



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

Διερεύνηση Επιπτώσεων Χρήσης Οχημάτων Εναλλακτικών Καυσίμων στα Αστικά Οδικά Δίκτυα

Διπλωματική Εργασία



Αβντουλάϊ Σιντορέλα

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

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής

Διερεύνηση Επιπτώσεων Χρήσης Οχημάτων Εναλλακτικών Καυσίμων στα Αστικά
Οδικά Δίκτυα
Συγγραφέας Διπλωματικής Εργασίας: Σιντορέλα Αβντουλάϊ
Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Ελένη Βλαχογιάννη
Αθήνα, 2024

National Technical University of Athens
School of Civil Engineering
Department of Transportation Planning and Engineering

**Investigating the Effects of Using Alternative Fuel Vehicles on Urban Road
Networks**

Thesis Author: Sidorela Avdulaj
Supervising Professor: Eleni Vlahogianni
Athens, 2024

Copyright© Σιντορέλα Αβντουλάι, 2024

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

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

Copyright © Sidorela Avdulaj, 2024

All Rights Reserved

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

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

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας ολοκληρώνονται και οι σπουδές μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Ως εκ τούτου θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέλαβαν στη διεκπεραίωσή της και σε όσους με ενθάρρυναν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου Κυρία Ελένη Βλαχογιάννη, Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για το παρών θέμα που με εμπιστεύτηκε να αναλάβω, καθώς και την πολύτιμη στήριξη και καθοδήγησή της σε κάθε στάδιο της παρούσας εργασίας.

Ταυτόχρονα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Κύριο Χάρη Χαλκιαδάκη, Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π., για τον πολύτιμο χρόνο και την υποστήριξη που μου παρείχε. Οι γνώσεις και οι συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας ήταν καθοριστικά στοιχεία για την υλοποίησή της.

Θα ήθελα σε αυτό το σημείο να ευχαριστήσω και τους καθηγητές της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών και ιδιαιτέρως του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής για τις πολύτιμες γνώσεις που μου μεταλαμπάδευσαν σε όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου, αλλά κυρίως τους ευχαριστώ που με έκαναν να αγαπήσω το αντικείμενο των σπουδών μου.

Ευχαριστώ τους φίλους μου που περάσαμε μαζί όλες τις αγωνίες αυτά τα φοιτητικά χρόνια. Για τις ατέλειωτες εργασίες που δουλεύαμε σαν ομάδα, και τα ατέλειωτα ξενύχτια που κάναμε πρόβα για τις παρουσιάσεις των εργασιών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που όλα αυτά τα χρόνια με στηρίζανε με κάθε τρόπο. Για τις συμβουλές τους και τις αγωνίες τους σε κάθε εξεταστική και την περηφάνεια την οποία αισθάνονται για την ολοκλήρωση των σπουδών μου σε μια απαιτητική σχολή παγκοσμίου κύρους.

Σιντορέλα Αβντουλάϊ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024

Διερεύνηση Επιπτώσεων Χρήσης Οχημάτων Εναλλακτικών Καυσίμων στα Αστικά Οδικά Δίκτυα

Συγγραφέας Διπλωματικής Εργασίας: Σιντορέλα Αβντουλάϊ

Επιβλέπουσα : Ελένη Ι. Βλαχογιάννη, Καθηγήτρια ΕΜΠ

ΣΥΝΟΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό να διερευνήσει την επίδραση διάφορων τεχνολογιών καυσίμων στους εκπεμπόμενους ρύπους σε αστικά δίκτυα μέσα από μοντέλα μικροσκοπικής προσομοίωσης κυκλοφορίας. Αφού έγινε η συλλογή των απαιτούμενων δεδομένων τόσο από την ΕΛΣΤΑΤ, όσο και από την EUROSTAT, διαμορφώθηκε το σενάριο βάσης, βάσει του οποίου γίνεται η σύγκριση των δέκα (10) εναλλακτικών σεναρίων. Στα σενάρια αυτά αυξάνεται κατά 10% το ποσοστό διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων στην κυκλοφορία. Παράλληλα, διερευνήθηκαν και δύο σενάρια μικτής σύνθεσης κυκλοφορίας. Το ένα σενάριο είναι μεσοπρόθεσμο και αφορά στο έτος 2025, ενώ το άλλο είναι μακροπρόθεσμο και αφορά στο έτος 2030. Στα σενάρια αυτά προσαρμόστηκε η παρούσα σύνθεση κυκλοφορίας, βάσει των ποσοστών αυξομείωσης των τεχνολογικών καυσίμων. Ως αποτέλεσμα, κυρίαρχος ρύπος είναι το CO₂. Ακολουθεί το CO και το NO_x. Ακόμη, η αύξηση του ποσοστού διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων επιδρά θετικά στη μείωση των εκλυόμενων ρύπων. Χαρακτηριστικά παρατηρείται ότι το σύνολο των ρύπων μειώθηκε κατά 380% μεταξύ του σεναρίου με την υπάρχουσα σύνθεση κυκλοφορίας και του σεναρίου με 100% διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων.

Λέξεις κλειδιά: Τεχνολογία Καυσίμων, Εκπεμπόμενοι Ρύποι, Μικροσκοπική Προσομοίωση, Εναλλακτικά Σενάρια, Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων, Μεσοπρόθεσμο, Μακροπρόθεσμο, Σύνθεση Κυκλοφορίας, Ποσοστό

Investigating the Effects of Using Alternative Fuel Vehicles on Urban Road Networks

Thesis Author: Sidorela Avdulaj

Supervising Professor: Eleni Vlahogianni

Abstract

This diploma thesis aims to investigate the effect of various fuel technologies on pollutants emitted in urban networks through microscopic traffic simulation models. After the collection of the required data by both ELSTAT and EUROSTAT, the baseline scenario was formulated, based on which the ten (10) alternative scenarios are compared. In these scenarios, the penetration rate of electric vehicles into traffic increases by 10%. At the same time, two mixed traffic composition scenarios were explored. One scenario is medium-term and concerns the year 2025, while the other is long-term and concerns the year 2030. In these scenarios, the current traffic composition was adjusted, based on the rates of variation of technology fuels. As a result, CO₂ is the dominant pollutant, followed by CO and NO_x. Moreover, the increase in the penetration rate of electric vehicles has a positive effect on the reduction of pollutants released. Characteristically, it is observed that the total emissions were reduced by 380% between the scenario with the existing traffic composition and the scenario with 100% penetration of electric vehicles.

Keywords: Fuel Technologies, Emitted Pollutants, Microscopic Simulation, Alternative Scenarios, Penetration Rate of Electric Vehicles, Medium-term, Long-term, Traffic Composition, Rate

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό να διερευνήσει τις τάσεις γύρω από τα εναλλακτικά καύσιμα στο τομέα των Μεταφορών (με έμφαση τις Οδικές Μεταφορές), να αποτυπώσει τους ρύπους οι οποίοι οφείλονται στις Μεταφορές, καθώς και να εξετάσει την επίδραση διάφορων τεχνολογιών καυσίμων στους εκλυόμενους ρύπους. Έχει ως στόχο να παρέχει μια επισκόπηση της διαδικασίας παραγωγής συνθετικών καυσίμων, του πιθανού κόστους τους, των πρακτικών χρήσης τους και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των συνθετικών καυσίμων που θα χρησιμεύσει ως χάρτης για την ανάπτυξή τους και θα ενθαρρύνει σχετικές επενδύσεις.

Για την επίτευξη των στόχων της παρούσας εργασίας, γίνεται αρχικά μία αναφορά στη γενικότερη ενεργειακή κατανάλωση στο τομέα των Μεταφορών και διερευνάται παράλληλα η οφειλόμενη στις Μεταφορές ατμοσφαιρική ρύπανση. Στη συνέχεια παρατίθενται στοιχεία για την αγορά εναλλακτικών καυσίμων, τόσο σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, όσο και στο πλαίσιο της Ελληνικής αγοράς. Επιπρόσθετα, ερευνώνται οι παράγοντες επιρροής της αποδοχής των εναλλακτικών καυσίμων στις οδικές μεταφορές. Στη συνέχεια διερευνώνται τα αποτελέσματα της σταδιακής αντικατάστασης του στόλου των οχημάτων από οχήματα εναλλακτικών καυσίμων μέσα από μια Μελέτη Περίπτωσης στην κεντρική περιοχή των Αθηνών. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, διαμορφώνονται σενάρια τα οποία αφορούν τόσο στη διερεύνηση της επίδρασης των ηλεκτρικών οχημάτων στην έκλυση αέριων ρύπων, όσο και σε κάποια μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα σενάρια μικτής σύνθεσης κυκλοφορίας (ύπαρξη οχημάτων με χρήση διαφόρων κατηγοριών καυσίμων). Τα σενάρια αξιολογούνται σε περιβάλλον μικροσκοπικής προσομοίωσης κυκλοφορίας. Όλα τα σενάρια συγκρίνονται με τις υφιστάμενες συνθήκες.

Η ανάλυση της διεθνούς βιβλιογραφίας σε θέματα ενέργειας και μεταφορών έδειξε ότι οι Μεταφορές είναι μέσα στους τέσσερις (4) τομείς οι οποίοι εκλύουν τις μεγαλύτερες ποσότητες CO₂ λόγω της κατανάλωσης ενέργειας που σχετίζεται με αυτές. Οι μεταφορές είναι υπεύθυνες για το μεγαλύτερο ποσοστό των εκπομπών πρωτογενών ρύπων. Όπως κάθε εστία καύσης, έτσι και οι κινητήρες των αυτοκινήτων και των άλλων τροχοφόρων εκπέμπουν μια σειρά ρύπων στο περιβάλλον. Η ρύπανση που προκαλείται απ' αυτούς, είναι αποτέλεσμα ατελούς καύσης και ο έλεγχός της αποτελεί ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο πρόβλημα, αφού οι κινητήρες τους λειτουργούν κάτω από συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες (αυξομείωση του φορτίου και των στροφών). Προϊόντα αυτών των εκπομπών είναι το Διοξείδιο του Άνθρακα (CO₂), το Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO) που προέρχεται κυρίως από τους βενζινοκινητήρες, τα Οξείδια του Αζώτου (NO_x), οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες (HC) και τέλος τα στερεά σωματίδια (PM_x), μεταξύ των οποίων κι ο καπνός, που προέρχεται κυρίως από τους κινητήρες ντίζελ.

Προς την κατεύθυνση της μετρίασης των αρνητικών επιπτώσεων των μεταφορών στο περιβάλλον, η αγορά των εναλλακτικών καυσίμων και κυρίως των ηλεκτρικών δείχνει να

κερδίζει έδαφος σε Ευρωπαϊκό και Εθνικό επίπεδο. Οχήματα μπαταρίας (BEVs) και τα plug-in hybrid ηλεκτρικά οχήματα (PHEVs) παρουσιάζουν διαρκώς αυξανόμενη τάση από το 2014 έως το 2020 στην ΕΕ. Στην Ελλάδα τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα αποτελούν το 35.46% επί του συνόλου των νέων οχημάτων για το 2022, ενώ, τα οχήματα τα οποία κινούνται με LPG και CNG, καθώς και με συνδυασμό τυπικού καυσίμου και LPG ή CNG αντιπροσωπεύουν μόνο ένα μικρό ποσοστό των νέων οχημάτων για το 2022.

Για την παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το εκτεταμένο αστικό οδικό δίκτυο του δακτυλίου της πόλης των Αθηνών (Athens Testbed) στο περιβάλλον μικροσκοπικής προσομοίωσης, Simulation of Urban Mobility (SUMO), που έχει αναπτυχθεί και συντηρείται από το Εργαστήριο Κυκλοφοριακής Τεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το Athens Testbed αποτελείται από 1293 διασταυρώσεις/ κόμβους και 2572 δρόμους/ συνδέσμους. Από άποψη κυκλοφοριακής ζήτησης, η πρωινή ώρα αιχμής λαμβάνεται υπόψιν. Κατά την ώρα αυτή, περί τα 86000 οχήματα εισέρχονται στο δίκτυο. Από τα οχήματα αυτά, το 99% αφορά σε επιβατικά οχήματα και το 1% βαρέα οχήματα (φορτηγά) (baseline scenario). Ακόμα, διαμορφώθηκαν δέκα (10) εναλλακτικά σενάρια στα οποία αυξανόταν το ποσοστό διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων κατά 10% ανά σενάριο. Επιπρόσθετα, διερευνήθηκαν και δύο (2) σενάρια μικτής σύνθεσης κυκλοφορίας. Το ένα σενάριο είναι μεσοπρόθεσμο και αφορά στο έτος 2025, ενώ το άλλο σενάριο είναι μακροπρόθεσμο και αφορά στο έτος 2030. Τα αποτελέσματα για τα σενάρια αυτά συγκρίνονται με το μηδενικό σενάριο (υπάρχουσα κατάσταση κυκλοφορίας).

Ο υπολογισμός της αέριας ρύπανσης από τις οδικές μεταφορές γίνεται με την βοήθεια του μοντέλου HBEFA 4.2 στο οποίο ποσοτικοποιούνται οι ακόλουθοι ρύποι: CO₂, CO, HC, NOx και PM_x (PM₁₀).

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προκύπτει ότι ο κυρίαρχος ρύπος είναι το CO₂. Ακολουθεί το NO_x, το CO κι έπειτα είναι οι υπόλοιποι ρύποι. Αναφορικά με τα σενάρια μεταβλητών ποσοστών διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων, παρατηρούνται σημαντικές μειώσεις στους συνολικούς εκλυόμενους ρύπους, συγκριτικά με την παρούσα κατάσταση. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για ποσοστό διείσδυσης 20% οι συνολικοί ρύποι μειώνονται κατά περίπου 24%, ενώ για ποσοστό διείσδυσης 70% οι συνολικοί ρύποι μειώνονται κατά περίπου 231%. Ένας βασικός λόγος ο οποίος οδήγησε σε τέτοια μείωση των ρύπων για αύξηση του ποσοστού διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων, είναι η χαμηλή μέση ταχύτητα (<40 χιλιομέτρων την ώρα για το σύνολο των προσομοιώσεων που διενεργήθηκαν). Η ταχύτητα αυτή ώθησε τα ηλεκτρικά οχήματα – όχι τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας – να μην κάνουν συχνή χρήση της Μηχανής Εσωτερικής Καύσης κι έτσι να μην εκλύουν μεγάλες ποσότητες αέριων ρύπων.

Ακόμα, τόσο το μεσοπρόθεσμο, όσο και το μακροπρόθεσμο σενάριο παρουσιάζουν σημαντική μείωση στους συνολικούς εκλυόμενους ρύπους, σε σχέση με την υπάρχουσα κατάσταση (212% και 1520% αντίστοιχα). Η διαφορά στους συνολικά εκλυόμενους ρύπους είναι σημαντική ακόμα και μεταξύ του μεσοπρόθεσμου και του μακροπρόθεσμου σεναρίου (417%). Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς σε αυτό το χρονικό ορίζοντα, είναι μεγάλο το αναμενόμενο ποσοστό διείσδυσης των εναλλακτικών καυσίμων στις Μεταφορές

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	8
Ευρετήριο πινάκων.....	9
Ευρετήριο Διαγραμμάτων.....	9
Ακρωνύμια.....	11
1.Εισαγωγή.....	13
1.1 Ενέργεια και Μεταφορές.....	13
<i>Διάγραμμα.....</i>	<i>14</i>
Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας.....	15
Ορισμός.....	15
1.2 Στόχοι της Διπλωματικής Εργασίας.....	16
1.2 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας.....	16
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	17
2.1 Επιπτώσεις Οδικών Μεταφορών στο Περιβάλλον.....	17
2.2 Η Αγορά Εναλλακτικών Καυσίμων.....	20
3.0 Μεθοδολογική Προσέγγιση.....	24
3.1 Ροή Εργασιών.....	24
3.2 Βασικές Αρχές Προσομοίωσης Κυκλοφορίας.....	25
3.3 Μοντέλα Εκτίμησης Ρύπων.....	25
3.3.1 Μακροσκοπική Προσομοίωση Κυκλοφορίας.....	25
3.3.2 Μικροσκοπική Προσομοίωση Κυκλοφορίας.....	26
3.3.3 ΗΒΕΦΑ.....	27
4. Εφαρμογή και Αποτελέσματα.....	28
4.1 Διαμόρφωση Σεναρίων.....	28
4.1 Οδικό Δίκτυο.....	28
4.3 Εκτίμηση Ρύπων.....	29
4.4 Αποτελέσματα.....	29
4.4.1 Ηλεκτροκίνηση ως η επικρατούσα τεχνολογία.....	29
4.4.2 Σενάρια μεσοπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης εξέλιξης τεχνολογιών εναλλακτικών καυσίμων.....	34
5. Συμπεράσματα.....	36

5.1 Γενικά	36
5.2 Βασικά Συμπεράσματα	37
5.3 Περιορισμοί και Μελλοντική Έρευνα	37
Βιβλιογραφία	38

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Το “Athens Testbed” (ιδιοκτησία του Εργαστηρίου Κυκλοφοριακής Τεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου).....	29
--	----

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1: Πίνακας ακρωνυμίων.....	9
Πίνακας 2: Συντελεστές ετήσιας ποσοστιαίας αυξομείωσης του στόλου επιβατικών οχημάτων, ανά κατηγορία καυσίμου, στην ΕΕ για τα έτη 2019-2030.....	19
Πίνακας 3: Παράδειγμα βάσης δεδομένων HBEFA.....	30
Πίνακας 4: Εκκλύμενοι ρύποι ανά σενάριο.....	31
Πίνακας 5: Ποσοστό μείωσης συνολικών εκκλύμενων ρύπων ανά σενάριο.....	35
Πίνακας 6: Εκκλύμενοι ρύποι ανά σενάριο.....	35

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Διαφορά στη συνολική παροχή ενέργειας (σε exajoules-EJ) για τα έτη 2021 και 2022, καθώς και σχετική εκτίμηση μέχρι το 2023 (IEA, 2022).....	14
Διάγραμμα 2: Τελική κατανάλωση ενέργειας κατά τρόπο μεταφοράς μέχρι το 2016 (EEA, 2018).....	14
Διάγραμμα 3: Τελική κατανάλωση ενέργειας (σε exajoules-EJ) στις Μεταφορές κατά μέσο και τύπο καυσίμου (IEA, 2022).....	15
Διάγραμμα 4: Τελική κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα, στην ΕΕ για το έτος 2021 (Eurostat, 2021).....	18
Διάγραμμα 5: Εκπομπές CO ₂ (σε Gt), ανά τομέα, για τα έτη 2019-2022 (IEA, 2022). (IEA, 2022).....	18
Διάγραμμα 6: Κατανάλωση ενέργειας στις Μεταφορές (σε mill.terajoules-TJ), ανά τύπο	

καυσίμου (EEA, 2018).....	19
Διάγραμμα 7: Κατανάλωση ενέργειας στις Μεταφορές (σε mill. Terajoules-TJ), ανά τύπο μεταφοράς (Eurostat,2021)	19
Διάγραμμα 8: (α) Εκλυόμενη ποσότητα CO2 (σε Kt) για τα έτη 2010 – 2021 (β) Εκλυόμενη ποσότητα CH4, N2O, NOX, CO, NMVOC και SO2 (σε Kt) για τα έτη 2010 – 2021.....	20
Διάγραμμα 9: Αριθμός επιβατικών αυτοκινήτων εναλλακτικών καυσίμων που ταξινομήθηκαν την περίοδο 2014-2020 στην ΕΕ (ΕΕΑ, 2018).....	21
Διάγραμμα 10: Αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας στην ΕΕ (Eurostat, 2022).....	21
Διάγραμμα 11: Μερίδιο των ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας επί του συνολικού αριθμού των αυτοκινήτων στην ΕΕ (Eurostat, 2022).....	22
Διάγραμμα 12: Διακύμανση των ποσοστών των νέων οχημάτων ανά κατηγορία καυσίμου για τα έτη 2020-2022 (Στοιχεία ΕΛΣΤΑΤ).....	23
Διάγραμμα 13: Ποσοστά νέων οχημάτων ανά τύπο καυσίμου για το 2022 (Στοιχεία ΕΛΣΤΑΤ).....	23
Διάγραμμα 14: Διάγραμμα Μεθοδολογικής Προσέγγισης.....	24
Διάγραμμα 15: Ποσοστό ηλεκτρικών οχημάτων και ποσοστό άλλων οχημάτων ανά σενάριο της Μελέτης Περίπτωσης.....	28
Διάγραμμα 16: Συνολικοί εκλυόμενοι αέριοι ρύποι (σε tn).....	31
Διάγραμμα 17: Εκλυόμενοι ρύποι CO2 (σε tn) ανά Σενάριο.....	31
Διάγραμμα 18: Εκλυόμενοι ρύποι CO (σε kg) ανά Σενάριο.....	32
Διάγραμμα 19: Εκλυόμενοι ρύποι HC (σε g) ανά Σενάριο.....	32
Διάγραμμα 20: Εκλυόμενοι ρύποι NOX (σε kg) ανά Σενάριο.....	33
Διάγραμμα 21: Εκλυόμενοι ρύποι PMX (σε kg) ανά Σενάριο.....	33

Ακρωνύμια

Ακρωνύμιο	Πλήρης όρος
BEVs	Ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας
CO	Μονοξείδιο του Άνθρακα
CO2	Διοξείδιο του Άνθρακα
EC	European Commission - Ευρωπαϊκή Επιτροπή
EEA	Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος - European Environment Agency
EJ	Exajoules
HBEFA	Handbook of Emission Factors for Road Transport
HC	Άκαυστοι υδρογονάνθρακες
IEA	Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας
Kt	Χιλιοτόνοι
LPG	Υγραέριο
MOVES	Motor Vehicle Emission Simulator
NG	Φυσικό αέριο
NOX	Οξειδία του Αζώτου
OICA	International Organization of Motor Vehicle Manufacturers - Διεθνής Οργανισμός Κατασκευαστών Μηχανοκίνητων Οχημάτων
PHEM	Passenger car and Heavy-duty Emission Model
PHEV	Plug-in hybrid ηλεκτρικά οχήματα
PMX	Στερεά σωματίδια
SO2	Διοξείδιο του θείου
SUMO	Simulation of Urban Mobility

TJ	Terajoules
VOCs	Πτητικές οργανικές ενώσεις
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΕΛΣΤΑΤ	Ελληνική Στατιστική Αρχή
ΕΜΠ	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
ΥΠΕΝ	Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας

1.Εισαγωγή

1.1 Ενέργεια και Μεταφορές

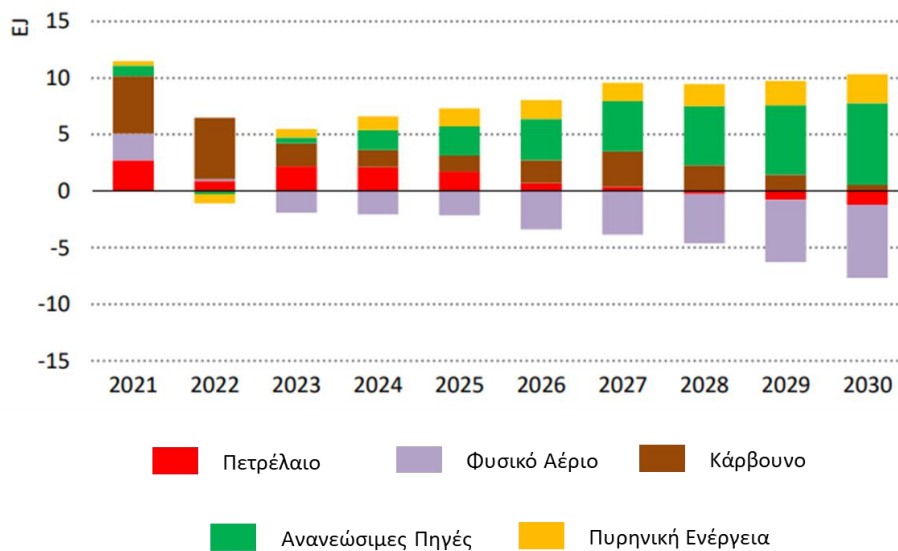
Η κλιματική αλλαγή και η ενεργειακή ασφάλεια είναι οι βασικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν σήμερα οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής σε παγκόσμιο επίπεδο. Συγκεκριμένα, μια βασική ανησυχία είναι η εξασφάλιση επαρκούς, αξιόπιστης και προσιτής πρόσβασης στον ενεργειακό εφοδιασμό, αφενός για την κάλυψη των βασικών ανθρώπινων αναγκών και τη διατήρηση της οικονομικής ανάπτυξης, αφετέρου για την προσπάθεια μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και της κατανάλωσης ορυκτής ενέργειας (Gül, 2008). Διεθνείς συμφωνίες όπως το στρατηγικό πλαίσιο για μία Κλιματικά Ουδέτερη Ευρώπη έως το 2050 (EC, 2019α) και η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (EC, 2019β) αναδεικνύουν την σημαντικότητα του ζητήματος.

Οι Μεταφορές διαδραματίζουν βασικό ρόλο σε αυτή την αναζήτηση λόγω της μεγάλης εξάρτησης από τα πετρελαϊκά προϊόντα και την ολοένα αυξανόμενη ζήτηση για μετακινήσεις. Οι Μεταφορές αποτελούν παγκοσμίως μία από τις σημαντικότερες πηγές ανθρωπογενών εκπομπών, οι οποίες παράγουν περίπου το 14% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου με το μεγαλύτερο ποσοστό να προέρχεται από τις οδικές μεταφορές, ακολουθούμενη από τις αεροπορικές και θαλάσσιες μεταφορές (Gül, 2008).

Συνεπώς, ο τομέας αυτός έχει μεγάλη ευθύνη στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από την καύση πετρελαϊκών καυσίμων και είναι σε μεγάλο βαθμό ευάλωτος λόγω των ασταθών αγορών πετρελαίου και της λειψυδρίας των πόρων.

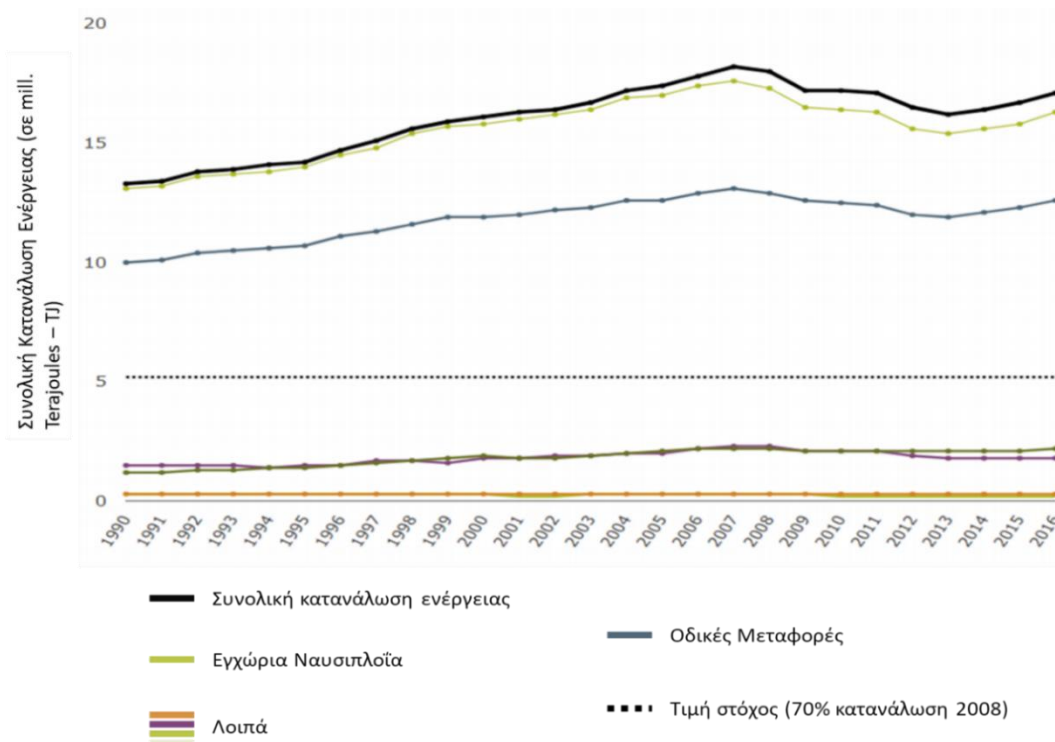
Τα εναλλακτικά καύσιμα, αποτελούν δυνητικά υποκατάστατα των καυσίμων πετρελαίου που μπορούν να βοηθήσουν να ξεπεραστεί η εξάρτηση της μεταφοράς από το πετρέλαιο και η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Τα καύσιμα αυτά διαθέτουν πολλά χαρακτηριστικά που τα καθιστούν κατάλληλα για να ανταποκριθούν στις παραπάνω προκλήσεις, ωστόσο αρκετοί είναι αυτοί που ισχυρίζονται ότι εξακολουθούν να απαιτούνται σημαντικές προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης για να καταστούν εμπορικά βιώσιμα (Bauen et al., 2017).

Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (IEA, 2022), τα ορυκτά καύσιμα παραμένουν η κυριότερη πηγή κάλυψης ενεργειακών αναγκών. Βάσει προβλέψεων όμως, ήδη από το 2022, παρατηρείται μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων (κι άλλων παραδοσιακών πηγών ενέργειας) και παράλληλα αύξηση της χρήσης εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Η τάση αυτή κορυφώνεται με την πάροδο των ετών, κάτι το οποίο παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1.



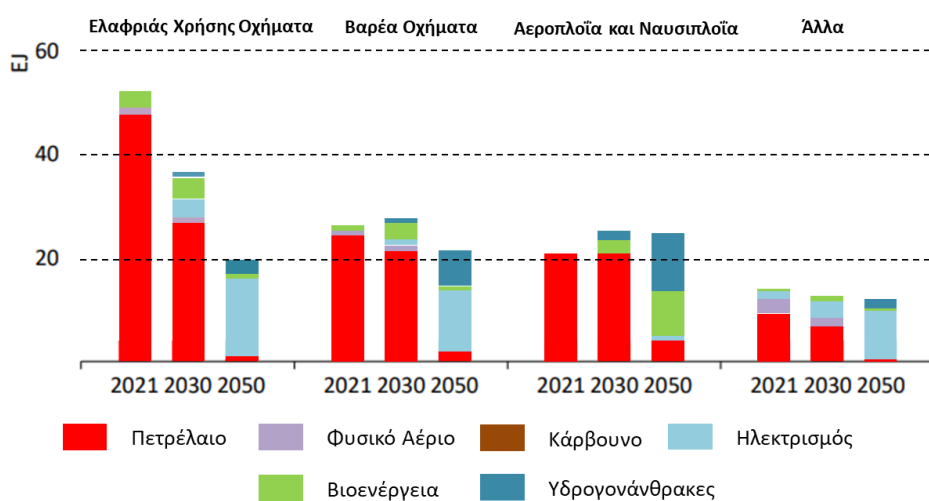
Διάγραμμα 1: Διαφορά στη συνολική παροχή ενέργειας (σε exajoules – EJ) για τα έτη 2021 και 2022, καθώς και σχετική εκτίμηση μέχρι το 2023 (IEA, 2022).

Σύμφωνα με στοιχεία του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (European Environment Agency - ΕΕΑ), μέχρι το έτος 2007 η κατανάλωση ενέργειας στις μεταφορές στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) αυξανόταν σταθερά (ΕΕΑ, 2018). Ωστόσο, στη συνέχεια παρατηρήθηκε μια έντονη μεταβολή στην εξέλιξη της (Διάγραμμα 2). Διαπιστώθηκε μια μείωση της κατανάλωσης το έτος 2008, η οποία συνεχίστηκε μέχρι το έτος 2013, ενώ στο αμέσως επόμενο διάστημα ακολούθησαν μικρές αυξήσεις των τιμών. Η μείωση αυτή, που παρατηρήθηκε από το 2008, οφείλεται στην εξοικονόμηση ενέργειας στις οδικές μεταφορές και είναι αποτέλεσμα της γενικότερης ενεργειακής απόδοσης των καυσίμων.



Διάγραμμα 2: Τελική κατανάλωση ενέργειας κατά τρόπο μεταφοράς μέχρι το 2016 (ΕΕΑ, 2018).

Βάσει των εκτιμήσεων του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (IEA, 2022), έχοντας ως έτος-βάση το 2021, προβλέπεται μία στροφή στη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο τομέα των Μεταφορών για τα ακόλουθα έτη. Συγκεκριμένα, αξίζει να αναφερθεί η εκτίμηση για μεγάλη αύξηση της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας, μέχρι το έτος 2050, στα ελαφριά οχήματα και στην κατηγορία των λοιπών οχημάτων. Η εκτίμηση αυτή είναι σε απόλυτη συμφωνία με τη γενικότερη εικόνα στην κατανάλωση ορυκτών καυσίμων και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Στο Διάγραμμα 3 παρουσιάζονται οι τιμές για το έτος 2021 και οι προβλέψεις για τα έτη 2030 και 2050.



Διάγραμμα 3: Τελική κατανάλωση ενέργειας (σε exajoules – EJ) στις Μεταφορές, κατά μέσο και τύπο καυσίμου (IEA, 2022).

Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας

Ορισμός

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ή ήπιες, ή πράσινη ενέργεια είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, ο ήλιος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Συγκεκριμένα σύμφωνα με την οδηγία 2009/28/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, ως ενέργεια από ανανεώσιμες μη ορυκτές πηγές θεωρείται η αιολική, ηλιακή, αεροθερμική, γεωθερμική, υδροθερμική και ενέργεια των ωκεανών, υδροηλεκτρική, από βιομάζα, από τα εκλυόμενα στους χώρους υγειονομικής ταφής αέρια, από αέρια μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και από βιοαέρια.

Ο όρος «ήπιες» αναφέρεται σε δυο βασικά χαρακτηριστικά τους. Καταρχάς, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερον, πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, πολύ «φιλικές» στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι

υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Έτσι θεωρούνται από πολλούς μία αφετηρία για την επίλυση των οικολογικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει η Γη. Τελευταία, από την Ευρωπαϊκή Ένωση, αλλά και από πολλά μεμονωμένα κράτη, υιοθετούνται νέες πολιτικές για τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που προάγουν τέτοιες εσωτερικές πολιτικές και για τα κράτη μέλη. Οι ΑΠΕ αποτελούν τη βάση του μοντέλου οικονομικής ανάπτυξης της πράσινης οικονομίας

1.2 Στόχοι της Διπλωματικής Εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι να διερευνήσει τις πιθανές επιδράσεις των τεχνολογιών εναλλακτικών καυσίμων στις Οδικές Μεταφορές σε αστικά δίκτυα. Στο πλαίσιο αυτό διερευνώνται οι επιπτώσεις στην κυκλοφορία και τις εκπομπές ρύπων από τη σταδιακή αντικατάσταση του στόλου των οχημάτων από οχήματα που κινούνται με εναλλακτικό καύσιμο.

Για τον σκοπό αυτό, δομούνται σενάρια τα οποία εξετάζονται στο περιβάλλον μικροσκοπικής προσομοίωσης SUMO, που έχει αναπτυχθεί και συντηρείται από το Εργαστήριο Κυκλοφοριακής Τεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ. Βάση δεδομένων για την ανάπτυξη των σεναρίων αποτέλεσε η ΕΛΣΤΑΤ. Ωστόσο, λόγω έλλειψης ποσοστού ηλεκτρικών οχημάτων στον υπάρχοντα στόλο επιβατικών οχημάτων, κρίθηκε αναγκαία η χρήση του ποσοστού όπως εκείνο προκύπτει από δεδομένα της EUROSTAT.

Επίσης, η έρευνα του Harrison (2019) λήφθηκε υπόψιν για τη διαμόρφωση δέκα (10) εναλλακτικών σεναρίων στα οποία αυξανόταν το ποσοστό διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων κατά 10% ανά σενάριο. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε το Μοντέλο HBEFA (Δυναμικό Μοντέλο που υπάγεται στην κατηγορία Μοντέλων Κατάστασης της Κυκλοφορίας), το οποίο αποτελεί ουσιαστικά μια βάση δεδομένων για συντελεστές εκπομπών ρύπων από οδικές μεταφορές.

1.2 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα Εργασία δομείται ως εξής: Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μία εισαγωγή στην κατανάλωση ενέργειας στο τομέα των Μεταφορών. Αρχικά γίνεται μία γενικότερη αναφορά στις ενεργειακές ανάγκες των Μεταφορών. Στη συνέχεια διερευνώνται περαιτέρω οι επιπτώσεις των Οδικών Μεταφορών στο Περιβάλλον. Τέλος γίνεται μία αναφορά στην αγορά των εναλλακτικών καυσίμων και παρουσιάζονται επίσης οι παράγοντες επιρροής της αποδοχής των εναλλακτικών Καυσίμων.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η Μεθοδολογική Προσέγγιση, η οποία εξετάζει την επίδραση των εναλλακτικών καυσίμων στους εκκλύμενους ρύπους στα δέκα (10) εναλλακτικά σενάρια που δημιουργήθηκαν. Για το λόγο αυτό διερευνάται τόσο η επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων, όσο και διάφορων τεχνολογιών εναλλακτικών καυσίμων σε συνθήκες μικτής κυκλοφορίας. Για την παρούσα εργασία, το αστικό οδικό δίκτυο του δακτυλίου της πόλης των Αθηνών χρησιμοποιήθηκε.

Παράλληλα, στο Κεφάλαιο 4 γίνεται περιγραφή της διαδικασίας προσομοίωσης και ανάλυση των αποτελεσμάτων. Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 γίνεται μία σύνοψη της έρευνας και παρουσιάζονται κάποια συμπεράσματα.

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Επιπτώσεις Οδικών Μεταφορών στο Περιβάλλον

Οι μεταφορές είναι υπεύθυνες για το μεγαλύτερο ποσοστό των εκπομπών πρωτογενών ρύπων. Όπως κάθε εστία καύσης, έτσι και οι κινητήρες των αυτοκινήτων και των άλλων τροχοφόρων εκπέμπουν μια σειρά ρύπων στο περιβάλλον. Η ρύπανση που προκαλείται απ' αυτούς, είναι αποτέλεσμα ατελούς καύσης και ο έλεγχός της αποτελεί ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο πρόβλημα, αφού οι κινητήρες τους λειτουργούν κάτω από συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες (αυξομείωση του φορτίου και των στροφών). Προϊόντα αυτών των εκπομπών είναι το Διοξείδιο του Άνθρακα (CO₂), το Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO) που προέρχεται κυρίως από τους βενζινοκινητήρες, τα Οξειδία του Αζώτου (NO_x), οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες (HC) και τέλος τα στερεά σωματίδια (PM_x), μεταξύ των οποίων κι ο καπνός, που προέρχεται κυρίως από τους κινητήρες πετρελαίου.

Διοξείδιο του Άνθρακα (CO₂): Αποτελεί το βασικότερο προϊόν της καύσης καυσίμου. Μπορεί να μην είναι τοξικό αλλά συμβάλει σημαντικά στην υπερθέρμανση του πλανήτη και θα πρέπει να μειωθεί, σύμφωνα με τον ΟΗΕ και την ΕΕ, μέσω της χρήσης εναλλακτικών μορφών καυσίμων που παράγουν λιγότερο CO₂ είτε μέσω της προώθησης οχημάτων μηδενικών εκπομπών, όπως τα ηλεκτρικά (BEVs κ.α.) είτε με την βελτίωση των επιδόσεων των θερμικών κινητήρων (ΟΙCΑ, 2023)

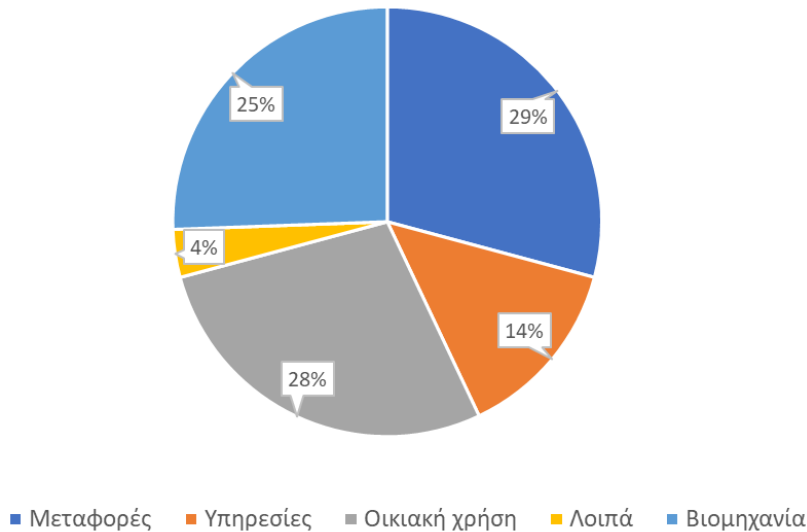
Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO): Παράγεται από την ατελή καύση του καυσίμου και είναι πολύ τοξικό, ιδιαίτερα σε μεγάλες συγκεντρώσεις. Συμβάλει στην παραγωγή όζοντος στα χαμηλά επίπεδα της ατμόσφαιρας και νέφους. Μπορεί να περιοριστεί μέσω της αποτελεσματικότερης καύσης και να μειωθεί περαιτέρω με οξείδωση μετά την καύση, σε έναν Καταλυτικό Μετατροπέα.

Υδρογονάνθρακες (HC): Είναι γνωστοί και ως Πτητικές Οργανικές Ενώσεις (VOCs) και αποτελούν ιδιαίτερα τοξικούς ρύπους ιδιαίτερα για το αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου. Παράγονται μέσω ατελούς ή μερικής καύσης και ευθύνονται για το φωτοχημικό νέφος και για την παραγωγή όζοντος. Μπορούν να μειωθούν μέσω αποτελεσματικότερης καύσης στον κινητήρα και σε επόμενο στάδιο να μειωθούν με οξείδωση μετά την καύση, σε έναν Καταλυτικό Μετατροπέα.

Οξειδία του Αζώτου (NO_x): Παράγονται όταν ο αέρας φτάνει σε υψηλές θερμοκρασίες όπως είναι σε έναν κινητήρα. Τα NO_x αποτελούν το μονοξείδιο του αζώτου NO και το διοξείδιο του αζώτου NO₂. Το NO_x συμβάλλει τόσο στη φωτοχημική αιθαλομίχλη όσο και στην όξινη βροχή και μπορεί να είναι ερεθιστικό για τους πνεύμονες. Σε αντίθεση με το CO και το HC δεν μπορεί να απομακρυνθεί με οξείδωση. Η αντίθετη διαδικασία - η απομάκρυνση του οξυγόνου, γνωστή ως "αναγωγή" είναι απαραίτητη για να το μετατρέψει σε άζωτο και οξυγόνο (ΟΙCΑ, 2023; ΕΕΑ, 2016).

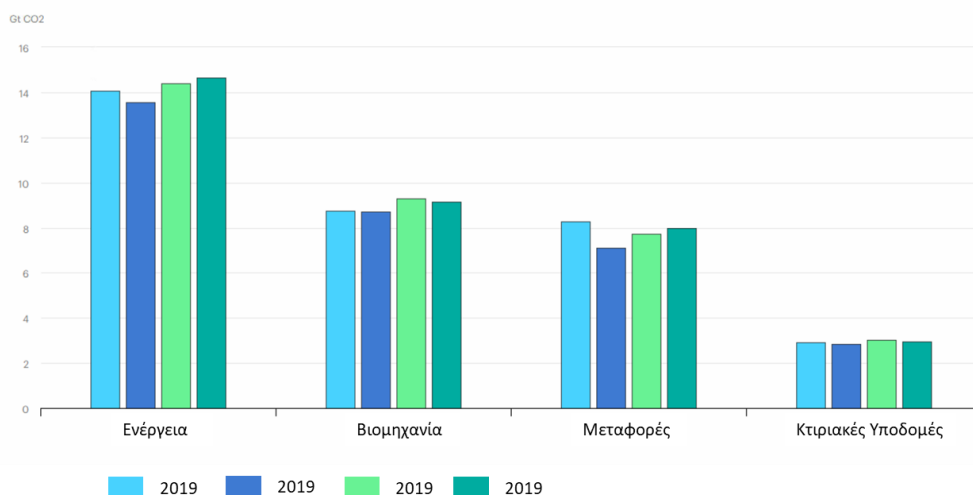
Στερεά Σωματίδια (PM): Παράγονται μέσω της ατελούς καύσης και αποτελούν ένα σύνθετο μίγμα πρωτογενών και δευτερογενών PM. Τα πρωτογενή απελευθερώνονται απευθείας στην ατμόσφαιρα, ενώ τα δευτερογενή σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα μέσω αντιδράσεων με το διοξείδιο του θείου (SO₂), τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και κάποιες πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs). Αποτελεί ιδιαίτερα τοξικό ρύπο καθώς προκαλεί καρδιαγγειακές, πνευμονικές παθήσεις και καρκίνους.

Η τελική ανάλυση της χρήσης ενέργειας το 2021 στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) παρουσίαζε τρεις κυρίαρχες κατηγορίες: τις μεταφορές (29.2%), την οικιακή χρήση (27.9%) και τη βιομηχανία (25.6 %) (Eurostat, 2021). Τα παραπάνω παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4.



Διάγραμμα 4: Τελική κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα, στην ΕΕ για το έτος 2021 (Eurostat, 2021).

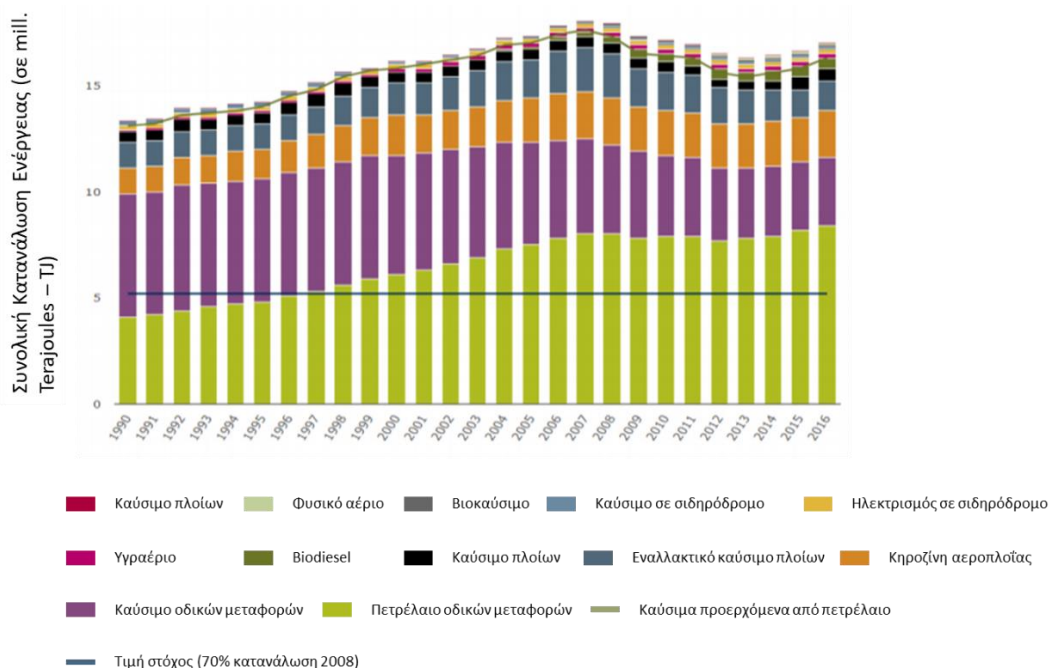
Ακόμη, και βάσει δεδομένων των ετών 2019 - 2022 (IEA, 2022), οι Μεταφορές είναι μέσα στους τέσσερις (4) τομείς οι οποίοι εκλύουν τις μεγαλύτερες ποσότητες CO₂ λόγω της κατανάλωσης ενέργειας που σχετίζεται με αυτές. Αυτό αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 5.



Διάγραμμα 5 Εκπομπές CO₂ (σε Gt), ανά τομέα, για τα έτη 2019 – 2022 (IEA, 2022). (IEA, 2022).

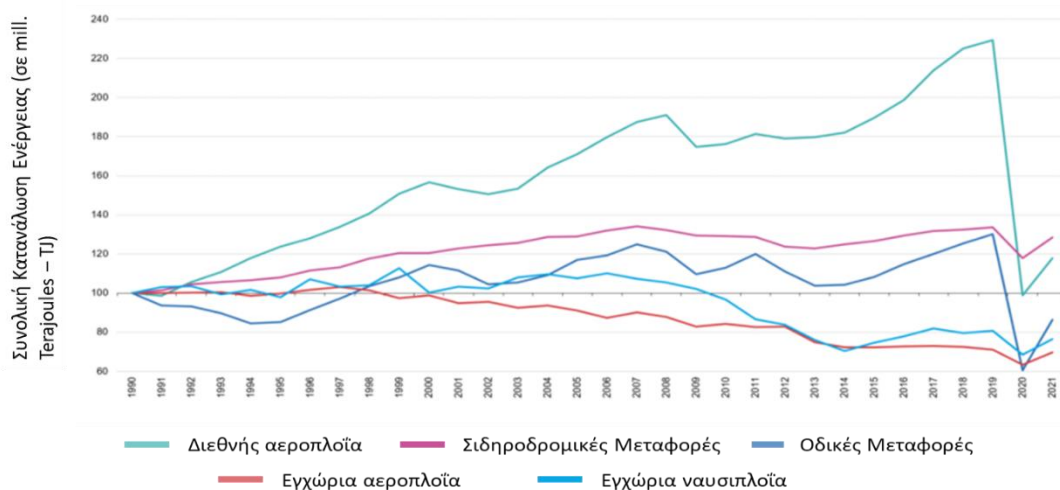
Το 2016, τα καύσιμα τα οποία είναι προϊόντα πετρελαίου αντιπροσώπευαν το 95% όλων των καυσίμων που καταναλώθηκαν. Σύμφωνα με τη Λευκή Βίβλο (EC, 2000), στην οποία

εκτιμήθηκαν οι επιπτώσεις από την συνεχόμενη κατανάλωση πετρελαίου στις μεταφορές, βασικός στόχος είναι η μείωση κατά 70% (από τα επίπεδα του 2008) της κατανάλωσης πετρελαίου έως το έτος 2050. Ακολουθούν τα αποτελέσματα της κατανάλωσης ενέργειας στις μεταφορές ανά τύπο καυσίμου, στο Διάγραμμα 6. Η πράσινη γραμμή αντιπροσωπεύει τη συνολική κατανάλωση πετρελαίου, ενώ η μπλε γραμμή αντιπροσωπεύει τη μείωση κατά 70% σε σχέση με τα επίπεδα του 2008 με σκοπό να επιτευχθεί ο στόχος της Λευκής Βίβλου.



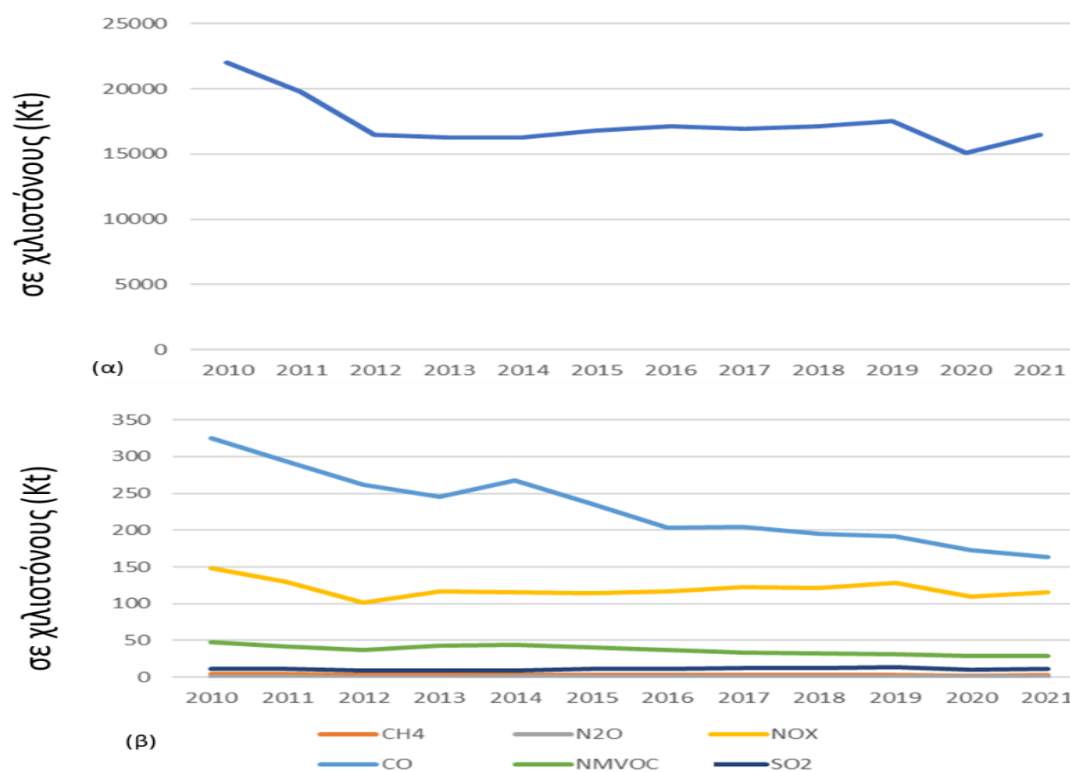
Διάγραμμα 6: Κατανάλωση ενέργειας στις Μεταφορές (σε mill. terajoules – TJ), ανά τύπο καυσίμου (EEA, 2018).

Με πιο πρόσφατα δεδομένα, η αυξητική τάση της κατανάλωσης ενέργειας στο τομέα των μεταφορών παρατηρείται και για τα έτη μετά το 2016 (Eurostat, 2021). Πτωτική τάση ωστόσο, παρατηρήθηκε το 2020 λόγω της πανδημίας COVID-19. Το Διάγραμμα 7 παρουσιάζει τη τάση της κατανάλωσης ενέργειας στο τομέα των Μεταφορών, ανά τύπο μεταφορικού μέσου, για τα έτη 1990 - 2021.



Διάγραμμα 7: Κατανάλωση ενέργειας στις Μεταφορές σε mill. terajoules ανά τύπο μεταφοράς (Eurostat, 2021).

Σχετικά με την εικόνα της εκπομπής αέριων ρύπων από τις Μεταφορές στην Ελλάδα, και βάσει στοιχείων που αντλήθηκαν από την Ετήσια Εθνική Απογραφή Αερίων του Θερμοκηπίου για το έτος 2021 (ΥΠΕΝ, 2023), παρουσιάζεται παρακάτω η τάση έκλυσης αέριων ρύπων από τις Μεταφορές στον Ελλαδικό χώρο. Παρατηρείται ότι το CO₂ εκλύεται σε αρκετά μεγαλύτερες ποσότητες σε σχέση με τα υπόλοιπα αέρια του θερμοκηπίου, και για το λόγο αυτό δεν απεικονίζεται στο ίδιο πλαίσιο με τους υπόλοιπους ρύπους (Διάγραμμα 8).



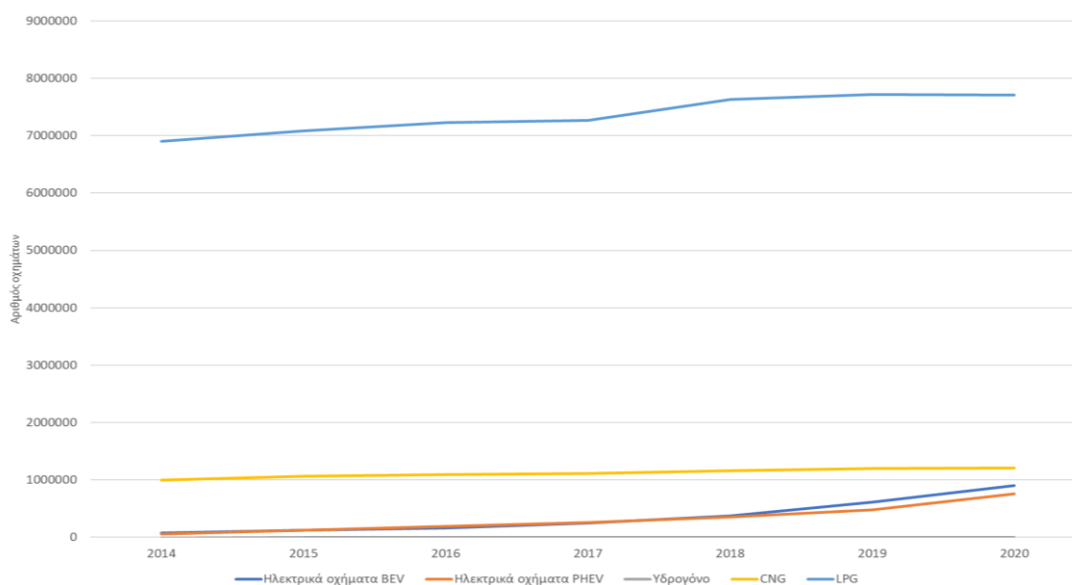
Διάγραμμα 8: (α) Εκλυόμενη ποσότητα CO₂ (σε Kt) για τα έτη 2010 – 2021 (β) Εκλυόμενη ποσότητα CH₄, N₂O, NOX, CO, NMVOC και SO₂ (σε Kt) για τα έτη 2010 – 2021.

Όπως και στα δεδομένα για την ΕΕ, έτσι κι εδώ παρατηρείται μία μείωση των εκπομπών αερίων ρύπων (κυρίως CO₂) για το έτος 2020. Αυτό οφείλεται στις συνθήκες που επικρατούσαν λόγω της πανδημίας COVID-19. Φαίνεται επίσης ότι, παρά τη μείωση αυτή, το 2021 η έκλυση αέριων ρύπων έλαβε την ανιούσα.

2.2 Η Αγορά Εναλλακτικών Καυσίμων

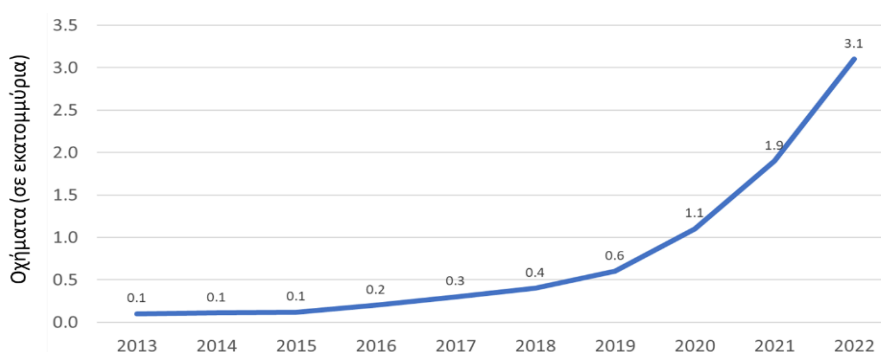
Μια σημαντική αύξηση στο ποσοστό της αγοράς αυτοκινήτων εναλλακτικού καυσίμου παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια του έτους 2008-2009, την οποία ωστόσο ακολούθησε σημαντική πτώση των πωλήσεων μέχρι το έτος 2011 σύμφωνα με την έκθεση του ΕΕΑ για το 2018 (ΕΕΑ, 2018) (Διάγραμμα 9). Για τα επόμενα έτη έως το 2015 οι πωλήσεις παρουσιάζουν σταδιακή ανάκαμψη, δημιουργώντας θετικές προοπτικές για το μέλλον. Τα τελευταία χρόνια, τα αυτοκίνητα με υγραέριο (LPG) διαδραματίζουν κυρίαρχο ρόλο με ποσοστό περίπου 4,3% του συνολικού αριθμού των επιβατικών αυτοκινήτων. Η Πολωνία και η Ιταλία είναι οι κορυφαίες χώρες οχημάτων υγραερίου στην ΕΕ. Τα αυτοκίνητα φυσικού αερίου (NG), ο αριθμός των οποίων σχεδόν τριπλασιάστηκε μεταξύ του 2005 και του 2015, κατέχουν σημαντική θέση σε χώρες όπως η Ιταλία και το Ηνωμένο Βασίλειο. Η εγγραφή νέων αυτοκινήτων NG παρουσιάζει αυξανόμενη τάση κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, ωστόσο το μερίδιό τους παραμένει χαμηλό.

Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει να γίνει στα ηλεκτρικά οχήματα. Αρχικά, με τον όρο ηλεκτρικά οχήματα εννοούμε μια σειρά διαφορετικών τύπων οχημάτων όπως τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (BEVs) και τα plug-in hybrid ηλεκτρικά οχήματα (PHEVs). Στο Διάγραμμα 9 παρατηρείται ότι τα οχήματα τέτοιου τύπου είναι εκείνα τα οποία παρουσιάζουν διαρκώς αυξανόμενη τάση από το 2014 έως το 2020 στην ΕΕ (EC, 2021). Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται μία αύξηση 1105% στα BEVs και 1231% στα PHEVs. Αξίζει να αναφερθεί ότι και οι υπόλοιπες κατηγορίες οχημάτων εναλλακτικών καυσίμων παρουσιάζουν αύξηση για τα έτη αυτά, όχι όμως της ίδιας τάξης μεγέθους με τα ηλεκτρικά οχήματα.



Διάγραμμα 9: Αριθμός επιβατικών αυτοκινήτων εναλλακτικών καυσίμων που ταξινομήθηκαν την περίοδο 2014-2020 στην ΕΕ (EEA, 2018).

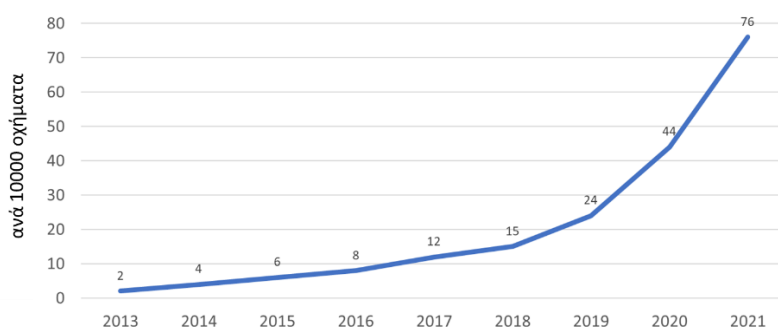
Επικεντρώνοντας περισσότερο στα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας, το 2013, υπήρχαν μόνο 52.000 πλήρως ηλεκτρικά αυτοκίνητα στην ΕΕ σύμφωνα με τη Eurostat (Eurostat, 2022). Ο αριθμός αυτός αυξήθηκε αρχικά σταδιακά, φθάνοντας τις 600.000 το 2019, και έκτοτε ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας κινείται αυξητικά κάθε χρόνο. Το 2022, η αγορά των ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας ξεπέρασε τα τρία (3) εκατομμύρια οχήματα. Τα παραπάνω αποτυπώνονται στο Διάγραμμα 10.



Διάγραμμα 10: Αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας στην ΕΕ (Eurostat, 2022).

Το μερίδιο των πλήρως ηλεκτρικών αυτοκινήτων επί του συνολικού αριθμού των αυτοκινήτων είναι ένα πιο σημαντικό στατιστικό στοιχείο. Το 2013, ήταν μόνο 2 ανά 10.000 αυτοκίνητα. Ο αριθμός ανά 10.000 αυξήθηκε σε 24 το 2019, 44 το 2020 και 76 το 2021. Ενώ το μερίδιό τους είναι ακόμη περιορισμένο προς το παρόν, ο ρυθμός αύξησης κατά την τελευταία δεκαετία

υποδηλώνει τεράστια ανάπτυξη στο εγγύς μέλλον (Eurostat, 2022). Τα παραπάνω φαίνονται στο ακόλουθο Διάγραμμα (Διάγραμμα 11).



Διάγραμμα 11: Μερίδιο των ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας επί του συνολικού αριθμού των αυτοκινήτων στην ΕΕ (Eurostat, 2022).

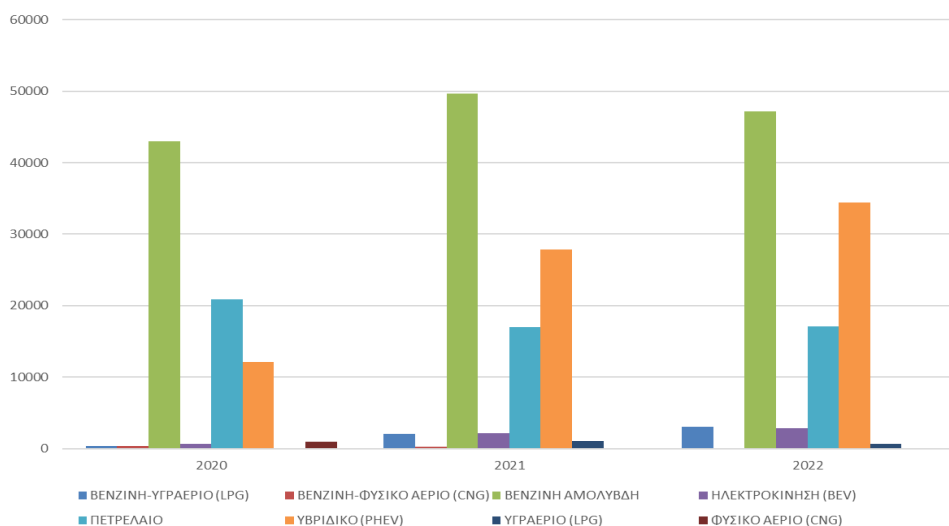
Τα αποτελέσματα των Διαγραμμάτων 10 και 11 καταδεικνύουν τη δυναμική που έχουν τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας στην ΕΕ. Αυτό το συμπέρασμα είναι σε απόλυτη συνάφεια με τη βιβλιογραφία. Μάλιστα, η βιβλιογραφία καταδεικνύει τη δυναμική όχι μόνο των ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας, αλλά και των άλλων τύπων οχημάτων τα οποία δύναται να κινηθούν με μπαταρία μέσα σε αστικά οδικά δίκτυα. Ο Harrison (2019) δημιούργησε ένα πίνακα με συντελεστές ετήσιας ποσοστιαίας αυξομείωσης του στόλου επιβατικών οχημάτων ανά κατηγορία καυσίμου. Οι συντελεστές παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Με ορίζοντα το 2030, φαίνεται ότι τα οχήματα τα οποία κινούνται με συμβατικά καύσιμα θα παρουσιάζουν σταδιακή μείωση στην προτίμησή τους από τους καταναλωτές. Στην αντίπερα όχθη, τα οχήματα τα οποία κινούνται με εναλλακτικές πηγές ενέργειας θα έχουν μια διαρκώς ανοδική πορεία. Τα οχήματα τα οποία κινούνται με LPC και CNG θα έχουν μια μικρή, μα σταθερή, αύξηση ενώ τα υβριδικά οχήματα αναμένεται να παρουσιάζουν διαρκώς αύξηση από 34% - 40%.

Πίνακας 2: Συντελεστές ετήσιας ποσοστιαίας αυξομείωσης του στόλου επιβατικών οχημάτων, ανά κατηγορία καυσίμου, στην ΕΕ για τα έτη 2019 – 2030

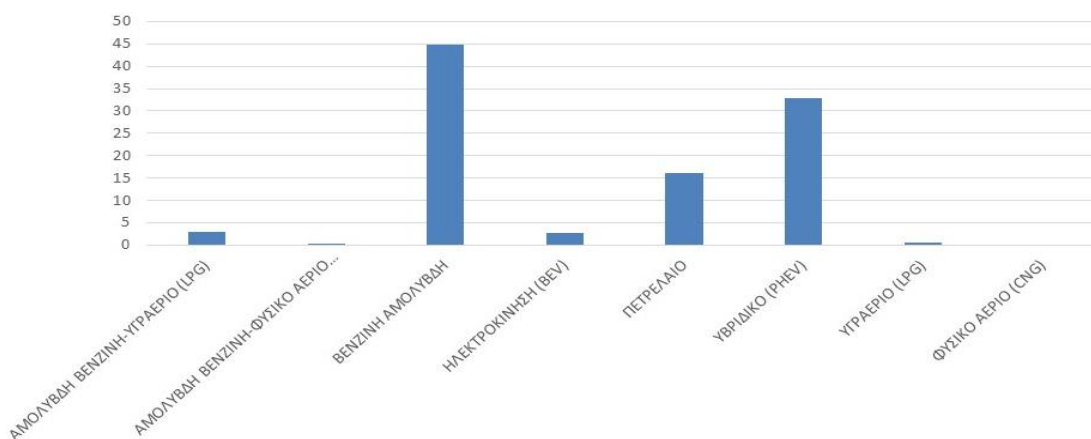
Έτος	Συντελεστής επιβατικών βενζίνης	Συντελεστής επιβατικών πετρελαίου	Συντελεστής επιβατικών LPC/CNG	Συντελεστής επιβατικών υβριδικών
2019	-1%	-12%	+4%	+40%
2020	-1%	-12%	+4%	+40%
2021	-1%	-12%	+5%	+37%
2022	-2%	-12%	+5%	+37%
2023	-2%	-15%	+5%	+37%
2024	-2%	-15%	+5%	+37%
2025	-3%	-15%	+5%	+34%
2026	-5%	-15%	+5%	+34%
2027	-7%	-20%	+5%	+34%
2028	-12%	-25%	+6%	+34%
2029	-12%	-25%	+6%	+34%
2030	-15%	-25%	+6%	+34%

Για να διερευνηθεί περαιτέρω η αγορά των εναλλακτικών καυσίμων στην Ελλάδα, ζητήθηκαν σχετικά στοιχεία από την Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ), τα οποία και παρασχέθηκαν στη συγγραφέα του παρόντος. Βάσει των δεδομένων της Eurostat, παρατηρείται ότι η Ελλάδα παραμένει ακόμα σχετικά πίσω στην αγορά ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας, αλλά η γενικότερη αγορά ηλεκτρικών οχημάτων δείχνει αυξητικές τάσεις. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στην ελλιπή υποδομή φόρτισης ή στις υψηλές τιμές των ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας. Στο Διάγραμμα 12 παρουσιάζεται η διακύμανση των ποσοστών των νέων οχημάτων ανά κατηγορία καυσίμου για τα έτη 2020-2022.



Διάγραμμα 12: Διακύμανση των ποσοστών των νέων οχημάτων ανά κατηγορία καυσίμου για τα έτη 2020-2022 (Στοιχεία ΕΛΣΤΑΤ).

Πιο συγκεκριμένα, για το 2022, τα ποσοστά ανά τύπο οχήματος βάσει των πωλήσεων νέων οχημάτων παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 13. Παρατηρείται στο Διάγραμμα αυτό ότι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα αποτελούν το 35.46% επί του συνόλου των νέων οχημάτων για το 2022. Στην αντίπερα όχθη, τα οχήματα τα οποία κινούνται με LPG και CNG, καθώς και με συνδυασμό τυπικού καυσίμου και LPG ή CNG αντιπροσωπεύουν μόνο ένα μικρό ποσοστό των νέων οχημάτων για το 2022.

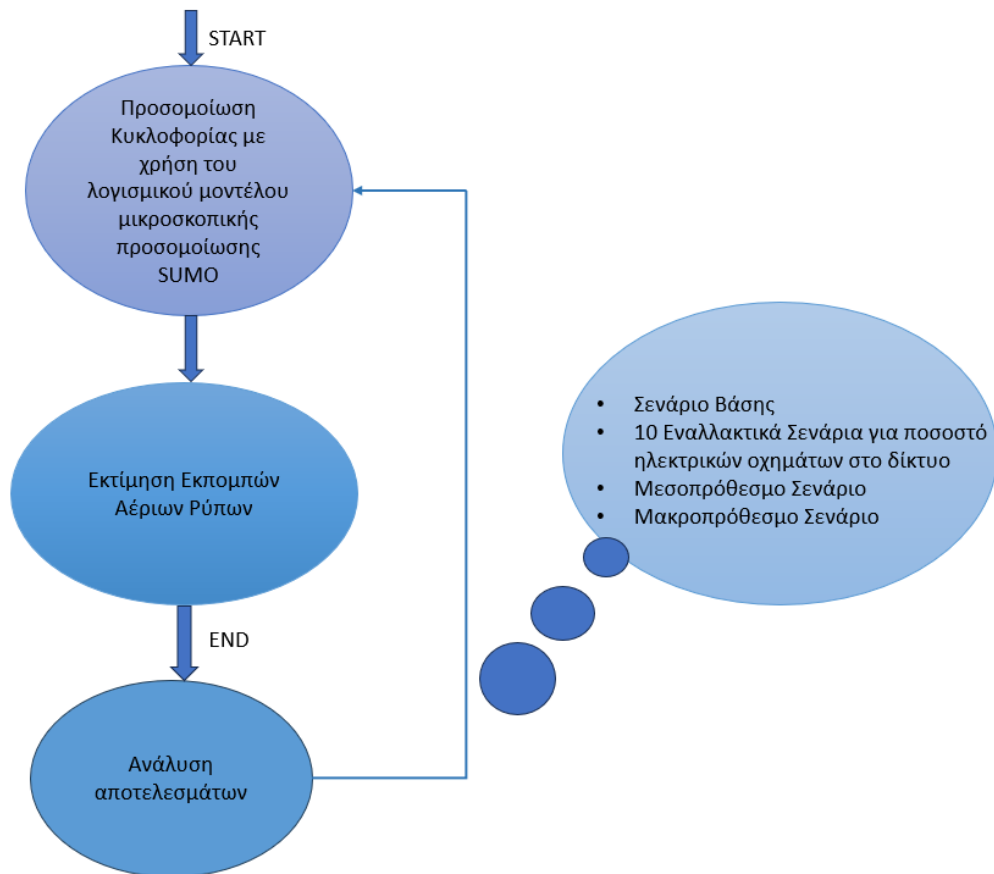


Διάγραμμα 13: Ποσοστά νέων οχημάτων ανά τύπο καυσίμου για το 2022 (Στοιχεία ΕΛΣΤΑΤ).

3.0 Μεθοδολογική Προσέγγιση

3.1 Ροή Εργασιών

Για την επίτευξη της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, θα αναπτυχθεί μεθοδολογία όπως παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 14: Διάγραμμα Μεθοδολογικής Προσέγγισης

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για τα ποσοστά ανά κατηγορία καυσίμου από την ΕΛΣΤΑΤ. Καθώς δεν υπήρχε κάποια ακριβής πληροφορία για το ποσοστό ηλεκτρικών οχημάτων στον ήδη υπάρχοντα στόλο, έγινε χρήση του ποσοστού όπως εκείνο προκύπτει από τα δεδομένα της Eurostat. Στη συνέχεια έγινε προσομοίωση της κυκλοφορίας με το μοντέλο μικροσκοπικής προσομοίωσης SUMO. Από την προσομοίωση της κυκλοφορίας προκύπτει η εκτίμηση Εκπομπών Αέριων Ρύπων και αυτό αποτελεί το σενάριο βάσης. Στη συνέχεια διαμορφώνονται δέκα εναλλακτικά σενάρια όπου το ποσοστό διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνεται κάθε φορά κατά 10%. Επιπρόσθετα, διερευνήθηκαν και δύο (2) σενάρια μικτής σύνθεσης κυκλοφορίας. Το ένα σενάριο είναι μεσοπρόθεσμο και αφορά το έτος 2025, ενώ το άλλο σενάριο είναι μακροπρόθεσμο και αφορά το έτος 2030. Για τα δύο αυτά σενάρια, έγινε προσαρμογή της παρούσας σύνθεσης κυκλοφορίας, για τα έτη αυτά, βάσει των ποσοστών αυξομείωσης των τεχνολογιών καυσίμων. Τα σενάρια αυτά συγκρίνονται με το σενάριο βάσης. Τέλος γίνεται ανάλυση αποτελεσμάτων και εξάγονται τα συμπεράσματα.

3.2 Βασικές Αρχές Προσομοίωσης Κυκλοφορίας

Η προσομοίωση είναι ένας προσιτός τρόπος να μελετηθούν ποικίλα χαρακτηριστικά του δικτύου όπως, η αέρια ρύπανση από τις οδικές μεταφορές, οι κύκλοι περιόδων των φωτεινών σηματοδοτών, οι αλλαγές στην πορεία των οχημάτων, τα όρια ταχυτήτων και άλλα μεγέθη. Βασική προϋπόθεση για την επιλογή του τύπου προσομοίωσης είναι να παράγονται ρεαλιστικά αποτελέσματα κάτω από τις επικρατούσες συνθήκες. Σε γενικές γραμμές, όσο πιο λεπτομερές είναι ένα δίκτυο τόσο καλύτερα αναπαριστά την πραγματικότητα. Στο πλαίσιο της εργασίας η προσομοίωση της κυκλοφορίας γίνεται στο περιβάλλον μικροσκοπικής προσομοίωσης, Simulation of Urban Mobility (SUMO). Το SUMO αποτελεί ένα δωρεάν, ανοιχτό λογισμικό, το οποίο είναι διαθέσιμο από το 2001 και επιτρέπει την προτυποποίηση κυκλοφοριακών συστημάτων και οδικών οχημάτων και αποτελεί σημαντικό εργαλείο στην διερεύνηση ζητημάτων όπως η επιλογή της βέλτιστης διαδρομής, της επίδρασης της σηματοδότησης στην κυκλοφορία, καθώς και της επίδρασης των τεχνολογιών επικοινωνίας μεταξύ των οχημάτων. Στις βιβλιοθήκες του SUMO συμπεριλαμβάνονται υποστηρικτικά εργαλεία (tools), τα οποία λειτουργούν ως πρόσθετα (add-ons) στο SUMO και βοηθούν στην υλοποίηση εργασιών όπως βαθμονόμηση του δικτύου, υπολογισμός εκπομπών ρύπων και έλεγχος της συνέχειας/συνδεσιμότητας του δικτύου. Το SUMO μπορεί να υποστηρίξει την εκτέλεση και τον έλεγχο της προσομοίωσης μέσω Διασύνδεσης Προγραμματισμού Εφαρμογών (Application Programming Interfaces). Μέσω του αναφερόμενου API, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει νέα πρότυπα και εργαλεία μέσω της γλώσσας προγραμματισμού Python. (<https://sumo.dlr.de/docs/Publications.html>)

3.3 Μοντέλα Εκτίμησης Ρύπων

Ο υπολογισμός της αέριας ρύπανσης από τις οδικές μεταφορές γίνεται με την βοήθεια μαθηματικών μοντέλων, τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους, ανάλογα με τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιούν για την επίλυση τους. Παρακάτω, γίνεται μία κατηγοριοποίηση των μοντέλων και στη συνέχεια επιλέγεται το μοντέλο εκείνο το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα. Τα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των εκπομπών αέριων ρύπων από τις μεταφορές χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, τα Στατικά και τα Δυναμικά Μοντέλα (Alkafoury et al., 2013).

3.3.1 Στατικά Μοντέλα

Τα Στατικά Μοντέλα αναπτύσσουν μεγάλης κλίμακας μοντέλα εκπομπών, χωρίς να είναι απαραίτητη η λεπτομερής καταγραφή της δραστηριότητας της πηγής. Τα μοντέλα στατικών εκπομπών εξαρτώνται κυρίως από επί μέρους παράγοντες εκπομπών και κατανάλωσης καυσίμου. Αυτοί οι παράγοντες βασίζονται στη **μακροσκοπική** δραστηριότητα του στόλου οχημάτων. Τα κύρια δεδομένα εισόδου είναι οι συντελεστές εκπομπών, οι παράγοντες κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας και η παραγωγικότητα μεταφοράς στα διανυθέντα χιλιόμετρα. Ένα πολύ μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του είδους των μοντέλων, είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ευκολία στις Εθνικές απογραφές ρύπων.

Τα Στατικά μοντέλα μπορούν να ταξινομηθούν σε δυο υποκατηγορίες, στα Μοντέλα Μέσης Ταχύτητας και στα Μοντέλα Συγκεντρωτικών Εκπομπών. Τα Μοντέλα Μέσης Ταχύτητας είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μοντέλα, με βάση την υπόθεση ότι οι μέσες εκπομπές σε ένα ταξίδι ποικίλλουν ανάλογα με τη μέση ταχύτητα του ταξιδιού. Τα μοντέλα αυτά δεν επιτρέπουν λεπτομερή χωρική ανάλυση στην εκτίμηση εκπομπών, καθώς η μέση ταχύτητα δεν περιγράφει τη στιγμιαία κατάσταση του οχήματος. Το πιο δημοφιλές μοντέλο αυτού του είδους είναι το VEPM. Τα Μοντέλα Συγκεντρωτικών Εκπομπών λειτουργούν με έναν μόνο συντελεστή εκπομπών που χρησιμοποιείται σε μεγάλη χωρική κλίμακα για να αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη ευρεία κατηγορία οχήματος και μια γενική κατάσταση οδήγησης. Τα μοντέλα αυτά είναι αρκετά γενικευμένα καθώς δε λαμβάνουν υπόψιν σημαντικά δυναμικά χαρακτηριστικά τα οποία μπορούν να αυξήσουν ή να μειώσουν την παραγωγή ρύπων. Ευρέως διαδεδομένα μοντέλα στην κατηγορία αυτή είναι τα μοντέλα NAEI και MOBILE.

3.3.2 Δυναμικά Μοντέλα

Τα Δυναμικά Μοντέλα δημιουργούνται από λεπτομερή δεδομένα, όπως για παράδειγμα αναλυτικές και στιγμιαίες πληροφορίες σχετικά με τον τύπο του οχήματος και την καύση καυσίμου, για διαφορετικά εύρη ταχύτητας και συνθήκες οδήγησης. Η δυναμική προσέγγιση τείνει να μοντελοποιεί τις εκπομπές σε επίπεδο δρόμου και εν συνεχεία τις ανάγει σε αστική κλίμακα. Τα μοντέλα εκπομπών, από κάτω προς τα πάνω, έχουν γίνει ερευνητικό επίκεντρο λόγω της λεπτότερους ανάλυσής τους, της καλύτερης ακρίβειας και της ικανότητας αξιολόγησης των εκπομπών μέσω δυναμικού ελέγχου κυκλοφορίας και λειτουργιών (Rakha et al., 2000). Τα δυναμικά μοντέλα μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τον τύπο παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία μοντελοποίησης. Έτσι, μπορεί να κατηγοριοποιηθούν σε Μοντέλα Κατάστασης Κυκλοφορίας και Στιγμιαία Μοντέλα.

Τα Μοντέλα Κατάστασης Κυκλοφορίας ενσωματώνουν την επίδραση της κυκλοφορικής δυναμικής σε ένα ενιαίο συγκεντρωτικό επίπεδο και διακρίνουν διαφορετικούς τύπους δρόμων και ενσωματώνουν τόσο την ταχύτητα όσο και την κατάσταση κυκλοφορίας στην εκτίμηση των εκπομπών. Οι καταστάσεις κυκλοφορίας καθορίζονται σύμφωνα με το είδος δρόμων και τις συνθήκες κυκλοφορίας (π.χ. ελεύθερη ροή αστικών περιοχών, κυκλοφοριακή συμφόρηση). Καλά παραδείγματα αυτού του τύπου είναι τα μοντέλα Handbook of Emission Factors for Road Transport (HBEFA) και ARTEMIS. Ενδεχομένως το COPERT θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως δυναμικό μοντέλο, καθώς, η ταχύτητα που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των εκπομπών στις τελευταίες εκδόσεις του υποδιαιρείται έτσι ώστε η διαφορετική τεχνολογία οχημάτων σε κάθε εύρος ταχύτητας, να έχει τον ειδικό συντελεστή εκπομπών για την κατάσταση της κανονικής λειτουργίας κινητήρα (hot engine) και της κρύας εκκίνησης (cold start). Παράλληλα όμως, το COPERT χρησιμοποιεί κι άλλες παραμέτρους εισόδου όπως κλιματολογικές συνθήκες.

Τα Στιγμιαία Μοντέλα παρέχουν πιο λεπτομερή περιγραφή της συμπεριφοράς των εκπομπών των οχημάτων, συνδέοντας τους ρυθμούς εκπομπών με τη λειτουργία του οχήματος κατά τη διάρκεια σύντομων χρονικών περιόδων (Wang & McGlinchy, 2009). Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν ένα μοντέλο προσομοίωσης κυκλοφορίας, που σκοπό έχει την άντληση δεδομένων σχετικά με την λειτουργία του οχήματος σε σύντομο χρονικό διάστημα και μοντέλα εκπομπών ρύπων τα οποία χρησιμοποιούν ως είσοδο την ισχύ του κινητήρα για τον προσδιορισμό του ρυθμού εκπομπών. Καλά παραδείγματα αυτού του τύπου μοντέλων είναι τα PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model) και MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator).

Από τα παραπάνω μοντέλα, κρίνεται για αρχή αναγκαίο να γίνει χρήση κάποιου Δυναμικού Μοντέλου, για να ληφθεί υπόψη η δυναμική της κυκλοφορίας των οχημάτων σε ένα αστικό οδικό δίκτυο όπως το Athens Testbed. Από τα Δυναμικά Μοντέλα, λαμβάνοντας υπόψη τις πληροφορίες που μπορούμε να έχουμε από το λογισμικό **μικροσκοπικής προσομοίωσης SUMO**, γίνεται επιλογή κάποιου Μοντέλου Κατάστασης Κυκλοφορίας. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν είναι διαθέσιμο το σύνολο των πληροφοριών που χρειάζεται ένα Στιγμαίο Μοντέλο. Από τα Μοντέλα Κατάστασης Κυκλοφορίας, επιλέγεται το HBEFA καθώς αναπτύσσεται συνεχώς κι επεκτείνεται με νέα δεδομένα για διάφορους τύπους καυσίμων, κινητήρων και οχημάτων.

3.3.3 HBEFA

Το μοντέλο HBEFA, το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα έρευνα, αποτελεί ουσιαστικά μία βάση δεδομένων για συντελεστές εκπομπών ρύπων από οδικές μεταφορές. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει πληροφορίες για κατανάλωση καυσίμου και συντελεστές για αέριους ρύπους για όλα τα πιθανά οχήματα τα οποία κινούνται σε οδό. Οι συντελεστές αέριων ρύπων πιο συγκεκριμένα είναι διαθέσιμοι από ένα πολύ λεπτομερές επίπεδο (π.χ., τύπος οχήματος, τεχνολογία κινητήρα, καύσιμο, κυκλοφοριακές συνθήκες), μέχρι σε ένα πιο γενικευμένο επίπεδο (π.χ., το μέσο αμάξι σε μία χώρα για μία συγκεκριμένη χρονιά). Στον Πίνακα 3 παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα της βάσης δεδομένων του HBEFA. Αξίζει να αναφέρουμε ότι στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε, πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο HBEFA 4.2.

Πίνακας 3: Παράδειγμα βάσης δεδομένων HBEFA

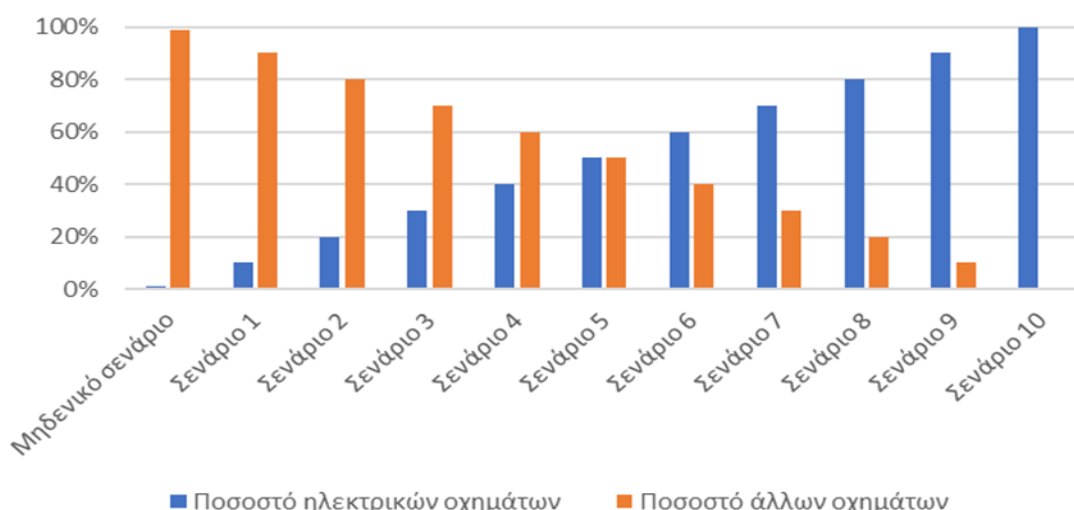
Country	Year	Vehicle category	Pollutant	Emission category	Technology	Emission factor	Unit
D	2020	pass. car	CO	hot	CNG	0,487	[g/Vehkm]
D	2020	pass. car	CO	hot	diesel	0,054	[g/Vehkm]
D	2020	pass. car	CO	hot	electricity	0	[g/Vehkm]
D	2020	pass. car	CO	hot	petrol	1,426	[g/Vehkm]
D	2020	pass. car	CO	start	CNG	0,036	[g/Vehkm]
D	2020	pass. car	CO	start	diesel	0,099	[g/Vehkm]
D	2020	pass. car	CO	start	electricity	0	[g/Vehkm]
D	2020	pass. car	CO	start	petrol	0,853	[g/Vehkm]
D	2020	pass. car	CO2(rep)	hot	CNG	83,943	[g/Vehkm]
D	2020	pass. car	CO2(rep)	hot	diesel	168,887	[g/Vehkm]
D	2020	pass. car	CO2(rep)	hot	electricity	0	[g/Vehkm]
D	2020	pass. car	CO2(rep)	hot	petrol	166,516	[g/Vehkm]
D	2020	pass. car	CO2(rep)	start	CNG	0,403	[g/Vehkm]
D	2020	pass. car	CO2(rep)	start	diesel	5,651	[g/Vehkm]
D	2020	pass. car	CO2(rep)	start	electricity	0	[g/Vehkm]
D	2020	pass. car	CO2(rep)	start	petrol	8,418	[g/Vehkm]

4. Εφαρμογή και Αποτελέσματα

4.1 Διαμόρφωση Σεναρίων

Η διαμόρφωση των σεναρίων τα οποία εξετάστηκαν περαιτέρω βασίστηκε στα ευρήματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης κι αφορά μόνο τα επιβατικά οχήματα. Τα ποσοστά ανά κατηγορία καυσίμου βασίστηκαν στα δεδομένα του 2022, όπως εκείνα ζητήθηκαν και παρασχέθηκαν από την ΕΛΣΤΑΤ. Καθώς δεν υπήρχε κάποια ακριβής πληροφορία για το ποσοστό ηλεκτρικών οχημάτων στον ήδη υπάρχοντα στόλο, έγινε χρήση του ποσοστού όπως εκείνο προκύπτει από τα δεδομένα της Eurostat (<1% για το 2021).

Το σενάριο αυτό διαμορφώνει το σενάριο βάσης (baseline scenario), βάσει του οποίου θα γίνει και η σύγκριση των υπόλοιπων αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια, και λαμβάνοντας υπόψιν τα ευρήματα της έρευνας του Harrison (2019), διαμορφώθηκαν δέκα (10) εναλλακτικά σενάρια στα οποία αυξανόταν το ποσοστό διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων κατά 10% ανά σενάριο. Αυτό αποτυπώνεται και στο Διάγραμμα 15.



Διάγραμμα 15: Ποσοστό ηλεκτρικών οχημάτων και ποσοστό άλλων οχημάτων ανά σενάριο της Μελέτης Περίπτωσης.

Επιπρόσθετα, διερευνήθηκαν και δύο (2) σενάρια μικτής σύνθεσης κυκλοφορίας. Το ένα σενάριο είναι μεσοπρόθεσμο και αφορά το έτος 2025, ενώ το άλλο σενάριο είναι μακροπρόθεσμο και αφορά το έτος 2030. Για τα δύο αυτά σενάρια, έγινε προσαρμογή της παρούσας σύνθεσης κυκλοφορίας, για τα έτη αυτά, βάσει των ποσοστών αυξομείωσης των τεχνολογιών καυσίμων (Πίνακας 2). Τα αποτελέσματα για τα σενάρια αυτά συγκρίνονται με το μηδενικό σενάριο (υπάρχουσα κατάσταση κυκλοφορίας).

4.2 Οδικό Δίκτυο

Στην προσομοίωση της κυκλοφορίας εξετάζεται περαιτέρω το εκτεταμένο αστικό οδικό δίκτυο του δακτυλίου της πόλης των Αθηνών. Το Athens Testbed χρησιμοποιείται στο περιβάλλον μικροσκοπικής προσομοίωσης SUMO (Lopez et al., 2018) και έχει αναπτυχθεί και συντηρείται από το Εργαστήριο Κυκλοφοριακής Τεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ. Το Athens Testbed αποτελείται τόσο από 1293 διασταυρώσεις/ κόμβους και 2572 δρόμους/ συνδέσμους. Από άποψη κυκλοφοριακής ζήτησης, η πρωινή ώρα αιχμής λαμβάνεται υπόψιν.

Κατά την ώρα αυτή, περί τα 86000 οχήματα εισέρχονται στο δίκτυο. Από τα οχήματα αυτά, το 99% αφορά επιβατικά οχήματα και το 1% βαρέα οχήματα (φορτηγά). Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται το Athens Testbed.



Εικόνα 1: Το “Athens Testbed” (ιδιοκτησία του Εργαστηρίου Κυκλοφοριακής Τεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου)

4.3 Εκτίμηση Ρύπων

Ο υπολογισμός των ρύπων από τις οδικές μεταφορές γίνεται με μαθηματικά μοντέλα, τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους, ανάλογα με τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιούν για την επίλυση τους. Το μοντέλο HBEFA, το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, αποτελεί ουσιαστικά μία βάση δεδομένων για συντελεστές εκπομπών ρύπων από οδικές μεταφορές. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει πληροφορίες για κατανάλωση καυσίμου και συντελεστές για αέριους ρύπους για όλα τα πιθανά οχήματα τα οποία κινούνται σε μια οδό. Οι συντελεστές αέριων ρύπων είναι διαθέσιμοι από ένα πολύ λεπτομερές επίπεδο, μέχρι ένα πιο γενικευμένο επίπεδο.

4.4 Αποτελέσματα

4.4.1 Ηλεκτροκίνηση ως η επικρατούσα τεχνολογία

Κάθε σενάριο προσομοιώθηκε δέκα (10) φορές, με διαφορετική τιμή αρχικοποίησης (seed) σε κάθε σενάριο. Αυτό έγινε για να αποφευχθούν τυχόν στατιστικά σφάλματα τα οποία μπορεί να προέκυπταν αν μια προσομοίωση εκτελούνταν μία φορά. Ακόμη, οι τιμές αρχικοποίησης που χρησιμοποιούνται, είναι κοινές όμως σε όλες τις προσομοιώσεις, για να διασφαλιστεί η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων.

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα έντεκα (11) σενάρια (μηδενικό σενάριο και σενάρια με ποσοστό διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων) για το σύνολο των ρύπων οι οποίοι ποσοτικοποιούνται με το πρότυπο HBEFA4.2.

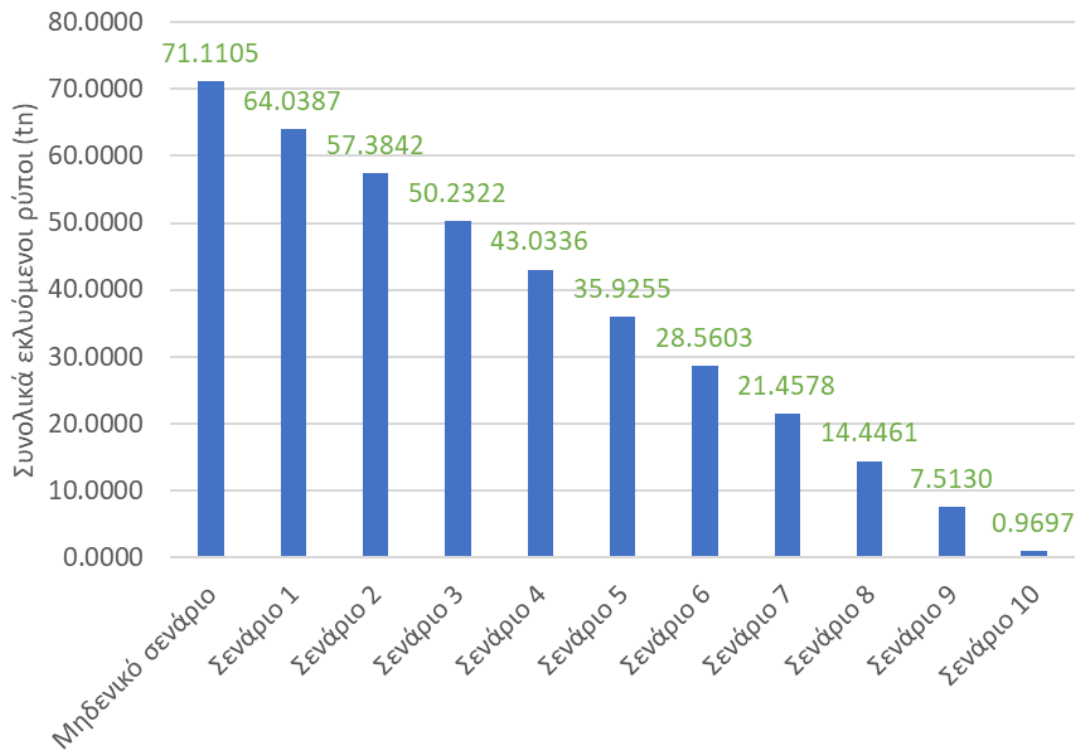
Πίνακας 4: Εκλυόμενοι ρύποι ανά σενάριο

Σενάριο	CO2 (tn)	CO (kg)	HC (g)	NOX (kg)	PMX (kg)
Μηδενικό σενάριο	71.09	7.21	79.04	15.86	1.43
Σενάριο 1	64.02	6.53	75.30	14.27	1.39
Σενάριο 2	57.36	5.89	71.72	12.77	1.36
Σενάριο 3	50.21	5.21	67.91	11.17	1.32
Σενάριο 4	43.02	4.52	64.12	9.55	1.29
Σενάριο 5	35.91	3.85	60.38	7.95	1.25
Σενάριο 6	28.55	3.16	56.55	6.29	1.21
Σενάριο 7	21.45	2.49	52.82	4.70	1.18
Σενάριο 8	14.44	1.81	49.04	3.12	1.14
Σενάριο 9	7.51	1.15	45.32	1.56	1.11
Σενάριο 10	0.97	0.54	41.95	0.09	1.08

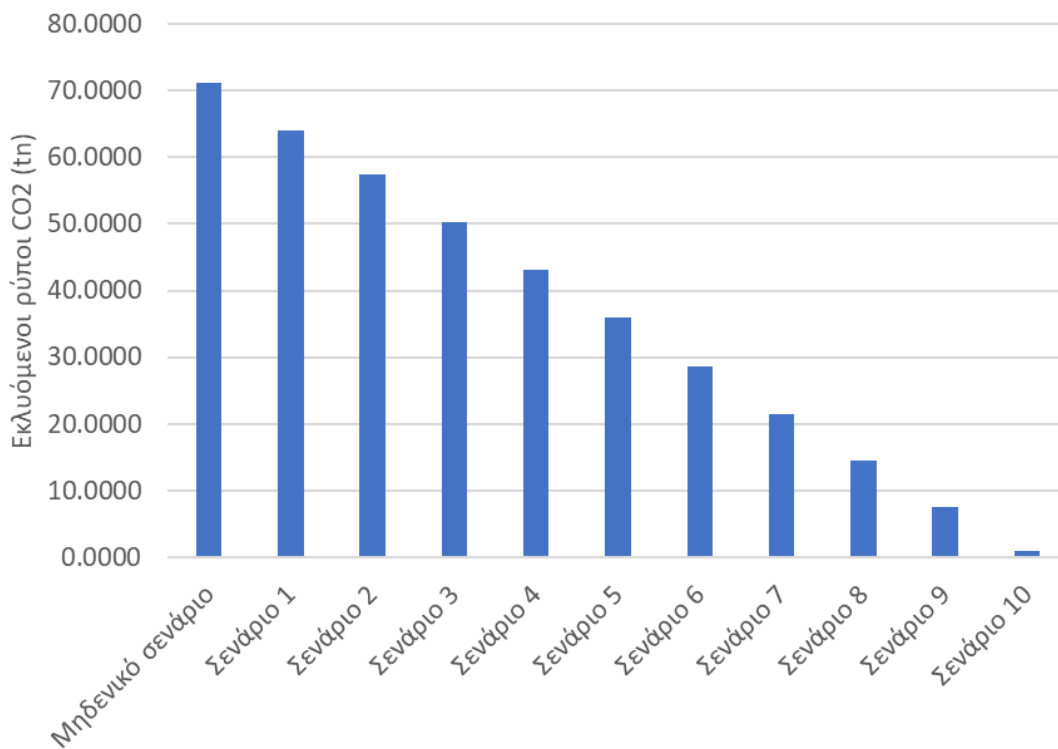
Από τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνεται ότι ο κυρίαρχος ρύπος είναι το CO₂. Ακολουθεί το NOX, το CO κι έπειτα είναι οι υπόλοιποι ρύποι. Τα ευρήματα αυτά ήταν αναμενόμενα καθώς συμφωνούν με τη σχετική βιβλιογραφία.

Παρατηρείται επίσης, η επίδραση που έχει η αύξηση του ποσοστού διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων, αναφορικά με τη μείωση των ρύπων. Στο Διάγραμμα 16 παρακάτω παρουσιάζονται οι συνολικοί εκλυόμενοι αέριοι ρύποι ανά σενάριο. Στα Διαγράμματα 17 – 21 παρουσιάζεται η εξέλιξη κάθε αέριου ρύπου ξεχωριστά ανά σενάριο.

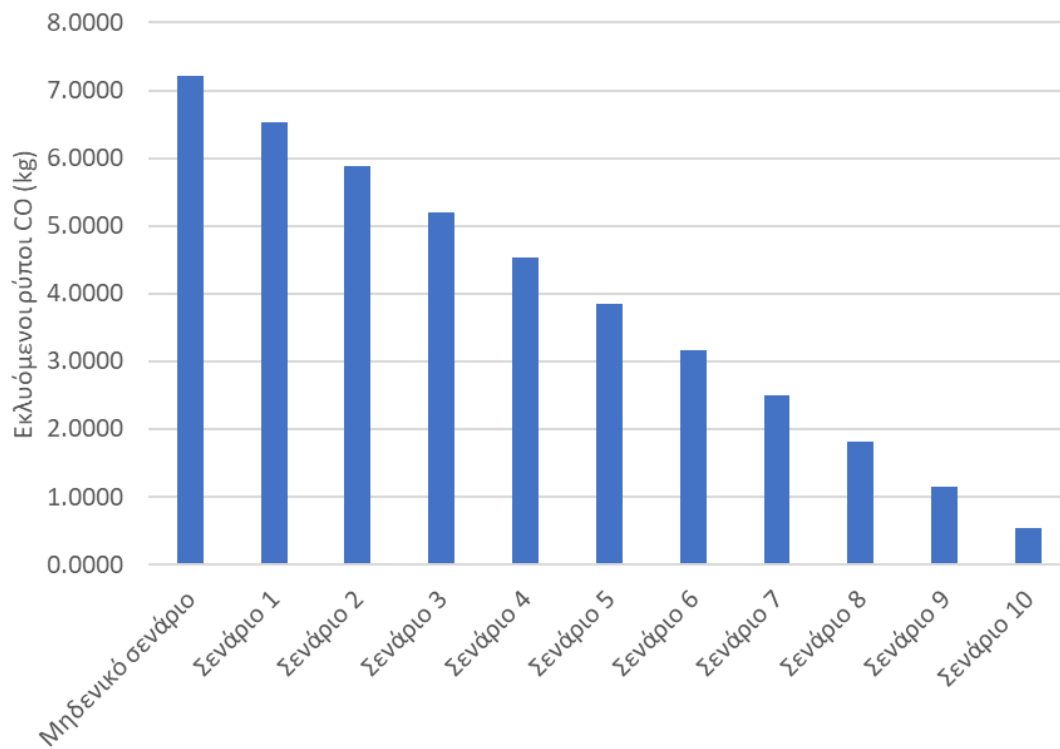
Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων, τόσο οι συνολικοί ρύποι μειώνονται. Αξίζει να αναφερθεί ότι μέχρι το Σενάριο 5 έχει επιτευχθεί μείωση των συνολικών ρύπων κατά περίπου 100% (97.94%), ενώ στο Σενάριο 10 (πλήρης διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων) η μείωση των συνολικών ρύπων είναι 7232%. Ένας βασικός λόγος ο οποίος οδηγεί σε τέτοια μείωση των ρύπων είναι η χαμηλή μέση ταχύτητα (<40 χιλιομέτρων την ώρα για το σύνολο των προσομοιώσεων που διενεργήθηκαν). Η ταχύτητα αυτή ωθεί τα ηλεκτρικά οχήματα PHEVs να μην κάνουν συχνή χρήση της Μηχανής Εσωτερικής Καύσης κι έτσι να μην εκλύουν μεγάλες ποσότητες αέριων ρύπων. Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται τα ποσοστά μείωσης των συνολικών εκλυόμενων αέριων ρύπων ανά Σενάριο, συγκριτικά με την παρούσα κατάσταση (Μηδενικό σενάριο).



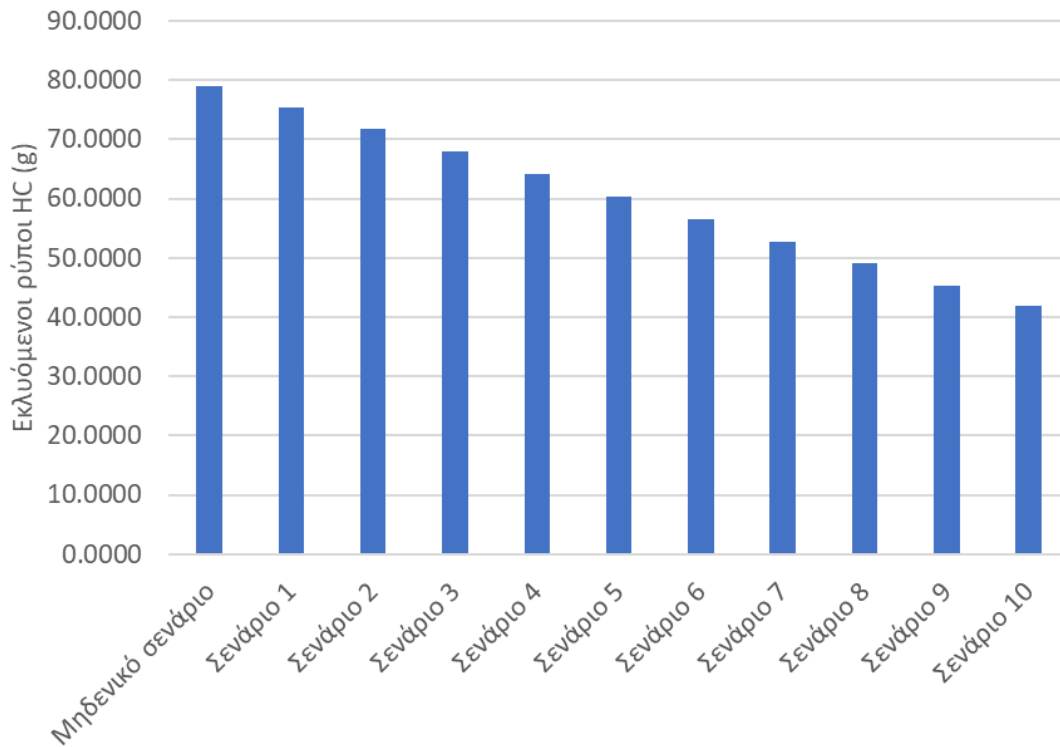
Διάγραμμα 16: Συνολικοί εκλυόμενοι αέριοι ρύποι (σε tn)



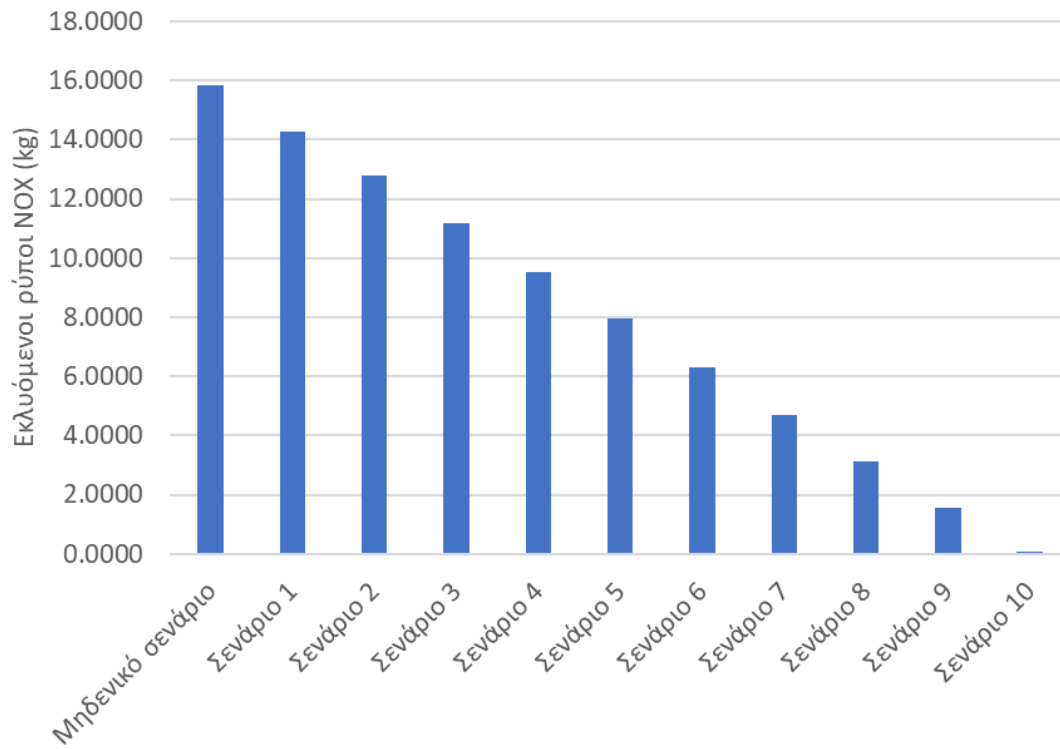
Διάγραμμα 17: Εκλυόμενοι ρύποι CO2 (σε tn) ανά Σενάριο



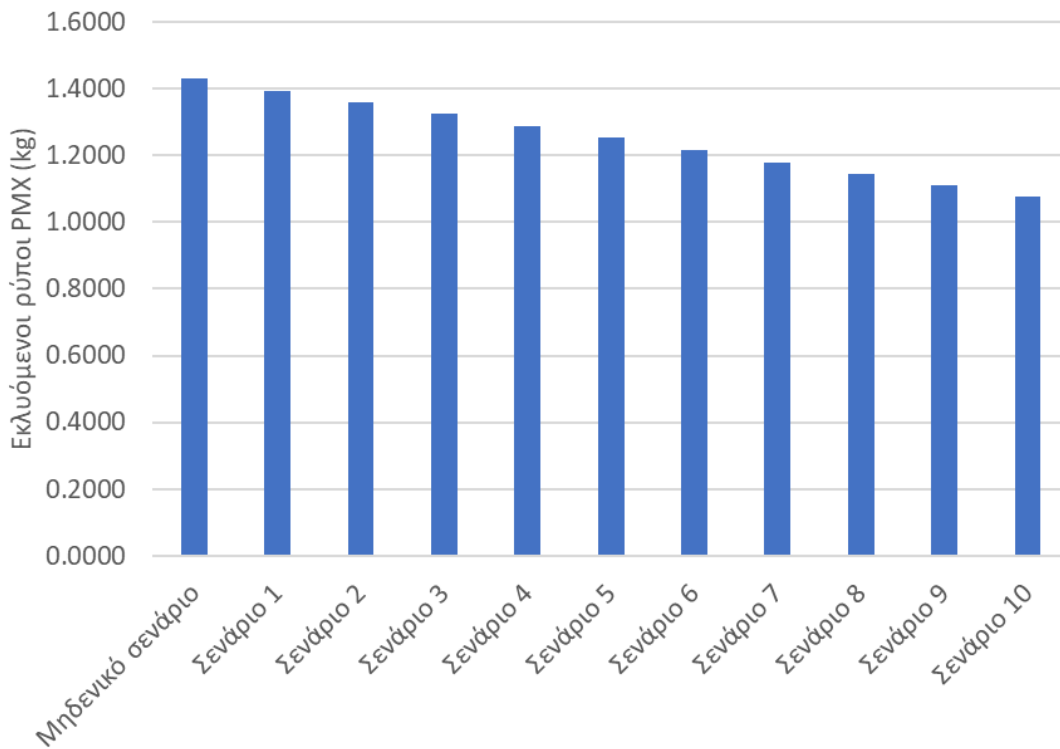
Διάγραμμα 18: Εκλυόμενοι ρύποι CO (σε kg) ανά Σενάριο



Διάγραμμα 19: Εκλυόμενοι ρύποι HC (σε g) ανά Σενάριο



Διάγραμμα 20: Εκλυόμενοι ρύποι NOX (σε kg) ανά Σενάριο



Διάγραμμα 21: Εκλυόμενοι ρύποι PMX (σε kg) ανά Σενάριο

Πίνακας 5: Ποσοστό μείωσης συνολικών εκλυόμενων ρύπων ανά σενάριο

Σενάριο	Συνολικοί ρύποι (tn)	Ποσοστό μείωσης (%)
Μηδενικό σενάριο	71.11	-
Σενάριο 1	64.04	11.04
Σενάριο 2	57.38	23.92
Σενάριο 3	50.23	41.56
Σενάριο 4	43.03	65.24
Σενάριο 5	35.93	97.94
Σενάριο 6	28.56	148.98
Σενάριο 7	21.46	231.40
Σενάριο 8	14.45	392.25
Σενάριο 9	7.51	846.49
Σενάριο 10	0.97	7232.93

4.4.2 Σενάρια μεσοπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης εξέλιξης τεχνολογιών εναλλακτικών καυσίμων

Καθένα από τα δύο (2) σενάρια προσομοιώθηκε δέκα (10) φορές, με διαφορετική τιμή seed σε κάθε σενάριο. Αυτό έγινε, όπως προηγουμένως αναφέρθηκε, για να αποφευχθούν τυχόν στατιστικά σφάλματα τα οποία μπορεί να προέκυπταν αν μια προσομοίωση εκτελούνταν μία φορά. Αναφέρεται επίσης ότι οι τιμές seed που χρησιμοποιούνται είναι κοινές σε όλες τις προσομοιώσεις, για να διασφαλιστεί η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων.

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το μηδενικό σενάριο, για το μεσοπρόθεσμο σενάριο και για το μακροπρόθεσμο σενάριο (έτη 2025 και 2030 αντίστοιχα). Ακόμη, ποσοτικοποιούνται οι συνολικοί ρύποι ανά σενάριο. Στα σενάρια αυτά, οι ρύποι ποσοτικοποιούνται κάνοντας χρήση του προτύπου HBEFA4.2.

Πίνακας 6: Εκλυόμενοι ρύποι ανά σενάριο

Σενάριο	CO ₂ (tn)	CO (kg)	HC (g)	NO _x (kg)	PM _x (kg)	Συνολικοί ρύποι (tn)
Μηδενικό σενάριο	71.09	7.21	79.04	15.86	1.43	71.11
Μεσοπρόθεσμο σενάριο (έτος 2025)	22.72	2.20	12.22	5.11	0.49	22.72
Μακροπρόθεσμο σενάριο (έτος 2030)	4.39	0.41	2.27	0.99	0.38	4.39

Αναφορικά με τους ρύπους, τα γενικά αποτελέσματα ακολουθούν την ίδια τάση. Ο κυρίαρχος ρύπος είναι το CO₂, ακολουθούμενος από το NO_x, το CO, το PM₁₀ και τέλος το HC. Τα ευρήματα αυτά ήταν αναμενόμενα καθώς συμφωνούν με τη σχετική βιβλιογραφία. Τόσο το μεσοπρόθεσμο όσο και το μακροπρόθεσμο σενάριο παρουσιάζουν σημαντική μείωση στους συνολικούς εκλυόμενους ρύπους. Για το μεσοπρόθεσμο σενάριο παρατηρείται μία μείωση των συνολικών ρύπων της τάξης του 212%, ενώ για το μακροπρόθεσμο σενάριο το ποσοστό αυτό αγγίζει το 1520%. Η διαφορά στους συνολικά εκλυόμενους ρύπους είναι σημαντική ακόμα και μεταξύ του μεσοπρόθεσμου και του μακροπρόθεσμου σεναρίου (μείωση συνολικά εκλυόμενων ρύπων κατά 417%). Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς σε αυτό το χρονικό ορίζοντα, είναι μεγάλο το προβλεπόμενο ποσοστό διείσδυσης των εναλλακτικών καυσίμων στις Μεταφορές.

5. Συμπεράσματα

5.1 Γενικά

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας ήταν να διερευνήσει την έκλυση επικίνδυνων αέριων ρύπων από τις οδικές μεταφορές καθώς και να εξάγει συμπεράσματα για την αγορά των εναλλακτικών καυσίμων, να τονίσει τους παράγοντες εκείνους οι οποίοι συμβάλλουν στην αποδοχή ή όχι της χρήσης των εναλλακτικών καυσίμων στις οδικές μεταφορές, καθώς και να ποσοτικοποιήσει την επίδραση που αναμένεται να έχουν τα ηλεκτρικά οχήματα στη μείωση των ποσοτήτων των εκλυόμενων αέριων ρύπων από τις Μεταφορές. Για να επιτευχθούν τα παραπάνω έγινε μία εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση και μία σύγκριση εναλλακτικών σεναρίων με αυξανόντα ρυθμό διεύθυνσης ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο..

Η βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι η κλιματική αλλαγή και η ενεργειακή ασφάλεια είναι οι βασικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν σήμερα οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής σε παγκόσμιο επίπεδο, κάτι το οποίο φαίνεται από την πληθώρα πολιτικών και διεθνών συμφωνιών στο τομέα αυτό. Φαίνεται ότι οι Μεταφορές διαδραματίζουν βασικό ρόλο αναφορικά με την κλιματική αλλαγή, λόγω της μεγάλης εξάρτησης από τα πετρελαϊκά προϊόντα και την ολοένα αυξανόμενη ζήτηση για μετακινήσεις.

Οι μεταφορές αποτελούν παγκοσμίως μία από τις σημαντικότερες πηγές ανθρωπογενών εκπομπών, οι οποίες παράγουν περίπου το 14% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου με το μεγαλύτερο ποσοστό να προέρχεται από τις οδικές μεταφορές, ακολουθούμενες από τις αεροπορικές και θαλάσσιες μεταφορές. Παράλληλα, διαφαίνεται ότι τα εναλλακτικά καύσιμα μπορούν να αποτελέσουν υποκατάστατα των καυσίμων πετρελαίου και να συνδράμουν έτσι στο να μην εξαρτάται πλήρως ο τομέας των Μεταφορών από το πετρέλαιο κι έτσι να επέλθει μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Αναφορικά με την αγορά εναλλακτικών καυσίμων, παρουσιάζει αυξητικές τάσεις τα τελευταία χρόνια. Ιδιαίτερο ρόλο σε αυτό διαδραματίζουν πλέον τα ηλεκτρικά οχήματα, καθώς στην κατηγορία αυτή παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση στην τάση πωλήσεων τόσο στην Ευρωπαϊκή Ένωση όσο και στην Ελλάδα. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στους παράγοντες επιρροής της αποδοχής των εναλλακτικών καυσίμων. Φαίνεται ότι η σωστή ενημέρωση των πολιτών σχετικά με τα εναλλακτικά καύσιμα, παράλληλα με την ύπαρξη των κατάλληλων κινήτρων και της κατάλληλης υποδομής μπορεί να οδηγήσει στην υιοθέτηση των οχημάτων εναλλακτικών καυσίμων από μεγαλύτερη μερίδα του πληθυσμού.

Σχετικά με την ποσοτικοποίηση των αέριων ρύπων στον Ελλαδικό χώρο, βάσει των στοιχείων του ΥΠΕΝ, δεν παρατηρείται κάποια μείωση των ρύπων τα τελευταία έτη, με εξαίρεση την ολοένα κι αυξανόμενη μείωση των ρύπων CO. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί το 2020, έτος κατά το οποίο ίσχυαν περιορισμοί στις μετακινήσεις των πολιτών λόγω έξαρσης της πανδημίας COVID-19.

5.2 Βασικά Συμπεράσματα

Έχοντας ως βάση τα στοιχεία της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, η παρούσα διπλωματική εργασία προχώρησε σε μία μελέτη εναλλακτικών σεναρίων στο εκτεταμένο αστικό οδικό δίκτυο του δακτυλίου της πόλης των Αθηνών (Athens Testbed). Εκεί προσομοιώθηκε η παρούσα σύνθεση της κυκλοφορίας και συγκρίθηκε με κάποια μελλοντικά σενάρια σύνθεσης της κυκλοφορίας. Τα σενάρια αυτά αφορούν το ποσοστό διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων στη σύνθεση του στόλου. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των σεναρίων παρατηρείται ότι ο κυρίαρχος ρύπος είναι το CO₂. Ακολουθεί το CO και το NO_x. Ακόμη, η αύξηση του ποσοστού διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων επιδρά θετικά στη μείωση των εκλύομενων ρύπων. Χαρακτηριστικά η παρούσα εργασία καταλήγει στον συμπεράσμα ότι το σύνολο των ρύπων μειώθηκε κατά 380% μεταξύ του σεναρίου με την υπάρχουσα σύνθεση κυκλοφορίας και του σεναρίου με 100% διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων.

5.3 Περιορισμοί και Μελλοντική Έρευνα

Πάνω στη θεματική της παρούσας Εργασίας, θα μπορούσε να διερευνηθεί η επίδραση Στρατηγικών Διαχείρισης Κυκλοφορίας στην μείωση της έκκλησης αέριων ρύπων, όσον αφορά κυρίως την υπάρχουσα σύνθεση κυκλοφορίας. Ακόμη, η υπάρχουσα σύνθεση κυκλοφορίας θα μπορούσε να διορθωθεί περαιτέρω και να ανταποκρίνεται ακόμα περισσότερο στην πραγματικότητα. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί αν τα σχετικά στοιχεία σύνθεσης της κυκλοφορίας για νέα και ήδη υπάρχοντα οχήματα ήταν διαθέσιμα. Τέλος, θα μπορούσε να γίνει και μία επικύρωση των μοντέλων εκτίμησης έκλυσης αέριων ρύπων, αν υπήρχαν σχετικά δεδομένα μέσω των οποίων να μπορούσε να εξαχθεί πληροφορία για την πραγματική ποσότητα αέριων ρύπων οφειλόμενων στις Οδικές Μεταφορές.

Βιβλιογραφία

Achterberg P, Houtman D, van Bohemen S, Manevska K (2010) Unknowing but supportive? Predispositions, knowledge, and support for hydrogen technology in the Netherlands. *Int J Hydrog Energy* 35:6075–6083

Adnan N., Nordin S. M., Rahman I. & Amini M. H. (2017). A market modeling review study on predicting Malaysian consumer behavior towards widespread adoption of PHEV/EV. *Environmental Science and Pollution Research*, 24[22], 17955–17975

Alkafoury, A., Bady, M., Hafez F. Aly, M., & Negm, A. (2013). Emissions Modeling for Road Transportation in Urban Areas: State-of-Art Review. *Proceeding of 23rd International Conference on —Environmental Protection is a Must.*

Bauen A., Gomez I, OudeNijeweme D., Maria Paraschiv M. (2017). *Alternative Fuels*. Publications Office of the European Union. doi: 10.2777/741279

Byrne M. R. & Polonsky M. J. (2001) "Impediments to consumer adoption of sustainable transportation: Alternative fuel vehicles", *International Journal of Operations & Production Management*, 21[12], 1521-1538, <https://doi.org/10.1108/EUM0000000006293>

Campbell A.R., Ryley T., & Thring R. (2012). Identifying the early adopters of alternative fuel vehicles: A case study of Birmingham, United Kingdom. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 46, Issue 8, Pages 1318-1327. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2012.05.004>

Chalkiadakis, C., Perdikouris, A., Vlahogianni, E.I. (2022). Urban road network resilience metrics and their relationship: Some experimental findings, *Case Studies on Transport Policy*, Volume 10, Issue 4, Pages 2377-2392, ISSN 2213-624X, doi:10.1016/j.cstp.2022.10.013

Cheah L. & Heywood J. (2011). Meeting U.S. passenger vehicle fuel economy standards in 2016 and beyond. *Energy Policy*, 39[1], 454-466. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.10.027>

Coffman M., Bernstein P. & Wee S. (2017) Electric vehicles revisited: a review of factors that affect adoption, *Transport Reviews*, 37[1], 79-93. DOI: 10.1080/01441647.2016.1217282

De Jong G., Fox J., Daly A., Pieters M. & Smit R. (2004) Comparison of car ownership models, *Transport Reviews*, 24:4, 379-408, DOI: 10.1080/0144164032000138733

Dimitropoulos A., Rietveld P., van Ommeren J. N. (2013). Consumer valuation of changes in driving range: A meta-analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 55, 27-45. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.08.001>

European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport, Consumer survey and test on fuel price comparison methodology – Final report, Publications Office, 2017, <https://data.europa.eu/doi/10.2832/589916>

European Environment Agency (2018). Available at: <https://www.eea.europa.eu/data-andmaps/indicators/transport-final-energy-consumption-bymode/assessment-9>

Eurostat Data Browser - Passenger cars, by type of motor energy. Available at: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ROAD_EQS_CARPDA_custom_2998776/bookmark/table?lang=en&bookmarkId=92675412-2af0-4d99-a6cc-d8321521fc17

Eurostat Data Browser. Available at: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_bal_s/default/table?lang=en

Franke T. & Krems J. F. (2013). What drives range preferences in electric vehicle users?. *Transport Policy*, 30, 56-62. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2013.07.005>

Gül T. (2008). AN ENERGY-ECONOMIC SCENARIO ANALYSIS OF ALTERNATIVE FUELS FOR TRANSPORT. Available at: https://www.psi.ch/eem/PublicationsTabelle/dis2008_guel.pdf

Haller M., Welch E., Lin J. & Fulla S. (2007). Economic costs and environmental impacts of alternative fuel vehicle fleets in local government: An interim assessment of a voluntary ten-year fleet conversion plan. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12[3], 219-230. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2007.02.001>

Harrison, D. (2019). Automotive Powertrain Forecast 2020-2030 Navigation Regional and Regulatory Divergence on the Road to Electrification. Automotive from Ultima Media.

Hidrue M. K., Parsons G. R., Kempton W. & Gardner M. P. (2011). Willingness to pay for electric vehicles and their attributes. *Resource and Energy Economics*, 33[3], 686-705. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2011.02.002>

Higgins C. D., Mohamed M. & Ferguson M. R. (2017). Size matters: How vehicle body type affects consumer preferences for electric vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 100, 182-201. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.04.014>

International Energy Agency (2022). *World Energy Outlook 2022*.

Jakobsson N., Gnann T., Plötz P., Sprei F. & Karlsson S. (2016). Are multi-car households better suited for battery electric vehicles? – Driving patterns and economics in Sweden and Germany. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 65, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.01.018>

Jensen A. F., Cherchi E. & Mabit S. L. (2013). On the stability of preferences and attitudes before and after experiencing an electric vehicle.

Kester J., Noel L., G. Zarazua de Rubens, & Sovacool B. K. (2018). Policy mechanisms to accelerate electric vehicle adoption: A qualitative review from the Nordic region. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 719-731. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.067>

Knez M., Jereb B. & Obrecht M. (2014). Factors influencing the purchasing decisions of low emission cars: A study of Slovenia. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 30, 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.05.007>

Koetse M. J. & Hoen A. (2014). Preferences for alternative fuel vehicles of company car drivers. *Resource and Energy Economics*, 37, 279-30. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2013.12.006>

Kölbl R., Bauer D. & Rudloff C. (2013) . Travel Behavior and Electric Mobility in Germany: Is the Problem the Driving Range, Costs, or Both?. Austrian Institute of Technology GmbH, Giefinggasse 2, Vienna 1210, Austria. 2385[1], 45-52. <https://doi.org/10.3141/2385-06>

Koppelman F.S. (1981). Non-linear utility functions in models of travel choice behavior. Volume 10, Issue 2, pp 127–146. <https://doi.org/10.1007/BF00165262>

Kurani K, Turrentine T, Sperling S (1996) Testing electric vehicle demand in ‘hybrid households’ using a reflexive survey. *Transp Res D* 1(2):131–150

Lieven T., Mühlmeier S., Henkel S., & Waller J.F. (2011). Who will buy electric cars? An empirical study in Germany. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 16, Issue 3, Pages 236-243, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2010.12.001>

Lopez, P. A., Wiessner, E., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flotterod, Y.-P., Hilbrich, R., Lucken, L., Rummel, J., & Wagner, P. (2018). Microscopic traffic simulation using Sumo. 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). <https://doi.org/10.1109/itsc.2018.8569938>

OICA - International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (2023). VEHICLE EMISSIONS. Available at: <https://www.oica.net/emission-control-technologies/>

Offer G. J., Howey D., Contestabile M., Clague R. & Brandon N. P. (2010). Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. *Energy Policy*, 38[1], 24-29. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.08.040>

Peters A. & Dütschke E. (2014). How do Consumers Perceive Electric Vehicles? A Comparison of German Consumer Groups, *Journal of Environmental Policy & Planning*, 16[3], 359-377, DOI: 10.1080/1523908X.2013.879037

Potoglou, D., and Kanaroglou, P. S. (2007). Household demand and willingness to pay for clean vehicles. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 12 (4), 264–274. doi:10.1016/j.trd.2007.03.001

Rakha, H., Van Aerde, M., Ahn, K., & Trani, A. (2000). Requirements for evaluating traffic signal control impacts on energy and emissions based on instantaneous speed and acceleration measurements. *Transportation Research Record*, 1738, pp. 56-67.

Rauh, N., Franke, T., & Krems, J. F. (2015). Understanding the Impact of Electric Vehicle Driving Experience on Range Anxiety. *Human Factors*, 57(1), 177-187. <https://doi.org/10.1177/0018720814546372>

Santos G. & Davies H. (2019). Incentives for quick penetration of electric vehicles in five European countries: Perceptions from experts and stakeholders. In Press, Corrected Proof What are Corrected Proof articles? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.10.034>

Santos G. & Davies H. (2019). Incentives for quick penetration of electric vehicles in five European countries: Perceptions from experts and stakeholders. In Press, Corrected Proof What are Corrected Proof articles? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.10.034>

Sierzchula W., Bakker S., Maat K. & Wee B. (2014). The influence of financial incentives and other socio-economic factors on electric vehicle adoption. *Energy Policy*, 68, 183-194. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.043>

Tanaka M., Ida T., Murakami K., & Friedman L. (2014). Consumers' willingness to pay for alternative fuel vehicles: A comparative discrete choice analysis between the US and Japan. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 70, Pages 194-209. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.10.019>

., & McGlinchy, I. (2009). Review of Vehicle Emission Modelling and the Issues for New Zealand. 32nd Australasian Transport Research Forum. Auckland, New Zealand.

Wee S., Coffman M. & La Croix, S. (2018). Do electric vehicle incentives matter? Evidence from the 50 U.S. states. *Research Policy*, 47[9], 1601-1610. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.05.003>

Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Έκθεση της Επιτροπής προς το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο σχετικά με την εφαρμογή της οδηγίας 2014/94/ΕΕ για την ανάπτυξη υποδομών εναλλακτικών καυσίμων, Βρυξέλλες (2021).

Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Γενική Διεύθυνση Δράσης για το Κλίμα, Κλιματικά ουδέτερη Ευρώπη έως το 2050 : ένα στρατηγικό μακρόπνοο όραμα για μια ευημερούσα, σύγχρονη, ανταγωνιστική και κλιματικά ουδέτερη οικονομία της ΕΕ, Publications Office (2019). Available at: <https://data.europa.eu/doi/10.2834/5687>

Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (2019). Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640>

Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Λευκή Βίβλος για την Περιβαλλοντική Ευθύνη (2000). Available at: <https://op.europa.eu/el/publication-detail/-/publication/0dd523bb-924f-4b00-999c-2b7effb7f6dd>

Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής - NATIONAL INVENTORY REPORT OF GREECE FOR GREENHOUSE AND OTHER GASES FOR THE YEARS 1990-2021 (2023). Available at: <https://ypen.gov.gr/perivallon/klimatiki-allagi/ektheseis-kai-yfistameni-katastasi/etisies-ethnikes-apografes-aerion-tou-thermokiouath-apo-to-2005/>

[Renovablesverdes.com/el/η-βιοενέργεια-που-χρησιμοποιείται-στις-μεταφορές-θα-αυξηθεί-4-φορές-έως-το-2060/](https://renovablesverdes.com/el/η-βιοενέργεια-που-χρησιμοποιείται-στις-μεταφορές-θα-αυξηθεί-4-φορές-έως-το-2060/)

[Metaforespess.gr/autokinitodromoi/οι-μεταφορές-ευθύνονται-για-το-30-των-συ/](https://metaforespess.gr/autokinitodromoi/οι-μεταφορές-ευθύνονται-για-το-30-των-συ/)

ee.europa.eu/el/pressroom/grafikes-plirofories/ekpompes-diokseidiou-toy-anthraka-apo/image/image-view-fullscreen

<https://energypress.gr/news/eurostat-72-meridio-ananeosimon-pigon-stis-metafores-stin-kypro-2022>

https://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/el/FTU_2.4.10.pdf

<https://www.europarl.europa.eu/topics/el/article/20221013STO43019/enallaktika-kausima-ochimaton-poia-einai-kai-pos-tha-enischusoume-ti-chrisi-tous>

http://www.cres.gr/kape/publications/pdf/treatise/4_limper_enal.pdf

seepe.gr/εναλλακτική-ενέργεια-περιβάλλον/

[file:///C:/Users/cindy/Downloads/\[Dimitriadis_A\]_Meleti_skopimotitas_gia_ti_chrisi_enallaktikon_kafsimon_stin_aktoploia.pdf](file:///C:/Users/cindy/Downloads/[Dimitriadis_A]_Meleti_skopimotitas_gia_ti_chrisi_enallaktikon_kafsimon_stin_aktoploia.pdf)

https://portal.tee.gr/portal/page/portal/teetkm/DRASTHRIOTHTES/EKDHLVSEIS/EKDHLVSEIS_2007_2009/KAYSIMA_METAFORWN_KAI_AEIFOROS_ANAPTYKSH/Tab2

<https://www.europarl.europa.eu/topics/el/article/20221013STO43019/enallaktika-kausima-ochimaton-poia-einai-kai-pos-tha-enischusoume-ti-chrisi-tous>

<http://www.allaboutenergy.gr/Intro12.html>

https://www.eca.europa.eu/ECAPublications/SR-2023-29/SR-2023-29_EL.pdf

<https://news.b2green.gr/35789/ώριμο-το-έδαφος-για-ανάπτυξη-του-βιομε>

https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/overall-targets-and-reporting/2030-targets_el

[https://www.europarl.europa.eu/thinktank/el/document/04A_FT\(2017\)N54594](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/el/document/04A_FT(2017)N54594)

<https://www.naftemporiki.gr/finance/world/1463320/i-eyropi-prochora-se-nea-pyriniki-epochi/>

http://www.cres.gr/kape/publications/pdf/treatise/4_limper_enal.pdf

<https://chem.noesis.edu.gr/H-Atmosfairikh-Rypansh-sum>

<https://atmitos.gr/ethalomichli/>

<https://www.sciencedirect.com/journal/renewable-energy>

<https://www.sciencedirect.com/journal/renewable-and-sustainable-energy-reviews>

<https://www.elsevier.com/en-gb/subject/energy/renewable-transformation-challenge>

