



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

**Σχολή Χημικών Μηχανικών και
Μηχανικών Περιβάλλοντος**

Αξιολόγηση Εναλλακτικών Μέτρων και Σεναρίων Βιώσιμης Αστικής Κινητικότητας μέσω Μικροσκοπικής Κυκλοφοριακής Προσομοίωσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΑΡΑΝΙΤΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

Επιβλέπουσα : Διονυσία Κολοκοτσά, Καθηγήτρια Π.Κ.

Συνεπιβλέπων: Δρ. Νικόλαος Καμπέλης

Μέλος Επιτροπής: Μιχαήλ Λαζαρίδης, Καθηγητής Π.Κ.

Χανιά, Ιούνιος 2025

“Μάθε κάτι καινούριο κάθε μέρα και κάνε λίγο καλό
γύρω σου, απλές αρχές με τεράστια δύναμη.”

Neil deGrasse Tyson

Αστροφυσικός, συγγραφέας και επιστημονικός
επικοινωνιολόγος

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της παρούσα Διπλωματικής Εργασίας σηματοδοτεί και το πέρας του κύκλου σπουδών μου στη Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος. Για τον λόγο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν με οποιοδήποτε τρόπο, στην προσπάθειά μου, όλο το διάστημα αυτό.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, την κυρία Διονυσία Κολοκοτσά, Καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, η οποία δέχτηκε να αναλάβει την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας, προσφέροντάς μου υποστήριξη και καθοδήγηση, για την υλοποίησή της.

Ταυτόχρονα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Νικόλαο Καμπέλη, Μεταδιδακτορικό Ερευνητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, για τον πολύτιμο χρόνο, την υποστήριξη και τη πολύτιμη συνδρομή που μου παρείχε, τόσο σε επιστημονικό όσο και σε προσωπικό επίπεδο, σε κάθε στάδιο της παρούσας εργασίας. Η συνεργασία μας ήταν γόνιμη, βασισμένη στον αμοιβαίο σεβασμό και την άμεση επικοινωνία.

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τους φίλους μου, με τους οποίους μοιράστηκα αυτήν την πορεία, δείχνοντας κατανόηση και στήριξη. Η παρουσία τους υπήρξε πολύτιμη, τόσο στις όμορφες στιγμές που δημιουργήσαμε μαζί, όσο και στις δύσκολες περιόδους που διένυσα.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την πιο βαθιά μου ευγνωμοσύνη προς την οικογένειά μου, η οποία στάθηκε δίπλα μου με κάθε τρόπο, και αποτέλεσαν το πιο σταθερό και ουσιώδες στήριγμα, καθ' όλη τη διάρκεια των χρόνων της φοίτησής μου.

Σύνοψη

Οι οδικές μεταφορές διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην καθημερινή λειτουργία της κοινωνίας, ωστόσο η περιβαλλοντική επιβάρυνση που προκαλούν εγείρει σοβαρές ανησυχίες. Η παρούσα διπλωματική έχει σκοπό τη μελέτη και αξιολόγηση επιλεγμένων Στρατηγικών Βιώσιμης Αστικής Κινητικότητας, για τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τις αστικές μεταφορές, μέσω του λογισμικού μικροσκοπικής προσομοίωσης SUMO. Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύχθηκε ένα βασικό σενάριο αναφοράς, προσεγγίζοντας την υφιστάμενη κατάσταση, ώστε να καταστεί δυνατή η σύγκριση με τα εναλλακτικά σενάρια. Το πρώτο σενάριο περιλαμβάνει την καθολική μείωση του ορίου ταχύτητας στα 30 km/h, το δεύτερο την υιοθέτηση ενός οικολογικού τρόπου οδήγησης, ενώ το τρίτο και τέταρτο σενάριο περιλαμβάνει σταδιακές αλλαγές στον στόλο των οχημάτων, όπως εκτιμάται από το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα, με χρονικό ορίζοντα το 2035 και 2050, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα παραπάνω σενάρια οδηγούν σε συνολική μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων, επιτυγχάνοντας τον βασικό στόχο της μελέτης. Συνολικά, η συνδυαστική εφαρμογή μέτρων αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη μετάβαση σε ένα βιώσιμο σύστημα μεταφορών, ενώ η χρήση της κυκλοφοριακής προσομοίωσης αποδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμη για την υποστήριξη στοχευμένων αποφάσεων στον σχεδιασμό μεταφορών και την περιβαλλοντική πολιτική.

Λέξεις κλειδιά: Βιώσιμη αστική κινητικότητα, οδικές μεταφορές, κυκλοφοριακή προσομοίωση, SUMO, εκπομπές ρύπων, περιβαλλοντική πολιτική

Abstract

Road transportation has a crucial impact to the daily functioning of society, however, its environmental burden remains a challenge. This thesis aims to study and evaluate selected Sustainable Urban Mobility Strategies, in order to mitigate the environmental impacts of urban mobility, using the microscopic simulation SUMO. Within this context, a baseline scenario was developed, approximating the current conditions, so that alternative scenarios can be compared. The first scenario involves the universal reduction of the speed limit to 30 km/h, the second the adoption of eco-driving practises, while the third and fourth scenarios refer to gradual changes in the vehicle fleet, according to the National Energy and Climate Plan, with target years 2035 and 2050, respectively. The results showed that all scenarios lead to an overall reduction in air pollution emissions, achieving the main objective of the study. Overall, applying these measures in combination is essential for the transition to a sustainable transport system, while the implementation of traffic simulation is fundamental to support targeted decisions in transport planning and environmental policy.

Keywords: Sustainable urban mobility, road transportation, traffic simulation, SUMO, emissions, environmental policy

Περίληψη

Η κυριαρχία των επιβατικών οχημάτων στις μετακινήσεις συμβάλλει σημαντικά στην περιβαλλοντική υποβάθμιση των αστικών περιοχών, καθώς οι εκπομπές αέριων ρύπων που προέρχονται από αυτά συνδέονται άμεσα με την επιδείνωση της ποιότητας του αέρα και τη δημόσια υγεία. Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων έχουν αναπτυχθεί τα Σχέδια Βιώσιμης Αστικής Κινητικότητας (ΣΒΑΚ), τα οποία στοχεύουν στη διαμόρφωση της αποδοτικότερης αστικής μετακίνησης, με περιορισμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό τη Μελέτη και Αξιολόγηση επιλεγμένων Στρατηγικών Βιώσιμης Αστικής Κινητικότητας, που αποσκοπούν στον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, αξιοποιώντας λογισμικό κυκλοφοριακής προσομοίωσης. Σε αυτό το πλαίσιο, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο κυκλοφορίας με ρεαλιστικές παραδοχές και διαμορφώθηκαν εναλλακτικά σενάρια, με απώτερο σκοπό τη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων στην περιοχή μελέτης.

Για την επίτευξη των στόχων της παρούσας εργασίας, αρχικά γίνεται μια αναφορά σχετικά με την επίδραση των οδικών μεταφορών στο περιβάλλον και στην υγεία των ανθρώπων, σε ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο. Παράλληλα, παρουσιάζονται στοιχεία για βασικούς άξονες με προσανατολισμό την επίλυση αυτών των προβλημάτων, όπως το θεσμικό πλαίσιο των ΣΒΑΚ, αλλά και επιμέρους μέτρα, όπως η μείωση του ορίου ταχύτητας σε 30 km/h, και η υιοθέτηση της οικολογικής οδήγησης (eco-driving), βάσει σχετικών μελετών που αξιολογούν τον αντίκτυπό τους. Η εξέλιξη και η διείσδυση της ηλεκτροκίνησης, τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Ελλάδα, εξετάστηκαν εξίσου, με έμφαση στις τρέχουσες τάσεις και τις προοπτικές ανάπτυξης του τομέα.

Στη συνέχεια, μετά την ανάλυση και κατανόηση της λειτουργίας του μοντέλου προσομοίωσης, εφαρμόστηκαν πέντε διαφορετικά σενάρια στην πόλη των Χανίων, η οποία επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης, λόγω της αυξημένης χρήσης επιβατικών οχημάτων στον αστικό ιστό της και της σχετικής περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκε ένα βασικό σενάριο, προσαρμοσμένο με βάση τα πιο πρόσφατα διαθέσιμα δεδομένα για τον στόλο και την κατανομή των οχημάτων. Ωστόσο, δεδομένης της έλλειψης αναλυτικών στοιχείων σχετικά με τη σύνθεση του στόλου, υιοθετήθηκαν τεκμηριωμένες προσεγγίσεις, προκειμένου να αποτυπωθεί με ρεαλιστικό τρόπο η ημερήσια κυκλοφορία στην περιοχή μελέτης. Το σενάριο αυτό λειτουργεί ως σημείο αναφοράς για τη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των υπόλοιπων σεναρίων.

Το πρώτο από τα εναλλακτικά σενάρια, αφορά την καθολική μείωση του ορίου ταχύτητας σε 30 km/h, ενώ το δεύτερο την υιοθέτηση της οικολογικής οδήγησης από τους οδηγούς. Για το τρίτο και τέταρτο σενάριο αντλήθηκαν δεδομένα από το ΥΠΕΝ, τα οποία αντικατοπτρίζουν την εκτιμώμενη κατανομή του στόλου οχημάτων για τα έτη 2035 και 2050, αντίστοιχα, προκειμένου να αποτυπωθεί η επίδραση της αυξημένης διείσδυσης οχημάτων νέας τεχνολογίας και χαμηλότερων εκπομπών στη συνολική περιβαλλοντική επίδοση της περιοχής μελέτης.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων επικεντρώνεται στο CO₂, το οποίο χρησιμοποιείται ως βασικός δείκτης ρύπανσης και συμβολής στην κλιματική αλλαγή, καθώς και στους ρύπους CO, HC, NO_x

και PM_x, που έχουν άμεσες και σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Από τη σύγκριση των σεναρίων με το βασικό διαπιστώθηκε ότι, τόσο στο πρώτο όσο και στο δεύτερο σενάριο, επιτεύχθηκε μείωση των συνολικών εκπομπών των αέριων ρύπων που εξετάστηκαν. Ωστόσο, η επίδραση του μέτρου δεν κατανέμεται ομοιογενώς σε όλα τα οδικά τμήματα, ενώ συνοδεύεται από αύξηση του μέσου χρόνου ταξιδιού. Στο τρίτο και τέταρτο σενάριο, παρατηρείται ακόμη μεγαλύτερη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων, αναδεικνύοντας τη σημασία της σταδιακής αντικατάστασης των παλαιών οχημάτων για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα. Τέλος, διατυπώνονται προτάσεις για την εφαρμογή κάθε μέτρου, ενώ επισημαίνεται ότι ο συνδυασμός των παρεμβάσεων μπορεί να αποφέρει τα μεγαλύτερα περιβαλλοντικά οφέλη.

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Ευρετήριο Εικόνων	5
Ευρετήριο Πινάκων	9
1 Εισαγωγή	10
1.1 Εισαγωγικό Πλαίσιο	10
1.2 Στόχοι Διπλωματικής	11
1.3 Δομή Διπλωματικής	12
2 Θεωρητικό Υπόβαθρο	14
2.1 Περιβάλλον και Μεταφορές	14
2.1.1 Εκπομπές στην Ευρώπη	14
2.1.2 Εκπομπές στην Ελλάδα	18
2.2 Ρύποι και Δημόσια Υγεία	20
2.3 Θεσμικό Πλαίσιο	21
2.3.1 ΣΒΑΚ	21
2.3.2 Κατηγορίες EURO	23
2.4 Όριο Ταχύτητας 30 km/h	24
2.5 Οικολογική οδήγηση (eco-driving)	25
2.6 Ηλεκτροκίνηση στην Ευρώπη και στην Ελλάδα	27
3 Μεθοδολογία	32
3.1 Ροή Εργασίας	32
3.2 Μοντέλα Προσομοίωσης	33
3.3 Simulation of Urban MObility (SUMO)	34
3.3.1 Μοντέλο Krauss	35
3.3.2 SUMO Tools	38
3.4 Εκπομπές - HBEFA	40
4 Εφαρμογή και Αποτελέσματα	44
4.1 Παρουσίαση Σεναρίων	44
4.2 Οδικό Δίκτυο	44
4.3 Βασικό Σενάριο	46
4.3.1 Χαρακτηριστικά Σεναρίου	46

4.3.2	Αποτελέσματα	50
4.4	1 ^ο Σενάριο	59
4.4.1	Τροποποιήσεις στο Δίκτυο	59
4.4.2	Ανάλυση Αποτελεσμάτων	59
4.5	2 ^ο Σενάριο	66
4.5.1	Τροποποιήσεις στα Εισαγόμενα Δεδομένα	66
4.5.2	Ανάλυση Αποτελεσμάτων	67
4.6	3 ^ο Σενάριο	73
4.6.1	Τροποποιήσεις στα Εισαγόμενα Δεδομένα	73
4.6.2	Αποτελέσματα Εκπομπών	75
4.7	4 ^ο Σενάριο	81
4.7.1	Τροποποιήσεις στα Εισαγόμενα Δεδομένα	81
4.7.2	Αποτελέσματα Εκπομπών	81
4.8	Σύνοψη Αποτελεσμάτων	87
5	Συμπεράσματα	88
5.1	Σύνοψη Μεθολογικής Προσέγγισης	88
5.2	Βασικά Συμπεράσματα	89
5.3	Συνολικά Συμπεράσματα	90
5.4	Περιορισμοί και Προτάσεις για Μελλοντική έρευνα	92
	Βιβλιογραφία	93

Ευρετήριο Εικόνων

1.1	Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία [European Commission, 2024]	11
2.1	Ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα παγκοσμίως από το 1940 έως το 2024 σε δισεκατομμύρια μετρικούς τόνους (Gt) [Statista, 2023]	15
2.2	Παγκόσμιες εκπομπές (CO ₂) από την κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα [International Energy Agency, 2023]	16
2.3	Εξέλιξη στις εκπομπές CO ₂ ανά τομέα στην ΕΕ (1990–2019) [Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2019]	17
2.4	Παγκόσμιες εκπομπές CO ₂ από τον τομέα των μεταφορών ανά υποτομέα, στο Σενάριο Καθάρων Μηδενικών Εκπομπών, 2000–2030 [International Energy Agency, 2023]	17
2.5	Συνολικός Αριθμός Επιβατικών Αυτοκινήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση (2014–2023) [Eurostat, 2025]	18
2.6	Συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα της ενέργειας σε εκατομμύρια τόνους (Mt) για την περίοδο 1990 – 2023 [Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2025]	19
2.7	Εξέλιξη του στόλου οχημάτων για όλες τις κατηγορίες κατά την περίοδο 1990 – 2023 [Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2025]	20
2.8	Εξέλιξη Πωλήσεων Ηλεκτρικών Αυτοκινήτων Παγκοσμίως (2012–2024) [International Energy Agency, 2024]	28
2.9	Ποσοστό νέων ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση (2010–2023) [Ritchie, 2024]	29
2.10	Στόλος ηλεκτρικών αυτοκινήτων (συνολικός αριθμός σε χρήση) στην Ευρωπαϊκή Ένωση (2010–2023) [Ritchie, 2024]	30
2.11	Ποσοστό ηλεκτρικών αυτοκινήτων που βρίσκονται σε χρήση στην Ευρωπαϊκή Ένωση (2010–2023) [Ritchie, 2024]	30
2.12	Εικόνα 2.13: Αριθμός νέων εγγραφών ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων (2016–2025) [EVStats, 2024]	31
2.13	Στόλος ηλεκτρικών αυτοκινήτων (συνολικός αριθμός σε χρήση) στην Ελλάδα (2015–2023) [Ritchie, 2024]	31
3.1	Ροή δεδομένων και εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των σεναρίων	35
3.2	Υπολογισμός απαίτησης ισχύος [Stefan Hausberger και Krajzewicz, 2014]	41

4.1	Οριοθέτηση περιοχής μελέτης σύμφωνα με το ΣΒΑΚ Δήμου Χανίων [Δήμος Χανίων, 2018]	45
4.2	Απεικόνιση του χάρτη της περιοχής μελέτης στο OpenStreetMap	45
4.3	Απεικόνιση του οδικού δικτύου των Χανίων στο Περιβάλλον Προσομοίωσης SUMO	46
4.4	Χρονική εξέλιξη του στόλου βενζινοκίνητων επιβατικών οχημάτων στην Ελλάδα ανά κατηγορία Euro (1990–2030) [Spyropoulos et al. 2023]	48
4.5	Χρονική εξέλιξη του στόλου πετρελαιοκίνητων επιβατικών οχημάτων στην Ελλάδα ανά κατηγορία Euro (1990–2030) [Spyropoulos et al. 2023]	48
4.6	Αριθμός επιβατικών οχημάτων εντός του δικτύου, ανά 5 λεπτά κατά τη διάρκεια της ημέρας (06:00–24:00)	49
4.7	Χρονική Κατανομή Εκπομπών CO ₂ (06:00–23:00)	51
4.8	Χρονική Κατανομή Εκπομπών CO (06:00–23:00)	52
4.9	Χρονική Κατανομή Εκπομπών HC (06:00–23:00)	52
4.10	Χρονική Κατανομή Εκπομπών PM _x (06:00–23:00)	53
4.11	Χρονική Κατανομή Εκπομπών NO _x (06:00–23:00)	53
4.12	Εκπομπές CO ₂ ανά τμήμα οδικού δικτύου στο βασικό σενάριο (g/km/h)	54
4.13	Εκπομπές CO ανά τμήμα οδικού δικτύου στο βασικό σενάριο (g/km/h)	55
4.14	Εκπομπές HC ανά τμήμα οδικού δικτύου στο βασικό σενάριο (g/km/h)	55
4.15	Εκπομπές PM _x ανά τμήμα οδικού δικτύου στο βασικό σενάριο (g/km/h)	56
4.16	Εκπομπές NO _x ανά τμήμα οδικού δικτύου στο βασικό σενάριο (g/km/h)	56
4.17	Επίπεδα κυκλοφοριακού φόρτου στον αστικό ιστό των Χανίων το πρωινό διάστημα (10:00) [Χανίων, 2020]	57
4.18	Επίπεδα κυκλοφοριακού φόρτου στον αστικό ιστό των Χανίων το μεσημβρινό διάστημα (15:00) [Χανίων, 2020]	58
4.19	Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών CO ₂ σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)	60
4.20	Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών CO σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)	60
4.21	Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών HC σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)	61
4.22	Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών PM _x σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)	61
4.23	Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών NO _x σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)	62
4.24	Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών CO ₂ με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)	62
4.25	Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών CO με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)	63
4.26	Σύγκριση Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών HC με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)	63
4.27	Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών PM _x με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)	64
4.28	Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών NO _x με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)	64
4.29	Ποσοστό των Συνολικών Οδικών Τμημάτων που σημείωσαν Μείωση Εκπομπών ανά Ρύπο	65

4.30	Σύγκριση Μέσου Χρόνου Αναμονής σε σχέση με το Βασικό Σενάριο	66
4.31	Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών CO ₂ σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00) .	67
4.32	Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών CO σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00) . .	68
4.33	Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών HC σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00) . .	68
4.34	Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών PM _x σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00) .	69
4.35	Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών NO _x σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00) .	69
4.36	Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών CO ₂ με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)	70
4.37	Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών CO με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)	70
4.38	Σύγκριση Χωρικής της Κατανομής των Εκπομπών HC με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)	71
4.39	Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών PM _x με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)	71
4.40	Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών NO _x με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)	72
4.41	Ποσοστό των Συνολικών Οδικών Τμημάτων που σημείωσαν Μείωση Εκπομπών ανά Ρύπο	72
4.42	Σύγκριση Μέσου Χρόνου Αναμονής σε σχέση με το Βασικό Σενάριο	73
4.43	Εξέλιξη Στόλου Επιβατικών Οχημάτων ανά Τύπο Καυσίμου (ως % επί συνόλου) [Ενέργειας, 2019]	74
4.44	Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών CO ₂ σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00) .	76
4.45	Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών CO σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00) . .	76
4.46	Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών HC σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00) . .	77
4.47	Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών PM _x σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00) .	77
4.48	Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών NO _x σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00) .	78
4.49	Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών CO ₂ με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)	78
4.50	Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών CO με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)	79
4.51	Σύγκριση Χωρικής της Κατανομής των Εκπομπών HC με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)	79
4.52	Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών PM _x με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)	80
4.53	Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών NO _x με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)	80
4.54	Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών CO ₂ σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00) .	82
4.55	Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών CO σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00) . .	83
4.56	Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών HC σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00) . .	83
4.57	Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών PM _x σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00) .	84
4.58	Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών NO _x σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00) .	84

4.59	Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών CO ₂ με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)	85
4.60	Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών CO με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)	85
4.61	Σύγκριση Χωρικής της Κατανομής των Εκπομπών HC με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)	86
4.62	Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών PM _x με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)	86
4.63	Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών NO _x με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)	87

Κατάλογος πινάκων

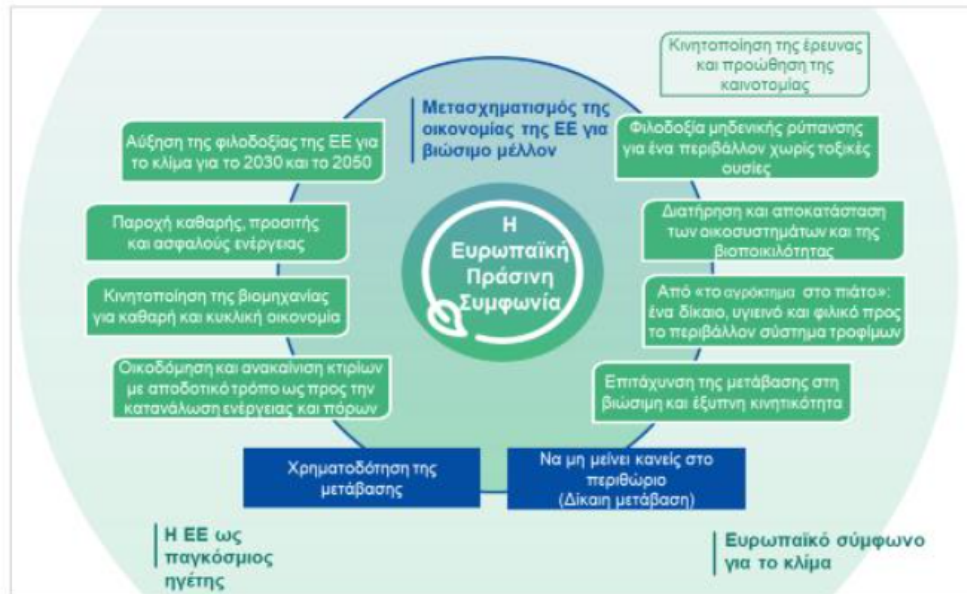
Πίνακας 2.1:	Πρότυπα εκπομπών Euro και Ημερομηνία έγκρισης [(ACEA), 2024] . . .	23
Πίνακας 2.2:	Όρια εκπομπών για βενζινοκίνητα οχήματα (g/km) [(ACEA), 2024] . . .	23
Πίνακας 2.3:	Όρια εκπομπών για πετρελαιοκίνητα οχήματα (g/km) [(ACEA), 2024] . .	23
Πίνακας 4.1:	Κατανομή οχημάτων ανά κατηγορία καυσίμου για το βασικό σενάριο [EVStats, 2024] [ACEA, 2025]	47
Πίνακας 4.2:	Κατανομή βενζινοκίνητων οχημάτων ανά κατηγορία εκπομπών Euro για το έτος 2023	49
Πίνακας 4.3:	Κατανομή πετρελαιοκίνητων οχημάτων ανά κατηγορία εκπομπών Euro για το έτος 2023	49
Πίνακας 4.4:	Συνολικές εκπομπές ρύπων στο Βασικό Σενάριο	50
Πίνακας 4.5:	Κυκλοφοριακοί δείκτες στο Βασικό Σενάριο	58
Πίνακας 4.6:	Σύγκριση Συνολικών Εκπομπών ανά Ρύπο μεταξύ Βασικού και 1 ^{ου} Σεναρίου	59
Πίνακας 4.7:	Μεταβολή των κύριων Κυκλοφοριακών δεικτών σε σχέση με το Βασικό Σενάριο	65
Πίνακας 4.8:	Τιμές Μέγιστης Επιτάχυνσης και Επιβράδυνσης για το Βασικό και 2 ^ο Σενάριο	66
Πίνακας 4.9:	Σύγκριση Συνολικών Εκπομπών ανά Ρύπο μεταξύ Βασικού και 2 ^{ου} σεναρίου	67
Πίνακας 4.10:	Μεταβολή των κύριων Κυκλοφοριακών δεικτών σε σχέση με το Βασικό Σενάριο	73
Πίνακας 4.11:	Κατανομή οχημάτων ανά κατηγορία καυσίμου για έτος 2030	74
Πίνακας 4.12:	Κατανομή βενζινοκίνητων οχημάτων ανά κατηγορία εκπομπών Euro για το έτος 2030	75
Πίνακας 4.13:	Κατανομή πετρελαιοκίνητων οχημάτων ανά κατηγορία εκπομπών Euro για το έτος 2030	75
Πίνακας 4.14:	Σύγκριση Συνολικών Εκπομπών ανά Ρύπο μεταξύ Βασικού και 3 ^{ου} σεναρίου	75
Πίνακας 4.15:	Κατανομή οχημάτων ανά κατηγορία καυσίμου για έτος 2050	81
Πίνακας 4.16:	Σύγκριση Συνολικών Εκπομπών ανά Ρύπο μεταξύ Βασικού και 4 ^{ου} σεναρίου	82
Πίνακας 4.17:	Συνολικοί Εκλυόμενοι Ρύποι ανά Σενάριο (kg)	87

1 Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγικό Πλαίσιο

Οι μεταφορές αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του σύγχρονου τρόπου ζωής, καλύπτοντας καθημερινές ανάγκες μετακίνησης του πληθυσμού. Οι μετακινήσεις με επιβατικά οχήματα, συνδυάζοντας την ευκολία και την αυτονομία, συμβάλλουν στην ενίσχυση της κινητικότητας και τη βελτίωση της προσβασιμότητας. Ωστόσο, η αυξανόμενη χρήση των ιδιωτικών οχημάτων, ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές, συνοδεύεται από σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η αύξηση των εκπομπών αέριων ρύπων, που συνδέονται άμεσα με την κλιματική αλλαγή, την ατμοσφαιρική ρύπανση και την δημόσια υγεία.

Η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα αυτό είναι ιδιαίτερα δύσκολη, λόγω της συνεχούς αύξησης της επιβατικής και εμπορευματικής δραστηριότητας [Sims et al. 2014]. Μάλιστα, σύμφωνα με την απάντηση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, επί της έκθεσης του Ευρωπαϊκού Ελεγκτικού Συνεδρίου [Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2022], σχετικά με την μείωση των εκπομπών CO₂ από τα επιβατικά οχήματα, πρόκειται για τον μοναδικό τομέα στην Ευρώπη, όπου οι εκπομπές CO₂ δεν έχουν μειωθεί από το 1990, μεταξύ άλλων επειδή ο αριθμός τους εξακολουθεί να αυξάνεται. Ανταποκρινόμενη σε αυτήν την πρόκληση, η Ευρωπαϊκή Ένωση, μέσω της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας, έχει θέσει ως φιλόδοξο στόχο να καταστεί η πρώτη κλιματικά ουδέτερη ήπειρος έως το 2050 [European Commission, 2024]. Για να επιτευχθεί αυτό, και τα 27 κράτη-μέλη της Ε.Ε. έχουν θέσει ως ενδιάμεσο βήμα, προς την επίτευξη των μηδενικών εκπομπών, να μειώσουν τις εκπομπές από τα επιβατικά αυτοκίνητα τουλάχιστον κατά το ήμισυ, έως το 2030, συγκριτικά με τα επίπεδα του 1990. Προκειμένου να υποστηριχθούν αυτοί οι στόχοι, προωθούνται στρατηγικές και πολιτικές που ενισχύουν αποδοτικότητα των μετακινήσεων, οι οποίες εντάσσονται σε στρατηγικά σχέδια, όπως τα Σχέδια Βιώσιμης Αστικής Κινητικότητας (ΣΒΑΚ), τα οποία αποσκοπούν στη βελτίωση της ποιότητας ζωής και της περιβαλλοντικής ισορροπίας στα αστικά κέντρα.



Εικόνα 1.1: Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία [European Commission, 2024]

Στην προσπάθεια επιδίωξης λοιπόν, ενός πιο αποδοτικού και βιώσιμου συστήματος μετακίνησης, τα μοντέλα κυκλοφοριακής προσομοίωσης αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για τον εντοπισμό των καταλληλότερων παρεμβάσεων σε μία περιοχή. Πρόκειται για ψηφιακά μοντέλα που επιτρέπουν την αναπαράσταση της ροής της κυκλοφορίας σε πραγματικές ή υποθετικές συνθήκες, συμβάλλοντας στον εντοπισμό προβλημάτων, στην δοκιμή εναλλακτικών λύσεων και στην εκτίμηση των επιπτώσεων που μπορεί να επιφέρουν. Τα βασικά πλεονεκτήματα των μοντέλων κυκλοφοριακής προσομοίωσης περιλαμβάνουν :

- την κατανόηση της κυκλοφορίας σε διαφορετικές χωρικές και χρονικές κλίμακες
- την πρόβλεψη κυκλοφοριακών συνθηκών
- την βελτιστοποίηση υποδομών και έργων, επιτρέποντας την δοκιμή σχεδιαστικών παρεμβάσεων
- τη συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων με σκοπό τη βελτίωση της συνολικής λειτουργίας του δικτύου
- την περιβαλλοντική αποτίμηση των επιπτώσεων της κυκλοφορίας

1.2 Στόχοι Διπλωματικής

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται μελέτη και αξιολόγηση επιλεγμένων στρατηγικών βιώσιμης αστικής κινητικότητας, οι οποίες σχετίζονται με τις υφιστάμενες ευρωπαϊκές κατευθύνσεις για τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τις αστικές μεταφορές. Η διερεύνηση πραγματοποιείται με τη χρήση του λογισμικού κυκλοφοριακής προσομοίωσης

SUMO (Simulation of Urban MObility), αξιοποιώντας σύγχρονα εργαλεία μοντελοποίησης και επικεντρώνεται στην ανάλυση διαφορετικών κυκλοφοριακών συνθηκών και σεναρίων και τις πιθανές επιδράσεις στο περιβάλλον. Σκοπός της εργασίας δεν είναι η πρόταση μιας ιδανικής λύσης, αλλά οι εξής :

- η κατανόηση της λειτουργίας του μοντέλου
- η παρουσίαση των βασικών αρχών της Βιώσιμης Αστικής Κινητικότητας (ΣΒΑΚ) και της σύνδεσής τους με το περιβάλλον
- η δημιουργία ενός μοντέλου κυκλοφορίας με ρεαλιστικές παραδοχές
- η μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων από την κυκλοφορία επιβατικών οχημάτων στην περιοχή μελέτης
- η εφαρμογή και σύγκριση διαφορετικών σεναρίων επιβατικών μετακινήσεων, ως προς τις εκπομπές αέριων ρύπων
- η ανάδειξη της σημασίας της προσομοίωσης ως εργαλείου υποστήριξης στη λήψη αποφάσεων

1.3 Δομή Διπλωματικής

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Για τον λόγο αυτό, κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση της δομής και της θεματολογίας των κεφαλαίων που την αποτελούν.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** γίνεται σύντομη αναφορά στο γενικό πλαίσιο και το υπόβαθρο της εργασίας, εστιάζοντας στον ρόλο των μεταφορών στον σύγχρονο τρόπο ζωής και τις βασικές περιβαλλοντικές προκλήσεις που προκύπτουν. Μέρος της ενότητας αυτής αποτελεί η αναφορά των στόχων της Ευρωπαϊκής Ένωσης για κλιματική ουδετερότητα ως το 2050, αλλά κυρίως το αντικείμενο μελέτης της εργασίας και οι κεντρικοί στόχοι που την διέπουν.

Το **δεύτερο κεφάλαιο** αποτελείται από τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, τα οποία αναχτήθηκαν από διεθνείς επιστημονικές βάσεις δεδομένων, επίσημες εκθέσεις την Ευρωπαϊκής Ένωσης, επιστημονικά άρθρα και εθνικά και τοπικά σχέδια βιώσιμης αστικής μετακίνησης. Αρχικά, εξετάζεται η επίδραση των οδικών μεταφορών στο περιβάλλον, με αναφορά στους κυριότερους ατμοσφαιρικούς ρύπους που προκύπτουν από τη λειτουργία τους και στις επιπτώσεις που αυτοί έχουν στη δημόσια υγεία. Στη συνέχεια, αναλύεται η έννοια του Σχεδίου Βιώσιμης Αστικής Κινητικότητας (ΣΒΑΚ), ενώ διερευνούνται επιλεγμένες στρατηγικές, όπως η μείωση του ορίου ταχύτητας και η οικολογική οδήγηση, με αναφορά σε ευρήματα από σχετικές έρευνες. Τέλος, γίνεται εισαγωγή στην έννοια της ηλεκτροκίνησης και στην αυξανόμενη τάση υιοθέτησής της σε ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** της εργασίας, γίνεται η περιγραφή της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε. Πιο συγκεκριμένα, εξηγείται ο τρόπος της λειτουργίας του λογισμικού SUMO και των εργαλείων που αξιοποιούνται για την υλοποίηση του έργου και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Το **τέταρτο κεφάλαιο** περιλαμβάνει την εφαρμογή της προσομοίωσης και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Καθώς προηγείται η περιγραφή του βασικού σεναρίου, το οποίο αποτυπώνει την υφιστάμενη κατάσταση, και των διαδοχικών εναλλακτικών σεναρίων, στην συνέχεια παρουσιάζεται η συγκριτική αποτίμηση που προέκυψε, μέσω πινάκων και γραφημάτων, τα οποία απεικονίζουν τις μεταβολές στις εκπομπές ρύπων σε σχέση με το βασικό σενάριο.

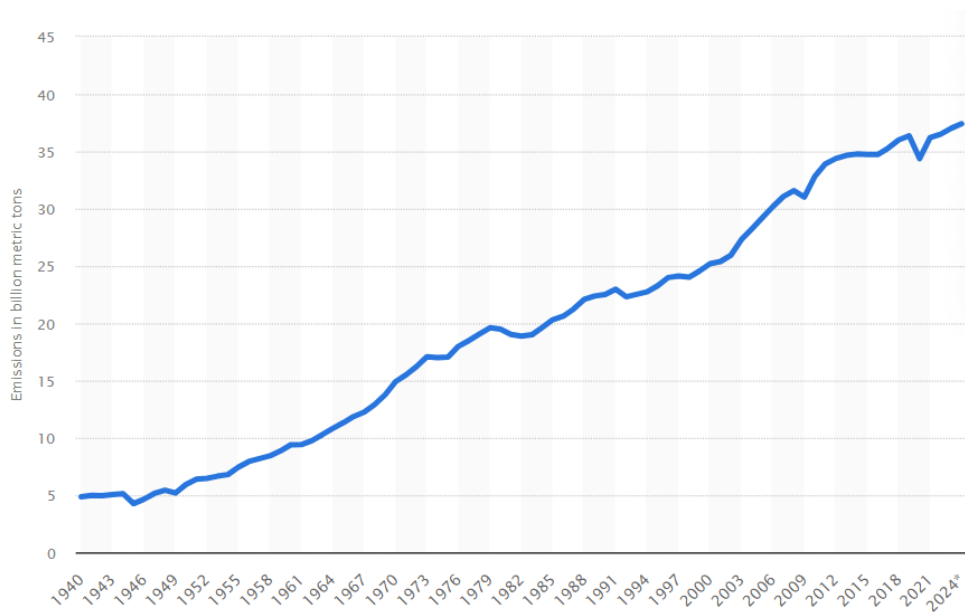
Το **πέμπτο κεφάλαιο** περιλαμβάνει τα συμπεράσματα της εργασίας. Γίνεται σύντομη ανακεφαλαίωση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα ανά σενάριο και οι γενικές διαπιστώσεις της μελέτης. Τέλος, διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα και πιθανές κατευθύνσεις βελτίωσης του μοντέλου ή επέκτασης της ανάλυσης.

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Περιβάλλον και Μεταφορές

2.1.1 Εκπομπές στην Ευρώπη

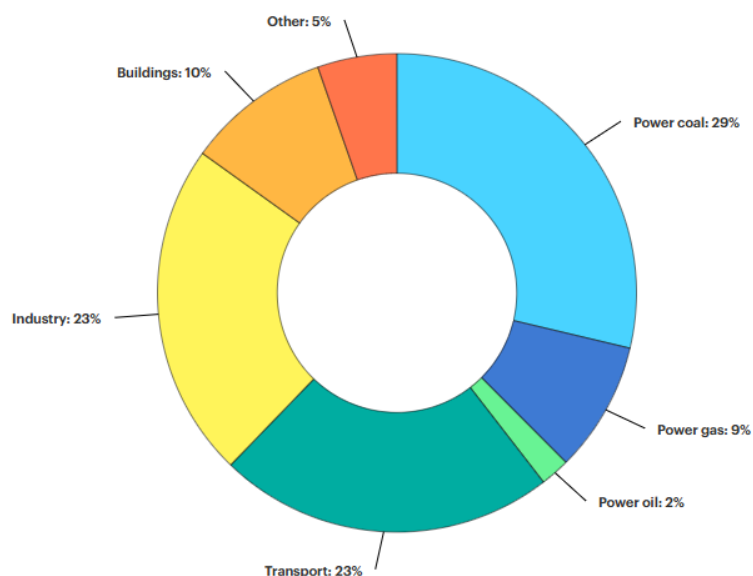
Η ατμοσφαιρική ρύπανση συγκαταλέγεται στις πλέον κρίσιμες περιβαλλοντικές προκλήσεις της σύγχρονης εποχής, με άμεση επιρροή στην υγεία των ανθρώπων και την κλιματική ισορροπία του πλανήτη. Ένας από τους βασικούς μηχανισμούς που συνδέουν τα φαινόμενα αυτά είναι η «συσσώρευση» αερίων του θερμοκηπίου (GHG) στην ατμόσφαιρα, τα οποία απορροφούν και επανεκπέμπουν θερμική ακτινοβολία, ενισχύοντας το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αν και το φαινόμενο αυτό είναι απαραίτητο για τη διατήρηση της ζωής, η υπερβολική αύξηση των συγκεντρώσεων αυτών των αερίων, λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, εντείνει το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου και διαταράσσει την πλανητική ενεργειακή ισορροπία. Μάλιστα, στην 6^η έκθεση αξιολόγησης της «Διακυβερνητικής Ομάδας για τις Κλιματικές Μεταβολές (IPCC)», η οποία δημοσιεύτηκε το 2023, αναφέρεται πως οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που προέρχονται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες είναι υπεύθυνες για περίπου το 1,1 °C της θέρμανσης του πλανήτη από τις αρχές του 20^{ού} αιώνα [Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022]. Μεταξύ των αερίων του θερμοκηπίου, το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) έχει τη μεγαλύτερη συμβολή, αντιστοιχώντας περίπου στο 75% των παγκόσμιων εκπομπών GHG, σύμφωνα με τις τελευταίες δημοσιεύσεις του Υπουργείου Μεταφορών των Ηνωμένων Πολιτειών [EPA, 2024]. Η συνεχώς αυξανόμενη παραγωγή του συνδέεται άμεσα με την καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας, τις βιομηχανικές δραστηριότητες και κυρίως τον τομέα των μεταφορών. Ακόμη, είναι σημαντικό να αναφερθεί, πως οι συνολικές εκπομπές του αυξήθηκαν κατά 44% μεταξύ 1990 και 2019, με τους τομείς της ενέργειας και των μεταφορών να αποτελούν τις βασικότερες πηγές [EPA, 2024].



Εικόνα 2.1: Ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα παγκοσμίως από το 1940 έως το 2024 σε δισεκατομμύρια μετρικούς τόνους (Gt) [Statista, 2023]

Η εικόνα 2.1 αποτυπώνει την χρονική εξέλιξη των παγκόσμιων ετήσιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από το 1940 έως το 2024. Οι εκπομπές εκφράζονται σε δισεκατομμύρια μετρικούς τόνους (gigatonnes), γεγονός που αναδεικνύει το μέγεθος του φαινομένου. Η συνεχής αύξηση αντικατοπτρίζει τη ραγδαία βιομηχανική και ενεργειακή ανάπτυξη, υποδεικνύοντας την ανάγκη για ουσιαστικές παρεμβάσεις.

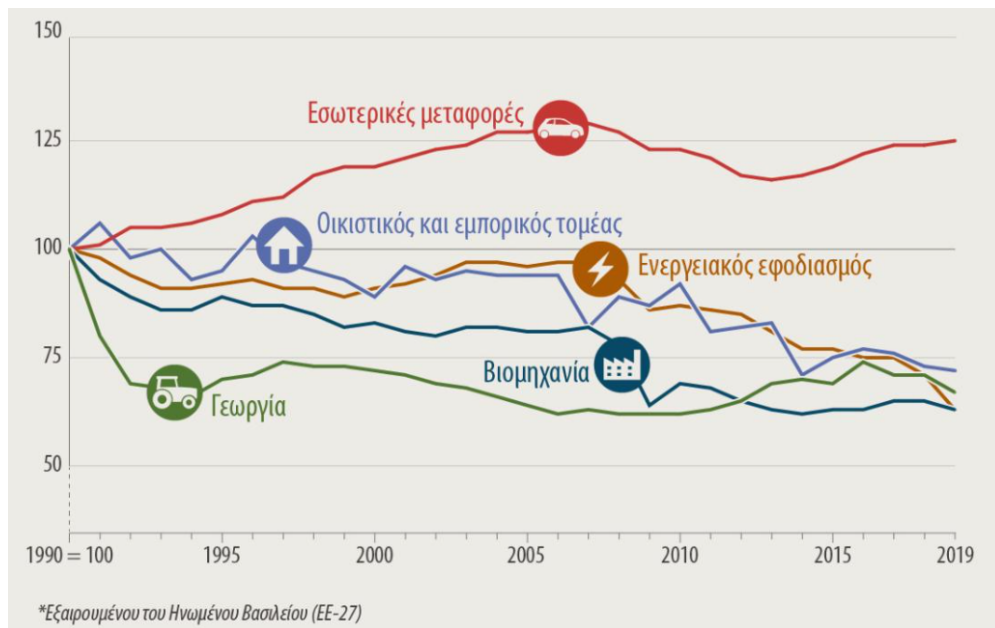
Ο τομέας των μεταφορών αποτελεί μια από τις σημαντικότερες πηγές εκπομπών GHG [International Energy Agency, 2023], ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει ανοδική τάση. Σύμφωνα με αναφορά της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος (EEA), όπως παρατίθεται στο έργο των Brand et al. 2021, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τις μεταφορές δεν παρουσιάζουν βελτίωση, σε αντίθεση με τους υπόλοιπους τομείς όπου καταγράφηκε μείωση την περίοδο 1990–2017 [Brand et al. 2021] [Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2022]. Συγκεκριμένα, ο τομέας των μεταφορών ευθύνεται για περίπου το ένα τέταρτο των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην Ε.Ε. [Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2019], από τις οποίες η πλειονότητα προέρχεται από τις οδικές μεταφορές, σε ποσοστό άνω του 70% [Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2019], ενώ σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή [European Commission, 2024], τα επιβατικά οχήματα ευθύνονται για το 16% των συνολικών εκπομπών CO₂ στην Ευρώπη.



Εικόνα 2.2: Παγκόσμιες εκπομπές (CO₂) από την κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα [[International Energy Agency, 2023](#)]

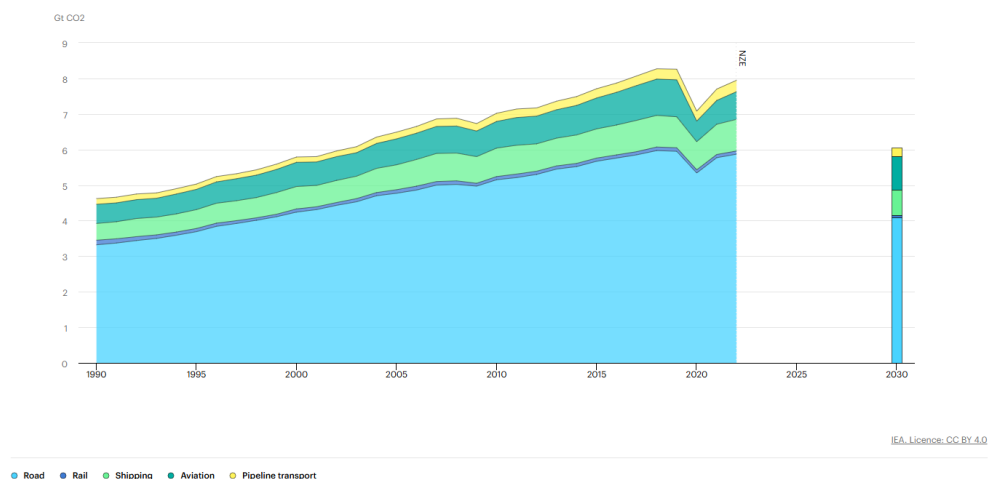
Στην εικόνα 2.2 παρουσιάζεται η κατανομή των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ που σχετίζονται με την ενέργεια, ανά βασικό τομέα δραστηριότητας. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική, καθώς επιτρέπει την αναγνώριση των κυριότερων πηγών εκπομπών και τον εντοπισμό των τομέων όπου απαιτούνται οι σημαντικότερες παρεμβάσεις πολιτικής. Οι εκπομπές CO₂ από την κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα προκύπτουν από δραστηριότητες, όπως :

- η καύση ορυκτών καυσίμων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- οι μεταφορές (οχήματα, πλοία, αεροπλάνα, κ.λπ.)
- η βιομηχανική χρήση ενέργειας (θέρμανση, παραγωγή ατμού)
- θέρμανση/ψύξη σε κτίρια



Εικόνα 2.3: Εξέλιξη στις εκπομπές CO₂ ανά τομέα στην ΕΕ (1990–2019) [Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2019]

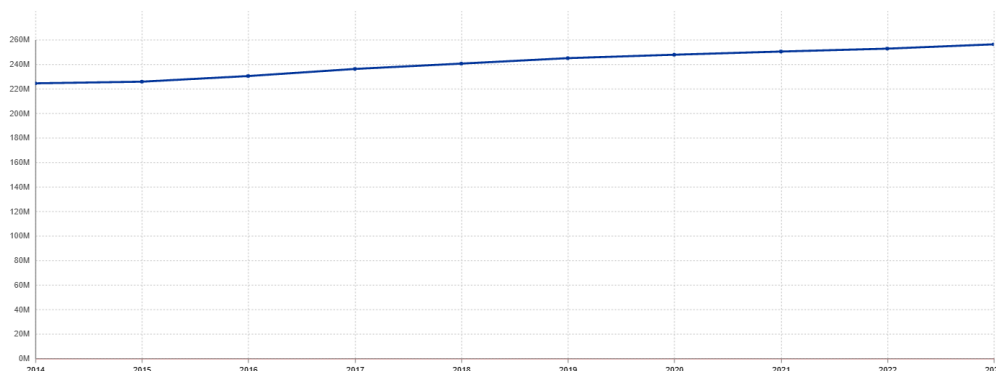
Η Εικόνα 2.3, αποδεικνύει ότι, ότι ενώ αρκετοί τομείς (ενέργεια, βιομηχανία, γεωργία, οικιστικός-εμπορικός) έχουν μειώσει τις εκπομπές τους από το 1990, οι εσωτερικές μεταφορές παρουσιάζουν αντίθετη πορεία, τονίζοντας την ανάγκη για θέσπιση κλιματικών στόχων. Οι εσωτερικές μεταφορές περιλαμβάνουν δραστηριότητες μετακίνησης εντός των συνόρων μιας χώρας, όπως οι οδικές, οι σιδηροδρομικές και οι δημόσιες συγκοινωνίες, εξαιρουμένων των διεθνών πτήσεων και της ναυτιλίας.



Εικόνα 2.4: Παγκόσμιες εκπομπές CO₂ από τον τομέα των μεταφορών ανά υποτομέα, στο Σενάριο Καθαρών Μηδενικών Εκπομπών, 2000–2030 [International Energy Agency, 2023]

Καθώς οι μεταφορές εξακολουθούν να εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από κινητήρες εσωτερικής καύσης, το CO₂ παραμένει το κυρίαρχο εκπεμπόμενο αέριο, αντιστοιχώντας στο 99% των συνολικών εκπομπών του τομέα [Brand et al. 2021].

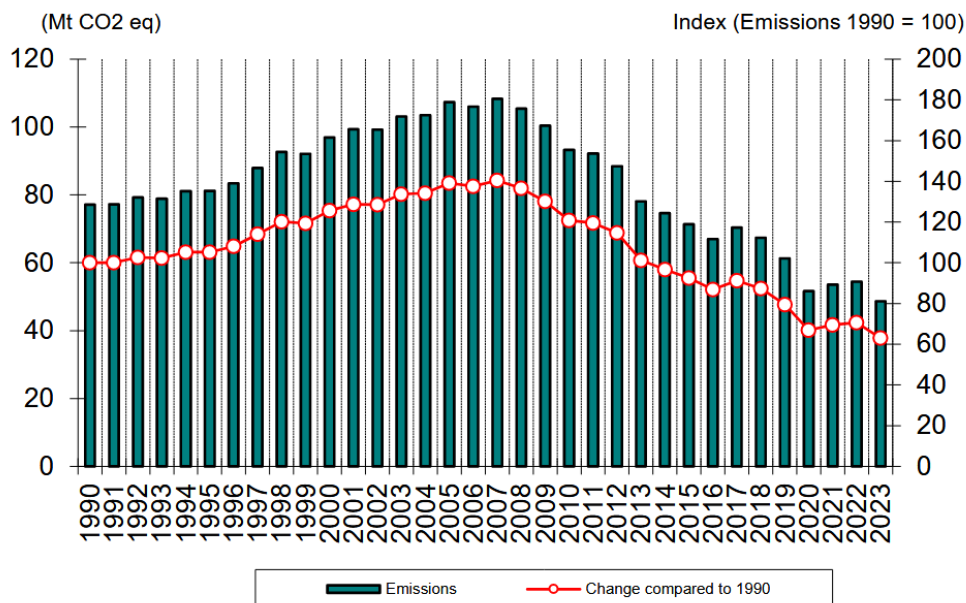
Η αύξηση του στόλου επιβατικών οχημάτων σχετίζεται άμεσα με την αύξηση των εκπομπών, ειδικότερα στις αστικές περιοχές. Η Εικόνα 2.5, παρουσιάζει την εξέλιξη του συνολικού αριθμού επιβατικών αυτοκινήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση για την περίοδο 2014–2023, υποδηλώνοντας την συνεχή αύξηση στον στόλο επιβατικών αυτοκινήτων, χωρίς σημαντικές πτώσεις ή διακυμάνσεις και ξεπερνώντας τα 260 εκατομμύρια [Eurostat, 2025], με σταθερή αύξηση κάθε χρόνο. Η κατάσταση αυτή καθιστά τον τομέα των μεταφορών έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που δυσχεραίνουν την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων σε αρκετές χώρες της Ε.Ε., μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα.



Εικόνα 2.5: Συνολικός Αριθμός Επιβατικών Αυτοκινήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση (2014–2023) [Eurostat, 2025]

2.1.2 Εκπομπές στην Ελλάδα

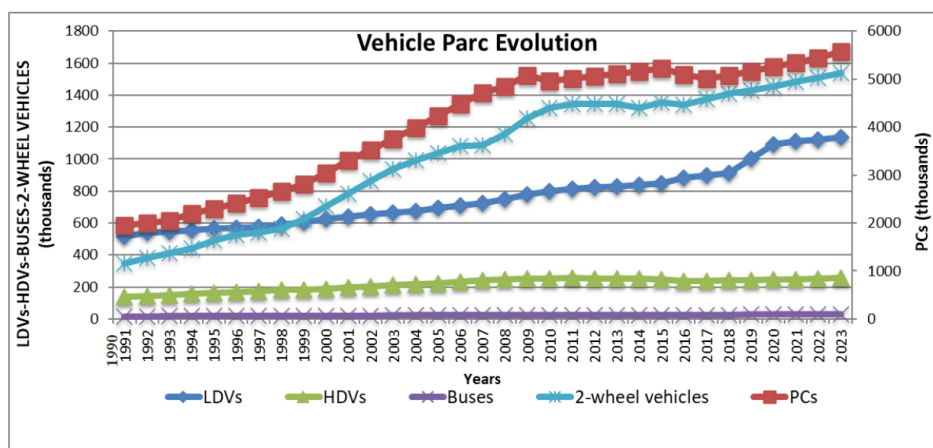
Λαμβάνοντας υπόψη την ανανεωμένη επίσημη απογραφή του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τον ενεργειακό τομέα στην Ελλάδα, για το έτος 2023 σημείωσαν μείωση παραπάνω του ενός τρίτου, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990 [Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2025], αντανακλώντας τη σταδιακή μετάβαση σε καθαρότερες μορφές ενέργειας αλλά και την επιρροή των πολιτικών μέτρων που υιοθετήθηκαν, μετά την εμφάνιση της πανδημίας του COVID-19. Το 2022, σε αντίθεση με αρκετές άλλες χώρες της Ε.Ε. όπου παρατηρήθηκαν πτωτικές τάσεις, η Ελλάδα παρουσίασε αύξηση σε ποσοστό +3,7%, καθώς εξέπεμπε 51 εκατομμύρια τόνους CO₂, καλύπτοντας το 0,15% των παγκόσμιων εκπομπών [International Energy Agency, 2025]. Η συνολική πορεία των εκπομπών αυτών απεικονίζεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 2.6, όπου καταγράφονται οι μακροχρόνιες διακυμάνσεις και οι κρίσιμες ετήσιες μεταβολές. Συγκεκριμένα, απεικονίζονται οι συνολικές εκπομπές σε εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου CO₂ (αριστερός άξονας) και ο δείκτη μεταβολής των εκπομπών σε σύγκριση με το έτος 1990.



Εικόνα 2.6: Συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα της ενέργειας σε εκατομμύρια τόνους (Mt) για την περίοδο 1990 – 2023 [Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2025]

Η Εθνική Έκθεση Απογραφής για τα Αέρια του Θερμοκηπίου, για το έτος 2023, από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας αναφέρει πως οι μεταφορές ευθύνονται για το 36,1% των συνολικών εκπομπών αέριων ρύπων και είναι ο μοναδικός τομέας, ο οποίος παρουσιάζει αύξηση από το 1990 και μετά, που φθάνει το 20,92% [Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2025]. Οι οδικές μεταφορές, αποτελούν βασική πηγή CO₂, με τα επίπεδά του το 2023, να εμφανίζονται αυξημένα κατά περίπου 25% σε σύγκριση με το 1990. Αντίθετα, το HC έχει υποχωρήσει σχεδόν κατά το ήμισυ, ενώ τα επίπεδα NO_x διατηρούνται σταθερά σε σχέση με την ίδια χρονιά.

Η σχετική συμβολή των οδικών μεταφορών στο σύνολο των εκπομπών του τομέα αυξήθηκε από 83% το 1990 κατά δύο ποσοστιαίες μονάδες έως το 2023, γεγονός που αποδίδεται στη σημαντική αύξηση του αριθμού των οχημάτων στη χώρα και την υπεροχή των ΙΧ., που σχεδόν τριπλασιάστηκαν από τότε [Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2024].



Εικόνα 2.7: Εξέλιξη του στόλου οχημάτων για όλες τις κατηγορίες κατά την περίοδο 1990 – 2023 [Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2025]

Στην Εικόνα 2.7 αποτυπώνεται η διαχρονική εξέλιξη του στόλου των οχημάτων εν χρήσει στην Ελλάδα από το 1990 έως το 2023, ανά κατηγορία. Ο αριστερός κατακόρυφος άξονας απεικονίζει τον αριθμό οχημάτων (σε χιλιάδες) για τις κατηγορίες ελαφρών οχημάτων (LDVs), βαρέων οχημάτων (HDVs), λεωφορεία και δίκυκλα, ενώ ο δεξιός κατακόρυφος άξονας αφορά μόνο τα επιβατικά οχήματα (PCs), επίσης σε χιλιάδες, δηλαδή η τιμή 1.000 στον άξονα σημαίνει 1.000.000 οχήματα.

2.2 Ρύποι και Δημόσια Υγεία

Η έκθεση σε ατμοσφαιρικούς ρύπους αποτελεί ιδιαίτερο λόγο ανησυχίας στις αστικές περιοχές, λόγω της πυκνής συγκέντρωσης πληθυσμού και η κυκλοφορία οχημάτων είναι, αν όχι η κύρια, τότε μία από τις βασικές πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης στις πόλεις [Reche et al. 2022]. Εκτός από τις εκπομπές CO₂, οι μεταφορές συνεισφέρουν σημαντικά και στην έκλυση άλλων επικίνδυνων ρύπων όπως τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και τα αιωρούμενα σωματίδια (PM_x), τα οποία έχουν άμεσες επιπτώσεις στη δημόσια υγεία. Η Διεθνής Ένωση Κατασκευαστών Αυτοκινήτων (OICA), η οποία εστιάζει στις τεχνολογίες ελέγχου εκπομπών (emissions control technologies), αναφέρει ότι οι εκπομπές των οχημάτων χωρίζονται σε πέντε βασικές κατηγορίες [International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (OICA), 2024] :

- **CO₂** : Το διοξείδιο του άνθρακα είναι κύριο προϊόν της καύσης καυσίμου που περιέχει άνθρακα), ωστόσο αν και δεν έχει άμεση επίδραση στην ανθρώπινη υγεία, αποτελεί δείκτης για την αξιολόγηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.
- **CO** : Το μονοξείδιο του άνθρακα παράγεται από ατελή καύση και είναι άχρωμο, άοσμο. Σε υψηλές συγκεντρώσεις είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο, καθώς μπορεί να προκαλέσει δηλητηριάσεις [Sharma et al. 2020].
- **HC** : Οι υδρογονάνθρακες γνωστοί και ως «Πητικές Οργανικές Ενώσεις (VOC)», είναι

υπολείμματα καυσίμου που δεν έχουν καεί πλήρως και συμβάλλουν στην δημιουργία του φωτοχημικού νέφους.

- **NO_x** : Τα οξείδια του αζώτου παράγονται όταν αέρας (που αποτελείται κυρίως από άζωτο και οξυγόνο) θερμαίνεται, όπως συμβαίνει σε έναν κινητήρα και έχουν άμεση συσχέτιση τόσο με το φωτοχημικό νέφος όσο και την όξινη βροχή
- **PM_x** : Τα αιωρούμενα σωματίδια προέρχονται από ατελή καύση άνθρακα, φθορά φρένων και ελαστικών και μπορούν να διεισδύσουν στο αναπνευστικό σύστημα και να προκαλέσουν χρόνιες παθήσεις.

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας έχει τεκμηριώσει πως έκθεση σε ρύπους που σχετίζονται με την κυκλοφορία συνδέεται με [\[World Health Organization \(WHO\), 2023\]](#):

- άσθμα
- συμπτώματα αναπνευστικών παθήσεων (άσθμα, χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια, καρκίνο του πνεύμονα)
- καρδιαγγειακή νοσηρότητα, όπως π.χ. στεφανιαία καρδιακή νόσο (φλεγμονή και βλάβες στα αγγεία της καρδιάς λόγω έκθεσης σε PM_x και NO_x)
- αγγειακά εγκεφαλικά επεισόδια
- θνησιμότητα
- πρόωρο τοκετό και χαμηλό βάρος γέννησης (μακροχρόνια έκθεση)

Επί προσθέτως, στην ανασκόπηση της υπάρχουσας επιδημιολογικής βιβλιογραφίας που παρατίθεται από τον Levy et. al (2010), διαπιστώθηκαν ισχυρές ενδείξεις για την σχέση ανάμεσα στη ρύπανση από την κυκλοφορία και την αύξηση της θνησιμότητας λόγω καρδιαγγειακών επεισοδίων. Επίσης, αποδείχθηκε και η συσχέτιση των PM_x με την πρόωρη θνησιμότητα, αφού λόγω του μικρού τους μεγέθους μπορούν να εισχωρήσουν βαθιά στους πνεύμονες [\[Levy et al. 2010\]](#).

Στην περίπτωση της Ελλάδας, ο τομέας των μεταφορών αποτελεί κύρια πηγή εκπομπών ρύπων, όπως τα NO_x και PM_x, αναδεικνύοντας την ανάγκη για αυστηρότερους ελέγχους και βελτιώσεις [\[ΕΛΣΤΑΤ, 2023\]](#).

2.3 Θεσμικό Πλαίσιο

2.3.1 ΣΒΑΚ

Η βιώσιμη αστική κινητικότητα αποτελεί βασικός πυλώνας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής [\[Ενέργειας, 2019\]](#). Η Ε.Ε. προωθεί την ανάπτυξη και εφαρμογή Βιώσιμης Αστικής Κινητικότητας (ΣΒΑΚ), μέσω της εφαρμογής μέτρων, που διασφαλίζουν την ποιότητα

ζωής, την προσβασιμότητα και την περιβαλλοντική ισορροπία, σε μια προσπάθεια επίτευξης των στόχων που έχουν τεθεί [European Commission, 2025] [Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2025]. Η συμβολή των μεταφορών στη βιώσιμη ανάπτυξη επισημάνθηκε σε αρχικό στάδιο κατά τη διάρκεια της «20^{ης} Διάσκεψης της Γης» του ΟΗΕ το 1992 και επιβεβαιώθηκε στο τελικό της έγγραφο την «Agenda 21» [United Nations, 2024], ενώ η έννοια του ΣΒΑΚ εμφανίστηκε στο επίσημο θεσμικό κείμενο της «Αστικής Δέσμης Μέτρων» (Urban Mobility Package) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής το 2013 [Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2019]. Η εφαρμογή τους βασίζεται στις Οδηγίες για την Ανάπτυξη και Υλοποίηση Σχεδίων Βιώσιμης Αστικής Κινητικότητας (ΣΒΑΚ), οι οποίες έχουν εκδοθεί από την «European Platform on Sustainable Urban Mobility Plans». Οι κατευθύνσεις αυτές, είναι διαθέσιμες στην επίσημη διαδικτυακή πλατφόρμα «ELTIS», η οποία αποτελεί ευρωπαϊκό παρατηρητήριο για τη βιώσιμη αστική κινητικότητα, παραθέτοντας παραδείγματα καλών πρακτικών και στοιχεία για πάνω από 600 πόλεις. Η σημασία των ΣΒΑΚ ενισχύεται θεσμικά από τον αναθεωρημένο Κανονισμό TEN-T (2024), ο οποίος καθιστά υποχρεωτική την υιοθέτηση ΣΒΑΚ και προβλέπει τη συλλογή και υποβολή δεικτών, που αποτυπώνουν και αξιολογούν την πρόοδο της αστικής κινητικότητας. Σύμφωνα με αυτό, μερικοί από τους κύριους στόχους ενός ΣΒΑΚ είναι [European Commission, 2025]:

- η βελτίωση της προσβασιμότητας και κινητικότητας όλων των πολιτών
- η ενίσχυση της οδικής ασφάλειας
- η μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης
- η βελτίωση της αποδοτικότητας και του κόστους του συστήματος μεταφορών
- η προστασία και βελτίωση της ποιότητας ζωής και του περιβάλλοντος
- η ολοκληρωμένη σύνδεση του κυκλοφοριακού και πολεοδομικού σχεδιασμού
- η ενίσχυση των εναλλακτικών και ήπιων τρόπων μετακίνησης
- η προώθηση της ηλεκτροκίνησης

Στην Ελλάδα, η εκπόνηση των πρώτων ΣΒΑΚ ξεκίνησε το 2014, και πλέον βάσει του Νόμου 784/2021 πρέπει να έχουν μεσομακροπρόθεσμο ορίζοντα τουλάχιστον δέκα (10) ετών και να ακολουθούν τις κατευθυντήριες οδηγίες του Eltis. Η υλοποίησή τους είναι υποχρεωτική για [European Commission, 2025] :

- α'. όλες τις περιφέρειες,
- β'. τους δήμους υπό τη δικαιοδοσία των αρμόδιων αρχών δημόσιων μεταφορών της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης
- γ'. όλους τους δήμους με πληθυσμό άνω των 30.000 κατοίκων.

2.3.2 Κατηγορίες EURO

Από το 1992, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει αυστηρούς κανονισμούς για τον περιορισμό της ποσότητας επιβλαβών ρύπων από τα νέα οχήματα, με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα και της δημόσιας υγείας. Οι απαιτήσεις αυτές εφαρμόζονται μέσω προτύπων Euro, τα οποία εισάγονται προοδευτικά και επιβάλλουν δεσμευτικά όρια στις εκπομπές ρύπων CO, HC, PM_x και NO_x. Για αυτό, οι αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν επενδύσει σημαντικά σε σύνθετες τεχνολογίες ελέγχου καυσαερίων, ώστε κάθε νέο όχημα που κατασκευάζεται να πληρεί τις προϋποθέσεις που τίθενται από τα σχετικά πρότυπα. Σύμφωνα με την Society of Motor Manufacturers and Traders (SMMT), ένα νέο αυτοκίνητο σήμερα παράγει 50 φορές λιγότερους ρύπους από ένα όχημα της δεκαετίας του 1970, γεγονός που τονίζει την τεχνολογική πρόοδο στον τομέα της κατασκευής αυτοκινήτων [(ACEA), 2024]. Οι πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζουν την χρονική εξέλιξη των προτύπων Euro και τα όρια εκπομπών, όπως αυτά καθορίστηκαν από σχετικές νομοθετικές πράξεις της Ε.Ε..

Πρότυπο εκπομπών	Ημερομηνία έγκρισης
Euro 1	31 Δεκεμβρίου 1992
Euro 2	1 Ιανουαρίου 1997
Euro 3	1 Ιανουαρίου 2001
Euro 4	1 Ιανουαρίου 2006
Euro 5	1 Ιανουαρίου 2011
Euro 6	1 Σεπτεμβρίου 2015

Πίνακας 2.1: Πρότυπα εκπομπών Euro και Ημερομηνία έγκρισης [(ACEA), 2024]

Ρύπος / Πρότυπο	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6
CO	2.72	2.2	2.3	1.0	1.0	1.0
HC	–	–	0.20	0.10	0.10	0.10
NO _x	–	–	0.15	0.08	0.06	0.06
PM	–	–	–	–	0.005	0.005

Πίνακας 2.2: Όρια εκπομπών για βενζινοκίνητα οχήματα (g/km) [(ACEA), 2024]

Ρύπος / Πρότυπο	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6
CO	2.72	1.0	0.66	0.50	0.50	0.50
HC+NO _x	0.97	0.7	0.56	0.30	0.23	0.17
NO _x	–	–	0.50	0.25	0.18	0.08
PM	0.14	0.08	0.05	0.025	0.005	0.005

Πίνακας 2.3: Όρια εκπομπών για πετρελαιοκίνητα οχήματα (g/km) [(ACEA), 2024]

Αξίζει να αναφερθεί, πως το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης στις 12 Απριλίου 2024, ενέκρινε το νέο ευρωπαϊκό πρότυπο Euro 7 για τις εκπομπές ρύπων από οδικά οχήματα και πρόκειται να τεθεί σε ισχύ από τον Νοέμβριο του 2026 [Council of the European Union, 2024]. Ο Κανονισμός αυτός στοχεύει όχι μόνο στην περαιτέρω μείωση των εκπομπών επιβλαβών ρύπων από την εξάτμιση, αλλά και από άλλες πηγές, όπως η τριβή των ελαστικών και τη φθορά των φρένων, ενώ ακόμα εισάγονται απαιτήσεις για τη διάρκεια ζωής των μπαταριών.

2.4 Όριο Ταχύτητας 30 km/h

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, στην έκθεση (EU Road Safety: Towards «Vision Zero»), αναφέρει πως οι οδικές μεταφορές αποτελούν «τον κύριο υπαίτιο ατυχημάτων» στην Ευρώπη. Για τον λόγο αυτό, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει έναν μακροπρόθεσμο στόχο, να πλησιάσει όσο το δυνατόν περισσότερο στο μηδενισμό των θανάτων από τροχαία ατυχήματα έως το 2050, ενώ ως ενδιάμεσο στόχο προβλέπεται η μείωση των θανάτων κατά το ήμισυ, έως το 2030 [European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency (CINEA), 2022]. Στο πλαίσιο αυτής της πολιτικής, η επιβολή ορίου ταχύτητας στα 30 km/h σε κατοικημένες περιοχές αποτελεί μια στρατηγική παρέμβαση που στοχεύει στον περιορισμό των κινδύνων και την πρόωση της καθαρότερης ατμόσφαιρας, εντός του οδικού δικτύου [Yannis και Michelaraki, 2024].

Κοινό σημείο αναφοράς για την εφαρμογή αυτής της στρατηγικής είναι η οδική ασφάλεια, αφού στοιχεία από πληθώρα μελετών αποδεικνύουν ότι η πιθανότητα των ατυχημάτων σχετίζεται με την ταχύτητα των οχημάτων. Κάθε χιλιόμετρο την ώρα, συνδέεται με μείωση ατυχημάτων κατά 6% σε κύριους και αστικούς δρόμους, όπως συνοψίζεται στην ανασκόπηση των Archer et al. (2008) [Archer et al. 2008]. Αντίστοιχα, η ανασκόπηση των Michelaraki and Yannis(2024) τεκμηριώνει περαιτέρω αυτή τη συσχέτιση, συγκεντρώνοντας ευρήματα από πολλές επιμέρους μελέτες. Σύμφωνα με τα στοιχεία που παρουσιάζονται, οι Cleland et al. καταγράφουν μειώσεις σε ατυχήματα κατά 25–45%, ενώ παρόμοια αποτελέσματα καταγράφονται και στις μελέτες των Lindenmann et al., Janssen & Verhoef (1989) και Vis et al., οι οποίες επίσης ενισχύουν την αξιοπιστία του μέτρου ως εργαλείο πρόληψης [Michelaraki et al. 2024]. Τα πρώτα αποτελέσματα από ευρωπαϊκές πόλεις, όπως το Άμστερνταμ, οι Βρυξέλλες, η Ζυρίχη, η Μπολόνια και η Γκρενόμπλ, οι οποίες υιοθέτησαν πολιτικές περιορισμού της ταχύτητας, ήταν θετικά, επιβεβαιώνοντας την αποτελεσματικότητα του μέτρου [Yannis και Michelaraki, 2024].

Εντούτοις, οι απόψεις για τις επιπτώσεις που μπορεί να επιφέρει στο περιβάλλον η μείωση του ορίου ταχύτητας είναι αντικρουόμενες. Η ανασκόπηση των Fondzenyuy et al. (2024) συγκεντρώνει εκτενή βιβλιογραφία σχετικά με τις επιπτώσεις της μείωσης των ορίων ταχύτητας στις εκπομπές ρύπων, καταδεικνύοντας ότι τα αποτελέσματα ποικίλλουν σημαντικά ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του εκάστοτε αστικού περιβάλλοντος [Fondzenyuy et al. 2024]. Συγκεκριμένα, ορισμένες έρευνες καταγράφουν σημαντικές μειώσεις στις εκπομπές CO₂, NO_x και PM_x, όταν η ταχύτητα μειώνεται από 50 σε 30 km/h. Για παράδειγμα, οι Madireddy et al. (2011) εντόπισαν μειώσεις εκπομπών έως και 40%, σε συγκεκριμένες αστικές συνθήκες [Madireddy et al. 2011], ενώ οι μελέτες των Casanova & Fonseca (2012) και Rhode et al. (2022) κατέγραψαν ανάλογα συμπεράσματα [Casanova et al. 2012] [Rhode et al. 2022]. Αντιθέτως, σε μη ομαλές συνθήκες κυκλοφορίας, όπως στη Βουδαπέστη (Gressai et al., 2021) και το Δουβλίνο (Tang et al., 2020) οι αντίστοιχες μελέτες καταγράφουν αύξηση των εκπομπών. Οι επιπτώσεις αυτές αποδίδονται σε αυξημένο αριθμό επιταχύνσεων-επιβραδύνσεων ή σε δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας των οχημάτων [Gressai et al. 2021] [Tang et al. 2019]. Συμπληρωματικά, η ανασκόπηση των Yannis and Michelaraki (2024), παρέχει μια συνολική εικόνα της υφιστάμενης βιβλιογραφίας, παρουσιάζοντας μελέτες με διστάμενα αποτελέσματα, όσον αφορά την επίδραση της μείωσης των ορίων

ταχύτητας στις εκπομπές ρύπων, διασφαλίζοντας τη συμπερίληψη ερευνητικών ευρημάτων υψηλής ποιότητας [Yannis και Michelaraki, 2024]. Πιο αναλυτικά, στο Βερολίνο, η εφαρμογή ορίων 30 km/h σε βασικούς οδικούς άξονες οδήγησε σε μείωση έως και 29% στα NO_x για την περίοδο 2017–2020, ενώ στο Μπιλμπάο, έναν χρόνο μετά την εφαρμογή του, ήδη διαπιστώθηκε μείωση 17,1% για τα NO_x και 19,1% στα PM_x. Παρόμοιες βελτιώσεις καταγράφηκαν και στο Graz της Αυστρίας, όπου οι εκπομπές NO_x μειώθηκαν στο ένα τέταρτο των συνολικών. Από την άλλη πλευρά, έχουν διατυπωθεί αμφιβολίες σχετικά με την επιβολή αυτού του μέτρου και την επίδρασή του στο περιβάλλον, αφού οι μελέτες των Jones και Brunt (2017), καθώς και των Williams και North (2013), παρουσιάζουν ευρήματα που υποδεικνύουν οι εκπομπές CO₂, NO_x και PM_x είναι υψηλότερες όταν επικρατεί το όριο ταχύτητας στα 30 km/h [Yannis και Michelaraki, 2024]. Επίσης, ο Gressai et al. (2021) υπογραμμίζει ότι η δομή του δικτύου διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο, τονίζοντας την ανάγκη για λεπτομερή αξιολόγηση πριν από την εφαρμογή τέτοιων πολιτικών [Gressai et al. 2021].

Παρά την πολυμορφία των πορισμάτων, ένα σημείο στο οποίο φαίνεται να συγκλίνουν τα ερευνητικά ευρήματα είναι η μείωση της ηχορύπανσης. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της περιορισμένης επιτάχυνσης, της μειωμένης ταχύτητας κύλισης και τριβής των ελαστικών με το έδαφος και των χαμηλότερων στροφών του κινητήρα, γεγονός που τεκμηριώνεται σε πολλές από τις μελέτες που παρουσιάζονται στις παραπάνω ανασκοπήσεις [Yannis και Michelaraki, 2024] [Michelaraki et al. 2024] [Archer et al. 2008] [Lu et al. 2023].

Πέρα από τις εκπομπές ρύπων, η μείωση του ορίου ταχύτητας έχει συνδεθεί και με αλλαγές στην κυκλοφοριακή ροή και του χρόνου μετακίνησης (travel times). Συγκεκριμένα, όπως καταγράφεται στις έρευνες που παρατίθενται στην μελέτη των Michelaraki and Yannis(2024), μεταξύ αυτών των Job and Mbugua (2020), Svensson et al. (2014) και Vis et al. (1992), η κυκλοφορία τείνει να είναι πιο ομαλή, με λιγότερες αλλαγές στην ταχύτητα των οχημάτων [Michelaraki et al. 2024]. Επιπλέον, αν και καταγράφεται μια ήπια αύξηση των χρόνων ταξιδιού, αυτή είναι συνήθως μικρότερη από αυτή που προσδοκά το κοινό, το οποίο τείνει να υπερεκτιμά την καθυστέρηση, γεγονός που μπορεί να συμβάλλει στην αρχική αντίσταση απέναντι στο μέτρο [Yannis και Michelaraki, 2024] [Archer et al. 2008].

Τέλος, αξίζει να επισημανθεί πως η οδήγηση σε χαμηλές ταχύτητες προάγει έναν πιο βιώσιμο τρόπο ζωής, ενισχύοντας την επιλογή ήπιων μορφών μετακίνησης. Σε πόλεις, όπως η Γκρενόμπλ, το Λιλ και η Ζυρίχη, παρατηρείται αύξηση της πεζής και ποδηλατικής κυκλοφορίας, καθώς το αίσθημα ασφάλειας οδηγεί σε μεγαλύτερη προθυμία για ενεργή μετακίνηση, ενώ συγχρόνως μειώνονται τα προβλήματα υγείας και ενισχύονται η κοινωνική αλληλεπίδραση και η προσβασιμότητα [Yannis και Michelaraki, 2024].

2.5 Οικολογική οδήγηση (eco-driving)

Η πιο αποδοτική οδήγηση αποτελεί μέρος της λύσης για τη μείωση των εκπομπών αερίων από τις οδικές μεταφορές [Andrieu et al. 2012]. Στη μελέτη του Simcic (2012), το ECOWILL είναι ένα έργο που στοχεύει στην προώθηση του eco-driving σε μεγάλη κλίμακα, με τον Πρόεδρο της

FIA (Διεθνής Ομοσπονδία Αυτοκινήτου), Jean Todt, να υπογραμμίζει ότι «η οδήγηση με σεβασμό προς την εξοικονόμηση ενέργειας και την προστασία του περιβάλλοντος έχει πλέον εξελιχθεί σε προτεραιότητα για όλους τους οδηγούς, ανεξαρτήτως της εμπειρίας τους». Στο ίδιο έργο οι βασικές πρακτικές που περιλαμβάνει η στρατηγική αυτή, αφορούν [\[Simcic, 2012\]](#) :

- την πρόβλεψη της ροής της κυκλοφορίας
- τη διατήρηση σταθερής ταχύτητας με χαμηλές στροφές κινητήρα
- την έγκαιρη αλλαγή ταχυτήτων, ανάλογα με την κυκλοφορία, τις ανάγκες ασφαλείας και το όχημα.
- τον συχνό έλεγχο της πίεσης των ελαστικών
- τη συνετή χρήση ενέργειας, δηλαδή τον περιορισμό της χρήσης κλιματισμού και ηλεκτρικού εξοπλισμού, όταν δεν χρειάζονται, αλλά και την αποφυγή περιττού βάρους

Παράγοντες όπως η μορφολογία του δρόμου οι συνθήκες οδήγησης και οι ατομικές ενέργειες μπορούν να επηρεάσουν την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές [\[Qu et al. 2021\]](#), ενώ κατά την κυκλοφοριακή συμφόρηση, όπου επικρατούν χαμηλές ταχύτητες και συχνές επιταχύνσεις, η κατανάλωση καυσίμου και οι εκπομπές CO₂ είναι σχετικά υψηλές [\[M. Wang et al. 2012\]](#). Σύμφωνα με την μελέτη των Ho et al. (2015), η οικολογική οδήγηση, μπορεί να εφαρμοστεί στον τομέα των ιδιωτικών οχημάτων, αποφέροντας οφέλη που περιλαμβάνουν μείωση τόσο της κατανάλωσης καυσίμου όσο και των εκπομπών άνθρακα σε ποσοστό άνω του 10%, καθιστώντας το ένα αξιόλογο μέτρο μετριασμού που αξίζει να υιοθετηθεί σε μεγάλη κλίμακα για μεγαλύτερη βιωσιμότητα στον τομέα των μεταφορών [\[Ho et al. 2015\]](#).

Επί προσθέτως, στην έρευνα των Morello et al. (2016), χρησιμοποιήθηκε μια πλατφόρμα προσομοίωσης για την αξιολόγηση αυτής της οδηγικής συμπεριφοράς, μέσω της οποίας επιτεύχθηκε περίπου 10-15% μείωση των εκπομπών CO₂ [\[Morello et al. 2016\]](#). Κατά την βιβλιογραφική ανασκόπηση των Sekadakis et al. (2025), αναφέρεται πως σε αντίστοιχη έρευνα των Xu et al. (2022), που πραγματοποιήθηκε μέσω προσομοιώσεων υπήρξαν μειώσεις στις εκπομπές NO_x, CO και CO₂ αντιστοιχεί σχεδόν στο ένα τρίτο της αρχικής τιμής τους. Σε συνέχεια των ανωτέρω, στην πειραματική διαδικασία που περιγράφεται στη μελέτη των Sekadakis et al. (2025), 39 άτομα έκαναν δοκιμές σε προσομοιωτή οδήγησης, τόσο οι ρύποι, όσο και η πιθανότητα ατυχήματος μειώθηκαν, εφόσον οι συμμετέχοντες οδηγούσαν εφαρμόζοντας τις τεχνικές eco-driving. [\[Sekadakis et al. 2025\]](#). Ακόμη, σε ανάλυση 150 πραγματικών διαδρομών από τους Arroyo-López et al. (2022), διαπιστώθηκε μείωση σχεδόν 13 κιλών CO₂ ανά διαδρομή. Η μελέτη των Ahn et al. (2002), όπου χρησιμοποιήθηκε στατιστική μέθοδος (regression analysis) για την ανάλυση της σχέσης μεταξύ οδηγικής συμπεριφοράς και εκπομπών ρύπων, επιβεβαιώνει πως η υιοθέτηση ήπιων επιταχύνσεων και μειωμένων στροφών κινητήρα οδηγούν σε εντυπωσιακή μείωση των εκπομπών CO (98%) και NO_x (21%) [\[Ahn et al. 2002\]](#).

Μία άλλη προσέγγιση, σχετικά με την ποσοτικοποίηση των πλεονεκτημάτων της οικολογικής οδήγησης, παρουσιάστηκε από τους Kobayashi et al., οι οποίοι, χρησιμοποιώντας δεδομένα από

πραγματικές διαδρομές και αξιοποιώντας μοντέλα κυκλοφοριακής προσομοίωσης, έδειξαν ότι η συγκεκριμένη οδηγική συμπεριφορά μειώνει τις εκπομπές CO₂ κατά περίπου 3,5%, όταν η κυκλοφορία δεν ξεπερνά τα 1.600 οχήματα/ώρα, ενώ σε υψηλότερους φόρτους μπορεί να αυξήσει τις εκπομπές, λόγω περισσότερων στάσεων και εκκινήσεων «stop and go» και της συνεπαγόμενης καθυστέρησης [Kobayashi et al. 2007]. Επιπλέον, οι Alam et al. επισημαίνουν ότι οι πρακτικές αυτές ενδέχεται να αυξήσουν την πιθανότητα ατυχημάτων και τους αέριους ρύπους σε επίπεδο δικτύου [Alam et al. 2014], ενώ σύμφωνα με τους Wang, Daamen, Hoogendoorn & Arem (2012), παρόλο που η μείωση ταχύτητας και επιτάχυνσης μειώνει τις εκπομπές ανά όχημα, σε επίπεδο δικτύου μπορεί να προκαλέσει αύξηση, καθώς τα οχήματα παραμένουν ενεργά στο δίκτυο για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα [M. Wang et al. 2012].

Πέρα από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, το eco-driving μειώνει την κατανάλωση καυσίμου και τον θόρυβο, βελτιώνοντας σημαντικά την οδική ασφάλεια [Ho et al. 2015]. Μελέτες δείχνουν ότι οι πιο ομαλές τεχνικές οδήγησης μειώνουν έως και 10% τα ποσοστά συγκρούσεων [Alam et al. 2014], ενώ παράλληλα συμβάλλουν στη μείωση των ατυχημάτων κατά το ήμισυ [Nævestad, 2022]. Τέλος, σύμφωνα με τη μελέτη των Wang και Boggio-Marzet (2018), οδηγοί που παρακολούθησαν εκπαίδευση για την εφαρμογή του eco-driving πέτυχαν κατά μέσο όρο μείωση 6,3% στην κατανάλωση καυσίμου σε διάφορους τύπους δρόμων, με τα μεγαλύτερα οφέλη να καταγράφονται σε βασικούς αρτηριακούς άξονες [Y. Wang et al. 2018].

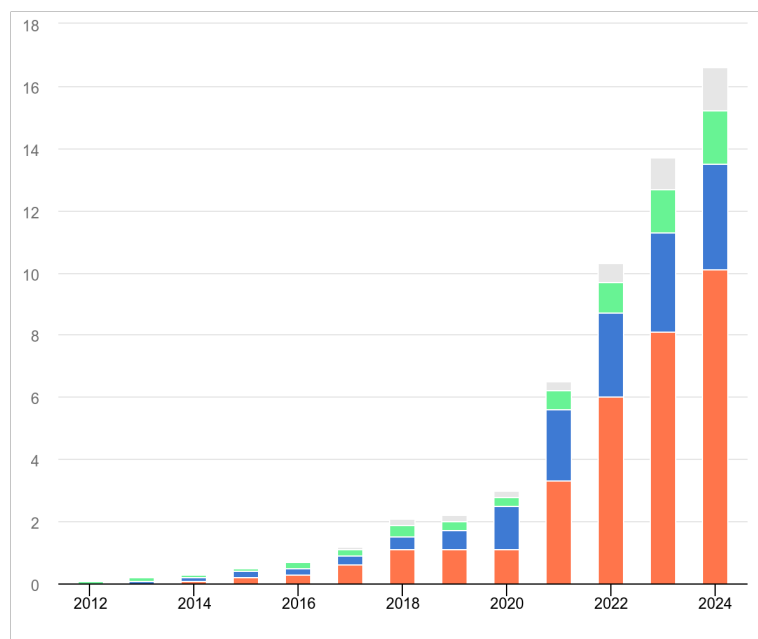
2.6 Ηλεκτροκίνηση στην Ευρώπη και στην Ελλάδα

Στο πλαίσιο των νέων ευρωπαϊκών κανονισμών και με γνώμονα την μετάβαση των οδικών μεταφορών σε ένα κλιματικά ουδέτερο πρότυπο έως το 2050, το αργότερο μέχρι το 2035, η Ευρωπαϊκή Ένωση επιτάσσει αποκλειστικά πωλήσεις οχημάτων μηδενικών ρύπων [Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2023]. Αυτή η εξέλιξη καθιστά την ηλεκτροκίνηση, την πλέον ελπιδοφόρα λύση για τις αστικές μετακινήσεις, τοποθετώντας την στο επίκεντρο της τεχνολογικής έρευνας και καινοτομίας [Kouridis et al. 2022]. Βασικό πλεονέκτημα των ηλεκτρικών οχημάτων είναι το γεγονός ότι δεν εκπέμπουν αέρια κατά την λειτουργία τους, βελτιώνοντας το κλίμα και την ποιότητα του αέρα, ενώ συγχρόνως, είναι πιο αποδοτικά ενεργειακά, καταναλώνοντας λιγότερο από το ένα τρίτο της ενέργειας που απαιτεί ένα αντίστοιχο συμβατικό αυτοκίνητο [Directorate-General for Climate Action, 2024]. Στις αστικές περιοχές, όπου κατοικεί η πλειοψηφία του ευρωπαϊκού πληθυσμού, η ηλεκτροκίνηση μπορεί να επιφέρει μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, των αιωρούμενων σωματιδίων και του θορύβου, με θετικό αντίκτυπο στη δημόσια υγεία των πολιτών [Kouridis et al. 2022].

Σύμφωνα με την έκθεση του European Environment Agency με τίτλο «Electric Vehicles from Life Cycle and Circular Economy Perspectives: TERM 2018», παρά τις υψηλότερες εκπομπές κατά την παραγωγή τους, οι οποίες μάλιστα εκτιμάται ότι είναι από 2 έως 3 φορές μεγαλύτερες σε σύγκριση με αυτή των συμβατικών οχημάτων με κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICEVs), τα ηλεκτρικά οχήματα αντισταθμίζουν την περιβαλλοντική επιβάρυνση που προκαλούν, εντός του κύκλου ζωής τους [European Environment Agency, 2018]. Εκτός από τα πλήρως ηλεκτρικά οχήματα, σημαντικό

ρόλο στη μετάβαση σε «καθαρότερες» μεταφορές διαδραματίζουν και τα υβριδικά συστήματα, τα οποία συνδυάζουν την ηλεκτροκίνηση με τον κινητήρα εσωτερικής καύσης, προσφέροντας μια ρεαλιστική ενδιάμεση λύση [European Environment Agency, 2018]. Τα υβριδικά αυτοκίνητα (HEV) διαθέτουν επαναφορτιζόμενη μπαταρία που τους επιτρέπει να κινούνται αποκλειστικά ηλεκτρικά σε μικρές αποστάσεις, μειώνοντας τις εκπομπές CO₂ και βελτιώνοντας την ενεργειακή αποδοτικότητα, ενώ σε μεγαλύτερες διαδρομές χρησιμοποιούν τον συμβατικό κινητήρα. Οι τεχνολογίες αυτές, αν και δεν επιτυγχάνουν μηδενικές εκπομπές, αποτελούν κρίσιμο βήμα για τη σταδιακή απανθρακοποίηση των μεταφορών, προσφέροντας άμεση μείωση εκπομπών ειδικά σε αστικές περιοχές, όπου οι συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης αναδεικνύουν τα πλεονεκτήματά τους [European Environment Agency, 2018].

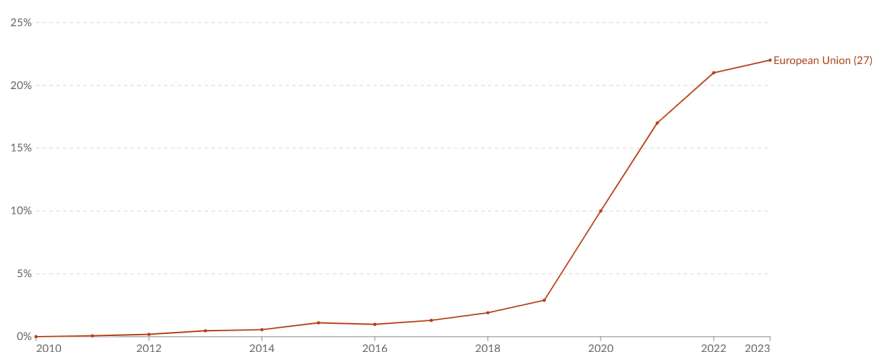
Εξαιτίας όλων αυτών των πλεονεκτημάτων, όπως αναμενόταν, η τάση στην αγορά διαμορφώνεται με εντυπωσιακούς ρυθμούς. Σύμφωνα με τα στοιχεία του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (IEA), οι πωλήσεις ηλεκτρικών αυτοκινήτων παγκοσμίως παρουσίασαν εκθετική αύξηση από το 2012 έως το 2023, με τα μεγαλύτερα μερίδια να προέρχονται από την Κίνα, ακολουθούμενη από την Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Το 2023, σχεδόν 14 εκατομμύρια νέα ηλεκτρικά αυτοκίνητα καταγράφηκαν, ανεβάζοντας το συνολικό αριθμό τους στους δρόμους στα 40 εκατομμύρια [International Energy Agency, 2024].



Εικόνα 2.8: Εξέλιξη Πωλήσεων Ηλεκτρικών Αυτοκινήτων Παγκοσμίως (2012–2024) [International Energy Agency, 2024]

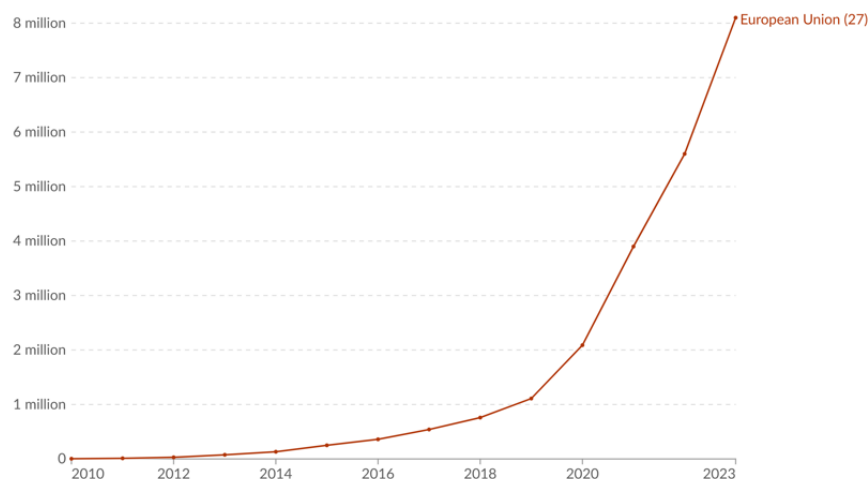
- Πορτοκαλί: Κίνα
- Μπλε: Ευρώπη
- Πράσινο: Ηνωμένες Πολιτείες
- Γκρι: Λοιπές χώρες

Η δημοσίευση «Tracking Global Data on Electric Vehicles» της Hannah Ritchie (Our World in Data, 2024) αποτελεί μια θεματική ανάλυση δεδομένων (data-driven report) που εστιάζει στη συλλογή, παρουσίαση και ερμηνεία παγκόσμιων στατιστικών σχετικά με τις πωλήσεις και τα αποθέματα ηλεκτρικών οχημάτων, αντλώντας στοιχεία από αξιόπιστους οργανισμούς [Ritchie, 2024]. Σύμφωνα με αυτή, το μερίδιο των νέων αυτοκινήτων που είναι ηλεκτρικά, συμπεριλαμβάνοντας τόσο τα πλήρως ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία όσο και τα plug-in υβριδικά (2010–2023), η Ευρωπαϊκή Ένωση παρουσίασε αρκετά ήπια διείσδυση μέχρι το 2018, αλλά από το 2019 και έπειτα, η αύξηση ήταν προφανής, με το μερίδιο των νέων ταξινομήσεων να εξαπλάσιάζεται σε διάστημα τριών χρόνων. Η τάση αυτή αντανακλά τις ισχυρές πολιτικές στήριξης, τα ευρωπαϊκά κίνητρα και την αυξανόμενη αποδοχή των ηλεκτρικών οχημάτων από το κοινό, ενώ παράλληλα δείχνει τη σημαντική μεταβολή στη δομή της αγοράς αυτοκινήτων στην Ευρώπη μέσα σε μόλις τέσσερα χρόνια.

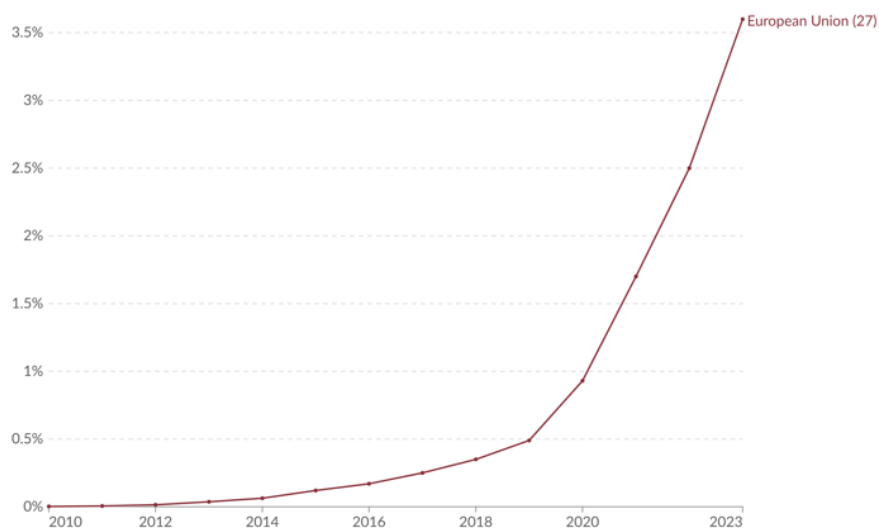


Εικόνα 2.9: Ποσοστό νέων ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση (2010–2023) [Ritchie, 2024]

Όπως φαίνεται στα γραφήματα που ακολουθούν (Εικόνα 2.10, Εικόνα 2.11), η αύξηση της παρουσίας ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση από το 2010 έως το 2023 είναι εντυπωσιακή. Και αυτό διότι, καθώς υπήρχαν σχεδόν μηδενικά επίπεδα το 2010, το ποσοστό τους έφτασε πάνω από το 3,5% το 2023, ενώ ο απόλυτος αριθμός τους αυξήθηκε από λιγότερο από 1 εκατομμύριο οχήματα το 2018 σε πάνω από 8 εκατομμύρια το 2023, αποτυπώνοντας μια εκθετική ανάπτυξη, ιδιαίτερα μετά το 2020.

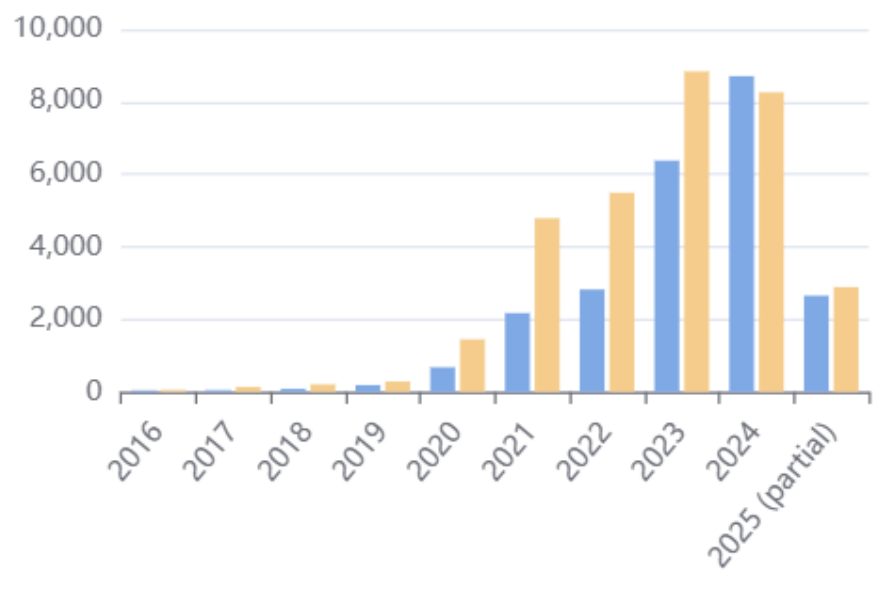


Εικόνα 2.10: Στόλος ηλεκτρικών αυτοκινήτων (συνολικός αριθμός σε χρήση) στην Ευρωπαϊκή Ένωση (2010–2023) [Ritchie, 2024]



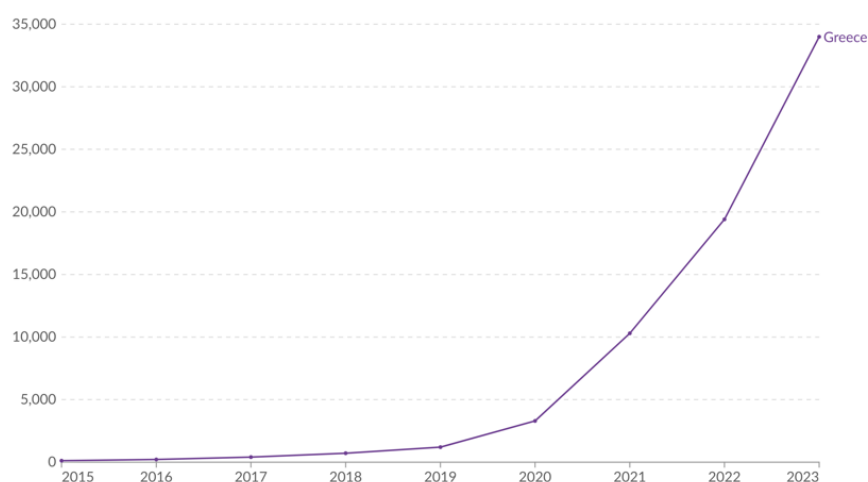
Εικόνα 2.11: Ποσοστό ηλεκτρικών αυτοκινήτων που βρίσκονται σε χρήση στην Ευρωπαϊκή Ένωση (2010–2023) [Ritchie, 2024]

Με μέσο όρο ηλικίας των οχημάτων τα 17,5 έτη, η Ελλάδα διαθέτει τον πιο παλαιωμένο στόλο οχημάτων εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης [ACEA, 2025]. Αν και ξεκίνησε αργά σε σύγκριση με την υπόλοιπη Ευρώπη, πλέον κινείται με γρήγορο ρυθμό στην υιοθέτηση ηλεκτρικών οχημάτων. Το ποσοστό των συνολικών οχημάτων που κινούνται ηλεκτρικά μπορεί να είναι ακόμα κάτω από 1%, ωστόσο, παρατηρείται μια σταθερή και σταδιακή αύξηση έως το 2020. Από το έτος 2021 και μετά οι ταξινομήσεις αυξάνονται ταχύτερα, φτάνοντας το 2023, με σχεδόν 9.000 νέα υβριδικά και πάνω από 6.000 νέα ηλεκτρικά οχήματα. Αν και οι υβριδικές πωλήσεις παραμένουν ελαφρώς υψηλότερες, η ταχεία άνοδος των ηλεκτρικών οχημάτων δείχνει ότι η Ελλάδα κινείται με σταθερά ανοδικά βήματα προς την ηλεκτροκίνηση, ακολουθώντας τις ευρωπαϊκές τάσεις [EVStats, 2024]. Παρακάτω, παρατίθενται τα σχετικά διαγράμματα:



Εικόνα 2.12: Εικόνα 2.13: Αριθμός νέων εγγραφών ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων (2016–2025) [EVStats, 2024]

- Μπλε: Ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (BEV)
- Πορτοκαλί: Υβριδικά οχήματα



Εικόνα 2.13: Στόλος ηλεκτρικών αυτοκινήτων (συνολικός αριθμός σε χρήση) στην Ελλάδα (2015–2023) [Ritchie, 2024]

Η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων (EVs) αναμένεται να αυξηθεί περισσότερο τα επόμενα χρόνια, ως αποτέλεσμα της ανόδου των τιμών πετρελαίου, των ανησυχιών για την κλιματική αλλαγή και της θέσπισης αυστηρών περιβαλλοντικών κανονισμών από την Ευρωπαϊκή Ένωση [Maia et al. 2011].

3 Μεθοδολογία

3.1 Ροή Εργασίας

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε η πόλη των Χανίων, ως περιοχή μελέτης, με αφετηρία την δημοσίευση του Σχεδίου Βιώσιμης Αστικής Κινητικότητας (ΣΒΑΚ) του Δήμου της περιοχής και των στόχων που θέτει, οι οποίοι σχετίζονται με την ανάπτυξη κατάλληλων μοντέλων και λογισμικών, καθώς και τη διαμόρφωση και αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων κινητικότητας. Το ΣΒΑΚ Χανίων προωθεί την ανάπτυξη της πόλης σύμφωνα με τις αρχές της αειφορίας και της βιώσιμης κινητικότητας, με βασικό στόχο τη μείωση των εκπομπών και των ρύπων που σχετίζονται με τις μεταφορές [Δήμος Χανίων, 2018].

Ωστόσο, δεν υπάρχουν διαθέσιμα επίσημα δεδομένα σχετικά με τον ημερήσιο κυκλοφοριακό φόρτο ή real-time δεδομένα κυκλοφορίας που αποτυπώνουν δυναμικά τη μεταβλητότητα των συνθηκών κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ αντίστοιχα, απουσιάζουν και στοιχεία για την πραγματική κατανομή του στόλου οχημάτων ανά κατηγορία καυσίμου σε τοπικό επίπεδο. Για τον λόγο αυτό, αξιοποιήθηκαν στοιχεία υιοθετήθηκαν τεκμηριωμένες προσεγγίσεις για τη διαμόρφωση σεναρίων που αντανακλούν όσο το δυνατόν πιο πιστά τις πραγματικές ημερήσιες συνθήκες της περιοχής, επιτρέποντας τη συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών παρεμβάσεων. Συγκεκριμένα, για την υλοποίηση και την ενίσχυση του ρεαλισμού των σεναρίων, αντλήθηκαν δεδομένα από την ΕΛΣΤΑΤ, για τον στόλο των οχημάτων της περιοχής, ενώ για την κατανομή των οχημάτων ανά κατηγορία καυσίμου αξιοποιήθηκαν στοιχεία από την ACEA και την EVStats – Greek Electric Vehicles, σε εθνικό επίπεδο. Επιπλέον, το έτος 2023 επιλέχθηκε ως βάση της μελέτης, καθώς αποτελεί το πιο πρόσφατο έτος για το οποίο υπάρχουν ολοκληρωμένα και επικυρωμένα δεδομένα σχετικά με τον αριθμό, τον τύπο και την κατανομή των οχημάτων, τόσο σε εθνικό όσο και σε τοπικό επίπεδο.

Όπως επιδιώκει και το ΣΒΑΚ Χανίων, έτσι και στην περίπτωση αυτή, τα σενάρια περιλαμβάνουν τις τάσεις και τις προοπτικές περιβαλλοντικής και αειφόρου ανάπτυξης της περιοχής [Δήμος Χανίων, 2018]. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε ένα βασικό σενάριο στο οποίο αποτυπώνεται η υφιστάμενη κατάσταση του οδικού δικτύου της πόλης των Χανίων, ενώ στη συνέχεια διαμορφώθηκαν τέσσερα εναλλακτικά σενάρια. Στο **πρώτο σενάριο** εξετάζεται η εφαρμογή του ορίου ταχύτητας στα 30 km/h σε όλο το δίκτυο της περιοχής μελέτης. Στο **δεύτερο σενάριο** μελετάται η επίδραση της οικολογικής οδήγησης (eco-driving), στο υφιστάμενο οδικό δίκτυο της πόλης. Το **τρίτο** και **τέταρτο σενάριο**, βασίζονται στις προβλέψεις που έγιναν από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ), όπως διατυπώνονται στο «Εθνικό Σχέδιο για

την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ)», για την εξέλιξη του στόλου οχημάτων για τα έτη 2030 και 2050, αντίστοιχα [Ενέργειας, 2019]. Οι προβλέψεις αυτές, λαμβάνουν υπόψη την προώθηση της ηλεκτροκίνησης και άλλων τεχνολογιών χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών που στοχεύουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα των μεταφορών.

Η διαμόρφωση των σεναρίων που εξετάστηκαν αφορούν αποκλειστικά τα επιβατικά οχήματα. Όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό του κυκλοφοριακού φόρτου και τη σημαντικότερη πηγή εκπομπών εντός του αστικού οδικού δικτύου. Η ανάλυση επικεντρώνεται στα επιβατικά οχήματα, καθώς αυτά αντιπροσωπεύουν τη βασική μορφή αστικής μετακίνησης, αναπαριστώντας ρεαλιστικά τη λειτουργία της πόλης, σε ημερήσιο κύκλο. Ειδικότερα, το γεγονός αυτό καθιστά τη μελέτη ιδιαίτερα κατάλληλη για την ανάλυση της οδηγικής συμπεριφοράς και την αξιολόγηση στρατηγικών διαχείρισης της κυκλοφορίας.

3.2 Μοντέλα Προσομοίωσης

Η κυκλοφορία στους δρόμους είναι ένα πολύπλοκο σύστημα που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η συμπεριφορά των οδηγών, οι συνθήκες του δρόμου και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ οχημάτων. Επειδή η διεξαγωγή πειραμάτων σε πραγματικές συνθήκες είναι συχνά δαπανηρά ή επικίνδυνα, η επιστημονική κοινότητα χρησιμοποιεί μοντέλα προσομοίωσης για τη μελέτη και τη βελτίωση της κυκλοφορίας. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες, ανάλογα με το επίπεδο λεπτομέρειας που χρησιμοποιούν: τα μικροσκοπικά, τα μεσοσκοπικά και τα μακροσκοπικά μοντέλα [Alvarez Lopez et al. 2018].

Μικροσκοπικά Μοντέλα (Microscopic Models) : Τα μικροσκοπικά μοντέλα επικεντρώνονται στο ατομικό επίπεδο, παρακολουθώντας ξεχωριστά κάθε όχημα και οδηγό και περιγράφοντας λεπτομερώς τις αποφάσεις τους, όπως την αλλαγή λωρίδας ή την απόσταση ασφαλείας. Η ακριβής αναπαράσταση των σύνθετων αλληλεπιδράσεων που συμβαίνουν εντός του αστικού ιστού, αποτελεί βασικό τους πλεονέκτημα, ωστόσο απαιτείται υψηλή υπολογιστική ισχύς, ιδιαίτερα όταν εφαρμόζονται σε μεγάλα δίκτυα. Είναι κατάλληλα για λεπτομερείς μελέτες, όπως η αξιολόγηση της επίδρασης συγκεκριμένων μέτρων κυκλοφοριακής διαχείρισης και προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό εκπομπών και την ανάλυση μεμονομένων διαδρομών [Alvarez Lopez et al. 2018] [Hoogendoorn et al. 2001].

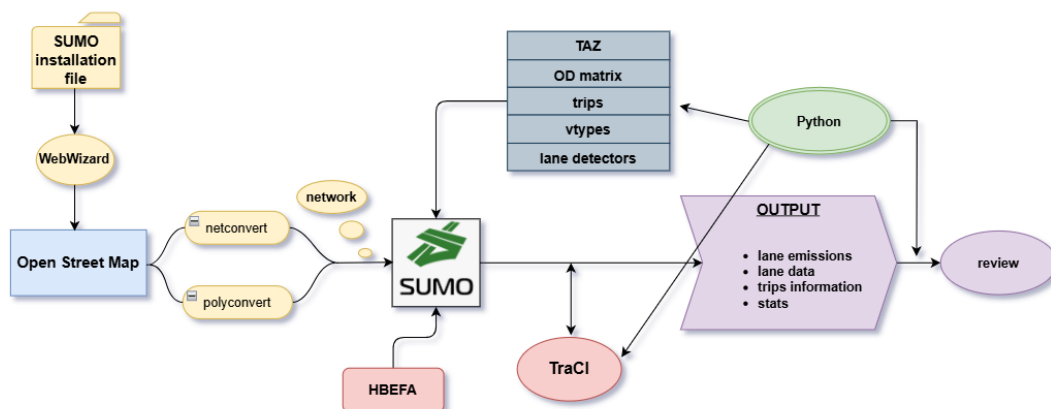
Μακροσκοπικά Μοντέλα (Macroscopic Models) : Τα μακροσκοπικά μοντέλα προσεγγίζουν την κυκλοφορία σε γενικό επίπεδο, εξετάζοντας το σύνολο του συστήματος. Χρησιμοποιούνται συνολικά μεγέθη όπως η πυκνότητα, η μέση ταχύτητα και ο συνολικός όγκος κυκλοφορίας, χωρίς την ανάλυση της ατομικής συμπεριφοράς. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδανική για την ανάλυση μεγάλων δικτύων ή για στρατηγικό σχεδιασμό, καθώς έχει λιγότερες υπολογιστικές απαιτήσεις και διακρίνονται για την ταχύτητα εκτέλεσής τους, σε σύγκριση με τα μικροσκοπικά μοντέλα [Alvarez Lopez et al. 2018] [Hoogendoorn et al. 2001].

Μεσοσκοπικά Μοντέλα (Mesoscopic Models) : Τα μεσοσκοπικά μοντέλα συνδυάζουν χαρακτηριστικά μικροσκοπικών και μακροσκοπικών προσεγγίσεων. Τα μοντέλα αυτά καθιστούν

ευφικτή την παρακολούθηση της πορείας μεμονομένων οχημάτων, βάση των συνολικών κυκλοφορικών δεδομένων. Έτσι, συνδυάζεται η αποδοτικότητα και η ταχύτητα μακροσκοπικών μοντέλων με τη δυνατότητα εξαγωγής στοιχείων για κάθε όχημα, όπως οι εκπομπές και οι χρόνοι ταξιδιού [Krauß, 1998].

3.3 Simulation of Urban MObility (SUMO)

Το SUMO (Simulation of Urban Mobility) είναι ένα ανοιχτού κώδικα, μικροσκοπικό και πολυτροπικό λογισμικό προσομοίωσης κυκλοφορίας, σχεδιασμένο για τη μελέτη της αστικής κινητικότητας και των οδικών μεταφορών. Αναπτύχθηκε από το Γερμανικό Κέντρο Αεροδιαστημικής (DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt), με την πρώτη του έκδοση να κυκλοφορεί το 2001. Το SUMO δημιουργήθηκε προκειμένου να παρέχει στην επιστημονική κοινότητα ένα ελεύθερο εργαλείο προσομοίωσης κυκλοφορίας, στο οποίο θα μπορούσαν να ενσωματωθούν και να δοκιμαστούν νέοι αλγόριθμοι, καθώς και να επιτρέπεται η διαρκής εξέλιξή του [Behrisch, Bieker, Erdmann και Krajzewicz, 2014] [Krajzewicz, Erdmann et al. 2012]. Το SUMO διαφέρει από άλλα λογισμικά προσομοίωσης καθώς είναι χρονικά διακριτό (time-discrete) και χωρικά συνεχές (space-continuous), με βήμα ενός δευτερολέπτου (1 s), το οποίο μπορεί να μειωθεί έως 1 χιλιοστό του δευτερολέπτου, γεγονός που προσδίδει μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσομοίωση της κυκλοφορίας [Krajzewicz, Hertkorn et al. 2014] [2025]. Στο μοντέλο, λαμβάνονται υπόψη στοιχεία όπως η ταχύτητα, οι αποστάσεις μεταξύ οχημάτων, οι κανόνες κυκλοφορίας και οι επικρατούσες οδικές συνθήκες στον δρόμο. Το SUMO αποτελεί ένα από τα πιο εξελιγμένα εργαλεία προσομοίωσης κυκλοφορίας, επιτρέποντας τη μοντελοποίηση σύνθετων σεναρίων κυκλοφορίας, την αξιολόγηση έξυπνων συστημάτων μεταφορών και τη διερεύνηση μελλοντικών τεχνολογιών κινητικότητας, όπως τα ηλεκτρικά και αυτόνομα οχήματα. Κάθε λωρίδα (lane) στο δίκτυο έχει μοναδική ταυτότητα, η οποία προκύπτει από αυτή του οδικού τμήματος (edge) που βρίσκεται. Κατόπιν, η σύνδεση των επιμέρους ακμών (edges) επιτυγχάνεται μέσω των κόμβων (junctions), οι οποίοι λειτουργούν ως ένωση μεταξύ εισερχόμενων και εξερχόμενων στοιχείων, επιτρέποντας τη συνεχή ροή της κυκλοφορίας. Οι μηχανισμοί αυτοί καθορίζουν τις επιτρεπτές πορείες των οχημάτων από μία ακμή σε μία άλλη, εφαρμόζοντας τους αντίστοιχους κανόνες προτεραιότητας ή τις φάσεις των φωτεινών σηματοδοτών, όπου αυτό απαιτείται [Αδαμίδης, 2017] [Erdmann et al. 2011]. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η ορθή αναπαράσταση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ ακμών, λωρίδων και οχημάτων. Επιπλέον, κάθε όχημα ορίζεται ρητά στο σύστημα με μοναδικό αναγνωριστικό (id), χρόνο αναχώρησης (depart time) και πλήρη διαδρομή (route/trip), η οποία περιλαμβάνει την πλήρη λίστα των συνδεδεμένων άκρων από την αφετηρία έως τον προορισμό του. Τέλος, τα οχήματα μπορούν να περιγραφούν με περισσότερες λεπτομέρειες, που αφορούν τη λωρίδα εκκίνησης και άφιξης, την ταχύτητα, την ακριβή θέση στο δίκτυο, τον τύπο τους, καθώς και την κατηγορία εκπομπών ρύπων (Euro) [2025].



Εικόνα 3.1: Ροή δεδομένων και εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των σεναρίων

Η Εικόνα 3.1 παρουσιάζει συνοπτικά τη διαδικασία που ακολουθείται για την δημιουργία των σεναρίων προσομοίωσης, μέσω του SUMO, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αποτυπώνονται, απαραίτητα στάδια, από την εισαγωγή γεωχωρικών δεδομένων και τη δημιουργία του οδικού δικτύου, έως την παραγωγή σεναρίων κυκλοφορίας και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων μέσω της Python. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα επιμέρους βήματα θα αναλυθούν εκτενέστερα στις επόμενες ενότητες.

3.3.1 Μοντέλο Krauss

Η παρούσα διπλωματική εργασία στηρίζεται στο μοντέλο ακολουθώντας οχήματος που προτάθηκε από τον Krauss (1998), το οποίο αποτελεί ένα από τα πλέον διαδεδομένα μικροσκοπικά μοντέλα προσομοίωσης κυκλοφορίας [Krauß, 1998]. Αυτό το μοντέλο έχει ενσωματωθεί στο SUMO ως το προεπιλεγμένο για την προσομοίωση της ακολουθίας οχημάτων (car-following model), με στόχο την αναπαράσταση της δυναμικής των οχημάτων, με γνώμονα την ασφάλεια και τη ρεαλιστικότητα. Η βασική ιδιότητα αυτού του μοντέλου είναι ότι οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των οχημάτων υποκινούνται από την πρόθεση να μην συγκρούονται μεταξύ τους, μέσω της διατήρησης μιας ασφαλούς απόστασης μεταξύ προπορευόμενου και ακολουθούντος οχήματος, αλλά και στην περίπτωση του απότομου φρεναρίσματος. Παράλληλα, λαμβάνονται υπόψη παράμετροι, όπως η μέγιστη επιτάχυνση και επιβράδυνση, ο χρόνος αντίδρασης και η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας, ενώ επιτρέπει την ενσωμάτωση στοχαστικών παραγόντων. Με τον τρόπο αυτό, προσομοιώνονται αποτελεσματικά οι «ατέλειες» της ανθρώπινης συμπεριφοράς στην οδήγηση, όπως καθυστερημένες αντιδράσεις ή υπερβολές στην επιτάχυνση και επιβράδυνση, ενώ ενσωματώνονται τυχαίες διακυμάνσεις της κυκλοφοριακής ροής και αυθόρμητες συμφορήσεις (jams) [Krauß, 1998]. Έτσι, τα οχήματα προσπαθούν να διατηρήσουν μια απόσταση ασφαλείας από το προπορευόμενο όχημα και να κινούνται με ταχύτητα που επιτρέπει την προσαρμογή στην επιβράδυνση του προπορευόμενου, καθώς μάλιστα ο εκάστοτε οδηγός θεωρείται ότι έχει χρόνο αντίδρασης (tau) περίπου 1 δευτερόλεπτο [Krajewicz, Hartinger et al. 2002]. Η Σχέση 3.1 υπολογίζει την ασφαλή ταχύτητα, δηλαδή τη μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να υιοθετήσει το όχημα

χωρίς να κινδυνεύσει από σύγκρουση με το προπορευόμενο.

$$V_{\text{safe}} = V_l(t) + \frac{g(t) - V_l(t)\tau}{\frac{\bar{V}}{b(\bar{V})} + \tau} \quad (3.1)$$

όπου :

- $V_l(t)$: Η ταχύτητα του προπορευόμενου οχήματος στη χρονική στιγμή t .
- $g(t)$: Η απόσταση (gap) προς το προπορευόμενο όχημα στη χρονική στιγμή t .
- (τ) : Ο χρόνος αντίδρασης του οδηγού (περίπου 1 δευτερόλεπτο).
- \bar{V} : Η εκτιμώμενη μέση ταχύτητα του οχήματος (χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της επιβράδυνσης).
- $b(\bar{V})$: Η μέγιστη επιβράδυνση του οχήματος, ως συνάρτηση της μέσης ταχύτητας.
- Το κλάσμα στον παρονομαστή εκτιμά τον χρόνο φρεναρίσματος (braking time).

Κατά την εφαρμογή του μοντέλου Krauss, η υπολογιζόμενη ασφαλής ταχύτητα ενδέχεται, σε ορισμένες περιπτώσεις, να υπερβαίνει είτε τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα του οδικού δικτύου είτε τη μέγιστη ταχύτητα που το όχημα είναι ικανό να αναπτύξει στο επόμενο βήμα, λόγω των ορίων στην επιτάχυνσή του [Krauß, 1998]. Για τον λόγο αυτό, το μοντέλο ορίζει την επιθυμητή ταχύτητα (desired velocity) ως το ελάχιστο μεταξύ της ασφαλούς ταχύτητας, της προηγούμενης ταχύτητας αυξημένης κατά τη μέγιστη επιτάχυνση, και της ανώτατης επιτρεπόμενης ταχύτητας του οχήματος :

$$V_{\text{des}}(t) = \min \{V_{\text{safe}}(t), V(t-1) + a, V_{\text{max}}\} \quad (3.2)$$

όπου :

- $V_{\text{des}}(t)$: Η επιθυμητή ταχύτητα του οχήματος στη χρονική στιγμή t , λαμβάνοντας υπόψη την ασφάλεια και τις φυσικές δυνατότητές του.
- $V_{\text{safe}}(t)$: Η ασφαλής ταχύτητα που διασφαλίζει αποφυγή σύγκρουσης με το προπορευόμενο όχημα.
- $V(t-1)$: Η ταχύτητα του οχήματος στο προηγούμενο χρονικό βήμα.
- a : Η μέγιστη επιτάχυνση που μπορεί να επιτύχει το όχημα.
- $V_{\text{max}}(t)$: Η μέγιστη ταχύτητα που επιτρέπεται ή μπορεί να φτάσει το όχημα.

Όπως περιγράφηκε προηγουμένως, το μοντέλο συνυπολογίζει την αδυναμία του οδηγού να προσαρμοστεί πλήρως στην επιθυμητή ταχύτητα. Η τελική ταχύτητα του οχήματος προκύπτει

από την αφαίρεση ενός τυχαίου ποσού, το οποίο εξαρτάται από την ατέλεια του οδηγού και τη μέγιστη επιτάχυνση από την επιθυμητή ταχύτητα, καθώς μάλιστα, διασφαλίζεται ότι η ταχύτητα δεν γίνεται αρνητική.

$$V(t) = \max \{0, \text{rand}[V_{\text{des}}(t) - \varepsilon a, V_{\text{des}}(t)]\} \quad (3.3)$$

όπου :

- $V(t)$: Η τελική ταχύτητα του οχήματος στη χρονική στιγμή t .
- $\text{rand}[x, y]$: Τυχαίος αριθμός εντός του διαστήματος $[x, y]$ που εισάγει στοχαστικότητα (τυχαία απόκλιση).
- ε : Παράγοντας «ατέλειας» του οδηγού, συντελεστής τυχειότητας στο μοντέλο
- a : Η μέγιστη επιτάχυνση
- $V_{\text{des}}(t)$: Η επιθυμητή ταχύτητα (από την Σχέση 3.2)
- $\text{max}[0, \dots]$: Εξασφαλίζει ότι η ταχύτητα δεν γίνεται αρνητική (δεν υπάρχει οπισθοπορεία).

Ανάλογα με τις τιμές των παραπάνω παραμέτρων κάθε μεμονομένου παράγοντα/οδηγού (agent), το μοντέλο μπορεί να περιγράψει τρεις διαφορετικές καταστάσεις ροής [Krauß, 1998]:

- **την ελεύθερη ροή (free motion)**: Τα οχήματα κινούνται με επιθυμητές ταχύτητες, χωρίς σημαντικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους, όπου η πυκνότητα των οχημάτων είναι χαμηλή, οπότε δεν υπάρχει ανάγκη για συνεχείς προσαρμογές της ταχύτητας.
- **τη συμφόρηση (jams)**: Η ροή επιβραδύνεται ή διακόπτεται και τα οχήματα κινούνται με πολύ χαμηλή ταχύτητα ή παραμένουν ακίνητα. Οι συμφόρησεις εμφανίζονται αυθόρμητα σε ρεαλιστικά μοντέλα όταν υπάρχει χαμηλή επιτάχυνση και στοχαστική συμπεριφορά οδηγών και η εκροή από αυτήν είναι μικρότερη σε σχέση με την εισροή, γεγονός που οδηγεί στην αύξησή της, μέχρι να σταθεροποιηθεί.
- **τη συγχρονισμένη ροή (synchronized flow)**: Τα οχήματα είναι «παγιδευμένα» πίσω από πιο αργά οχήματα, οι ταχύτητες στις λωρίδες είναι εξισορροπημένες και οι αλλαγές λωρίδας είναι σπάνιες.

Το **μοντέλο αλλαγής λωρίδας (Lane Change Model)** αποτελεί ένα ακόμη κρίσιμο στοιχείο για τη ρεαλιστική προσομοίωση της οδικής κυκλοφορίας, καθώς επηρεάζει άμεσα τη δυναμική της ροής, την αποσυμφόρηση και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ οχημάτων. Η μοντελοποίηση αυτής της συμπεριφοράς είναι απαραίτητη για την προσομοίωση της κίνησης σε δρόμους με πολλαπλές λωρίδες, που απαντώνται συχνά τόσο σε αστικά περιβάλλοντα, όσο και σε αυτοκινητοδρόμους [Behrisch, Bieker, Erdmann, Knocke et al. 2014]. Στο μοντέλο του Krauss, η συμπεριφορά αλλαγής λωρίδας βασίζεται σε ένα πλαίσιο αποφάσεων που ενσωματώνει τόσο λειτουργικά κριτήρια, όσο

και στοχαστικούς παράγοντες, προσομοιώνοντας πιο ρεαλιστικά την ανθρώπινη συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα, οι βασικές προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται πριν την εκτέλεση αυτής ενέργειας, είναι οι εξής:

- Μια αλλαγή λωρίδας πραγματοποιείται, εάν είναι ευνοϊκή και ασφαλής (απόσταση ασφαλείας).
- Η απόφαση αλλαγής λωρίδας εξαρτάται από την ταχύτητα του οχήματος, την απόσταση από το προπορευόμενο όχημα και τις συνθήκες (ταχύτητες) των «γειτονικών» λωρίδων.
- Η προσπέραση από τη δεξιά πλευρά επιτρέπεται μόνο υπό συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης.

Το μοντέλο αλλαγής λωρίδας δεν καθορίζει μόνο το «κίνητρο» για την αλλαγή λωρίδας, αλλά είναι εξίσου υπεύθυνο για την προσαρμογή της ταχύτητας των οχημάτων, προκειμένου να καταστεί εφικτός ο ελιγμός. Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο σε συνθήκες αυξημένης κυκλοφοριακής πυκνότητας, καθώς τα οχήματα πρέπει να διατηρούν ασφαλείς αποστάσεις από όλα τα οχήματα στη λωρίδα που θέλουν να μεταβούν, ώστε να αποφευχθούν μελλοντικές συγκρούσεις [Behrisch, Bieker, Erdmann, Knocke et al. 2014].

3.3.2 SUMO Tools

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η εκτέλεση μιας μικροσκοπικής προσομοίωσης, απαιτείται ο πλήρης καθορισμός του οδικού δικτύου, η κυκλοφοριακή ζήτηση και η σύνθεση του στόλου. Συνεπώς, το SUMO διαθέτει ένα πακέτο εφαρμογών που βοηθούν στην προετοιμασία και εκτέλεση της προσομοίωσης, ώστε να αποδοθεί το οδικό δίκτυο και η ζήτηση της κυκλοφορίας σε δική του μορφή αρχείων (XML files). Για τον λόγο αυτό, διαθέτει βιβλιοθήκη χρήσιμων αλγορίθμων (Python scripts), που διευκολύνουν την επεξεργασία τους, δημιουργώντας έναν αποδοτικό πυρήνα στην διαδικασία εκτέλεσης μιας προσομοίωσης [Clemente, 2022] [Behrisch, Bieker, Erdmann και Krajzewicz, 2014].

Netconvert : Το netconvert αποτελεί βασικό εργαλείο του SUMO για τη δημιουργία και μετατροπή δικτύων κυκλοφορίας σε μορφή συμβατή με την πλατφόρμα προσομοίωσης. Λειτουργεί ως λογισμικό γραμμής εντολών, που δέχεται αρχεία εισόδου από διάφορες εφαρμογές, όπως είναι το OpenStreetMap (OSM), τα οποία μετατρέπονται σε αρχεία XML. Μεταξύ των κύριων λειτουργιών του περιλαμβάνονται η εισαγωγή και μετατροπή δεδομένων γεωχωρικών πληροφοριών, η δημιουργία ολοκληρωμένων οδικών δικτύων με κόμβους, λωρίδες, φωτεινούς σηματοδότες και λοιπά στοιχεία υποδομής, καθώς και η επεξεργασία υφιστάμενων δικτύων [Guastella et al. 2023].

Polyconvert : Το polyconvert χρησιμοποιείται για την εισαγωγή και μετατροπή περιβαλλοντικών στοιχείων (όπως κτίρια, πάρκα ή υδάτινες επιφάνειες) από αρχεία OSM, με σκοπό τον εμπλουτισμό της οπτικής και λειτουργικής ακρίβειας της προσομοίωσης. Λειτουργεί συμπληρωματικά προς το netconvert, καθώς αυτό δημιουργεί τη βασική δομή κυκλοφορίας, ενώ το polyconvert αξιοποιείται για την προσθήκη μη κυκλοφοριακών στοιχείων από τον χάρτη, βελτιώνοντας τη ρεαλιστικότητα

και το γραφικό περιβάλλον του μοντέλου [Guastella et al. 2023].

Duarouter : Το Dynamic User Assignment (DUA) στο SUMO είναι υπεύθυνο για τον υπολογισμό βέλτιστων διαδρομών των οχημάτων, μεταξύ του σημείου προέλευσης και προορισμού, συνδέοντας την ζήτηση της κυκλοφορίας, δεδομένης της ώρας αναχώρησης, με την δομή του εκάστοτε οδικού δικτύου. Η δρομολόγηση πραγματοποιείται μέσω του αλγορίθμου εύρεσης συντομότερης διαδρομής που υλοποιήθηκε από τον Dijkstra (1959), ο οποίος, χάρη στην αποδεδειγμένη αξιοπιστία και αποδοτικότητά του, αποτελεί θεμέλιο λίθο σε εφαρμογές κυκλοφοριακής προσομοίωσης, ενισχύοντας τη ρεαλιστικότητα των παραγόμενων διαδρομών [Dijkstra, 1959].

TraCI : Το Traffic Control Interface (TraCI) είναι ένα Application Programming Interface (API), το οποίο γεφυρώνει την επικοινωνία μεταξύ του SUMO και των Python scripts, επιτρέποντας τον έλεγχο και την αλληλεπίδραση με τον προσομοιωτή, σε πραγματικό χρόνο. Το TraCI επιτρέπει την παρατήρηση της συμπεριφοράς των οχημάτων και την ανάκτηση δεδομένων από την προσομοίωση, κατά την εκτέλεση του κώδικα, καθιστώντας δυνατή τη δυναμική διαχείριση της κυκλοφορίας. Η ενσωμάτωση του εργαλείου αυτού στην έρευνα των υβριδικών οχημάτων (HEV) συμβάλλει στην ανάπτυξη πιο αποδοτικών και βιώσιμων λύσεων μεταφορών, υποστηρίζοντας μια πιο ρεαλιστική και στοχευμένη ανάλυση των επιδόσεών τους [Tettamanti et al. 2024].

Traffic Analysis Zone (TAZ) : Το Traffic Analysis Zone είναι μια ορισμένη περιοχή που χρησιμοποιείται για την ανάλυση της κυκλοφορίας σε αυτή. Οι TAZs είναι χρήσιμες για τον χωρικό διαχωρισμό του δικτύου σε τμήματα, όπου συλλέγονται δεδομένα κυκλοφορίας, όπως οι αφετηρίες και οι προορισμοί των οχημάτων. Με αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται η ανάλυση της προσομοίωσης σε αστικά περιβάλλοντα [Guastella et al. 2023].

Origin-Destination Matrices (O/D Matrices) : Οι πίνακες προέλευσης-προορισμού (O/D Matrices) αποτελούν βασικό εργαλείο στη μοντελοποίηση της κυκλοφορίας, καθώς καταγράφουν τον αριθμό των οχημάτων που μετακινούνται από μια ζώνη προέλευσης (TAZ i) προς μια ζώνη προορισμού (TAZ j), μέσα σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Στο πλαίσιο του SUMO, οι πίνακες O/D μετατρέπονται σε επιμέρους ατομικά ταξίδια (trips) με τη χρήση του εργαλείου **od2trips**. Οι διαδρομές διαχωρίζονται μεταξύ τους με βάση μοναδικά στοιχεία, όπως ο χρόνος εκκίνησης και τερματισμού εντός του καθορισμένου χρονικού διαστήματος. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό, πως η ύπαρξη αρχείου TAZ είναι απαραίτητη για τη σωστή λειτουργία της μετατροπής, αφού οι διαδρομές πρέπει να προσαρμόζονται στις χωρικές οντότητες του μοντέλου, διασφαλίζοντας την ακρίβεια και τη ρεαλιστικότητα της προσομοίωσης.

Lane Area Detectors : Οι Lane Area Detectors είναι εικονικοί αισθητήρες εντός του SUMO, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της κυκλοφορίας σε μία συγκεκριμένη λωρίδα. Αντίστοιχα με τις πραγματικές κάμερες κυκλοφορίας, οι ανιχνευτές αυτοί καταγράφουν δεδομένα κυκλοφορίας, όπως ο αριθμός των οχημάτων, η μέση ταχύτητα, το ποσοστό της λωρίδας που είναι κατειλημμένο από οχήματα (occupancy) και ο χρόνος απώλειας (time loss). Ωστόσο, εκτός από αυτά τα δεδομένα, επιτρέπουν την παρακολούθηση των εκπομπών ρύπων, καταγράφοντας τα επίπεδα ρύπανσης για κάθε λωρίδα κυκλοφορίας, και επιτρέποντας τη σύγκριση των εκπομπών σε διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης [Guastella et al. 2023].

WebWizard : Το WebWizard αποτελεί ένα διαδικτυακό εργαλείο που διευκολύνει τη δημιουργία

κυκλοφοριακών σεναρίων, αξιοποιώντας αυτοματοποιημένη επεξεργασία γεωχωρικών δεδομένων για τη μοντελοποίηση οδικών δικτύων και ροών κυκλοφορίας. Με κύριο στόχο τη διασύνδεση δεδομένων του OpenStreetMap (OSM) με το μοντέλο προσομοίωσης, το εργαλείο αυτό ενσωματώνει λειτουργίες μετατροπής και δρομολόγησης, χρησιμοποιώντας εσωτερικά βοηθήματα, όπως είναι το netconvert, το polyconvert και το randomTrips, το οποίο δημιουργεί ένα σύνολο τυχαίων διαδρομών για ένα δοσμένο οδικό δίκτυο. Έτσι, δημιουργείται ένα συνεκτικό σύνολο αρχείων που απαρτίζουν το βασικό περιβάλλον μίας προσομοίωσης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το ελάχιστο σύνολο αρχείων εισόδου που συνθέτουν αυτό που ορίζεται συνήθως ως «σενάριο» περιλαμβάνει πληροφορίες για το οδικό δίκτυο (net), πληροφορίες για τις Ζώνες Ανάθεσης Κυκλοφορίας (TAZ), και πληροφορίες για τις Μήτρες Προέλευσης-Προορισμού (ODM), τα οποία μπορούν να επεκταθούν με επιπλέον πληροφορίες [Clemente, 2022].

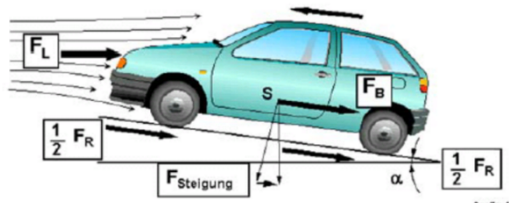
3.4 Εκπομπές - HBEFA

Τα μικρο-μοντέλα εκπομπών απαιτούν πληθώρα δεδομένων που σχετίζονται με τις μετρήσεις παραμέτρων οχημάτων, όπως η επιτάχυνση και η ταχύτητα, καθώς και στοιχεία του δρόμου, όπως η κλίση του εδάφους και οι συντεταγμένες θέσης [Mądział, 2023]. Το HBEFA (**Handbook of Emission Factors for Road Transport**) αποτελεί μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες βάσεις δεδομένων για την εκτίμηση εκπομπών ρύπων από οδικές μεταφορές στην Ευρώπη, παρέχοντας εκτενείς συντελεστές εκπομπών για επιβατικά οχήματα, ελαφρά και βαρέα οχήματα, καθώς και δίκυκλα, για μεγάλο πλήθος κυκλοφοριακών σεναρίων. Έτσι, στο περιβάλλον του SUMO, ενσωματώθηκε μέρος αυτών των δεδομένων για τη μικροσκοπική προσομοίωση εκπομπών, επικεντρωμένο στους βασικούς ρύπους CO₂, CO, HC, NO_x, PM_x και την κατανάλωση καυσίμου [2025]. Στο HBEFA διακρίνονται τρεις βασικές κατηγορίες εκπομπών [INFRAS, 2023] [Behrisch, Flötteröd et al. 2024] [Alvarez Lopez et al. 2018]:

- **Hot emissions** : Εκπομπές όταν ο κινητήρας είναι ζεστός.
- **Cold-start emissions** : Εκπομπές που παράγονται αμέσως μετά την εκκίνηση του κινητήρα, πριν αυτός θερμανθεί.
- **Evaporative emissions** : Εκπομπές από εξάτμιση καυσίμου και όχι από καύση, που προκύπτουν μετά την απενεργοποίηση του κινητήρα (Soak), από θερμοκρασιακές μεταβολές (Diurnal) ή κατά την οδήγηση (Running losses)

Το HBEFA βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στο μοντέλο «**PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model)**», το οποίο αναπτύχθηκε από το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Γκρατς (TU Graz). Το PHEM χρησιμοποιεί δεδομένα από ελεγχόμενες εργαστηριακές δοκιμές, με τη χρήση δυναμομέτρων (chassis dynamometers) και μέσω φορητών συστημάτων μέτρησης εκπομπών PEMS (Portable Emission Measurement Systems) για να υπολογίσει τους βασικούς συντελεστές

εκπομπών. Για τον υπολογισμό τους, το PHEM λαμβάνει υπόψη τη στιγμιαία ισχύ που απαιτείται για την κίνηση του οχήματος, η οποία υπολογίζεται με βάση τη συνολική αντίσταση στην κίνηση. Η υπολογιζόμενη στιγμιαία απαίτηση ισχύος, ανά χρονικό βήμα (Εικόνα 3.2, καθορίζουν την ποσότητα των ρύπων που παράγεται. Οι απώλειες στο σύστημα μετάδοσης κίνησης θεωρούνται σταθερές στο 5%. [Stefan Hausberger και Krajzewicz, 2014] [Thermodynamics et al. 2024].



$$P_e = (P_{\text{rolling resistance}} + P_{\text{air resistance}} + P_{\text{acceleration}} + P_{\text{road gradient}}) / \eta_{\text{gearbox}}$$

$$P_R = (m_{\text{Vehicle}} + m_{\text{Load}}) \times g \times (Fr_0 + Fr_1 \times v + Fr_4 \times v^4) \times v$$

$$P_{Air} = (Cd \times A \times \frac{\rho}{2}) \times v^3$$

$$P_a = (m_{\text{Vehicle}} + m_{\text{Rot}} + m_{\text{Load}}) \times a \times v$$

$$P_{grad} = (m_{\text{Vehicle}} + m_{\text{Load}}) \times \text{Gradient} \times 0.01 \times v$$

$$\eta_{\text{gearbox}} = 0.95 \text{ (average efficiency)}$$

Εικόνα 3.2: Υπολογισμός απαίτησης ισχύος [Stefan Hausberger και Krajzewicz, 2014]

όπου:

- P_e : Συνολική απαιτούμενη κινητήρια ισχύς (σε W).
- P_R : Ισχύς για την υπερνίκηση της αντίστασης κύλισης, λόγω επαφής ελαστικών-οδοστρώματος.
- P_{Air} : Ισχύς για την υπερνίκηση της αεροδυναμικής αντίστασης.
- P_a : Ισχύς για την υπερνίκηση της αδράνειας κατά την επιτάχυνση.
- P_{grad} : Ισχύς για την υπερνίκηση της αντίστασης λόγω κλίσης του δρόμου.
- η_{gearbox} : Μέσος βαθμός απόδοσης του συστήματος μετάδοσης ($\eta = 0.95$).
- m_{vehicle} : Μάζα του οχήματος (kg).
- m_{Load} : Πρόσθετο φορτίο οχήματος (kg).
- m_{Rot} : Ισοδύναμη μάζα λόγω περιστρεφόμενων μερών (kg).
- g : Επιτάχυνση της βαρύτητας.
- Fr_0, Fr_1, Fr_4 : Συντελεστές αντίστασης κύλισης.
- v : Ταχύτητα οχήματος (m/s).
- a : Επιτάχυνση οχήματος (m/s²).
- Cd : Συντελεστής οπισθέλκουσας δύναμης, δηλαδή η αντίσταση του οχήματος στην κίνηση, λόγω του αέρα.
- A : Μετωπική επιφάνεια οχήματος (m²).

- ρ : Πυκνότητα αέρα (kg/m^3).
- *Gradient*: Κλίση του δρόμου σε % (θετική για ανηφόρα, αρνητική για κατηφόρα).

Ο υπολογισμός εκπομπών ρύπων σε λογισμικά προσομοίωσης οχημάτων απαιτεί την αναγνώριση της αντίδρασης του κινητήρα σε διαφορετικές συνθήκες οδήγησης. Για να γίνει ευφικτή αυτή η εκτίμηση στο πλαίσιο μικροσκοπικής προσομοίωσης, το HBEFA αξιοποιεί χάρτες ή αλλιώς λεπτομερείς πίνακες (emission maps), οι οποίοι απεικονίζουν την ποσότητα εκπομπών για κάθε συνδυασμό κινητήριας ισχύος και στροφών ανά λεπτό (rpm), επιτρέποντας την αποτύπωση της δυναμικής λειτουργίας ενός κινητήρα σε ποικίλες συνθήκες [S. Hausberger et al. 2016] [Stefan Hausberger, Rexeis et al. 2009] [INFRAS et al. 2019]. Ωστόσο, το HBEFA δεν έχει σχεδιαστεί για να ενσωματώνεται άμεσα σε μικροσκοπικά μοντέλα κυκλοφορίας όπως το SUMO, καθώς βασίζεται σε σταθερά προδιαγεγραμμένα προφίλ ταχύτητας. Προκειμένου λοιπόν, η πρόσβαση σε αυτά τα δεδομένα να καταστεί δυνατή, το SUMO αξιοποιεί πολυωνυμικές εξισώσεις (Σχέση 3.4), σε συνάρτηση με τη στιγμιαία ταχύτητα και επιτάχυνση του οχήματος [Behrisch, Bieker, Erdmann, Knocke et al. 2014].

$$e(V, a) = c_0 + b_1 \cdot V \cdot a + c_1 \cdot V + c_2 \cdot V^2 + c_3 \cdot V^3 \quad (3.4)$$

όπου:

- $e(V, a)$: Ποσότητα εκπομπών (ή κατανάλωση καυσίμου/ενέργειας)
- V : Στιγμιαία ταχύτητα του οχήματος (σε m/s).
- a : Στιγμιαία επιτάχυνση του οχήματος (σε m/s^2).
- c_0 : Σταθερός όρος της εξίσωσης (μονάδες εξαρτώνται από το είδος ρύπου).
- b_1 : Συντελεστής για τον όρο αλληλεπίδρασης ταχύτητας και επιτάχυνσης ($V \cdot a$).
- c_1 : Συντελεστής για τον γραμμικό όρο της ταχύτητας.
- c_2 : Συντελεστής για τον τετραγωνικό όρο της ταχύτητας.
- c_3 : Συντελεστής για τον κυβικό όρο της ταχύτητας.

Οι συντελεστές αυτοί προκύπτουν μέσω της καμπύλης παλινδρόμησης (regression) των δεδομένων των emission maps για κάθε τύπο οχήματος και κατηγορία εκπομπής [Behrisch, Bieker, Erdmann, Knocke et al. 2014], αποτυπώνοντας την επίδραση της ταχύτητας και της επιτάχυνσης στην παραγωγή των εκπομπών. Η διαδικασία αυτή εξασφαλίζει ότι η εξίσωση μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε σημείο της προσομοίωσης, ανεξαρτήτως της πορείας ταχύτητας ή του φορτίου του οχήματος. Τέλος, η χρήση αυτής της εξίσωσης στο SUMO προσφέρει έναν αποδοτικό και ακριβή τρόπο υπολογισμού εκπομπών, βασισμένο σε ρεαλιστικά δεδομένα, αποφεύγοντας την υπολογιστική πολυπλοκότητα και την αναζήτηση δεδομένων από σύνθετους πίνακες.

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται η 4^η και τελευταία έκδοση του HBEFA, η οποία αποτελεί μια ολοκληρωμένη βάση δεδομένων, κατάλληλη για περιβαλλοντικό σχεδιασμό και χάραξη πολιτικής. Η έκδοση αυτή δίνει την δυνατότητα σε προσομοιώσεις να αντικατοπτρίζουν τις εκπομπές οχημάτων στον πραγματικό κόσμο, παρέχοντας μάλιστα ένα ισχυρό πλαίσιο για την ανάλυση των πιθανών οφελών των υβριδικών οχημάτων (HEVs) στην αστική κυκλοφορία [Tettamanti et al. 2024].

4 Εφαρμογή και Αποτελέσματα

4.1 Παρουσίαση Σεναρίων

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, που υλοποιήθηκαν στο οδικό δίκτυο της πόλης των Χανίων. Όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η πόλη των Χανίων επιλέχθηκε λόγω της ύπαρξης εγκεκριμένου ΣΒΑΚ και των προβλημάτων που αυτό καταγράφει. Ειδικότερα, τα περισσότερα οχήματα διασχίζουν το δίκτυο, χωρίς να έχουν προορισμό μέσα σε αυτό, ενώ παρατηρείται αυξημένη χρήση Ι.Χ. και κατά συνέπεια υπάρχουν περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τον κυκλοφοριακό φόρτο [Δήμος Χανίων, 2018]. Στο πλαίσιο της μελέτης, διαμορφώθηκε ένα βασικό σενάριο, το οποίο προσεγγίζει την υφιστάμενη κατάσταση του οδικού δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη στοιχεία για τον στόλο των οχημάτων και την κατανομή τους ανά κατηγορία καυσίμου. Η ανάλυση επικεντρώνεται αποκλειστικά στα επιβατικά οχήματα, τα οποία αποτελούν τη σημαντικότερη πηγή κυκλοφοριακού φόρτου και εκπομπών εντός του αστικού ιστού [Δήμος Χανίων, 2021]. Βάσει των στόχων του ΣΒΑΚ Χανίων για την προώθηση της βιώσιμης κινητικότητας και τη μείωση των εκπομπών, διαμορφώθηκαν και αξιολογήθηκαν τέσσερα εναλλακτικά σενάρια, τα οποία συγκρίνονται με το βασικό σενάριο ως προς την επίδρασή τους στην κυκλοφορία και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Τα σενάρια που εξετάζονται περιλαμβάνουν:

- εφαρμογή ορίου ταχύτητας 30 km/h στο σύνολο του οδικού δικτύου,
- υιοθέτηση της οικολογικής οδήγησης (eco-driving),
- σταδιακή διείσδυση οχημάτων χαμηλών και μηδενικών εκπομπών για τα έτη 2030 και 2050, σύμφωνα με το «Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ)».

Η αξιολόγηση των σεναρίων γίνεται σε σύγκριση με το βασικό σενάριο, ως προς τις συνολικές εκπομπές, τη χρονική κατανομή της κυκλοφορίας και τη γεωγραφική κατανομή της επιβάρυνσης στο δίκτυο.

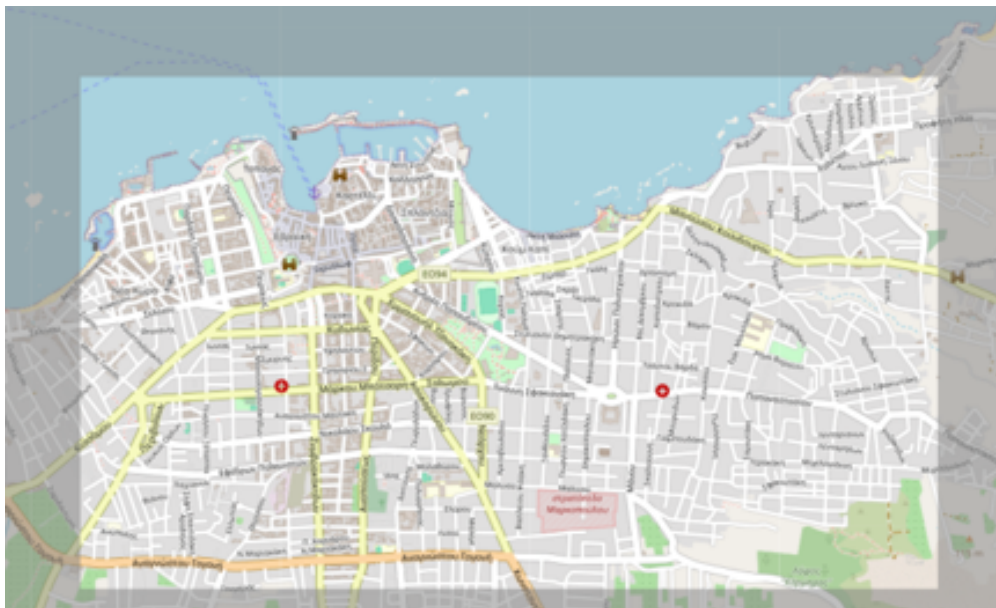
4.2 Οδικό Δίκτυο

Η περιοχή μελέτης επιλέχθηκε με βάση τον καθορισμό του Σχεδίου Βιώσιμης Αστικής Κινητικότητας (ΣΒΑΚ) του Δήμου Χανίων, το οποίο επικεντρώνεται στο αστικό κέντρο και τις περιοχές αυξημένης κυκλοφορίας και τουριστικής δραστηριότητας. Το οδικό δίκτυο που

εξετάζεται περιλαμβάνει το ιστορικό και εμπορικό κέντρο της πόλης, καθώς και βασικούς οδικούς άξονες με έντονη «διαμπερή» κυκλοφορία, όπως περιγράφονται στο ΣΒΑΚ (Εικόνα 4.1) [Δήμος Χανίων, 2018].



Εικόνα 4.1: Οριοθέτηση περιοχής μελέτης σύμφωνα με το ΣΒΑΚ Δήμου Χανίων [Δήμος Χανίων, 2018]



Εικόνα 4.2: Απεικόνιση του χάρτη της περιοχής μελέτης στο OpenStreetMap

Το οδικό δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση αποτελείται από 1.957 κόμβους (nodes) και 4.214 οδικά τμήματα/δρόμοι (edges), καλύπτοντας με λεπτομέρεια την περιοχή μελέτης. Η ταχύτητα που έχει αποδοθεί στο οδικό δίκτυο ακολουθεί τα όρια του Κώδικα Οδικής Κυκλοφορίας (Ν. 2696/1999), όπου σύμφωνα με το Άρθρο 20, η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα εντός κατοικημένων περιοχών είναι τα 50 km/h, εκτός αν ορίζεται διαφορετικά με ειδική σήμανση [1999].



Εικόνα 4.3: Απεικόνιση του οδικού δικτύου των Χανίων στο Περιβάλλον Προσομοίωσης SUMO

Η προσομοίωση καλύπτει το χρονικό διάστημα από τις 6:00 το πρωί έως τις 12:00 το βράδυ, καθώς αυτές οι ώρες αντιστοιχούν στη διάρκεια της ημερήσιας κυκλοφορίας όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη κινητικότητα των οχημάτων και των πολιτών. Η επιλογή αυτού του εύρους επιτρέπει τη μελέτη των κυριότερων κυκλοφοριακών προτύπων, συμπεριλαμβανομένων των περιόδων αιχμής.

4.3 Βασικό Σενάριο

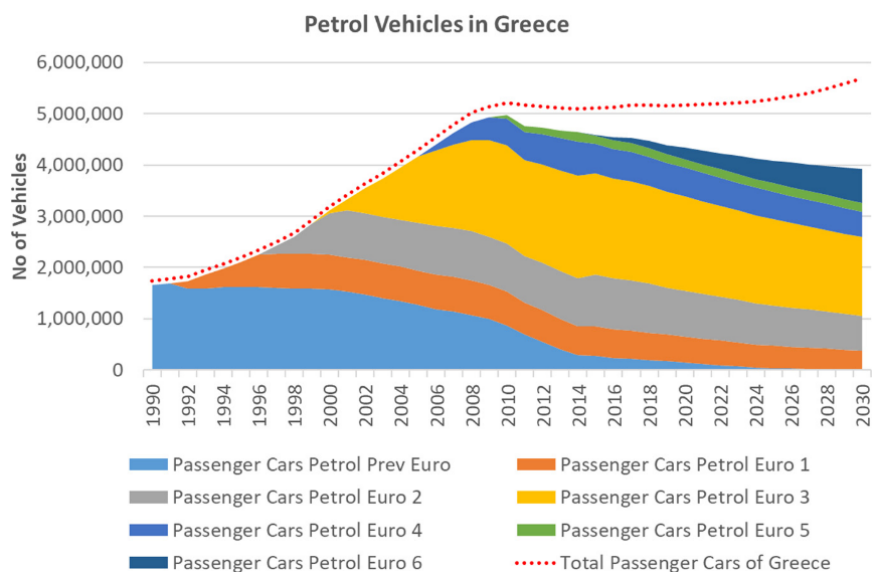
4.3.1 Χαρακτηριστικά Σεναρίου

Κατά το διάστημα της προσομοίωσης, εισήχθησαν 67.000 επιβατικά οχήματα στο δίκτυο, αριθμός που παρουσιάζει απόκλιση μικρότερη του 1% από τα επίσημα στοιχεία της ΕΛΣΤΑΤ για το έτος 2023, αναφορικά με τον αριθμό οχημάτων σε κυκλοφορία ανά νομό. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, τέτοιου είδους μικρές αποκλίσεις στα δεδομένα εισόδου θεωρούνται αποδεκτές για λόγους υπολογιστικής αποδοτικότητας και ρεαλιστικής προσομοίωσης των μοντέλων [Program, 2014] [Walker et al. 2008]. Αξίζει να σημειωθεί, πως τόσο ο στόλος αυτός, όσο και οι διαδρομές που ακολουθούν τα οχήματα χρησιμοποιούνται ως σημείο αναφοράς και παραμένουν σταθερά για όλα τα σενάρια, ώστε να διασφαλιστεί η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζεται η κατανομή των οχημάτων ανά κατηγορία καυσίμου, για το βασικό σενάριο.

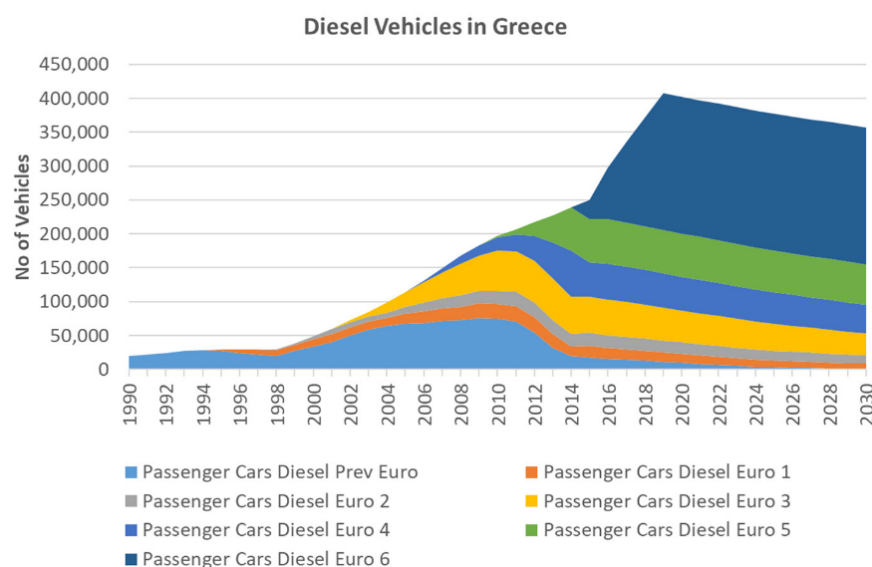
Κατηγορία Καυσίμου	Ποσοστό %
Gasoline	88.4
Diesel	8.9
BEV (Battery Electric Vehicle)	0.3
HEV (Hybrid Electric Vehicle)	2.2
CNG (Compressed Natural Gas)	0.1
LPG (Liquefied Petroleum Gas)	0.1
Σύνολο	100

Πίνακας 4.1: Κατανομή οχημάτων ανά κατηγορία καυσίμου για το βασικό σενάριο [EVStats, 2024] [ACEA, 2025]

Επί προσθέτως, η κατανομή ανά κατηγορία εκπομπών Euro, για τα βενζοκίνητα και πετρελαιοκίνητα οχήματα, προσεγγίστηκε με βάση τα δεδομένα που παρουσιάζονται στην έρευνα των Spyropoulos et al. (2023), σχετικά με την εξέλιξη του στόλου των οχημάτων στην Ελλάδα για την περίοδο 1990-2030 [Spyropoulos et al. 2023]. Η προσέγγιση βασίζεται σε αναγνωρισμένο ερευνητικό έργο και αντικατοπτρίζει τις πραγματικές τάσεις ανανέωσης του στόλου. Όπως αναφέρεται στην Ένωση Ευρωπαϊκών Κατασκευαστών Αυτοκινήτων (ACEA), στην Ελλάδα, τα οχήματα έχουν μέση «ηλικία» τα 17,5 χρόνια, το οποίο είναι το υψηλότερο μεταξύ των κρατών-μελών της Ε.Ε. [ACEA, 2025]. Στην Εικόνα 4.4 αποτυπώνεται με γράφημα η χρονική εξέλιξη του στόλου των επιβατικών οχημάτων βενζίνης, ενισχύοντας αυτήν την τοποθέτηση, αφού οι κατηγορίες Euro 0 έως 3 δείχνουν να καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό του στόλου έναντι των προγενέστερων κατηγοριών. Οι νεότερες κατηγορίες (Euro 4 έως 6) εμφανίζουν σχετικά μικρή διείσδυση, γεγονός που επιβεβαιώνει τη βραδεία ανανέωση του στόλου και τη χρήση οχημάτων υψηλότερων εκπομπών ρύπων. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αποτυπώνει την προβλεπόμενη συνολική πορεία του στόλου των επιβατικών οχημάτων στη χώρα. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 4.5, που αφορά τα πετρελαιοκίνητα οχήματα, παρατηρείται σημαντική αύξηση του αριθμού των οχημάτων μετά το 2010, ενώ επικρατούν σταδιακά τα οχήματα κατηγοριών Euro 5 και 6.



Εικόνα 4.4: Χρονική εξέλιξη του στόλου βενζινοκίνητων επιβατικών οχημάτων στην Ελλάδα ανά κατηγορία Euro (1990–2030) [Spyropoulos et al. 2023]



Εικόνα 4.5: Χρονική εξέλιξη του στόλου πετρελαιοκίνητων επιβατικών οχημάτων στην Ελλάδα ανά κατηγορία Euro (1990–2030) [Spyropoulos et al. 2023]

Από την ανάλυση των διαγραμμάτων, εκτιμήθηκε προσεγγιστικά η ποσοστιαία κατανομή των επιβατικών οχημάτων ανά πρότυπο εκπομπών (Euro) για το έτος 2023. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες:

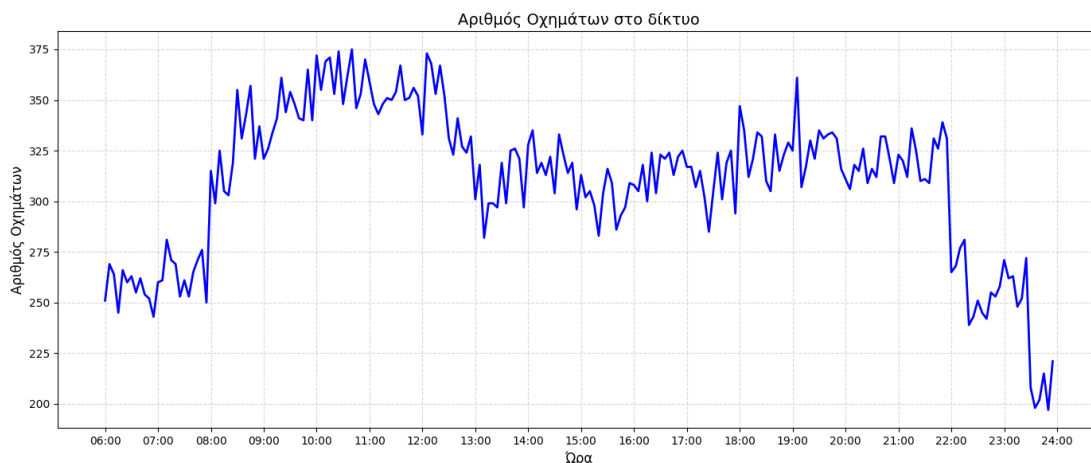
Κατηγορία Euro	Ποσοστό %
Euro 0	1
Euro 1	10
Euro 2	25
Euro 3	40
Euro 4	12
Euro 5	4
Euro 6	8
Σύνολο	100

Πίνακας 4.2: Κατανομή βενζινοκίνητων οχημάτων ανά κατηγορία εκπομπών Euro για το έτος 2023

Κατηγορία Euro	Ποσοστό %
Euro 0	1
Euro 1	3
Euro 2	5
Euro 3	12
Euro 4	14
Euro 5	20
Euro 6	45
Σύνολο	100

Πίνακας 4.3: Κατανομή πετρελαιοκίνητων οχημάτων ανά κατηγορία εκπομπών Euro για το έτος 2023

Η χρονική κατανομή των διαδρομών των οχημάτων ορίστηκε έτσι ώστε να αντικατοπτρίζει τα πρότυπα κυκλοφορίας που παρατηρούνται σε ένα αστικό περιβάλλον. Με την χρήση των πινάκων προέλευσης-προορισμού (OD matrices), δημιουργήθηκαν διαδρομές από και προς το κέντρο της πόλης, αναπαριστώντας τα διαστήματα αιχμής κατά τις πρωινές, τις μεσημβρινές και απογευματινές ώρες. Η διαμόρφωση αυτή βασίστηκε σε κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά που περιγράφονται στη «Μελέτη Οργάνωσης της Κυκλοφορίας» για τη διαμόρφωση πράσινης διαδρομής και ποδηλατοδρόμου σε κύριες αρτηρίες της πόλης των Χανίων [Χανίων, 2020]. Στην Εικόνα 4.6 παρουσιάζεται ο αριθμός των οχημάτων που βρίσκονται σε κίνηση, κατά τη διάρκεια της ημέρας, αποτυπώνοντας την διαφοροποίηση του κυκλοφοριακού φόρτου κατά το διάστημα της ημέρας.



Εικόνα 4.6: Αριθμός επιβατικών οχημάτων εντός του δικτύου, ανά 5 λεπτά κατά τη διάρκεια της ημέρας (06:00–24:00)

Τέλος, σχετικές έρευνες για την οδηγική συμπεριφορά στην Ελλάδα, δηλώνουν ότι μεγάλο ποσοστό των οδηγών υπερβαίνουν τα όρια ταχύτητας στους αστικούς δρόμους [Yannis, Folla et al. 2022] [Yannis, Louca et al. 2013]. Με σκοπό την αποτύπωση ρεαλιστικών οδηγικών συμπεριφορών στη συγκεκριμένη προσομοίωση, εισήχθησαν παράμετροι που προσομοιώνουν αποκλίσεις από τα τυπικά όρια ταχύτητας και τη στοχαστική φύση της κίνησης. Συγκεκριμένα, η μεταβλητή

speedFactor επιτρέπει την προσαρμογή της ταχύτητας κάθε οχήματος σε σχέση με το καθορισμένο όριο, αναπαριστώντας την τάση ορισμένων οδηγών να υπερβαίνουν τα θεσμοθετημένα όρια, ενώ η παράμετρος **sigma** εισάγει στοχαστικότητα στη δυναμική του οχήματος, προσομοιώνοντας αυξομειώσεις στην ταχύτητα, εξαιτίας των ανθρώπινων αβεβαιοτήτων και των κυκλοφοριακών συνθηκών.

4.3.2 Αποτελέσματα

Το βασικό σενάριο λειτουργεί ως σημείο αναφοράς για την ποσοτική αξιολόγηση και την επίδραση που επιφέρουν τα ακολουθούντα σενάρια στο περιβάλλον. Ειδικότερα, στην περίπτωση αυτή υπολογίζονται οι εκπομπές ρύπων, για την υπάρχουσα κυκλοφοριακή κατάσταση, χωρίς κάποια παρέμβαση στο οδικό δίκτυο και τα αποτελέσματα που προκύπτουν αποτελούν τη βάση σύγκρισης, ώστε να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων που προτείνονται στα εναλλακτικά σενάρια, αναφορικά με τη μείωση εκπομπών. Για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας και επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων, έχει οριστεί σταθερή τιμή αρχικοποίησης (seed). Αυτό σημαίνει ότι κάθε φορά που το σενάριο εκτελείται, τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι ταυτόσημα, αποτρέποντας τις διακυμάνσεις που μπορεί να προκύψουν από τα στοχαστικά στοιχεία του μοντέλου.

Αποτελέσματα Εκπομπών

Αρχικά, παρουσιάζονται οι συνολικές εκπομπές ρύπων που καταγράφηκαν στο βασικό σενάριο για το σύνολο της περιόδου προσομοίωσης (06:00–24:00). Οι τιμές αυτές εκφράζουν το περιβαλλοντικό φορτίο του υφιστάμενου κυκλοφοριακού συστήματος, που θα αποτελέσει την βάση σύγκρισης με τα επόμενα σενάρια και περιλαμβάνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), μονοξειδίου του άνθρακα (CO), οξειδίων του αζώτου (NO_x), μικροσωματιδίων (PM_x) και υδρογονανθράκων (HC).

Ρύπος	kg	tn
CO ₂	31.199,791	31,200
CO	284,395	0,284
HC	8,522	0,009
PM _x	3,876	0,004
NO _x	26,277	0,026

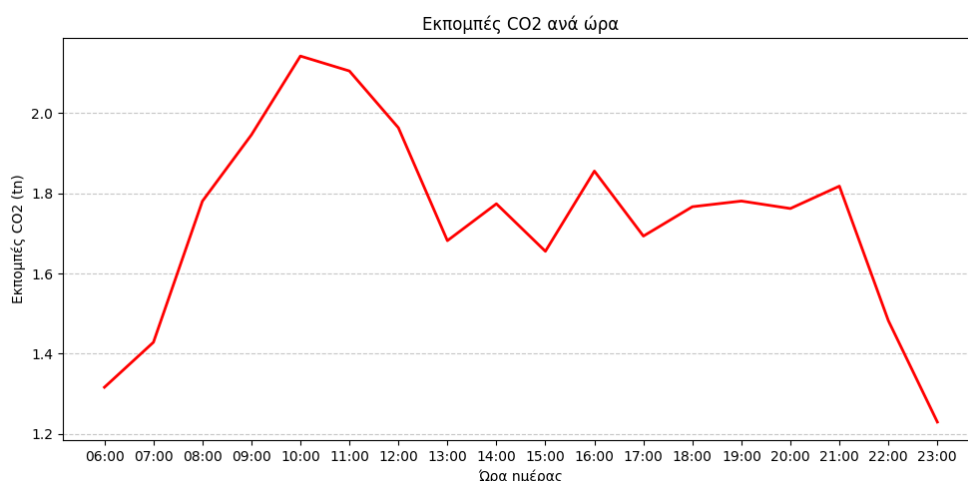
Πίνακας 4.4: Συνολικές εκπομπές ρύπων στο Βασικό Σενάριο

Όπως προκύπτει από τον παραπάνω πίνακα, οι εκπομπές CO₂ αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού περιβαλλοντικού φορτίου του σεναρίου, γεγονός που αποδίδεται στη σχεδόν καθολική επικράτηση βενζινοκίνητων οχημάτων στο δίκτυο. Έτσι, η παραγωγή CO₂ σε μεγάλες ποσότητες ευνοείται εξαιτίας της πλήρους καύσης του καυσίμου αυτού, το οποίο έχει υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα [Aosaf et al. 2022] [European Environment Agency, 2020]. Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζουν και οι εκπομπές CO, οι οποίες είναι προϊόντα ατελούς

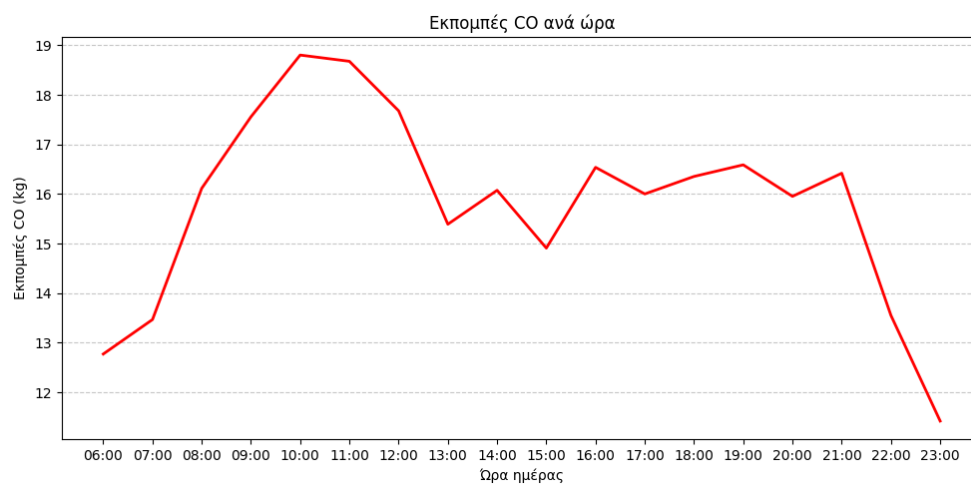
καύσης και είναι αυξημένες σε οχήματα που κινούνται με βενζίνη. Παράλληλα, η περιορισμένη συμμετοχή υβριδικών και ηλεκτρικών οχημάτων επιβεβαιώνουν την κυριαρχία αυτών των ρύπων από οχήματα εσωτερικής καύσης.

Εν συνεχεία, παρά το γεγονός ότι οι εκπομπές των NO_x, των PM_x και των HC, είναι μικρότερες σε απόλυτες τιμές, παραμένουν κρίσιμες για την δημόσια υγεία, ιδιαίτερα στο πυκνοκατοικημένο αστικό περιβάλλον. Συγκεκριμένα, οι εκπομπές σωματιδίων, αν και συνήθως είναι χαρακτηριστικό της καύσης των πετρελαιοκίνητων οχημάτων, η παρουσία τους είναι περιορισμένη, ενώ οι εκπομπές HC και NO_x οφείλονται κατά κύριο λόγο στον παλιό στόλο των βενζινοκίνητων οχημάτων, όπου τα πρότυπα εκπομπών τους δεν είχαν τους ίδιους περιορισμούς σε σύγκριση με τα νεότερα και απουσιάζουν οι καταλύτες, οποίοι είναι υπεύθυνοι για τον περιορισμό των εκπομπών τοξικών ή καρκινογόνων ενώσεων [European Environment Agency, 2020] [Bernard et al. 2018] [Zimakowska-Laskowska et al. 2024] [Fameli et al. 2016].

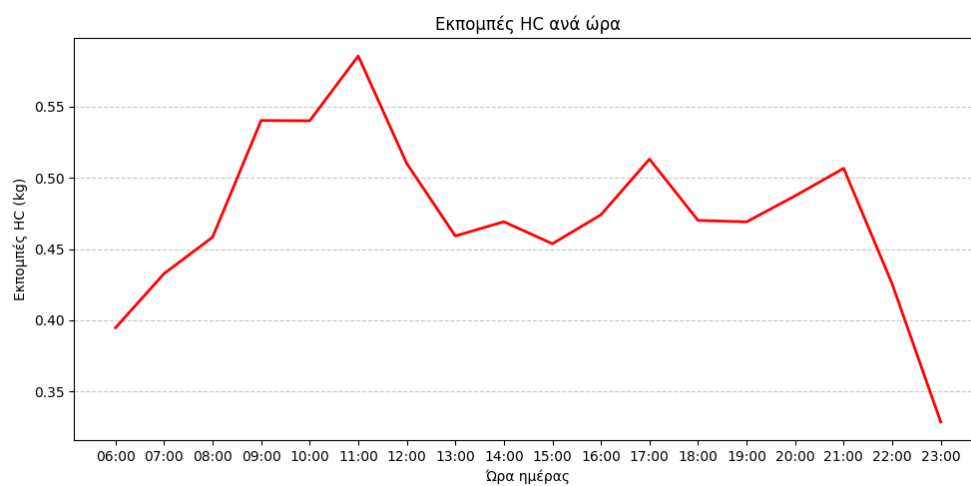
Η ανάλυση της χρονικής κατανομής των ρύπων δείχνει ότι η περιβαλλοντική επιβάρυνση αλλάζει εντός της ημέρας και σχετίζεται άμεσα με τη μεταβολή του κυκλοφοριακού φόρτου στα διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα σχετικά διαγράμματα για κάθε ρύπο, με τα αθροιστικά αποτελέσματα ανά δεκαπέντε λεπτά, αποτυπώνοντας τη μεταβολή των εκπομπών κατά τη διάρκεια της ημέρας.



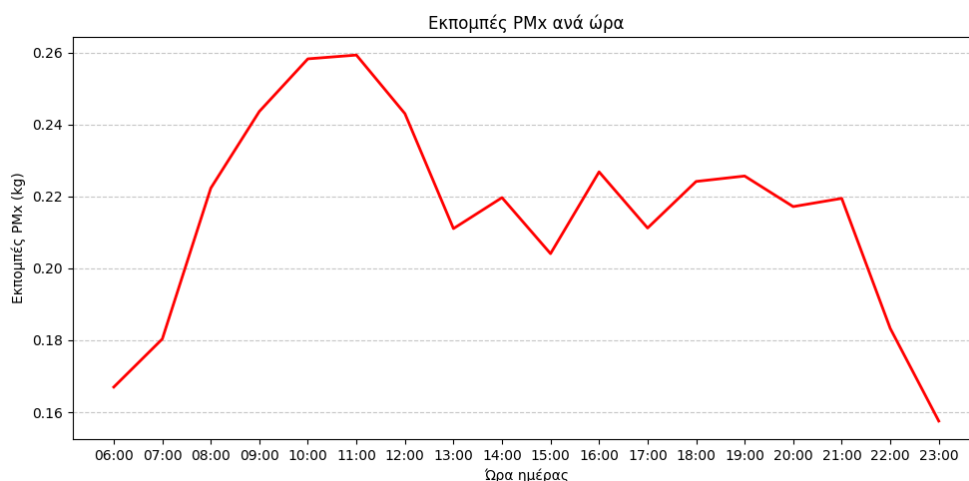
Εικόνα 4.7: Χρονική Κατανομή Εκπομπών CO₂ (06:00–23:00)



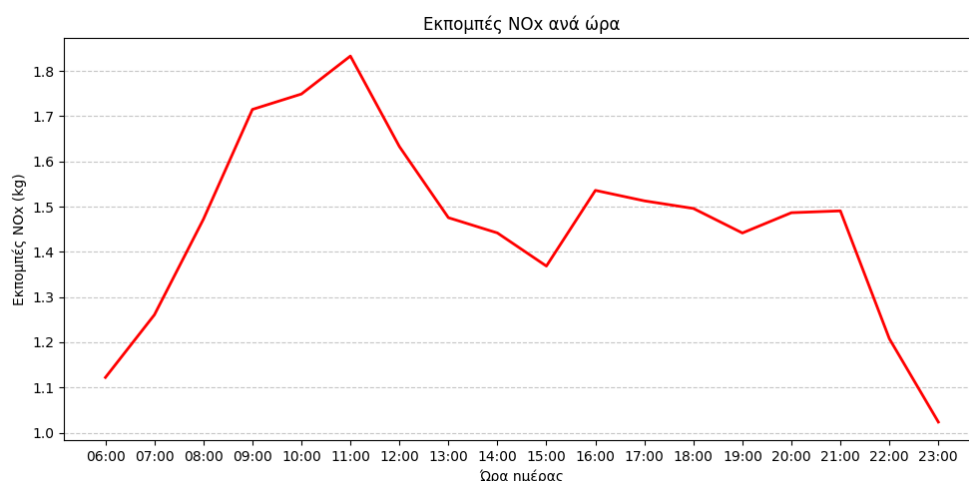
Εικόνα 4.8: Χρονική Κατανομή Εκπομπών CO (06:00–23:00)



Εικόνα 4.9: Χρονική Κατανομή Εκπομπών HC (06:00–23:00)



Εικόνα 4.10: Χρονική Κατανομή Εκπομπών PMx (06:00–23:00)

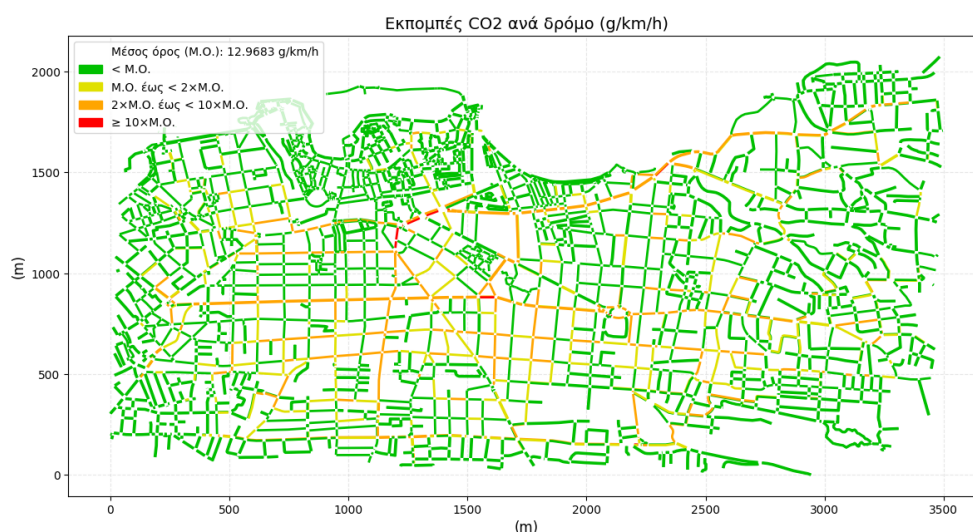


Εικόνα 4.11: Χρονική Κατανομή Εκπομπών NOx (06:00–23:00)

Η ανάλυση της χρονικής εξέλιξης των εκπομπών ρύπων εντός της ημέρας αποκαλύπτει σαφή μοτίβα περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, τα οποία συνδέονται άμεσα με τις διακυμάνσεις της κυκλοφορίας. Όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα, οι εκπομπές παρουσιάζουν κορυφώσεις κατά τις πρωινές (08:00–11:00) και απογευματινές (17:00–20:00) ώρες αιχμής, όπου παρατηρείται και ο μεγαλύτερος αριθμός ενεργών οχημάτων στο δίκτυο Εικόνα 4.6. Τα δεδομένα αυτά επιβεβαιώνουν ότι η ένταση της κυκλοφορίας είναι ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει την εξέλιξη της ρύπανσης, δεδομένου ότι η συντριπτική πλειοψηφία του στόλου αποτελείται από οχήματα ίδιου τύπου καυσίμου (κυρίως βενζίνης) και κατά συνέπεια, η διαφοροποίηση ως προς τις κατηγορίες καυσίμου δεν φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο στην παρούσα φάση. Έτσι, οι διακυμάνσεις στις εκπομπές αποδίδονται πρωτίστως στον κυκλοφοριακό φόρτο και, και όχι στη

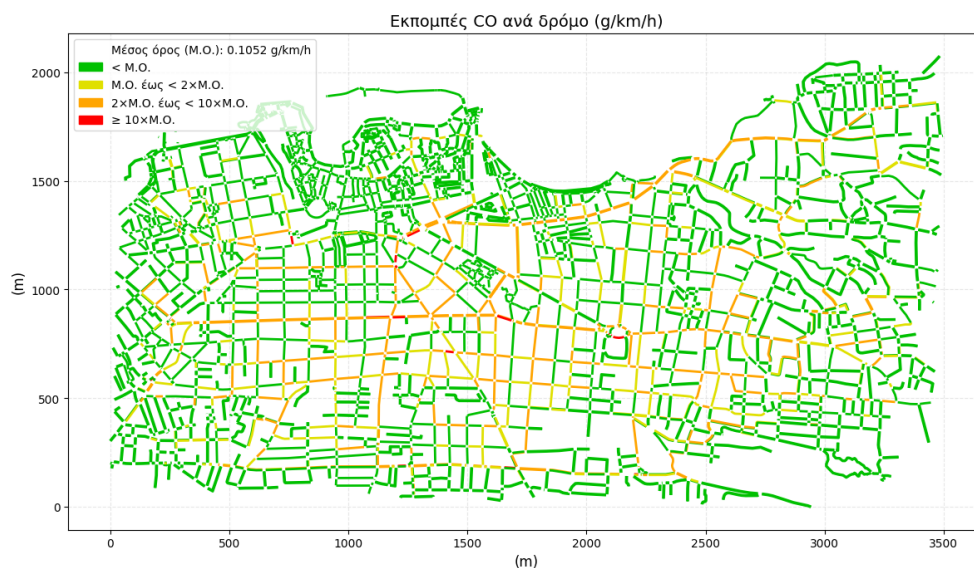
σύσταση του στόλου ανά κατηγορία καυσίμου.

Η χωρική κατανομή των εκπομπών παρουσιάζεται μέσω θεματικών χαρτών, στους οποίους απεικονίζονται οι συνολικές εκπομπές ανά δρόμο. Στις παρακάτω εικόνες, παρουσιάζεται η σχετική ένταση των εκπομπών σε μονάδες g/km/h, επιτρέποντας τη χωρική σύγκριση εντός του οδικού δικτύου και την ανάδειξη των επιβαρυνμένων περιοχών. Με πράσινο χρώμα αποδίδονται τα τμήματα με εκπομπές κάτω από τον μέσο όρο των εκπομπών του δικτύου, ενώ με κίτρινο τα τμήματα που κυμαίνονται μεταξύ του μέσου όρου έως δύο φορές πάνω από αυτόν. Όσον αφορά τους πιο επιβαρυνμένους δρόμους (hot spots), αυτοί αποτυπώνονται στον χάρτη με πορτοκαλί και κόκκινο χρώμα. Συγκεκριμένα, το πορτοκαλί χρησιμοποιείται για τμήματα στα οποία οι εκπομπές κυμαίνονται από το διπλάσιο έως δεκαπλάσιο της μέσης τιμής του δικτύου, ενώ το κόκκινο υποδηλώνει οδικά τμήματα με εκπομπές τουλάχιστον δέκα φορές υψηλότερες από τον μέσο όρο.



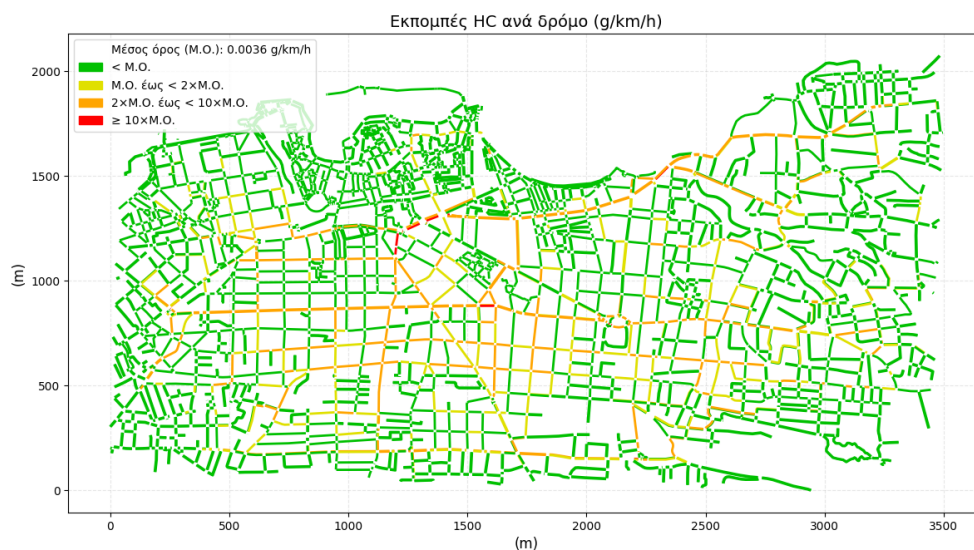
Εικόνα 4.12: Εκπομπές CO₂ ανά τμήμα οδικού δικτύου στο βασικό σενάριο (g/km/h)

Η μέγιστη τιμή εκπομπής CO₂) ανέρχεται στα 1.538,9716 g/km/h και εντοπίζεται στους δρόμους Νικ. Πλαστήρα και Τζανακάκη, ενώ η μέση τιμή σε όλο το δίκτυο είναι 12,9653 g/km/h.



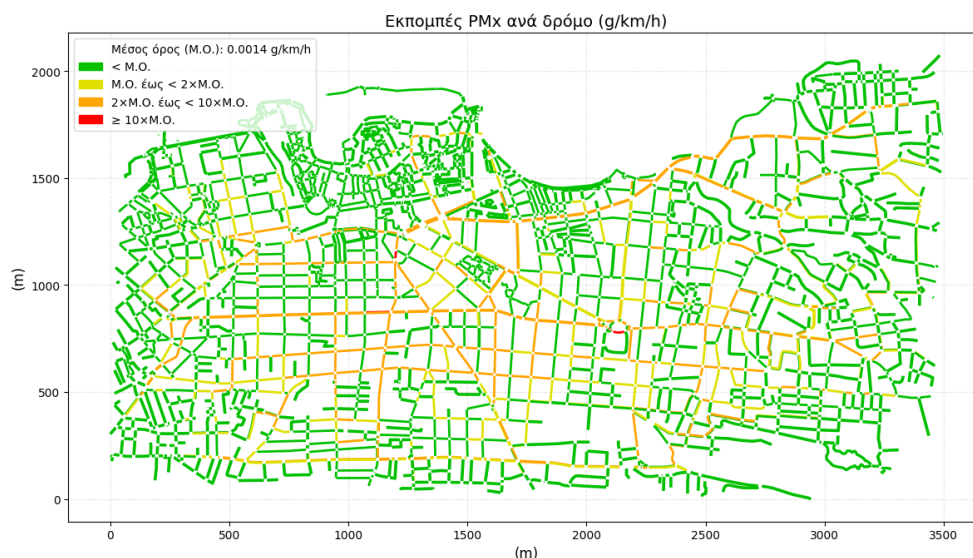
Εικόνα 4.13: Εκπομπές CO ανά τμήμα οδικού δικτύου στο βασικό σενάριο (g/km/h)

Η μέγιστη τιμή εκπομπής CO εντοπίζεται στα 3,0253 g/km/h και εντοπίζεται στους δρόμους Νικ. Πλαστήρα και Τζανακάκη, ενώ η μέση τιμή σε όλο το δίκτυο είναι 0,1052 g/km/h.



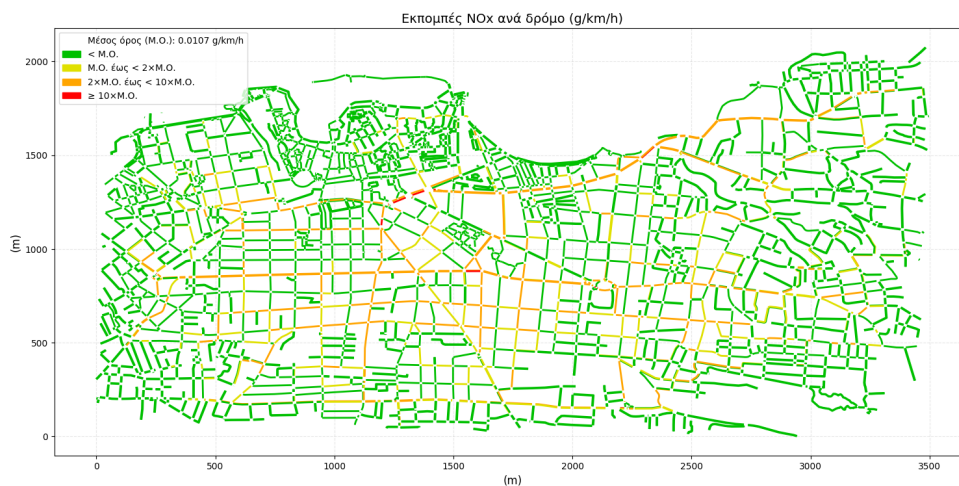
Εικόνα 4.14: Εκπομπές HC ανά τμήμα οδικού δικτύου στο βασικό σενάριο (g/km/h)

Η μέγιστη τιμή εκπομπής HC ανέρχεται σε 0,6333 g/km/h και εντοπίζεται στους δρόμους Νικ. Πλαστήρα και Τζανακάκη, ενώ η μέση τιμή σε όλο το δίκτυο είναι 0,0036 g/km/h.



Εικόνα 4.15: Εκπομπές PMx ανά τμήμα οδικού δικτύου στο βασικό σενάριο (g/km/h)

Η μέγιστη τιμή εκπομπής PMx ανέρχεται σε 0,0251 g/km/h και εντοπίζεται στους δρόμους Νικ. Πλαστήρα και Τζανακάκη, ενώ η μέση τιμή σε όλο το δίκτυο είναι 0,0014 g/km/h.

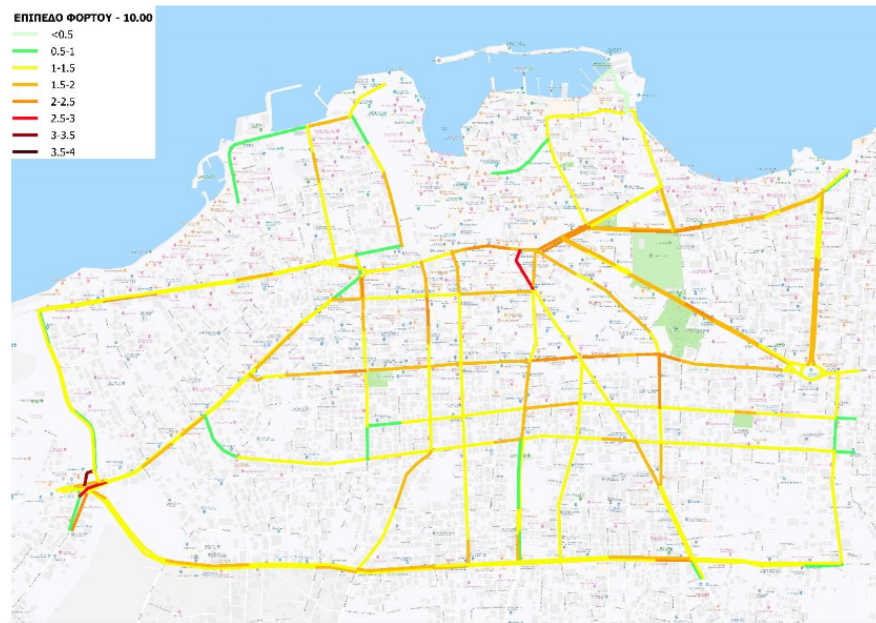


Εικόνα 4.16: Εκπομπές NOx ανά τμήμα οδικού δικτύου στο βασικό σενάριο (g/km/h)

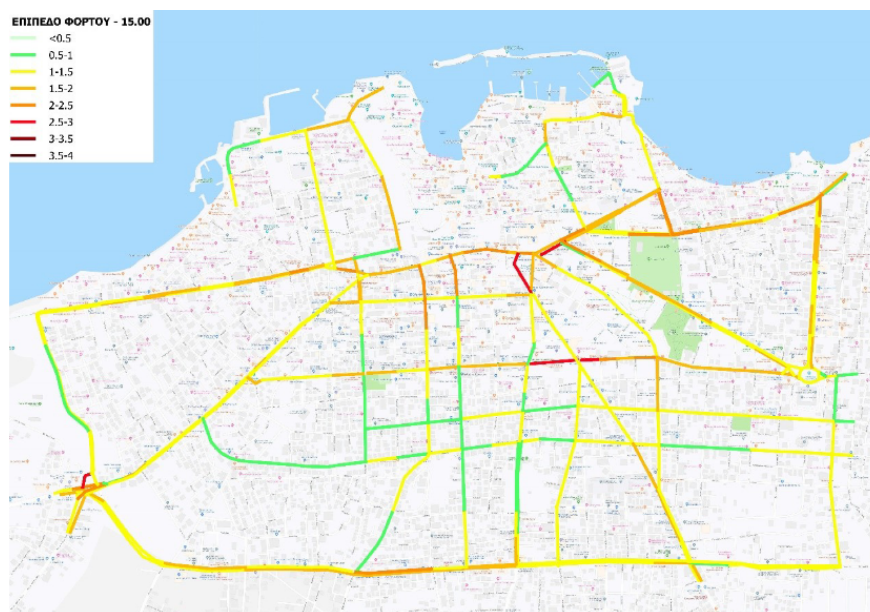
Η μέγιστη τιμή εκπομπής NOx ανέρχεται σε 1,2456 g/km/h και εντοπίζεται στους δρόμους Νικ. Πλαστήρα και Τζανακάκη, ενώ η μέση τιμή σε όλο το δίκτυο είναι 0,0107 g/km/h..

Παρατηρείται λοιπόν, συγκέντρωση υψηλότερων εκπομπών σε οδούς διαμπερούς κυκλοφορίας

και κύριους άξονες πρόσβασης προς το κέντρο. Για την αξιολόγηση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων της κυκλοφοριακής προσομοίωσης και της ακρίβειας στην κατανομή των εκπομπών, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των παραγόμενων χαρτών εκπομπών με πραγματικά δεδομένα κυκλοφοριακού φόρτου για την περιοχή των Χανίων ,όπως αυτά παρουσιάζονται στη «Μελέτη Οργάνωσης της Κυκλοφορίας» του Δήμου Χανίων [Χανίων, 2020].



Εικόνα 4.17: Επίπεδα κυκλοφοριακού φόρτου στον αστικό ιστό των Χανίων το πρωινό διάστημα (10:00) [Χανίων, 2020]



Εικόνα 4.18: Επίπεδα κυκλοφοριακού φόρτου στον αστικό ιστό των Χανίων το μεσημβρινό διάστημα (15:00) [Χανίων, 2020]

Η ανάλυση αυτή αναδुकνύει τη χωρική συσχέτιση μεταξύ των περιοχών υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου σε ώρες αιχμής και των τμημάτων του οδικού δικτύου που παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες τιμές εκπομπών, ανά χιλιόμετρο και ώρα. Κεντρικοί άξονες όπως η Χατζημιχάλη Γιάνναρη, η Αποκορώνου, η Σκαλίδη-Σοφ. Βενιζέλου και η Νικ. πλαστήρα εμφανίζονται με κόκκινο ή πορτοκαλί και στους δύο χάρτες, επιβεβαιώνοντας ότι η προσομοίωση αναπαριστά με επιτυχία τις πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας, ενισχύοντας με αυτόν τον τρόπο την αξιοπιστία του μοντέλου.

Κυκλοφοριακοί Δείκτες

Στο πλαίσιο του βασικού σεναρίου προέκυψαν οι εξής βασικοί δείκτες λειτουργικής απόδοσης του οδικού δικτύου :

Δείκτης Κυκλοφορίας	Τιμή
Μέση ταχύτητα οχημάτων στο δίκτυο	39,6 km/h
Μέσος χρόνος διαδρομής	3,57 λεπτά
Μέσος χρόνος αναμονής ανά όχημα	20,57 δευτερόλεπτα
Μέσος όρος στάσεων ανά όχημα (λόγω εμποδίων)	1,8 στάσεις

Πίνακας 4.5: Κυκλοφοριακοί δείκτες στο Βασικό Σενάριο

Οι δείκτες αυτοί συνδέονται άμεσα με τις εκπομπές ρύπων, καθώς η αυξημένοι χρόνοι αναμονής (idling times) και οι χαμηλές ταχύτητες αποτελούν βασικούς παράγοντες ενίσχυσης της παραγωγής εκπομπών CO, NOx και PMx σε αστικό περιβάλλον.

4.4 1^ο Σενάριο

4.4.1 Τροποποιήσεις στο Δίκτυο

Το πρώτο από τα εναλλακτικά σενάρια αυτής της εργασίας περιλαμβάνει την εφαρμογή του ορίου ταχύτητας σε 30 km/h για ολόκληρο το δίκτυο της περιοχής που μελετάται. Προκειμένου να υλοποιηθεί αυτό το εγχείρημα, επιλέχθηκαν οι δρόμοι (edges) με μεγαλύτερο όριο ταχύτητας, το οποίο προσαρμόστηκε στα νέα δεδομένα. Η συνολική μετατροπή, περιλαμβάνει 2.962 δρόμους (edges), το οποίο αντιστοιχεί στο 69,78% των συνολικών δρόμων. Όσον αφορά δεδομένα σχετικά με τον στόλο, τις διαδρομές και την κατανομή ανά κατηγορία καυσίμου, αυτά παρέμειναν ίδια με εκείνα του βασικού σεναρίου, ώστε να διασφαλιστεί η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων.

4.4.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Αποτελέσματα Εκπομπών

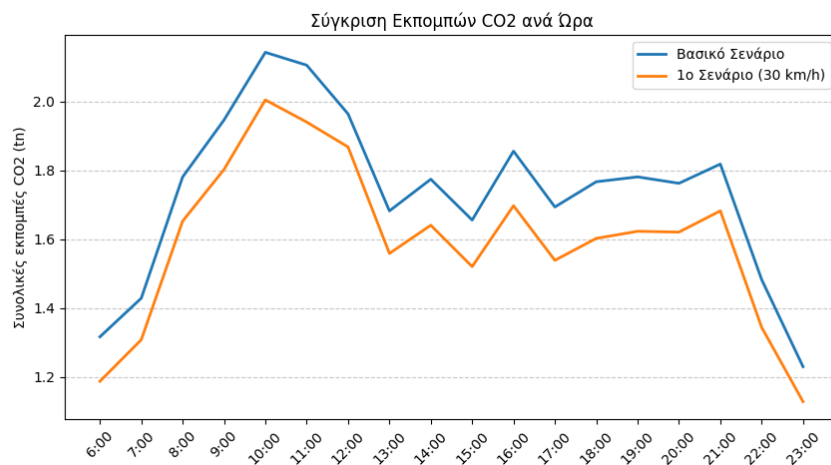
Στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του 1^{ου} σεναρίου, σχετικά με τις συνολικές εκπομπές ρύπων καθ'όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Παράλληλα, εμφανίζονται και τα αντίστοιχα στοιχεία του Βασικού Σεναρίου, αλλά και η μεταξύ τους σύγκριση ως προς το ποσοστό μεταβολής των εκπομπών, προκειμένου να αποτιμηθεί η επίδραση της παρέμβασης. Όπως προκύπτει λοιπόν, η μείωση του ορίου ταχύτητας οδηγεί σε αυτήν την περίπτωση σε μείωση των εκπομπών σε όλους τους ρύπους που μελετώνται, ενώ μάλιστα υπάρχει έντονη βελτίωση στις μετρήσεις του CO. Οι εξελίξεις αυτή επιβεβαιώνει τα περιβαλλοντικά οφέλη που μπορούν να προκύψουν από την στρατηγική αυτή σε ένα αστικό περιβάλλον, αλλά και την εξάρτηση των εκπομπών με την ταχύτητα των οχημάτων.

Ρύπος	Βασικό (kg)	1 ^ο Σενάριο (kg)	Βασικό (tn)	1 ^ο Σενάριο (tn)	Ποσοστό Μείωσης (%)
CO ₂	31.199,791	28.731,02	31,200	28,731	7,91
CO	284,395	63,89	0,284	0,064	77,53
HC	8,522	8,502	0,009	0,009	0,22
PM _x	3,876	3,528	0,004	0,004	8,98
NO _x	26,277	24,324	0,026	0,024	7,43

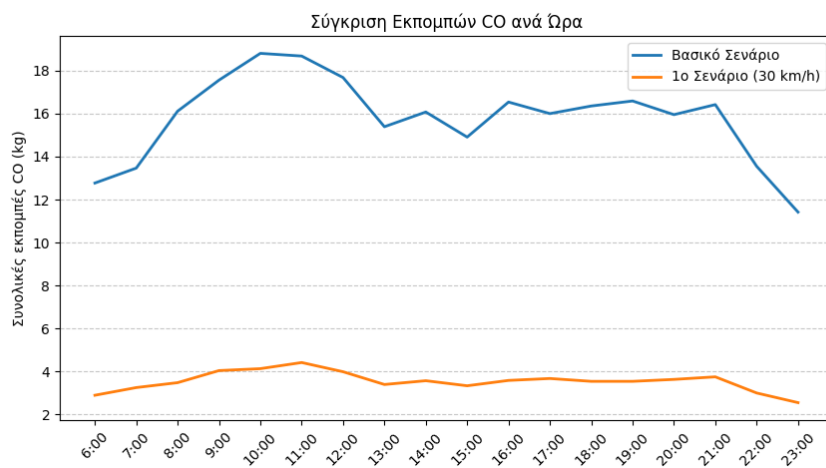
Πίνακας 4.6: Σύγκριση Συνολικών Εκπομπών ανά Ρύπο μεταξύ Βασικού και 1^{ου} Σεναρίου

Για την καλύτερη αποτύπωση των αποτελεσμάτων, είναι σημαντική η σύγκριση των εκπομπών ανά ρύπο, με το βασικό σενάριο, κατά τη διάρκεια της ημέρας, ώστε να αποτυπωθεί η επίδοση της πολιτικής αυτής σε περιόδους κυκλοφοριακής αιχμής, αλλά και σε συνθήκες χαμηλής κυκλοφορίας. Από την ανάλυση των παρακάτω διαγραμμάτων, φαίνεται ότι υπάρχει μείωση των συνολικών εκπομπών σε όλο το βάθος χρόνου της προσομοίωσης, με τη διαφορά να είναι εντονότερη τις ώρες αιχμής, γεγονός που αποδεικνύει ότι οι ηπιότερες συνθήκες οδήγησης και οι χαμηλές ταχύτητες μειώνουν την παραγωγή αέριων ρύπων [Yannis και Michelaraki, 2024] [Archer et al. 2008]. Αντιθέτως, οι εκπομπές HC δείχνουν να έχουν μικρές μεταβολές κατά τη διάρκεια της

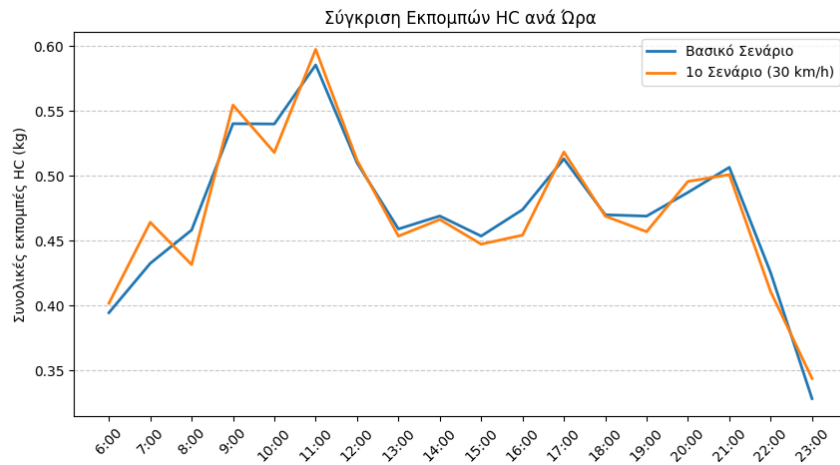
ημέρας, ενώ τις ώρες αιχμής αυξάνονται ελαφρώς, καθώς οι μεγαλύτεροι χρόνοι αναμονής και οι πολύ χαμηλές ταχύτητες περιορίζουν την απόδοση του καταλύτη σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από το επιθυμητό [Mei et al. 2021].



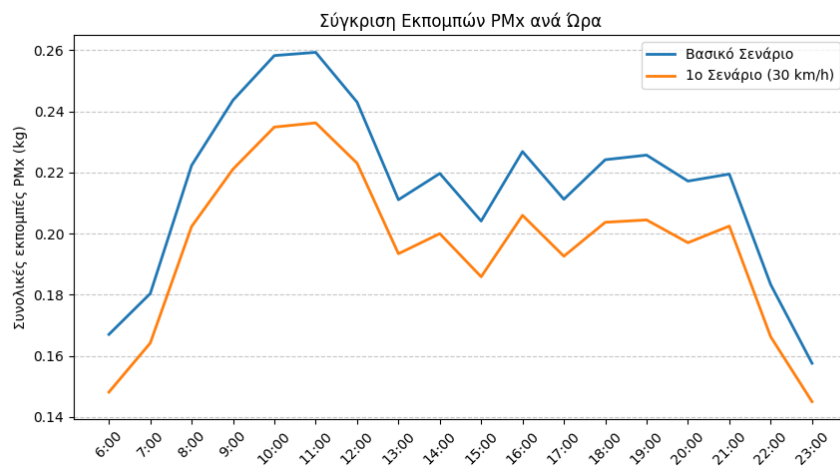
Εικόνα 4.19: Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών CO₂ σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)



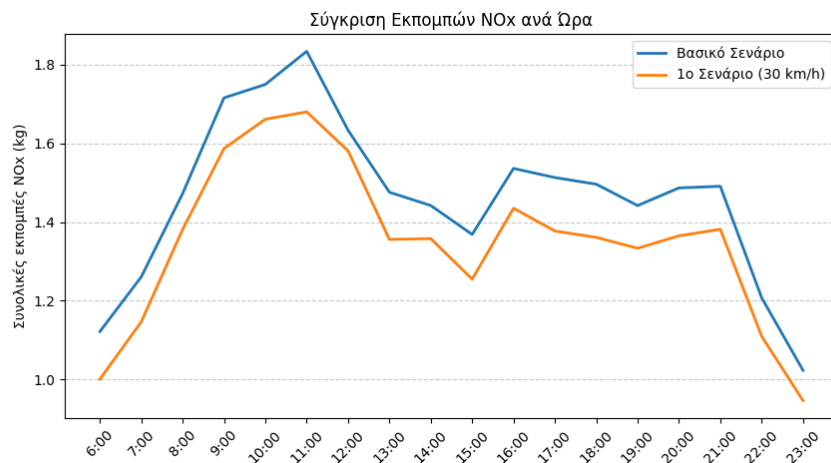
Εικόνα 4.20: Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών CO σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)



Εικόνα 4.21: Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών HC σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)

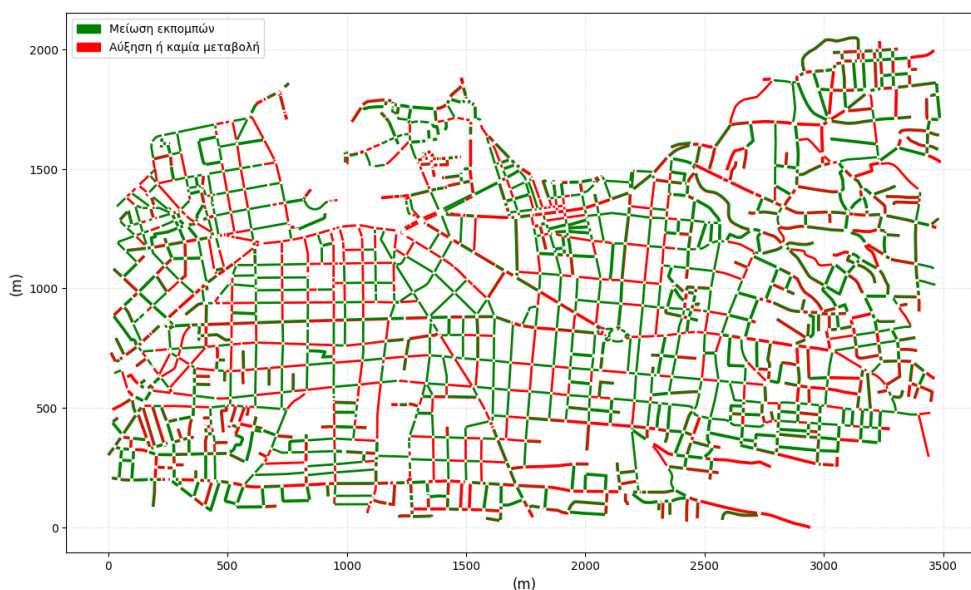


Εικόνα 4.22: Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών PM_x σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)

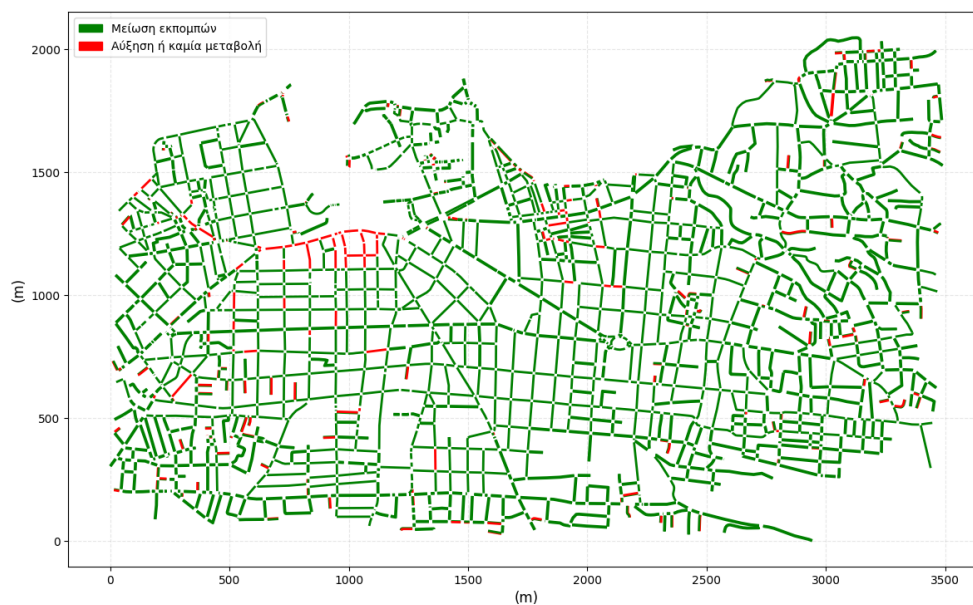


Εικόνα 4.23: Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών NOx σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)

Για την καλύτερη αποτύπωση της χωρικής διαφοροποίησης που προκύπτει από την επιβολή του ορίου ταχύτητας στα 30 km/h, δημιουργήθηκαν χαρτογραφικές απεικονίσεις παρουσιάζοντας την θετική ή αρνητική του μέτρου. Οι δρόμοι που παρουσιάζουν μείωση εκπομπών σημειώνονται με πράσινο χρώμα, ενώ αυτοί που εμφάνισαν αύξηση ή δεν υπήρξε μεταβολή με κόκκινο. Η συνένωση αυτή έγινε διότι το ποσοστό των δρόμων που δεν σημείωσαν καμία περιβαλλοντική αλλαγή είναι αμελητέο, ενώ η στασιμότητα κατά την επιβολή αυτής πολιτικής, από περιβαλλοντικής άποψης, θεωρείται εξίσου ανεπιθύμητη.



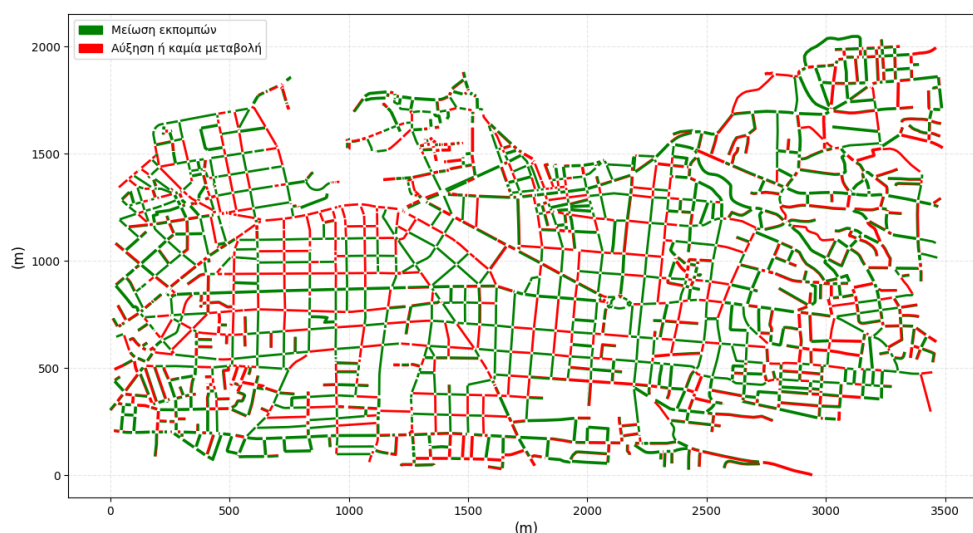
Εικόνα 4.24: Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών CO₂ με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)



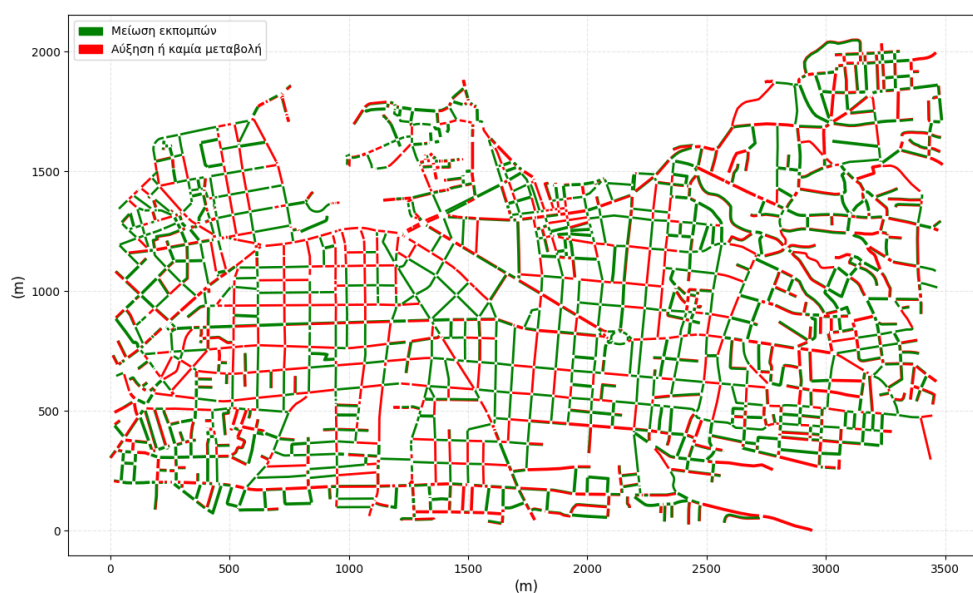
Εικόνα 4.25: Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών CO με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)



Εικόνα 4.26: Σύγκριση Χωρικής της Κατανομής των Εκπομπών HC με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)

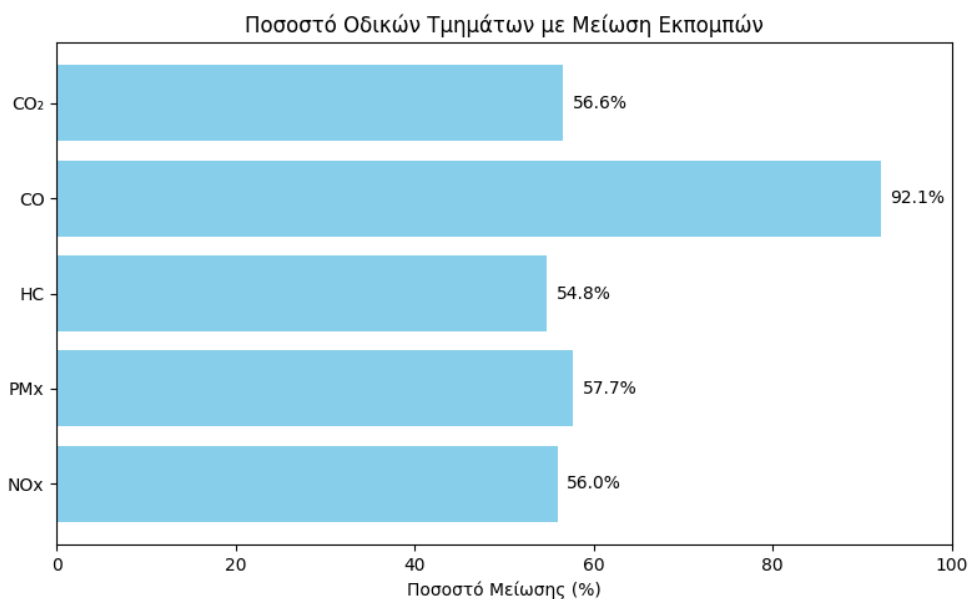


Εικόνα 4.27: Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών PMx με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)



Εικόνα 4.28: Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών NOx με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)

Σε πρώτη ανάλυση, η παραπάνω σύγκριση αποτυπώνει με οπτικό τρόπο τις μεταβολές των εκπομπών για κάθε οδικό τμήμα του δικτύου. Στην Εικόνα 4.25, η οποία αφορά τις εκπομπές CO, τα οφέλη που προκύπτουν μετά την εφαρμογή του μέτρου, είναι ιδιαίτερα εμφανή. Ωστόσο, για την πληρέστερη κατανόηση της συνολικής επίδρασης και των υπόλοιπων ρύπων, ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας με τα ποσοστά των οδικών τμημάτων που σημείωσαν μείωση εκπομπών ανά ρύπο.



Εικόνα 4.29: Ποσοστό των Συνολικών Οδικών Τμημάτων που σημείωσαν Μείωση Εκπομπών ανά Ρύπο

Σύμφωνα με την Εικόνα 4.29, η επιβολή του μέτρου είναι θετική στο μεγαλύτερο μέρος του δικτύου, ωστόσο δεν είναι ιδιαίτερα έντονη και εκτεταμένη σε όλο δίκτυο, επιβεβαιώνοντας την ανάγκη για στοχευμένο περιορισμό της ταχύτητας των οχημάτων.

Συγκριτική Ανάλυση Δεικτών Απόδοσης

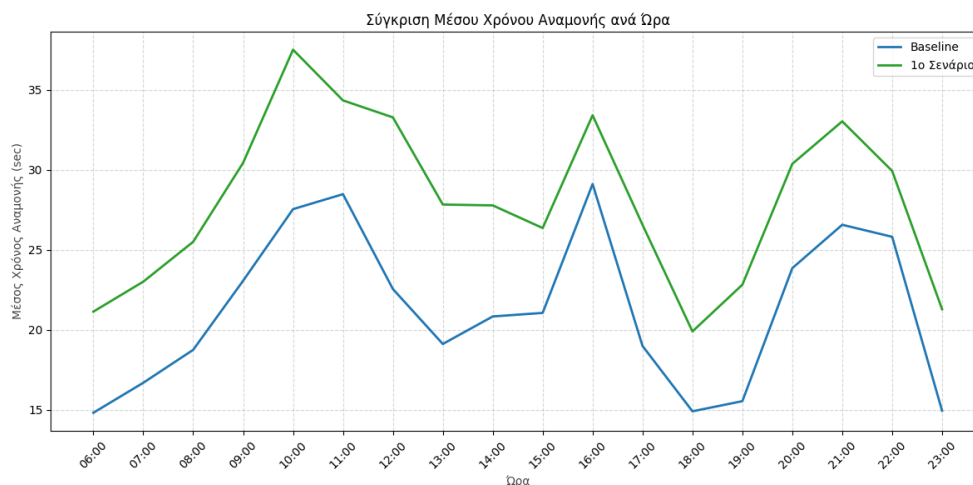
Η επιβολή του ανώτατου ορίου ταχύτητας στα 30 km/h αναμένεται να επηρεάσει και βασικούς δείκτες απόδοσης του κυκλοφοριακού συστήματος, οι οποίοι σχετίζονται κυρίως με την χρησιμότητα του μέτρου για τους οδηγούς των οχημάτων. Στον Πίνακα 4.7 παρατίθενται τα συγκριτικά αποτελέσματα των κυριότερων δεικτών σε σχέση με το βασικό σενάριο, αναδεικνύοντας το λειτουργικό κόστος που επιφέρει το μέτρο, ως προς την τη διάρκεια μετακίνησης των οδηγών.

Δείκτης Κυκλοφορίας	Μεταβολή σε σύγκριση με το Βασικό Σενάριο
Μέση ταχύτητα οχημάτων στο δίκτυο	Μείωση 34,1%
Μέσος χρόνος διαδρομής	Αύξηση 52,1%
Μέσος χρόνος αναμονής ανά όχημα	Αύξηση 31,7%
Μέσος όρος στάσεων ανά όχημα (λόγω εμποδίων)	Αύξηση 16,1%

Πίνακας 4.7: Μεταβολή των κύριων Κυκλοφοριακών δεικτών σε σχέση με το Βασικό Σενάριο

Η Εικόνα 4.42 αντικατοπτρίζει με γράφημα τη χρονική διακύμανση του μέσου χρόνου αναμονής των οχημάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας, αναδεικνύοντας τις επιπτώσεις που μπορεί να επιφέρει το μέτρο στην αποδοτικότητα των καθημερινών μετακινήσεων. Στην περίπτωση αυτή, οι μέσοι χρόνοι κατά τους οποίους ένα όχημα βρίσκεται σε ακινησία (idling times) είναι σταθερά

υψηλότεροι σε σχέση με το βασικό σενάριο, καταγράφοντας μεγαλύτερες διακυμάνσεις τα διαστήματα με που υπάρχει πιο έντονη κυκλοφοριακή δραστηριότητα.



Εικόνα 4.30: Σύγκριση Μέσου Χρόνου Αναμονής σε σχέση με το Βασικό Σενάριο

4.5 2^ο Σενάριο

4.5.1 Τροποποιήσεις στα Εισαγόμενα Δεδομένα

Το υπό μελέτη σενάριο διερευνά την επίδραση της συμπεριφοράς οικολογικής οδήγησης (eco-driving), διατηρώντας σταθερή τη δομή τόσο του οδικού δικτύου, όσο και της κατανομής των οχημάτων, όπως αυτά παρουσιάζονται στο βασικό σενάριο (Ενότητα 4.3). Ωστόσο, σε αντίθεση με αυτό, όπου η συμπεριφορά των οδηγών χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη μεταβλητότητα και επιθετικότητα κατά την κίνηση, σε αυτή την περίπτωση, οι οδηγοί υιοθετούν έναν πιο συντηρητικό τρόπο οδήγησης, ακολουθώντας τις αρχές της οικολογικής οδήγησης, όπως παρουσιάζονται στην Ενότητα 2.5. Έτσι, οι παρεμβάσεις επικεντρώνονται αποκλειστικά στην αλλαγή της οδηγικής συμπεριφοράς, επιδιώκοντας ηπιότερες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις, αλλά και μεγαλύτερη σταθερότητα στην ταχύτητα των οχημάτων κατά την διάρκεια του ταξιδιού τους. Επιπλέον, τα οχήματα διατηρούν μεγαλύτερες αποστάσεις ασφαλείας (**desired Gap Factor**) και οι οδηγοί των οχημάτων διακρίνονται επιδεικνύουν πιο υπομονετική και συνετή στάση, απέναντι στις μεταβαλλόμενες κυκλοφοριακές συνθήκες, αποφεύγοντας απότομες αντιδράσεις (**impatience**). Οι νέες τιμές για την επιτάχυνση και επιβράδυνση παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8, οι οποίες αντλήθηκαν από τη διπλωματική εργασία του Αδαμίδη, στην οποία παρουσιάζεται η επίδραση διαφορετικών οδηγικών προφίλ, με τη χρήση του λογισμικού SUMO [Αδαμίδης, 2017]. Οι τιμές του βασικού σεναρίου αντιστοιχούν στις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις του λογισμικού.

Παράμετρος	Βασικό Σενάριο	2 ^ο Σενάριο
Μέγιστη Επιτάχυνση (m/s ²)	2,60	1,79
Μέγιστη Επιβράδυνση (m/s ²)	4,50	2,42

Πίνακας 4.8: Τιμές Μέγιστης Επιτάχυνσης και Επιβράδυνσης για το Βασικό και 2^ο Σενάριο

4.5.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Αποτελέσματα Εκπομπών

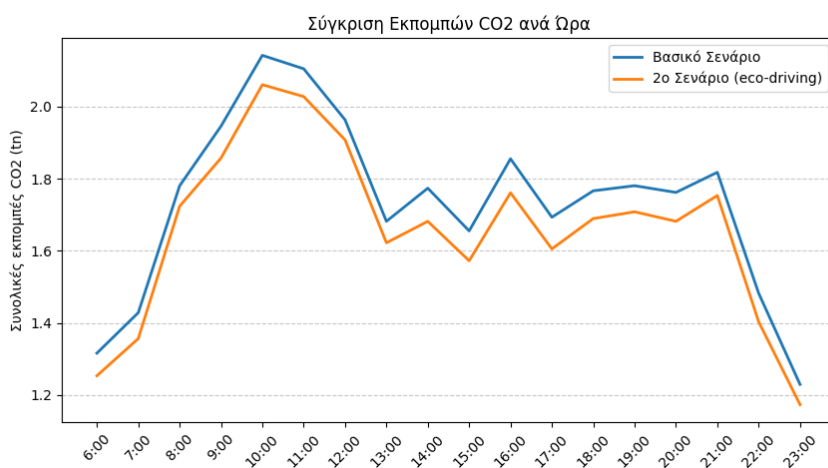
Στον Πίνακα 4.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του 2^{ου} σεναρίου, σχετικά με τις συνολικές εκπομπές ρύπων καθ'όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Παράλληλα, εμφανίζονται και τα αντίστοιχα στοιχεία του Βασικού Σεναρίου, αλλά και η μεταξύ τους σύγκριση ως προς το ποσοστό μεταβολής των εκπομπών, προκειμένου να αποτιμηθεί η επίδραση της παρέμβασης.

Ρύπος	Βασικό (kg)	2 ^ο Σενάριο (kg)	Βασικό (tn)	2 ^ο Σενάριο (tn)	Ποσοστό Μείωσης (%)
CO ₂	31.199,791	29.859,695	31,200	29,865	4,30
CO	284,395	207,993	0,284	0,208	26,86
HC	8,522	8,193	0,009	0,008	3,86
PM _x	3,876	3,753	0,0039	0,0038	3,16
NO _x	26,277	24,739	0,026	0,0247	5,85

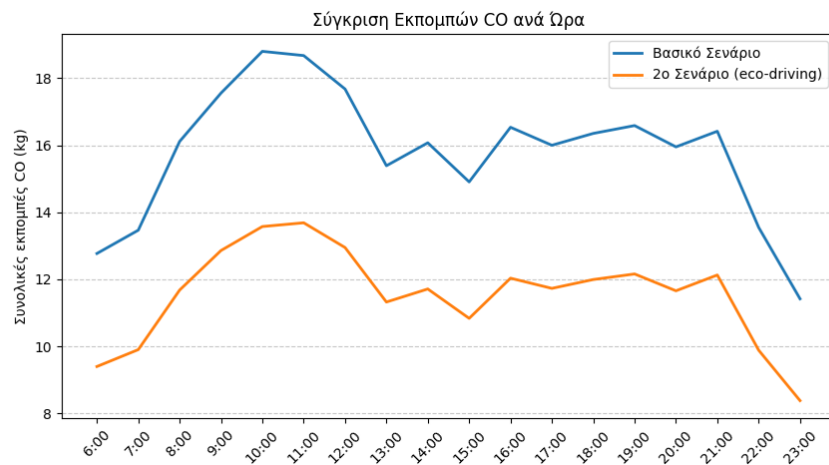
Πίνακας 4.9: Σύγκριση Συνολικών Εκπομπών ανά Ρύπο μεταξύ Βασικού και 2^{ου} σεναρίου

Ο Πίνακας 4.9 επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα αυτού του τρόπου οδηγικής συμπεριφοράς, καθώς υπάρχει θετική επίδραση στην μείωση των συνολικών εκπομπών του δικτύου, για κάθε ρύπο. Η επίδραση αυτή είναι πιο έντονη στις εκπομπές CO, ενώ για τους υπόλοιπους ρύπους μπορεί να μην είναι εξίσου θεαματική, ωστόσο παραμένει σημαντική.

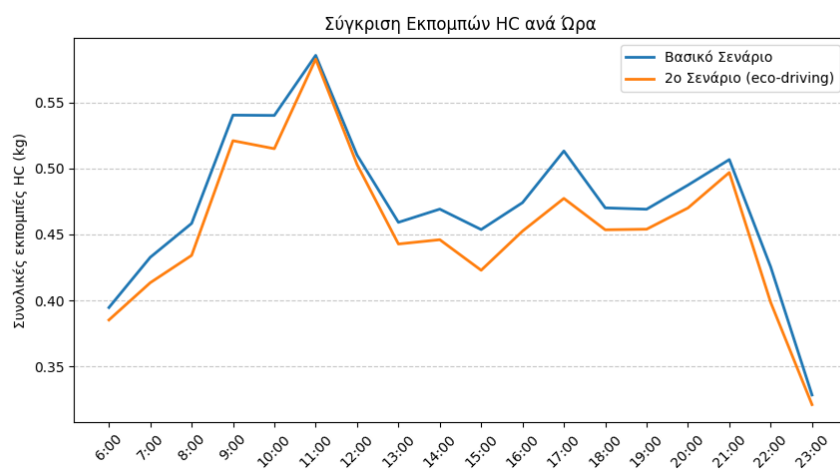
Για την καλύτερη αποτύπωση των αποτελεσμάτων, παρουσιάζεται η σύγκριση των εκπομπών ανά ρύπο, με το βασικό σενάριο, κατά τη διάρκεια της ημέρας, ώστε να αποτυπωθεί η επίδοση αυτής, σε περιόδους κυκλοφοριακής αιχμής, αλλά και σε συνθήκες χαμηλής κυκλοφορίας.



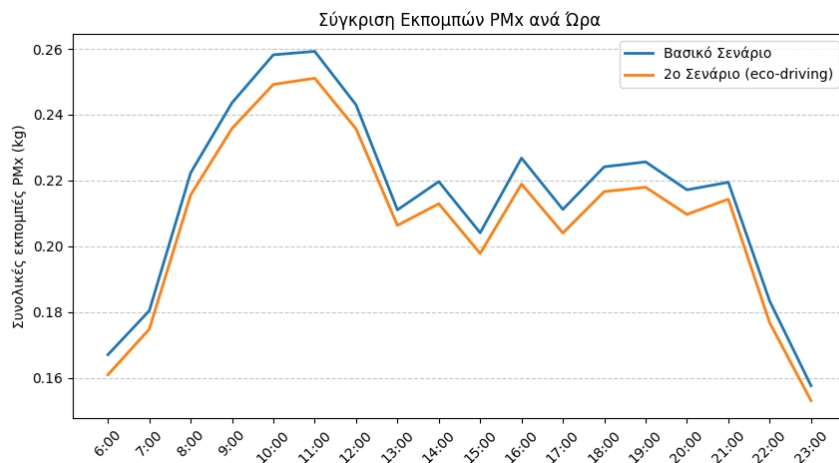
Εικόνα 4.31: Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών CO₂ σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)



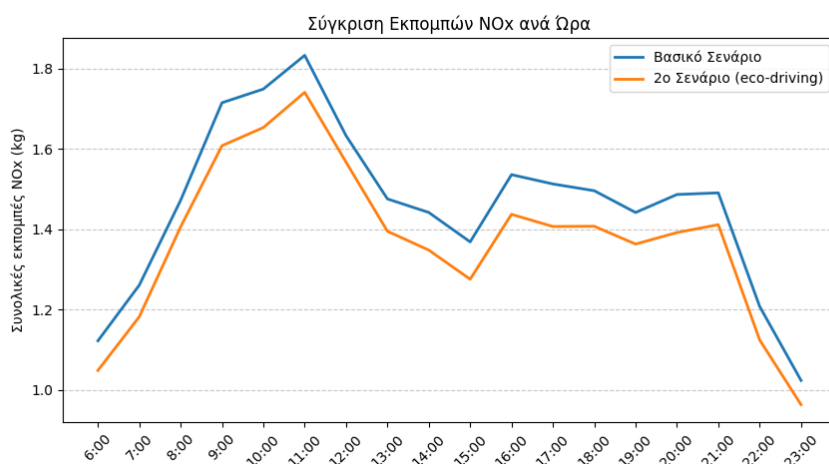
Εικόνα 4.32: Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών CO σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)



Εικόνα 4.33: Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών HC σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)



Εικόνα 4.34: Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών PMx σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)

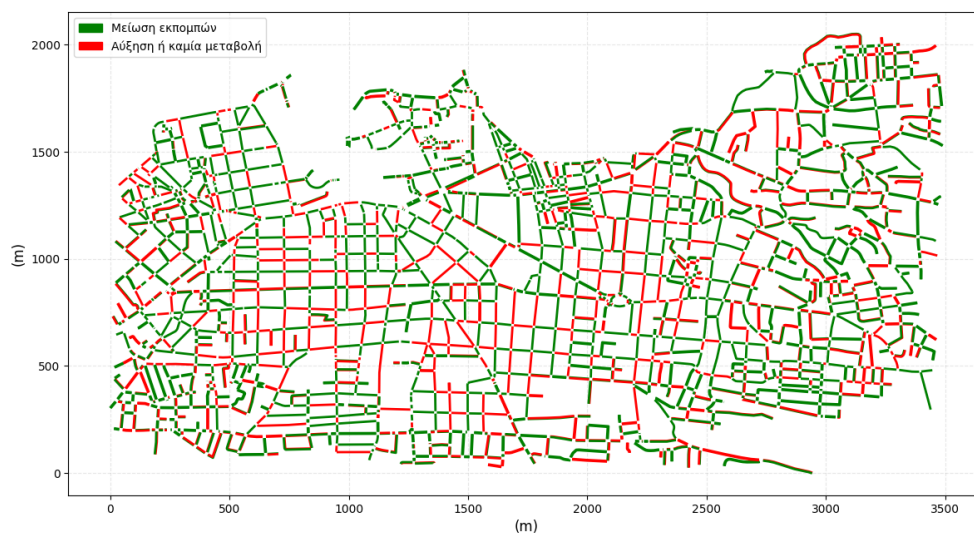


Εικόνα 4.35: Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών NOx σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)

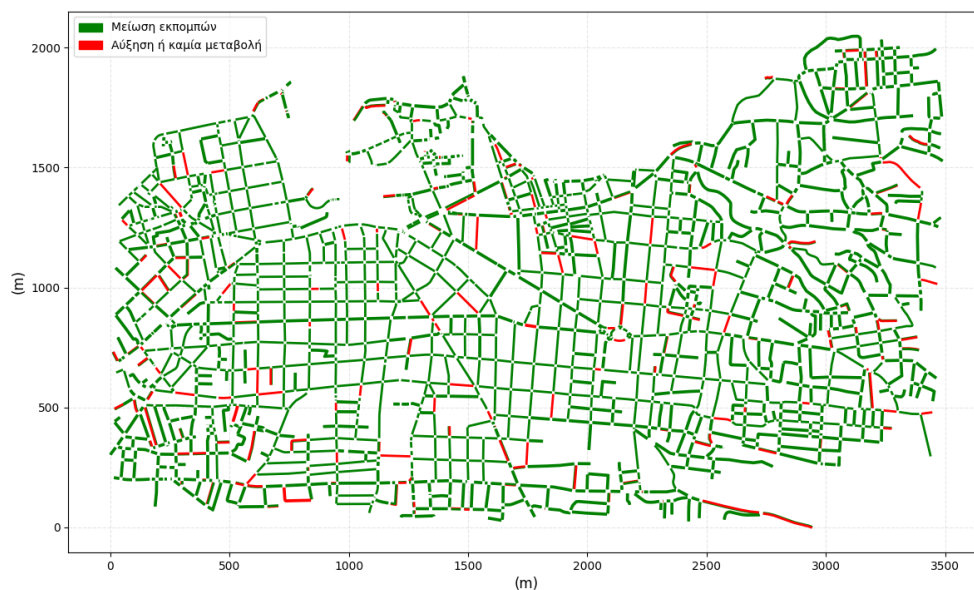
Από την ανάλυση των παρακάτω διαγραμμάτων, φαίνεται ότι υπάρχει σταθερή μείωση των συνολικών εκπομπών κάθε ρύπου, σε όλο το βάθος χρόνου της προσομοίωσης. Μέσω της εφαρμογής του eco-driving, διακρίνεται η επίδραση που έχει η οδηγική συμπεριφορά στο περιβάλλον, ειδικότερα τις ώρες αιχμής, όπου οι συνολικές εκπομπές των οχημάτων είναι χαμηλότερες. Αξιοσημείωτη είναι η θετική επίδραση του μέτρου για τις εκπομπές CO, οι οποίες είναι εμφανής καθ'όλη τη διάρκεια της ημέρας. Το γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με τις εκπομπές HC, οι οποίες παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες αιχμής.

Όπως και στο προηγούμενο σενάριο, δημιουργήθηκαν χάρτες, για την απεικόνιση της θετικής ή αρνητικής επίδρασης της ήπιας οδηγικής συμπεριφοράς σε κάθε οδικό τμήμα του δικτύου. Κατά τον ίδιο τρόπο, οι δρόμοι με μείωση εκπομπών αποδίδονται με πράσινο χρώμα, ενώ εκείνοι με

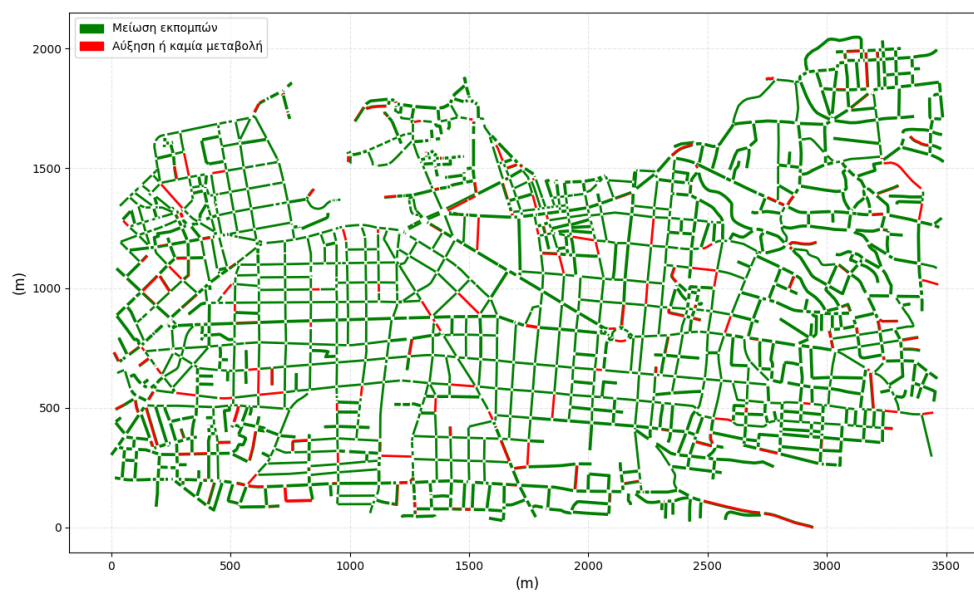
αύξηση ή μηδενική μεταβολή με κόκκινο.



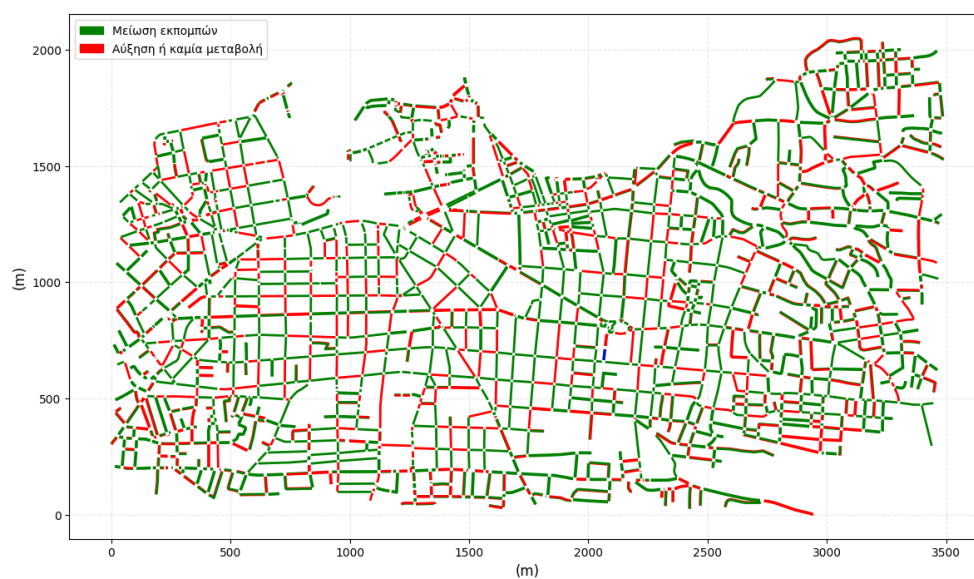
Εικόνα 4.36: Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών CO₂ με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)



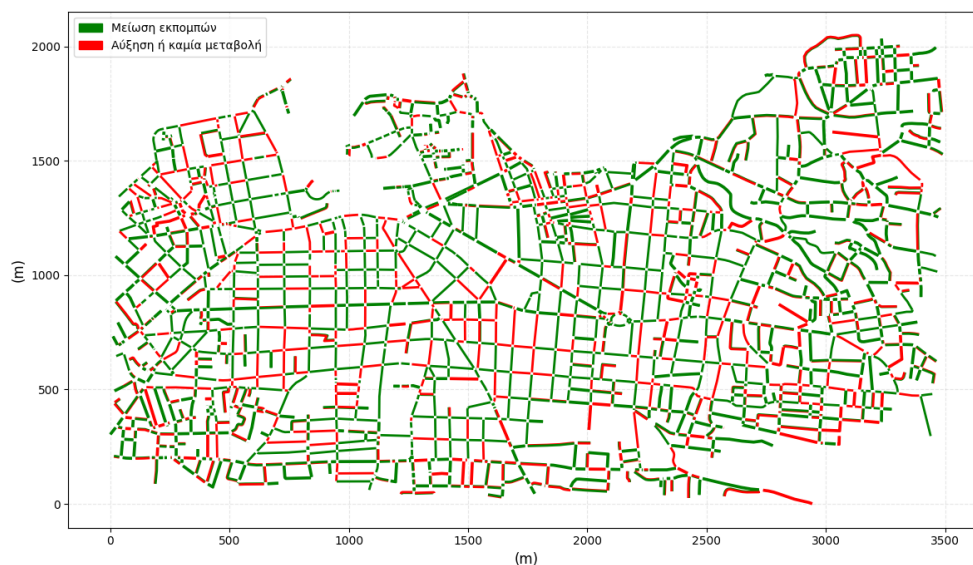
Εικόνα 4.37: Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών CO με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)



Εικόνα 4.38: Σύγκριση Χωρικής της Κατανομής των Εκπομπών HC με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)



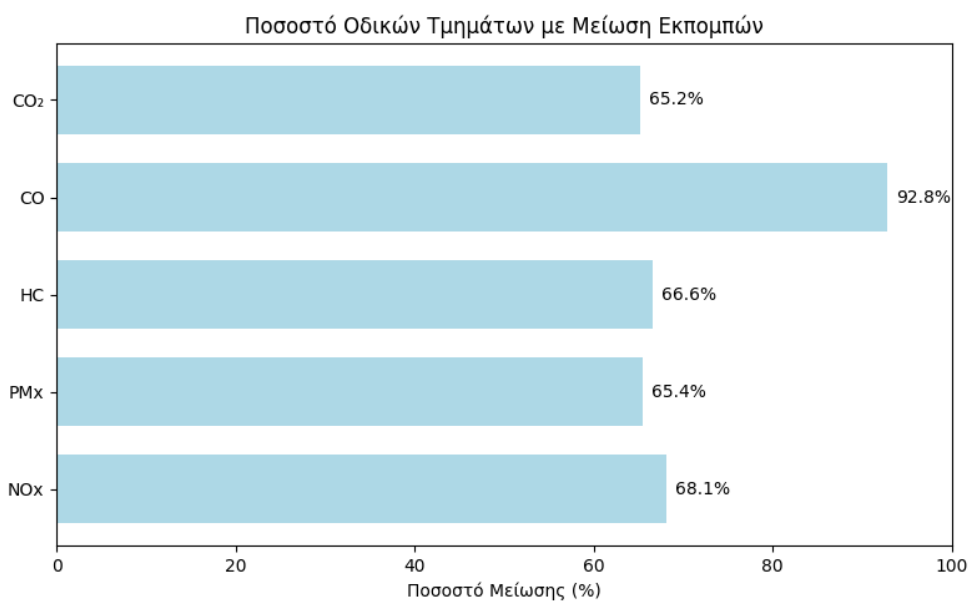
Εικόνα 4.39: Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών PMx με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)



Εικόνα 4.40: Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών NO_x με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)

Σε ευρύτερη κλίμακα, διαπιστώνεται ότι, με την υιοθέτηση του eco-driving, υπάρχει περιβαλλοντική πρόοδος, όσον αφορά τη συσχέτιση των εκπομπών με το βασικό σενάριο, σε κάθε οδικό τμήμα του χάρτη, ενώ πιο αισθητή φαίνεται να είναι η πρόοδος στις εκπομπές CO. Εν αντιθέση, η επίδραση στις εκπομπές PM_x και NO_x, ανά δρόμο είναι αμφίσημη, διότι οι μεταβολές δεν παρουσιάζουν εννιαία τάση.

Έτσι, για την πληρέστερη κατανόηση της συνολικής επίδρασης και των υπόλοιπων ρύπων, ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας με τα ποσοστά των οδικών τμημάτων που σημείωσαν μείωση εκπομπών ανά ρύπο.



Εικόνα 4.41: Ποσοστό των Συνολικών Οδικών Τμημάτων που σημείωσαν Μείωση Εκπομπών ανά Ρύπο

Σύμφωνα με την Εικόνα 4.41, παρότι η ένταση της επίδρασης διαφέρει ανά ρύπο, διαπιστώνεται περιβαλλοντικό όφελος σε σημαντικό μέρος του δικτύου, γεγονός που ενισχύει την άποψη ότι η υπό μελέτη οδηγική συμπεριφορά που εξετάζεται, μπορεί πράγματι να χαρακτηριστεί ως «οικολογική».

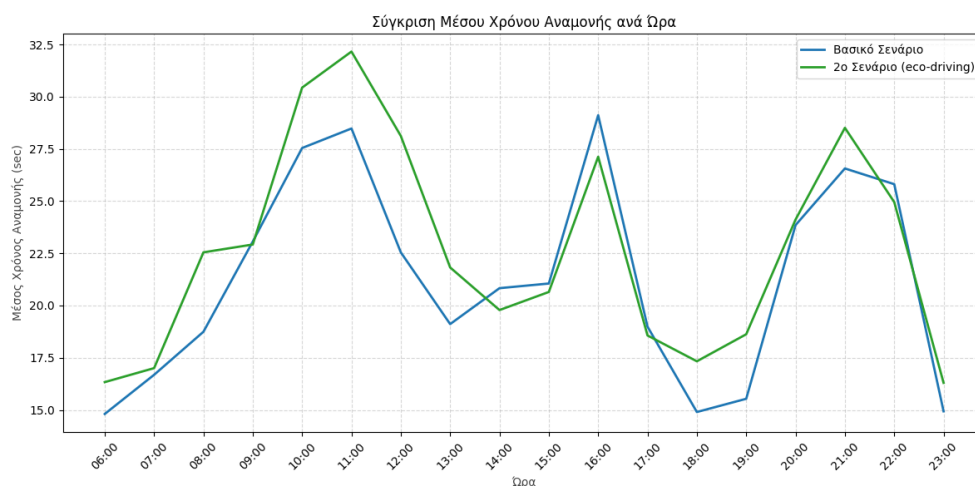
Συγκριτική Ανάλυση Δεικτών Απόδοσης

Στον Πίνακα 4.10 παρατίθενται τα συγκριτικά αποτελέσματα των κυριότερων δεικτών σε σχέση με το βασικό σενάριο, αναδεικνύοντας τη συσχέτιση της οδηγικής συμπεριφοράς με τη δυναμική της κυκλοφορίας και την αύξηση του χρόνου μετακίνησης των οχημάτων.

Δείκτης Κυκλοφορίας	Μεταβολή σε σύγκριση με το Βασικό Σενάριο
Μέση ταχύτητα οχημάτων στο δίκτυο	Μείωση 12,7%
Μέσος χρόνος διαδρομής	Αύξηση 14,6%
Μέσος χρόνος αναμονής ανά όχημα	Αύξηση 7,9%
Μέσος όρος στάσεων ανά όχημα (λόγω εμποδίων)	Αύξηση 1,6%

Πίνακας 4.10: Μεταβολή των κύριων Κυκλοφοριακών δεικτών σε σχέση με το Βασικό Σενάριο

Στην Εικόνα 4.42 αποτυπώνεται με γράφημα τη χρονική διακύμανση του μέσου χρόνου αναμονής των οχημάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η διαφοροποίηση είναι πιο έντονη στις ώρες με αυξημένο κυκλοφοριακό φόρτο, όπου πιθανώς η μείωση της ταχύτητας και η αποφυγή επιθετικής οδήγησης να εντείνουν τη συσσώρευση οχημάτων σε σημεία συμφόρησης.



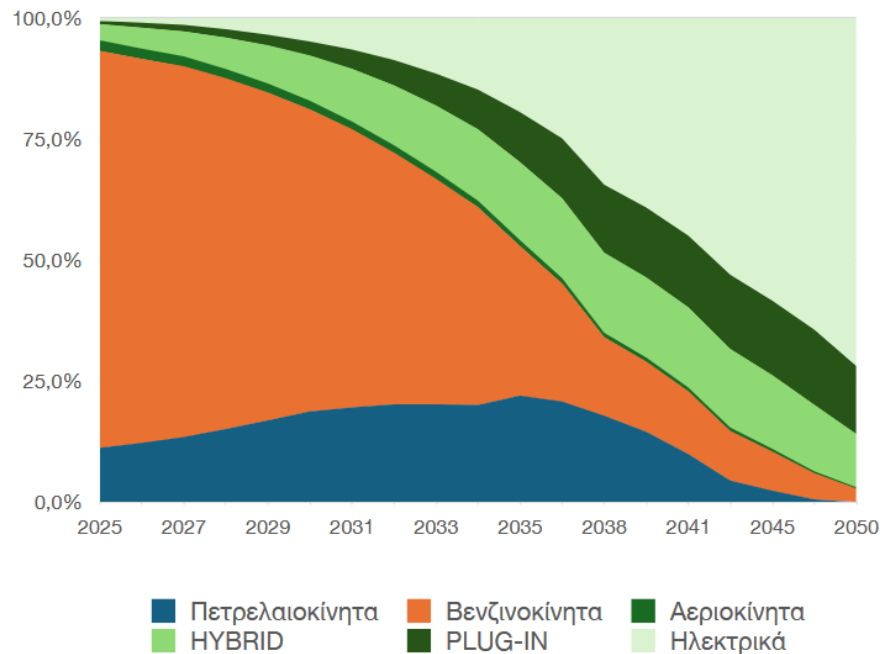
Εικόνα 4.42: Σύγκριση Μέσου Χρόνου Αναμονής σε σχέση με το Βασικό Σενάριο

4.6 3^ο Σενάριο

4.6.1 Τροποποιήσεις στα Εισαγόμενα Δεδομένα

Στα πλαίσια αυτού του σεναρίου, στόχος είναι η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών ωφελειών που προκύπτουν από την προώθηση και ενσωμάτωση ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων στον

συνολικό στόλο των κατοίκων της περιοχής, κατά την φάση λειτουργίας τους. Η κατανομή του στόλου, βασίστηκε σε προβλέψεις που περιλαμβάνονται στο «Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ)», από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (Εικόνα 4.43) [Ενέργειας, 2019], οι οποίες αντιστοιχούν στο έτος 2030. Η μεθοδολογία κατανομής υπήρξε προσεγγιστική, λαμβάνοντας υπόψη τις τάσεις που επικρατούν, ώστε να αποδοθεί μια αντιπροσωπευτική εικόνα της μελλοντικής εξέλιξης του στόλου και να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις των εναλλακτικών τεχνολογιών κίνησης. Ο Πίνακας 4.11 εμπεριέχει την κατανομή του στόλου για το έτος 2030, όπως αυτή προέκυψε από την προσεγγιστική μέθοδο που εφαρμόστηκε.



Εικόνα 4.43: Εξέλιξη Στόλου Επιβατικών Οχημάτων ανά Τύπο Καυσίμου (ως % επί συνόλου) [Ενέργειας, 2019]

Κατηγορία Καυσίμου	Ποσοστό %
Gasoline	50
Diesel	20
BEV (Battery Electric Vehicle)	10
HEV (Hybrid Electric Vehicle)	19,9
CNG (Compressed Natural Gas)	0,05
LPG (Liquefied Petroleum Gas)	0,05
Σύνολο	100

Πίνακας 4.11: Κατανομή οχημάτων ανά κατηγορία καυσίμου για έτος 2030

Για την αποτύπωση της κατανομής των οχημάτων ανά κατηγορία εκπομπών Euro, για τα βενζινοκίνητα και πετρελαιοκίνητα οχήματα, αξιοποιήθηκαν, όπως και στο βασικό σενάριο, τα δεδομένα που παρουσιάζονται στην έρευνα των Spyropoulos et al. (2023) (Εικόνα 4.4 και Εικόνα 4.5) [Spyropoulos et al. 2023]. Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιτρέπει την κατανόηση των τάσεων εξέλιξης του στόλου στην Ελλάδα, αντικατοπτρίζοντας τη μετατόπιση προς νεότερες και πιο

σύγχρονες τεχνολογίες των οχημάτων, που στοχεύουν στον περιορισμό των εκπομπών αέριων ρύπων, αλλά και στη σταδιακή απόσυρση οχημάτων «μεγάλης ηλικίας». Η ποσοστιαία κατανομή των επιβατικών οχημάτων ανά πρότυπο εκπομπών (Euro) για το έτος 2030 παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες.

Κατηγορία Euro	Ποσοστό %
Euro 1	5
Euro 2	25
Euro 3	40
Euro 4	10
Euro 5	5
Euro 6	15
Σύνολο	100

Πίνακας 4.12: Κατανομή βενζινοκίνητων οχημάτων ανά κατηγορία εκπομπών Euro για το έτος 2030

Κατηγορία Euro	Ποσοστό %
Euro 1	1
Euro 2	3
Euro 3	8
Euro 4	13
Euro 5	20
Euro 6	55
Σύνολο	100

Πίνακας 4.13: Κατανομή πετρελαιοκίνητων οχημάτων ανά κατηγορία εκπομπών Euro για το έτος 2030

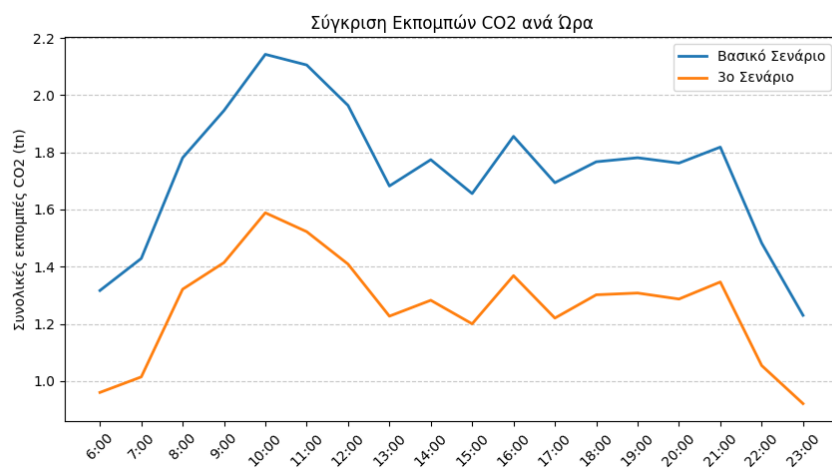
4.6.2 Αποτελέσματα Εκπομπών

Στον Πίνακα 4.14 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του 3^{ου} σεναρίου, σχετικά με τις συνολικές εκπομπές ρύπων καθ'όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Οι διαφορές σε σύγκριση με το βασικό σενάριο, υποδεικνύουν ότι η αντικατάσταση των παλαιών βενζινοκίνητων και πετρελαιοκίνητων οχημάτων με πιο σύγχρονα έχει καταλυτικό ρόλο στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανση και ιδιαίτερα στους αέριους ρύπους που παράγονται κατά την ατελή καύση στον κινητήρα.

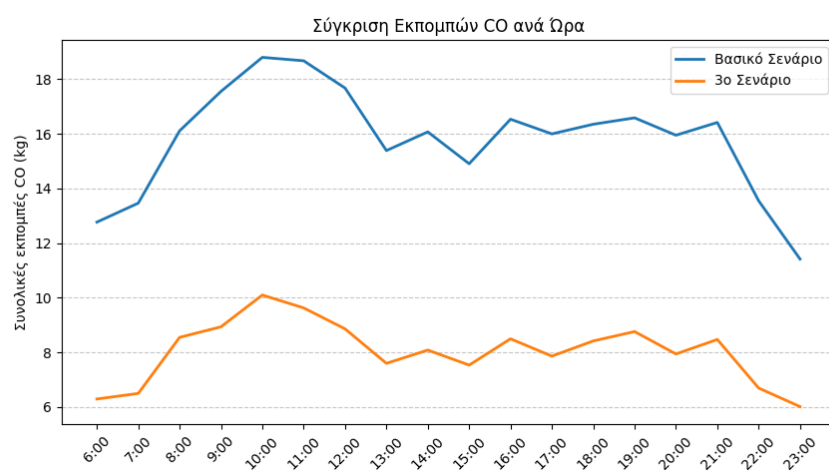
Ρύπος	Βασικό (kg)	3 ^ο Σενάριο (kg)	Βασικό (tn)	3 ^ο Σενάριο (tn)	Ποσοστό Μείωσης (%)
CO ₂	31.199,791	22.755,49	31,200	22,755	27,07
CO	284,395	144,845	0,284	0,145	49,07
HC	8,522	2,981	0,009	0,003	64,98
PM _x	3,876	2,981	0,0039	0,003	23,01
NO _x	26,28	20,903	0,026	0,020	20,45

Πίνακας 4.14: Σύγκριση Συνολικών Εκπομπών ανά Ρύπο μεταξύ Βασικού και 3^{ου} σεναρίου

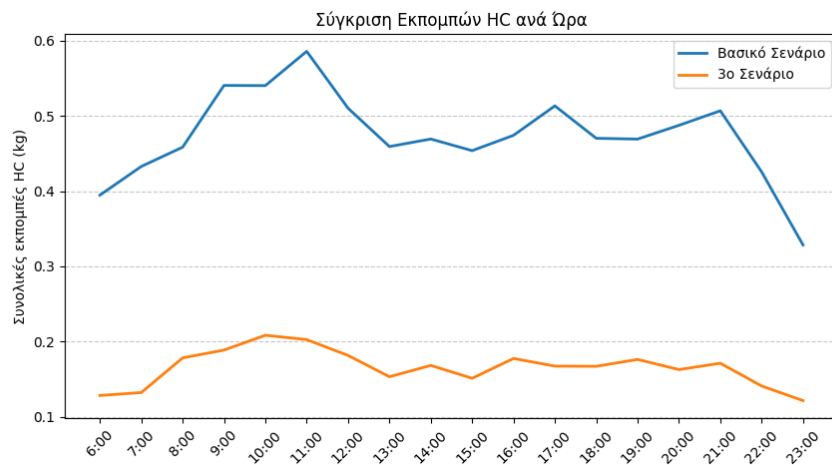
Παρακάτω, ακολουθεί η σύγκριση των εκπομπών ανά ρύπο με το βασικό σενάριο καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, για την αξιολόγηση της απόδοσης του σεναρίου τόσο κατά τις ώρες κυκλοφοριακής αιχμής όσο και σε περιόδους μειωμένης κυκλοφορίας.



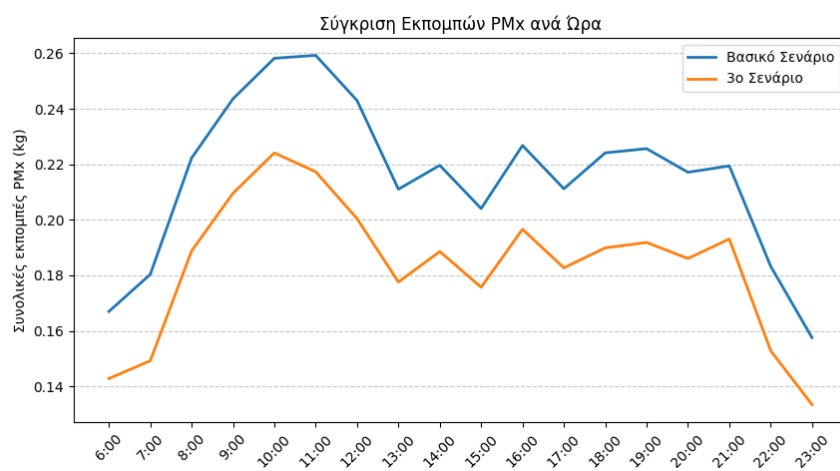
Εικόνα 4.44: Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών CO₂ σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)



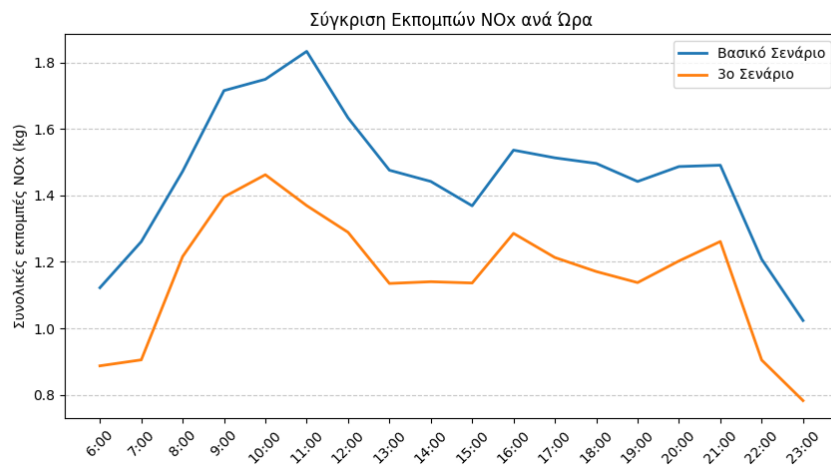
Εικόνα 4.45: Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών CO σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)



Εικόνα 4.46: Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών HC σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)



Εικόνα 4.47: Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών PMx σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)



Εικόνα 4.48: Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών NOx σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)

Από την παρατήρηση των διαγραμμάτων, είναι εμφανής η επιρροή των οχημάτων που δεν εκπέμπουν ρύπους, αλλά και των πιο αποδοτικών οχημάτων εσωτερικής καύσης, σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Η συνέπεια που παρουσιάζεται ως προς τη μορφή των γραφημάτων αποδίδεται κυρίως στην παρουσία των νεότερων, πιο αποδοτικών οχημάτων, που διανέμονται ομοιόμορφα στο στόλο καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Η ανανέωση του στόλου με πιο σύγχρονα οχήματα οδηγεί σε σταθερή και σημαντική βελτίωση των εκπομπών, ανεξάρτητα από την ώρα ή το φορτίο της κυκλοφορίας.

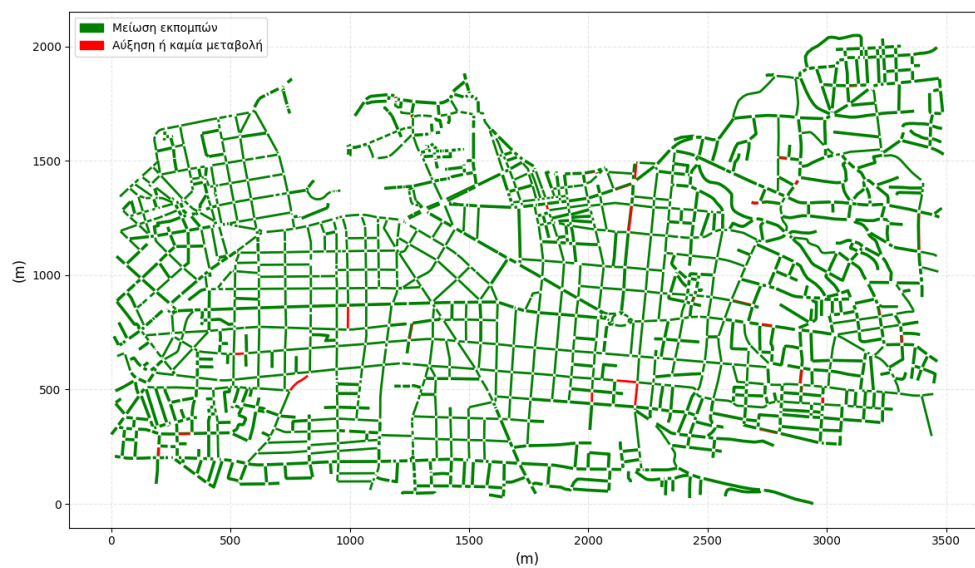
Όπως και στα προηγούμενα σενάρια, δημιουργήθηκαν χάρτες, για την απεικόνιση της απόδοσης της αλλαγής στόλου οχημάτων, σε κάθε οδικό τμήμα του δικτύου. Η διαφορά σε αυτή την περίπτωση είναι πως η βελτίωση που προκύπτει είναι ξεκάθαρη και σημειώνεται μείωση των εκπομπών ρύπων σχεδόν σε κάθε τμήμα του οδικού δικτύου της υπό μελέτη περιοχής.



Εικόνα 4.49: Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών CO₂ με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)



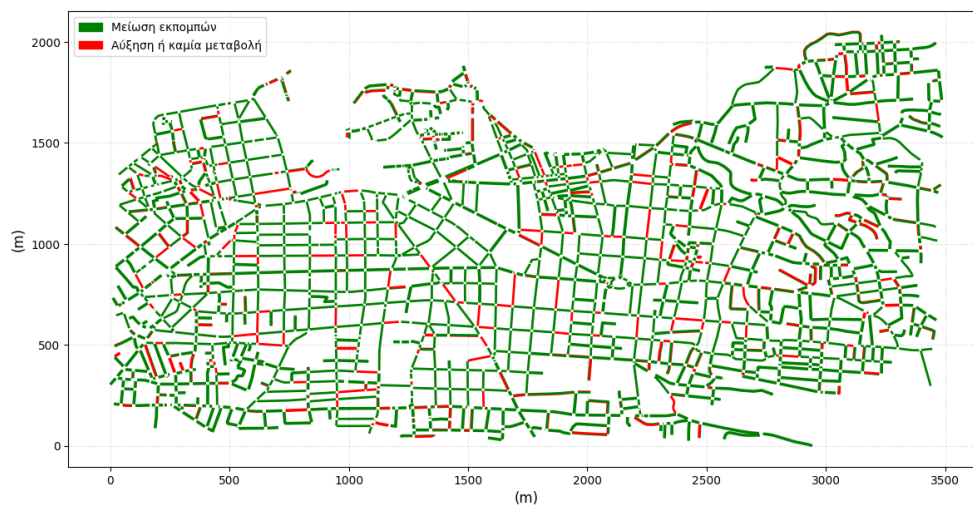
Εικόνα 4.50: Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών CO με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)



Εικόνα 4.51: Σύγκριση Χωρικής της Κατανομής των Εκπομπών HC με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)



Εικόνα 4.52: Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών PMx με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)



Εικόνα 4.53: Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών NOx με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)

Όσον αφορά, στοιχεία όπως οι χρόνοι ταξιδιού, η μέση ταχύτητα ή οι χρόνοι καθυστέρησης, αυτά παραμένουν ίδια με το βασικό σενάριο, καθώς οι αλλαγές ήταν εστιασμένες στην κατηγορία καυσίμου, με αποτέλεσμα οι υπόλοιποι παράμετροι να μην επηρεάζονται από αυτές τις αλλαγές.

4.7 4^ο Σενάριο

4.7.1 Τροποποιήσεις στα Εισαγόμενα Δεδομένα

Στο παρόν σενάριο, η ανάλυση σχετικά με την την υπόθεση της σημαντικής διεύρυνσης τεχνολογιών μηδενικών ή πολύ χαμηλών εκπομπών, όπως αυτή παρατίθεται στην Εικόνα 4.43, παρατείνεται χρονικά έως το έτος 2050. Οι παραδοχές που υιοθετήθηκαν επιτρέπουν την αποτύπωση ενός σεναρίου σχεδόν πλήρους ανανέωσης του στόλου, διατηρώντας τη μεθοδολογική συνοχή με τα προηγούμενα σενάρια. Σύμφωνα λοιπόν με τα δεδομένα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.43, τα πετρελαιοκίνητα οχήματα έχουν εκλείψει πλήρως από τον συνολικό στόλο, ενώ τα οχήματα που χρησιμοποιούν αέρια καύσιμα, παρότι διατηρούσαν μια μικρή παρουσία για τα προηγούμενα έτη, αυτή μειώνεται ακόμα περισσότερο, καταλαμβάνοντας πλέον ένα αμελητέο ποσοστό στον συνολικό στόλο της χώρας. Συνεπώς, τα κυκλοφορούντα οχήματα χαρακτηρίζονται από κυριαρχία των ηλεκτρικών και υβριδικών τεχνολογιών, οι οποίες αποτελούν τη βάση του στόλου, επιβεβαιώνοντας την πλήρη μετάβαση προς καθαρότερες μορφές μετακίνησης. Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο μέσος όρος ηλικίας ενός οχήματος ανέρχεται περίπου στα 15 έτη [Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2023], θεωρήθηκε πως για το έτος 2050, ο συνολικός στόλος οχημάτων εσωτερικής καύσης θα αποτελείται αποκλειστικά από οχήματα που ενσωματώνουν την πιο σύγχρονη διαθέσιμη τεχνολογία καυσίμου, η οποία στην παρούσα φάση είναι οχήματα κατηγορίας εκπομπών Euro 6. Η υπόθεση αυτή ενισχύεται από την αναμενόμενη σταδιακή απόσυρση παλαιότερων οχημάτων και την αυστηροποίηση των περιβαλλοντικών προδιαγραφών. Τα δεδομένα για την κατανομή των οχημάτων ανά κατηγορία καυσίμου για αυτό το σενάριο βρίσκονται συγκεντρωμένα στον Πίνακα 4.15.

Κατηγορία Καυσίμου	Ποσοστό %
Gasoline	4,98
Diesel	-
BEV (Battery Electric Vehicle)	70
HEV (Hybrid Electric Vehicle)	25
CNG (Compressed Natural Gas)	0,01
LPG (Liquefied Petroleum Gas)	0,01
Σύνολο	100

Πίνακας 4.15: Κατανομή οχημάτων ανά κατηγορία καυσίμου για έτος 2050

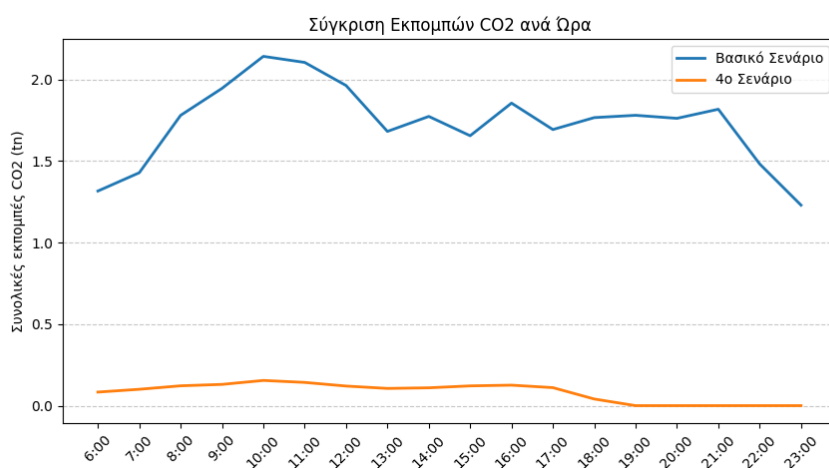
4.7.2 Αποτελέσματα Εκπομπών

Στον Πίνακα 4.16 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του 4^{ου} σεναρίου, σχετικά με τις συνολικές εκπομπές ρύπων καθ'όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι θεαματικά, καθώς το μεγαλύτερο μέρος του στόλου των οχημάτων έχει αντικατασταθεί με οχήματα μηδενικών ρύπων.

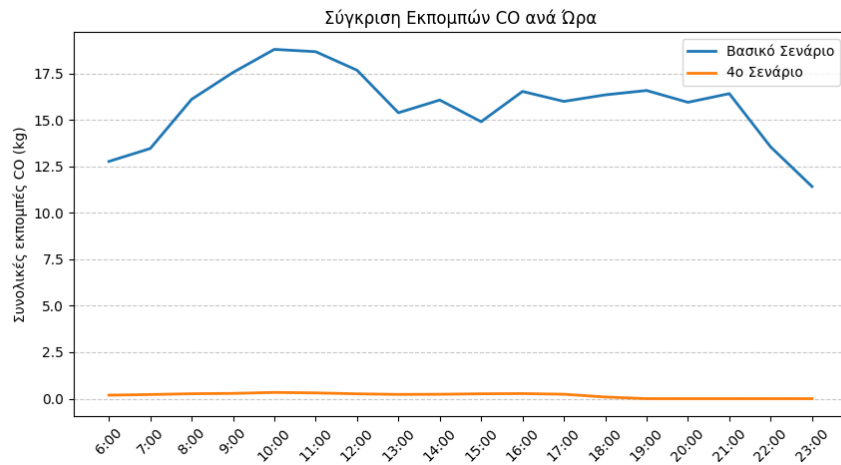
Ρύπος	Βασικό (kg)	4 ^ο Σενάριο (kg)	Βασικό (tn)	4 ^ο Σενάριο (tn)	Ποσοστό Μείωσης (%)
CO ₂	31.199,791	1.465,489	31,200	1,465	95,30
CO	284,395	3,174	0,284	0,003	98,88
HC	8,522	0,046	0,009	0,00005	99,46
PM _x	3,876	0,804	0,004	0,0008	79,26
NO _x	26,28	0,236	0,0002	0,026	99,10

Πίνακας 4.16: Σύγκριση Συνολικών Εκπομπών ανά Ρύπο μεταξύ Βασικού και 4^{ου} σεναρίου

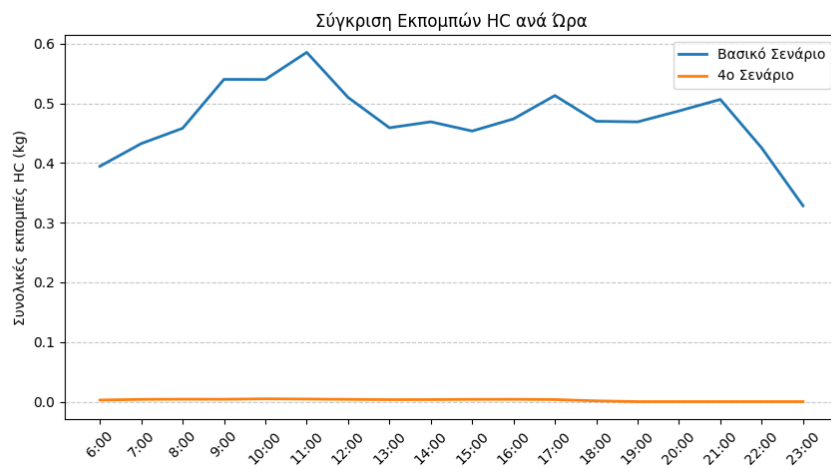
Στη συνέχεια, ακολουθεί η σύγκριση των εκπομπών ανά ρύπο με το βασικό σενάριο καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, όπου η σχεδόν επίπεδη κατανομή της καμπύλης για όλους τους ρύπους που μελετώνται, αντανακλά πλήρως την απουσία οχημάτων με κινητήρες εσωτερικής καύσης, αποτυπώνοντας την αποτελεσματικότητα της ηλεκτρικίνησης στην προσπάθεια μείωσης των εκπομπών αέριων ρύπων.



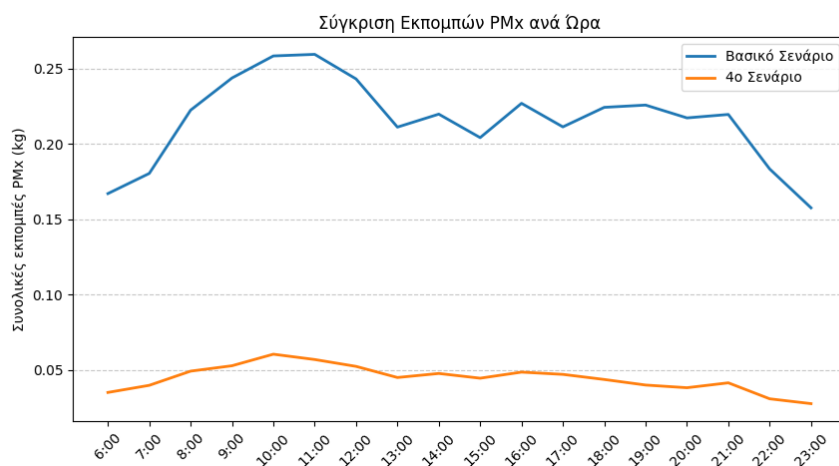
Εικόνα 4.54: Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών CO₂ σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)



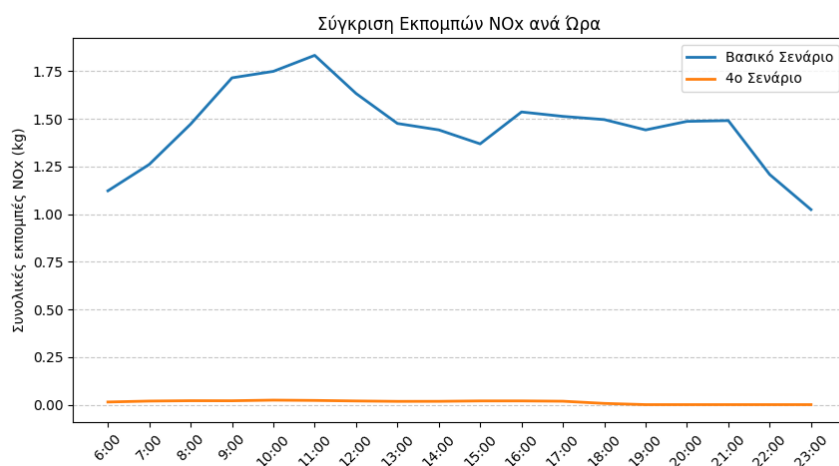
Εικόνα 4.55: Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών CO σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)



Εικόνα 4.56: Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών HC σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)

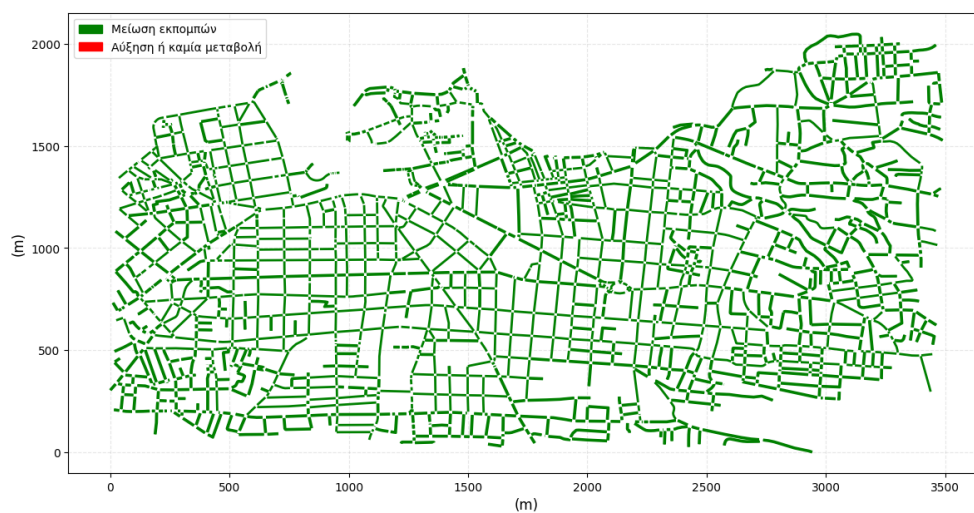


Εικόνα 4.57: Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών PMx σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)

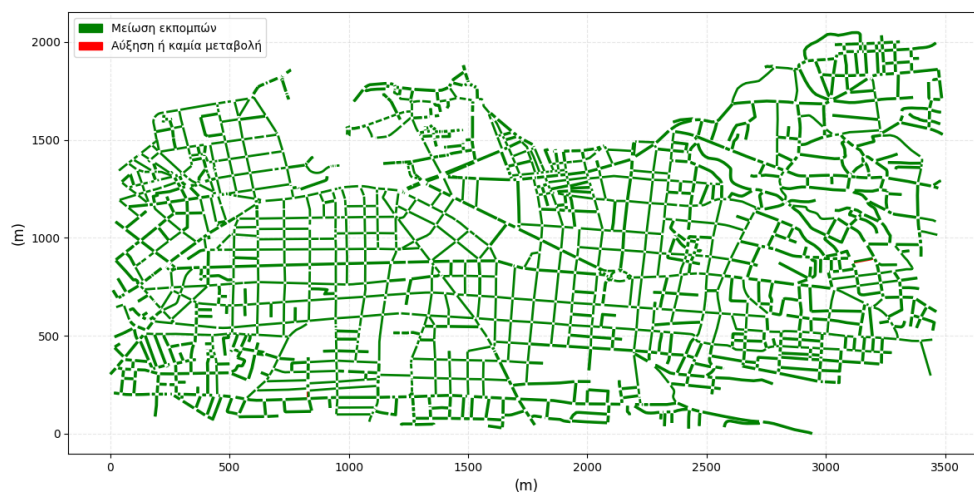


Εικόνα 4.58: Σύγκριση Εξέλιξης Εκπομπών NOx σε σχέση με το Βασικό Σενάριο (06:00–23:00)

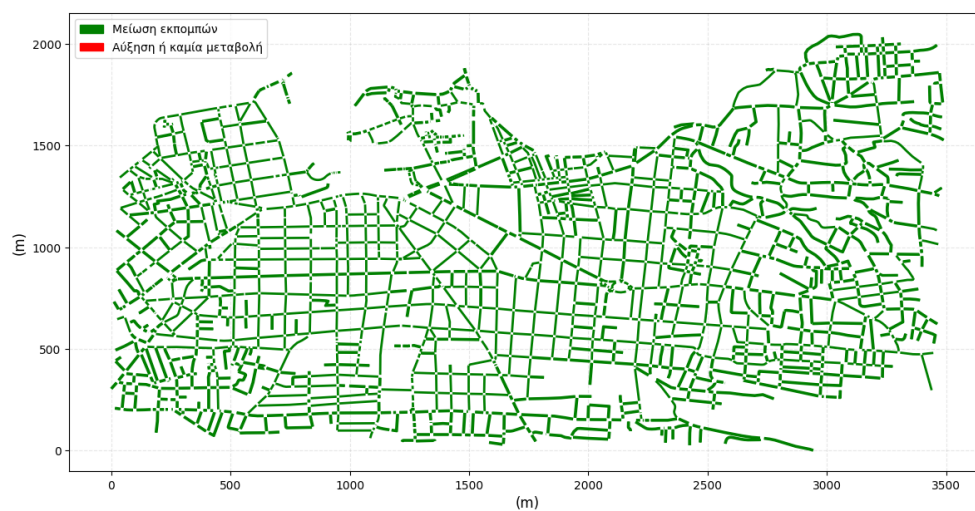
Τέλος, η παρακάτω χαρτογραφική αποτύπωση, ενισχύει τα θετικά αποτελέσματα, αφού η βελτίωση είναι συνολική και εξαπλώνεται ομοιόμορφα σε όλο οδικό δίκτυο. Συνεπώς, η υιοθέτηση καθαρών τεχνολογιών μετακίνησης οδηγεί σε δραστική περιβαλλοντική αναβάθμιση, συμπεραίνοντας ότι το περιβαλλοντικό όφελος είναι συστηματικό και όχι τοπικό.



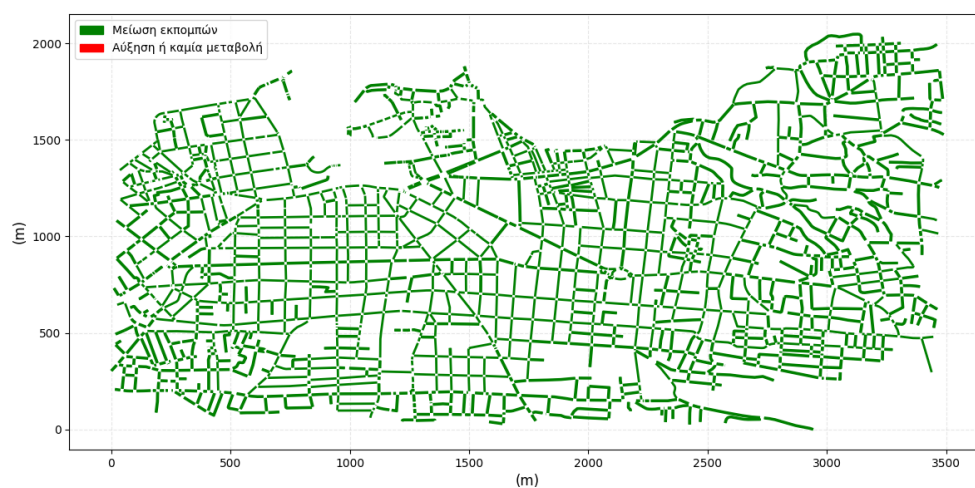
Εικόνα 4.59: Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών CO₂ με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)



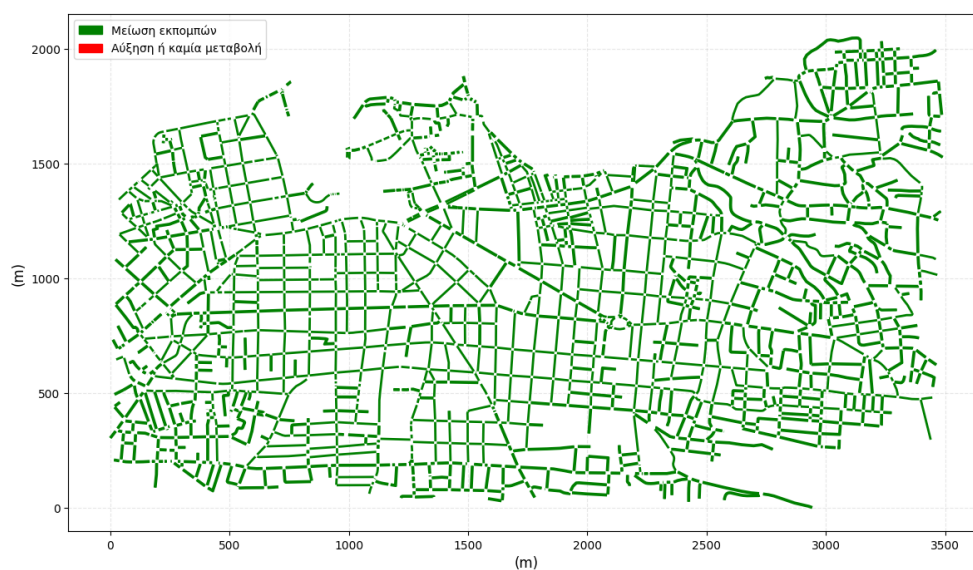
Εικόνα 4.60: Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών CO με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)



Εικόνα 4.61: Σύγκριση Χωρικής της Κατανομής των Εκπομπών HC με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)



Εικόνα 4.62: Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών PMx με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)



Εικόνα 4.63: Σύγκριση της Χωρικής Κατανομής των Εκπομπών NOx με το Βασικό Σενάριο ανά Οδικό Τμήμα (g/km/h)

4.8 Σύνοψη Αποτελεσμάτων

Στον Πίνακα 4.17 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των συνολικών εκπομπών κάθε ρύπου, για τα πέντε σενάρια που δημιουργήθηκαν στην προσομοίωση του οδικού δικτύου της περιοχής των Χανίων, για το χρονικό διάστημα 06:00 έως 24:00.

Ρύπος	Βασικό	1 ^ο	2 ^ο	3 ^ο	4 ^ο
CO ₂	31.199,79	28.731,02	29.85,69	22.755,49	1.465,49
CO	284,36	63,89	207,99	144,85	3,18
HC	8,52	8,50	8,193	2,98	0,05
PM _x	3,88	3,53	3,753	2,98	0,80
NO _x	26,28	24,32	24,739	20,90	0,24

Πίνακας 4.17: Συνολικοί Εκλυόμενοι Ρύποι ανά Σενάριο (kg)

5 Συμπεράσματα

5.1 Σύνοψη Μεθολογικής Προσέγγισης

Η ανάλυση της οδικής κυκλοφορίας αποτελεί έναν από τους βασικότερους προβληματισμούς της σύγχρονης αστικής καθημερινότητας, καθώς σε συνδυασμό με την αυξανόμενη κινητικότητα των πολιτών, προκύπτουν σημαντικές συνέπειες στο περιβάλλον. Η κατάσταση αυτή έχει άμεσες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και κατ'επέκταση, στην ποιότητα ζωής των κατοίκων, αφού εκτίθενται σε αυξημένους περιβαλλοντικούς κινδύνους. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει την επιτακτική ανάγκη για υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών και στοχευμένων παρεμβάσεων, τόσο σε επίπεδο πολιτικής όσο και ατομικής συμπεριφοράς, με σκοπό τον περιορισμό των επιπτώσεων και τη διαμόρφωση ενός πιο υγιούς και λειτουργικού αστικού περιβάλλοντος. Σε αυτό το πλαίσιο, η χρήση προσομοιώσεων οδικού δικτύου προσφέρει ένα πολύτιμο εργαλείο για την εκτίμηση των επιπτώσεων διαφορετικών κυκλοφοριακών σεναρίων στο περιβάλλον. Η αποτύπωση ρεαλιστικών συνθηκών κυκλοφορίας και η ένταξη μοντέλων εκπομπών, καθιστά την προσομοίωση ουσιώδη για την υποστήριξη και λήψη αποφάσεων και την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων που τίθενται σε Ευρωπαϊκό και τοπικό επίπεδο.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, εστιάζει στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την κυκλοφορία και ειδικότερα, από τη χρήση επιβατικών οχημάτων, με στόχο την αξιολόγηση ορισμένων στρατηγικών που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα. Αξιοποιώντας το λογισμικό SUMO, δημιουργήθηκε ένα βασικό σενάριο, βασισμένο σε δεδομένα της υφιστάμενης κατάστασης της πόλης των Χανίων, έτσι ώστε να διαμορφωθεί μια ρεαλιστική βάση αναφοράς, για τη σύγκριση με τα εναλλακτικά σενάρια που επιλέχθηκαν στο πλαίσιο της μελέτης. Τα εξεταζόμενα σενάρια περιλαμβάνουν, αρχικά, την αλλαγή του ορίου ταχύτητας σε 30 km/h, σε όλο το δίκτυο (1^ο σενάριο), και στη συνέχεια, την υιοθέτηση ενός οικολογικού τρόπου οδήγησης (2^ο σενάριο). Επίσης, όσον αφορά τη διείσδυση των ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων, αντλήθηκαν δεδομένα από το ΥΠΕΝ, βάσει των οποίων εκτιμήθηκε η κατανομή του στόλου επιβατικών οχημάτων ανά τύπο καυσίμου για τα επόμενα έτη. Με βάση αυτές τις προβλέψεις, διαμορφώθηκαν δύο επιπλέον σενάρια, που αντιστοιχούν στις αναμενόμενες συνθέσεις στόλου για τα έτη 2030 και 2050 (3^ο και 4^ο σενάριο, αντίστοιχα). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των σεναρίων, αναφορικά με τις εκπομπές των αέριων ρύπων (CO₂, CO, HC, PM_x και NO_x), επεξεργάστηκαν και συγκρίθηκαν με εκείνα του βασικού, τόσο σε συνολικό επίπεδο, όσο και χωρικά, ανά οδικό τμήμα, προκειμένου να αναδειχθεί η αποτελεσματικότητα κάθε παραδοχής ως προς την επίτευξη της επιδιωκόμενης μείωσης των εκπομπών.

5.2 Βασικά Συμπεράσματα

Η μελέτη αυτή πραγματεύεται την αξιολόγηση διαφορετικών κυκλοφοριακών στρατηγικών, όσον αφορά το περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο, στο οδικό δίκτυο της πόλης των Χανίων, όπως αυτό ορίστηκε από το Σχέδιο Βιώσιμης Αστικής Κινητικότητας του Δήμου της περιοχής. Η διαδικασία βασίζεται στη σύγκριση των εναλλακτικών σεναρίων με το βασικό, το οποίο λειτουργεί ως σημείο αναφοράς και προσομοιώνει την υφιστάμενη κατάσταση, επιτρέποντας την αποτίμηση της αποτελεσματικότητας κάθε παρέμβασης σε σχέση με αυτό.

Στο **βασικό σενάριο**, το οποίο βασίστηκε σε ρεαλιστικά δεδομένα, σχετικά με την κατανομή του στόλου ανά κατηγορία καυσίμου και κατηγορία εκπομπών Euro, κατέδειξε σημαντικό φόρτο εκπομπών, ιδίως στις εκπομπές CO₂ και CO. Τα αποτελέσματα αυτά συνδέονται άμεσα με τη σχεδόν καθολική επικράτηση των βενζινοκίνητων οχημάτων στους δρόμους, αλλά και με τη «μεγάλη ηλικία» του συνολικού στόλου των οχημάτων, επιβεβαιώνοντας τη βραδεία ανανέωση του στόλου και την περιορισμένη παρουσία τεχνολογιών καθαρής κίνησης [Sharma et al. 2020]. Επί προσθέτως, η χρονική ανάλυση έδειξε ότι η συσσώρευση εκπομπών κορυφώνεται κατά τις ώρες αιχμής, ακολουθώντας τον ρυθμό της κυκλοφοριακής έντασης, αλλά και στους κύριους και κεντρικούς οδικούς άξονες της περιοχής μελέτης. Η ισχυρή συσχέτιση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με τα επίπεδα κυκλοφοριακού φόρτου που καταγράφηκαν σε επίσημες σχετικές μελέτες, για την κυκλοφορία της πόλης, ενισχύουν την αξιοπιστία του μοντέλου αυτού.

Η υλοποίηση του **πρώτου σεναρίου**, προβλέπει την καθολική μείωση του ορίου ταχύτητας σε 30 km/h, παρουσιάζοντας μείωση στις εκπομπές ρύπων, σε σχέση με τις μετρήσεις του βασικού σεναρίου. Ειδικότερα, οι εκπομπές CO₂ σημείωσαν μείωση 7,9%, οι εκπομπές CO 77,5%, οι HC 0,2%, ενώ οι τιμές PM_x μειώθηκαν κατά 9% και τα NO_x κατά 7,4%. Η μείωση των εκπομπών CO₂, NO_x και ειδικότερα του CO αποδίδονται κυρίως στη σταθεροποίηση της ταχύτητας και τον περιορισμό των επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων, ευνοώντας την καλύτερη καύση του καυσίμου [Archer et al. 2008] [Yannis και Michelaraki, 2024]. Αντιθέτως, σε αυτές τις μικρές ταχύτητες οι εκπομπές HC παραμένουν σχεδόν ίδιες, ενώ η πιο σταθερή ροή κίνησης και αποφυγή έντονων φρεναρισμάτων συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών PM_x. Ωστόσο, η χρονική κατανομή των εκπομπών κατά τη διάρκεια της ημέρας διατηρεί το ίδιο μοτίβο με το βασικό σενάριο, παρουσιάζοντας κορυφώσεις στις ώρες αιχμής, αλλά σε χαμηλότερα επίπεδα, ενώ η μείωση των εκπομπών καταγράφεται λίγο πάνω από το 50% των συνολικών οδικών τμημάτων του δικτύου, περιορίζοντας την ένταση του συνολικού περιβαλλοντικού οφέλους. Επίσης, Το μέτρο αυτό είναι λογικό να επηρεάζει τη μέση ταχύτητα που επικρατεί στο δίκτυο, μετριάζοντάς τη κατά 34,1%, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση του χρόνου ταξιδιού σχεδόν κατά το ήμισυ (52,1%), καθώς και του μέσου χρόνου αναμονής, όπου τα οχήματα παραμένουν σε ακινησία.

Στο **δεύτερο σενάριο**, εφαρμόστηκε η οικολογική οδηγική συμπεριφορά, ώστε να παρατηρηθεί η επιρροή του τρόπου οδήγησης στο περιβάλλον, χωρίς να γίνουν μεταβολές στη δομή και στα χαρακτηριστικά του στόλου του δικτύου. Συγκεκριμένα, καταγράφηκε μείωση των συνολικών εκπομπών CO₂ κατά 4,3%, των εκπομπών CO κατά 26,9%, των HC κατά 3,9% και των PM_x και NO_x κατά 3,2% και 5,8%, αντίστοιχα. Η χρονική κατανομή των ρύπων έχει παρόμοια τάση με αυτή

του βασικού σεναρίου, με σταθερή μείωση καθ'όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, ειδικότερα στις εκπομπές CO. Παράλληλα, διαπιστώνεται ότι σε σημαντικό μέρος του δικτύου μετά τη μεμονωμένη σύγκριση σε κάθε οδικό τμήμα του δικτύου, η υιοθέτηση αυτού του τρόπου οδήγησης έχει θετικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Η συνολική επίδραση του eco-driving ερμηνεύεται κυρίως από τον περιορισμό της επιθετικής συμπεριφοράς, την πρόβλεψη συνθηκών και κατά συνέπεια την αποφυγή των απότομων επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων, αλλά και τη διατήρηση σταθερής ταχύτητας. Τα στοιχεία αυτά συμβάλλουν σε πιο αποτελεσματική καύση, μειωμένη κατανάλωση καυσίμου και, κατ' επέκταση, σε χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα [Andrieu et al. 2012] [Sekadakis et al. 2025] [Ericsson, 2001]. Είναι εξίσου σημαντικό να αναφερθεί, πως η ήπια οδηγική συμπεριφορά, οδήγησε σε μείωση της μέσης ταχύτητας στο δίκτυο κατά 12,7%, αυξάνοντας τον μέσο όρο ταξιδιού και τον χρόνο ακινησίας των οχημάτων. Το γεγονός αυτό, πιθανόν να οφείλεται στην περιορισμένη ικανότητα για επιτάχυνση, καθυστερώντας την απομάκρυνση από σημεία ρύθμισης της κυκλοφορίας, όπως οι φωτεινοί σηματοδότες και οι πινακίδες STOP, αυξάνοντας τη συσσώρευση οχημάτων σε συγκεκριμένα σημεία του δικτύου. Παρότι οι μεταβολές αυτές είναι υπαρκτές, το ποσοστό τους παραμένει κοντά στο 10%, επομένως η επιβάρυνση στη λειτουργία του δικτύου μπορεί να θεωρηθεί ήπια.

Για το **τρίτο και τέταρτο σενάριο**, εξετάζοντας την διείσυση και προώθηση νεότερων τεχνολογιών μετακίνησης με επιβατικό όχημα, βάση των εκτιμήσεων του ΥΠΕΝ για τα έτη 2030 και 2050, αντίστοιχα, προέκυψαν κοινές τάσεις μείωσης των συνολικών εκπομπών αέριων ρύπων στην περιοχή μελέτης. Πιο αναλυτικά, για την προβλεπόμενη σύνθεση του στόλου για το 2030, καταγράφηκε μείωση ως εξής: CO₂ 27,1%, CO 49,1%, HC 65%, PM_x 23,1% και NO_x 20,4%, επιβεβαιώνοντας ότι η ανανέωση του στόλου συμβάλλει σημαντικά στη μείωση των εκπομπών. Τα σύγχρονα οχήματα, για τη συμμόρφωση σχετικά με τους περιορισμούς των τελευταίων κατηγοριών Euro, διαθέτουν προηγμένα συστήματα επεξεργασίας και καθαρισμού καυσαερίων, καθώς και φίλτρα για την «παγίδευση» των σωματιδίων, ενώ τα υβριδικά και ειδικότερα τα ηλεκτρικά οχήματα χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα χαμηλές ή ακόμα και μηδενικές εκπομπές [European Environment Agency, 2020] [Ravi et al. 2023] [ACEA, 2023]. Αντίστοιχα, για το έτος 2050 τα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενο να εμφανίσουν ακόμα μεγαλύτερη μείωση: CO₂ 98,9%, CO 95,3%, HC 99,5%, PM_x 79,3% και NO_x 99,1%, τονίζοντας τα οφέλη της ηλεκτροκίνησης. Τέλος, κοινό χαρακτηριστικό και των δύο σεναρίων αποτελεί η σαφή υποχώρηση της συσσώρευσης εκπομπών, κατά κύριο λόγο σε ολόκληρο το δίκτυο, ενώ σε λίγες περιπτώσεις περιορίζεται στο μεγαλύτερο μέρος αυτού.

5.3 Συνολικά Συμπεράσματα

Λαμβάνοντας υπόψη τη βιβλιογραφία που αναλύθηκε όσο και τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης, γίνεται κατανοητό πως η αντιμετώπιση των εκπομπών από τον τομέα των οδικών μεταφορών αποτελεί κρίσιμο ζήτημα, καθώς οι αστικές περιοχές συνεχίζουν να πλήττονται ολοένα και περισσότερο, με επιπτώσεις στη δημόσια υγεία και την ποιότητα της ζωής. Ως αποτέλεσμα, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη για άμεση λήψη μέτρων και στρατηγικών, που

να ευθυγραμμίζονται με την προσπάθεια επίτευξης των στόχων της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Στο πλαίσιο αυτό, οι προτεινόμενες εναλλακτικές λύσεις που εξετάστηκαν σε αυτή τη μελέτη μπορούν πράγματι να συνεισφέρουν ουσιαστικά στη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων σε ένα αστικό περιβάλλον, προσφέροντας εφικτές και ρεαλιστικές στρατηγικές για την προώθηση της βιώσιμης κινητικότητας.

Η εφαρμογή στρατηγικών ήπιας κυκλοφορίας, όπως είναι η καθολική μείωση του ορίου ταχύτητας, αν και αναδεικνύεται κυρίως για την επιρροή της στον μετριασμό των ατυχημάτων εντός του αστικού ιστού, έχει θετικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Ωστόσο, το ενδεχόμενο να προκληθούν καθυστερήσεις στους χρόνους μετακίνησης των οδηγών, σε συνδυασμό με την άνιση επίδραση του μέτρου σε χωρικό επίπεδο, απαιτεί σωστό και λεπτομερή σχεδιασμό για την εφαρμογή του. Παρ' όλα αυτά, το συνολικό όφελος υπερισχύει, καθιστώντας το μέτρο εφαρμόσιμο υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Επιπλέον, η υιοθέτηση της οικολογικής οδήγησης αποτελεί μέρος της λύσης για την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών προβλημάτων και τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας, υπό την μορφή της προσωπικής ευθύνης απέναντι στο περιβάλλον και την κοινωνία, προσφέροντας έναν χαμηλού κόστους και άμεσα εφαρμόσιμο τρόπο μείωσης των εκπομπών και των ατυχημάτων. Η ενίσχυση της εφαρμογής του μέτρου μπορεί να επιτευχθεί μέσω στοχευμένων παρεμβάσεων και κατάλληλων οικονομικών κινήτρων, όπως η παροχή ανατροφοδότησης σε πραγματικό χρόνο και οι φοροαπαλλαγές, διευκολύνοντας την ευρύτερη αποδοχή του ως καθημερινή οδηγική πρακτική [Andrieu et al. 2012] [Sekadakis et al. 2025].

Ακόμη, λόγω της καθοριστικής συμβολής τους στη μείωση εκπομπών η τάση για ανανέωση του στόλου με νεότερα οχήματα και ιδιαίτερα η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων αναγνωρίζεται ως η πιο ουσιαστική λύση για τις αστικές μετακινήσεις και την απανθρακοποίηση των μεταφορών [Kouridis et al. 2022] [Ritchie, 2024] [Hawkins et al. 2013]. Η διατύπωση αυτή ενισχύεται αν αναλογιστεί κανείς, η παραγωγή τους διακρίνεται από αυξημένες εκπομπές, το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα σε βάθος χρόνου εξοφλείται γρήγορα. Ωστόσο, το αυξημένο κόστος αγοράς τους αποτελεί εμπόδιο στην ευρεία διεύρυνσή τους στον συνολικό στόλο, γεγονός που καθιστά απαραίτητες τις στοχευμένες συνδυαστικές πολιτικές παρεμβάσεις, όπως η επιβολή φορολογικών κινήτρων και η προώθηση επιδοτήσεων. Συγχρόνως, απαιτείται αποθάρυνση της αγοράς οχημάτων με κινητήρες εσωτερικής καύσης, με αύξηση των τιμών τους, του κόστους καυσίμου και μείωση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας [Hawkins et al. 2013] [Shaban et al. 2023].

Τέλος, ακόμη και με την είσοδο καθαρότερων οχημάτων στην αγορά, η επίδρασή τους στην ατμοσφαιρική ρύπανση χρειάζεται αρκετό διάστημα για να γίνει αισθητή [Hawkins et al. 2013], επομένως απαιτείται συνδυασμός στρατηγικών και παρεμβάσεων που θα επιταχύνουν την προσπάθεια επίτευξης των στόχων για κλιματική ουδετερότητα. Υπό αυτό το πρίσμα, αποδεικνύεται πως η χρήση μοντέλων κυκλοφοριακής προσομοίωσης είναι ιδιαίτερα χρήσιμη και αποτελεσματική, καθώς επιτρέπει τη σύγκριση σεναρίων πολιτικής και την εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων υπό διαφορετικές κυκλοφοριακές συνθήκες. Οι σχετικές μελέτες υποδεικνύουν ότι τέτοιες πλατφόρμες προσφέρουν επιστημονικά τεκμηριωμένα αποτελέσματα προσομοίωσης, τα οποία μπορούν να υποστηρίξουν στοχευμένες αποφάσεις σε επίπεδο

σχεδιασμού μεταφορών και περιβαλλοντικής πολιτικής.

5.4 Περιορισμοί και Προτάσεις για Μελλοντική έρευνα

Το θέμα της διπλωματικής εργασίας που παρουσιάστηκε επιδέχεται περαιτέρω βελτιώσεις, ως προς την ακρίβεια απεικόνισης της πραγματικής κατάστασης της πόλης των Χανίων, ειδικότερα σε ό,τι αφορά την κατανομή και τις κατηγορίες των οχημάτων που διασχίζουν το οδικό της δίκτυο. Μεταξύ άλλων, ενδεικτικά παραδείγματα περιλαμβάνουν :

- τη χρήση πιο πρόσφατων τοπικών δεδομένων, αναφορικά με τον στόλο οχημάτων και τον τύπο καυσίμου που είναι σε χρήση, εφόσον αυτά είναι διαθέσιμα.
- την ένταξη όλων των κατηγοριών οχημάτων που διασχίζουν την περιοχή, όπως είναι τα ελαφρά (LDV) και τα βαρέα οχήματα (HDV) ή ακόμη και οι μοτοσυκλέτες.
- την προσθήκη λεωφορείων και των δρομολογίων που ακολουθούν σε ημερήσια βάση.
- την ενσωμάτωση της πεζής κυκλοφορίας, η οποία μπορεί να επηρεάζει τη ροή και τη συνολική απόδοση του οδικού δικτύου, εξαιτίας της έντονης τουριστικής δραστηριότητας στην περιοχή.
- τη δημιουργία των υφιστάμενων χώρων στάθμευσης εντός της περιοχής μελέτης.

Ωστόσο, με την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας, προκύπτουν και επιπλέον ζητήματα που αξίζουν περαιτέρω μελέτη, για την πληρέστερη κατανόηση των παραμέτρων που διαμορφώνουν την περιβαλλοντική επίδοση των κυκλοφοριακών στρατηγικών. Αρχικά, η ενσωμάτωση των τοπικών λεωφορείων και των διαδρομών που ακολουθούν, θα μπορούσε να επιτρέψει τη συγκριτική αξιολόγηση με σενάρια σταδιακής αντικατάστασής τους με ηλεκτρικά. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τις λειτουργίες του SUMO και της δυνατότητας που παρέχει για την τροποποίηση του οδικού δικτύου, είναι ευφικτή η προσαρμογή της λειτουργίας των φωτεινών σηματοδοτών ή ακόμη και η αντικατάστασή τους με κυκλικούς κόμβους, οι οποίοι διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην αποδοτικότητα της κυκλοφορίας και στη μείωση των εκπομπών. Με παρόμοιο προσανατολισμό, μπορούν να επιτευχθούν και άλλου τύπου παρεμβάσεις, όπως η δημιουργία ποδηλατοδρόμων, η διαπλάτυνση οδών και πεζοδρομίων, καθώς και ευρύτερες τροποποιήσεις στη γεωμετρία και τη λειτουργία του αστικού χώρου. Εντούτοις, η υλοποίηση ενός τέτοιου συνόλου επεμβάσεων αποτελεί ένα σύνθετο έργο, το οποίο απαιτεί λεπτομερή σχεδιασμό και τεχνική ακρίβεια. Τέλος, προτείνεται μετατροπή των εκπομπών αέριων ρύπων σε συγκεντρώσεις, για την ακριβέστερη αποτύπωση της ποιότητας του αέρα της περιοχής.

Βιβλιογραφία

1. (ACEA), European Automobile Manufacturers' Association (2024). *Euro Standards*. Accessed: 2025-04-27. URL: <https://www.acea.auto/fact/euro-standards/>.
2. ACEA (2023). 'EURO' Pollutant Emission Standards - Fact Sheet. Accessed May 2025. URL: <https://www.acea.auto/files/EURO-Pollutant-Emission-Standards-Factsheet.pdf>.
3. — (Jan. 2025). *Vehicles on European Roads*. URL: https://www.acea.auto/files/ACEA_Report_-_Vehicles_on_European_roads_2025.pdf.
4. Ahn, Kyoungcho, Hesham Rakha, Hussein Abdel-Aty, and K. Moran (Mar. 2002). «Estimating Vehicle Fuel Consumption and Emissions Based on Instantaneous Speed and Acceleration Levels.» In: *Journal of Transportation Engineering*.
5. Alam, Md. Saniul and Aonghus McNabola (Sept. 2014). «A Critical Review and Assessment of Eco-Driving Policy & Technology: Benefits & Limitations.» In: *Transport Policy* 35, pp. 42–49.
6. Alvarez Lopez, Pablo, Michael Behrisch, Laura Bieker-Walz, Jakob Erdmann, Yun-Pang Flötteröd, Robert Hilbrich, Leonhard Lücken, Johannes Rummel, Peter Wagner, and Evamarie Wießner (2018). «Microscopic Traffic Simulation using SUMO.» In: *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE, pp. 2575–2582. DOI: [10.1109/ITSC.2018.8569938](https://doi.org/10.1109/ITSC.2018.8569938).
7. Andrieu, Cindie and Guillaume Saint Pierre (2012). «Comparing Effects of Eco-driving Training and Simple Advices on Driving Behavior.» In: *15th Meeting of the EURO Working Group on Transportation (EWGT 2012)*. IFSTTAR, IM, LIVIC. Versailles-Satory, France.
8. Asof, Mugdho Rasheeq, Yang Wang, and Ke Du (2022). «Comparison of the emission factors of air pollutants from gasoline, CNG, LPG and diesel fueled vehicles at idle speed.» In: *Environmental Pollution* 305, p. 119296. DOI: [10.1016/j.envpol.2022.119296](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119296).
9. Archer, J., N. Fotheringham, M. Symmons, and B. Corben (Jan. 2008). *The Impact of Lowered Speed Limits in Urban and Metropolitan Areas*. Technical Report. Version 5.00.
10. Behrisch, Michael, Laura Bieker, Jakob Erdmann, Melanie Knocke, Daniel Krajzewicz, and Peter Wagner (2014). «Evolution of SUMO's Simulation Model.» In: *Traffic and Transportation Simulation – Looking Back and Looking Ahead: Celebrating 50 Years of Traffic Flow Theory*. Vol. E-C195. TRB E-Circular. Transportation Research Board, pp. 1–21. URL: <https://elib.dlr.de/96400/>.
11. Behrisch, Michael, Laura Bieker, Jakob Erdmann, and Daniel Krajzewicz (2014). «SUMO – Simulation of Urban MObility: An Overview.» In.
12. Behrisch, Michael, Yun-Pang Flötteröd, and Peter Wagner (2024). «Comparing and Parameterizing the Electrical Energy Consumption Models in SUMO.» In: *SUMO User Conference*

2024. Published: 17 July 2024. Licensed under CC BY 3.0 DE. Berlin, Germany: SCP. DOI: [10.52825/scp.v5i.1012](https://doi.org/10.52825/scp.v5i.1012). URL: <https://doi.org/10.52825/scp.v5i.1012>.
13. Bernard, Yoann, Uwe Tietge, John German, and Rachel Muncrief (June 2018). *Determination of Real-World Emissions from Passenger Vehicles Using Remote Sensing Data*. Tech. rep. The International Council on Clean Transportation (ICCT). URL: https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Real-World-Emissions-Passenger-Vehicles_ICCT-white-paper_20180614.pdf.
 14. Brand, Christian, Evi Dons, Esther Anaya-Boig, Ione Avila-Palencia, Anna Clark, Audrey de Nazelle, Mireia Gascon, Mailin Gaupp-Berghausen, Regine Gerike, Thomas Götschi, Francesco Iacorossi, Sonja Kahlmeier, Michelle Laeremans, Mark J. Nieuwenhuijsen, Juan Pablo Orjuela, Francesca Racioppi, Elisabeth Raser, David Rojas-Rueda, Arnout Standaert, Erik Stigell, Simona Sulikova, Sandra Wegener, and Luc Int Panis (2021). «The climate change mitigation effects of daily active travel in cities.» In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 93, p. 102764. DOI: [10.1016/j.trd.2021.102764](https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102764). URL: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102764>.
 15. Casanova, J. and N. Fonseca (2012). «Environmental Assessment of Low Speed Policies for Motor Vehicle Mobility in City Centres.» In: *International Journal of Environmental Research* 6.3. Accepted: March 9, 2012, pp. 689–698.
 16. Clemente, Maria Laura (2022). «Building a Real-World Traffic Micro-Simulation Scenario from Scratch with SUMO.» In: *SUMO User Conference 2022*. CRS4, Italy: CEUR Workshop Proceedings. URL: <https://doi.org/10.52825/scp.v3i.109>.
 17. Council of the European Union (Apr. 2024). *Euro 7: Council adopts new rules on emission limits for cars, vans and trucks*. Accessed: 2025-04-29. URL: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2024/04/12/euro-7-council-adopts-new-rules-on-emission-limits-for-cars-vans-and-trucks/>.
 18. Dijkstra, Edsger W. (1959). «A Note on Two Problems in Connexion with Graphs.» In: *Numerische Mathematik*. DOI: [10.1007/BF01386390](https://doi.org/10.1007/BF01386390).
 19. Directorate-General for Climate Action (May 2024). *5 Things You Should Know About Electric Cars*. URL: https://climate.ec.europa.eu/news-your-voice/news/5-things-you-should-know-about-electric-cars-2024-05-14_en.
 20. EPA (2024). *Climate Indicators: Global Greenhouse Gas Emissions*. Accessed April 2025. URL: <https://www.epa.gov/climate-indicators>.
 21. Erdmann, Jakob and Daniel Krajzewicz (2011). «SUMO's Road Intersection Model.» In: *Proceedings*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
 22. Ericsson, Eva (Sept. 2001). «Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors.» In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 6.5, pp. 325–345. DOI: [10.1016/S1361-9209\(01\)00003-7](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(01)00003-7).
 23. European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency (CINEA) (2022). *H2020 Transport - Road Safety 2022*. Accessed: 2025-04-29. URL: <https://cinea.ec.europa.eu/system/files/2023-02/H2020%20Transport-Road%20Safety%202022-web.pdf>.

24. European Commission (2024a). *CO₂ emission performance standards for cars and vans*. European Commission. URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/co2-emission-performance-standards-cars-and-vans_en.
25. — (2024b). *Delivering the European Green Deal*. Accessed: 2025-04-12. URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_el.
26. — (2025). *Sustainable Urban Mobility Planning and Monitoring*. Accessed: April 2025. URL: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/urban-transport/sustainable-urban-mobility-planning-and-monitoring_en.
27. European Environment Agency (2018). *Electric Vehicles from Life Cycle and Circular Economy Perspectives: TERM 2018: Transport and Environment Reporting Mechanism (TERM) Report*. Tech. rep. Kongens Nytorv 6, 1050 Copenhagen K, Denmark: European Environment Agency. DOI: 10.2800/77428. URL: <https://www.eea.europa.eu>.
28. — (2020). *Explaining Road Transport Emissions: A Non-technical Guide*. <https://www.eea.europa.eu/publications/explaining-road-transport-emissions>. European Environment Agency Report, Copenhagen.
29. Eurostat (2025). *Passenger Cars by Age*. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/road_eqs_carage/default/line?lang=en.
30. EVStats (2024). *EVStats Greece*. URL: <https://www.evstats.gr/en>.
31. Fameli, K. M. and V. D. Assimakopoulos (2016). «Development of a Road Transport Emission Inventory for Greece and the Greater Athens Area: Effects of Important Parameters.» In: *Science of the Total Environment*. Department of Environmental Physics, University of Athens; Institute for Environmental Research and Sustainable Development, National Observatory of Athens.
32. Fondzenyuy, Stephen Kome, Blair Matthew Turner, Alina Florentina Burlacu, Chris Jurewicz, Davide Shingo Usami, Steffel Ludivin Tezong Feudjio, and Luca Persia (2024). «The Impact of Speed Limit Change on Emissions: A Systematic Review of Literature.» In: *Sustainability* 16.17, p. 7712. DOI: 10.3390/su16177712. URL: <https://doi.org/10.3390/su16177712>.
33. Gressai, Manuel, Balázs Varga, Tamás Tettamanti, and István Varga (2021). «Investigating the impacts of urban speed limit reduction through microscopic traffic simulation.» In: *Transportation Research Procedia* 52. Budapest University of Technology and Economics, pp. 145–152.
34. Guastella, Davide Andrea and Gianluca Bontempi (2023). *Traffic Modeling with SUMO: a Tutorial*. arXiv preprint arXiv:2304.05982v1, 1 Mar 2023. arXiv: 2304.05982 [cs.NI].
35. Hausberger, S., C. Matzer, M. Rexeis, and M. Zallinger (June 2016). *Update of Emission Factors for EURO 4, EURO 5 and EURO 6 Diesel Passenger Cars for the HBEFA Version 3.3*. Tech. rep. Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics (IVT), Graz University of Technology (TUG). URL: https://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA33_TUG_finalreport_01062016.pdf.

36. Hausberger, Stefan and Daniel Krajzewicz (Feb. 2014). *Deliverable 4.2 – Extended Simulation Tool PHEM coupled to SUMO with User Guide*. EU Project Deliverable D4.2. Version 1.7, Public (PU). COLOMBO Project, FP7-ICT-2011-8. URL: <https://www.colombo-fp7.eu/>.
37. Hausberger, Stefan, Martin Rexeis, Michael Zallinger, and Raphael Luz (2009). *Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3*. Tech. rep. I-20/2009 Haus-Em 33/08/679. Publishing of this report is allowed only in the complete version. Graz, Austria: Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics, TU Graz.
38. Hawkins, Troy R., Bhawna Singh, Guillaume Majeau-Bettez, and Anders Hammer Strømman (2013). «Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles.» In: *Journal of Industrial Ecology* 17.1, pp. 53–64. DOI: [10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x](https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x).
39. Ho, Sze-Hwee, Yiik-Diew Wong, and Victor Wei-Chung Chang (Feb. 2015). «What Can Eco-driving Do for Sustainable Road Transport? Perspectives from a City (Singapore) Eco-driving Programme.» In: *Sustainable Cities and Society* 14, pp. 82–88.
40. Hoogendoorn, Serge P. and Piet H.L. Bovy (2001). «State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling.» In: *Journal of Systems and Control Engineering, Special Issue on Road Traffic Modelling and Control* 215.4, pp. 283–303. DOI: [10.1243/0959651011541842](https://doi.org/10.1243/0959651011541842).
41. INFRAS (2023). *HBEFA - Handbook Emission Factors for Road Transport: Methodology Overview*. <https://www.hbefa.net/en/methodology/overview>. Accessed: 2025-05-09. INFRAS, Switzerland.
42. INFRAS, TUG, ifeu, HSDAC, and WSP Sweden (Aug. 2019). *HBEFA 4.1 Development Report*. Tech. rep. INFRAS AG, Bern. URL: https://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA41_Development_Report.pdf.
43. Intergovernmental Panel on Climate Change (2022). *Sixth Assessment Report – Summary for Policymakers*. AR6 Synthesis Report. IPCC.
44. International Energy Agency (2023a). *Global CO₂ emissions from transport by sub-sector in the Net Zero Scenario, 2000–2030*. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-from-transport-by-sub-sector-in-the-net-zero-scenario-2000-2030-2>.
45. — (2023b). *Global energy-related CO₂ emissions by sector*. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-energy-related-co2-emissions-by-sector>.
46. — (2023c). *Transport Sector CO₂ Emissions*. Accessed: April 2025. URL: <https://www.iea.org>.
47. — (2024a). *Electric Car Sales 2012–2024*. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electric-car-sales-2012-2024>.
48. — (2024b). *Global EV Outlook 2024: Trends in Electric Cars*. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>.
49. — (2025). *Greece: Emissions*. Accessed on 23 April 2025. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/countries/greece/emissions> (visited on 04/23/2025).
50. International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (OICA) (2024). *Emission Control Technologies*. Accessed: April 27, 2025. URL: <https://www.oica.net/emission-control-technologies/>.

51. Kobayashi, I., Y. Tsubota, and H. Kawashima (2007). «Eco-driving Simulation: Evaluation of Eco-driving within a Network Using Traffic Simulation.» In: *Urban Transport XIII: Urban Transport and the Environment in the 21st Century*. Vol. 96. WIT Transactions on The Built Environment. WIT Press. DOI: [10.2495/UT070701](https://doi.org/10.2495/UT070701). URL: <https://www.witpress.com>.
52. Kouridis, Ch and Ch Vlachokostas (2022). «Towards decarbonizing road transport: Environmental and social benefit of vehicle fleet electrification in urban areas of Greece.» In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 153, p. 111775. DOI: [10.1016/j.rser.2021.111775](https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111775).
53. Krajzewicz, Daniel, Jakob Erdmann, Michael Behrisch, and Laura Bieker (2012). «Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban MObility.» In: *International Journal on Advances in Systems and Measurements* 5.3 & 4. URL: http://www.iariajournals.org/systems_and_measurements/.
54. Krajzewicz, Daniel, Markus Hartinger, Georg Hertkorn, Peter Mieth, Christian Rössel, Julia Zimmer, and Peter Wagner (2002). «Using the Road Traffic Simulation “SUMO” for Educational Purposes.» In: *Proceedings of the 4th SUMO User Conference*. Rutherfordstr. 2 – 12489 Berlin. Berlin, Germany.
55. Krajzewicz, Daniel, Georg Hertkorn, Peter Wagner, and Christian Rössel (2014). «SUMO (Simulation of Urban MObility): An Open-source Traffic Simulation.» In: Uploaded by Peter Wagner on 05 June 2014.
56. Krauß, Stefan (Apr. 1998). «Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics.» Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Department of Mobility and System Technology. Inaugural-Dissertation. Cologne, Germany: University of Cologne.
57. Levy, Jonathan I, Jonathan J Buonocore, and Katherine von Stackelberg (2010). «Evaluation of the public health impacts of traffic congestion: a health risk assessment.» In: *Environmental Health* 9.1, p. 65. DOI: [10.1186/1476-069X-9-65](https://doi.org/10.1186/1476-069X-9-65).
58. Lu, Qing-Long, Moeid Qurashi, and Constantinos Antoniou (Sept. 2023). «Simulation-based policy analysis: The case of urban speed limits.» In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 175, p. 103754. DOI: [10.1016/j.tra.2023.103754](https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103754).
59. Madireddy, Madhava, Bert De Coensel, Arnaud Can, Bart Degraeuwe, Bart Beusen, Ina De Vlieger, and Dick Botteldooren (2011). «Assessment of the impact of speed limit reduction and traffic signal coordination on vehicle emissions using an integrated approach.» In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 16.7, pp. 504–508. DOI: [10.1016/j.trd.2011.05.006](https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.05.006).
60. Mądział, Maksymilian (2023). «Vehicle Emission Models and Traffic Simulators: A Review.» In: *Energies* 16.9. Published: 7 May 2023, p. 3941. ISSN: 1996-1073. DOI: [10.3390/en16093941](https://doi.org/10.3390/en16093941). URL: <https://doi.org/10.3390/en16093941>.
61. Maia, Ricardo, Marco Silva, Rui Araújo, and Urbano Nunes (June 2011). «Electric Vehicle Simulator for Energy Consumption Studies in Electric Mobility Systems.» In: *2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems (FISTS)*. IEEE. DOI: [10.1109/FISTS.2011.5973655](https://doi.org/10.1109/FISTS.2011.5973655).
62. Mei, Hui, Lulu Wang, Menglei Wang, Rencheng Zhu, Yunjing Wang, Yi Li, Ruiqin Zhang, Bowen Wang, and Xiaofeng Bao (Aug. 2021). «Characterization of Exhaust CO, HC and NOx Emissions

- from Light-Duty Vehicles under Real Driving Conditions.» In: *Atmosphere* 12.9, p. 1125. DOI: [10.3390/atmos12091125](https://doi.org/10.3390/atmos12091125). URL: <https://doi.org/10.3390/atmos12091125>.
63. Michelaraki, Eva and George Yannis (Sept. 2024). «Exploring the benefits from 30 km/h speed limit to enhance urban sustainability.» In: *Proceedings of the 30th ITS World Congress*. Paper ID #461. Dubai, UAE.
 64. Morello, Eugenio, Silvana Toffolo, and Giorgio Magra (Apr. 2016). «Impact Analysis of Ecodriving Behaviour Using Suitable Simulation Platform (ICT-EMISSIONS Project).» In: *6th Transport Research Arena*. Torino, Italy: IVECO S.p.A.
 65. Nævestad, Tor-Olav (Nov. 2022). «Eco-driving as a Road Safety Measure: Before and After Study of Three Companies.» In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 91, pp. 95–115.
 66. Program, National Cooperative Highway Research (2014). *Analytical Travel Forecasting Approaches for Project-Level Planning and Design*. NCHRP Report 765. Transportation Research Board. Washington, D.C.: Transportation Research Board of the National Academies. URL: <https://www.trb.org/Publications/Blurbs/170400.aspx>.
 67. Qu, Liang, Weiwei Wang, Mengliang Li, Xiaohong Xu, Zongbo Shi, Hongjun Mao, and Taosheng Jin (Feb. 2021). «Dependence of Pollutant Emission Factors and Fuel Consumption on Driving Conditions and Gasoline Vehicle Types.» In: *Atmospheric Pollution Research* 12.2, pp. 137–146.
 68. Ravi, Sai Sudharshan, Sergey Osipov, and James W. G. Turner (2023). «Impact of Modern Vehicular Technologies and Emission Regulations on Improving Global Air Quality.» In: *Atmosphere* 14.7, p. 1164. DOI: [10.3390/atmos14071164](https://doi.org/10.3390/atmos14071164). URL: <https://doi.org/10.3390/atmos14071164>.
 69. Reche, Cristina, Aurelio Tobias, and Mar Viana (2022). «Vehicular Traffic in Urban Areas: Health Burden and Influence of Sustainable Urban Planning and Mobility.» In: *Atmosphere* 13.4, p. 598. DOI: [10.3390/atmos13040598](https://doi.org/10.3390/atmos13040598). URL: <https://doi.org/10.3390/atmos13040598>.
 70. Rhode, Jonathan, Peter Wagner, and Theresa Ziemke (2022). «The Effect of Speed Limits and Traffic Signal Control on Emissions.» In: *Procedia Computer Science*. Vol. 201. The 11th International Workshop on Agent-based Mobility, Traffic and Transportation Models (ABMTRANS-2022), Porto. Elsevier, pp. 568–573. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050922003793>.
 71. Ritchie, Hannah (Apr. 2024). *Tracking Global Data on Electric Vehicles: Explore Data on Electric Car Sales and Stocks Worldwide*. URL: <https://ourworldindata.org/electric-vehicle-data>.
 72. Sekadakis, Marios, Maria Ioanna Sousouni, Thodoris Garefalakis, Maria G. Oikonomou, Apostolos Ziakopoulos, and George Yannis (2025). «Evaluating the Environmental and Safety Impacts of Eco-Driving in Urban and Highway Environments.» In: *Sustainability* 17.2762. Open Access under CC BY license. DOI: [10.3390/su17062762](https://doi.org/10.3390/su17062762). URL: <https://doi.org/10.3390/su17062762>.
 73. Shaban, Farida, Pelopidas Siskos, and Christos Tjortjis (2023). «Electromobility Prospects in Greece by 2030: A Regional Perspective on Strategic Policy Analysis.» In: *Energies* 16.16, p. 6083. DOI: [10.3390/en16166083](https://doi.org/10.3390/en16166083). URL: <https://doi.org/10.3390/en16166083>.

74. Sharma, Rohit, Raghvendra Kumar, Pradeep Kumar Singh, Maria Simona Raboaca, and Raluca-Andreea Felseghi (2020a). «A Systematic Study on the Analysis of the Emission of CO, CO₂ and HC for Four-Wheelers and Its Impact on the Sustainable Ecosystem.» In: *Sustainability* 12.17, p. 6707. DOI: [10.3390/su12176707](https://doi.org/10.3390/su12176707). URL: <https://doi.org/10.3390/su12176707>.
75. — (2020b). «A Systematic Study on the Analysis of the Emission of CO, CO₂ and HC for Four-Wheelers and Its Impact on the Sustainable Ecosystem.» In: *Sustainability* 12.17, p. 6707. DOI: [10.3390/su12176707](https://doi.org/10.3390/su12176707). URL: <https://doi.org/10.3390/su12176707>.
76. Simcic, Gabriel (2012). *ECOWILL: Implementing Eco-driving on a Wide Scale*. Road Safety Day 2012, Cyprus. FIA Region I.
77. Sims, R., R. Schaeffer, F. Creutzig, X. Cruz-Núñez, M. D'Agosto, D. Dimitriu, M.J. Figueroa Meza, L. Fulton, S. Kobayashi, O. Lah, A. McKinnon, P. Newman, M. Ouyang, J.J. Schauer, D. Sperling, and G. Tiwari (2014). «Transport.» In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ed. by O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, and J.C. Minx. Contribution of Working Group III to the IPCC Fifth Assessment Report. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. DOI: [10.1017/CB09781107415416](https://doi.org/10.1017/CB09781107415416).
78. *Simulation of Urban MObility (SUMO) Documentation* (2025). <https://sumo.dlr.de/docs/index.html>.
79. Spyropoulos, Georgios C., Panagiotis T. Nastos, Konstantinos P. Moustris, and Konstantinos J. Chalvatzis (2023). «Transportation and Air Quality Perspectives and Projections in a Mediterranean Country, the Case of Greece.» In: *Land* 12.7, p. 1396. DOI: [10.3390/land12071396](https://doi.org/10.3390/land12071396).
80. Statista (2023). *Global CO₂ emissions 1965-2022*. URL: <https://www.statista.com/statistics/276629/global-co2-emissions/>.
81. Tang, Jiayi, Aonghus McNabola, Bruce Misstear, Francesco Pilla, and Md Saniul Alam (2019). «Assessing the Impact of Vehicle Speed Limits and Fleet Composition on Air Quality Near a School.» In: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16.1, p. 149. DOI: [10.3390/ijerph16010149](https://doi.org/10.3390/ijerph16010149).
82. Tettamanti, Tamás, Chinedu Amabel Okolie, Tamás Ormándi, and Balázs Varga (2024). *A Python Tool for SUMO Traffic Simulation to Model Hybrid Electric Vehicles (HEV) for Comprehensive Emission Analysis*. Technical Report. BME Traffic Lab, Department of Control for Transportation et al. URL: <https://github.com/bmetrafficlab/sumo-hybrid-electric>.
83. Thermodynamics, Institute for and Sustainable Propulsion Systems (2024). *Institute for Thermodynamics and Sustainable Propulsion Systems, TU Graz*. Inffeldgasse 19, 8010 Graz, Austria. Head: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Helmut Eichlseder. Graz University of Technology.
84. United Nations (2024). *Sustainable Transport*. UN Sustainable Development Goals – Thematic Topic. URL: <https://sdgs.un.org/topics/sustainable-transport>.
85. Walker, Joan L., Jieping Li, Sumeeta Srinivasan, and Denis Bolduc (2008). «Travel Demand Models in the Developing World: Correcting for Measurement Errors.» In: *Transportation*

- Research Record* 2049, pp. 70–77. DOI: [10.3141/2049-09](https://doi.org/10.3141/2049-09). URL: <https://doi.org/10.3141/2049-09>.
86. Wang, Meng, Winnie Daamen, Serge Hoogendoorn, and Bart van Arem (2012). «Potential Impacts of Ecological Adaptive Cruise Control Systems on Traffic and Environment.» In: *IET Intelligent Transport Systems*. Received: 15 April 2012; Revised: 1 October 2012; Accepted: 1 November 2012. DOI: [10.1049/iet-its.2012.0069](https://doi.org/10.1049/iet-its.2012.0069).
 87. Wang, Yang and Alessandra Boggio-Marzet (Oct. 2018). «Evaluation of Eco-Driving Training for Fuel Efficiency and Emissions Reduction According to Road Type.» In: *Transport Research Centre, TRANSyT, Universidad Politécnica de Madrid*.
 88. World Health Organization (WHO) (2023). *Transport, health and environment*. Accessed: April 2025. URL: <https://www.who.int/europe/news-room/fact-sheets/item/transport-health-and-environment>.
 89. Yannis, George, Katerina Folla, Dimitrios Nikolaou, Antonis Chaziris, Marianthi Kallidoni, Stratos Georgiopoulos, and Manos Parissis (2022). «Assessing Driver Safety Behaviour in Greece.» In: *Transportation Research Procedia*. Transport Research Arena (TRA) Conference. URL: <https://www.sciencedirect.com>.
 90. Yannis, George, Georgia Louca, Sophia Vardaki, and George Kanellaidis (2013). «Why do drivers exceed speed limits.» In: *European Transport Research Review* 5.2, pp. 63–70. DOI: [10.1007/s12544-013-0094-0](https://doi.org/10.1007/s12544-013-0094-0). URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12544-013-0094-0>.
 91. Yannis, George and Eva Michelaraki (2024). «Review of City-Wide 30 km/h Speed Limit Benefits in Europe.» In: *Sustainability* 16.11, p. 4382. DOI: [10.3390/su16114382](https://doi.org/10.3390/su16114382). URL: <https://doi.org/10.3390/su16114382>.
 92. Zimakowska-Laskowska, Magdalena and Piotr Laskowski (2024). «Comparison of Pollutant Emissions from Various Types of Vehicles.» In: *Combustion Engines* 197.2. Open Access under CC BY license, pp. 139–145. DOI: [10.19206/CE-181193](https://doi.org/10.19206/CE-181193). URL: <https://doi.org/10.19206/CE-181193>.
 93. Αδαμίδης, Φίλιππος (2017). «Διερεύνηση των επιδράσεων προτύπων οικολογικής και απότομης οδήγησης στα μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής και στις εκπομπές ρύπων.» Επιβλέπουσα: Ε.Ι. Βλαχογιάννη. Διπλωματική εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής.
 94. Δήμος Χανίων (Feb. 2018). *Σχέδιο Βιώσιμης Αστικής Κινητικότητας (ΣΒΑΚ) Δήμου Χανίων – Τεύχος Τεχνικών Δεδομένων*. Διεύθυνση Τεχνικών Υπηρεσιών, Τμήμα Μελετών. Χανιά, Ελλάδα.
 95. — (2021). *Στρατηγική Βιώσιμης Αστικής Ανάπτυξης Δήμου Χανίων 2021–2027*. <https://www.chania.gr/el/municipality/sxedia/svad2021-2027.html>. Επίσημο έγγραφο στρατηγικού σχεδιασμού.
 96. ΕΛΣΤΑΤ (2023). *Εκπομπές CO₂ στην Ελλάδα*. URL: <https://www.statistics.gr>.
 97. Ενέργειας, Υπουργείο Περιβάλλοντος και (2019). *Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα*. URL: <https://ypen.gr/esek>.

98. Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2019). *Πρότυπα απόδοσης εκπομπών CO₂ για αυτοκίνητα και βαν*. Ευρωπαϊκή Επιτροπή. URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/co2-emission-performance-standards-cars-and-vans_en (visited on 04/14/2025).
99. — (2022). *Απαντήσεις της Ευρωπαϊκής Επιτροπής στην Ειδική Έκθεση του Ευρωπαϊκού Ελεγκτικού Συνεδρίου*. https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR22_18/SR_Energy_Efficiency_Greece_EL.pdf.
100. — (July 4, 2023). «Η απαγόρευση της πώλησης νέων οχημάτων βενζίνης και ντίζελ στην ΕΕ από το 2035.» In: *Άρθρο*. URL: <https://www.europarl.europa.eu/news/el/headlines/society/20221019ST044572/i-apagorefsi-ton-ochimaton-benzinis-kai-ntizel-stin-ee-apo-to-2035>.
101. Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο (2019). *Εκπομπές CO₂: Πόσο "καθαρά" είναι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα; (γράφημα)*. Τελευταία ενημέρωση: 10-12-2024. Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. URL: <https://www.europarl.europa.eu/topics/el/article/20190313ST031218/ekpompes-co2-poso-kathara-einai-ta-ilektrika-autokinita-grafima>.
102. Νόμος 2696/1999 – Κώδικας Οδικής Κυκλοφορίας (Κ.Ο.Κ.) (1999). https://www.kodiko.gr/nomologia/download_fek?f=fek/1999/a/fek_a_57_1999.pdf. ΦΕΚ Α' 57/23.03.1999.
103. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (Dec. 2024). *1η Διετής Έκθεση Διαφάνειας στο Πλαίσιο της Σύμβασης-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή*. HELLENIC REPUBLIC MINISTRY OF ENVIRONMENT AND ENERGY, 1st Biennial Transparency Report under the United Nations Framework Convention on Climate Change. Διαθέσιμο από: ΥΠΕΝ (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας).
104. — (Apr. 2025a). *Εθνική Απογραφή Εκπομπών Αερίων του Θερμοκηπίου και Άλλων Αερίων για τα Έτη 1990–2023: Εθνικό Απογραφικό Έγγραφο*. Έκδοση Απριλίου 2025. Αθήνα, Ελλάδα: Ελληνική Δημοκρατία, Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. URL: <https://ypen.gr>.
105. — (2025b). *Πρώτηση της βιώσιμης κινητικότητας στην Ελλάδα: Υποστηρίζοντας την υιοθέτηση των ΣΒΑΚ*. Ανακτήθηκε τον Απρίλιο του 2025. URL: <https://ypen.gov.gr/chorikos-schediasmos/astikos-schediasmos/viosimi-kinitikotita/>.
106. Χανίων, Δήμος (Jan. 2020). *Μελέτη και Τεκμηρίωση για τη διαμόρφωση πράσινης διαδρομής και ποδηλατοδρόμου στον άξονα των οδών Χατζημιχάλη Γιάνναρη, Σκαλίδη και Πειραιώς, Δήμου Χανίων*. Tech. rep. Διεύθυνση Τεχνικών Υπηρεσιών, Τμήμα Μελετών, Προγραμμάτων και Δημοτικής Περιουσίας, Τεχνική μελέτη. Χανιά, Ελλάδα: Δήμος Χανίων.