακής ικανότητας της οδού και, όπως θα φανεί παρακάτω, σε μείωση των εκπομπών ρύπων. Οι αρχές αυτές κρίνονται ιδιαίτερα σημαντικές για τα αυτόνομα οχήματα, τα οποία θα μπορούσαν να επιτύχουν αύξηση της χωρητικότητας της οδού απλώς περιορίζοντας τις διαφορές στις ικανότητές τους να επιταχύνουν και να επιβραδύνουν. Ενδέχεται, βέβαια, αυτό το φαινόμενο να έχει κόστος στην ασφάλεια των οχημάτων, καθώς ελαχιστοποιεί τα κενά ασφαλείας μεταξύ τους.

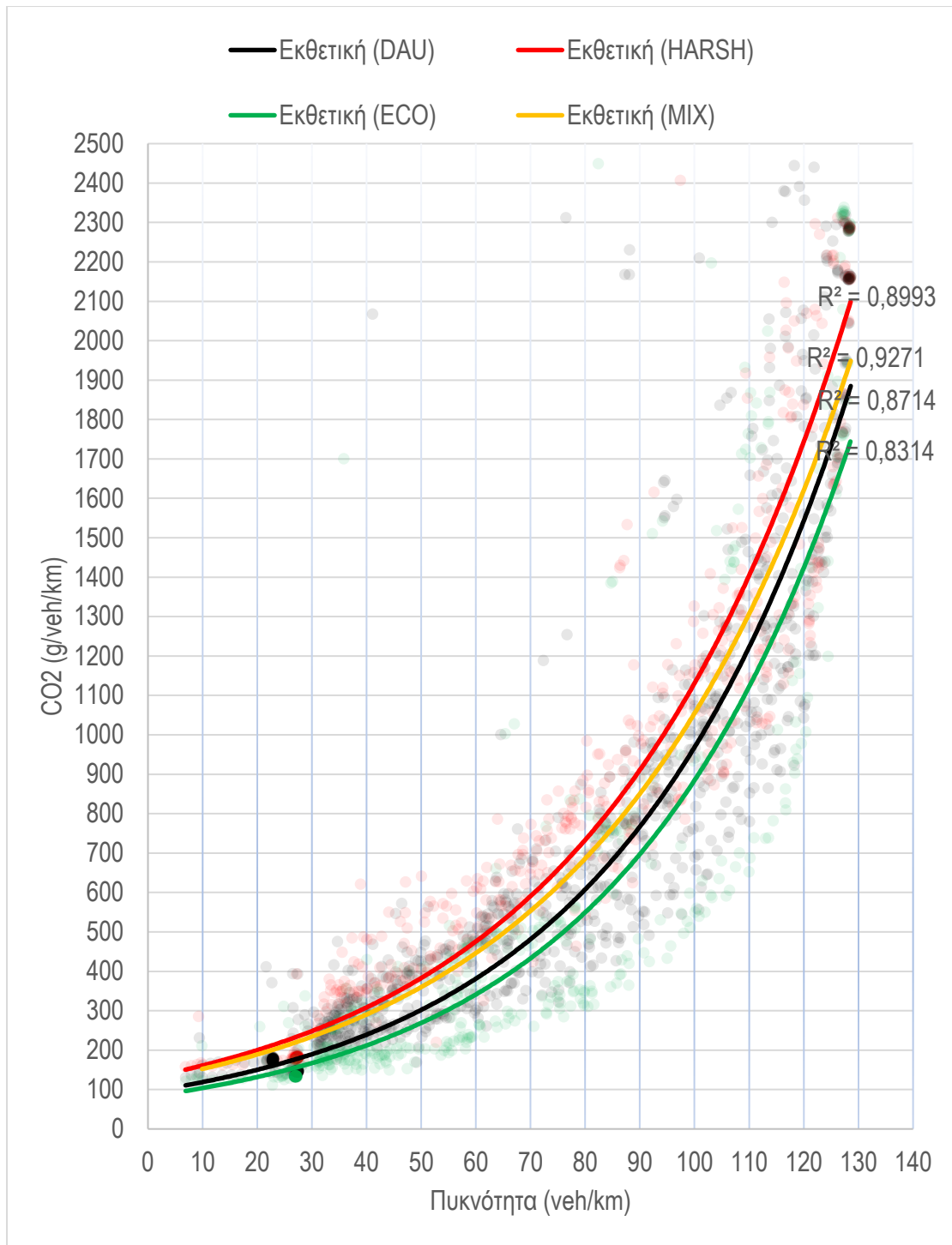
Τα σχήματα 5.7(α)-(β) δίνουν μερικές ακόμη πληροφορίες για το πώς επιτυγχάνεται αυτή η βελτίωση της ροής στο πρότυπο **ECO**. Φαίνεται ότι για την ίδια ταχύτητα ο κυκλοφοριακός φόρτος μεγιστοποιείται στο πρότυπο **ECO**, γεγονός που μπορεί να εξηγηθεί από τη μείωση των αποστάσεων ασφαλείας μεταξύ των οχημάτων. Τα οχήματα δεν πραγματοποιούν πολλές απότομες και μη προβλεπόμενες μεταβολές της ταχύτητάς τους, οπότε το ακολουθούν όχημα έχει τη δυνατότητα να κρατάει σχεδόν πάντα σταθερή απόσταση ασφαλείας από το προπορευόμενο όχημα. Όσο οι επιταχύνσεις και οι επιβραδύνσεις γίνονται μεγαλύτερες και πιο απότομες, το ακολουθούν όχημα αυξάνει το κενό ασφαλείας ή, πιο πρακτικά, χάνει χρόνο προσπαθώντας να προσαρμόσει τη ταχύτητά του σε αυτή του προπορευόμενου οχήματος. Για να το κάνει αυτό, πραγματοποιεί επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις, οι οποίες μπορεί να μη γίνονται αντιληπτές από τον ερευνητή που χρησιμοποιεί το μικροσκοπικό προσομοιωτή, εντούτοις οδηγούν σε αύξηση των ρύπων. Έτσι, το αποτέλεσμα είναι ότι τελικά επιτυγχάνεται μικρότερη μέση ταχύτητα, όπως φαίνεται στα σχήματα 8(α) και (β), επειδή τα οχήματα δεν μπορούν να εξαντλήσουν τη δυνατότητά τους να αναπτύξουν ταχύτητα.

Στην παρούσα φάση η προσομοίωση δεν απέχει πολύ από τη πραγματικότητα. Ο περιορισμός των επιταχύνσεων και των επιβραδύνσεων από τους οδηγούς μπορεί όντως να οδηγήσει στη βελτίωση της κυκλοφοριακής ροής, αξιοποιώντας, ίσως, ένα σύστημα συνεργασίας οδηγών (ITS), όπου θα δίνονται συμβουλές στους οδηγούς για την ομαλοποίηση και την εναρμόνιση των μεταξύ τους διαφορών στις επιταχύνσεις και τις επιβραδύνσεις. Οι διαφορές των

προτύπων **DAU**, **HARSH** και **ECO** μεταξύ τους δεν κρίνονται πολύ μεγάλες, ωστόσο κρίνονται σημαντικές σε σχέση με το πρότυπο **MIX**. Αυτό αναπόφευκτα οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της χωρητικότητας της οδού οφείλεται αποκλειστικά σε δύο παράγοντες: αφενός στην ύπαρξη ομοιογενούς ροής και αφετέρου στο περιορισμό των στιγμιαίων μεταβολών της ταχύτητας των οχημάτων, όταν αυτά βρίσκονται κοντά το ένα με το άλλο.

Στα επόμενα διαγράμματα γίνεται η εξέταση της επίδρασης αυτών των προτύπων στις εκπομπές ρύπων.

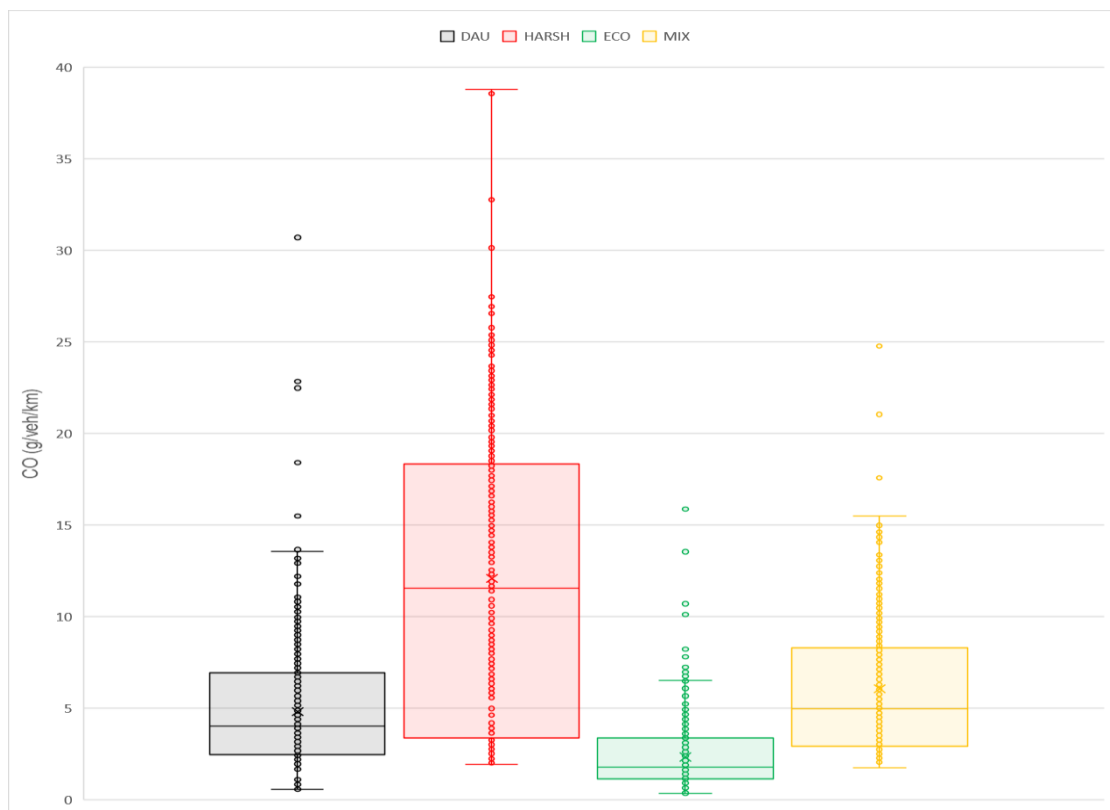
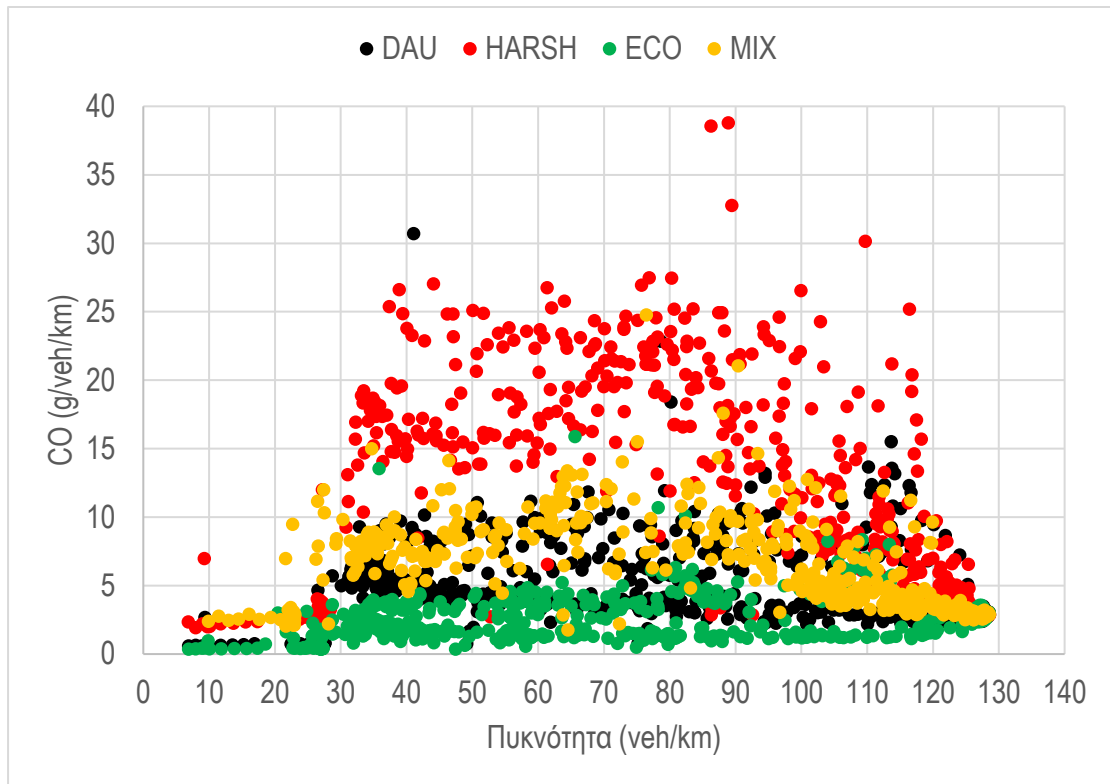




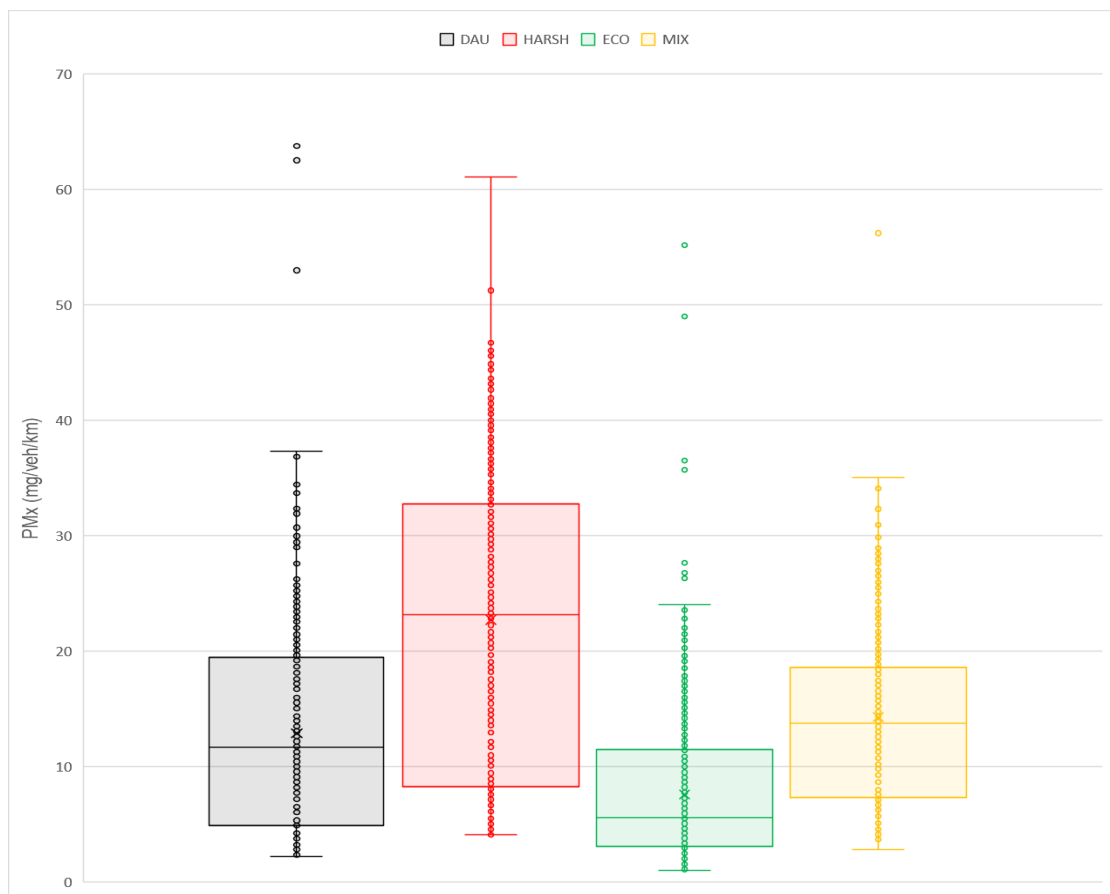
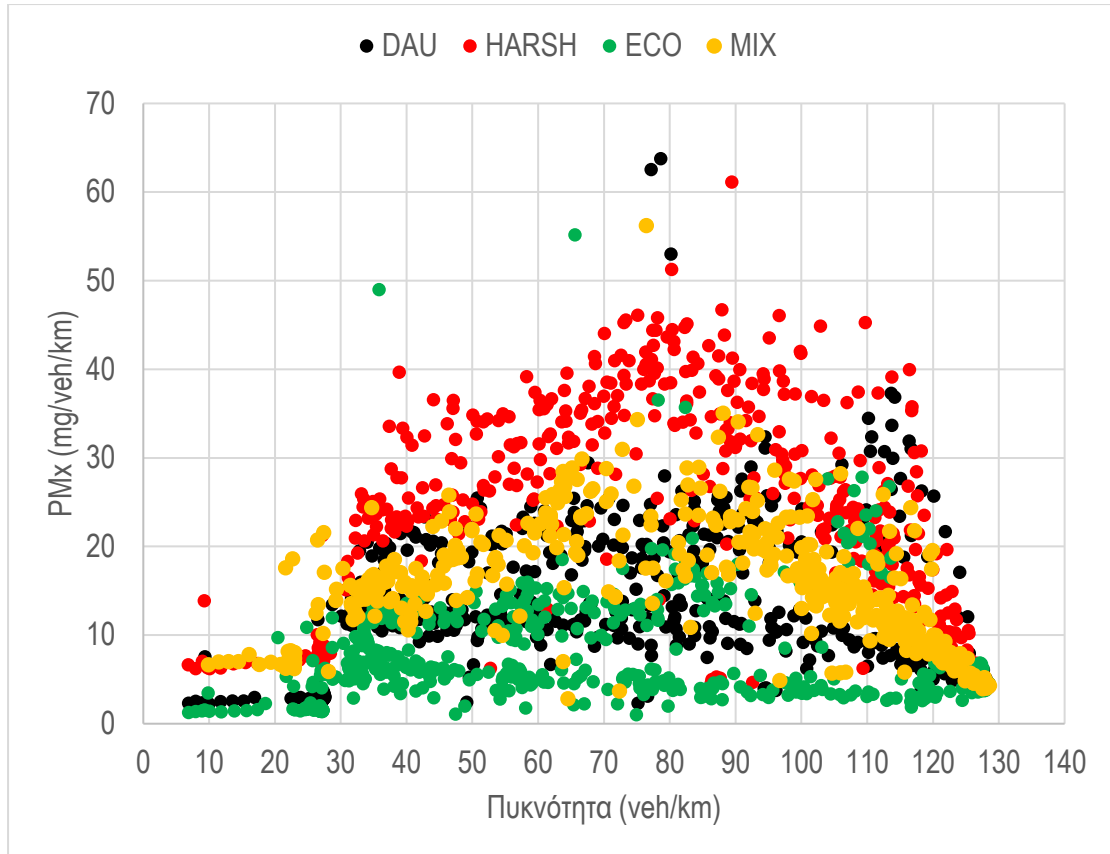
Σχήματα 5.9(α) - (β): Διαγράμματα εκπομπών CO₂ – πυκνότητας.

Στα σχήματα 5.9(α)-(β) παρατηρείται, όπως αναμενόταν, ότι το πρότυπο **HARSH** προκαλεί τις υψηλότερες εκπομπές CO₂ ανά όχημα και ανά χιλιόμετρο. Το πρότυπο **MIX** αντιστοιχεί σε μια μέση κατάσταση, ενώ ακολουθούν τα πρότυπα **DAU** και **ECO**, με το τελευταίο να παρουσιάζει τις χαμηλότερες εκπομπές ρύπων. Με βάση τα εκθετικά μοντέλα φαίνεται ότι το πρότυπο **ECO** παρουσιάζει σταθερά χαμηλότερες εκπομπές CO₂ σε σχέση με το πρότυπο **MIX**, ωστόσο, όπως θα φανεί στη συνέχεια (σχήμα 5.13) οι διαφορές στη

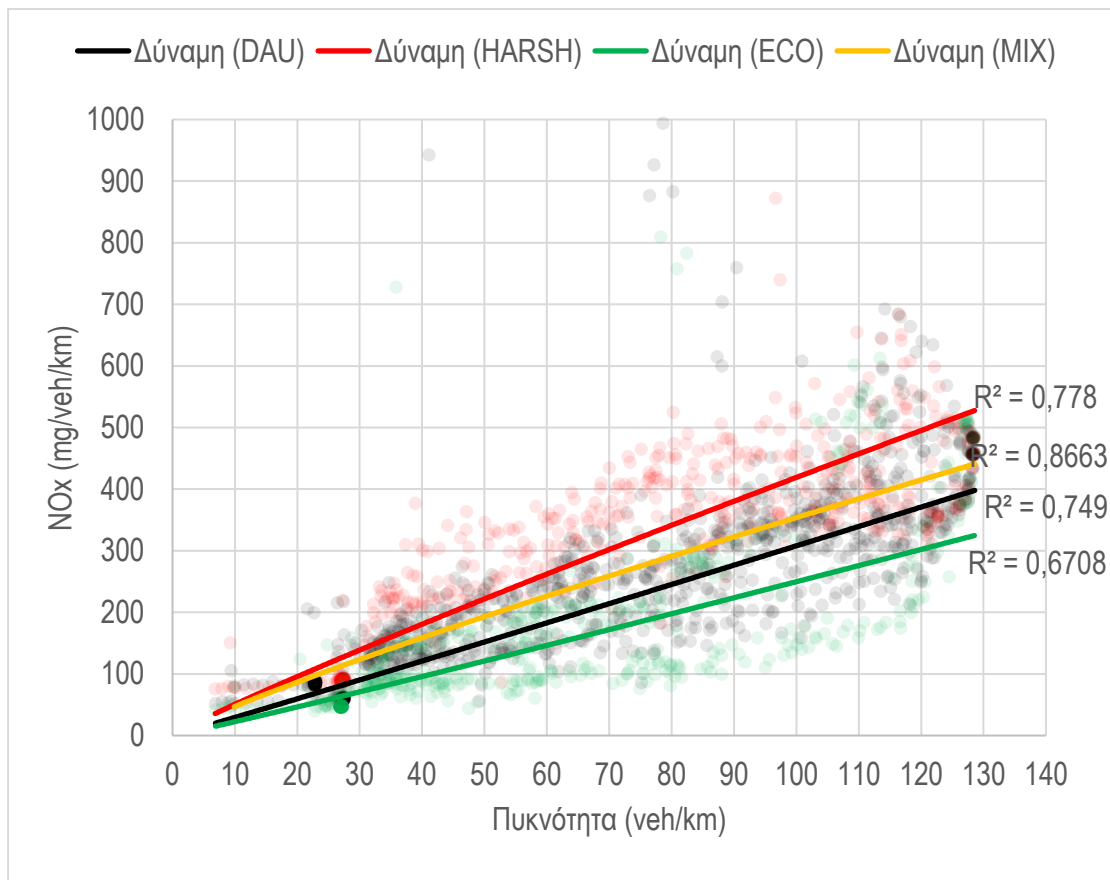
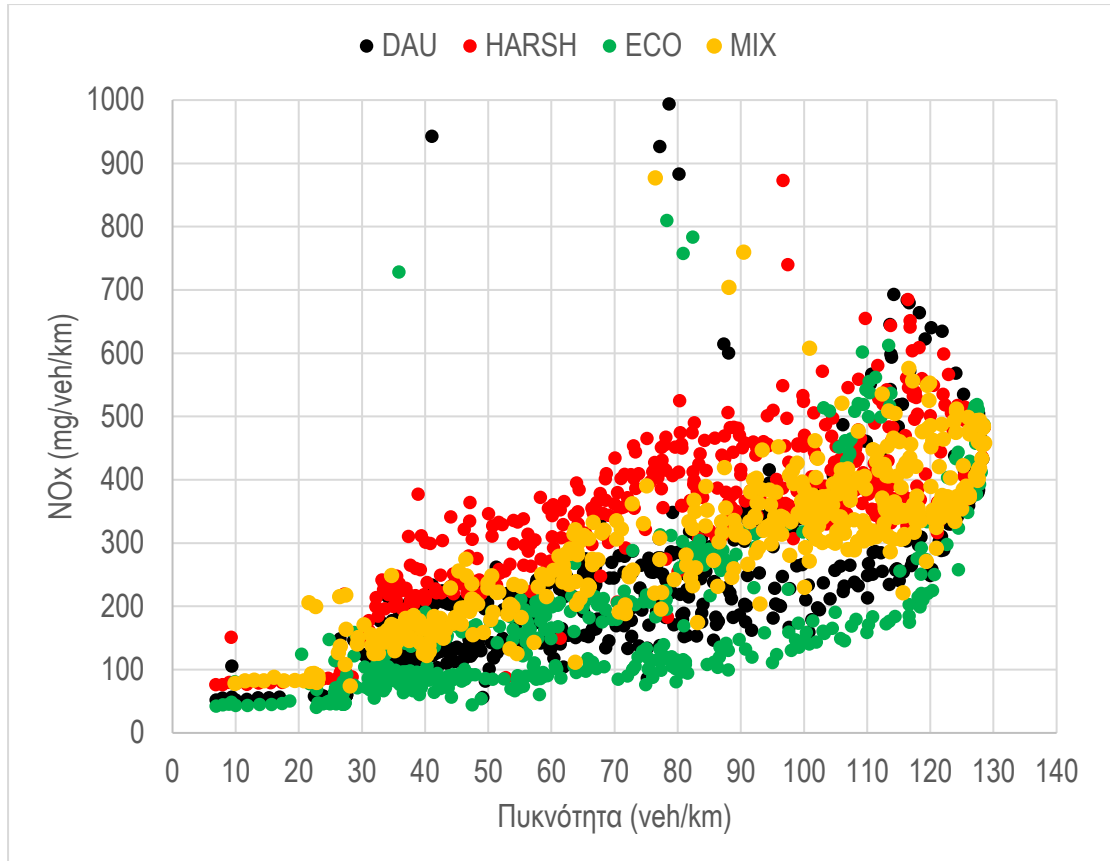
πραγματικότητα δεν είναι σταθερές, αλλά οφείλονται στη προσέγγιση με το εκθετικό μοντέλο. Ανάλογα διαγράμματα μπορούν να σχεδιαστούν και για τους ρύπους CO, PM_x και NO_x.



Σχήματα 5.10(α) - (β): Διαγράμματα εκπομπών CO.



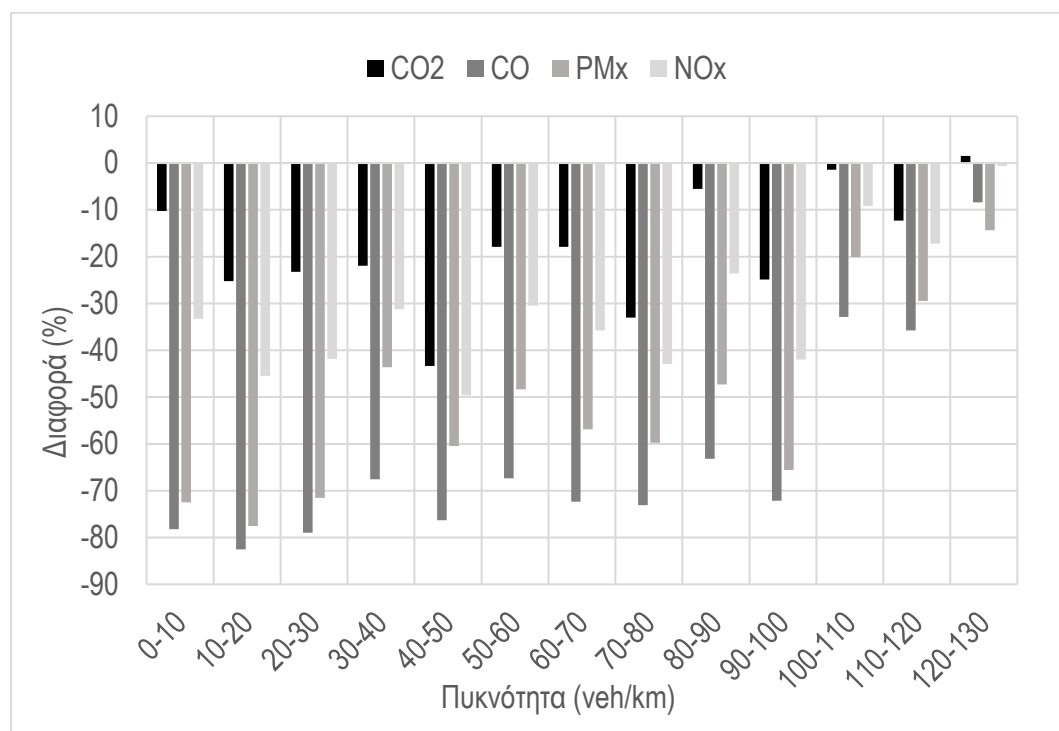
Σχήματα 5.11(α) - (β): Διαγράμματα εκπομπών PMx.



Σχήματα 5.12(α) - (β): Διαγράμματα εκπομπών NOx – πυκνότητας.

Ανάλογες παρατηρήσεις μπορούν να διατυπωθούν και για τις εκπομπές ρύπων CO, PM_x και NO_x. Το πρότυπο **HARSH** οδηγεί σε όλες τις περιπτώσεις σε αύξηση των ρύπων, ενώ το πρότυπο **ECO** οδηγεί σε αισθητή μείωση των ρύπων. Όπως αναμενόταν, τα πρότυπα **DAU** και **MIX** αντιστοιχούν σε μια μέση κατάσταση όσον αφορά τους ρύπους, με το **MIX** να προκαλεί λίγο υψηλότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση.

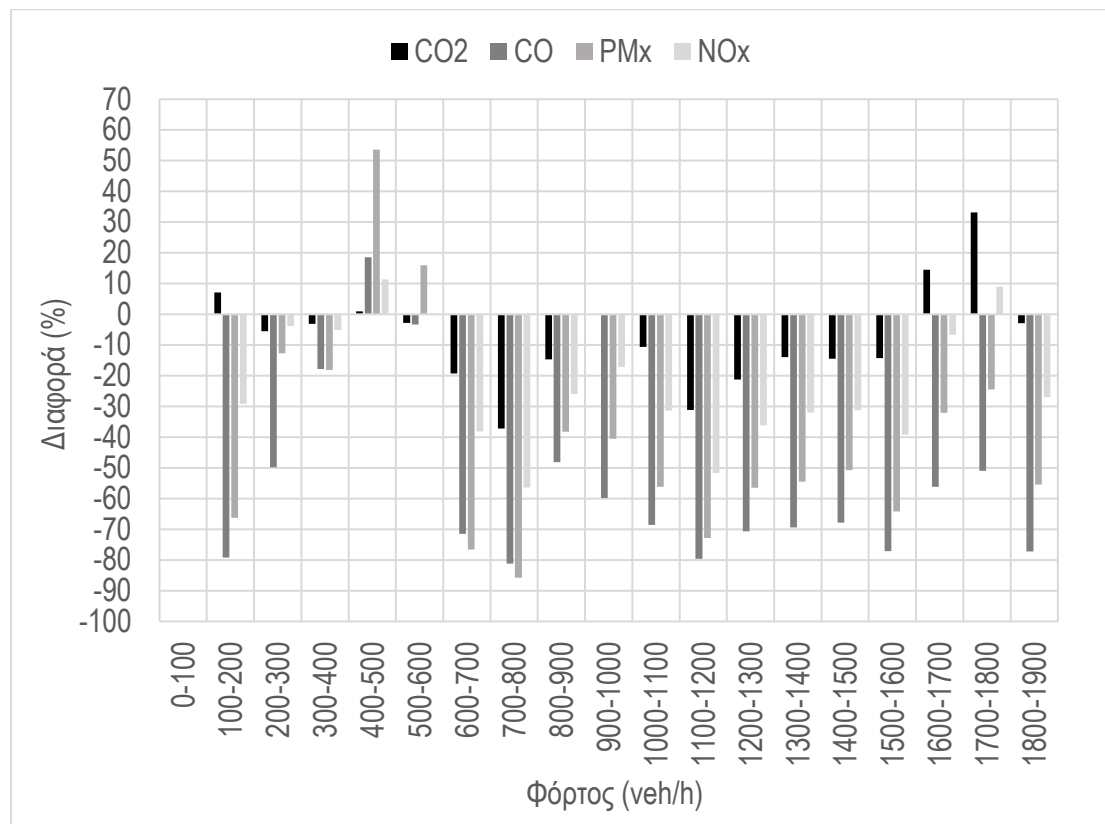
Συνεπώς, γίνεται κατανοητό ότι η οδήγηση με χαμηλότερες και ομαλότερες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις όσον αφορά τη κίνηση σε οδό χωρίς σηματοδότηση έχει το πλεονέκτημα της μείωσης των εκπομπών για όλους τους ρύπους που εξετάστηκαν, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το μικροσκοπικό προσομοιωτή SUMO. Αυτή η μείωση ποσοτικοποιείται στα επόμενα δύο ραβδογράμματα, όπου φαίνεται η ποσοστιαία μείωση των ρύπων στο πρότυπο **ECO** σε σύγκριση με το πρότυπο **MIX**. Με άλλα λόγια, ποσοτικοποιούνται τα οφέλη της οικολογικής οδήγησης.



Σχήμα 5.13: Μείωση εκπομπών ρύπων στο πρότυπο ECO σε σχέση με το πρότυπο MIX.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.13, συντελείται σημαντική μείωση των εκπομπών ρύπων στο πρότυπο **ECO**. Η μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση παρατηρείται σταθερά στο CO, ενώ η διαφορά των εκπομπών CO₂ κινείται μεταξύ του -43.34% και του 1.51%. Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.14, όπου οι εκπομπές ρύπων παρουσιάζονται συναρτήσει του φόρτου οχημάτων. Σε αυτή τη περίπτωση παρατηρείται ότι η μείωση του CO₂ αρχίζει να συντελείται σε φόρτο οχημάτων 500 οχ./ώρα και πάνω, Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι η πυκνότητα και ο φόρτος μπορεί να σχετίζονται με δύο τρόπους, πρώτον σε συμφορημένη ροή και δεύτερον σε μη

συμφορημένη ροή και, συνεπώς, τα σχήματα 5.13 και 5.14 δεν πρέπει να τίθενται σε σύγκριση μεταξύ τους.



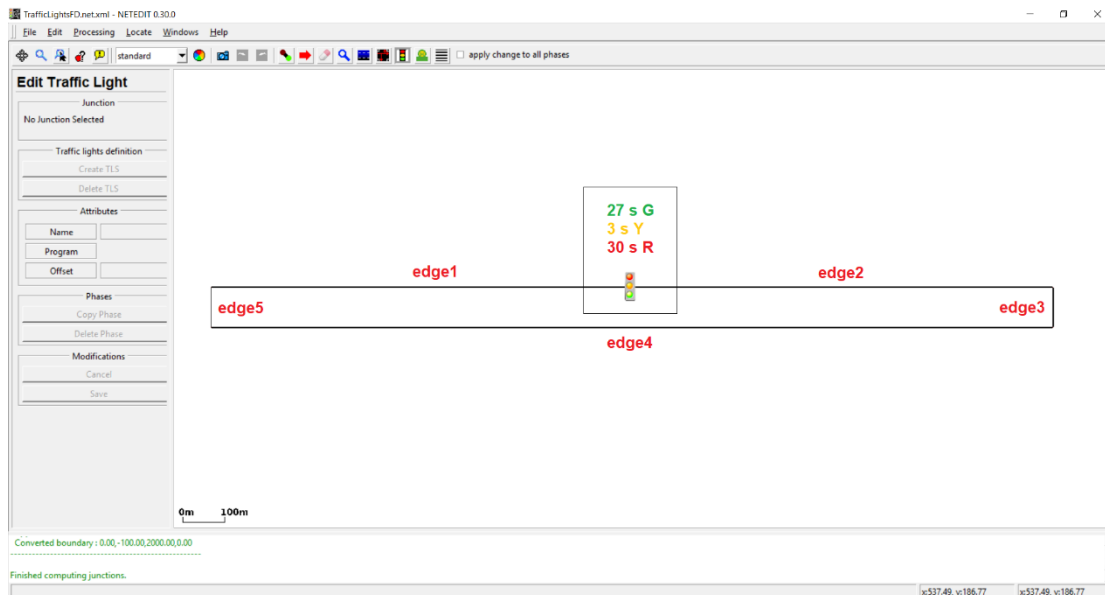
Σχήμα 5.14: Η μείωση των εκπομπών ρύπων στο πρότυπο ECO σε σχέση με το πρότυπο MIX συναρτήσεσι του φόρτου.

5.3.2 Ροή σε οδό με σηματοδοτούμενο κόμβο

- Προσομοίωση σε αστική οδό μίας λωρίδας προς μία κατεύθυνση με όριο ταχύτητας τα 50 km/h.
- Το καθαρό μήκος των οχημάτων είναι 4.5 m.
- Το κενό ασφαλείας μεταξύ των οχημάτων είναι 2.5 m.
- Η ατέλεια του οδηγού στο να διατηρεί σταθερή την ταχύτητα του οχήματός του είναι 0.5. Η τιμή αυτή προτείνεται από το SUMO. Αυτός ο συντελεστής ονομάζεται ϵ στις σχέσεις του μοντέλου του Krauss.
- Τα οχήματα είναι τεχνολογίας κινητήρα Euro 4, αμόλυβδης βενζίνης.
- Τα δεδομένα συγκεντρώνονται αθροιστικά για χρονικά διαστήματα 200 s προκειμένου να μειωθεί ο όγκος τους και να αυξηθεί η ακρίβεια των μετρήσεων.
- Τοποθετείται φωτεινός σηματοδότης περιόδου ενός λεπτού, με το πράσινο να διαρκεί 27 s, το κίτρινο 3 s και το κόκκινο 30 s.
- Για κάθε πρότυπο η προσομοίωση διάρκειας 10 ωρών επαναλαμβάνεται 3 φορές.

Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση των προτύπων **DAU**, **HARSH** και **ECO** στους ρύπους, όταν τα οχήματα αναγκάζονται να σταματήσουν εξαιτίας ενός φωτεινού σηματοδότη, δημιουργήθηκε ένα νέο σενάριο. Το σενάριο αυτό βασίζεται σε μια κλειστή διαδρομή που αποτελείται από 5 ακμές (edges) και 5 κόμβους (junctions). Μεταξύ των ακμών 1 και 2, δηλαδή στον κόμβο 2, τοποθετείται φωτεινός σηματοδότης, ο οποίος έχει περίοδο ενός λεπτού. Πιο αναλυτικά, ο σηματοδότης προγραμματίζεται έτσι ώστε να αποτελείται από πράσινη ένδειξη για χρονικό διάστημα 27 δευτερολέπτων, κίτρινη ένδειξη για διάστημα 3 δευτερολέπτων και κόκκινη ένδειξη για διάστημα 30 δευτερολέπτων. Ο φωτεινός σηματοδότης συμβάλλει καθοριστικά σε δύο λειτουργίες: αφενός αναγκάζει τα οχήματα να σταματούν σε τακτικά χρονικά διαστήματα και αφετέρου μειώνει αισθητά τη ταχύτητα των οχημάτων, οπότε δημιουργείται χώρος για εισαγωγή νέων οχημάτων στη προσομοίωση.

Το δίκτυο που χρησιμοποιείται στο παρόν στάδιο είναι ένα κλειστό και τετραγωνικό δίκτυο. Το όριο ταχύτητας ορίστηκε στα 13.89 m/s (50 km/h), που αποτελεί μια τυπική τιμή του ορίου ταχύτητας σε αστικές οδούς, έτσι ώστε να αποφευχθούν εξαναγκασμένες απότομες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις ακριβώς πριν από τον φωτεινό σηματοδότη. Το δίκτυο σχεδιάζεται στην εφαρμογή NETEDIT και αποθηκεύεται με το όνομα **TrafficLightsFD.net.xml**. Η ακμή 1 είναι η πιο σημαντική, καθώς από αυτή θα ληφθούν όλα τα δεδομένα εξόδου από τη προσομοίωση. Ωστόσο, σε αντίθεση με το προηγούμενο σενάριο, η ακμή 1 έχει μήκος 1 km και, συνεπώς, οι τιμές των ρύπων που προκύπτουν είναι ήδη ανηγμένες στο χιλιόμετρο.



Σχήμα 5.15: Το κλειστό, τετραγωνικό δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε στη προσομοίωση ροής με σηματοδότηση.

5.3.2.1 Πρότυπο DAU

Έπειτα, ορίζεται το αρχείο **TrafficLightsFD.rou.xml** που περιλαμβάνει τους τύπους των οχημάτων. Σε σύγκριση με το προηγούμενο σενάριο, εισάγεται ένας επιπλέον παράγοντας αβεβαιότητας, ο οποίος εκφράζεται με τη μεταβλητή **speedFactor**, ώστε να προκαλεί μεταβολές στις διαδοχικές επαναλήψεις της προσομοίωσης και να μειωθεί η πιθανότητα να προκύψουν πανομοιότυπα αποτελέσματα. Η μεταβλητή αυτή ορίζεται ως **speedFactor="normc(mean, dev, min, max)"**, όπου επιλέγονται τυχαία ταχύτητες κίνησης οχημάτων από τη κανονική κατανομή με μέση τιμή *mean*, τυπική απόκλιση *dev*, κάτω όριο *min* και άνω όριο *max*.

```

TrafficLightsFD.rou.xml

<routes>
  <vtype id="DAU" type="passenger" accel="2.46" decel="2.82"
sigma="0.5" length="4.50" speedFactor="normc(1,0.1,0.2,2)"
carFollowModel="Krauss" emissionClass="PHEMlight/PKW_G_EU4"/>
  <flow id="DAU" type="DAU" departSpeed = "random" departLane="free"
beg="0" end="72000" vehsPerHour="20" from="edge1" to="edge2" />
</routes>
```

Σύμφωνα με το παραπάνω πλαίσιο, ορίζονται τα οχήματα του προτύπου **DAU**. Η μεταβλητή **speedFactor="normc(1,0.1,0.2,2)"** ορίζει ότι το 95% των οχημάτων ταξιδεύει με ταχύτητα μεταξύ του 90% και του 110% του ορίου ταχύτητας που έχει τεθεί για το παρόν σενάριο. Επιπρόσθετα, το κάτω όριο ορίζεται στο 20% της επιτρεπόμενης ταχύτητας, ενώ το πάνω όριο ορίζεται στο 200% της επιτρεπόμενης ταχύτητας. Η μεταβλητή **departSpeed="random"** ορίζει ότι κατά την εισαγωγή τους στη προσομοίωση τα οχήματα έχουν ταχύτητα στο διάστημα από το 0 μέχρι και το επιτρεπόμενο όριο ταχύτητας της ακμής στην οποία εισάγονται. Τέλος, η μεταβλητή **vehsPerHour="20"** υποδηλώνει ότι το SUMO θα προσπαθήσει να εισάγει 20 νέα οχήματα κάθε ώρα στη προσομοίωση, με τη προϋπόθεση ότι τα κενά μεταξύ των οχημάτων είναι επαρκή.

Τα οχήματα που ολοκληρώνουν τη διαδρομή από την ακμή 1 μέχρι την ακμή 2 δεν πρέπει να εγκαταλείψουν τη προσομοίωση. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται **rerouters**, όπως ορίζεται στο αρχείο **TrafficLightsFd.add.xml**, όπου φαίνεται ότι όσα οχήματα φτάνουν στην ακμή 2 επαναδρομολογούνται προς την ακμή 5 και αντίστροφα. Επιπλέον, για να λάβει ο χρήστης τα δεδομένα εξόδου από την ακμή 1, ορίζονται τα ονόματα των αρχείων εξόδου, όπου το αρχείο δεδομένων εξόδου ακμής ονομάζεται **edgedata.xml** και τα δεδομένα συλλέγονται αθροιστικά για 200 s (μεταβλητή **freq**), ενώ το αρχείο των δεδομένων εκπομπών ρύπων ονομάζεται **edgedataemi.xml**, είναι τύπου (**type**) εκπομπών (**emissions**) και συλλέγεται αθροιστικά για 200 s. Τέλος, τοποθετείται ένας ελεγκτής επαγωγικού βρόχου (**induction loops detector**) στο μέσο της ακμής 2 με όνομα αρχείου εξόδου

inductionloop.xml. Έτσι, ο χρήστης ορίζει ποια αρχεία εξόδου χρειάζεται και με ποιο τρόπο πρέπει αυτά να συλλεχθούν.

```

TrafficLightsFD.add.xml

<additional>
  <rerouter id="rerouter_0" edges="edge2">
    <interval end="1e9">
      <destProbReroute id="edge5"/>
    </interval>
  </rerouter>
  <rerouter id="rerouter_1" edges="edge5">
    <interval end="1e9">
      <destProbReroute id="edge2"/>
    </interval>
  </rerouter>
  <inductionLoop id="inductionLoop" file="inductionloop.xml"
  lane="edge2_0" pos="500" freq="200" />
  <edgeData id="edgedata" file="edgedata.xml" freq="200" />
  <edgeData id="edgedataemi" type="emissions" freq="200"
  file="emi.edgedata.xml" excludeEmpty="true"/>
</additional>

```

Τα τρία αρχεία της μορφής **name.xml** που προαναφέρθηκαν συνδυάζονται στο αρχείο **TrafficLightsFD.sumocfg**, με το οποίο ο χρήστης μπορεί να τρέξει τη προσομοίωση.

```

TrafficLightsFD.sumocfg

<configuration>
  <input>
    <net-file value="TrafficLightsFD.net.xml"/>
    <route-files value="TrafficLightsFD.rou.xml"/>
    <additional-files value="TrafficLightsFD.add.xml"/>
  </input>
</configuration>

```

5.3.2.2 Πρότυπο HARSH

Κατά όμοιο τρόπο ορίζεται το πρότυπο **HARSH**. Το αρχείο **TrafficLightsFD.rou.xml** μεταβάλλεται έτσι ώστε να περιλαμβάνει τις νέες, υψηλότερες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις.

```

TrafficLightsFD.rou.xml

<routes>
  <vType id="HARSH" type="passenger" accel="3.84" decel="4.15"
  sigma="0.5" length="4.50" speedFactor="normc(1,0.1,0.2,2)"
  carFollowModel="Krauss" emissionClass="PHEMlight/PKW_G_EU4"/>
  <flow id="HARSH" type="HARSH" departSpeed = "random"
  departLane="free" beg="0" end="72000" vehsPerHour="20" from="edge1"
  to="edge2" />
</routes>

```

5.3.2.3 Πρότυπο ECO

Παρομοίως, μεταβάλλεται το αρχείο **TrafficLightsFD.rou.xml**, ώστε να περιλαμβάνει τις ομαλότερες επιταχύνσεις του προτύπου **ECO**.

```

TrafficLightsFD.rou.xml

<routes>
  <vType id="ECO" type="passenger" accel="1.79" decel="2.42"
sigma="0.5" length="4.50" speedFactor="normc(1,0.1,0.2,2)"
carFollowModel="Krauss" emissionClass="PHEMlight/PKW_G_EU4"/>
  <flow id="ECO" type="ECO" departSpeed = "random" departLane="free"
beg="0" end="72000" vehsPerHour="20" from="edge1" to="edge2" />
</routes>

```

5.3.2.4 Πρότυπο MIX

Όπως έχει ειπωθεί πολλές φορές σε προηγούμενες παραγράφους, το πρότυπο **MIX** αποτελείται από το ποσοστιαίο άθροισμα των προτύπων **DAU**, **HARSH** και **ECO**. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η μεταβλητή **probability**, η οποία παίρνει τις τιμές 0.46, 0.14 και 0.40 στους ορισμούς των τύπων οχημάτων (**vType**) των προτύπων **DAU**, **HARSH** και **ECO** αντίστοιχα.

```

TrafficLightsFD.rou.xml

routes>
  <vType id="DAU" accel="2.46" decel="2.82" sigma="0.5"
probability="0.46" length="4.50" speedFactor="normc(1,0.1,0.2,2)"
carFollowModel="Krauss" emissionClass="PHEMlight/PKW_G_EU4"/>
  <flow id="DAU" type="DAU" departSpeed = "random" departLane="free"
beg="0" end="72000" vehsPerHour="20" from="edge1" to="edge2" />
  <vType id="HARSH" accel="3.84" decel="4.15" sigma="0.5"
probability="0.14" length="4.50" speedFactor="normc(1,0.1,0.2,2)"
carFollowModel="Krauss" emissionClass="PHEMlight/PKW_G_EU4"/>
  <flow id="HARSH" type="HARSH" departSpeed = "random"
departLane="free" beg="0" end="72000" vehsPerHour="20" from="edge1"
to="edge2" />
  <vType id="ECO" accel="1.79" decel="2.42" sigma="0.5"
probability="0.40" length="4.50" speedFactor="normc(1,0.1,0.2,2)"
carFollowModel="Krauss" emissionClass="PHEMlight/PKW_G_EU4"/>
  <flow id="ECO" type="ECO" departSpeed = "random" departLane="free"
beg="0" end="72000" vehsPerHour="20" from="edge1" to="edge2" />
</routes>

```

5.3.2.5 Επεξεργασία δεδομένων εξόδου

Στο παρόν σενάριο η επεξεργασία των δεδομένων εξόδου αποτελείται από δύο βήματα. Αρχικά, εφαρμόζεται η σχέση 5.1 για τη μετατροπή της ροής οχημάτων ανά 200 s σε ροή οχημάτων ανά ώρα. Έπειτα, για να βρεθεί ο μέσος όρος των

εκπομπών ρύπων υπό συγκεκριμένες τιμές πυκνότητας και ροής οχημάτων στην ακμή 1 χρησιμοποιείται η συνάρτηση **AVERAGEIFS** του Excel, η οποία περιλαμβάνει τρεις όρους που αντιστοιχούν στο εύρος των τιμών από τις οποίες προκύπτει ο μέσος όρος, τη συνθήκη 1 και τη συνθήκη 2. Οι συνθήκες 1 και 2 ορίζουν το κατώτερο και το ανώτερο όριο του εύρους της ροής ή της πυκνότητας για τις οποίες υπολογίζεται η μέση τιμή, όπως φαίνεται και στη παρακάτω εικόνα.

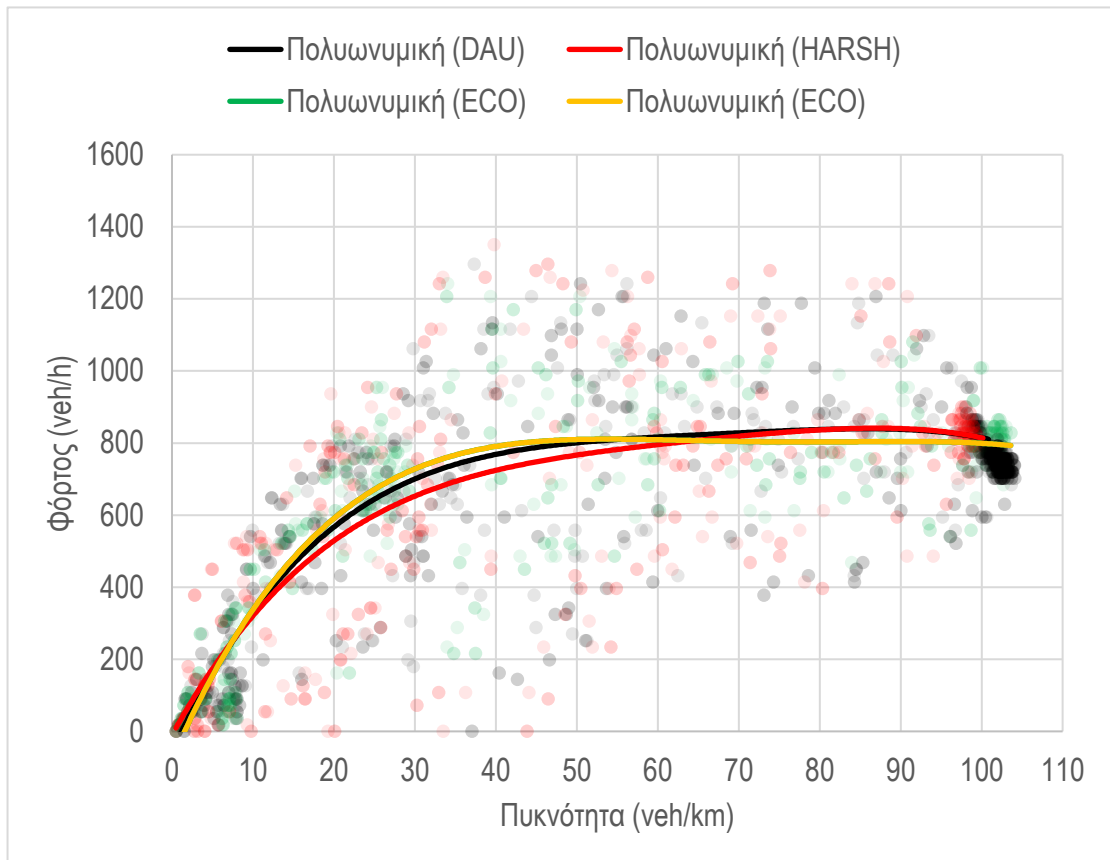
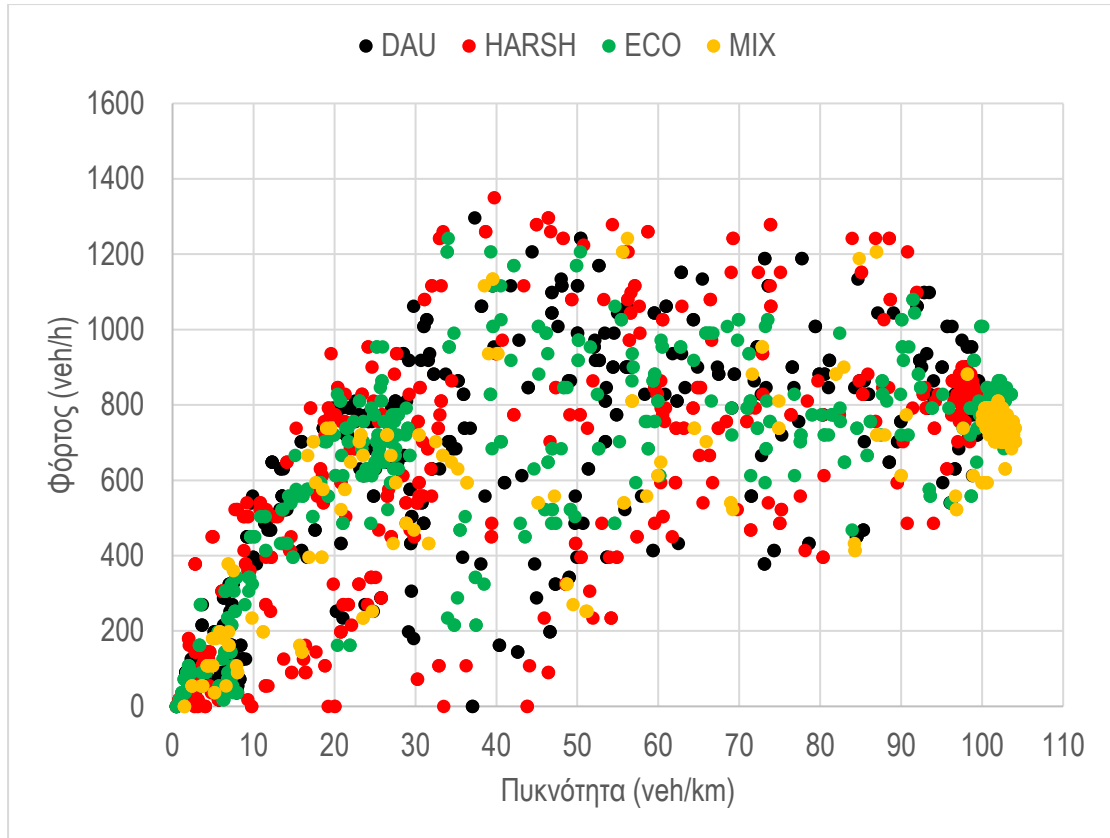
G	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP	B
Enters	flow		flow	CO2 [g/(veh*km)]	CO [g/(veh*km)]	PMx [mg/(veh*km)]	NOx [mg/(veh*km)]	traveltime (s)		
1	18		0-100	276.26	2.23	7.03	109.21	121.15		
1	18		100-200	385.37	3.86	11.96	159.63	170.19		
2	36		200-300	323.39	3.02	9.49	133.92	139.40		
2	36		300-400	475.10	4.77	14.85	196.08	213.95		
4	72		400-500	521.35	5.04	15.82	213.28	235.48		
5	90		500-600	440.59	4.38	13.85	185.09	190.23		
5	90		600-700	457.86	4.39	13.82	189.20	200.49		
5	90		700-800	590.81	5.11	16.31	234.28	271.89		
5	90		800-900	739.83	6.17	19.80	288.31	348.67		
8	144		900-1000	555.38	5.26	16.72	227.83	248.44		
4	72		1000-1100	564.84	5.35	16.97	232.27	251.94		
11	198		1100-1200	504.54	5.15	16.22	213.83	217.61		
3	54		1200-1300	416.89	4.51	14.18	184.40	165.28		
12	216									

Σχήμα 5.16: Η συνάρτηση averageifs στο Excel.

5.3.2.6 Αποτελέσματα

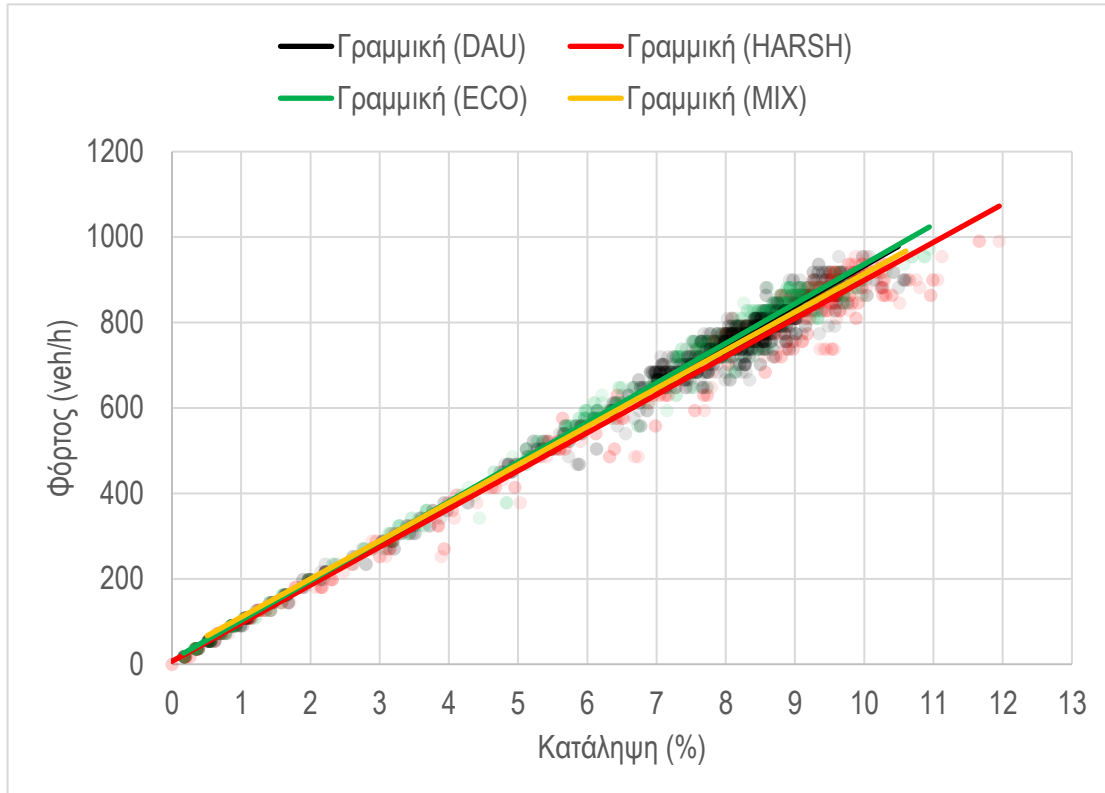
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και της μετέπειτα επεξεργασίας των δεδομένων εξόδου θα παρατεθούν στη παρούσα παράγραφο. Αρχικά, δημιουργούνται τα διαγράμματα φόρτου – πυκνότητας για την ακμή 1 και φόρτου – κατάληψης για την ακμή 2, προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση των προτύπων επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων στα μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα διαγράμματα των ρύπων συναρτήσει της πυκνότητας των οχημάτων στην ακμή 1. Τέλος, συγκρίνονται τα πρότυπα **ECO** και **MIX** με σκοπό τη διερεύνηση των επιπτώσεων της οικολογικής οδήγησης στις εκπομπές ρύπων από επιβατικά οχήματα.

Όπως φαίνεται στα σχήματα 5.17(α)-(β), οι τιμές του φόρτου στα τέσσερα πρότυπα παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση για τις εκάστοτε τιμές της πυκνότητας. Συνεπώς, η προσέγγιση με ένα πολυωνυμικό μοντέλο, όπως αυτή στο σχήμα 17(β) δεν μπορεί να θεωρηθεί ιδανική. Ωστόσο, οι χαμηλότερες επιταχύνσεις του προτύπου **ECO** δεν φαίνεται να προκαλούν μείωση της κυκλοφοριακής ικανότητας της οδού, αφού σύμφωνα με το σχήμα το πολυωνυμικό μοντέλο **ECO** σχεδόν συμπίπτει με το μοντέλο του προτύπου **DAU**. Σε κάθε περίπτωση, ο φωτεινός σηματοδότης περιορίζει το φόρτο στα 800 οχ./ώρα περίπου σε σύγκριση με τα 2000 οχ./ώρα της ελεύθερης ροής.

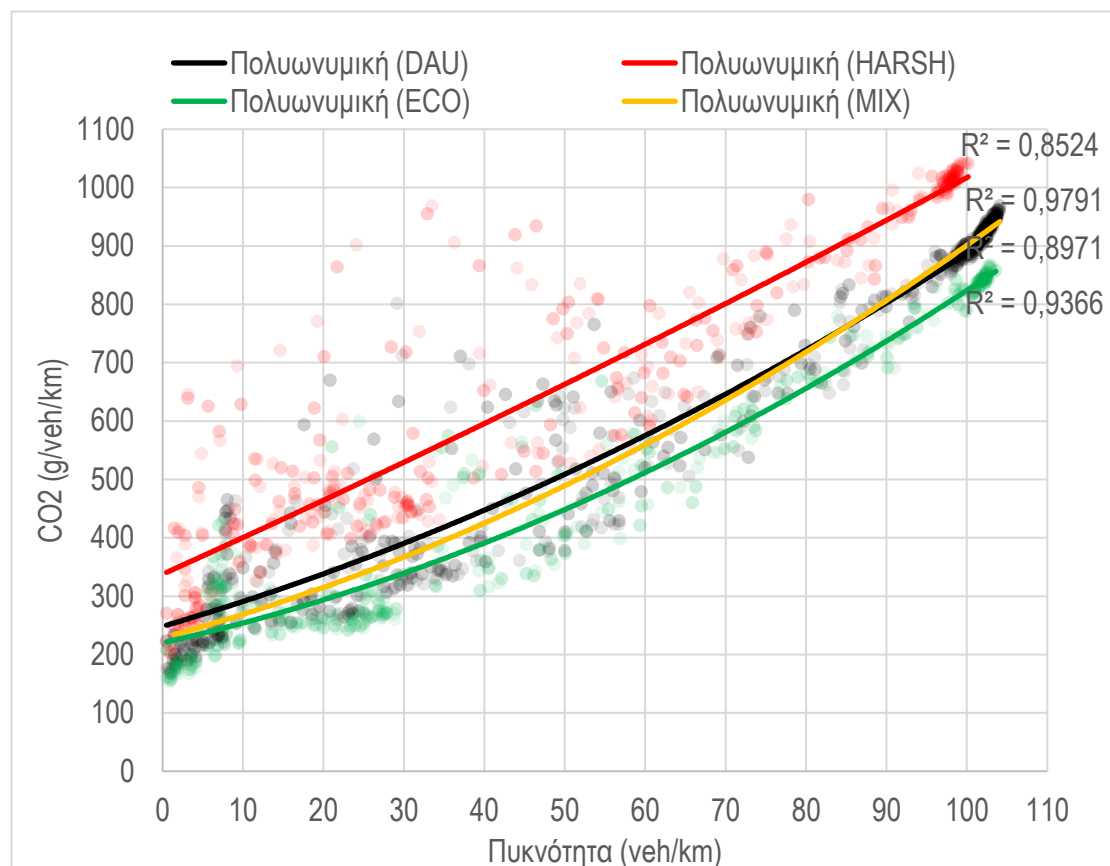
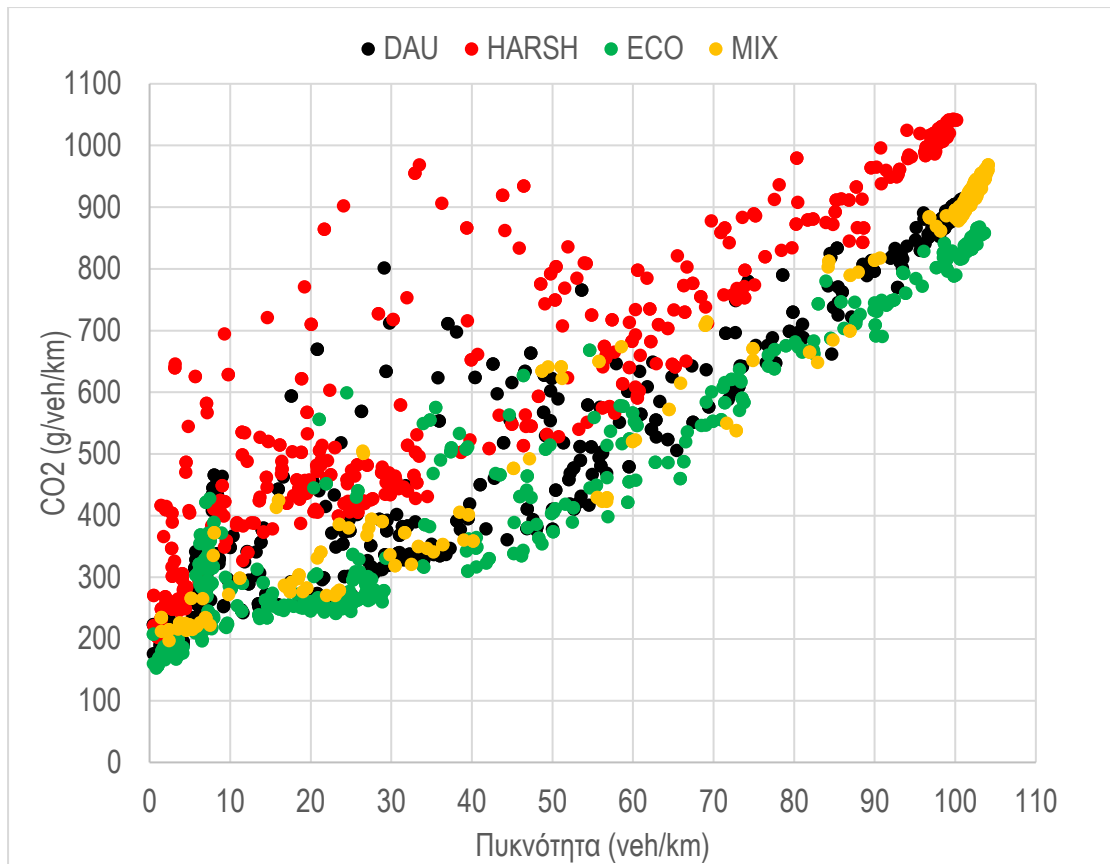


Σχήματα 5.17(α) - (β): Θεμελιώδη διαγράμματα φόρτου – πυκνότητας της ακμής 1 (πριν το φωτεινό σηματοδότη).

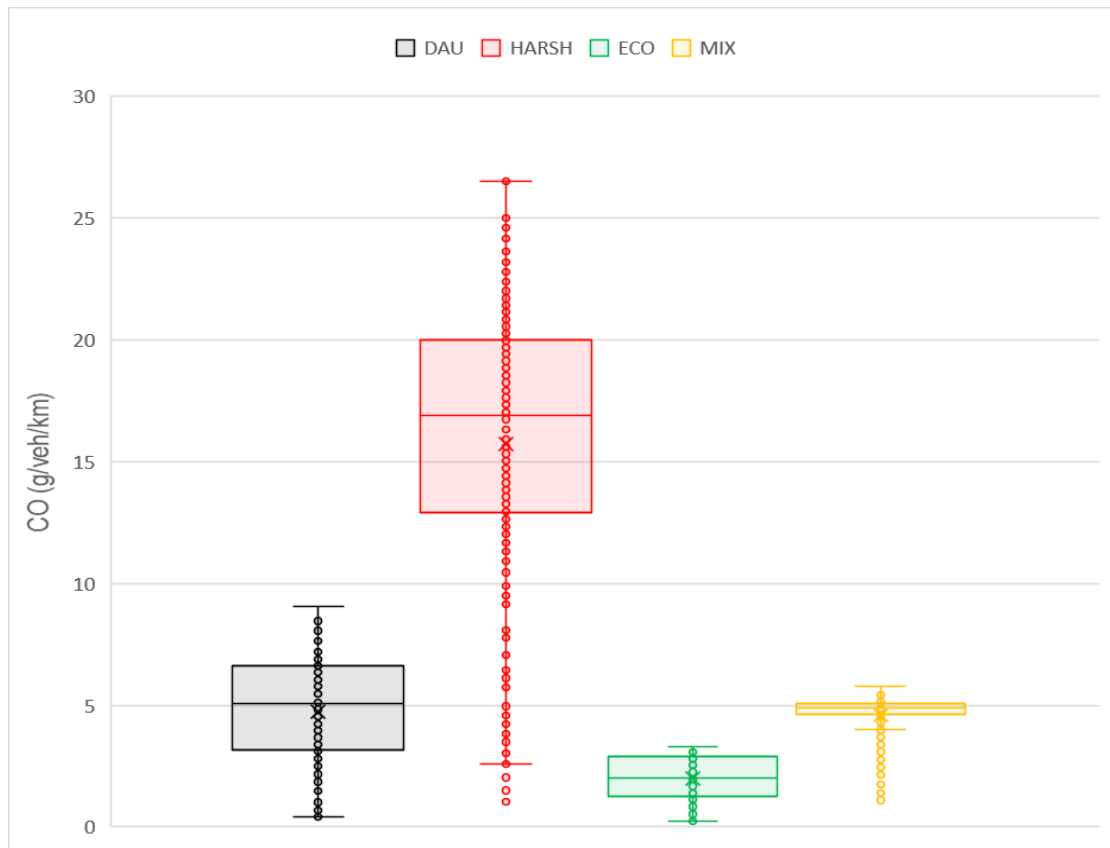
Δεδομένου ότι ο περιοριστικός παράγοντας της προσομοίωσης είναι ο φωτεινός σηματοδότης μεταξύ των ακμών 1 και 2, είναι προφανές ότι οι μετρήσεις του ελεγκτή επαγωγικού βρόχου σχεδόν συμπίπτουν για τα πρότυπα **DAU**, **HARSH**, **ECO** και **MIX**, όπως αποδεικνύεται στα σχήμα 5.18. Η αύξηση των εισερχόμενων οχημάτων σχετίζεται γραμμικά με την αύξηση της κατάληψης, γεγονός που υποδεικνύει ότι η οδός δεν φτάνει ποτέ σε τιμές κοντά στο κορεσμό.



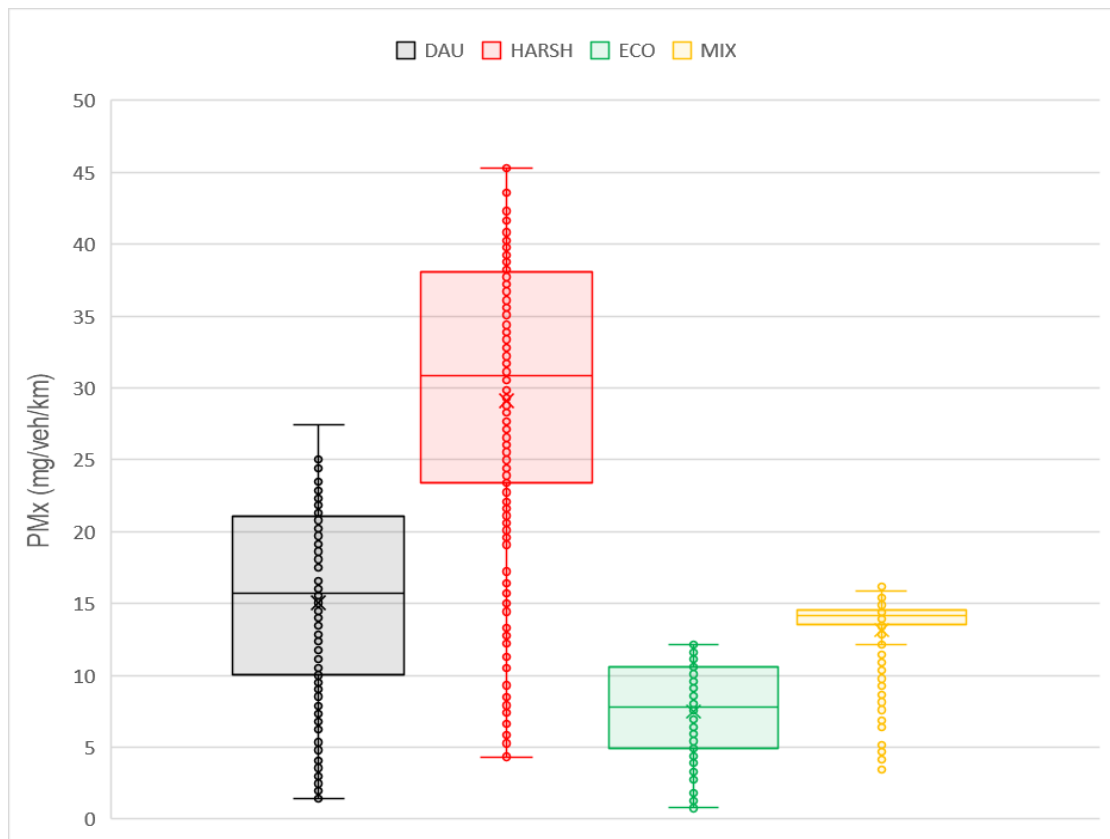
Σχήμα 5.18: Σχέση φόρτου – κατάληψης στον επαγωγικό βρόχο της ακμής 2.



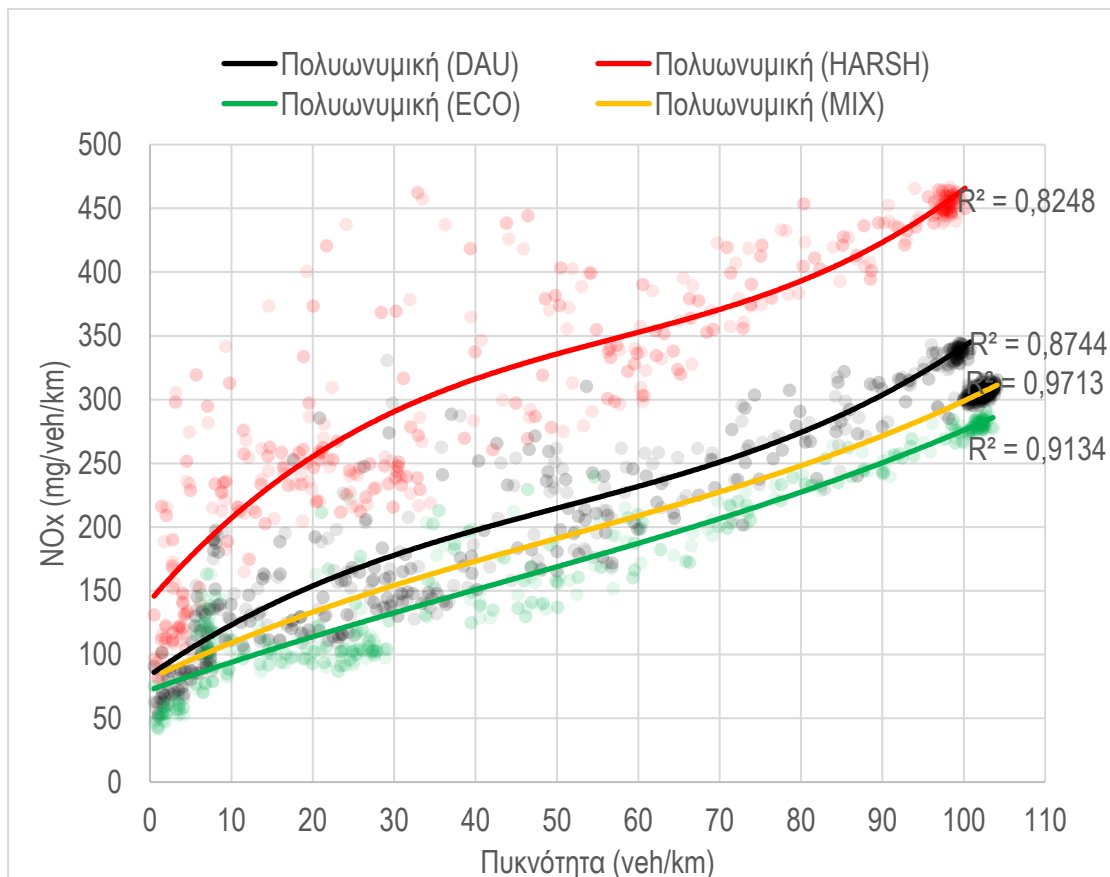
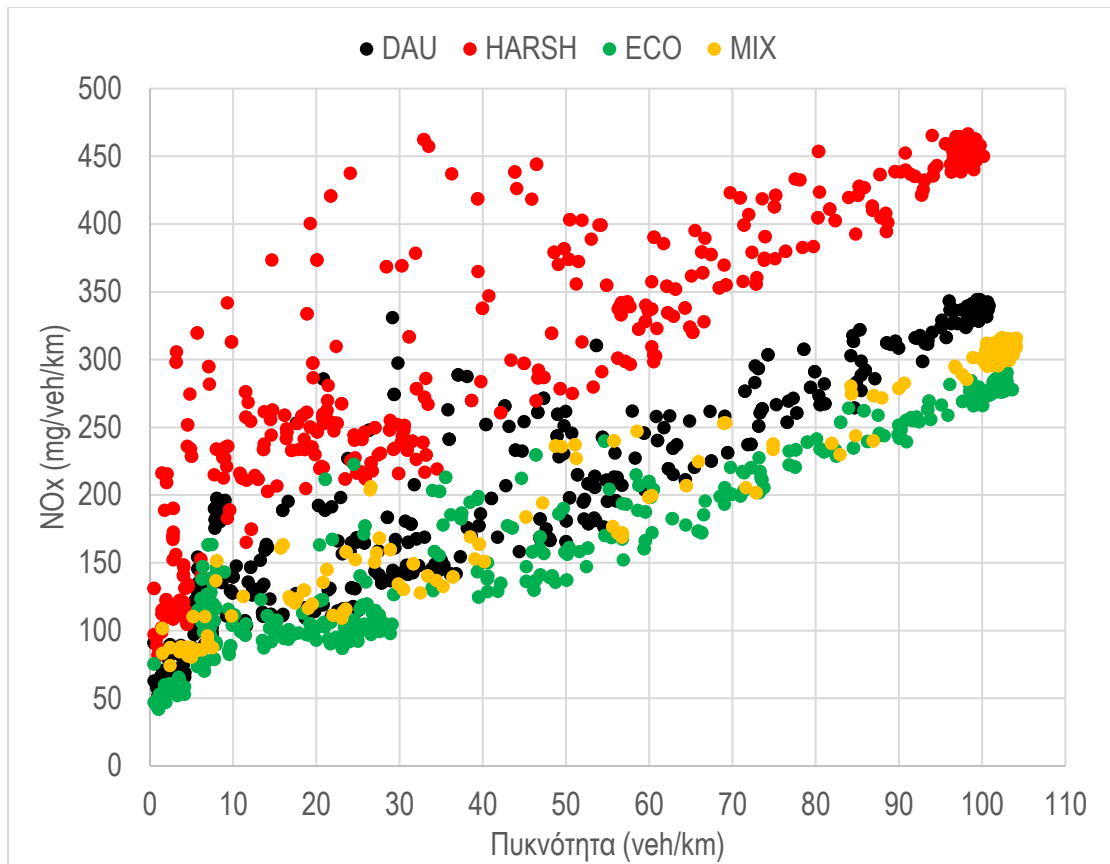
Σχήματα 5.19(α) - (β): Διαγράμματα εκπομπών CO₂ – πυκνότητας



Σχήμα 5.20: Διάγραμμα εκπομπών CO.

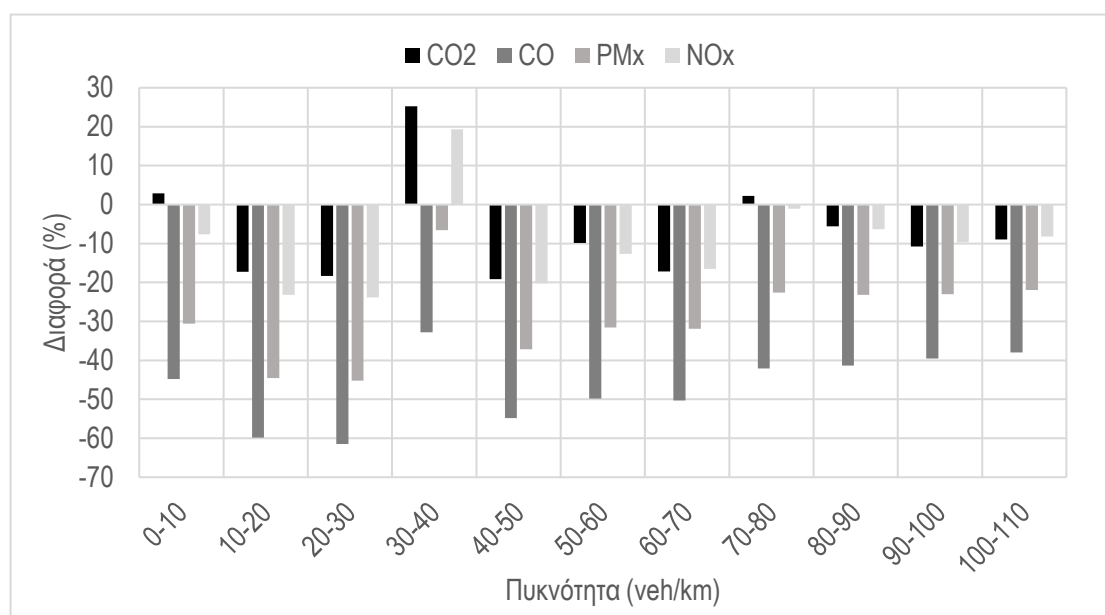


Σχήμα 5.21: Διάγραμμα εκπομπών PMx.

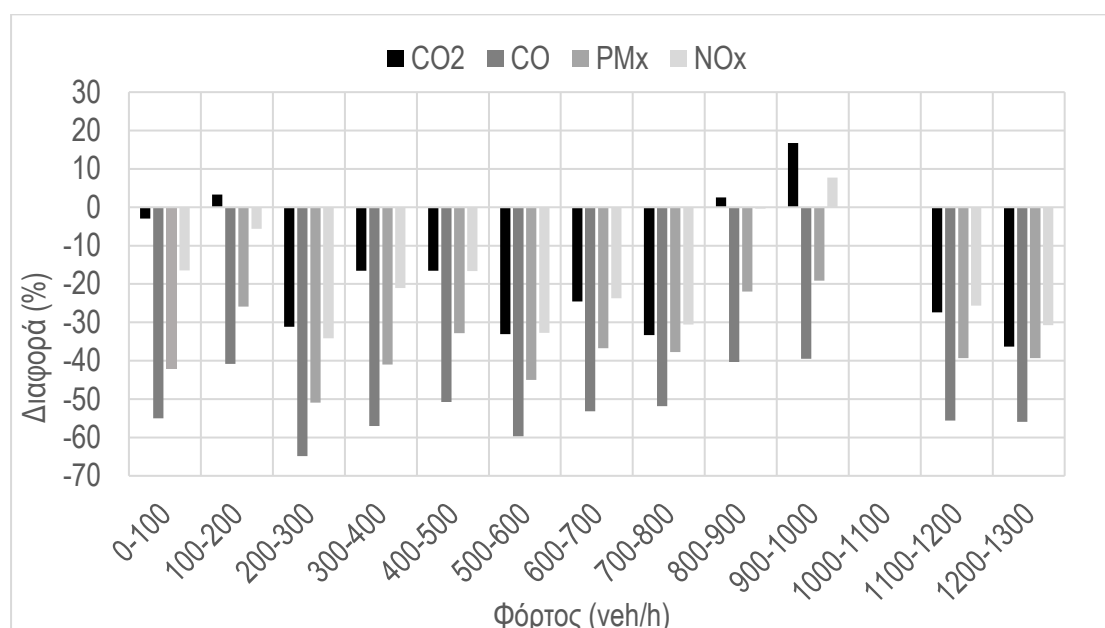


Σχήματα 5.22(α) - (β): Διαγράμματα εκπομπών NOx – πυκνότητας.

Σύμφωνα με τα διαγράμματα εκπομπών CO₂, CO, PM_x και NO_x συναρτήσει της πυκνότητας των οχημάτων, το πρότυπο **ECO** έχει ως θετικό αποτέλεσμα τη μείωση των ρύπων, ακόμα και σε περιπτώσεις οδήγησης σε αστική σηματοδοτούμενη οδό. Στο παρόν σενάριο, το πρότυπο **HARSH** οδηγεί σε μεγάλη αύξηση των εκπομπών, ενώ αντίθετα δεν συμβάλλει καθόλου στη βελτίωση της ροής των οχημάτων (σχήμα 5.17). Έτσι, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η απότομη οδήγηση πρέπει να αποφεύγεται από τους οδηγούς, επειδή αφενός αυξάνει τους ρύπους και αφετέρου δεν προσφέρει κάποιο όφελος στον οδηγό. Στα παρακάτω σχήματα εξετάζονται οι ποσοστιαίες μεταβολές στις εκπομπές των ρύπων μεταξύ των προτύπων **ECO** και **MIX**.



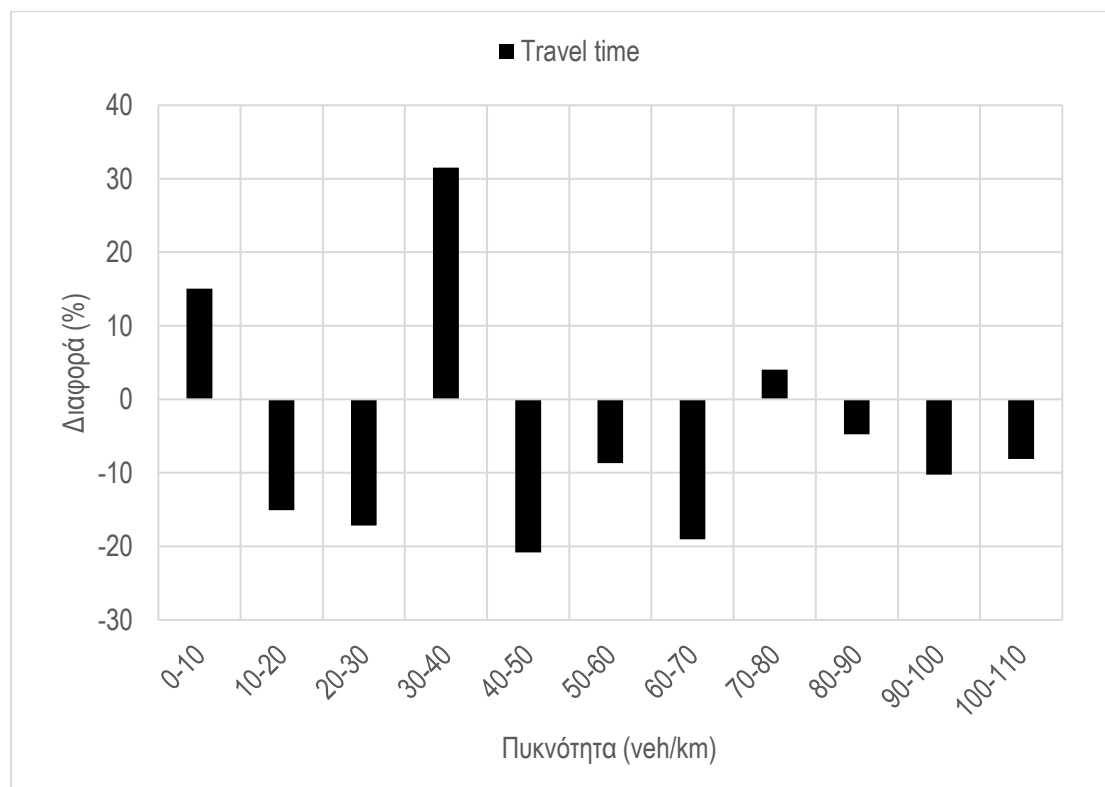
Σχήμα 5.23: Μείωση των εκπομπών ρύπων στο πρότυπο ECO σε σχέση με το πρότυπο MIX.



Σχήμα 5.24: Διαφορά μεταξύ των προτύπων ECO και MIX συναρτήσει του φόρτου.

Όπως φαίνεται στα σχήματα 5.23 και 5.24, το πρότυπο **ECO** οδηγεί σε εξοικονόμηση ρύπων σε όλα σχεδόν τα εύρη πυκνοτήτων και φόρτων. Τα CO, PMx και NOx παρουσιάζουν μείωση σε όλες τις περιπτώσεις, ενώ αντίθετα το CO₂ δεν μειώθηκε στις πυκνότητες 30-40 και 70-80 οχ./χλμ. και 100-200 και 800-1000 οχ./ώρα. Τονίζεται, ότι αυτές οι ιδιαιτερότητες του διαγράμματος μπορεί να οφείλονται σε λάθη κατά τη προσομοίωση ή να είναι τυχαίο αποτέλεσμα. Συμπερασματικά, η οδήγηση με χαμηλότερες επιβραδύνσεις και επιταχύνσεις μπορεί να χαρακτηριστεί οικολογική, καθώς προκαλεί μείωση των εκπομπών ρύπων.

Ένα άλλο πρόβλημα που καλείται να εξετάσει ο μελετητής της οικολογικής οδήγησης είναι το αν ο περιορισμός των μεταβολών της ταχύτητας προκαλεί αύξηση του χρόνου μετακίνησης. Η λογική λέει ότι μια μείωση των επιταχύνσεων προκαλεί αύξηση του χρόνου μετακίνησης, αφού οι οδηγοί μένουν περισσότερη ώρα πίσω από το φωτεινό σηματοδότη, δηλαδή μειώνεται ο αριθμός των οχημάτων που διέρχονται από αυτόν σε κάθε περίοδο. Στα πλαίσια της προσομοίωσης εξετάστηκαν και οι χρόνοι μετακίνησης (**travelTime**), ωστόσο δεν μπόρεσε να διατυπωθεί κάποιο ξεκάθαρο συμπέρασμα, τουλάχιστον όσον αφορά το παρόν σενάριο. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μεταβλητή **travelTime** από τα δεδομένα εξόδου της ακμής 1 παρουσιάζονται στο σχήμα 5.25 συναρτήσει της πυκνότητας. Φαίνεται ότι σε πυκνότητες 0-10, 30-40 και 70-80 οχ./χλμ.ο χρόνος μετακίνησης αυξάνεται, ενώ σε όλες τις περιπτώσεις μειώνεται. Εντούτοις, το φαινόμενο θα πρέπει να μελετηθεί περαιτέρω για να προκύψει κάποιο ασφαλές συμπέρασμα.



Σχήμα 5.25: Ποσοστιαίες μεταβολές της μεταβλητής *travelTime* συναρτήσει της πυκνότητας.

5.3.3 Αξιολόγηση σε επίπεδο δικτύου

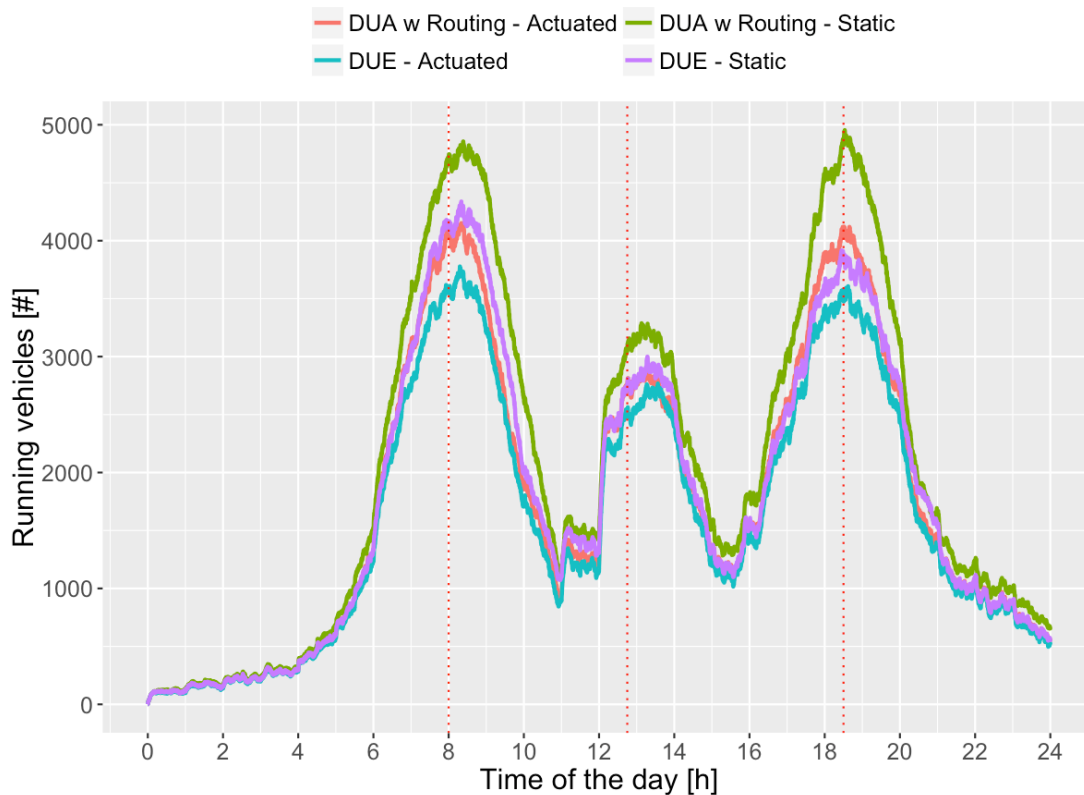
Το Luxembourg SUMO Traffic (LuST) Scenario 2.0 [24][25] είναι ένα project που δημιουργήθηκε από το εργαστήριο VehicularLab του Πανεπιστημίου του Λουξεμβούργου. Σκοπός αυτού του προγράμματος είναι η κατασκευή του δικτύου μιας ολόκληρης πόλης χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα για τη γεωμετρία του δικτύου και τις μετακινήσεις που λαμβάνουν χώρα κατά της διάρκεια της ημέρας. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το LuST βασίστηκε στο μικροσκοπικό προσομοιωτή SUMO, που αποτελεί δωρεάν λογισμικό, δίνεται η δυνατότητα στους ερευνητές να ασχοληθούν με θέματα βελτιστοποίησης της κυκλοφορίας σε αστικές οδούς, σενάρια εκκένωσης της πόλης, διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των μέσων μαζικής μεταφοράς κ.α. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξετάζεται η αποτελεσματικότητα του προτύπου **ECO** στη μείωση των εκπομπών ρύπων από επιβατικά οχήματα και οι επιπτώσεις του στο χρόνο μετακίνησης.



Σχήμα 5.26: Το δίκτυο του LuST. Πηγή: Codeca et al. [25]

Όπως είναι φυσικό, ένα project αυτού του είδους δύναται να χρησιμοποιηθεί για την εξέταση πολλών σεναρίων. Σε αυτή την ενότητα της διπλωματικής εργασίας θα αξιοποιηθεί η ζήτηση DUA static (Dynamic user Assignment – static), επειδή όπως φαίνεται στο σχήμα 5.27 παρουσιάζει τις υψηλότερες αιχμές στη ταυτόχρονη κυκλοφορία οχημάτων. Αρχικά, αξιολογείται η επίπτωση του προτύπου **ECO** αθροιστικά στο δίκτυο. Έπειτα, προκειμένου να αξιολογηθεί η επίπτωση υπό πραγματικά δεδομένα κυκλοφορίας σε μια κεντρική οδό της πόλης, παράγονται τα δεδομένα εξόδου για τη λεωφόρο

Boulevard Royal, η οποία βρίσκεται περιμετρικά του πυρήνα της παλιάς πόλης του Λουξεμβούργου.



Σχήμα 5.27: Σενάρια ζήτησης. Χρησιμοποιήθηκε το DUA w Routing – Static.. Πηγή: Codeca et al. [25]

Για να λάβει τα αρχεία δεδομένων εξόδου ακμής και δεδομένων εκπομπών ρύπων ο χρήστης πρέπει να εισάγει τις αντίστοιχες εντολές στο αρχείο **addoutput.add.xml**. Τα αρχεία αυτά θα έχουν την ονομασία **edgedata.xml** και **edgedataemi.xml** αντίστοιχα και περιλαμβάνουν δεδομένα μόνο για επιβατικά αυτοκίνητα, εξαιρώντας τα αστικά λεωφορεία. Τα δεδομένα αυτά συλλέγονται αθροιστικά ανά ώρα, γεγονός που θα διευκολύνει τη μετέπειτα επεξεργασία των μετρήσεων.

5.3.3.1 Πρότυπο MIX*

Το πρότυπο **MIX** που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την ενότητα της διπλωματικής εργασίας διαφέρει από το πρότυπο MIX που προέκυψε από την ομαδοποίηση Κ-μέσων και για αυτό το λόγο θα αναφέρεται ως **MIX***. Το πρότυπο αυτό αποτελείται από 6 τύπους επιβατικών οχημάτων, όπως αυτοί ορίζονται στο αρχείο **vtypes.add.xml** που περιέχεται στο πακέτο LuST (πίνακας 5.6), χωρίς να γίνει καμία μεταβολή των μεγεθών των επιταχύνσεων και των επιβραδύνσεων. Επιπλέον, περιέχεται ένας τύπος οχήματος αστικού λεωφορείου, ο οποίος περιλαμβάνεται μεν στη προσομοίωση, δεν λαμβάνεται υπόψη όμως στον υπολογισμό των ρύπων.

Πρότυπο MIX*				
vType	length	a (m/s ²)	b (m/s ²)	probability
passenger1	5.0	2.6	4.5	0.40
passenger2a	4.5	3.0	4.5	0.20
passenger2b	4.5	2.8	4.5	0.20
passenger3	6.0	2.7	4.5	0.10
passenger4	5.5	2.4	4.5	0.05
passenger5	7.0	2.3	4.5	0.05

Πίνακας 5.6: Το πρότυπο MIX* του project LuST

5.3.3.2 Πρότυπο ECO

Αντίθετα, το πρότυπο **ECO** ορίζεται όπως ακριβώς και στις προηγούμενες ενότητες. Οι επιταχύνσεις και οι επιβραδύνσεις των οχημάτων του τύπου passenger περιορίζονται σε τιμές μικρότερες από 1.79 m/s² στην επιτάχυνση και 2.42 m/s² στην επιβράδυνση, με εξαίρεση βέβαια τα αστικά λεωφορεία, τα οποία δεν περιλαμβάνονται στα δεδομένα εξόδου.

5.3.3.3 Προσομοίωση και αθροιστικά αποτελέσματα σε επίπεδο δικτύου

- Το καθαρό μήκος των οχημάτων κυμαίνεται μεταξύ των 4.5 m και των 7.0 m.
- Το κενό ασφαλείας μεταξύ των οχημάτων είναι 2.5 m.
- Η ατέλεια του οδηγού στο να διατηρεί σταθερή την ταχύτητα του οχήματός του είναι 0.5. Η τιμή αυτή περιέχεται στο LuST Scenario.
- Τα οχήματα είναι τεχνολογίας κινητήρα Euro 4, αμόλυβδης βενζίνης.
- Τα δεδομένα συγκεντρώνονται αθροιστικά για χρονικά διαστήματα 3600 s προκειμένου να προκύψουν τα διαγράμματα εκπομπών ρύπων ανά ώρα.
- Η προσομοίωση έχει διάρκεια 24 ωρών και γίνεται μία φορά για κάθε πρότυπο.
- Ο χρόνος αναμονής (μεταβλητή **waitingTime**) ορίζεται ως το σύνολο του χρόνου που το όχημα έχει ταχύτητα μικρότερη από 0.1 m/s.

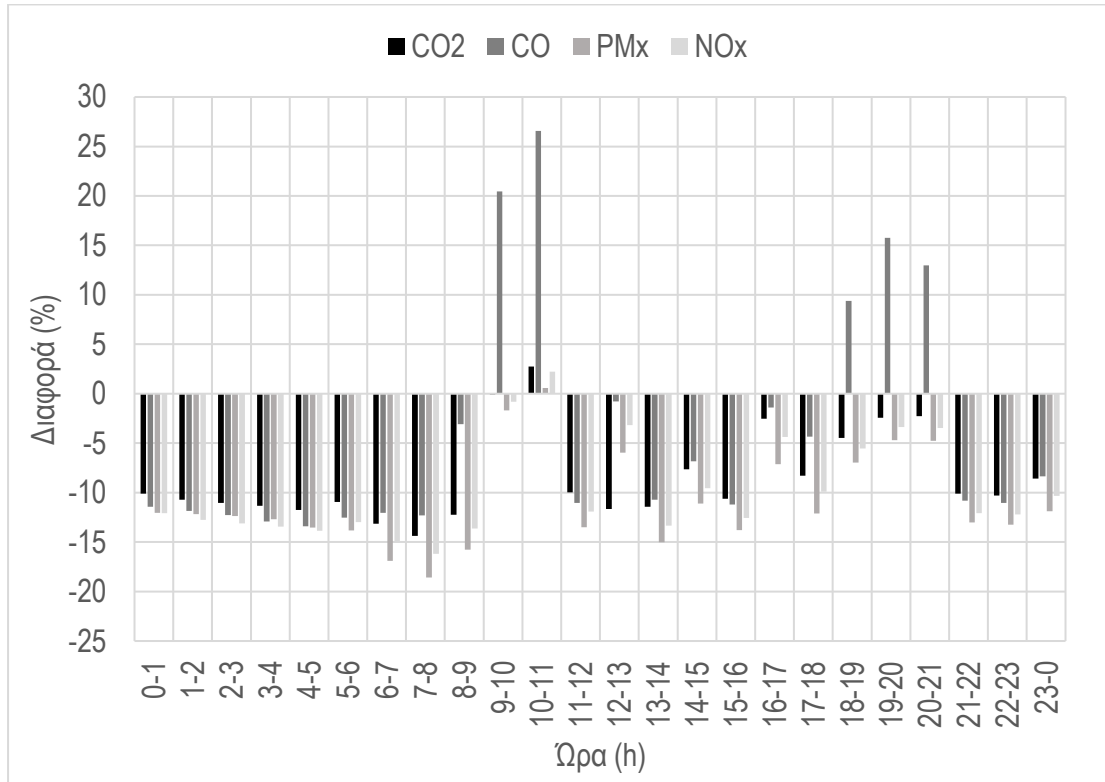
Σε αυτό το στάδιο η προσομοίωση έχει σκοπό τη διερεύνηση των επιπτώσεων του προτύπου **ECO** στις εκπομπές ρύπων, το χρόνο μετακίνησης και το χρόνο αναμονής, τόσο αθροιστικά, όσο και ανά ώρα. Τα αθροιστικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η οδήγηση με μέγιστη επιτάχυνση και επιβράδυνση αυτές του προτύπου **ECO** συνεπάγεται μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 8.39%, των εκπομπών CO κατά 1.85%, των εκπομπών PM_x κατά 11.55% και των εκπομπών NO_x κατά 9.94%. Ταυτόχρονα όμως, ο συνολικός χρόνος μετακίνησης όλων των οχημάτων αυξήθηκε κατά 7.31% και ο συνολικός χρόνος αναμονής αυξήθηκε κατά 21.54%, όπως φαίνεται και στο πίνακα 5.7 που

συνοψίζει τις μεταβολές σε όλες τις μεταβλητές. Συνεπώς, μπορεί να προκύπτει όφελος όσον αφορά τις εκπομπές ρύπων, εντούτοις αυτή η εξοικονόμηση συνεπάγεται κόστος στο χρόνο μετακίνησης και στο χρόνο αναμονής των οδηγών σε σχέση με το πρότυπο **MIX***.

	CO ₂ (t)	CO (t)	PM _x (kg)	NO _x (kg)	travelTime (h)	waitingTime (h)
ECO	490.33	9.05	9.69	194.40	52537.62	10709.76
MIX*	535.22	9.22	10.96	215.86	48959.54	8811.80
Διαφορά (ECO – MIX)	-8.39%	-1.85%	-11.55%	-9.94%	7.31%	21.54%

Πίνακας 5.7: Αθροιστικά αποτελέσματα προσομοίωσης σε επίπεδο δικτύου

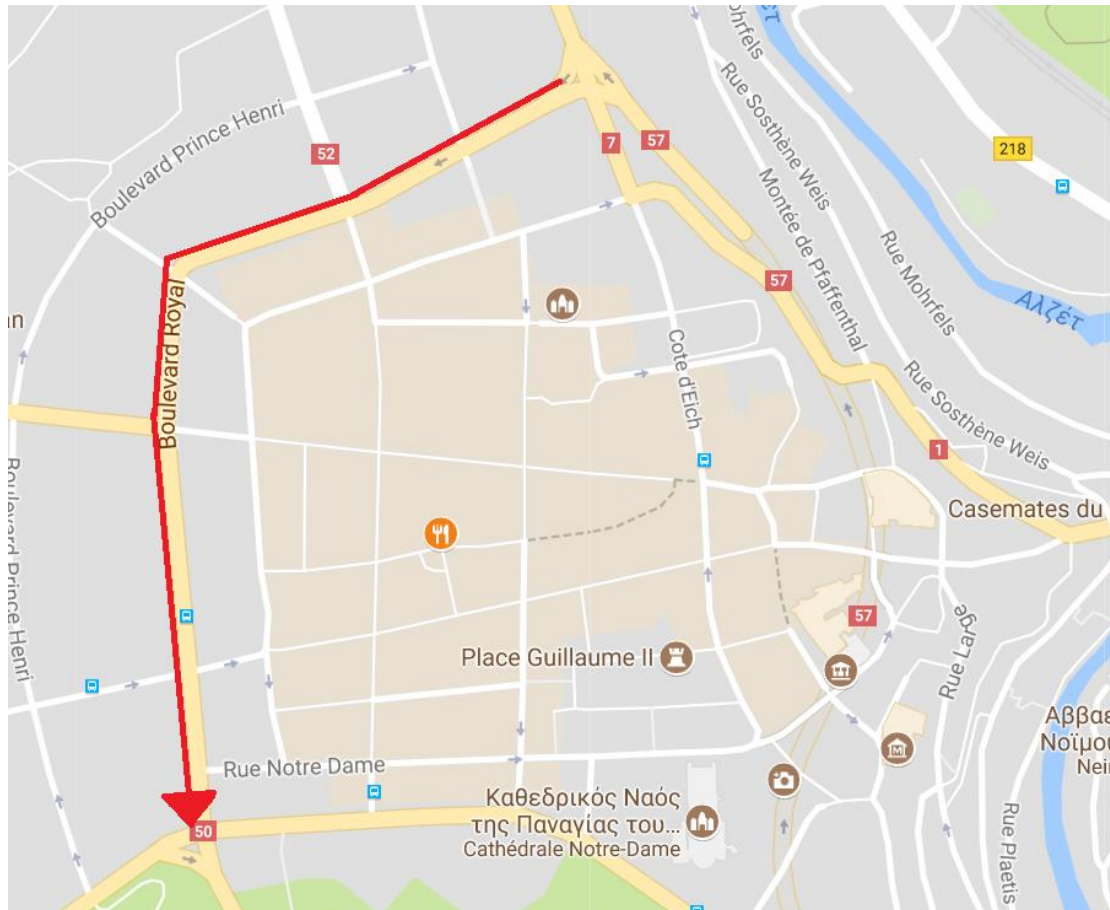
Ομοίως, η εξέταση των δεδομένων εξόδου ανά ώρα δείχνει ότι τα οφέλη της οικολογικής οδήγησης σε επίπεδο δικτύου επεκτείνονται σε όλες τις ώρες της ημέρας. Αυτό συνεπάγεται ότι τα οφέλη εμφανίζονται ακόμα και όταν η κυκλοφορία οχημάτων είναι υψηλή, όπως για παράδειγμα συμβαίνει κατά τις περιόδους 7-9 h και 18-20 h (σχήμα 5.27). Η σύγκριση των εκπομπών ρύπων ανά ώρα φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 5.28, σύμφωνα με το οποίο οι εκπομπές CO₂, CO, PM_x και NO_x μειώνονται σχεδόν σε όλα τα διαστήματα ενός εικοσιτετράωρου στο πρότυπο **ECO** σε σύγκριση με το **MIX***, με ελάχιστες εξαιρέσεις, οπότε αποδεικνύεται ότι η οικονομική οδήγηση είναι επωφελής.



Σχήμα 5.28: Ποσοστιαία διαφορά στους ρύπους σε επίπεδο δικτύου ανά ώρα.

5.3.3.4 Επιπτώσεις του προτύπου ECO κατά μήκος μιας οδού

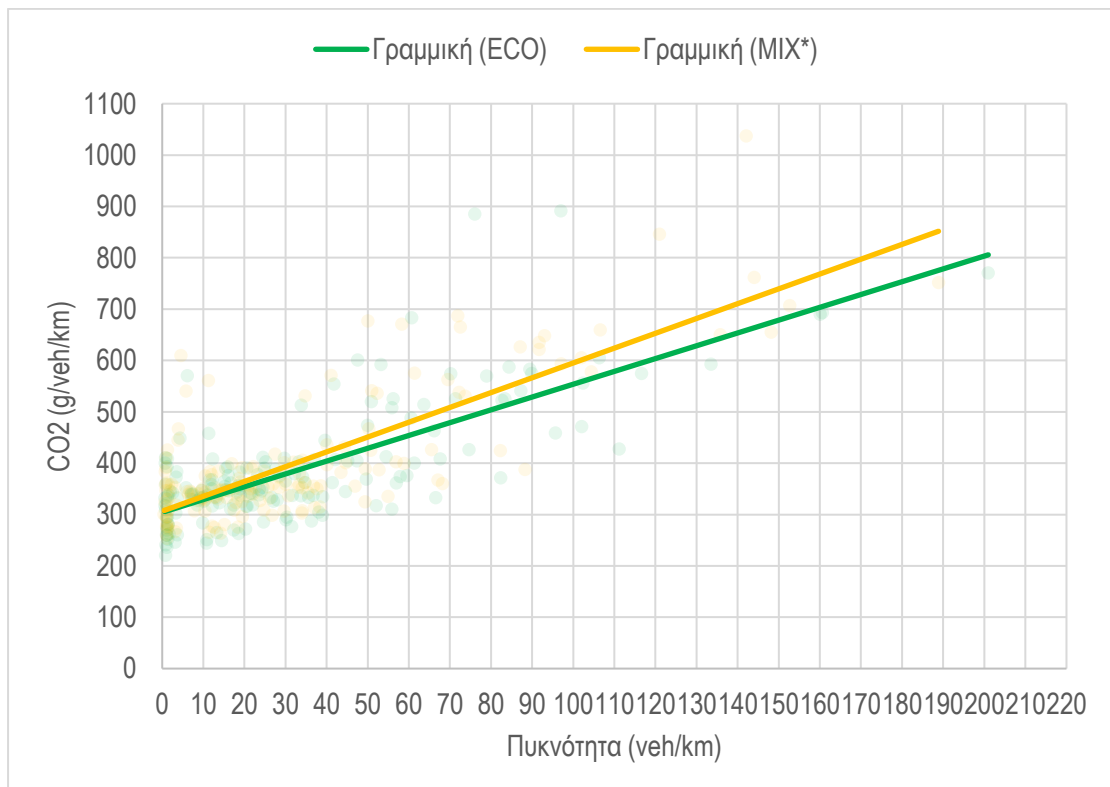
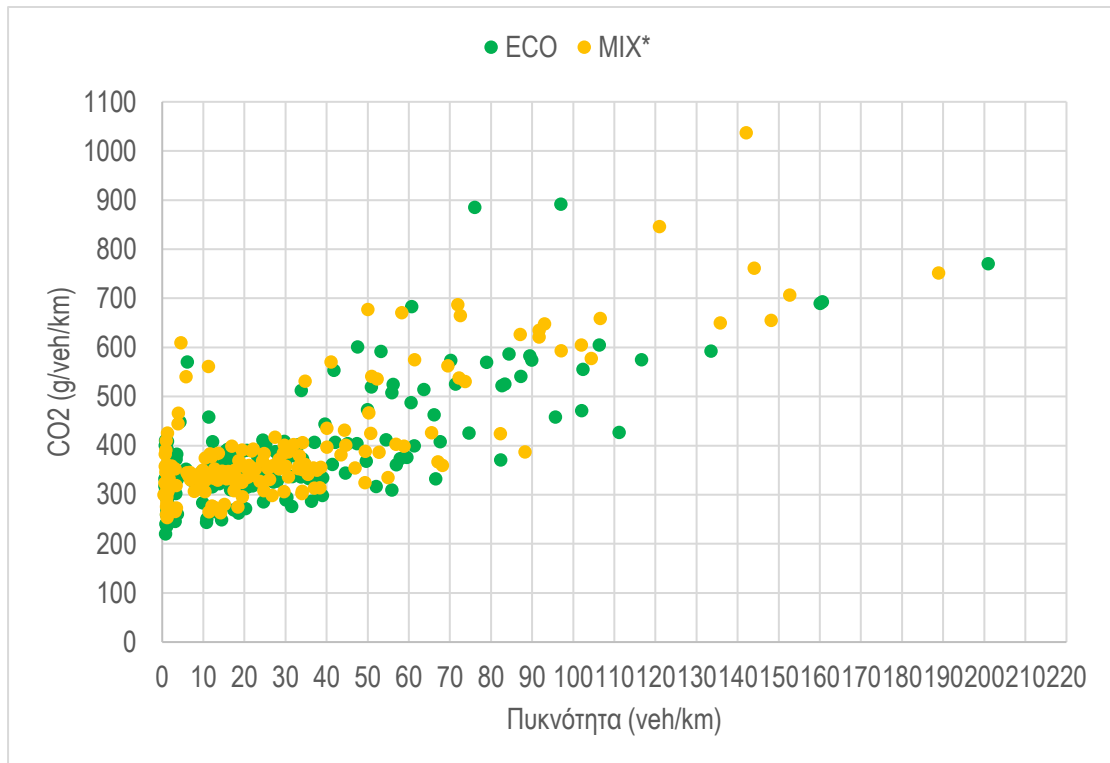
Στο τελευταίο στάδιο της προσομοίωσης μελετάται αν τα θετικά αποτελέσματα του προτύπου **ECO** που διαπιστώθηκαν σε επίπεδο δικτύου μπορούν να παρατηρηθούν και τοπικά, σε μια οδό που αποτελεί μέρος του ευρύτερου δικτύου. Για αυτό το σκοπό, επιλέχθηκε να μελετηθεί η οδός Boulevard Royal, επειδή παρατηρήθηκε ότι φέρει πολύ υψηλή κυκλοφορία σε σχέση με άλλες οδούς κατά τις ώρες αιχμής. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η κατεύθυνση κίνησης από τα βορειοανατολικά προς τα νότια, στο τμήμα που ορίζεται από τις οδούς Cote d'Eich και Boulevard Franklin D. Roosevelt (σχήμα 5.29). Σε αυτό το τμήμα η λεωφόρος είναι τριών λωρίδων ανά κατεύθυνση και περιλαμβάνει 6 σηματοδοτούμενους κόμβους. Έτσι, αξιοποιούνται τα αρχεία εξόδου δεδομένων ακμής και τα αρχεία εξόδου δεδομένων εκπομπών ρύπων που δημιουργήθηκαν για την αξιολόγηση των επιπτώσεων αθροιστικά στο δίκτυο και, άρα, δεν υπάρχει ανάγκη να τρέξει ξανά η προσομοίωση. Οι παραδοχές είναι οι ίδιες όπως και στη παράγραφο 5.3.3.3.



Σχήμα 5.29: Η λεωφόρος Boulevard Royal στη κατεύθυνση κίνησης ΒΑ προς Ν.

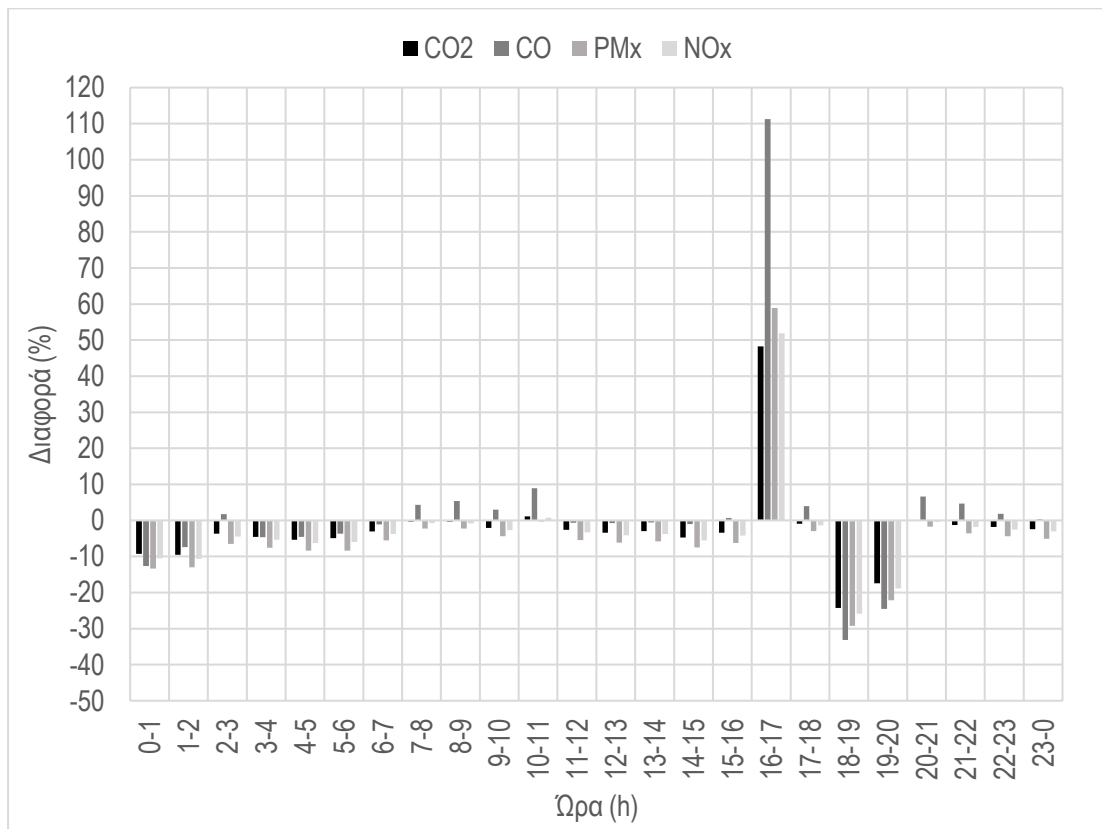
Τα αποτελέσματα της εικοσιτετράωρης προσομοίωσης επιβεβαιώνουν σε μεγάλο βαθμό τις παρατηρήσεις της παραγράφου 5.3.2.6. Αρχικά, παρατηρείται ότι συναρτήσει της πυκνότητας, το πρότυπο **MIX*** φαίνεται να προκαλεί υψηλότερες εκπομπές CO₂ σε σύγκριση με το πρότυπο **ECO**. Οι

διάσπαρτες παρατηρήσεις προσεγγίζονται με ένα γραμμικό μοντέλο προκειμένου να γίνει αντιληπτή αυτή η διαφορά, όπως φαίνεται στα σχήματα 530(α)-(β).



Σχήματα 5.30(α) - (β): Διαγράμματα CO₂ – πυκνότητας σε αστική οδό τριών λωρίδων ανά κατεύθυνση.

Για να εξεταστεί η επίδραση του προτύπου **ECO** κατά τη διάρκεια της ημέρας δημιουργείται ένα διάγραμμα που εκφράζει τις ποσοστιαίες διαφορές ανάμεσα στα πρότυπα **ECO** και **MIX***. Γενικά, όσον αφορά τα CO₂, PM_x και NO_x παρατηρείται μείωση των εκπομπών κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ αντίθετα οι εκπομπές CO παρουσιάζουν άλλοτε αύξηση και άλλοτε μείωση. Επιπλέον, παρατηρείται ότι κατά τις ώρες 16-20 h οι εκπομπές στο πρότυπο **ECO** παρουσιάζουν αρχικά μεγάλη αύξηση σε σχέση με το MIX* και αμέσως μετά μεγάλη μείωση. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε κάποιο λάθος του προσομοιωτή ή σε κάποιο λάθος που προέκυψε κατά τη επεξεργασία των δεδομένων εξόδου.



Σχήμα 5.31: Ποσοστιαία διαφορά στους ρύπους σε επίπεδο λεωφόρου ανά ώρα.

Συνολικά, λαμβάνοντας υπόψη τις παρατηρήσεις της τελευταίας παραγράφου που αφορά τη προσομοίωση σε υπαρκτό δίκτυο με πραγματικά δεδομένα προέλευσης-προορισμού, όπου ο προγραμματισμός των φωτεινών σηματοδοτών παραμένει στατικός στα πρότυπα **ECO** και **MIX***, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι αν οι οδηγοί μειώσουν τις επιταχύνσεις και τις επιβραδύνσεις τους κάτω από το ανώτατο όριο των 1.79 m/s² και 2.42 m/s², τότε αυτό θα οδηγούσε αθροιστικά σε μείωση σε όλες τις κατηγορίες των ρύπων που εξετάστηκαν. Ωστόσο, προκύπτουν και αρνητικές συνέπειες, οι οποίες έχουν να κάνουν με το χρόνο αναμονής και το χρόνο μετακίνησης, ο οποίος αθροιστικά βρέθηκε να αυξάνεται στο πρότυπο **ECO**. Παράλληλα, απαιτείται μεγαλύτερη διερεύνηση των επιπτώσεων της οικολογικής οδήγησης προκειμένου να επιλυθούν προβλήματα όπως η παρατήρηση ακραίων τιμών και μεταβολών στα διαγράμματα εκπομπών ρύπων.

5.3.4 Έλεγχος στατιστικά σημαντικής μεταβολής ρύπων

Σε αυτή τη παράγραφο θα ελεγχθεί αν η μείωση στις εκπομπές ρύπων του προτύπου **ECO** σε σύγκριση με το πρότυπο **MIX** είναι στατιστικά σημαντική. Για καθένα από τα τρία σενάρια που εξετάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους (ροή σε οδό χωρίς σηματοδότηση, ροή σε οδό με σηματοδότηση και αξιολόγηση σε επίπεδο δικτύου) πραγματοποιούνται Student's t-test και Mann–Whitney U-test (ή Wilcoxon rank – sum test) σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$.

Το t-test χρησιμοποιείται για τη σύγκριση των μέσων όρων δύο πληθυσμών που διαφέρουν ως προς ένα χαρακτηριστικό. Στα δύο πρώτα σενάρια χρησιμοποιείται μια παραλλαγή του t-test που ονομάζεται Welch's t-test, η οποία ενδείκνυται για περιπτώσεις όπου οι δύο πληθυσμοί έχουν διαφορετικό μέγεθος και διαφορετική διακύμανση. Αντίθετα, στο σενάριο της αξιολόγησης σε επίπεδο δικτύου χρησιμοποιείται το Paired t-test, όπου η σύγκριση των δεδομένων γίνεται γραμμή προς γραμμή. Αν μ_1 είναι ο μέσος όρος του πρώτου πληθυσμού και μ_2 είναι ο μέσος όρος του δεύτερου πληθυσμού, τότε οι υποθέσεις του t-test ορίζονται ως:

$$\begin{aligned} H_0: \mu_1 - \mu_2 &= 0 \\ H_1: \mu_1 - \mu_2 &< 0 \end{aligned}$$

Το Mann-Whitney U-test είναι ένας μη παραμετρικός εναλλακτικός του t-test έλεγχος που χρησιμοποιείται για να διερευνηθεί, αν δύο ανεξάρτητα δείγματα που επιλέγονται από δύο πληθυσμούς ακολουθούν την ίδια κατανομή (δηλαδή αν οι πληθυσμοί έχουν την ίδια διάμεσο). Οι υποθέσεις του U-test είναι:

$$\begin{aligned} H_0: P(x_i > y_i) &= P(x_i < y_i) \\ H_1: P(x_i > y_i) &< P(x_i < y_i) \end{aligned}$$

Η κλήση των t-test και U-test στην RStudio γίνεται χρησιμοποιώντας τις εντολές `t.test()` και `wilcox.test()` αντίστοιχα. Εκεί ορίζονται οι δύο πληθυσμοί, αν ο έλεγχος που θα γίνει θα είναι `paired` ή όχι καθώς και η εναλλακτική υπόθεση (`alternative`) που στη παρούσα διπλωματική εργασία ορίζεται ως μικρότερη (`"less"`). Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων βασίζεται στη τιμή **p-value**. Για τιμές της p-value μεγαλύτερες του επιπέδου σημαντικότητας $\alpha = 0.05$ γίνεται αποδεκτή η μηδενική υπόθεση, ενώ για τιμές μικρότερες του α απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση και γίνεται αποδεκτή η εναλλακτική υπόθεση. Παράδειγμα κλήσης των ελέγχων στην RStudio:

```
t.test(FFemissions$CO2_ECO, FFemissions$CO2_MIX, paired = FALSE,
       alternative = "LESS")

wilcox.test(LDemissions$CO2_ECO, LDemissions$CO2_MIX, paired = TRUE,
            alternative = "LESS")
```

t-tests: Ροή σε οδό χωρίς σηματοδότηση						
Ρύπος	t-test	μ_1	μ_2	p-value	H ₀	H ₁
CO ₂	Welch's	528.92 g/veh/km	851.31 g/veh/km	<2.2e-16	✗	✓
CO	Welch's	2.34 g/veh/km	6.08 g/veh/km	<2.2e-16	✗	✓
PM _x	Welch's	7.57 mg/veh/km	14.29 mg/veh/km	<2.2e-16	✗	✓
NO _x	Welch's	167.94 mg/veh/km	276.92 mg/veh/km	<2.2e-16	✗	✓

t-tests: Ροή σε οδό με σηματοδότηση						
Ρύπος	t-test	μ_1	μ_2	p-value	H ₀	H ₁
CO ₂	Welch's	479.70 g/veh/km	793.49 g/veh/km	<2.2e-16	✗	✓
CO	Welch's	1.98 g/veh/km	4.58 g/veh/km	<2.2e-16	✗	✓
PM _x	Welch's	7.47 mg/veh/km	13.14 mg/veh/km	<2.2e-16	✗	✓
NO _x	Welch's	170.00 mg/veh/km	268.36 mg/veh/km	<2.2e-16	✗	✓

t-tests: Αξιολόγηση σε επίπεδο δικτύου					
Ρύπος	t-test	$\mu_1 - \mu_2$	p-value	H ₀	H ₁
CO ₂	Paired	-368337.60 mg/edge/h	0.0003064	✗	✓
CO	Paired	-1402.64 mg/edge/h	0.2678	✓	✗
PM _x	Paired	-10.38 mg/edge/h	5.71e-05	✗	✓
NO _x	Paired	-176.08 mg/edge/h	2.264e-05	✗	✓

Πίνακες 5.8(α)-(γ): Αποτελέσματα των t-tests

U-tests: Ροή σε οδό χωρίς σηματοδότηση				
Ρύπος	Paired	p-value	H ₀	H ₁
CO ₂	FALSE	<2.2e-16	✗	✓
CO	FALSE	<2.2e-16	✗	✓
PM _x	FALSE	<2.2e-16	✗	✓
NO _x	FALSE	<2.2e-16	✗	✓

U-tests: Ροή σε οδό με σηματοδότηση				
Ρύπος	Paired	p-value	H ₀	H ₁
CO ₂	FALSE	<2.2e-16	✗	✓
CO	FALSE	<2.2e-16	✗	✓
PM _x	FALSE	<2.2e-16	✗	✓

NO _x	FALSE	<2.2e-16	✘	✓
-----------------	-------	----------	---	---

U-tests: Αξιολόγηση σε επίπεδο δικτύου				
Ρύπος	Paired	p-value	H ₀	H ₁
CO ₂	TRUE	<2.2e-16	✘	✓
CO	TRUE	8.707e-05	✘	✓
PM _x	TRUE	<2.2e-16	✘	✓
NO _x	TRUE	<2.2e-16	✘	✓

Πίνακες 5.9(α)-(γ): Αποτελέσματα των U-tests

Τα αποτελέσματα των t-test και U-test δείχνουν ότι η μείωση των ρύπων είναι στατιστικά σημαντική, μέσω της απόρριψης των μηδενικών υποθέσεων και της αποδοχής των εναλλακτικών υποθέσεων. Εξαίρεση αποτελεί ο έλεγχος των εκπομπών CO στο σενάριο της αξιολόγησης σε επίπεδο δικτύου, όπου η τιμή της p-value είναι 0.2678, δηλαδή υψηλότερη από το α. Αυτό σημαίνει ότι η μηδενική υπόθεση δεν απορρίπτεται, οπότε το αποτέλεσμα του t-test σε αυτή μόνο τη περίπτωση θα μπορούσε να διατυπωθεί ως «η πιθανότητα να μην ισχύει η εναλλακτική υπόθεση είναι 26.78%». Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, μπορεί με βεβαιότητα να ειπωθεί ότι η υιοθέτηση μια πιο ομαλής συμπεριφοράς κατά την οδήγηση, η οποία στη προκειμένη περίπτωση υλοποιείται μέσω του περιορισμού των επιταχύνσεων και των επιβραδύνσεων, **οδηγεί σε στατιστικά σημαντική μείωση των εκπομπών ρύπων CO₂, CO, PM_x και NO_x**. Έτσι, αποδεικνύεται ότι ο οδηγός οδηγεί οικολογικά, αν περιορίζει τις επιταχύνσεις και τις επιβραδύνσεις του οχήματός του στα 1.79 m/s² και στα 2.42 m/s² αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Σύνοψη μεθοδολογικής προσέγγισης

Στο παρελθόν, το ερευνητικό ενδιαφέρον για το θέμα της οδηγικής συμπεριφοράς και της οικολογικής οδήγησης υπήρξε εξαιρετικά έντονο. Ωστόσο, μέχρι τώρα τα δεδομένα που έχουν χρησιμοποιηθεί προέρχονταν κυρίως από πειραματικές διαδικασίες και μετρήσεις. Η εισαγωγή νέων τεχνολογιών, όπως είναι τα έξυπνα κινητά τηλέφωνα (smartphones), στο πεδίο της έρευνας των μεταφορών κατέστησε δυνατή τη συλλογή, την αποθήκευση και τη μετάδοση δεδομένων φυσικής οδήγησης με υψηλή ανάλυση. Τα δεδομένα παρέχουν νέες δυνατότητες για την αναλυτική αποτίμηση της επίδρασης της οδηγικής συμπεριφοράς στα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά της κυκλοφοριακής ροής.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν να διερευνηθούν οι επιπτώσεις των διαφορετικών οδηγικών προτύπων (ή προφίλ) στα θεμελιώδη μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής και στις εκπομπές ρύπων από οχήματα ΙΧ, τόσο σε επίπεδο αρτηρίας, όσο και σε επίπεδο δικτύου. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκε μια πολυεπίπεδη μεθοδολογία με βάση την πρώτη παράγωγο της ταχύτητας και τη μεταβλητότητά της, σύμφωνα με την οποία: α. ορίστηκαν οι παράμετροι της οδηγικής συμπεριφοράς και ένας δείκτης οικολογικής οδήγησης, β. αναλύθηκαν πραγματικά δεδομένα μεγάλου όγκου από πολλαπλούς οδηγούς και ομαδοποιήθηκαν οι διαφορετικές συμπεριφορές σε συγκεκριμένα προφίλ, γ. τροποποιήθηκε το μικροσκοπικό πρότυπο ακολουθούντος οχήματος του Krauss, ώστε να περιγράψει τη συμπεριφορά του οδηγού ανάλογα με το προφίλ οδήγησής του και δ. αναλύθηκαν οι επιπτώσεις των διαφορετικών προφίλ οδήγησης στα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά της κυκλοφοριακής ροής και στις εκπομπές ρύπων.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στη διπλωματική εργασία αφορούσαν σε 4156 αστικές μετακινήσεις από 100 ξεχωριστούς οδηγούς, οι οποίοι είχαν εγκαταστήσει στο κινητό τους τηλέφωνο την εφαρμογή OSeven Telematics. Οι ποσοτικές αναλύσεις διεξήχθησαν σε λογισμικό ανοικτού κώδικα. Συγκεκριμένα, η προετοιμασία της βάσης δεδομένων, η προκαταρκτική ανάλυση και η ομαδοποίηση των δεδομένων σε προφίλ οδήγησης διεξήχθησαν στο λογισμικό ανοικτού κώδικα R, ενώ το κυκλοφοριακό υπόβαθρο, τα κυκλοφοριακά μοντέλα και η τελική προσομοίωση της κυκλοφορίας πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό ανοικτού κώδικα SUMO του DLR. Ακόμα, προκειμένου να συμπεριλάβει ένα ευρύ φάσμα καταστάσεων κυκλοφορίας, η προσομοίωση αυτή επαναλαμβάνεται σε τρία διακριτά σενάρια. Το πρώτο αφορά σε προσομοίωση σε οδό χωρίς σηματοδότηση, το δεύτερο σε προσομοίωση σε επίπεδο δικτύου και στο τρίτο λαμβάνονται δεδομένα για τους ρύπους, τόσο για όλο το δίκτυο αθροιστικά, όσο και για μια μεμονωμένη κεντρική οδό.

6.2 Βασικά συμπεράσματα

Από την ανάλυση και ομαδοποίηση των δεδομένων προέκυψε ότι η οδηγική συμπεριφορά μπορεί να ομαδοποιηθεί σε τρία προφίλ και ότι υπάρχει αύξουσα σχέση μεταξύ δεικτών οικολογικής οδήγησης και μεγέθους των επιταχύνσεων και των επιβραδύνσεων. Οι τρεις ομάδες (πρότυπα) ονομάστηκαν **DAU** (Drive As Usual), **HARSH** και **ECO**, ενώ ταυτόχρονα δημιουργήθηκε και η ομάδα **MIX** ως ποσοστιαίο άθροισμα των επιμέρους ομάδων. Συγκεκριμένα προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Είναι δυνατή η συλλογή δεδομένων κατά την οδήγηση χρησιμοποιώντας μόνο smartphones. Οι σύγχρονες τεχνολογίες καταγραφής, επεξεργασίας και αποστολής δεδομένων μέσω internet μπορούν να συμβάλλουν καθοριστικά στην έρευνα στο τομέα των μεταφορών.
- Τα δεδομένα φυσικής οδήγησης μπορούν να χωριστούν σε 3 ομάδες (συστάδες). Η ομαδοποίηση K-μέσων με τον αλγόριθμο του Lloyd μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα ($GS_u = 0.38$)
- Παρατηρείται αύξουσα σχέση ανάμεσα στα μεγέθη των επιταχύνσεων/επιβραδύνσεων και στο δείκτη οικολογικής οδήγησης **smooth_eco**. Όσο αυξάνεται ο δείκτης, τόσο η συμπεριφορά του οδηγού γίνεται πιο απότομη.

Η προτυποποίηση των προφίλ οδήγησης σε μικροσκοπικά κυκλοφοριακά μοντέλα και η περαιτέρω προσομοίωση έδειξαν ότι μεταβολές επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων επιδρούν καθοριστικά στις εκπομπές ρύπων, ενώ αντίθετα δεν ήταν δυνατό να βρεθεί μία καθολική σχέση μεταξύ των προτύπων και του χρόνου μετακίνησης. Ωστόσο, υπάρχουν ενδείξεις ότι η οικολογική οδήγηση προκαλεί αύξηση των χρόνων μετακίνησης και αναμονής των οχημάτων, σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από προσομοίωση κυκλοφορίας οχημάτων στο μικροσκοπικό προσομοιωτή SUMO.

Πιο συγκεκριμένα, από την προσομοίωση των προφίλ οδηγικής συμπεριφοράς σε μη σηματοδοτούμενες αστικές αρτηρίες προέκυψε ότι:

- Η ομογενοποίηση των επιταχύνσεων και των επιβραδύνσεων αυξάνει τη ροή των οχημάτων. Τα οχήματα βελτιστοποιούν τα μεταξύ τους κενά ασφαλείας με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο φόρτος των οχημάτων που εισέρχεται στην οδό. Επιπλέον, μειώνονται οι πιθανότητες κάποιο όχημα υψηλών επιταχύνσεων να παρεμποδίζεται από κάποιο άλλο πιο αργό.
- Ο κυκλοφοριακός φόρτος μεγιστοποιείται στο πρότυπο **ECO**, γεγονός που μπορεί να εξηγηθεί από τη μείωση των αποστάσεων ασφαλείας μεταξύ των οχημάτων. Τα οχήματα δεν πραγματοποιούν μεγάλες και μη προβλεπόμενες μεταβολές στη ταχύτητά τους, οπότε δεν «χάνεται» χώρος στη προσπάθεια των οχημάτων να διατηρήσουν την απόστασή τους από το προπορευόμενο όχημα.
- Αποδεικνύεται ότι τα αυτόνομα οχήματα θα μπορούσαν να βελτιώσουν τη ροή οχημάτων, καθώς ομογενοποιούν τις επιταχύνσεις και τις

επιβραδύνσεις τους και, επομένως, τα κενά ασφαλείας μεταξύ τους. Ένα παρόμοιο σύστημα ITS μπορεί να εφαρμοστεί και σε μη αυτόνομα οχήματα, όπου θα δίνονται συμβουλές στους οδηγούς για αύξηση ή μείωση των επιταχύνσεών τους.

- Το πρότυπο **HARSH** προκαλεί τις υψηλότερες εκπομπές ρύπων. Το πρότυπο **MIX** αντιστοιχεί, όπως αναμενόταν, σε μία μέση κατάσταση και ακολουθούν τα πρότυπα **DAU** και **ECO**. Η σύγκριση των **ECO** και **MIX** οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μείωση όλων των ρύπων είναι στατιστικά σημαντική. Η διαφορά των εκπομπών CO₂ στο **ECO** – **MIX** κυμαίνεται μεταξύ των -43.34% (μείωση) και 1.51% (αύξηση).

Σε αρτηρίες με σηματοδοτούμενους κόμβους η προσομοίωση κατέδειξε ότι:

- Ο φωτεινός σηματοδότης (πράσινο 27 s, κίτρινο 3 s και κόκκινο 30 s) περιόρισε το φόρτο από τα 2000 οχ./ώρα στα 800 οχ./ώρα περίπου. Το πρότυπο **ECO** δεν φαίνεται να επιδρά αρνητικά στο φόρτο της σηματοδοτούμενης οδού, ούτε βέβαια και στο φόρτο της μη σηματοδοτούμενης οδού.
- Το πρότυπο **HARSH** οδηγεί σε αύξηση των εκπομπών ρύπων σε σχέση με το **MIX** και δεν συμβάλλει θετικά στη βελτίωση της ωριαίας ροής οχημάτων στην οδό. Αντίθετα, το πρότυπο **ECO** οδηγεί σε στατιστικά σημαντική μείωση των ρύπων σε σύγκριση με το πρότυπο **MIX**, η οποία αγγίζει ακόμα και το -33% στο CO₂ και σημειώνει ακόμα μεγαλύτερη μείωση στα CO, PM_x και NO_x. Στα διαγράμματα ρύπων – πυκνότητας υπάρχουν εξαιρέσεις στη μείωση του CO₂.
- Δεν ήταν δυνατό στο παρόν σενάριο να διατυπωθεί κάποιο ξεκάθαρο συμπέρασμα σχετικά με το αν ο χρόνος που χρειάζονται οι οδηγοί για να διανύσουν την οδό αυξάνεται ή μειώνεται.

Τέλος, **σε επίπεδο δικτύου** τα βασικά συμπεράσματα φαίνεται ότι είναι τα παρακάτω:

- Τα αθροιστικά αποτελέσματα που περιλαμβάνουν όλες τις μετακινήσεις στη πόλη δείχνουν μείωση 8.39% στο CO₂, 1.85% στο CO, 11.55% στο PM_x και 9.94% στο NO_x, όταν τα οχήματα περιορίζουν τις επιταχύνσεις και τις επιβραδύνσεις τους στις τιμές του προτύπου **ECO** σε σχέση με τις τιμές του προτύπου **MIX**.
- Αντίθετα, ο συνολικός χρόνος μετακίνησης (**travelTime**) αυξάνεται κατά 7.31% και ο συνολικός χρόνος αναμονής (**waitingTime**) αυξάνεται κατά 21.54%.
- Η προσομοίωση σε κεντρικό οδικό άξονα δεν έδωσε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Συναρτήσε της πυκνότητας, οι ρύποι φαίνεται πως μειώνονται στο πρότυπο **ECO**. Αθροιστικά, αν και φαίνεται να υπάρχει μια σταθερή τάση μείωσης των ρύπων, ορισμένα λάθη στη προσομοίωση ή στην επεξεργασία των δεδομένων αποκλείουν τη διατύπωση ενός ξεκάθαρα συμπεράσματος.

6.3 Συνολικά συμπεράσματα

Συνολικά προκύπτει ότι η αύξηση της πυκνότητας οχημάτων έχει ως συνέπεια την αύξηση των εκπομπών ρύπων ανά όχημα και ανά χιλιόμετρο. Ακόμα, φαίνεται ότι το πρότυπο **ECO** οδηγεί σε μείωση ή ενδείξεις για μείωση εκπομπών CO₂, CO, PM_x και NO_x. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτή η μεταβολή είναι στατιστικά σημαντική, αφού επιβεβαιώνεται από Student's t-tests και Mann-Whitney U-tests. Τέλος, οι στατιστικοί έλεγχοι των υποθέσεων καταδεικνύουν ότι αν οι οδηγοί μειώσουν τις επιταχύνσεις και τις επιβραδύνσεις των οχημάτων τους στα ανώτατα όρια των 1.79 m/s² και 2.42 m/s² αντίστοιχα, τότε αυτό οδηγεί σε στατιστικά σημαντική μείωση των ρύπων. Οι οδηγοί που δεν υπερβαίνουν αυτές τις τιμές οδηγούν οικολογικά. Άρα, ένα πρότυπο οικολογικής (ή οικονομικής) οδήγησης υιοθετεί επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις αυτού του μεγέθους.

Γενικά, τα αποτελέσματα κρίνονται ως ικανοποιητικά όσον αφορά στην αναμενόμενη μεταβολή των μακροσκοπικών κυκλοφοριακών μεγεθών και των εκπομπών ρύπων. Φαίνεται ότι η ομογενοποίηση των επιταχύνσεων και των επιβραδύνσεων βελτιώνει και αυξάνει τη ροή οχημάτων ανά ώρα, αφού τα οχήματα βελτιστοποιούν τις μεταξύ τους αποστάσεις. Επιπλέον, η διατήρηση των επιταχύνσεων και των επιβραδύνσεων σε χαμηλές τιμές οδηγεί σε μείωση των ρύπων, αφού τα οχήματα πραγματοποιούν μόνο ομαλές μεταβολές της ταχύτητάς τους προκειμένου να εκκινήσουν, να σταματήσουν ή να ελαχιστοποιήσουν το κενό ασφαλείας μεταξύ του προπορευόμενου και του ακολουθούντος οχήματος.

Όσον αφορά, βέβαια, στο χρόνο μετακίνησης, τα αποτελέσματα δεν είναι τόσο ξεκάθαρα. Οι οδοί που εξετάστηκαν δεν παρουσίασαν μια σταθερή μείωση ή μια σταθερή αύξηση του χρόνου μετακίνησης. Αντίθετα, η προσομοίωση στο δίκτυο LuST με το πρότυπο **ECO** οδήγησε σε αύξηση των αθροιστικών χρόνων μετακίνησης και αναμονής σε σχέση με το πρότυπο **MIX** σε επίπεδο δικτύου.

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαφέρει σε μεγάλο βαθμό από παλαιότερες έρευνες που έχουν γίνει πάνω στο θέμα της οδηγικής συμπεριφοράς, των ρύπων και της οικολογικής οδήγησης. Οι βασικοί λόγοι είναι ότι χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα οδήγησης, όπου δεν είχαν δοθεί οδηγίες στους οδηγούς να ακολουθήσουν συγκεκριμένη διαδρομή ή να υιοθετήσουν συγκεκριμένη οδηγική συμπεριφορά, ενώ στη συνέχεια αξιοποιήθηκε ο δείκτης **smooth_eco** και άλλοι δείκτες οικολογικής συμπεριφοράς για να δημιουργηθεί το πρότυπο **ECO**. Έπειτα, αποδείχτηκε ότι αυτό το πρότυπο οδηγεί σε μείωση των εκπομπών CO₂, CO, PM_x και NO_x. Αντίθετα, οι εργασίες που είχαν γίνει παλαιότερα βασίζονταν σε δεδομένα οδήγησης που προέκυψαν από πειράματα με σκοπό το eco-driving. Το βασικό μειονέκτημα αυτών των πειραμάτων είναι ότι δεν μπορούν πάντα να αναπαραστήσουν τη πραγματικότητα, αφού οι οδηγοί αναγκάζονται να προσαρμοστούν στα δεδομένα του πειράματος και να ακολουθήσουν προκαθορισμένες διαδρομές.

6.4 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Το θέμα της διπλωματικής εργασίας που παρουσιάστηκε επιδέχεται πολλές αλλαγές, οι οποίες θα προσέθεταν επιπλέον παράγοντες αβεβαιότητας και έτσι θα οδηγούσαν σε αποτελέσματα και συμπεράσματα που επιβεβαιώνονται για περισσότερα σενάρια της κυκλοφορίας οχημάτων. Ενδεικτικά αναφέρονται:

- Ομαδοποίηση Κ-μέσων χρησιμοποιώντας περισσότερες μεταβλητές και βελτίωση του διαχωρισμού των ομάδων.
- Μείωση ή αύξηση του αριθμού των ομάδων, σύγκριση δεικτών Silhouette και διερεύνηση επιπτώσεων στους ρύπους και τη ροή των οχημάτων.
- Προσομοίωση χρησιμοποιώντας εναλλακτικά πρότυπα ακολουθώντας οχήματος και αλλαγή μοντέλων υπολογισμού ρύπων (π.χ. HBEFA 2.1, 3.1). Αξιοποίηση διαφορετικού λογισμικού προσομοίωσης.
- Εξαγωγή προτύπων επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων συναρτήσει της ταχύτητας, π.χ. για ταχύτητες 0 - 30 km/h, 30 - 60 km/h κ.ο.κ. Αυτό το σενάριο θα προσέδιδε περισσότερο ρεαλισμό, καθώς αναμένεται να ισχύει ότι $a_{0-30} > a_{30-60} > a_{60-90}$ και ομοίως για την επιβράδυνση.
- Διερεύνηση της επιρροής των ακραίων τιμών (outliers) στα αποτελέσματα της ομαδοποίησης Κ-μέσων και επιλογή της τυπικής μέγιστης τιμής $\mu + 2 \cdot \sigma$ της κανονικής κατανομής αντί για τη μέση μέγιστη επιτάχυνση και επιβράδυνση κάθε ομάδας.
- Εισαγωγή περισσότερων παραγόντων αβεβαιότητας στο δίκτυο, όπως για παράδειγμα περισσότεροι κόμβοι, κυκλικοί κόμβοι, κλίσεις στις οδούς κ.α.

Ωστόσο, πέρα από τις αλλαγές ή τις βελτιώσεις που θα μπορούσαν να γίνουν στην παρούσα εργασία, ανακύπτουν ορισμένα νέα θέματα, τα οποία θα μπορούσαν να διερευνηθούν στο πλαίσιο άλλων διπλωματικών εργασιών. Ενδεικτικά αναφέρονται:

- Περαιτέρω διερεύνηση και ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων της οικολογικής οδήγησης στους χρόνους μετακίνησης και αναμονής και στη δημιουργία ουρών οχημάτων.
- Διερεύνηση της αποδοχής του eco-driving από τους οδηγούς και δημιουργία του αντίστοιχου μίγματος, αυξάνοντας ή μειώνοντας αντίστοιχα το ποσοστό του προτύπου ECO. Έπειτα, ποσοτικοποίηση των αναμενόμενων ωφελειών.
- Επαλήθευση των εκπομπών ρύπων συναρτήσει της πυκνότητας, του φόρτου και της ταχύτητας χρησιμοποιώντας πραγματικές πειραματικές μετρήσεις από οχήματα σε αστικές οδούς.
- Ανάπτυξη προσομοίωσης της πολυτροπικής κυκλοφορίας και συναξιολόγηση της βελτίωσης της συμπεριφοράς των οδηγών σε συνάρτηση με άλλα μέτρα διαχείρισης της κυκλοφορίας, όπως για παράδειγμα πινακίδες μεταβλητών μηνυμάτων, πολιτικές πληρωμής

τελών κυκλοφορίας ανάλογα με την οικολογική ή μη συμπεριφορά του οδηγού, τεχνολογίες πληροφόρησης του οδηγού μέσα στο όχημα κ.α.

Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη ότι το SUMO αποτελεί δωρεάν λογισμικό προσομοίωσης της κυκλοφορίας οχημάτων και επιτρέπει τη δημιουργία προεκτάσεων για τη διερεύνηση θεμάτων σχετικά με τις μεταφορές, θα άξιζε ο σχεδιασμός ολόκληρου ή ενός μέρους του δικτύου της Αθήνας, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μελλοντικές ερευνητικές εργασίες. Παρότι πρόκειται για μια χρονοβόρα και εντατική εργασία, η δυνατότητα που προσφέρει το SUMO για εισαγωγή του δικτύου από άλλα προγράμματα (π.χ. OpenStreetMaps, PTV VISUM, PTV Vissim) καθιστά αυτό το έργο εφικτό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] European Commission. (2016). Reducing CO₂ emissions from passenger cars. Ανακτήθηκε από https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars_en
- [2] The International Council on Clean Transportation. (2015). European Vehicle Market Statistics – Pocketbook 2015/16. Ανακτήθηκε από http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EU/pocketbook_2015.pdf
- [3] Ma, L., Liang, J., Gao, D., Sun, J., Li, Z. (2012). The future demand of transportation in China: 2030 scenario based on a hybrid model. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 54, 428-437
- [4] United States Environmental Protection Agency. (2016). Climate Change Indicators: Global Greenhouse Gas Emissions. Ανακτήθηκε από www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-global-greenhouse-gas-emissions
- [5] Automobile Association. (2017). Drive smart and save. Ανακτήθηκε από <http://www.theaa.com/driving-advice/fuels-environment/drive-smart>
- [6] Eboli, L., Mazzulla, G., Pungillo, G. (2016). Combining speed and acceleration to define car users' safe or unsafe driving behaviour. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 68, 113-125
- [7] Tselentis, D. I., Yannis, G., Vlahogianni, E. I. (2017). Innovative motor insurance schemes: A review of current practices and emerging challenges. *Accident Analysis & Prevention*, 98, 139-148.
- [8] Meseguer, J. E., Toh, C.K., Calafate, C.T., Cano, J. C., Manzoni, P. (2017). DrivingStyles: A mobile platform for driving styles and fuel consumption characterization. *Journal of Communications and networks*, 19(2), 162-168
- [9] Fomunung, I., Washington, S., Guensler, R. (1999). A statistical model for estimating oxides of nitrogen emissions from light duty motor vehicles. *Transportation Research Part D*, 4(5), 333-352
- [10] Ericsson, E. (2001). Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors. *Transportation Research Part D*, 6(5), 325-345
- [11] Ho, S. H, Wong, Y. D., Chang, C. W. C. (2015). What can eco-driving do for sustainable road transport? Perspectives from a city (Singapore) eco-driving programme. *Sustainable Cities and Society*, 14, 82-88
- [12] U.S. Department of Energy, office of energy efficiency and renewable energy & U.S. Environmental protection agency. (2012a). Fuel Economy Guide 2012
- [13] U.S. Department of Energy, office of energy efficiency and renewable energy & U.S. Environmental protection agency. (2012b). Gas mileage tips – Keeping your car in shape. Ανακτήθηκε από: <http://www.fueleconomy.gov/feg/driveHabits.shtml>
- [14] Hennig, W. (2004). Ford Eco-driving: The clever move. *Vehicle environmental engineering & ford Europe*. Cologne, Germany.

- [15] Zarkadoula, M., Zoidis, G., Tritopoulou, E. (2007). Training urban bus drivers to promote smart driving: A note on a Greek eco-driving pilot program. *Transportation Research Part D*, 12(6), 449-451
- [16] Xu, Y., Li, H., Liu, H., Rodgers, M. O., Guensler, R. L. (2017). Eco-driving for transit: An effective strategy to conserve fuel and emissions. *Applied Energy*, 194, 784-797
- [17] Kobayashi, I., Tsubota, Y., Kawashima, H. (2007). Eco-driving simulation: evaluation of eco-driving withing a network using traffic simulation. *WIT Transactions on The Built Environment*, 96, 741-750
- [18] Alam, Md. S., McNabola, A. (2014). A critical review and assessment of Eco-Driving policy & technology: Benefits & Limitations. *Transport Policy*, 35, 42-49
- [19] Wang, M., Daamen, W., Hoogedoorn, S., Arem, B.V. (2012). Investigating potential impacts of an optimization-based eco-acc system on traffic and environment. In: *91st Annual Meeting of Transportation Research Board*, Washington, D.C., 2012
- [20] Beusen, B., Broekx, S., Denys, T., Beckx, C., Degraeuwe, B., Gijssbers, M., Scheepers, K., Govaerts, L., Torfs, R., Panis, L. I. (2009). Using on-board logging devices to study the longer-term impact of an eco-driving course. *Transportation Research Part D*, 14(7), 514-520
- [21] Liu, B. S., Lee, Y. H. (2006). In vehicle workload assessment: effects of traffic situations and cellular phone use. *Transportation research Part D: Transport and Environment*, 14(7), 514-520
- [22] Igliński, H., Babiak, M. (2017). Analysis of the potential of autonomous vehicles in reducing the emissions of greenhouse gases in road transport. In: *TRANSCOM 2017: International scientific conference on sustainable, modern and safe transport*, *Procedia Engineering*, 192, 353-358
- [23] SARTRE 2012, Διαθέσιμο στο: http://www.sartre-project.eu/en/publications/Documents/ITSWC_2012_control_pres.pdf
- [24] Codeca, L., Frank, R., Engel, T. (2015). Luxembourg SUMO Traffic (LuST) Scenario: 24 Hours of Mobility for Vehicular Networking Research. In: *Proceedings of the 7th IEEE Vehiculaar Networking Conference, Kyoto, Japan*
- [25] Codeca, L., Frank, R., Faye, S., Engel, T. (2016). Luxembourg SUMO Traffic (LuSt) Scenario: Traffic Demand Evaluation. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 9(2), 52-63
- [26] Mohamad, I., Usman, D. (2013). Standardization and Its Effects on K-Means Clustering Algorithm. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and technology*, 6(17), 3299-3303
- [27] Karthikeyani Visalakshi, N., Suguna, J. (2009). K-Means Clustering using Max-min Distance Measure. In: *NAFIPS 2009. Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society*,
- [28] Κοκολάκης, Γ., Σπηλιώτης, Ι. (2010). *Θεωρία Πιθανοτήτων και Στατιστική με Εφαρμογές*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμεών

- [29] Jain, A. K., Murty, M. N., Flynn, P. J. (1999). Data Clustering: A Review. *ACM Computing Surveys*, 31(3), 264-323
- [30] Ακακιάδου, Γ. (2007). *Μελέτη του αλγορίθμου ομαδοποίησης k-means σε δεδομένα του παγκόσμιου ιστού* (Διπλωματική εργασία). Ανακτήθηκε από Ιδρυματικό Καταθετήριο Επιστημονικών Εργασιών του ΑΠΘ.
- [31] Phillips, J. M. (2013). *CS 6955 Data Mining* [University Course]. Retrieved from <http://www.cs.utah.edu/~jeffp/teaching/cs5955/L10-kmeans.pdf>
- [32] k-means clustering. (n.d.). In *Wikipedia*. Retrieved July 28, 2017, from http://en.wikipedia.org/wiki/K-means_clustering
- [33] Bolshakova, N., Azuaje, F. (2003). Cluster validation techniques for genome expression data. *Signal Processing*, 83(4), 825-833
- [34] Davies, D. L., Bouldin, D. W. (1979). A Cluster Separation Measure. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-1(2), 224-227
- [35] Φραντζεσκάκης, Ι. Μ., Γκόλιας, Ι. Κ., Πιτσιάβα-Λατινοπούλου, Μ.Χ. (2009). *Κυκλοφοριακή Τεχνική*. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου
- [36] Maerivoet, S., De Moor, B. (2008). Traffic Flow Theory. In *arXiv:physics/0507126*, Retrieved August 2, 2017 from <http://arxiv.org/abs/physics/0507126v1>
- [37] Greenshields, B. D. (1935). A Study of Traffic Capacity. *Proceedings of the Highway Research Board*, 14, 448-477
- [38] Zaidi, K., Milojevic, M., Rakocevic, V., Rajarajan, M. (2015). Host Based Intrusion Detection for VANETs: A Statistical Approach to Rogue Node Detection. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology*
- [39] Edie, L. C. (1961). Car following and steady-state theory for non-congested traffic. *Operations Research*, 9, 66-76
- [40] Rompis, S., Habtemichaell, F., Cetin, M. (2014). A Methodology for Calibrating Microscopic Simulation for Modeling Traffic Flow under Incidents. In: *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Qingdao, China, October 8-11, 2014
- [41] Boubaker, S., Rehim, F., Kalboussi, A. (2015). Effect of vehicular technology on energy consumption and emissions. *International Journal of Environmental Studies*. doi: 10.1080/00207233.2015.1035568
- [42] Krauss, S. (1998). *Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics* (Doctoral Dissertation). Retrieved from DLR, Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt, Hauptabteilung Mobilität und Systemtechnik, Köln
- [43] Krajzewicz, D., Hartinger, M., Hertkorn, G., Mieth, P., Rössel, C., Zimmer, J., Wagner, P. (2005). Using the Road Traffic Simulation “SUMO” for educational purposes, *Traffic and Granular Flow '03*, Berlin, Heidelberg: Springer
- [44] Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, J., Bieker, L. (2012). Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban Mobility.

International Journal On Advances in Systems and Measurements, 5(3&4), 128-138

[45] Hausberger, S. (2008). The Model PHEM – Structure and Applications [PowerPoint Slides]. Retrieved from <http://www.tfeip-secretariat.org/assets/Transport/Expert-Meetings/JRC-Expert-meeting-on-the-Development-of-Emission-Factors-for-Road-Transport-Sector-16-17-October-2008-Ispra-Italy/200810Hausberger.pdf>

[46] TU Graz. (2009). *Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3* [Report]. Retrieved from http://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA_31_Docu_hot_emissionfactors_PC_LCV_HDV.pdf

[47] Andrieu, C., Saint Pierre, G. (2012). Comparing effects of eco-driving training and simple advices on driving behavior. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 54, 211-220