ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ



ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εφαρμογή Ειδικά διαμορφωμένων Κύκλων Οδήγησης για σύγκριση οχημάτων διαφορετικής ενέργειας σε αστικές/υπεραστικές συνθήκες της Κρήτης.

Στεφανάκης Βασίλειος-Ανάργυρος
ΑΜ: 6301

Επιβλέπον Καθηγητές: Τζιράκης Ευάγγελος

Ηράκλειο,
Νοέμβριος 2025

Ευχαριστίες

Η εν λόγο πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στο Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο ,στο τμήμα Μηχανολογία που υπάγετε στη σχολή τεχνικών εφαρμογών, κατά το έτος 2025. Η υλοποίηση τούτης εργασίας δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την βοήθεια και καθοδήγηση του επιβλέποντος καθηγητή κ. Τζιράκη Ευάγγελου μέλος ΕΔΙΠ του Ελληνικού Μεσογειακό Πανεπιστήμιο.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Λαδάκη Εμμανουήλ περιφερειακό διευθυντή
Κρήτης, Κυκλάδων και Δωδεκανήσων στην εταιρία Avis για την χορηγία του οχήματος διότι χωρίς την βοήθεια του τα παρακάτω αποτελέσματα δεν θα ήταν δυνατόν να συλλεχθούν και η ολοκλήρωση της εργασίας θα ήταν αδύνατη.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εστιάζει στη μελέτη της ενεργειακής απόδοσης και των εκπομπών ενός Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) σε πραγματικές συνθήκες οδήγησης. Αρχικά παρουσιάζονται τα θεσμοθετημένα πρότυπα εκπομπών ρύπων, οι επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και οι μέθοδοι μέτρησης καυσαερίων. Στη συνέχεια αναλύεται η τεχνολογική εξέλιξη των PHEV και η συμβολή τους στη μείωση των εκπομπών CO_2. Το πειραματικό μέρος πραγματοποιήθηκε στο Ηράκλειο Κρήτης, υπό τρία προφίλ οδήγησης (οικονομικό, με τη ροή της κυκλοφορίας, επιθετικό) και σε δύο καταστάσεις του οχήματος (φορτισμένο – αφόρτιστο). Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι το PHEV, όταν είναι φορτισμένο και οδηγείται με ήπιο στυλ, μπορεί να κινηθεί αποκλειστικά ηλεκτρικά, μηδενίζοντας τις εκπομπές CO_2 και την κατανάλωση καυσίμου. Επιπλέον, ακόμα και αφόρτιστο, η ανάκτηση ενέργειας συνεισφέρει στη μείωση των εκπομπών. Συνολικά, επιβεβαιώνεται η συμβολή των PHEV στη βιώσιμη κινητικότητα, υπό την προϋπόθεση τακτικής φόρτισης και υιοθέτησης πιο φιλικού προς το περιβάλλον τρόπου οδήγησης.

Λέξεις κλειδιά: PHEV, ρίποι CO_2 ,κύκλοι οδήγησης, κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, κατανάλωση WLTC, WLTP,RDE,

Abstract

This thesis focuses on the study of the energy efficiency and emissions of a Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) under real driving conditions. It begins with an overview of the regulatory emission standards, the impact of air pollution, and the methods used for exhaust gas measurement. The technological development of PHEVs and their role in reducing CO_2 emissions are also discussed. The experimental part was conducted in Heraklion, Crete, under three driving profiles (eco-driving, traffic flow, aggressive driving) and in two vehicle states (fully charged – discharged). The results show that when the PHEV is fully charged and driven in an economical manner, it can operate solely on electric power, achieving zero CO_2 emissions and zero fuel consumption. Furthermore, even when discharged, energy recovery during deceleration contributes to reducing emissions. Overall, the findings confirm the potential of PHEVs to promote sustainable mobility, provided that regular charging and environmentally friendly driving behavior are adopted.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες 2
Περίληψη 2
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή 7
1.1 Ατμοσφαιρική ρύπανση 7
1.2 Φαινόμενο του Θερμοκηπίου 7
1.3 Επιπτώσεις στην υγεία 8
1.4 Ανθρωπογενείς εκπομπές ρύπων 9
1.5 Βλαβερές ουσίες που εκπέμπουν οι κινητήρες των οχημάτων 9
Κεφάλαιο 2: Θεσμοθετημένα πρότυπα 10
2.1 Ευρωπαϊκά πρότυπα εκπομπών ρύπων 10
2.2 Πρόγραμμα περιορισμού καυσαερίων από τα οχήματα 13
2.3 Σταθμοί και όργανα μέτρησης εκπομπής ρύπων 13
2.4 Έλεγχοι – Κάρτα Ελέγχου Καυσαερίων (Κ.Ε.Κ.) 15
2.5 Το Πρωτόκολλο του Κιότο 16
2.6 Εφαρμογή των μέτρων 17
2.7 Το Χρηματιστήριο Ρύπων (Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών) 18
Κεφάλαιο 3: Όρια εκπομπών και υποχρεώσεις στην Ελλάδα 19
3.1 Επιπτώσεις για κάθε επιπλέον γραμμάριο CO_2 στις αυτοκινητοβιομηχανίες 19
3.2 Στόχοι ειδικών εκπομπών της Ε.Ε. 20
3.3 Μέθοδοι για τη μείωση του χάσματος μεταξύ εκπομπών CO_2 σε πραγματικές συνθήκες και σε συνθήκες δοκιμών στο εργαστήριο 22
3.4 Πρόστιμο υπέρβασης εκπομπών 24
3.5 Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου 25
3.6 Μέθοδοι συλλογής δεδομένων για τον υπολογισμό κατανάλωσης καυσίμου 26
Κεφάλαιο 4: Κύκλοι οδήγησης 28
4.1 Ταξινόμηση κύκλων οδήγησης 28
4.2 Βασικές παράμετροι των κύκλων οδήγησης 29
4.3 Κύκλοι οδήγησης στην Ευρωπαϊκή Ένωση 30
4.4 Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής 32
4.5 Artemis – CADC 33
4.6 WLTC (Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Cycle) 36
Κεφάλαιο 5: Μέθοδοι μέτρησης καυσαερίων στον κύκλο πόλης 39
5.1 Εξοπλισμός ανάλυσης των αερίων 39
5.2 Προδιαγραφές και δοκιμές 40
5.3 Σύντομη περιγραφή δοκιμών τύπου I και II 43
Κεφάλαιο 6: Τρόποι κατασκευής κύκλων οδήγησης πόλης 45
Κεφαλαίο 7: Η Εξέλιξη των Μπαταριών στα Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEV) 49

Ιστορική Εξέλιξη των PHEV και των Μπαταριών τους 50
Τεχνολογίες Μπαταριών και Συστήματα Διαχείρισης 50
Στατιστικά Στοιχεία και Γραφήματα 50
Παράγοντες που Επηρεάζουν την Πραγματική Αυτονομία 51
Μελλοντικές Προοπτικές 52
Συμπεράσματα 52
Κεφάλαιο 8: Θεωρία Miller 52
1. Εισαγωγή 52
2. Θεωρητική Ανάλυση 52
3. Θερμοδυναμική Απόδοση 53
4. Συγκριτική Ανάλυση με Κύκλο Otto και Atkinson 54
5. Εφαρμογές 54
6. Συμπεράσματα 54
Κεφάλαιο 9: Πειραματική διαδικασία 55
Εισαγωγή στο πείραμα -Συλλογή δεδομένων 55
Εξοπλισμός των μετρήσεων 56
-Όχημα καταγραφής 56
-Συσκευή συλλογής δεδομένων 57
Τεχνικά Χαρακτηριστικά 57
Εφαρμογές 57
Εφαρμογές και Πλεονεκτήματα 58
Εφαρμογή Torque 59
Εφαρμογή Torque Pro 59
Δυνατότητες και Μεταβλητές Καταγραφής 59
Μεθοδολογία Καταγραφής 59
Ανάλυση των δεδομένων 62
Βιβλιογραφία 79

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Τύποι χημικών ενώσεων

CO	μονοξείδιο του άνθρακα
HC	υδρογονάνθρακα
NOx	οξείδιο του αζώτου
O2	οξυγόνο
PM	αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter)

Συντομογραφίες

Cc	κυβικά εκατοστά (cubic centimeters)
EOK	Ευρωπαϊκή Οικονομική επιτροπή
E.E	Ευρωπαϊκή Επιτροπή
ECE	Economic Commission for Europe
ECU	Economic Control Unit
OBD	On-Board Diagnostics (σύστημα αυτοδιάγνωσης)
NEDC	New European Drinving Cycle
UDC	Urban Driving Cycle
UDDS	Urban Dynamometer Driving Schedule
ARTEMIS	Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems
WHDC	World Harmonized Heavy Duty Cycle
WLTC	Worldwide Harmonized Light Duty Test Cycle
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure
WMTC	Worldwide Harmonized Motorcycle Emission Test Cycle

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

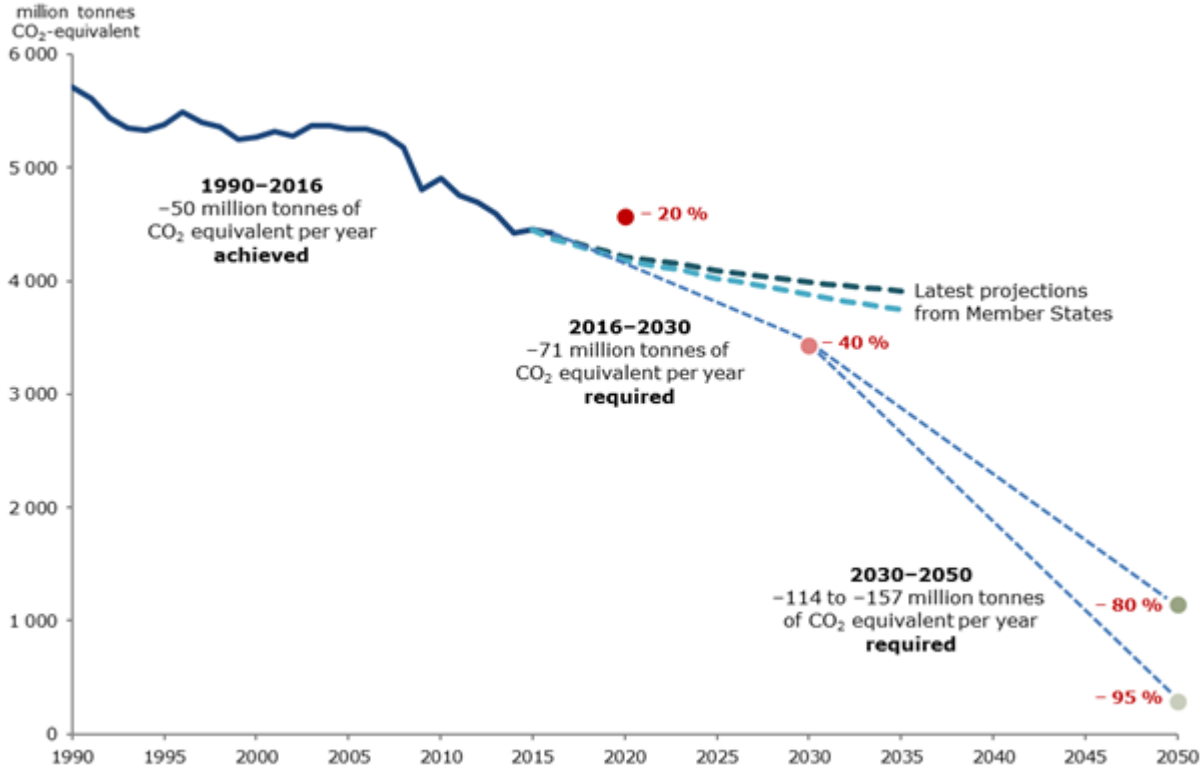
1.1 Ατμοσφαιρική ρύπανση

Η ατμοσφαιρική ρύπανση ορίζεται ως η παρουσία οποιασδήποτε ουσίας στην ατμόσφαιρα σε συγκεντρώσεις αρκετά υψηλές ώστε να προκαλούν βλάβες σε ανθρώπους, ζώα, βλάστηση ή υλικά. Οι ρύποι της ατμόσφαιρας ποικίλλουν ανά περιοχή, όμως ορισμένοι – όπως το όζον (O_3), το διοξείδιο του αζώτου (NO_2), τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) και το διοξείδιο του θείου (SO_2) – παρακολουθούνται στενά καθώς είναι γνωστό ότι βλάπτουν το περιβάλλον και την υγεία. Αν και μεγάλο ποσοστό των παραγόμενων αερίων ρύπων προέρχεται από φυσικές πηγές (π.χ. ηφαιστειακή δραστηριότητα, σκόνη ερήμων, θαλάσσιο αλάτι), οι ανθρωπογενείς εκπομπές είναι κυρίως υπεύθυνες για τα σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα που έχουν εμφανιστεί τις τελευταίες δεκαετίες. Αυτό οφείλεται τόσο στην ανατροπή της φυσικής ισορροπίας όσο και στην ιδιαίτερα υψηλή τοπική συγκέντρωση ανθρωπογενών ρύπων σε μικρές γεωγραφικές περιοχές (ιδίως αστικά κέντρα και βιομηχανικές ζώνες).

1.2 Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι μια φυσική διαδικασία της ατμόσφαιρας χάρη στην οποία δημιουργούνται οι κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας που καθιστούν τη Γη κατοικήσιμη. Τα αέρια που ευθύνονται για το φαινόμενο αυτό ονομάζονται αέρια του θερμοκηπίου (Greenhouse Gases, GHG). Τα κυριότερα αέρια θερμοκηπίου είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο (CH_4), το υποξείδιο του αζώτου (N_2O), οι υδροφθοράνθρακες (HFCs), οι υπερφθοράνθρακες (PFCs) και το εξαφθορικό θείο (SF_6). Τα αέρια αυτά παγιδεύουν θερμότητα στην ατμόσφαιρα, διατηρώντας τη μέση θερμοκρασία του πλανήτη σε επίπεδα ανεκτά για την ανάπτυξη της ζωής. Χωρίς το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου, η μέση θερμοκρασία της Γης θα ήταν πολύ χαμηλότερη, ωστόσο η υπέρμετρη αύξηση των συγκεντρώσεων των GHG λόγω ανθρώπινων δραστηριοτήτων ενισχύει το φαινόμενο και

οδηγεί σε υπερθέρμανση του πλανήτη (κλιματική αλλαγή).



Εικόνα 1: διάγραμμα τάσης και στόχου μείωσης των εκπομπών θερμοκηπίου

1.3 Επιπτώσεις στην υγεία

Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι έχουν σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Τα αιωρούμενα σωματίδια ($PM_{2.5}$ και PM_{10}) διεισδύουν στο αναπνευστικό σύστημα προκαλώντας αναπνευστικά και καρδιαγγειακά προβλήματα. Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (EEA), μόνο η έκθεση σε λεπτά σωματίδια $PM_{2.5}$ προκάλεσε τουλάχιστον ~253.000 πρόωρους θανάτους στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2021. Τα οξείδια του αζώτου (NOx) ερεθίζουν το αναπνευστικό σύστημα και συμβάλλουν στον σχηματισμό αστικού νέφους (smog) και όζοντος χαμηλού υψομέτρου, ενώ

το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) εμποδίζει τη μεταφορά οξυγόνου στο αίμα. Συνεπώς, η μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης αποτελεί κρίσιμο στόχο για τη δημόσια υγεία.

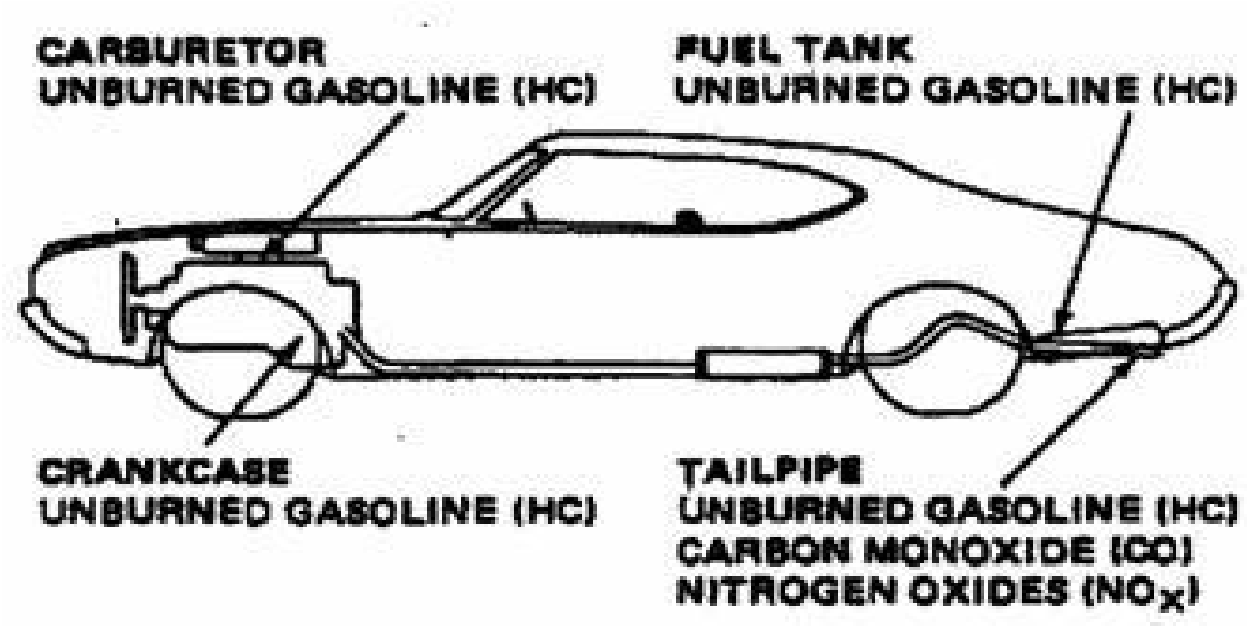
1.4 Ανθρωπογενείς εκπομπές ρύπων

Οι ανθρώπινες δραστηριότητες αποτελούν σημαντική πηγή επιβλαβών εκπομπών. Μεταξύ αυτών, οι μεταφορές διαδραματίζουν πρωτεύοντα ρόλο. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση ο τομέας των μεταφορών είναι υπεύθυνος περίπου για το ένα τέταρτο των συνολικών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και μάλιστα είναι ο μόνος μεγάλος τομέας όπου οι εκπομπές αυξήθηκαν σε σχέση με το 1990. Ειδικότερα, οι οδικές μεταφορές αποτελούν την μεγαλύτερη εκπομπή οξειδίων του αζώτου (NOx) στην Ευρώπη. Άλλες κύριες ανθρωπογενείς πηγές ρύπων είναι η παραγωγή ενέργειας (σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής), η βιομηχανία, η θέρμανση κτιρίων και η γεωργία. Η συγκέντρωση των δραστηριοτήτων αυτών στα αστικά κέντρα οδηγεί σε υψηλά επίπεδα ρύπανσης τοπικά, επιδεινώνοντας τα προβλήματα όπως η αστική αιθαλομίχλη και η όξινη βροχή.

1.5 Βλαβερές ουσίες που εκπέμπουν οι κινητήρες των οχημάτων

Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης των οχημάτων εκπέμπουν πληθώρα βλαβερών ουσιών. Οι κύριοι ρύποι από την καύση βενζίνης ή πετρελαίου είναι: μονοξείδιο του άνθρακα (CO), άκαυστοι υδρογονάνθρακες (HC) – πολλοί εκ των οποίων είναι τοξικοί ή και καρκινογόνοι, οξείδια του αζώτου (NOx) – που συμβάλλουν στον σχηματισμό όζοντος και όξινης βροχής, και αιωρούμενα σωματίδια (PM) – κυρίως από κινητήρες πετρελαίου, τα οποία προκαλούν αναπνευστικές παθήσεις. Επιπλέον, οι κινητήρες εκπέμπουν διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το οποίο δεν είναι τοξικό για την ανθρώπινη υγεία αλλά είναι το κυριότερο ανθρωπογενές αέριο θερμοκηπίου, συμβάλλοντας στην κλιματική αλλαγή. Άλλοι ρύποι περιλαμβάνουν το διοξείδιο του θείου (SO_2 , κυρίως παλαιότερα λόγω θείου στα καύσιμα) και δευτερογενώς αμμωνία (NH_3) από καταλύτες. Η Ευρωπαϊκή πολιτική περιορίζει δραστικά τις εκπομπές αυτές μέσω ολοένα αυστηρότερων προτύπων, αναγκάζοντας τους κατασκευαστές οχημάτων να υιοθετήσουν τεχνολογίες όπως καταλυτικοί μετατροπείς, φίλτρα σωματιδίων και

συστήματα επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής (SCR) για τα NOx.



Εικόνα 2: *πηγές και τύποι ατμοσφαιρικών ρίπων σε ένα όχημα*

Κεφάλαιο 2: Θεσμοθετημένα πρότυπα

2.1 Ευρωπαϊκά πρότυπα εκπομπών ρύπων

Στην Ευρώπη έχουν θεσπιστεί πρότυπα εκπομπών για οχήματα, γνωστά ως πρότυπα *Euro*, που καθορίζουν τα ανώτατα επιτρεπόμενα όρια ρύπων από τα νέα οχήματα. Τα πρότυπα αυτά (Euro 1, 2, 3, …) εισάγονται σταδιακά από τις αρχές της δεκαετίας του 1990, με κάθε επόμενη βαθμίδα να γίνεται αυστηρότερη ως προς τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα, υδρογονανθράκων, οξειδίων του αζώτου και σωματιδίων. Για παράδειγμα, το Euro 1 (1992) εισήγαγε για πρώτη φορά καταλυτικούς μετατροπείς στα αυτοκίνητα, ενώ το Euro 6 (2014/15) έθεσε πολύ χαμηλά όρια για τα NOx στα πετρελαιοκίνητα (80 mg/km) και για τα PM με την απαίτηση χρήσης φίλτρων σωματιδίων.

Το πιο πρόσφατο πρότυπο, Euro 7, συμφωνήθηκε το 2024 και αναμένεται να τεθεί σε ισχύ το 2025–2026, φέρνοντας περαιτέρω διεύρυνση του

ρυθμιστικού πλαισίου. Εισάγει για πρώτη φορά όρια και για ρύπους μη εξάτμισης, όπως τα σωματίδια από τη φθορά φρένων και ελαστικών, ενώ περιλαμβάνει και απαιτήσεις για τη διάρκεια ζωής των μπαταριών στα ηλεκτρικά οχήματα. Για τα επιβατικά αυτοκίνητα και ελαφρά φορτηγά, το Euro 7 διατηρεί τα υφιστάμενα όρια καυσαερίων του Euro 6 αλλά θέτει αυστηρότερες

απαιτήσεις στον αριθμό σωματιδίων (PN), ενώ για τα βαρέα οχήματα μειώνει σημαντικά τα όρια ρύπων και ρυθμίζει για πρώτη φορά ρύπους όπως το υποξείδιο του αζώτου (N_2O) . Επιπρόσθετα, το Euro 7 εισάγει ένα νέο σύστημα επίβλεψης εκπομπών εντός του οχήματος, γνωστό ως OBM (*On-board emissions monitoring*), το οποίο θα παρακολουθεί συνεχώς τις εκπομπές ρύπων (NOx και PM) κατά την πραγματική οδήγηση σε όλα τα οχήματα Euro 7 με κινητήρα καύσης . Αυτή η καινοτομία στοχεύει να διασφαλίσει τη συμμόρφωση των οχημάτων με τα όρια ρύπων καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους, σε πραγματικές συνθήκες οδήγησης.

Euro emissions standards for diesel cars

Euro standard	Date	CO	NOx	PM
Euro 1	July 1992	2.72	-	0.14
Euro 2	January 1996	1.0	-	0.08
Euro 3	January 2000	0.64	0.50	0.05
Euro 4	January 2005	0.50	0.25	0.025
Euro 5a	September 2009	0.50	0.180	0.005
Euro 6	September 2014	0.50	0.080	0.005

Εικόνα 3: Οριακές τιμές για πετρελαιοκίνητα αυτοκίνητα

Euro emissions standards for petrol cars

Euro standard	Date	CO	NOx	PM
Euro 1	July 1992	2.72	-	-
Euro 2	January 1996	2.2	-	-
Euro 3	January 2000	2.3	0.15	-
Euro 4	January 2005	1.0	0.08	-
Euro 5	September 2009	1.0	0.060	0.005
Euro 6	September 2014	1.0	0.060	0.005

εικόνα 4: οριακές τιμές για βενζινοκίνητα αυτοκίνητα

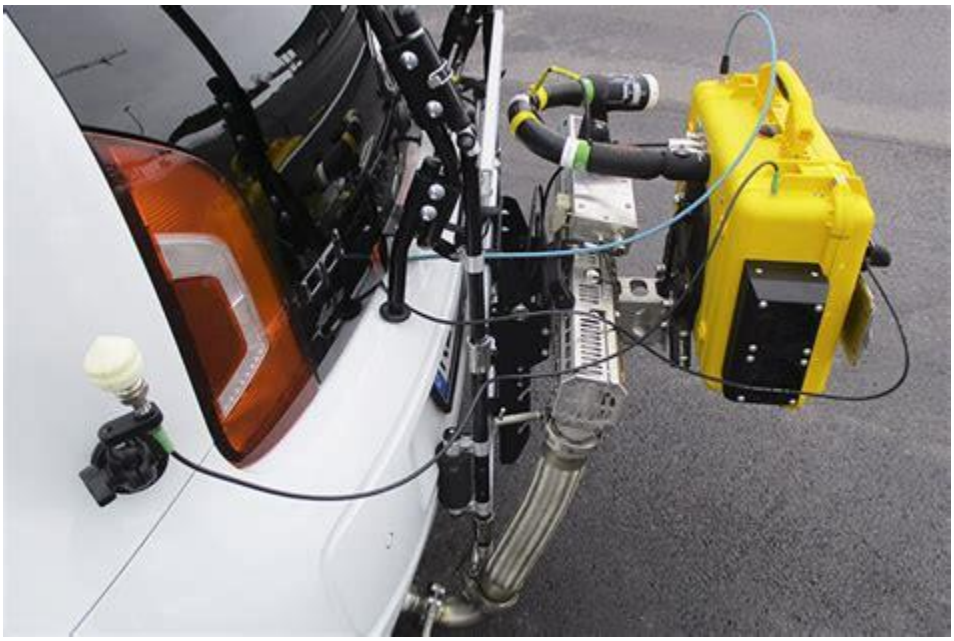
2.2 Πρόγραμμα περιορισμού καυσαερίων από τα οχήματα

Η Ευρωπαϊκή Ένωση ακολουθεί μια ολοκληρωμένη στρατηγική για τον περιορισμό των εκπομπών καυσαερίων από τα οχήματα. Εκτός από τα πρότυπα Euro που θέτουν όρια ανά όχημα, εφαρμόζονται και οριζόντια μέτρα όπως η βελτίωση της ποιότητας των καυσίμων (π.χ. μείωση περιεκτικότητας σε θείο), η προώθηση εναλλακτικών καυσίμων χαμηλών εκπομπών και η ενίσχυση της χρήσης μέσων μαζικής μεταφοράς και ήπιων μέσων μετακίνησης. Σε επίπεδο ΕΕ έχουν εκδοθεί οδηγίες και κανονισμοί που θέτουν στόχους και προγράμματα για καθαρότερα οχήματα. Για παράδειγμα, θεσπίστηκαν κανονισμοί που επιβάλλουν ανώτατες μέσες εκπομπές CO_2 για το στόλο νέων αυτοκινήτων κάθε κατασκευαστή , υποχρεώνοντας πρακτικά τους κατασκευαστές να επενδύσουν σε αποδοτικότερους κινητήρες και ηλεκτροκίνηση. Στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας, η ΕΕ έχει μακροπρόθεσμο στόχο την κλιματική ουδετερότητα ως το 2050, δεσμευόμενη νομικά μέσω του Ευρωπαϊκού Νόμου για το Κλίμα. Το 2023 εγκρίθηκε κανονισμός που προβλέπει από το 2035 και μετά όλα τα καινούργια αυτοκίνητα και ελαφρά φορτηγά που θα πωλούνται στην ΕΕ να έχουν μηδενικές εκπομπές CO_2, ουσιαστικά απαγορεύοντας τους κινητήρες εσωτερικής καύσης στα νέα οχήματα από εκείνο το έτος . Μέσω τέτοιων προγραμμάτων και ρυθμίσεων, επιδιώκεται η σταδιακή μείωση των ρύπων των μεταφορών και η ευθυγράμμιση με τους κλιματικούς στόχους.

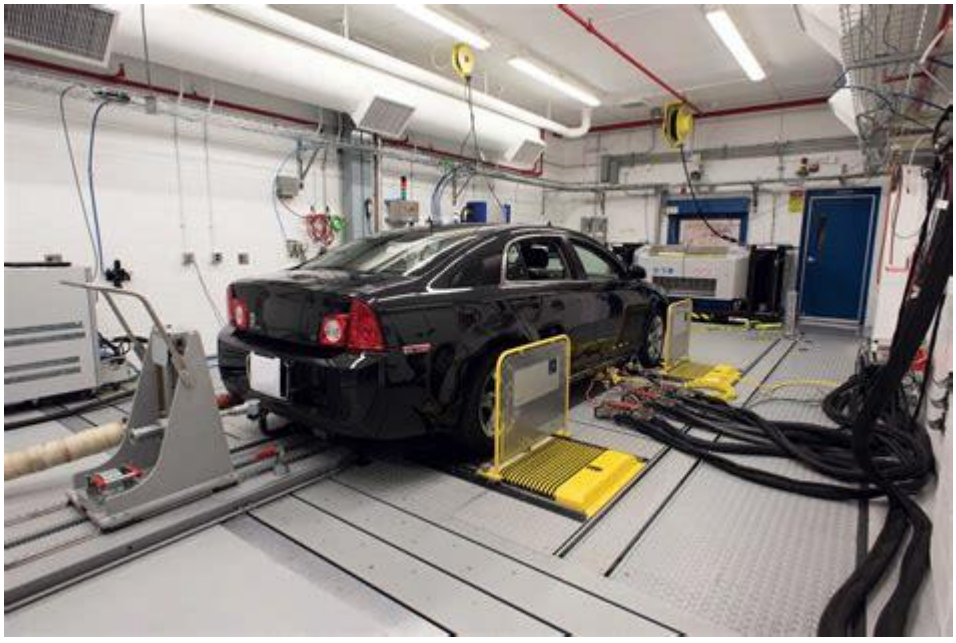
2.3 Σταθμοί και όργανα μέτρησης εκπομπής ρύπων

Η τήρηση των προτύπων εκπομπών επιτυγχάνεται με δοκιμές και μετρήσεις σε εξειδικευμένους σταθμούς και με κατάλληλα όργανα. Για την έγκριση τύπου νέων οχημάτων, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε εργαστήρια με τη χρήση δυναμόμετρων κύλισης (*chassis dynamometers*), όπου το όχημα εκτελεί προκαθορισμένους κύκλους οδήγησης (π.χ. WLTP) και αναλύονται τα καυσαέρια του. Τα όργανα που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν αναλυτές αερίων που μετρούν τις συγκεντρώσεις CO, CO_2, HC, NOx κ.ά., καθώς και οπτικούς μετρητές καπνού για τα σωματίδια αιθάλης. Επιπλέον, σε πραγματικές συνθήκες δρόμου χρησιμοποιούνται φορητά συστήματα μέτρησης εκπομπών (*Portable Emissions Measurement Systems*, PEMS) για τη διενέργεια δοκιμών RDE (Real Driving Emissions). Τα PEMS είναι συσκευές που τοποθετούνται στο όχημα και

περιλαμβάνουν φορητούς αναλυτές αερίων και αισθητήρες ροής καυσαερίων, επιτρέποντας τη μέτρηση ρύπων ενώ το όχημα οδηγείται κανονικά στον δρόμο. Τέτοια συστήματα εξελίχθηκαν σημαντικά την τελευταία δεκαετία, καθιστώντας εφικτό τον αξιόπιστο έλεγχο των εκπομπών σε ρεαλιστικές συνθήκες οδήγησης.



Εικόνα 5: Κινητό σύστημα μέτρησης εκπομπών



Εικόνα 6: Δοκιμή σε δυναμόμετρο



Εικόνα 7: Αναλυτής εκπομπών

2.4 Έλεγχοι – Κάρτα Ελέγχου Καυσαερίων (Κ.Ε.Κ.)

Στην Ελλάδα, πέραν των ελέγχων που γίνονται κατά την έγκριση τύπου ενός νέου οχήματος, εφαρμόζεται και περιοδικός έλεγχος των εκπομπών για τα εν κυκλοφορία οχήματα. Συγκεκριμένα, ένα έτος μετά την πρώτη άδεια κυκλοφορίας του, κάθε όχημα πρέπει να περάσει από έλεγχο καυσαερίων και να εφοδιαστεί με την Κάρτα Ελέγχου Καυσαερίων (Κ.Ε.Κ.), η οποία ανανεώνεται κατ' έτος. Ο έλεγχος αυτός

πραγματοποιείται σε εξουσιοδοτημένα συνεργεία ή ΚΤΕΟ και περιλαμβάνει μέτρηση των εκπομπών στο ρελαντί και σε αυξημένες στροφές κινητήρα. Για βενζινοκίνητα οχήματα με καταλύτη, ελέγχονται κυρίως οι εκπομπές CO και HC, ενώ για τα πετρελαιοκίνητα μετριέται η αδιαφάνεια καπνού (ένδειξη σωματιδιακών εκπομπών). Αν οι μετρούμενες τιμές υπερβαίνουν τα επιτρεπόμενα όρια (που καθορίζονται από τη νομοθεσία ανά κατηγορία οχήματος και πρότυπο Euro), τότε ο κάτοχος υποχρεούται σε συντήρηση/ρύθμιση και επανέλεγχο. Η Κ.Ε.Κ. αποτελεί ένα επιπλέον εργαλείο για τη διασφάλιση ότι τα οχήματα διατηρούν χαμηλές εκπομπές σε όλη τη διάρκεια ζωής τους και συμμορφώνονται με τα όρια ρύπων.

2.5 Το Πρωτόκολλο του Κιότο

Σε διεθνές επίπεδο, η πρώτη μεγάλη συμφωνία για τον περιορισμό των αερίων του θερμοκηπίου ήταν το Πρωτόκολλο του Κιότο (1997), το οποίο έθεσε νομικά δεσμευτικούς στόχους μείωσης των εκπομπών GHG για τις ανεπτυγμένες χώρες κατά την περίοδο 2008–2012. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, ως συμβαλλόμενο μέρος, ανέλαβε σημαντικές μειώσεις εκπομπών στο πλαίσιο του Κιότο και εφάρμοσε μέτρα για την υλοποίησή τους (π.χ. Ευρωπαϊκό Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών, προώθηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας). Το Πρωτόκολλο του Κιότο διαδέχθηκε η Συμφωνία του Παρισιού (2015), μια παγκόσμια συμφωνία που για πρώτη φορά υποχρεώνει όλες τις χώρες (αναπτυγμένες και αναπτυσσόμενες) να καταρτίσουν εθνικούς στόχους μείωσης των εκπομπών, με σκοπό τη συγκράτηση της αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας κάτω από 2°C. Η ΕΕ, μέσω του Ευρωπαϊκού Κλιματικού Νόμου που τέθηκε σε ισχύ τον Ιούλιο του 2021, κατοχύρωσε νομικά τη δέσμευσή της να γίνει κλιματικά ουδέτερη έως το 2050, σε συνέχεια της Συμφωνίας του Παρισιού . Παράλληλα, έθεσε ενδιάμεσο στόχο μείωσης καθαρών εκπομπών κατά τουλάχιστον 55% ως το 2030 (σε σύγκριση με το 1990). Οι διεθνείς αυτές συμφωνίες και δεσμεύσεις καθοδηγούν και τον τομέα των μεταφορών, επιταχύνοντας τη μετάβαση σε καθαρότερες τεχνολογίες οχημάτων και καυσίμων.

2.6 Εφαρμογή των μέτρων

Η αποτελεσματικότητα των περιβαλλοντικών μέτρων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πιστή εφαρμογή και επιβολή τους. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, οι κανονισμοί εκπομπών εφαρμόζονται ομοιόμορφα σε όλα τα κράτη-μέλη: ένα νέο όχημα μπορεί να ταξινομηθεί μόνο εφόσον πληροί το εκάστοτε πρότυπο Euro και έχει περάσει επιτυχώς όλες τις δοκιμές τύπου. Οι εθνικές αρχές εγκρίσεως τύπου οχημάτων συνεργάζονται, ενώ η Ευρωπαϊκή Επιτροπή διεξάγει και δικούς της δειγματοληπτικούς ελέγχους (market surveillance) ώστε να εντοπίζονται τυχόν αποκλίσεις ή παράνομες πρακτικές (π.χ. *defeat devices*). Μετά το σκάνδαλο "Dieselgate" δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην εφαρμογή των κανονισμών, με αυστηρότερους ελέγχους συμμόρφωσης σε πραγματικές συνθήκες. Επιπλέον, τα κράτη-μέλη μέσω των ΚΤΕΟ και της Κάρτας Καυσαερίων διασφαλίζουν ότι και τα οχήματα σε κυκλοφορία δεν ρυπαίνουν υπέρμετρα. Τέλος, έχουν θεσπιστεί οικονομικά εργαλεία και κίνητρα για την υποστήριξη των μέτρων: φορολογικά κίνητρα για αγορά καθαρότερων οχημάτων, επιδοτήσεις για ηλεκτροκίνηση, και πολιτικές όπως η αστική διόδια ή περιορισμοί κυκλοφορίας σε "πράσινες ζώνες" που αποθαρρύνουν τη χρήση ρυπογόνων οχημάτων στα κέντρα πόλεων. Η συνεπής εφαρμογή όλων των παραπάνω μέτρων έχει συμβάλει στη σταδιακή βελτίωση της ποιότητας του αέρα. Για παράδειγμα, στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής και της βιομηχανίας (που καλύπτονται από το ETS, βλ. επόμενη ενότητα) οι εκπομπές μειώθηκαν κατά ~47% μέσα σε 18 χρόνια . Αντίστοιχα, στα αυτοκίνητα, οι εκπομπές ρύπων ανά χιλιόμετρο έχουν μειωθεί δραστικά τις τελευταίες δεκαετίες χάρη στα τεχνολογικά μέτρα συμμόρφωσης με τα πρότυπα Euro.

2.7 Το Χρηματιστήριο Ρύπων (Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών)

Το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών της ΕΕ (EU ETS) αποτελεί ένα βασικό εργαλείο πολιτικής για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Εφαρμόζεται από το 2005 και λειτουργεί με βάση την αρχή «cap-and-trade»: τίθεται ένα συνολικό όριο (cap) στις εκπομπές CO_2 μεγάλων εγκαταστάσεων (ηλεκτροπαραγωγή, ενεργοβόρες βιομηχανίες) και αεροπορικών εταιριών, και εκδίδονται αντίστοιχα δικαιώματα εκπομπής. Οι επιχειρήσεις που συμμετέχουν πρέπει στο τέλος κάθε έτους να παραδώσουν δικαιώματα για κάθε τόνο CO_2 που εξέπεμψαν. Μπορούν να αγοράζουν ή να πωλούν δικαιώματα μεταξύ τους, δημιουργώντας έτσι μια χρηματιστηριακή αξία για τις εκπομπές: αν μια εταιρεία μειώσει τις εκπομπές της, μπορεί να πουλήσει τα πλεονάζοντα δικαιώματα και να επωφεληθεί οικονομικά, ενώ μια εταιρεία που δυσκολεύεται να μειώσει ρύπους μπορεί να αγοράσει δικαιώματα πληρώνοντας το αντίστοιχο κόστος. Με την πάροδο του χρόνου, το συνολικό όριο εκπομπών μειώνεται, κάνοντας τα δικαιώματα όλο και πιο δυσεύρετα και ακριβά – έτσι, δημιουργείται κίνητρο για συνεχή μείωση ρύπων.

Το EU ETS έως το 2020 κάλυπτε ~45% των εκπομπών της ΕΕ (βιομηχανία, ενέργεια, αεροπορία). Το 2023, στο πλαίσιο του πακέτου “Fit for 55”, αποφασίστηκε η δημιουργία ενός δεύτερου Συστήματος Εμπορίας Εκπομπών (γνωστό ως ETS2) που θα καλύπτει τις εκπομπές από τους τομείς των οδικών μεταφορών και των κτιρίων, το οποίο θα τεθεί σε εφαρμογή από το 2027 . Συγκεκριμένα, θα επιβάλλεται πλέον κόστος άνθρακα στα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στις μεταφορές και στη θέρμανση, επεκτείνοντας την αρχή “ο ρυπαίνων πληρώνει” και σε αυτούς τους κατανεμημένους τομείς. Με την ένταξη και των μεταφορών στο σύστημα εμπορίας, περίπου το 75% των συνολικών εκπομπών της ΕΕ θα καλύπτονται πλέον από σχήματα τιμολόγησης άνθρακα . Παράλληλα, για να αντισταθμιστούν τυχόν κοινωνικές επιπτώσεις (π.χ. αύξηση κόστους καυσίμων για τα νοικοκυριά), έχει προβλεφθεί η δημιουργία Κοινωνικού Ταμείου για το Κλίμα, το οποίο θα

χρηματοδοτεί δράσεις στήριξης των ευάλωτων ομάδων στα πλαίσια του ETS2. Συνολικά, το χρηματιστήριο ρύπων αποτελεί μια ευέλικτη και ισχυρή πολιτική: οι επιχειρήσεις έχουν την ευχέρεια να επιλέξουν πώς θα μειώσουν τις εκπομπές τους (είτε επενδύοντας σε καθαρότερη τεχνολογία είτε αγοράζοντας δικαιώματα), εξασφαλίζοντας ότι οι μειώσεις επιτυγχάνονται εκεί όπου το κόστος είναι χαμηλότερο, ενώ το περιβαλλοντικό αποτέλεσμα (συνολική μείωση εκπομπών) είναι εγγυημένο από το φθίνον ανώτατο όριο.

Κεφάλαιο 3: Όρια εκπομπών και υποχρεώσεις στην Ελλάδα

3.1 Επιπτώσεις για κάθε επιπλέον γραμμάριο CO_2 στις αυτοκινητοβιομηχανίες

Οι κανονισμοί της ΕΕ για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) από νέα οχήματα επιβάλλουν αυστηρά όρια στον μέσο όρο εκπομπών κάθε κατασκευαστή. Η μη επίτευξη των στόχων αυτών συνοδεύεται από σημαντικές οικονομικές κυρώσεις. Κάθε επιπλέον γραμμάριο CO_2 ανά χιλιόμετρο πάνω από τον στόχο μπορεί να κοστίσει υπέρογκα ποσά σε μια αυτοκινητοβιομηχανία, δεδομένου ότι το πρόστιμο εφαρμόζεται για κάθε όχημα που ταξινομήθηκε. Ενδεικτικά, η ΕΕ έχει ορίσει *ποινή υπέρβασης εκπομπών* €95 για κάθε 1 g/km CO_2 πάνω από τον στόχο, ανά αυτοκίνητο. Αυτό σημαίνει ότι αν ένας κατασκευαστής ξεπεράσει τον στόχο του κατά π.χ. 5 g/km και πουλήσει 100.000 αυτοκίνητα, θα αντιμετωπίσει πρόστιμο €47,5 εκατομμυρίων. Επομένως, **κάθε γραμμάριο CO_2 μετράει** – οι αυτοκινητοβιομηχανίες δίνουν τεράστια βαρύτητα στην αποδοτικότητα καυσίμου και την ηλεκτροκίνηση, διότι η υπέρβαση των ορίων CO_2 μπορεί να επιφέρει όχι μόνο περιβαλλοντικό αλλά και οικονομικό κόστος. Ήδη, μεγάλες εταιρείες έχουν κληθεί να καταβάλουν πρόστιμα για υπέρβαση στόχων (π.χ. ο όμιλος Volkswagen πλήρωσε άνω των €100 εκατ. για ελαφρα

υπέρβαση του στόχου του το 2020). Συνολικά, το θεσμικό πλαίσιο δημιουργεί ένα ισχυρό κίνητρο συμμόρφωσης: οι κατασκευαστές είτε θα επενδύσουν σε τεχνολογίες χαμηλών/μηδενικών εκπομπών ώστε να αποφύγουν τα πρόστιμα, είτε θα υποστούν σοβαρές οικονομικές συνέπειες.

Κατάταξη	Μάρκα	Μέσος CO_2 2024 (g/km)	Μέσος CO_2 2025 (g/km)
1	Tesla	0	0
2	Volvo	66	60
3	BMW	100	92
4	Peugeot	100	95
5	Fiat	100	95
6	Seat	104	100
7	Kia	104	98
8	Opel/Vauxhall	105	100
9	MG (SAIC)	105	95
10	Citroën	106	100
11	Mercedes-Benz	108	105
12	Toyota	110	105
13	Renault	110	108
14	Skoda	110	105
15	Hyundai	110	105
16	Audi	115	110
17	Dacia	116	112
18	Ford	118	115
19	Volkswagen	118	112
20	Nissan	120	115

Πίνακας 1: 20 αυτοκινητοβιομηχανίες με τις λιγότερες εκπομπές CO_2

3.2 Στόχοι ειδικών εκπομπών της Ε.Ε.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει συγκεκριμένους στόχους ως προς τις **μέσες ειδικές εκπομπές CO_2** του στόλου νέων οχημάτων. Για τα επιβατικά αυτοκίνητα, ο στόχος για την περίοδο 2020–2024 είναι 95 g CO_2/km (μετρημένο με τον παλιό κύκλο NEDC, ισοδύναμο με περίπου 115 g/km σε

WLTP) . Αυτός ο στόχος είναι ο μέσος όρος που πρέπει να επιτύχει ο στόλος κάθε κατασκευαστή – στην πράξη, κάθε κατασκευαστής έχει έναν εξατομικευμένο στόχο γύρω από αυτό το νούμερο, αναλόγως του μέσου βάρους των οχημάτων του. Από το 2025, τα όρια γίνονται αυστηρότερα και υπολογίζονται πλέον εξ ολοκλήρου με βάση τις μετρήσεις WLTP. Συγκεκριμένα, από το 2025 έως το 2029 τίθεται στόχος περίπου 94 g/km κατά WLTP κατά μέσο όρο στον στόλο της ΕΕ, ο οποίος αντιστοιχεί σε 15% μείωση των εκπομπών συγκριτικά με το σημείο βάσης του 2021. Για το 2030 έχει θεσπιστεί ακόμη πιο φιλόδοξος στόχος: μείωση κατά 37,5% των μέσων εκπομπών των νέων αυτοκινήτων σε σχέση με το 2021 (δηλαδή περίπου 59–60 g/km κατά WLTP).

Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε, το 2023 εγκρίθηκε κανονισμός που προβλέπει 100% μείωση των εκπομπών CO_2 για νέα αυτοκίνητα από το 2035 και μετά. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι από το 2035 και έπειτα θα πωλούνται στην ΕΕ μόνο αυτοκίνητα μηδενικών εκπομπών (ηλεκτρικά ή άλλης τεχνολογίας μηδενικού άνθρακα), επισπεύδοντας το τέλος των κινητήρων εσωτερικής καύσης. Παράλληλα, αντίστοιχοι στόχοι τέθηκαν και για τα ελαφρά επαγγελματικά (van) καθώς και – σε ξεχωριστή νομοθεσία – για τα βαρέα φορτηγά και λεωφορεία (μείωση 30% των εκπομπών CO_2 των νέων φορτηγών έως το 2030 σε σχέση με το 2019).

Οι στόχοι ειδικών εκπομπών λειτουργούν ως μοχλός πίεσης και καινοτομίας στην αυτοκινητοβιομηχανία: για να συμμορφωθούν, οι κατασκευαστές αυξάνουν την παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων και βελτιώνουν την αποδοτικότητα των συμβατικών κινητήρων. Επιπλέον, η ΕΕ έχει προβλέψει μηχανισμούς ευελιξίας και κινήτρων: για παράδειγμα, έως το 2029 οι κατασκευαστές λαμβάνουν «super-credits» και bonus στον στόχο τους αν ένα μεγάλο μερίδιο των πωλήσεών τους είναι οχήματα μηδενικών ή χαμηλών εκπομπών (ZLEV). Όλα αυτά εντάσσονται στη συνολική στρατηγική για μείωση των εκπομπών από τις μεταφορές κατά 90% έως το 2050, όπως προβλέπει η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία.

3.3 Μέθοδοι για τη μείωση του χάσματος μεταξύ εκπομπών CO_2 σε πραγματικές συνθήκες και σε συνθήκες δοκιμών στο εργαστήριο

Παραδοσιακά είχε παρατηρηθεί μεγάλο χάσμα μεταξύ των εκπομπών CO_2 και της κατανάλωσης καυσίμου που μετρούνται στις τυποποιημένες εργαστηριακές δοκιμές και εκείνων που επιτυγχάνονται στην πραγματική χρήση από τους οδηγούς. Στο παρελθόν, με τον κύκλο NEDC, οι τιμές κατανάλωσης/CO_2 που δηλώνονταν ήταν συστηματικά 20-40% χαμηλότερες από τις πραγματικές, λόγω των μη ρεαλιστικών συνθηκών της δοκιμής και της εκμετάλλευσης «παραθυριών» στη διαδικασία μέτρησης. Για τη μείωση αυτού του χάσματος, η ΕΕ εισήγαγε αφενός έναν νέο, πιο αντιπροσωπευτικό κύκλο εργαστηριακής δοκιμής (το WLTP), και αφετέρου τις δοκιμές RDE σε πραγματικό δρόμο Η μετάβαση από το NEDC στο WLTP αποτέλεσε σημαντικό βήμα: από την 1η Σεπτεμβρίου 2019 όλα τα νέα αυτοκίνητα που ταξινομούνται στην ΕΕ πιστοποιούνται με βάση το WLTP, αντικαθιστώντας πλήρως τον παλαιό κύκλο. Ο κύκλος WLTP (WLTC) έχει μεγαλύτερη διάρκεια, υψηλότερες μέσες και μέγιστες ταχύτητες και πιο δυναμικό προφίλ οδήγησης σε σχέση με τον NEDC, προσομοιώνοντας ρεαλιστικότερα την πραγματική οδήγηση . Για παράδειγμα, η μέση ταχύτητα στον WLTP είναι ~46,5 km/h (έναντι ~34 km/h στον NEDC) και η διάρκεια ~30 λεπτά (αντί 20) . Αυτός ο πιο απαιτητικός κύκλος μειώνει το περιθώριο «βελτιστοποίησης» και φέρνει τις εργαστηριακές εκπομπές πιο κοντά στις πραγματικές.

Παράλληλα, οι δοκιμές RDE (Real Driving Emissions) ενσωματώθηκαν ως υποχρεωτικές από το στάδιο Euro 6d-TEMP (2017+) για ρύπους όπως τα NOx και τα σωματίδια, και έχουν συμβάλει και στην καλύτερη αντιστοίχιση της κατανάλωσης. Κατά τις RDE δοκιμές, το όχημα οδηγείται στον δρόμο (με χρήση PEMS) σε ένα μίγμα αστικού, υπεραστικού και αυτοκινητόδρομου περιβάλλοντος, και πρέπει οι εκπομπές του να βρίσκονται εντός ορίων (με έναν επιτρεπόμενο συντελεστή ανοχής για την ακρίβεια των μετρήσεων). Ο αρχικός συντελεστής ανοχής (Conformity Factor) για τα NOx ήταν 2.1 (Euro 6d-TEMP) και μειώθηκε σε 1.43 στο Euro 6d. Από το 2023 (στάδιο Euro 6e) ο συντελεστής μειώθηκε περαιτέρω σε 1.1, πλησιάζοντας δηλαδή μια κατάσταση όπου οι τιμές RDE θα πρέπει πρακτικά να ισούνται με τα όρια εργαστηρίου (συν μια πολύ μικρή τεχνική ανοχή). Επιπλέον, με το πρότυπο Euro 7, όπως προαναφέρθηκε, εισάγεται σύστημα συνεχούς παρακολούθησης επί του οχήματος (OBM) των εκπομπών NOx/PM κατά την οδήγηση , που θα ειδοποιεί για υπερβάσεις και θα εξασφαλίζει ότι τα οχήματα συμμορφώνονται *διαρκώς*.

Τέλος, ένα ακόμα μέτρο για τη μείωση του χάσματος ήταν η επιβολή από την ΕΕ της παρακολούθησης της πραγματικής κατανάλωσης καυσίμου: από το 2021 όλα τα νέα οχήματα φέρουν διατάξεις OBFCM (*On- Board Fuel/Energy Consumption Monitoring*) που καταγράφουν την πραγματική κατανάλωση καυσίμου ή/και ηλεκτρικής ενέργειας. Τα δεδομένα αυτά συλλέγονται (ανώνυμα) και αναφέρονται στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή, η οποία μπορεί να αξιολογήσει την απόκλιση μεταξύ πιστοποιημένων και πραγματικών τιμών. Έτσι, δημιουργείται πρόσθετη διαφάνεια και πίεση στους κατασκευαστές να διασφαλίζουν ότι τα οχήματά τους δεν εμφανίζουν υπερβολικές αποκλίσεις στην πράξη.

Συνολικά, με την εφαρμογή του WLTP, των δοκιμών RDE και των συστημάτων παρακολούθησης, το χάσμα πραγματικών-εργαστηριακών εκπομπών έχει μειωθεί σημαντικά τις τελευταίες χρονιές. Σύγχρονες μελέτες επιβεβαιώνουν ότι οι πραγματικές εκπομπές CO_2 των νέων αυτοκινήτων πλέον είναι κατά μέσο

όρο ~20% υψηλότερες από τις εργαστηριακές (WLTP), ποσοστό πολύ μικρότερο σε σχέση με το παρελθόν. Το ζητούμενο είναι να συνεχιστεί η σύγκλιση αυτή, ώστε οι επίσημες τιμές να αντιστοιχούν στην πραγματική απόδοση – κάτι κρίσιμο και για την εμπιστοσύνη των καταναλωτών αλλά και για την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων στην πράξη.

3.4 Πρόστιμο υπέρβασης εκπομπών

Όπως προαναφέρθηκε, αν οι μέσες εκπομπές CO_2 ενός κατασκευαστή υπερβούν τον στόχο του σε ένα ημερολογιακό έτος, επιβάλλεται *πρόστιμο υπέρβασης* το οποίο μπορεί να είναι ιδιαίτερα υψηλό. Ο τύπος υπολογισμού του προστίμου δίνεται από το γινόμενο: €95 × (γραμμάρια υπέρβασης) × (αριθμός νέων οχημάτων που ταξινομήθηκαν). Το πρόστιμο αυτό δεν είναι ανώτατο πλαφόν – δηλαδή όσο περισσότερο υπερβεί ένας κατασκευαστής τον στόχο και όσο περισσότερα αυτοκίνητα πουλήσει, τόσο μεγαλύτερο γίνεται συνολικά. Αυτό έχει οδηγήσει τις αυτοκινητοβιομηχανίες να αντιμετωπίζουν τους στόχους CO_2 ως εταιρική προτεραιότητα ανώτατης σημασίας, με τα θέματα κατανάλωσης καυσίμου/εκπομπών CO_2 να φτάνουν μέχρι το διοικητικό επίπεδο. Για παράδειγμα, όπως σημειώθηκε, μια υπέρβαση 1 g/km σε μια αγορά 1 εκατομμυρίου αυτοκινήτων συνεπάγεται €95 εκατομμύρια πρόστιμο – ποσό που μπορεί να εξαφανίσει το κέρδος ενός μοντέλου ή να επηρεάσει σημαντικά τους οικονομικούς δείκτες μιας εταιρείας . Στην Ελλάδα, οι αντιπροσωπείες/εισαγωγείς οφείλουν επίσης να συμμορφώνονται με τους στόχους, καθώς τα πρόστιμα υπολογίζονται σε επίπεδο κατασκευαστή πανευρωπαϊκά αλλά τοπικά μπορεί να επηρεάσουν την τιμολογιακή πολιτική (π.χ. επιλογή να μην εισαχθούν αυτοκίνητα με υψηλές εκπομπές που θα "ανεβάσουν" τον μέσο όρο). Συμπληρωματικά, εκτός από τα πρόστιμα CO_2, υπάρχουν και εθνικές φορολογίες που τιμολογούν τις υψηλές εκπομπές (π.χ. στην Ελλάδα τα τέλη ταξινόμησης και τα ετήσια τέλη κυκλοφορίας σχετίζονται με τις εκπομπές CO_2). Όλα αυτά συνθέτουν ένα πλέγμα οικονομικών αντικινήτρων για τα ρυπογόνα οχήματα και εργαλείων προώθησης καθαρότερων επιλογών.

3.5 Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου

Η κατανάλωση καυσίμου ενός οχήματος συνδέεται άμεσα με τις εκπομπές CO_2, καθώς η καύση υδρογονανθράκων παράγει CO_2< σε σταθερή αναλογία. Στις εργαστηριακές δοκιμές, ο υπολογισμός της μέσης κατανάλωσης (σε L/100km) γίνεται έμμεσα μέσω της μέτρησης του εκπεμπόμενου άνθρακα (CO_2) κατά τον κύκλο. Γνωρίζοντας ότι η καύση 1 λίτρου βενζίνης παράγει περίπου 2,31 kg CO_2 και 1 λίτρου πετρελαίου ~2,64 kg CO_2, οι μηχανικοί μπορούν να μετατρέψουν τις μετρημένες εκπομπές άνθρακα στη δοκιμή σε ισοδύναμη κατανάλωση καυσίμου. Για παράδειγμα, ένα αυτοκίνητο που εκπέμπει 120 g CO_2/km αντιστοιχεί περίπου σε 5,2 L/100km κατανάλωση βενζίνης.

Στην πράξη, τα σύγχρονα αυτοκίνητα διαθέτουν πολλούς τρόπους μέτρησης ή εκτίμησης της κατανάλωσης: οι εγκέφαλοι κινητήρα (ECU) και τα συστήματα OBD υπολογίζουν συνεχώς τη στιγμιαία κατανάλωση καυσίμου από δεδομένα όπως ο χρόνος ψεκασμού και η ροή αέρα, προβάλλοντας μια εκτίμηση στον οδηγό. Για πιο ακριβή επιστημονικά δεδομένα, χρησιμοποιούνται ειδικοί αισθητήρες ροής καυσίμου ή ζυγιστικές μέθοδοι (τοποθέτηση του αυτοκινήτου σε ζυγαριά για μέτρηση καυσίμου πριν/μετά τη δοκιμή).

Η συλλογή πραγματικών δεδομένων κατανάλωσης έχει αναβαθμιστεί σημαντικά με τα υποχρεωτικά OBFCM: οι συσκευές αυτές καταγράφουν σε μνήμη τη συνολική κατανάλωση καυσίμου και την απόσταση, επιτρέποντας τον αξιόπιστο υπολογισμό του πραγματικού μέσου L/100km που διένυσε το όχημα. Ήδη οι πρώτες αναφορές δεδομένων OBFCM από στόλους οχημάτων στην Ευρώπη δείχνουν πώς η πραγματική κατανάλωση συγκρίνεται με τη θεωρητική, εντοπίζοντας μοντέλα με μεγάλη απόκλιση.

Συμπερασματικά, ο υπολογισμός της κατανάλωσης καυσίμου είναι πλέον μια καλά ορισμένη διαδικασία τόσο σε ελεγχόμενες συνθήκες (εργαστήριο) όσο

και σε πραγματικές συνθήκες (μέσω OBD/OBFCM). Η ακριβής εκτίμηση της κατανάλωσης είναι κρίσιμη, όχι μόνο για την ενημέρωση των καταναλωτών αλλά και για την εκτίμηση των εκπομπών CO_2 σε επίπεδο χώρας και ΕΕ, καθώς και για τον σχεδιασμό πολιτικής (φορολογία, κίνητρα αποδοτικών οχημάτων).

3.6 Μέθοδοι συλλογής δεδομένων για τον υπολογισμό κατανάλωσης καυσίμου

Η συλλογή δεδομένων είναι κλειδί για τον ακριβή υπολογισμό και παρακολούθηση της κατανάλωσης καυσίμου. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι συλλογής, ανάλογα με το πλαίσιο:

Εργαστηριακές δοκιμές τύπου (Type approval): Κατά τη διάρκεια των δοκιμών WLTP, συνήθως δεν χρησιμοποιείται φυσικό όργανο μέτρησης ροής καυσίμου. Αντίθετα, η κατανάλωση προσδιορίζεται από τις εκπομπές καυσαερίων (μέθοδος άνθρακα). Τα καυσαέρια του οχήματος συγκεντρώνονται σε σακούλες (μέθοδος CVS) ή αναλύονται συνεχώς και υπολογίζεται η συνολική μάζα άνθρακα (CO_2, CO, HC) που εκπέμφθηκε. Από αυτό, μέσω στοιχειομετρικών σχέσεων, προκύπτει πόσο καύσιμο καταναλώθηκε. Αυτή η μέθοδος είναι αξιόπιστη και τυποποιημένη.

- **Δοκιμές δρόμου (RDE, έρευνες κατανάλωσης):** Σε πραγματικές συνθήκες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ειδικός εξοπλισμός, όπως **ροόμετρα καυσίμου** που τοποθετούνται στη γραμμή καυσίμου για συνεχή μέτρηση της ροής, ή εναλλακτικά η μέθοδος πλήρωσης-πλήρωσης (brim-to-brim) σε δοκιμές – δηλαδή γέμισμα ρεζερβουάρ πριν και μετά από μια διαδρομή ακριβούς μήκους και μέτρηση της διαφοράς καυσίμου. Όμως, για μεγαλύτερα σύνολα δεδομένων, οι **ηλεκτρονικές μέθοδοι** είναι πιο πρακτικές: όπως αναφέρθηκε, μέσω της θύρας OBD μπορούν να συλλεγούν δεδομένα από το ECU (ενδείξεις στιγμιαίας/μέσης κατανάλωσης). Πολλά ερευνητικά έργα χρησιμοποιούν συσκευές OBD data loggers για να καταγράψουν

ταυτόχρονα ταχύτητα οχήματος, στροφές κινητήρα, ροή καυσίμου, κ.λπ. Με τέτοιες μεθόδους, μπορούν να συγκεντρωθούν μεγάλα δείγματα πραγματικών προφίλ οδήγησης και κατανάλωσης.

- **Τηλεματική και OBFCM:** Πλέον, στόλοι οχημάτων (π.χ. εταιρικοί στόλοι, ταξί) συχνά διαθέτουν τηλεματικές μονάδες που στέλνουν δεδομένα κατανάλωσης σε κεντρικούς servers, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο. Τα OBFCM, όπως προαναφέρθηκε, αποθηκεύουν τις πληροφορίες αυτές ώστε να μπορούν να αναγνωστούν σε τεχνικούς ελέγχους ή να μεταδοθούν (ανώνυμα) για στατιστικούς σκοπούς.

Η Ελλάδα συμμετέχει σε ευρωπαϊκά προγράμματα παρακολούθησης πραγματικών εκπομπών/ κατανάλωσης, και δεδομένα συλλέγονται από στόλους οχημάτων και ΚΤΕΟ, συμβάλλοντας στη βελτίωση της ακρίβειας των εθνικών απογραφών εκπομπών αλλά και στην καλύτερη κατανόηση του πώς συμπεριφέρονται τα οχήματα στον πραγματικό κόσμο. Αυτές οι πληροφορίες είναι κρίσιμες για τη διαμόρφωση πολιτικών μεταφορών (π.χ. πόσο εφικτοί είναι οι στόχοι διείσδυσης ηλεκτροκίνησης, ποια είναι η εξοικονόμηση καυσίμου από ένα πρόγραμμα απόσυρσης κλπ.).

Κεφάλαιο 4: Κύκλοι οδήγησης

4.1 Ταξινόμηση κύκλων οδήγησης

Οι *κύκλοι οδήγησης* (driving cycles) είναι προκαθορισμένα προφίλ ταχύτητας–χρόνου που χρησιμοποιούνται για τη δοκιμή και αξιολόγηση των οχημάτων υπό επαναλαμβανόμενες συνθήκες. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ταξινόμησης των κύκλων οδήγησης. Μια βασική διάκριση είναι μεταξύ **τυποποιημένων (νομοθετικών) κύκλων** και **μη τυποποιημένων (ερευνητικών ή τοπικών) κύκλων**. Οι τυποποιημένοι κύκλοι – όπως ο NEDC, ο WLTC κ.α. – έχουν καθοριστεί από αρχές (ΕΕ, UNECE) και χρησιμοποιούνται επίσημα για μετρήσεις κατανάλωσης και εκπομπών σε δοκιμές τύπου. Αντιθέτως, πολλές φορές αναπτύσσονται *εξειδικευμένοι τοπικοί κύκλοι* στο πλαίσιο ερευνών, για να αναπαραστήσουν τις ιδιαίτερες συνθήκες οδήγησης μιας συγκεκριμένης πόλης ή περιοχής.

Επίσης, οι κύκλοι μπορούν να ταξινομηθούν με βάση το είδος της οδήγησης που αναπαριστούν: **αστικοί κύκλοι** (χαμηλές ταχύτητες, συχνές στάσεις/εκκινήσεις), **υπεραστικοί κύκλοι** (μέτριες ταχύτητες, ροή κυκλοφορίας σε ανοιχτούς δρόμους) και **κύκλοι αυτοκινητοδρόμου** (υψηλές ταχύτητες, σταθερότερη οδήγηση). Για παράδειγμα, ο ευρωπαϊκός κύκλος NEDC στην πραγματικότητα αποτελείτο

από δύο σκέλη: ένα αστικό τμήμα (Urban Driving Cycle, UDC) και ένα υπεραστικό τμήμα (Extra Urban Driving Cycle, EUDC).

Τέλος, μπορούμε να διακρίνουμε τους κύκλους σε **στατικούς** έναντι **δυναμικών**: στους πρώτους, το προφίλ ταχύτητας είναι μια ντετερμινιστική συνάρτηση του χρόνου, ίδιο κάθε φορά. Στους δυναμικούς (ή περιγραφόμενους στατιστικά), δεν υπάρχει μία μόνο καθορισμένη πορεία – π.χ. ένας κύκλος μπορεί να ορίζεται από στατιστικές παράμετρούς αντί για μία συγκεκριμένη καμπύλη. Ωστόσο, στην πράξη, οι περισσότεροι γνωστοί κύκλοι είναι στατικοί προκαθορισμένοι. Οι δυναμικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται περισσότερο σε στοχαστικές προσομοιώσεις οδήγησης ή στη δημιουργία νέων κύκλων (βλ. Κεφ. 6).

4.2 Βασικές παράμετροι των κύκλων οδήγησης

Κάθε κύκλος οδήγησης χαρακτηρίζεται από ορισμένες βασικές παραμέτρους που συνοψίζουν τη "δυναμικότητα" και το προφίλ του. Τέτοιες παράμετροι είναι: - **Μέση ταχύτητα** (με και χωρίς στάσεις): δείχνει τον μέσο ρυθμό κίνησης. Ένας αστικός κύκλος έχει συνήθως πολύ χαμηλή μέση ταχύτητα (10–30 km/h). - **Μέγιστη ταχύτητα** και **ποσοστό χρόνου σε υψηλές ταχύτητες**: π.χ. ο NEDC είχε μέγιστη ~120 km/h, ενώ ο WLTC ~131 km/h. - **Διαστήματα αδράνειας (ρελαντί)**: το ποσοστό του χρόνου που το όχημα είναι σταματημένο. Σε έναν κύκλο πόλης μπορεί να είναι σημαντικό (π.χ. 15-30% του χρόνου σε στάση). - **Αριθμός στάσεων**: πόσες πλήρεις ακινητοποιήσεις περιλαμβάνει ο κύκλος. - **Συχνότητα και ρυθμός επιταχύνσεων/επιβραδύνσεων**: αυτές οι δυναμικές μεταβολές επηρεάζουν σημαντικά την κατανάλωση και εκπομπές. Οι κύκλοι συνήθως συνοψίζουν το μέσο ρυθμό επιτάχυνσης (m/s^2) και επιβράδυνσης, καθώς και τις μέγιστες τιμές τους. - **Συνολική διάρκεια** και **απόσταση**: π.χ. ένας κύκλος μπορεί να διαρκεί 1200 δευτερόλεπτα και να αντιστοιχεί σε 10 km οδήγησης.

Οι παράμετροι αυτές είναι θεμελιώδεις διότι επιτρέπουν την αξιολόγηση ενός κύκλου και τη σύγκρισή του με άλλο. Περιγράφουν ουσιαστικά τη συμπεριφορά ενός οχήματος σε όρους ταχύτητας, επιτάχυνσης, φρεναρίσματος και ακινητοποίησης. Για παράδειγμα, ένας κύκλος με υψηλό μέσο επιτάχυνσης και μικρό χρόνο αδράνειας είναι πιο "επιθετικός" και πιθανότατα θα προκαλέσει υψηλότερη κατανάλωση/εκπομπές συγκριτικά με έναν κύκλο ήπιας οδήγησης.

Στις νομοθετικές δοκιμές, αυτές οι παράμετροι καθορίζονται αυστηρά από τον κύκλο. Στις πραγματικές συνθήκες, κάθε οδηγικό προφίλ μπορεί να έχει τεράστιες διαφοροποιήσεις στις ίδιες παραμέτρους, γι' αυτό και η αντιστοίχιση ενός πραγματικού ταξιδιού σε έναν κύκλο δεν είναι πάντα απλή. Παρ' όλ' αυτά, η γνώση των βασικών χαρακτηριστικών ενός κύκλου είναι χρήσιμη για να κατανοήσουμε τι συνθήκες αναπαριστά (π.χ. "ο κύκλος Χ είναι πολύ αργός με πολλές στάσεις – τυπικό κέντρο πόλης σε ώρα αιχμής", ή "ο κύκλος Ψ έχει μεγάλες επιταχύνσεις – προσομοιώνει σβέλτη οδήγηση σε αυτοκινητόδρομο").

4.3 Κύκλοι οδήγησης στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Στην Ευρώπη, ιστορικά χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι κύκλοι οδήγησης για τη δοκιμή των οχημάτων. Για πολλά χρόνια, ο βασικός κύκλος ήταν ο **ECE-15**, ένας αστικός κύκλος που αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1970 (Economic Commission for Europe urban cycle). Ο ECE-15 είχε διάρκεια ~195 δευτερόλεπτα, πολύ χαμηλή μέση ταχύτητα (~19 km/h) και μέγιστη περίπου 50 km/h, με αρκετές στάσεις – αντιπροσωπευτικός αστικής κυκλοφορίας εκείνης της εποχής. Στη συνέχεια, προστέθηκε ένας συμπληρωματικός κύκλος **EUDC** (Extra Urban Driving Cycle) για να προσομοιώσει οδήγηση σε υπεραστικές συνθήκες: αυτός περιλάμβανε ταχύτερα τμήματα έως 120 km/h. Ο συνδυασμός 4 επαναλήψεων του ECE-15 και 1 του EUDC αποτέλεσε

τον **NEDC (New European Driving Cycle)**, που εφαρμόστηκε από τα τέλη του ’90 ως το 2017. Ο NEDC είχε μέση ταχύτητα ~34 km/h, διάρκεια ~1180 s και απόσταση ~11 km . Αν και υπήρξε το πρότυπο επί 20ετία, ο NEDC επικρίθηκε ότι δεν ανταποκρινόταν πλέον στις σύγχρονες συνθήκες (ήπιες επιταχύνσεις, μεγάλες σταθερές ταχύτητες) , οδηγώντας σε υποεκτίμηση της κατανάλωσης.

Ήδη από τα μέσα των 2000s, άρχισαν προσπάθειες ανάπτυξης ενός νέου παγκόσμιου κύκλου. Αυτό οδήγησε στον **WLTC (Worldwide harmonized Light-duty Test Cycle)**, ο οποίος εγκρίθηκε από τον ΟΗΕ το 2015 και υιοθετήθηκε από την ΕΕ ως ο νέος κύκλος δοκιμής τύπου (στο πλαίσιο της διαδικασίας WLTP). Ο WLTC είναι αποτέλεσμα συνδυασμού δεδομένων οδήγησης από Ευρώπη, Ασία και Αμερική, ώστε να είναι αντιπροσωπευτικός σε παγκόσμιο επίπεδο. Για τα επιβατικά αυτοκίνητα, χωρίζεται σε 4 φάσεις: Low, Medium, High, Extra High, που προσομοιώνουν αστική, περιαστική, υπεραστική και αυτοκινητόδρομο αντίστοιχα. Η συνολική διάρκεια του WLTC είναι ~1800 s (30 λεπτά) και η απόσταση ~23,3 km . Η μέση ταχύτητα είναι 46,5 km/h και η μέγιστη 131 km/h . Ο κύκλος περιλαμβάνει 12 στάσεις (13% του χρόνου σε αδράνεια) και αρκετά δυναμικά συμβάντα επιτάχυνσης/φρεναρίσματος. Συνολικά είναι πολύ πιο
«έντονος» από τον NEDC, προσεγγίζοντας ρεαλιστικότερα τη σύγχρονη οδήγηση (π.χ. ταχύτητες αυτοκινητοδρόμων, γρήγορες επιταχύνσεις σε προσπεράσεις κ.λπ.).

Εκτός από τους βασικούς αυτούς κύκλους, στην Ευρώπη έχουν αναπτυχθεί και ερευνητικοί κύκλοι. Ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα είναι το **Artemis project** (περιγράφεται στη ενότητα 4.5), που παρήγαγε κύκλους βασισμένους σε πραγματικά δεδομένα κυκλοφορίας από ευρωπαϊκές χώρες (κύκλοι Artemis Urban, Road και Motorway). Οι κύκλοι αυτοί δεν χρησιμοποιήθηκαν ως επίσημοι κύκλοι έγκρισης τύπου, όμως βρήκαν εφαρμογή σε μελέτες προσομοίωσης εκπομπών και σε

προγράμματα έρευνας.

Συνοψίζοντας, η ΕΕ έχει περάσει από απλούς αστικούς κύκλους (ECE) σε συνδυασμένους (NEDC) και πλέον σε πιο σύνθετους και παγκόσμια εναρμονισμένους κύκλους (WLTP/WLTC). Κάθε μετάβαση σηματοδότησε και μια αλλαγή φιλοσοφίας: από την ιδανική ήπια οδήγηση των ‘70s στην πιο ρεαλιστική απεικόνιση του 21ου αιώνα. Η εξέλιξη αυτή βελτίωσε την ακρίβεια των μετρήσεων κατανάλωσης και εκπομπών, όπως ήδη αναλύθηκε στο Κεφ. 3.3.

4.4 Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής

Στις ΗΠΑ χρησιμοποιείται ένα διαφορετικό σύνολο κύκλων οδήγησης για τη ρύθμιση των εκπομπών και της κατανάλωσης. Ο βασικός κύκλος είναι ο **FTP-75 (Federal Test Procedure 1975)**, γνωστός και ως LA-4, που προσομοιώνει αστική οδήγηση στο Λος Άντζελες. Ο FTP-75 έχει διάρκεια ~1874 s (με ενδιάμεσο διάλειμμα 10 λεπτών) και περιλαμβάνει πολλές στάσεις, χαμηλές και μεσαίες ταχύτητες, με μέγιστη ~91 km/h. Είναι αυστηρότερος από τον παλιό ECE-15 καθώς έχει περισσότερες και μακρύτερες φάσεις επιτάχυνσης. Για να ληφθούν υπόψη και συνθήκες υπεραστικές και ψυχρές εκκινήσεις, η EPA πρόσθεσε συμπληρωματικούς κύκλους: τον **HWFET (Highway Fuel Economy Test)** για σταθερή οδήγηση σε αυτοκινητόδρομο (~97 km/h σταθερά) και τον **US06** (SFTP US06) που εισάγει έντονες επιταχύνσεις και υψηλές ταχύτητες (έως 129 km/h) για να προσομοιώσει επιθετική οδήγηση. Επίσης, υπάρχει ο κύκλος **SC03** που προσομοιώνει χρήση κλιματισμού σε αστικές συνθήκες.

Για τον υπολογισμό της οικονομίας καυσίμου στα αυτοκόλλητα των αυτοκινήτων, η EPA λαμβάνει έναν συνδυασμό των αποτελεσμάτων από τους FTP-75, HWFET, US06 και SC03 με συγκεκριμένους συντελεστές στάθμισης. Έτσι προκύπτουν οι γνωστές τιμές πόλης, αυτοκινητοδρόμου και συνδυασμένου κύκλου (city, highway, combined MPG). Σημειώνεται ότι το αμερικανικό πλαίσιο έδωσε νωρίς έμφαση σε ρεαλιστικότερες δοκιμές – π.χ.

ήδη από το 2008 η EPA αναθεώρησε τη μεθοδολογία υπολογισμού MPG ώστε οι τιμές στα αυτοκόλλητα να αντανακλούν καλύτερα την πραγματικότητα, εισάγοντας διορθώσεις για κρύο καιρό, κλιματισμό και επιθετική οδήγηση (χρήση US06 και SC03). Γενικά, οι αμερικανικοί κύκλοι διαφέρουν από τους ευρωπαϊκούς τόσο φιλοσοφικά όσο και στις λεπτομέρειες. Οι ΗΠΑ είχαν ανέκαθεν μεγαλύτερες ταχύτητες στους κύκλους (αντανακλώντας τα όρια ταχύτητας και τις συνθήκες οδήγησης εκεί), καθώς και διαφορετικές πρακτικές (π.χ. οι μετρήσεις γίνονται με το όχημα κλιματιζόμενο σε ~25°C, ενώ στην Ευρώπη στους 23°C χωρίς A/C). Παρά τις διαφορές, σήμερα παρατηρείται σύγκλιση: ο WLTP υιοθετείται εν μέρει και στις ΗΠΑ για ορισμένες κατηγορίες ή ως σημείο αναφοράς, ενώ ευρύτερα υπάρχει συνεργασία μέσω των παγκόσμιων τεχνικών κανονισμών.

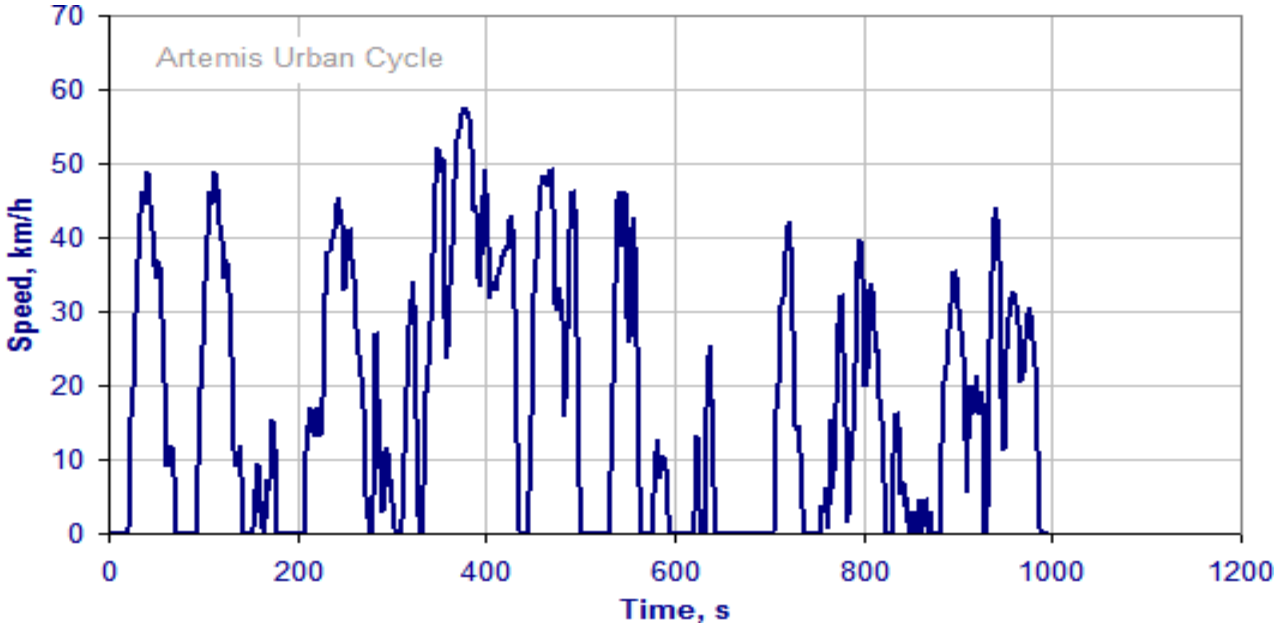
4.1 Artemis – CADC

Το πρόγραμμα **ARTEMIS** (Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems) ήταν μια ερευνητική πρωτοβουλία της ΕΕ στις αρχές της δεκαετίας του 2000, με στόχο τη βελτίωση των μοντέλων εκπομπών από τις μεταφορές. Στο πλαίσιο του ARTEMIS, συγκεντρώθηκαν εκτενή δεδομένα πραγματικής οδήγησης από διάφορες ευρωπαϊκές χώρες και, αναλύοντάς τα, προτάθηκαν νέοι κύκλοι οδήγησης, γνωστοί ως **CADC (Common Artemis Driving Cycles)**. Αυτοί περιλαμβάνουν έναν αστικό κύκλο (Artemis Urban), έναν περιαστικό/υπεραστικό (Artemis Road) και έναν κύκλο αυτοκινητοδρόμου (Artemis Motorway). Οι κύκλοι Artemis είναι αρκετά μεγαλύτεροι σε διάρκεια σε σχέση με τον NEDC και θεωρούνται πιο αντιπροσωπευτικοί της πραγματικής οδήγησης στην Ευρώπη γύρω στο 2000. Για παράδειγμα, ο αστικός κύκλος Artemis έχει διάρκεια ~20 λεπτά, μέση ταχύτητα ~17-18 km/h και μέγιστη ~60 km/h, περιλαμβάνοντας ποικιλία επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων (συμπεριλαμβανομένων και κάποιων πιο έντονων από ό,τι ο NEDC). Ο αυτοκινητοδρομιακός Artemis φτάνει τα 150 km/h, λαμβάνοντας υπόψη και χώρες με υψηλά όρια ταχύτητας (π.χ. Γερμανία).

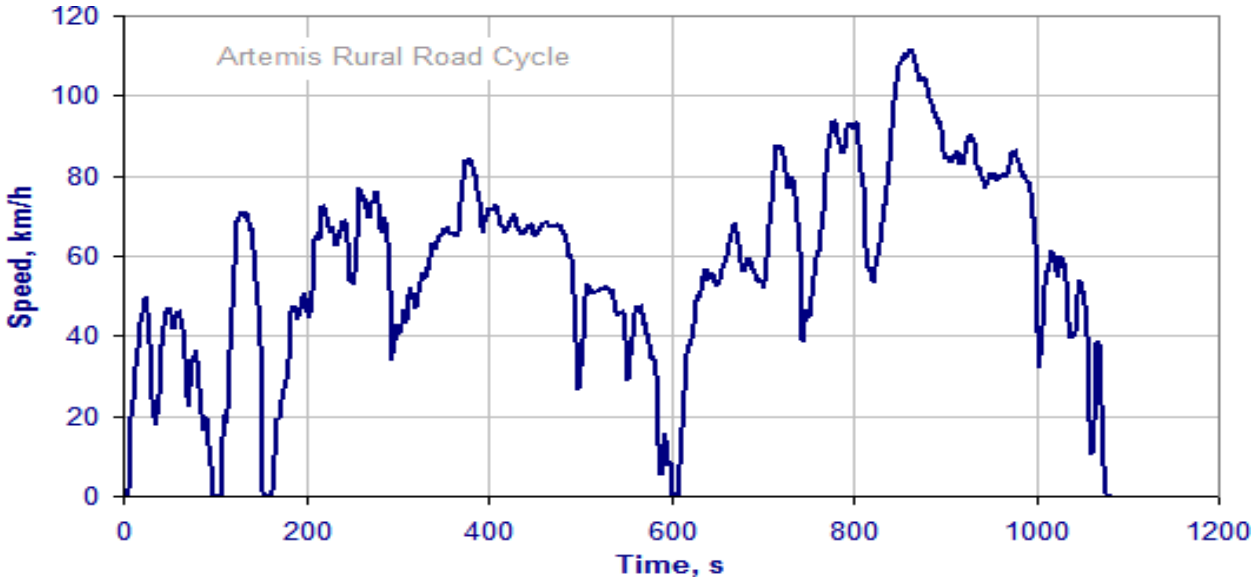
Αν και οι CADC δεν υιοθετήθηκαν για την έγκριση τύπου, χρησιμοποιήθηκαν ευρέως σε μελέτες. Πολλές χώρες αξιοποίησαν τους κύκλους αυτούς για να εκτιμήσουν τις εκπομπές σε εθνικά μοντέλα (π.χ. η Γαλλία και η Γερμανία για την τροφοδότηση μοντέλων στόλου). Επίσης, πριν την έλευση του WLTP, οι CADC θεωρούνταν ένα ενδιάμεσο βήμα για πιο ρεαλιστικές δοκιμές – αρκετοί ερευνητές συνέκριναν τις εκπομπές οχημάτων σε NEDC vs Artemis, καταδεικνύοντας τις διαφορές.

Σημαντική συνεισφορά του ARTEMIS ήταν και η μεθοδολογία ανάπτυξης κύκλων: χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές ανάλυσης στατιστικών χαρακτηριστικών των πραγματικών διαδρομών και κατάτμησης σε *micro- trips*, ώστε οι τελικοί κύκλοι να "μοιάζουν" στα κρίσιμα μεγέθη με το μεγάλο σύνολο πραγματικών δεδομένων. Αυτή η προσέγγιση επηρέασε και την ανάπτυξη του WLTP.

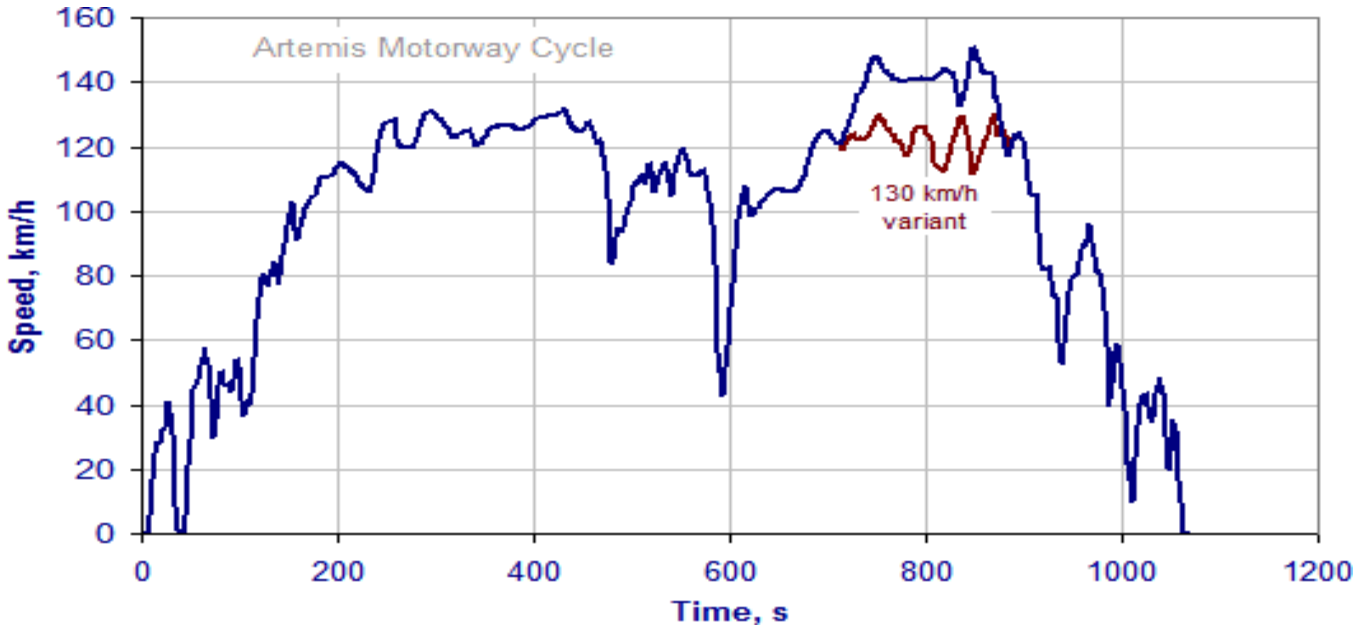
Εν κατακλείδι, το πρόγραμμα ARTEMIS ανέδειξε την αξία των εμπειρικών δεδομένων στη διαμόρφωση κύκλων οδήγησης. Οι κύκλοι CADC παραμένουν ένα χρήσιμο εργαλείο σε προσομοιώσεις και συγκρίσεις, και ιστορικά γεφύρωσαν το κενό μεταξύ του απλουστευμένου NEDC και του σύγχρονου WLTP.



Διάγραμμα 1:Αστικός κύκλος πόλης Artemis



Διάγραμμα 2: Αγροτικός κύκλος Artemis



Διάγραμμα 3: Κύκλος Artemis σε αυτοκινητόδρομο

4.2 WLTC (Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Cycle)

Ο κύκλος WLTC, όπως περιεγράφηκε εν μέρει στην ενότητα 4.3, είναι ο ακρογωνιαίος λίθος της διαδικασίας δοκιμών WLTP για επιβατικά οχήματα και ελαφρά φορτηγά. Η ανάπτυξή του έγινε υπό την αιγίδα της UNECE με σκοπό να εναρμονιστούν οι διαδικασίες δοκιμών διεθνώς – κάτι απαραίτητο εν μέσω παγκοσμιοποίησης της αυτοκινητοβιομηχανίας. Ο WLTC έχει τρεις παραλλαγές (Classes 1, 2, 3) ανάλογα με τη λόγια αναλογία ισχύος/βάρους του οχήματος, αλλά για τα περισσότερα επιβατικά αυτοκίνητα στην Ευρώπη χρησιμοποιείται η παραλλαγή Class 3 (πλήρης κύκλος με 4 φάσεις).

Το προφίλ ταχύτητας του WLTC είναι αρκετά σύνθετο: ξεκινά με την φάση Low που περιλαμβάνει πολύ αστική οδήγηση (πολλές στάσεις, ταχύτητες έως ~60 km/h), συνεχίζει με Medium (ταχύτερη κίνηση έως ~80 km/h), High (έως ~100 km/h) και Extra High (επιτάχυνση μέχρι 131 km/h). Μεταξύ των φάσεων υπάρχουν μεταβάσεις χωρίς όμως το όχημα να σταματά – ο κύκλος είναι ενιαίος. Η μετάβαση από τη μια φάση στην άλλη απλώς σηματοδοτεί αλλαγή στο μοτίβο οδήγησης (π.χ. μετά τα ~600 s ξεκινά η φάση High με υψηλότερες επιταχύνσεις).

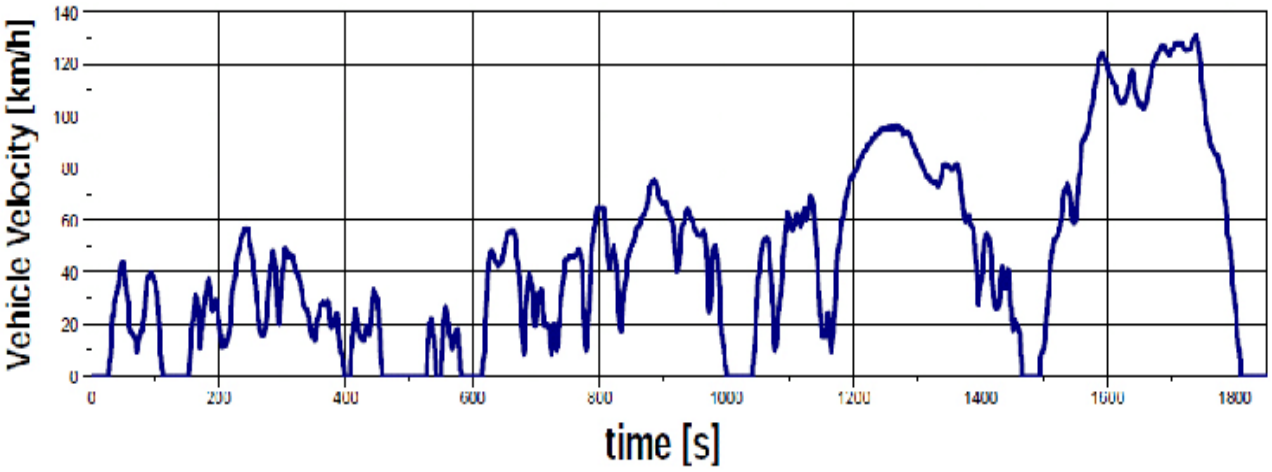
Ο WLTC σχεδιάστηκε ώστε να αντικατοπτρίζει σύγχρονες συνθήκες: γρήγορες επιταχύνσεις μετά από στάση (στην Low φάση υπάρχει τμήμα με 0-45 km/h αρκετά απότομο), ελάχιστοι μεγάλοι χρόνοι σταθερής ταχύτητας (σε αντίθεση με τον NEDC που είχε μεγάλα διαστήματα στα 50, 70, 100 km/h), και σύντομες φάσεις αδράνειας. Τα οχήματα δοκιμάζονται τόσο σε ψυχρή εκκίνηση (η μέτρηση ξεκινά με τον κινητήρα κρύο) όσο και – για κάποιους ρύπους – σε θερμή εκκίνηση, ανάλογα με τις απαιτήσεις (π.χ. στον Euro 6/7 η μέτρηση για PM/PN περιλαμβάνει μόνο ψυχρή εκκίνηση στον WLTP, ενώ για NOx υπολογίζεται ολοκληρωτικά).

Η εισαγωγή του WLTC/WLTP έφερε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα, όμως δεν πρέπει να παραβλέπουμε ότι πρόκειται πάντα για εργαστηριακό κύκλο – δεν μπορεί να καλύψει όλες τις πιθανές πραγματικές συνθήκες. Γι’ αυτό συνδυάζεται με το RDE στον δρόμο, όπως εξηγήθηκε. Επίσης, ο WLTP επιτρέπει να λαμβάνονται υπόψη πρόσθετες παράμετροι εξοπλισμού (βάρος επιλογών, αεροδυναμικές επιδράσεις από έξτρα εξοπλισμό) κατά τον υπολογισμό της κατανάλωσης, ώστε οι τιμές να αντανακλούν καλύτερα την πραγματική διαμόρφωση του εκάστοτε μοντέλου.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, ο WLTC έχει υιοθετηθεί από πολλές χώρες εκτός Ευρώπης: Ιαπωνία, Κορέα, Ινδία, κ.α., διευκολύνοντας έτσι και το έργο των κατασκευαστών που μπορούν να κάνουν μία δοκιμή για πολλές αγορές. Οι

ΗΠΑ μέχρι στιγμής διατηρούν το δικό τους σύστημα (FTP), όμως υπάρχει συνεργασία για σύγκλιση στο μέλλον σε ορισμένα σημεία.

Συνοπτικά, ο WLTC είναι ο πλέον σύγχρονος κύκλος οδήγησης για επιβατικά οχήματα, ενσωματώνοντας εμπειρία από πραγματικά δεδομένα παγκοσμίως. Αποτελεί το **πιο σύγχρονό** εργαλείο για τη μέτρηση της κατανάλωσης και των εκπομπών σε ελεγχόμενες συνθήκες και, σε συνδυασμό με τις δοκιμές RDE, εξασφαλίζει ότι τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων έχουν ισχυρή αντιστοίχιση με την πραγματικότητα.



Διάγραμμα 4: Κύκλος WLTC

Κεφάλαιο 5: Μέθοδοι μέτρησης καυσαερίων στον κύκλο πόλης

5.1 Εξοπλισμός ανάλυσης των αερίων

Η μέτρηση των καυσαερίων σε έναν κύκλο οδήγησης (είτε εργαστηριακό είτε πραγματικό) απαιτεί κατάλληλο εξοπλισμό ανάλυσης. Στο εργαστήριο, όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιούνται σταθεροί αναλυτές αερίων που ανιχνεύουν τις συγκεντρώσεις των βασικών ρύπων στο ρεύμα εξαγωγής καυσαερίων. Τυπικά, οι τεχνικές περιλαμβάνουν: - **NDIR (Non-Dispersive Infrared)** αναλυτές για CO και CO₂, - **FID (Flame Ionization Detector)** για τους υδρογονάνθρακες (HC), - **Chemiluminescence analyzer (CLA)** για τα οξείδια του αζώτου (NO, NO_2), **Οπτικούς αισθητήρες** ή **ζυγιστικές μεθόδους** για τα σωματίδια (π.χ. μέτρηση μάζας PM μέσω φίλτρων ή καταμέτρηση σωματιδιακού αριθμού με συσκευές CPC/DC).

Για τις δοκιμές σε πραγματικό δρόμο (RDE), ο εξοπλισμός είναι φορητός (PEMS). Ένα σύστημα PEMS περιλαμβάνει μίνι εκδόσεις των παραπάνω αναλυτών, ανθεκτικές σε κραδασμούς και μεταβολές θερμοκρασίας, καθώς και αισθητήρες ροής καυσαερίων για τον υπολογισμό των εκπομπών σε mg/km. Τα PEMS συστήματα τοποθετούνται συνήθως στο πίσω μέρος/πορτμπαγκάζ του οχήματος υπό δοκιμή, με μια εξαγωγή συνδεδεμένη στην εξάτμιση. Επιπλέον έχουν μονάδες GPS για καταγραφή του προφίλ διαδρομής, βαρόμετρα και θερμόμετρα για τις συνθήκες περιβάλλοντος, και συχνά αισθητήρες δόνησης/κλίσης για έλεγχο της ομαλότητας της διαδρομής.

Σε έναν "κύκλο πόλης", δηλαδή σε μια αστική διαδρομή, ο εξοπλισμός ανάλυσης αντιμετωπίζει την πρόκληση της συχνής διακύμανσης των ρύπων: στις επιταχύνσεις και τις ψηλές στροφές κινητήρα παρατηρούνται αιχμές ρύπων, ενώ στα ρελαντί οι εκπομπές μειώνονται. Τα σύγχρονα όργανα έχουν γρήγορη απόκριση και υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας, έτσι ώστε να καταγράφουν αξιόπιστα και αυτές τις ταχείες μεταβολές. Ειδικά για τα σωματίδια, οι αριθμοί μπορούν να αυξηθούν απότομα κατά μια απότομη επιτάχυνση – γι' αυτό απαιτείται λεπτομερής καταγραφή.

Για να εξασφαλιστεί η ακρίβεια, γίνεται βαθμονόμηση των οργάνων πριν και μετά τη δοκιμή με αέρια γνωστής συγκέντρωσης. Στις εργαστηριακές μετρήσεις, όλα τα αέρια συλλέγονται σε ένα "σακκόμετρο" (bag) κατά τμήματα του κύκλου, και στο τέλος αναλύονται μέσες τιμές. Στο RDE, τα PEMS καταγράφουν συνεχώς (συνήθως με 1 Hz ή ταχύτερα) και ενσωματώνουν τα αποτελέσματα.

Συνολικά, ο διαθέσιμος εξοπλισμός για ανάλυση καυσαερίων σήμερα επιτρέπει αξιόπιστες μετρήσεις τόσο στο εργαστήριο όσο και στον δρόμο. Η τεχνολογία PEMS υπήρξε καταλύτης για την εισαγωγή των RDE τεστ, ενώ μελλοντικά τα συστήματα OBM (on-board monitoring) του Euro 7 ίσως χρησιμοποιούν απλούστερους ενσωματωμένους αισθητήρες για συνεχή έλεγχο – σηματοδοτώντας μια νέα γενιά εξοπλισμού όπου το ίδιο το όχημα θα "γνωρίζει" και θα αναφέρει τις εκπομπές του σε πραγματικό χρόνο.

5.2 Προδιαγραφές και δοκιμές

Οι προδιαγραφές διεξαγωγής των δοκιμών εκπομπών είναι λεπτομερώς καθορισμένες από τα πρότυπα και τις κανονιστικές πράξεις. Στόχος είναι να διασφαλιστεί ότι οι δοκιμές είναι επαναλήψιμες και συγκρίσιμες μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων και οχημάτων.

Στο εργαστήριο (δοκιμή τύπου I), ο κύκλος (π.χ. WLTP) πρέπει να εκτελείται με αυστηρή τήρηση του προφίλ ταχύτητας. Αυτό επιτυγχάνεται με έναν οδηγό ή ρομποτικό σύστημα οδήγησης που ακολουθεί την καμπύλη ταχύτητας σε μια οθόνη. Οι αποκλίσεις επιτρέπονται μόνο εντός μικρών ανοχών (συνήθως ±2 km/h ή ±1 s χρονικά). Πριν την δοκιμή, το όχημα προετοιμάζεται (φόρτιση μπαταρίας 12V, προκλιματισμός στα 23°C, τοποθέτηση σε κυλίνδρους με προσομοίωση αντιστάσεων κύλισης/αεροδυναμικής βάσει του βάρους και του συντελεστή CdA του). Για τα υβριδικά/ηλεκτρικά, υπάρχουν ειδικές διαδικασίες φόρτισης και ισορροπίας μπαταρίας.

Κατά τη δοκιμή, οι παράλληλες μετρήσεις (ταχύτητα, ροπή στους κυλίνδρους, θερμοκρασία θαλάμου, συγκεντρώσεις ρύπων κλπ.) πρέπει να βρίσκονται εντός ορίων. Μετά τη λήξη, οι σακούλες συλλογής αερίων αναλύονται και εφαρμόζονται διορθώσεις (π.χ. για υπόβαθρο, αραιώσεις). Οι προδιαγραφές καλύπτουν μέχρι και λεπτομέρειες όπως το μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος ζάντας/ελαστικού, την πίεση ελαστικών, κ.ά., ώστε όλα τα εργαστήρια να εφαρμόζουν το ίδιο πρωτόκολλο.

Στις RDE δοκιμές, οι προδιαγραφές αφορούν κυρίως τις **συνθήκες διαδρομής**: πρέπει η διαδρομή να περιλαμβάνει 3 τμήματα – αστικό (περίπου 34% του χρόνου, ταχύτητες <60 km/h), υπεραστικό (33%, 60–90 km/h) και αυτοκινητόδρομο (33%, >90 km/h με τουλάχιστον 5 λεπτά πάνω από 100 km/h και μέγιστη > 110 km/h). Η συνολική διάρκεια πρέπει να είναι 90–120 λεπτά και η θερμοκρασία περιβάλλοντος μεταξύ -7°C και 35°C (για Euro 6d). Υπάρχουν επίσης όρια για το αθροιστικό υψομετρικό κέρδος (<1200 m) και το υψόμετρο (<700 m, εκτός αν εφαρμόζεται συντελεστής ψηλού υψομέτρου). Καθορίζεται ακόμη και το *dynamic conditions indicator* (ψευδώνυμο "εξίσωση μάγισσας") που ελέγχει αν ο οδηγός ήταν επαρκώς επιθετικός ή όχι – δεν επιτρέπεται η οδήγηση να είναι *υπερβολικά* ή *μηδενικά* δυναμική σε σχέση με ένα προβλεπόμενο εύρος.

Τα PEMS πρέπει να περάσουν *κλιμακωτή δοκιμή* (calibration check) πριν τη χρήση και να ρυθμιστούν να μην επηρεάζονται από κραδασμούς. Κατά τη διάρκεια της διαδρομής, το σύστημα συλλέγει δεδομένα που μετά επεξεργάζονται με ειδικό λογισμικό (οι λεγόμενοι αλγόριθμοι "trip normality" και "EMROAD"/"CLEAR" για τον υπολογισμό των εκπομπών). Οι προδιαγραφές θέτουν επίσης όρια στη μέση ταχύτητα κάθε φάσης, στο μερίδιο του χρόνου idle (π.χ. το πολύ 6±3% του χρόνου μπορεί να είναι πλήρης στάση στο αστικό σκέλος), κ.λπ., ώστε κάθε έγκυρη RDE να καλύπτει ένα ικανό φάσμα συνθηκών χωρίς να "χαλαρώνει" υπερβολικά. Εάν κάποια διαδρομή δεν πληροί τα κριτήρια (π.χ. πάρα πολύ μποτιλιαρισμένη ή αντίθετα διαρκώς ελεύθερη), μπορεί να χαρακτηριστεί μη έγκυρη και να επαναληφθεί.

Επιπλέον δοκιμές, όπως η **δοκιμή τύπου II** (εκπομπές CO στο ρελαντί) και **τύπου III** (εκπομπές εξαερώσεων στροφαλοθαλάμου, παρωχημένη πλέον καθώς οι σύγχρονοι κινητήρες δεν επιτρέπουν εξαερώσεις στο περιβάλλον), έχουν τις δικές τους προδιαγραφές. Η δοκιμή τύπου II, συγκεκριμένα, γινόταν σε βενζινοκινητήρες μετά από σταθεροποίηση του κινητήρα σε θερμοκρασία λειτουργίας και μετρούσε τον όγκο CO στο καυσαέριο στο ρελαντί (και ενίοτε στις 2500 rpm χωρίς φορτίο). Τα όρια ήταν (για παλιά Euro) π.χ. 0,5% ή 0,3% κατ' όγκο CO. Σήμερα, με τους καταλυτικούς μετατροπείς, αυτή η μέτρηση έχει χάσει την κρίσιμη σημασία της (καθώς στο ρελαντί οι καταλύτες είναι ενεργοί και το CO είναι ελάχιστο), αλλά εξακολουθεί να γίνεται στους ελέγχους ΚΤΕΟ ως μια απλή ένδειξη ορθής λειτουργίας.

Συμπερασματικά, κάθε είδους δοκιμή εκπομπών διέπεται από αυστηρές προδιαγραφές – είτε αφορά τον *τρόπο οδήγησης* (προφίλ κύκλου, RDE συνθήκες) είτε τον *εξοπλισμό μέτρησης* (βαθμονομήσεις, συχνότητα κ.λπ.). Η πιστή τήρηση αυτών διασφαλίζει ότι τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα

και συγκρίσιμα, επιτρέποντας την αποτελεσματική επιβολή των οριακών τιμών που ορίζει η νομοθεσία.

5.3 Σύντομη περιγραφή δοκιμών τύπου I και II

Στη νομοθεσία της ΕΕ για τις εκπομπές ρύπων από οχήματα, οι δοκιμές ταξινομούνται σε διάφορους "τύπους". Οι δύο βασικότεροι είναι:

Δοκιμή τύπου I: Πρόκειται για τη βασική δοκιμή ελέγχου των εκπομπών καυσαερίων από τον κινητήρα σε λειτουργία υπό φορτίο. Είναι η γνωστή δοκιμή στον τυποποιημένο κύκλο οδήγησης (παλαιότερα NEDC, πλέον WLTP) με το όχημα σε δυναμόμετρο. Μετριούνται οι εκπομπές CO, συνολικών υδρογονανθράκων (THC), μεθανίου (CH_4, αν χωριστά απαιτείται), NOx και σωματιδίων (μάζα PM και αριθμός PN) που εκπέμπονται κατά τον κύκλο. Για οχήματα βενζίνης επίσης ελέγχεται η εκπομπή μη μεθανιούχων υδρογονανθράκων (NMHC). Η δοκιμή τύπου I γίνεται με κρύα εκκίνηση (θερμοκρασία ψυκτικού ~23°C, συνήθως) και περιλαμβάνει όλο το φάσμα του κύκλου. Τα αποτελέσματα της δοκιμής τύπου I είναι αυτά που συγκρίνονται με τα όρια του εκάστοτε προτύπου Euro για τους παραπάνω ρύπους. Εν ολίγοις, η δοκιμή τύπου I αξιολογεί τις *πρωτογενείς εκπομπές εξάτμισης* σε προσομοιωμένες πραγματικές συνθήκες οδήγησης. Στην εποχή του Euro 6d, η δοκιμή τύπου I έχει επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνει τόσο το εργαστηριακό σκέλος WLTP όσο και το επιτόπιο σκέλος RDE – πρακτικά δηλαδή χωρίζεται σε υπο-δοκιμή Ια (WLTP) και Ιβ (RDE). Και στα δύο υποχρεούται το όχημα να συμμορφωθεί με τα θεσπισμένα όρια (λαμβάνοντας υπόψη τον εκάστοτε συντελεστή συμμόρφωσης στο RDE όπως αναφέρθηκε).

- **Δοκιμή τύπου ΙΙ:** Αυτή η δοκιμή είναι ουσιαστικά ένας απλός έλεγχος εκπομπής CO με το όχημα σε *σταθερό ρελαντί* (και ενίοτε σε αυξημένο ρελαντί 2500 rpm χωρίς φορτίο). Ιστορικά, η δοκιμή τύπου ΙΙ απαιτούσε ότι το ποσοστό CO στον όγκο των καυσαερίων στο ρελαντί δεν ξεπερνά ένα όριο (π.χ. 0,5% vol για Euro 3, 0,2% για Euro 4, κ.ο.κ.). Αυτός ο έλεγχος είχε σημασία στις αρχές της εποχής των καταλυτικών μετατροπέων, ως ένας τρόπος να διαπιστωθεί αν ο κινητήρας καίει σωστά το καύσιμο στο ρελαντί και αν ο καταλύτης λειτουργεί (ένα πολύ υψηλό CO στο ρελαντί θα υποδήλωνε βλάβη στο σύστημα τροφοδοσίας ή ανάφλεξης). Στα σύγχρονα οχήματα, χάρη στη διαχείριση από την ECU και στους τριπλούς καταλύτες, οι εκπομπές CO στο ρελαντί είναι πάρα πολύ χαμηλές όταν ο κινητήρας ζεσταθεί (κοντά στο 0% vol). Παρόλα αυτά, η δοκιμή τύπου ΙΙ εξακολουθεί να αναφέρεται τυπικά ως μέρος των ελέγχων έγκρισης τύπου, αν και έχει πολύ μικρή πρακτική σημασία για τα Euro 5/6 όπου σχεδόν όλα τα οχήματα την περνούν με μεγάλη ευκολία. Στον περιοδικό τεχνικό έλεγχο (ΚΤΕΟ) ωστόσο, ο έλεγχος ρελαντί/αυξημένου ρελαντί συνεχίζει να χρησιμοποιείται ως απλός δείκτης για τη ρύθμιση του κινητήρα.

Άλλες δοκιμές που αξίζει εν συντομία να αναφερθούν: **Τύπου ΙΙΙ** (μέτρηση εκπομπών εξατμίσεων στροφαλοθαλάμου – σήμερα ουσιαστικά μηδενικές λόγω ανακυκλοφορίας αναθυμιάσεων μέσω PCV), **Τύπου IV** (έλεγχος εξατμιστικών εκπομπών καυσίμου – δοκιμή διαφυγών από το ρεζερβουάρ και το σύστημα εξαερισμού, π.χ. με δοκιμή εξάτμισης θερμού εμποτισμού/διάχυσης, σημαντική για περιορισμό εκπομπών VOC), **Τύπου V** (δοκιμή αντοχής/γήρανσης – παλαιότερα απαιτούσε το όχημα να έχει διανύσει
80.000 km ή τεχνητή γήρανση καταλύτη προκειμένου να ελεγχθεί η διατήρηση συμμόρφωσης, πλέον με Euro 6/7 αυτό αντικαταστάθηκε από απαιτήσεις "ορίων σε διάρκεια ζωής" και από τις διατάξεις OBM/OBD), **Τύπου**

VI (δοκιμή εκπομπών σε χαμηλές θερμοκρασίες – π.χ. μέτρηση εκπομπών CO και HC σε θερμοκρασία -7°C για βενζινοκίνητα, για να διασφαλιστεί ότι το όχημα παραμένει καθαρό και στο κρύο ξεκίνημα).

Συνολικά, οι δοκιμές τύπου I και II ήταν οι θεμελιώδεις κατά την έγκριση τύπου. Σήμερα, με το εξελιγμένο πλαίσιο Euro 6/7, το βάρος έχει μετατοπιστεί στην δοκιμή τύπου I (εργαστήριο + RDE) ως τον κύριο έλεγχο, ενώ οι τύποι II-IV είναι βοηθητικοί/συμπληρωματικοί έλεγχοι εξειδικευμένων πτυχών των εκπομπών.

Κεφάλαιο 6: Τρόποι κατασκευής κύκλων οδήγησης πόλης

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι και τεχνικές με τις οποίες μπορούν να *κατασκευαστούν* (δηλαδή να παραχθούν) αντιπροσωπευτικοί κύκλοι οδήγησης για μια πόλη ή για συγκεκριμένες συνθήκες. Δύο κύριες προσεγγίσεις είναι συνήθως αυτές που ακολουθούνται:

(α) Εμπειρική–Στατιστική Προσέγγιση: Σε αυτήν την μέθοδο, συλλέγονται πραγματικά δεδομένα οδήγησης (ταχύτητα-χρόνος) από έναν στόλο οχημάτων που κυκλοφορούν στην πόλη ενδιαφέροντος. Τα δεδομένα αυτά χωρίζονται σε μικρότερα τμήματα, συχνά σε **micro-trips** (μικροδιαδρομές μεταξύ δύο

διαδοχικών στάσεων). Για κάθε micro-trip και για το σύνολο του δείγματος υπολογίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά (όπως αυτά της ενότητας 4.2: μέση ταχύτητα, ποσοστό αδράνειας, επιταχύνσεις κ.λπ.). Στη συνέχεια, γίνεται επιλογή και σύνθεση ορισμένων χαρακτηριστικών micro-trips με τέτοιο τρόπο ώστε ο συνδυασμένος κύκλος να έχει παρόμοιες στατιστικές ιδιότητες με το συνολικό δείγμα δεδομένων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετρική απόστασης (π.χ. ελάχιστο τετράγωνο σφάλμα ως προς τις παραμέτρους) για να διαλέξει κανείς ποιες micro-trips θα αποτελέσουν τον τελικό κύκλο. Συχνά ο κύκλος πραγματοποιείται ως εξής: στάση-επιτάχυνση-κίνηση-επιβράδυνση-στάση, επαναλαμβάνοντας μοτίβα που εντοπίστηκαν στα πραγματικά δεδομένα. Η μέθοδος αυτή ήταν π.χ. η βάση για τους κύκλους ARTEMIS και για πολλούς τοπικούς κύκλους που αναπτύχθηκαν σε ερευνητικά έργα. Το πλεονέκτημα είναι ότι ο κύκλος που προκύπτει "μοιάζει" με πραγματικές διαδρομές, διότι ουσιαστικά αποτελεί συρραφή πραγματικών τμημάτων. Ωστόσο, μπορεί να χρειαστεί ρύθμιση για να πετύχουν ακριβώς οι μέσες τιμές που θέλουμε (π.χ. ίσως επιβάλλουμε ένα μικρό τροποποιημένο τμήμα αν το τελικό αποτέλεσμα αποκλίνει σε μια παράμετρο).

(β) Στοχαστική–Μοντελοκεντρική Προσέγγιση: Εδώ, αντί να επιλεγούν ευθέως κομμάτια διαδρομών, δημιουργείται ένα *μοντέλο* που παράγει τεχνητή πορεία ταχύτητας βασισμένη στα στατιστικά των δεδομένων. Μια συνήθης τεχνική είναι η χρήση **αλυσίδων Markov**: από τα δεδομένα υπολογίζεται η πιθανότητα μετάβασης από μια δεδομένη ταχύτητα/επιτάχυνση στην επόμενη κατάσταση, δημιουργώντας έτσι έναν πίνακα πιθανοτήτων. Έπειτα, ξεκινώντας από μια τυχαία αρχή, το μοντέλο Markov παράγει μια συνθετική χρονοσειρά ταχύτητας βήμα-βήμα ακολουθώντας τις πιθανότητες αυτές. Το αποτέλεσμα είναι μια "τυχαία" αλλά ρεαλιστική διαδρομή, της οποίας τα στατιστικά – εφόσον το μοντέλο ήταν σωστό – τείνουν προς εκείνα των αρχικών δεδομένων. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να συνδυαστεί και με Monte Carlo προσομοιώσεις: παράγονται πολλοί εικονικοί κύκλοι και επιλέγεται ένας αντιπροσωπευτικός ή υπολογίζεται ένας μέσος όρος. Επίσης, συχνά προστίθεται βηματική βελτιστοποίηση:

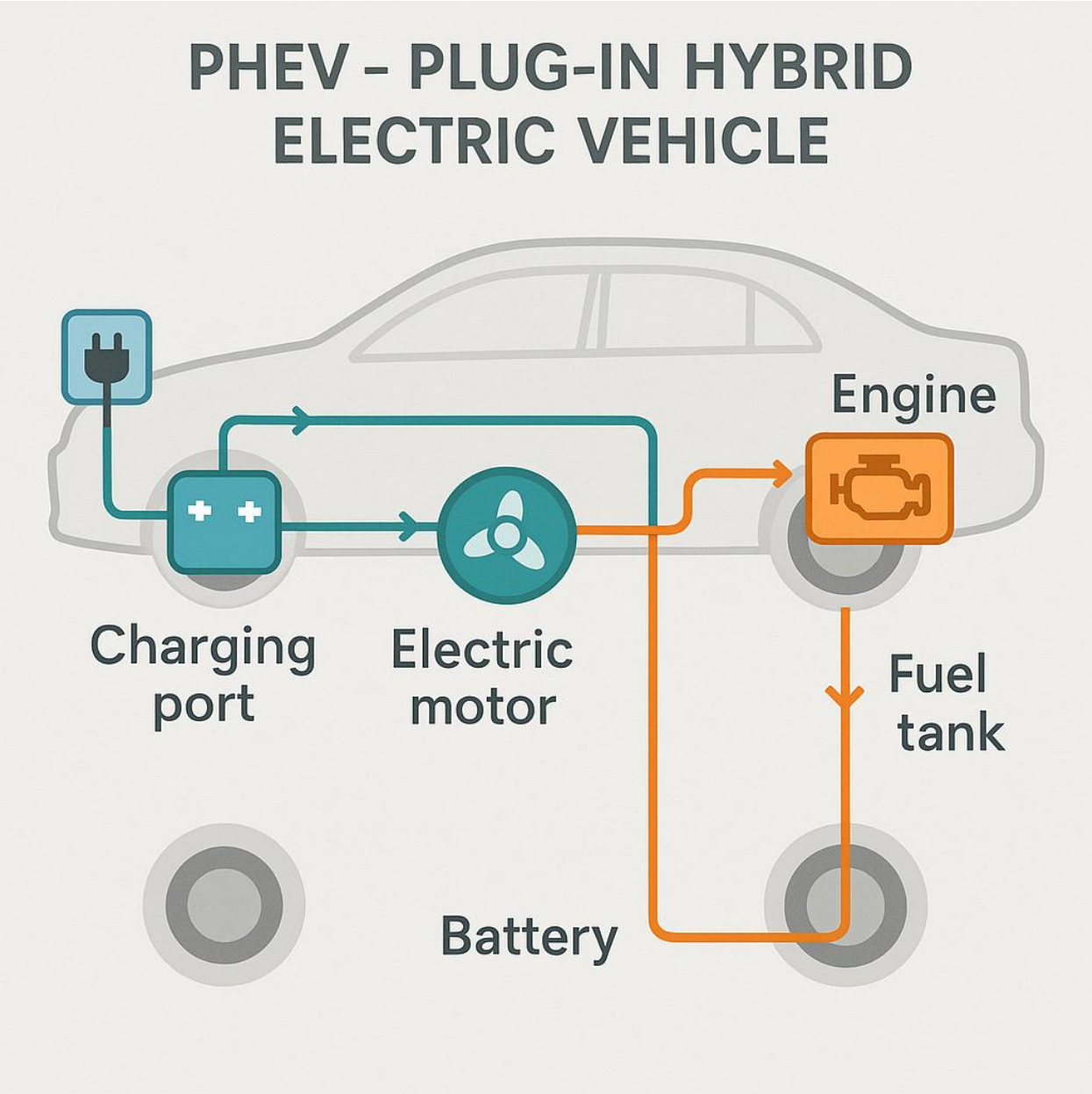
π.χ. χρησιμοποιούνται γενετικοί αλγόριθμοι ή αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που τροποποιούν ελαφρώς τον συνθετικό κύκλο για να πετύχουν ακριβέστερα τις επιθυμητές παραμέτρους (όπως ακριβώς επιθυμητή μέση ταχύτητα, συγκεκριμένο αριθμό στάσεων, κ.λπ.).

Μια πιο πρόσφατη παραλλαγή είναι η **ομαδοποίηση (clustering) και σύνθεση**: τα δεδομένα οδηγικής συμπεριφοράς ομαδοποιούνται σε κατηγορίες (clusters) με παρόμοια χαρακτηριστικά (π.χ. χαμηλή ταχύτητα/συχνές στάσεις, μέτρια ροή, υψηλή ταχύτητα ομαλή κίνηση, κ.ά.) μέσω αλγορίθμων K-means. Στη συνέχεια, από κάθε cluster επιλέγεται ένα αντιπροσωπευτικό τμήμα διαδρομής. Τα επιλεγμένα αυτά τμήματα ενώνονται για να σχηματίσουν τον κύκλο. Η διάρκεια που αφιερώνεται σε κάθε cluster στον κύκλο μπορεί να είναι ανάλογη της συχνότητας εμφάνισής του στα πραγματικά δεδομένα. Έτσι διασφαλίζεται ότι ο τελικός κύκλος καλύπτει όλες τις τυπικές καταστάσεις κυκλοφορίας ανάλογα με τη βαρύτητά τους. Με αυτή τη μέθοδο, μελέτη του 2025 ανέπτυξε έναν αντιπροσωπευτικό αστικό κύκλο για την πόλη Κίτο του Ισημερινού, χρησιμοποιώντας K-means clustering σε ~188.000 σημεία δεδομένων ταχύτητας – ο προκύπτων κύκλος είχε μέση ταχύτητα ~22,7 km/h και αναπαρήγαγε τα συχνά σταμάτα- ξεκίνα λόγω της γραμμικής αστικής ανάπτυξης της πόλης. Το παράδειγμα αυτό αναδεικνύει τη σύγχρονη τάση χρήσης εξελιγμένων, δεδομένων-οδηγούμενων μεθόδων για τον ορισμό τοπικών κύκλων οδήγησης.

Επιπρόσθετα, σε κάποιες περιπτώσεις η κατασκευή κύκλου μπορεί να στοχεύει σε *"χειρότερη περίπτωση"* (worst-case) ή σε *"τυπική περίπτωση"*. Για περιβαλλοντικές μελέτες ενδιαφέρει συχνά ο τυπικός μέσος κύκλος (για εκτίμηση μέσων εκπομπών), αλλά για δοκιμές αντοχής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας πιο απαιτητικός κύκλος (worst case) ώστε να δοκιμάσει τα όρια των συστημάτων ελέγχου ρύπων ενός οχήματος.

Κεφάλαιο 7: Τι είναι ένα PHEV

Ένα PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) αποτελεί ένα υβριδικό όχημα προηγμένης τεχνολογίας, το οποίο συνδυάζει δύο βασικές πηγές ενέργειας: έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICE – Internal Combustion Engine) και έναν ή περισσότερους ηλεκτροκινητήρες, οι οποίοι τροφοδοτούνται από μπαταρία υψηλής χωρητικότητας. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα ενός PHEV σε σχέση με ένα συμβατικό υβριδικό όχημα (HEV) είναι η δυνατότητα εξωτερικής φόρτισης της μπαταρίας μέσω παροχής ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, γεγονός που του επιτρέπει να διανύει σημαντικές αποστάσεις αποκλειστικά με ηλεκτροκίνηση.
Η λειτουργία ενός PHEV βασίζεται στην ευέλικτη αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο πηγών ισχύος:
Κατά την ηλεκτρική λειτουργία, το όχημα χρησιμοποιεί αποκλειστικά τον ηλεκτροκινητήρα, επιτυγχάνοντας μηδενικές εκπομπές ρύπων και μειωμένο κόστος λειτουργίας.
Κατά τη συμβατική λειτουργία, όταν η μπαταρία αποφορτιστεί ή απαιτείται υψηλότερη ισχύς, ενεργοποιείται ο κινητήρας εσωτερικής καύσης, εξασφαλίζοντας αυξημένη αυτονομία και ευελιξία στη χρήση.
Επιπλέον, μέσω του συστήματος ανάκτησης ενέργειας κατά την πέδηση (regenerative braking), μέρος της κινητικής ενέργειας επανατροφοδοτεί τη μπαταρία, βελτιστοποιώντας την ενεργειακή απόδοση.
Τα PHEV εντάσσονται στο πλαίσιο της μεταβατικής τεχνολογίας προς την πλήρη ηλεκτροκίνηση, καθώς συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης με την επιχειρησιακή ασφάλεια που προσφέρει ο κινητήρας εσωτερικής καύσης. Επιπλέον, συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και άλλων ρύπων, ιδίως όταν χρησιμοποιούνται με συστηματική φόρτιση και σε αστικές συνθήκες οδήγησης.
Συνολικά, τα PHEV αποτελούν μια ενδιάμεση αλλά ιδιαίτερα κρίσιμη τεχνολογική λύση στον τομέα της βιώσιμης κινητικότητας, συνδυάζοντας περιβαλλοντικά οφέλη, ενεργειακή αποδοτικότητα και πρακτικότητα χρήσης, μέχρι την πλήρη επικράτηση των αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων (BEV – Battery Electric Vehicles).



Εικόνα 8: Σχεδιάγραμμα ενός PHEV

Κεφάλαιο 8: Η Εξέλιξη των Μπαταριών στα Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEV)

Τα Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEV) συνιστούν μία ενδιάμεση τεχνολογική λύση μεταξύ των συμβατικών οχημάτων εσωτερικής καύσης (ICE) και των αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων (BEV). Ο συνδυασμός κινητήρα εσωτερικής καύσης και ηλεκτροκινητήρα επιτρέπει τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών, ενώ η δυνατότητα φόρτισης από εξωτερική πηγή παρέχει ηλεκτρική αυτονομία ικανή να καλύψει σημαντικό μέρος των καθημερινών μετακινήσεων. Καθοριστικό ρόλο σε αυτή τη μετάβαση

διαδραματίζουν οι μπαταρίες, οι οποίες εξελίχθηκαν σημαντικά την τελευταία δεκαετία.

Ιστορική Εξέλιξη των PHEV και των Μπαταριών τους

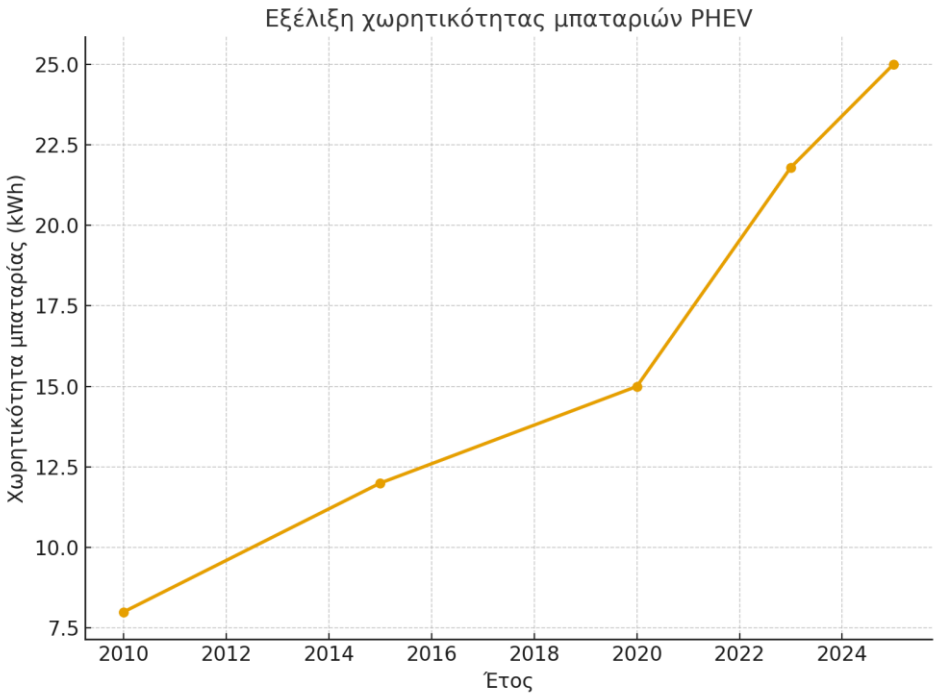
Η εμπορική διάθεση των PHEV ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του 2000. Τα πρώτα μοντέλα ενσωμάτωναν μπαταρίες μικρής χωρητικότητας (5–8 kWh), αποδίδοντας ηλεκτρική αυτονομία της τάξης των 20–30 km. Καθώς η τεχνολογία ιόντων λιθίου ωρίμαζε, η ενεργειακή πυκνότητα (Wh/kg και Wh/L) αυξήθηκε, επιτρέποντας τη σταδιακή αύξηση της χωρητικότητας. Σήμερα, οι χωρητικότητες κυμαίνονται από 12 έως 25 kWh, προσφέροντας αυτονομίες που φτάνουν τα 80–100 km σε ορισμένα μοντέλα.

Τεχνολογίες Μπαταριών και Συστήματα Διαχείρισης

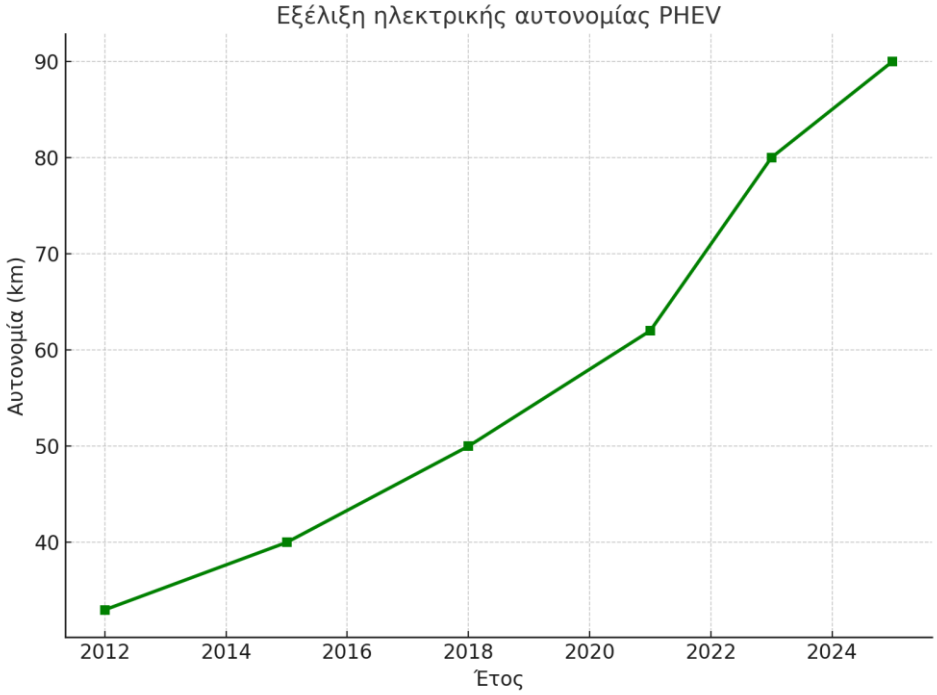
Οι περισσότερες μπαταρίες PHEV βασίζονται σε χημείες ιόντων λιθίου, όπως το νικέλιο-μαγγάνιο-κοβάλτιο (Li-NMC) και ο σίδηρος-φωσφορικό λίθιο ($LiFePO_4$). Οι δύο αυτές τεχνολογίες προσφέρουν διαφορετικά πλεονεκτήματα: η πρώτη υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, η δεύτερη αυξημένη αντοχή και ασφάλεια. Η χρήση εξελιγμένων συστημάτων διαχείρισης μπαταρίας (Battery Management Systems – BMS) βελτιστοποιεί την απόδοση, προστατεύει τα στοιχεία και παρατείνει τον κύκλο ζωής.

Στατιστικά Στοιχεία και Γραφήματα

Σύμφωνα με διεθνείς μελέτες, η μέση χωρητικότητα μπαταριών στα PHEV αυξήθηκε από περίπου 8 kWh το 2010 σε πάνω από 21,8 kWh το 2023, σημειώνοντας ετήσια αύξηση της τάξης του 20–25%. Αντίστοιχα, η ηλεκτρική αυτονομία ανέβηκε από ~33 km το 2012 σε ~80 km το 2023. Στα παρακάτω σχήματα αποτυπώνεται η εξέλιξη αυτή.



Διάγραμμα 2: Εξέλιξη χωρητικότητας μπαταριών PHEV ανά έτος.



Διάγραμμα 3: Εξέλιξη ηλεκτρικής αυτονομίας PHEV ανά έτος.

Παράγοντες που Επηρεάζουν την Πραγματική Αυτονομία

Η θεωρητική ηλεκτρική αυτονομία διαφέρει συχνά από την πραγματική. Παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες (θερμοκρασία), η οδηγική συμπεριφορά, το φορτίο του οχήματος και η χρήση συστημάτων κλιματισμού επηρεάζουν

σημαντικά την απόδοση. Επιπλέον, η συχνότητα φόρτισης από τον οδηγό καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη συνεισφορά της ηλεκτρικής λειτουργίας.

Μελλοντικές Προοπτικές

Η περαιτέρω εξέλιξη των PHEV συνδέεται με νέες τεχνολογίες μπαταριών, όπως οι στερεού ηλεκτρολύτη και οι anode-free διατάξεις, που υπόσχονται αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας κατά 20–30%. Η μείωση του κόστους ανά kWh και η βελτίωση των BMS θα επιτρέψουν μεγαλύτερα πακέτα ενέργειας, χωρίς υπέρμετρη αύξηση βάρους και κόστους. Έτσι, μελλοντικά PHEV θα μπορούν να ξεπερνούν τα 100 km ηλεκτρικής αυτονομίας, ενισχύοντας τον ρόλο τους ως μεταβατική τεχνολογία προς τα BEV.

Συμπεράσματα

Η εξέλιξη των μπαταριών στα PHEV υπήρξε καθοριστική για τη διείσδυση της τεχνολογίας στην αγορά. Η αύξηση χωρητικότητας και αυτονομίας καθιστά τα οχήματα αυτά περισσότερο ελκυστικά για τον χρήστη, ενώ οι νέες τεχνολογίες προδιαγράφουν περαιτέρω βελτιώσεις. Ωστόσο, η πραγματική αξιοποίηση των δυνατοτήτων τους εξαρτάται από την οδηγική συμπεριφορά και τη συχνότητα φόρτισης.

Κεφάλαιο 9: Θεωρία Miller

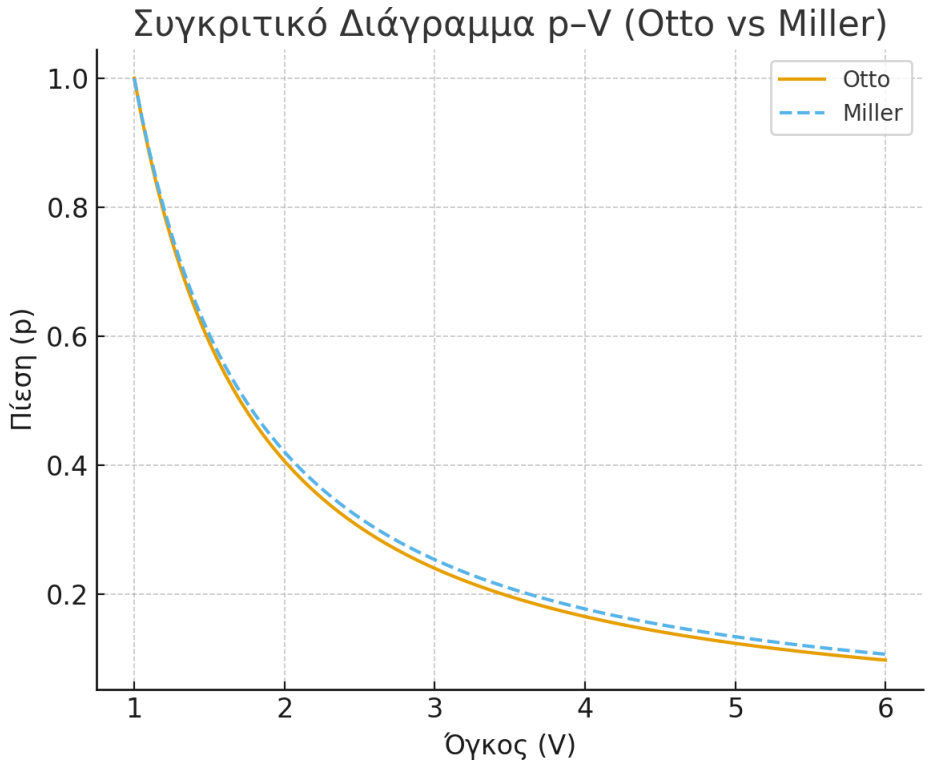
1. Εισαγωγή

Ο κύκλος Miller αποτελεί θερμοδυναμική παραλλαγή του κύκλου Otto, με στόχο τη βελτίωση της θερμικής απόδοσης και τη μείωση των εκπομπών ρύπων. Η ειδοποιός διαφορά του είναι η μεταβολή στον χρόνο κλεισίματος της βαλβίδας εισαγωγής, η οποία μπορεί να είναι πρόωρη ή καθυστερημένη. Με αυτόν τον τρόπο, διαφοροποιείται ο αποτελεσματικός λόγος συμπίεσης από τον γεωμετρικό, επιτρέποντας υψηλότερους λόγους εκτόνωσης και καλύτερη απόδοση.

2. Θεωρητική Ανάλυση

Η βασική αρχή του κύκλου Miller συνίσταται στη μείωση της θερμοκρασίας κατά τη φάση συμπίεσης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του ελέγχου της βαλβίδας εισαγωγής, με αποτέλεσμα τη μείωση της πιθανότητας κρουστικής καύσης. Ο κύκλος Miller συχνά συνδυάζεται με υπερπλήρωση (turbocharger ή supercharger)

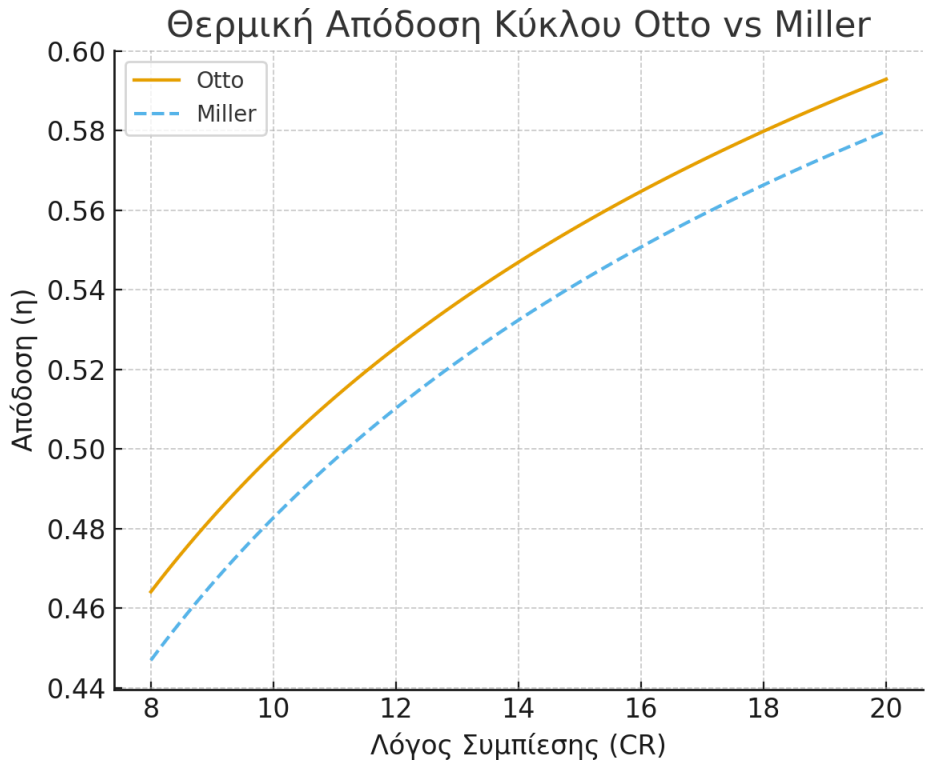
ώστε να αντισταθμίζεται η μείωση της μάζας αέρα λόγω της διαφορετικής εισαγωγής.



Διάγραμμα 4 : Συγκριτικό διάγραμμα p–V μεταξύ κύκλου Otto και Miller.

3. Θερμοδυναμική Απόδοση

Σε θεωρητικό επίπεδο, η θερμική απόδοση του κύκλου Miller είναι υψηλότερη από αυτή του κύκλου Otto για ίδιους λόγους εκτόνωσης, χάρη στη μείωση των θερμικών απωλειών. Παράλληλα, ο μειωμένος κίνδυνος κρουστικής καύσης επιτρέπει τη χρήση υψηλότερων λόγων συμπίεσης, βελτιώνοντας τη συνολική αποδοτικότητα.



Διάγραμμα 5: Θερμική απόδοση κύκλων Otto και Miller σε συνάρτηση με τον λόγο συμπίεσης.

4. Συγκριτική Ανάλυση με Κύκλο Otto και Atkinson

Ο κύκλος Otto αποτελεί τη βάση για τους περισσότερους βενζινοκινητήρες, ενώ ο κύκλος Atkinson χρησιμοποιείται κυρίως σε υβριδικά οχήματα, με στόχο την αύξηση της αποδοτικότητας μέσω μεγαλύτερης διαδρομής εκτόνωσης. Ο κύκλος Miller συνδυάζει στοιχεία και από τους δύο, προσφέροντας υψηλή απόδοση και μειωμένες εκπομπές, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με υπερπλήρωση.

5. Εφαρμογές

Σήμερα, ο κύκλος Miller χρησιμοποιείται σε υβριδικά αυτοκίνητα, σε βαρέα οχήματα και σε ναυτικούς κινητήρες. Η εφαρμογή του είναι ιδιαίτερα σημαντική σε περιβάλλοντα με αυστηρούς κανονισμούς εκπομπών, καθώς μειώνει σημαντικά τα NOx και το CO_2. Επιπλέον, προσφέρει χαμηλότερα επίπεδα θορύβου και φθοράς λόγω μειωμένων θερμικών και μηχανικών καταπονήσεων.

6. Συμπεράσματα

Ο κύκλος Miller αποτελεί μία σημαντική εξέλιξη στην τεχνολογία των θερμοδυναμικών κύκλων. Η δυνατότητα χρήσης υψηλότερων λόγων συμπίεσης, σε συνδυασμό με χαμηλότερες θερμοκρασίες καύσης, τον καθιστά ιδανικό για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή απόδοση και χαμηλές εκπομπές. Η πρακτική του σημασία ενισχύεται ιδιαίτερα από τον συνδυασμό του με υπερπλήρωση.

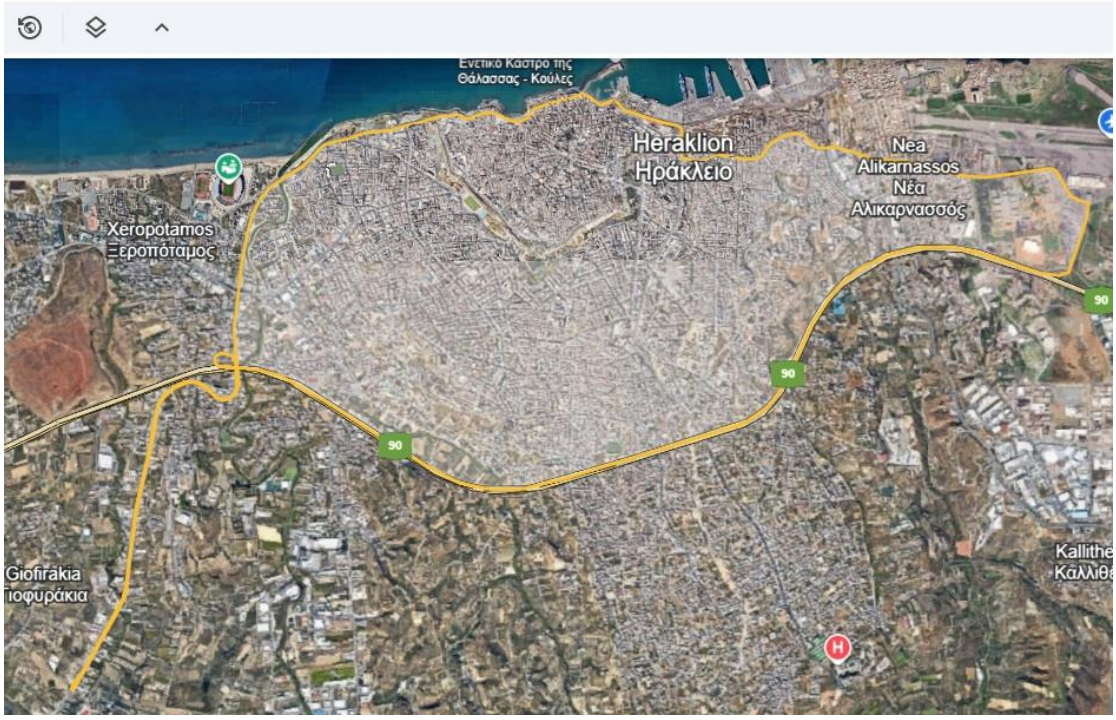
Κεφάλαιο 10: Πειραματική διαδικασία

Εισαγωγή στο πείραμα -Συλλογή δεδομένων

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα πτυχιακή εργασία προέκυψαν από μετρήσεις που έγιναν στη πόλη του Ηρακλείου. Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται λεπτομερώς η πειραματική διάταξη στην οποία έγιναν οι μετρήσεις , καθώς και τα επιμέρους σκέλη που την αποτελούν.

Οι μετρήσεις ξεκίνησαν στις 31/03/2025 και τελείωσαν στις 31/05/2025. Είναι αναγκαίο να αναφέρουμε μια διακοπή από τις 12/04/2025 μέχρι 27/04/2025 λόγω Πάσχα. Η λήψη των δεδομένων έγινε από Δευτέρα με Παρασκευή και ώρα αρχής καταγραφής 3 μ.μ

Η επιλογή της διαδρομή έγινε με γνώμονα να μπορούμε να έχουμε ένα σχετικά μεγάλο εύρος ταχυτήτων αλλά εναλλαγές στην επιτάχυνση-επιβράδυνση καθώς και γεωγραφικής ποικιλομορφίας ανηφορική - κατηφορική οδήγηση. Το σημείο αφετηρίας και τερματισμού παραμένει το ίδιο, έτσι ώστε να μπορούμε να έχουμε ένα ρεαλιστικό προφίλ όσον αφορά τις διαδρομές.



Εικόνα 9 : Διαδρομή καταγραφής των δεδομένων στη πόλη του Ηρακλείου

Η συνολική απόσταση της διαδρομή ήταν στα 23 χλμ , με μέσο όρο διάρκειας τα 60 λεπτά. Κατά την λήψη των μετρήσεων είχαμε τον ίδιο οδηγό με το ίδιο αυτοκίνητο και ώρα έναρξης των μετρήσεων πάντα η ίδια.
Για τις ανάγκες του πειράματος πραγματοποιήθηκαν 6 σειρές από μετρήσεις, με 3 διαφορετικά προφίλ οδήγησης αμυντική – επιθετική – ροή κυκλοφορίας για τις δυο διαφορετικές κατάστασής του οχήματός φορτισμένο πλήρως και αφόρτιστο.

Εξοπλισμός των μετρήσεων

-Όχημα καταγραφής



Εικόνα 10: Το όχημα του πειράματος

Το όχημα με το οποίο έγιναν οι καταγραφές είναι ένα πενταθέσιο αυτοκίνητο κόμπακτ crossover SUV ιδιωτικής χρήσης. Πιο αναλυτικά είναι ένα Volvo XC40 PHEV (2022). Το αυτοκίνητο που χρησιμοποιήθηκες για της μετρήσεις συγκεκριμένα λειτουργεί με βενζινοκινητήρα απόδοσης 180 ίππων καθώς και με έναν ηλεκτροκινητήρα μέγιστης απόδοσής 82 ίππων με συνδυαστική στους 262 ίππους

Κατηγορία	**Χαρακτηριστικό**	**Τιμή / Περιγραφή**
Κινητήρας	Θερμικός κινητήρας	1.5 L 3-κύλινδρος turbo βενζίνης
	Ισχύς βενζινοκινητήρα	180 hp (132 kW) @ 5.800 rpm
	Ροπή βενζινοκινητήρα	265 Nm @ 1.500–3.000 rpm
	Ηλεκτροκινητήρας	60 kW / 82 hp – 160 Nm
	Συνολική ισχύς	~262 hp / 425 Nm

Απόδοση	0–100 km/h	~7.3 δευτερόλεπτα
	Τελική ταχύτητα	180 km/h (ηλεκτρονικά περιορισμένη)
Μπαταρία & Αυτονομία	Τύπος μπαταρίας	Λιθίου-ιόντων (Li-ion)
	Χωρητικότητα μπαταρίας	10.7 kWh
	Ηλεκτρική αυτονομία (WLTP)	~50 km (πραγματική 43–45 km)
Κατανάλωση	Κατανάλωση καυσίμου (μικτή WLTP)	1.8–1.9 L/100 km (όταν φορτισμένο)
	Εκπομπές CO_2	~41–45 g/km
Μετάδοση	Τύπος κιβωτίου	7-τάχυτο αυτόματο διπλού συμπλέκτη (7DCT)
	Τύπος κίνησης	Προσθιοκίνητο (FWD)
Διαστάσεις & Βάρος	Καθίσματα	5
	Βάρος	1.735–1.812 kg

Πίνακάς 2: Χαρακτηρίστηκα οχήματος

-Συσκευή συλλογής δεδομένων

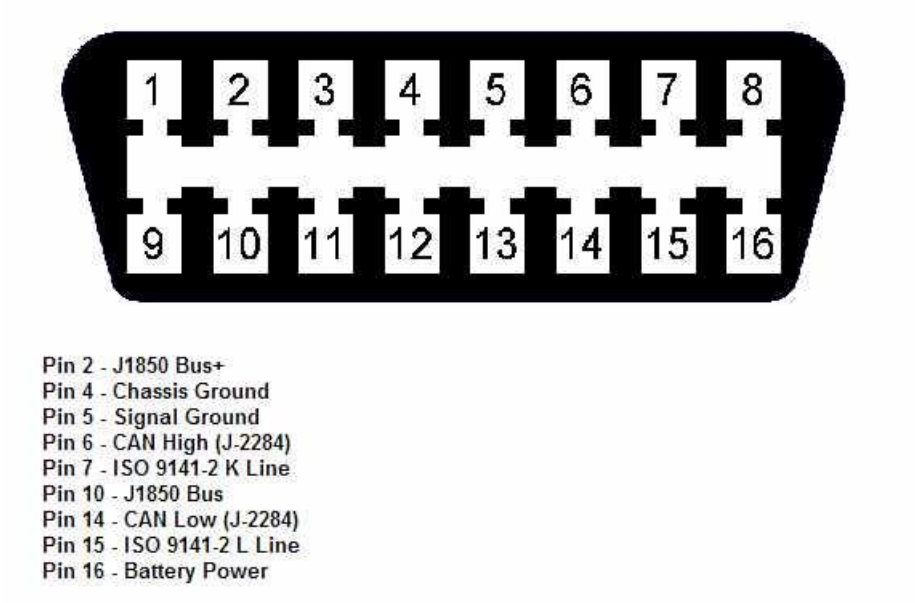
Για την περισυλλογή των δεδομένων μας χρησιμοποιήθηκε μια συσκευή OBD 2.
Το σύστημα OBD-II (On-Board Diagnostics II) αποτελεί διεθνές πρωτόκολλο για την παρακολούθηση και διάγνωση τεχνικών σφαλμάτων που σχετίζονται με τον κινητήρα και τα συστήματα ελέγχου εκπομπών ενός οχήματος. Εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στις Ηνωμένες Πολιτείες το 1996 και είναι πλέον υποχρεωτικό σε όλες τις αγορές παγκοσμίως, συμπεριλαμβανομένης της Ευρωπαϊκής Ένωσης από το 2001 για βενζινοκίνητα οχήματα και το 2004 για πετρελαιοκίνητα.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά

- Σύνδεση μέσω 16-πινης θύρας (SAE J1962), τοποθετημένη συνήθως κάτω από το τιμόνι.
- Πρωτόκολλα επικοινωνίας: ISO 9141-2, ISO 14230-4, ISO 15765-4 (CAN), SAE J1850.
- Διάγνωση μέσω διαγνωστικών κωδικών σφαλμάτων (DTCs).
- Παρακολούθηση πραγματικών δεδομένων (π.χ. στροφές κινητήρα, θερμοκρασία, αισθητήρες O_2).
- Αποθήκευση ιστορικών δεδομένων (Freeze Frame Data).

Εφαρμογές

- Εντοπισμός και αποκατάσταση βλαβών.
- Περιβαλλοντική συμμόρφωση με πρότυπα εκπομπών.
- Ανάλυση και έρευνα κινητήρων, κατανάλωσης και εκπομπών.
- Εποπτεία στόλου οχημάτων μέσω τηλεματικής παρακολούθησης.



Εικόνα 11: Απεικόνιση θύρας OBD2

Αντάπτορας OBD-II της Vgate: Τεχνική Επισκόπηση και Εφαρμογές

Ο αντάπτορας OBD-II της εταιρείας Vgate αποτελεί ένα σύγχρονο και υψηλής αξιοπιστίας εργαλείο για τη διάγνωση και παρακολούθηση συστημάτων ελέγχου οχημάτων με δυνατότητες συνδεσιμότητας μέσω Bluetooth, Wi-Fi ή BLE (Bluetooth Low Energy). Τα μοντέλα της σειράς iCar και vLinker συμβαδίζουν με τα παγκόσμια πρότυπα OBD-II και EOBD, καθιστώντας τα ιδιαίτερα χρήσιμα για ερευνητικούς, τεχνικούς αλλά και πρακτικούς σκοπούς.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά

- Υποστήριξη πρωτοκόλλων OBD-II: ISO 9141-2, ISO 14230-4, ISO 15765-4 (CAN), SAE J1850 PWM/VPW.
- Συνδεσιμότητα: Wi-Fi, Bluetooth 3.0, BLE 4.0 ή Bluetooth 3 Mbps (ανάλογα το μοντέλο).
- Αυτόματη μετάβαση σε κατάσταση ύπνου (sleep mode) για εξοικονόμηση ενέργειας.
- Συμβατότητα με εφαρμογές όπως Torque, CarScanner, OBDFusion, LeafSpy, BimmerCode.
- Υποστήριξη πλήρους διαγνωστικού εύρους: ανάγνωση/διαγραφή DTCs, παρακολούθηση ζωντανών δεδομένων (live data), freeze frame, αισθητήρες O_2, fuel trims κ.ά.

Εφαρμογές και Πλεονεκτήματα

Οι αντάπτορες Vgate βρίσκουν εφαρμογή σε ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων: από την απλή διάγνωση βλαβών σε επιβατικά οχήματα έως την παρακολούθηση δεδομένων κατανάλωσης, απόδοσης και εκπομπών σε επιστημονικές μελέτες και στόλους οχημάτων. Ιδιαίτερα τα μοντέλα iCar Pro 2S και vLinker MC+

προσφέρουν υψηλή σταθερότητα σύνδεσης και υποστήριξη για ειδικά δίκτυα όπως SW-CAN και MS-CAN (κυρίως σε οχήματα GM και Ford).

Συμβατότητα με Ηλεκτρικά και Υβριδικά Οχήματα

Ειδικά για τα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα, η σειρά Vgate προσφέρει μοντέλα με δυνατότητες αυτόματης επανενεργοποίησης (auto wake-up) και ελαχιστοποίηση κατανάλωσης ρεύματος σε κατάσταση αναμονής. Αυτό είναι κρίσιμο για την αποφυγή αποφόρτισης της κύριας μπαταρίας σε EV, ενώ διασφαλίζεται και η σταθερότητα της σύνδεσης με τις αντίστοιχες εφαρμογές.



Εικόνα 11: Η εφαρμογή μετρήσεων

Εφαρμογή Torque

Εφαρμογή Torque Pro

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκε η δωρεάν έκδοση της εφαρμογής Torque pro για τη συλλογή δεδομένων από τη συσκευή διάγνωσης. Η εφαρμογή επικοινωνεί με τον OBD-II αντάπτορα μέσω συνδεσιμότητας Bluetooth και εμφανίζει τις επιλεγμένες παραμέτρους στην οθόνη της έξυπνης συσκευής. Παρέχεται επιπλέον η δυνατότητα καταγραφής διαδρομών σε χάρτη, με παραμετροποίηση ανάλογα με ταχύτητα, καθώς και ανάλυση στατιστικών μετακινήσεων. Επιπλέον, τα δεδομένα μπορούν να μεταφορτωθούν σε απομακρυσμένο εξυπηρετητή μέσω δικτύου για περαιτέρω επεξεργασία.

Δυνατότητες και Μεταβλητές Καταγραφής

Η εφαρμογή Torque περιλαμβάνει πληθώρα επιλογών μεταβλητών που μπορούν να καταγραφούν, όπως στιγμιαία ταχύτητα GPS και OBD, επιτάχυνση στους άξονες x, y, z, κατανάλωση καυσίμου, θερμοκρασία ψυκτικού κινητήρα, ροπή κινητήρα, εκπομπές CO2, και πολλές ακόμη. Η διαμόρφωση του προφίλ οχήματος πριν την έναρξη της μέτρησης αυξάνει την ακρίβεια των υπολογισμών, συμπεριλαμβάνοντας πληροφορίες όπως κυβισμός, τύπος καυσίμου, μέγιστες στροφές και βάρος οχήματος.

Μεθοδολογία Καταγραφής

Η διαδικασία καταγραφής περιλαμβάνει συγκεκριμένα βήματα: σύνδεση του αντάπτορα στη θύρα OBD-II του οχήματος, τοποθέτηση της έξυπνης συσκευής σε σταθερό σημείο, ενεργοποίηση του οχήματος και εκκίνηση της εφαρμογής. Η

καταγραφή δεδομένων ξεκινά με την εκκίνηση του κινητήρα και συνεχίζεται έως την ολοκλήρωση της διαδρομής. Κατά τη διάρκεια στάσης με σβηστό κινητήρα, η καταγραφή ολοκληρώνεται, ενώ εάν η στάση γίνει με αναμμένο κινητήρα, η εφαρμογή συνεχίζει την καταγραφή δεδομένων, καταγράφοντας και την αδράνεια.

Επεξεργασία δεδομένων

Τα αρχεία δεδομένων που καταγράφηκαν από το κινητό χρησιμοποιώντας την εφαρμογή Torque, αποθηκεύονται σε μορφή αρχείου κειμένου τύπου CSV (.csv, Comma Separated Values). Οι τιμές των παραμέτρων που καταγράφονται μέσω των αισθητήρων αποθηκεύονται σε αυτού του τύπου τα αρχεία ως κείμενο, το οποίο διαχωρίζεται σε στήλες με την εμφάνιση κομμάτων.

```
GPS Time, Device Time, Longitude, Latitude,GPS Speed
(Meters/second), Horizontal Dilution of Precision,
Altitude, Bearing, G(x), G(y), G(z), G(calibrated),Engine
RPM(rpm),Kilometers Per Litre(Instant)(kpl),Trip
Distance(km),Engine Coolant Temperature(°C),Mass Air
Flow Rate(g/s)Thu Nov 12 18:08:41 GMT+02:00 2020,12-
Νοε-2020  18:08:40.172,25.124608333333338,
35.338028333333334,0.85238,3.9,18.6,92.29,-
1.647,7.786,4.357,-0.056135774,0.0,0.0,-,59.0,-Thu Nov
12 18:08:42 GMT+02:00 2020,12-Νοε-2020
18:08:41.171,25.124601666666663,35.338028333333334
,0.7648772,1.2,18.1,27.17,-0.574,7.881,
6.004,0.03063041,0.0,0.0,-,59.0,-Thu Nov 12 18:08:43
GMT+02:00 2020,12-Νοε-2020 18:08:42.171,25.1246
,35.338033333333335,0.0,1.6,18.0,27.17,-
0.459,7.834,5.219,-0.020302117,0.0,0.0,-,59.0,-Thu Nov
12 18:08:44 GMT+02:00 2020,12-Νοε-2020
18:08:43.171,25.124604999999995,35.33803666666667,
0.0,2.1,17.9,27.17,-0.565,7.202,
6.454,0.0064837337,0.0,0.0,-,59.0,-
```

Εικόνα 12:Δείγμα αρχείου κειμένου από μετρήσεις τύπου CSV

Υπό αυτήν τη μορφή, τα αρχεία, θεωρητικά, μπορούν να εισαχθούν σε προγράμματα στατιστικής επεξεργασίας (όπως Excel, MATLAB), χωρίς να χρειάζονται περαιτέρω μετατροπές. Στην πράξη, όμως, η αποκωδικοποίηση και εισαγωγή των αρχείων στα προγράμματα δεν ήταν άμεσα δυνατή.

Τα προβλήματα σε αυτό το στάδιο προέκυπταν από την αναγνώριση των

αριθμητικών τιμών ως απλό κείμενο ή την παράλειψη ανάγνωσης των κόμματων, με αποτέλεσμα να μην διαχωρίζονται σωστά οι καταγεγραμμένες τιμές. Έτσι, το αρχείο δεν ήταν χρηστικό.
Για την αντιμετώπιση αυτού του εμποδίου επιλέχθηκαν εναλλακτικά λογισμικά μετατροπής. Τα αρχεία CSV μετατράπηκαν σε μορφή XLSX (μορφή που αναγνωρίζεται από το Excel) με τη χρήση των παραπάνω εργαλείων.
Επομένως, για τη συλλογή των δεδομένων που λαμβάνονταν για κάθε μεταβλητή, δημιουργείται ένας φάκελος με την ονομασία "Torque Logs", όπου περιλαμβάνονται όλα τα δεδομένα καταγραφής σε μορφή αρχείου Excel – και κατ' αυτόν ακριβώς τον τρόπο έγινε και στο παρόν πείραμα.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	GPS Time	Device Time	Longitude	Latitude	GPS Speed (Meters/second)	Horizontal Dilution of Precision	Altitude	Bearing	G(x)	G(y)	G(z)	G(calibrated)	Absolute Throttle Position B(%)	Acceleration Sensor(Total)(g)
2	Tue May 13 15:27:08 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:08.393	2517232215	3533379577	0	4.08523E+15	9.18273E+14	0	15	637	67	0 -		-3
3	Tue May 13 15:27:09 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:09.388	2517232009	3533379377	0	4.02065E+15	9.15373E+15	0	21	628	691	-1 -		-4
4	Tue May 13 15:27:10 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:10.386	2517231917	3533379319	0	3.79009E+16	9.1516E+14	0	4	666	692	2 -		-2
5	Tue May 13 15:27:11 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:11.387	2517231879	3533379267	0	3.79009E+16	9.14588E+15	0	-4	625	724	1 -		-4
6	Tue May 13 15:27:12 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:12.387	2517231867	3533379251	0	3.79009E+16	9.14449E+15	0	38	55	789	2 -		-1
7	Tue May 13 15:27:13 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:13.386	2517231858	3533379241	0	3.79009E+16	9.14362E+15	0	-47	614	692	-2	20.39	-5
8	Tue May 13 15:27:14 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:14.386	2517231852	3533379234	0	3.79009E+16	9.14331E+12	0	5	609	722	0	20.39	-3
9	Tue May 13 15:27:15 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:15.388	2517231841	3533379223	0	3.79009E+16	9.14221E+15	0	-9	621	714	0	20.39	-3
10	Tue May 13 15:27:16 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:16.387	2517231835	3533379214	0	3.79009E+16	9.14095E+14	0	-33	63	699	0	20.39	-3
11	Tue May 13 15:27:17 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:17.386	2517231829	3533379208	0	3.79009E+16	9.13962E+15	0	-8	628	71	-1	20.39	0
12	Tue May 13 15:27:18 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:18.386	2517231826	3533379203	0	3.79009E+16	9.13846E+15	0	-3	657	648	-2	20.39	-4
13	Tue May 13 15:27:19 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:19.387	2517231815	3533379193	0	3.79009E+16	9.13662E+11	0	24	648	68	0	20.39	-4
14	Tue May 13 15:27:20 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:20.388	2517231808	353337918	0	3.79009E+16	9.13548E+15	0	-11	655	653	-2	20.39	-5
15	Tue May 13 15:27:21 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:21.389	25172318	353337917	0	3.79009E+16	9.13361E+14	0	4	638	685	-1	20.39	-4
16	Tue May 13 15:27:22 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:22.388	2517231796	3533379161	0	3.79009E+16	9.13254E+13	0	-8	65	682	0	20.39	-4
17	Tue May 13 15:27:23 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:23.387	2517231788	3533379147	0	3.79009E+16	9.13124E+14	0	18	655	64	-3	20.39	-6
18	Tue May 13 15:27:24 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:24.388	2517231782	3533379136	0	3.79009E+16	9.13012E+15	0	9	658	666	-1	20.39	-4
19	Tue May 13 15:27:25 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:25.386	2517231778	3533379122	0	3.79009E+16	9.12811E+14	0	34	608	765	3	20.39	-8
20	Tue May 13 15:27:26 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:26.386	251723177	3533379116	0	3.79009E+16	9.12675E+15	0	-59	59	559	-39	20.39	-39
21	Tue May 13 15:27:27 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:27.388	2517231881	3533378072	9.4E+15	3.79009E+16	9.18533E+15	1.657E+15	8	55	981	4	20.39	0
22	Tue May 13 15:27:28 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:28.386	2517230733	3533375239	0	3.79009E+16	8.92488E+15	0	69	58	1018	8	20.39	0
23	Tue May 13 15:27:29 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:29.387	2517230281	3533374064	0	3.79009E+16	8.80206E+15	0	78	54	981	4	20.39	0
24	Tue May 13 15:27:30 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:30.387	2517229939	3533373175	0	3.79009E+16	8.69896E+14	0	77	54	984	4	20.39	0
25	Tue May 13 15:27:31 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:31.388	2517229913	3533372699	0	3.79009E+16	8.66025E+15	0	82	53	989	5	20.39	0
26	Tue May 13 15:27:32 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:32.387	251722989	3533372314	0	3.79009E+16	8.64769E+15	0	83	55	983	4	20.39	0
27	Tue May 13 15:27:33 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:33.386	251722992	3533372234	0	3.79009E+16	8.62767E+14	0	2	118	687	-25	28.63	-89
28	Tue May 13 15:27:34 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:34.387	2517230046	3533372111	0	3.79009E+16	8.57717E+15	0	75	12	977	4	28.63	0
29	Tue May 13 15:27:35 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:35.387	2517230044	3533371821	0	3.79009E+16	8.55533E+14	0	53	105	972	4	20.39	0
30	Tue May 13 15:27:36 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:36.387	2517230059	3533371496	0	3.79009E+16	8.53048E+14	0	54	1	982	4	20.39	0
31	Tue May 13 15:27:37 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:37.387	2517230105	3533371263	0	3.79009E+16	8.50583E+15	0	58	97	981	4	20.39	0
32	Tue May 13 15:27:38 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:38.387	2517230069	3533371185	0	3.79009E+16	8.50197E+14	0	55	101	98	4	20.39	0
33	Tue May 13 15:27:39 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:39.387	2517230056	3533371173	0	3.79009E+16	8.50268E+15	0	54	98	982	5	20.39	0
34	Tue May 13 15:27:40 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:40.387	2517230058	3533371149	0	3.79009E+16	8.5009E+13	0	55	102	982	4	20.39	0
35	Tue May 13 15:27:41 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:41.387	2517230055	3533371133	0	3.79009E+16	8.5042E+11	0	51	103	98	4	20.39	0
36	Tue May 13 15:27:42 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:42.389	2517230054	3533371128	0	3.79009E+16	8.50417E+15	0	51	99	98	4	20.39	0
37	Tue May 13 15:27:43 GMT+03:00 2025	13-Μαΐ-2025 15:27:43.387	2517230054	3533371125	0	3.79009E+16	8.50404E+14	0	52	1	981	4	20.39	0

Εικόνα 13: Τελική μορφή του αρχείου κειμένου στο Excel (.xslx)

Εφόσον έχουν ολοκληρωθεί τα αντίστοιχα αρχεία για κάθε διαδρομή ξεχωριστά — τα οποία αποστέλλονται εύκολα μέσω της εφαρμογής σε οποιαδήποτε διεύθυνση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου επιλεγεί— ξεκινά η περαιτέρω επεξεργασία τους.
Μετά το πέρας κάθε διαδρομής συλλέγονται δεδομένα για τις μεταβλητές που έχουν επιλεγεί προς καταγραφή από την εφαρμογή. Η μοναδική μεταβλητή της οποίας οι τιμές καταγράφονται τόσο μέσω του διαγνωστικού OBD-II όσο και μέσω του GPS της κινητής συσκευής είναι η ταχύτητα. Όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές συλλέγονται αποκλειστικά μέσω της διαγνωστικής συσκευής OBD και στο παρόν πείραμα περιλαμβάνουν:

- τις στροφές του κινητήρα ανά λεπτό (Engine RPM),
- το φορτίο του κινητήρα (Engine Load %),
- τη θέση του αισθητήρα γκαζιού (Throttle Position %) και
- τη ροή καυσίμου ανά χιλιόμετρο (Kilometers per Litre – KPL).
- ποσοστό εναπομείναντας υβριδικής μπαταρίας

Αφού πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες μετατροπές μονάδων, η πρώτη φάση της επεξεργασίας επικεντρώνεται στη σταδιακή εξομάλυνση της ταχύτητας, ώστε να μειωθούν οι έντονες διακυμάνσεις και να εξομαλυνθεί η ροή των τιμών. Οι μετρήσεις ταχύτητας που επιλέχθηκαν στη συγκεκριμένη ανάλυση είναι αυτές που προέρχονται από το GPS, καθώς θεωρήθηκαν ακριβέστερες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες του διαγνωστικού συστήματος.
Επόμενο βήμα αποτελεί η απόρριψη οποιασδήποτε τιμής ταχύτητας μικρότερης των 2 km/h, καθώς τέτοιες τιμές θεωρούνται ενδεικτικές ακινησίας του οχήματος (μηδενική ταχύτητα). Στη συνέχεια επιλέγονται μόνο τα σημεία όπου η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη του μηδενός, δημιουργώντας έτσι ένα σύνολο δεδομένων ταχύτητας «χωρίς στάση», το οποίο αντιπροσωπεύει αποκλειστικά την κίνηση του οχήματος.
Ακολουθεί ο υπολογισμός της επιτάχυνσης και της επιβράδυνσης, καθώς και των μέγιστων τιμών αυτών ανά φάση — δηλαδή μεταξύ δύο διαδοχικών στάσεων (0 km/h). Τέλος, υπολογίζεται το ποσοστό (%) του χρόνου που το όχημα ήταν σε στάση και σε κίνηση, όπως επίσης οι μέσες τιμές ταχύτητας, ταχύτητας χωρίς στάση, επιτάχυνσης και επιβράδυνσης.

Ανάλυση των δεδομένων

Μετά από την ανάλυση των δεδομένων δημιουργείται ο παρακάτω πίνακας με όλα τα δεδομένα συγκεντρωτικά. Στον πίνακα αυτόν θα δούμε τις τιμές κάθε εβδομάδας μετρήσεων για τους τρεις τρόπους οδήγησης με τις δυο καταστάσεις του οχήματος μας. Πιο αναλυτικά οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν είναι μέση ταχύτητα (km/h) , η μέση ταχύτητα «χωρίς στάση» (km/h) , η μέση επιτάχυνση (m/s^2), η μέση επιβράδυνση (m/s^2), η μέση εκπομπή ρίπων CO_2 (g/km), η μέση ροή καυσίμου (cc/min) και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (kwh).

	Μέση Ταχ. (km/h)	Μέση Ταχ. Χωρις Στ. (km/h)	Μέση Επιτ. (m/s^2)	Μέση Επιβρ.(m/s^2)	μέση ρίποι (g/km)	μέση ροή (cc/min)	κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (kwh)	κατανάλωση (l)
οικονομική οδήγηση με φορτισμένο								
Δευτέρα	26,6	33,87	0,27	-0,3	0	0	5,16	0
Τρίτη	25,77	34,96	0,27	-0,31	0,06	0	4,2	0
Τετάρτη	26,65	33,64	0,24	-0,3	0	0	3,94	0
Πέμπτη	21,72	29,16	0,24	-0,26	0	0	7,39	0
Παρασκευή	22,25	29,35	0,17	-0,18	0	0	3,81	0
οικονομική οδήγηση αφόρτιστο								
Δευτέρα	27,31	34,41	0,3	-0,33	62,27	47,9	1,97	2,34
Τρίτη	24,73	31,39	0,22	-0,25	42,52	40,98	1,93	2,35
Τετάρτη	23,41	30,4	0,23	-0,28	45,94	42,77	1,93	2,37
Πέμπτη	24,99	31,39	0,27	-0,33	59,78	39,17	1,89	2,02
Παρασκευή	25,06	31,38	0,27	-0,33	59,78	39,17	1,89	2,02
οδήγηση με την ροή φορτισμένο								
Δευτέρα	24,09	32,16	0,31	-0,36	0	0	4,57	0
Τρίτη	22,25	30,26	0,3	-0,35	0	0	4,57	0,13
Τετάρτη	18,49	25,59	0,24	-0,31	0	0	4,32	0
Πέμπτη	20,81	29,4	0,3	-0,35	0	0	6	0
Παρασκευή	25,83	34,36	0,31	-0,4	0	0	8,14	0
οδήγηση με την ροή αφόρτιστο								
Δευτέρα	27,38	36,62	0,34	-0,37	66,77	49,73	0	2,34
Τρίτη	28,07	36,24	0,35	-0,41	70,89	49,11	0	2,26
Τετάρτη	22,89	36,53	0,39	-0,43	88,03	47,34	0,04	2,71
Πέμπτη	30,45	39,86	0,38	-0,41	73,71	51,65	0,17	2,21
Παρασκευή	31,44	39,6	0,42	-0,48	60,9	49,17	1,97	2,21
επιθετική οδήγηση φορτισμένο								
Δευτέρα	27,55	37,94	0,4	-0,43	27,59	15,61	6,08	0
Τρίτη	30,04	41,63	0,51	-0,54	34,25	19,55	5,5	0,88
Τετάρτη	26,44	35,84	0,4	-0,43	27,37	15,05	5,54	0,23
Πέμπτη	23,63	32,05	0,43	-0,51	7,22	3,77	5,54	0,23
Παρασκευή	23,84	34,66	0,42	-0,53	3,75	2,42	6,08	0
επιθετική οδήγηση με αφόρτιστο								
Δευτέρα	28,34	37,12	0,42	-0,48	28,21	37,78	2,01	1,78
Τρίτη	28,27	36,79	0,43	-0,49	100,21	58,75	1,85	2,72

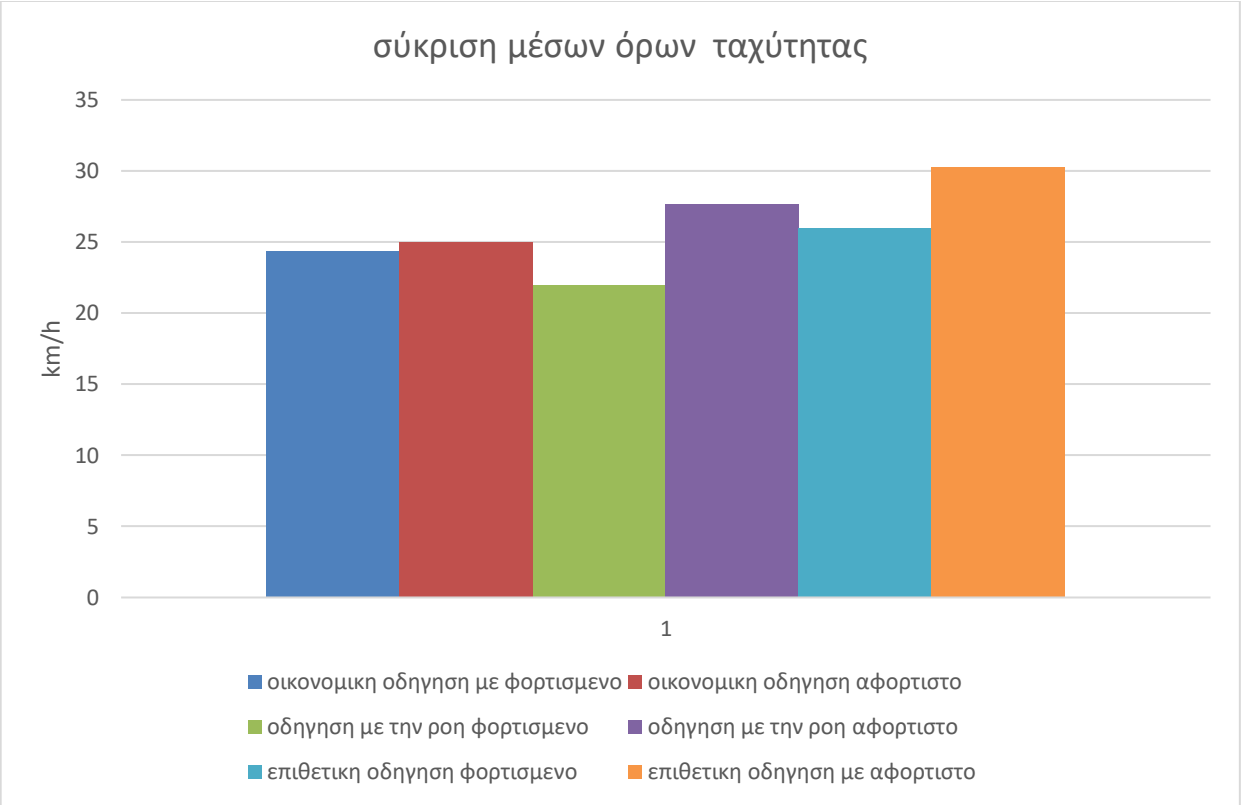
Τετάρτη	33,22	43,77	0,58	-0,55	148,21	80,94	1,93	3,17
Πέμπτη	29,39	37,62	0,48	-0,51	116,1	65,15	1,93	2,88
Παρασκευή	33,01	42,25	0,51	-0,54	127,36	73,96	2,01	2,96

Πίνακας 3 : Δεδομένα κάθε ημέρας της εβδομάδας αν τρόπο οδήγησης και κατάσταση οχήματος

Στην συνέχεια ακολουθεί ο παρακάτω πίνακας

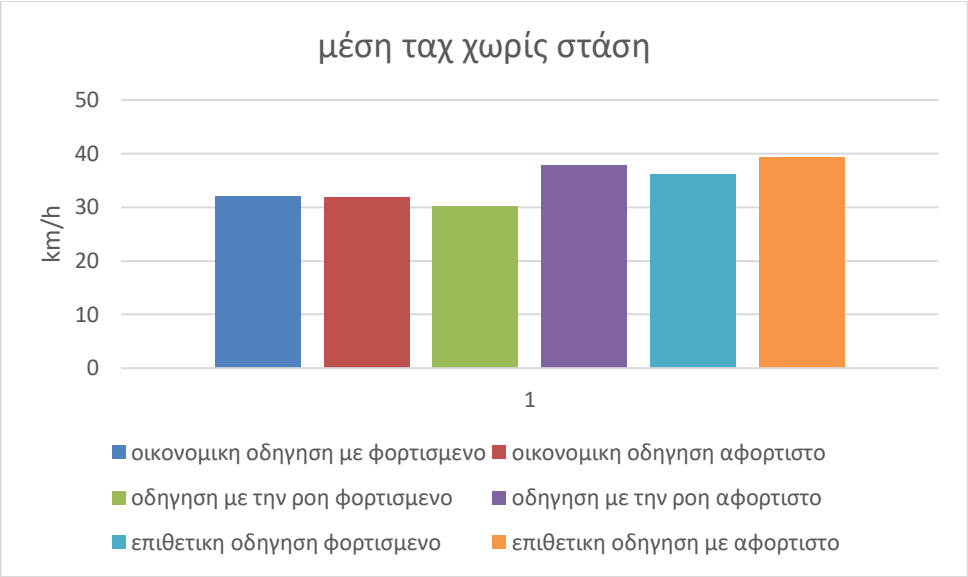
Μέση Ταχ. (km/h)	Μέση Ταχ. Χωρίς Στ. (km/h)	Μέση Επιτ. (m/s^2)	Μέση Επιβρ.(m/s^2)	μέση ρίποι (g/km)	μέση ροή (cc/min)	κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (kwh)	κατανάλωση (l)
οικονομική οδήγηση με φορτισμένο							
24,3686	31,97351	0,229296	-0,25953	0,012973	0	4,9	0
οικονομική οδήγηση αφόρτιστο							
25,03	31,74217	0,257065	-0,30611	53,68331	41,94606	1,91	2,22
οδήγηση με την ροή φορτισμένο							
22,00376	30,07412	0,290202	-0,35027	0	0	5,7575	0,026
οδήγηση με την ροή αφόρτιστο							
27,67112	37,69525	0,376706	-0,41811	73,0263	49,26844	0,545	2,346
επιθετική οδήγηση φορτισμένο							
25,97216	36,19042	0,427497	-0,48252	19,4042	10,90967	5,665	0,268
επιθετική οδήγηση με αφόρτιστο							
30,26561	39,28939	0,478834	-0,51648	101,3179	62,24579	1,93	2,702

Πίνακας 4: μέσοι όροι των τιμών για κάθε εβδομάδα και για κάθε κατάσταση



Διάγραμμα 6: Σύγκριση μέσων όρων ταχύτητας

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται μια αναλυτική σύγκριση των μέσων όρων των ταχυτήτων για κάθε στυλ οδήγησης και κατάστασης του οχήματος. Παρατηρείται ότι η ταχύτητά αυξάνεται περισσότερο στην επιθετική οδήγηση με το όχημα αφόρτιστο. Επίσης θα πρέπει να σχολιάσουμε το γεγονός ότι δεν υπάρχει μεγάλη διαφοροποιήσει στις τιμές την οικονομικής φορτισμένο - αφόρτιστο αλλά παρατηρούμε την μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των τιμών για την οδήγηση με την ροή της κυκλοφορίας σε σχέση με τις υπόλοιπές τιμές. Αυτό αιτιολογείται με το γεγονός ότι κατά την συλλογή των δεδομένων ξεκίνησε παράλληλα και η τουριστική περίοδος του νησιού με αποτέλεσμα να υπάρξει μια απότομη αύξηση της κυκλοφορίας οχημάτων.

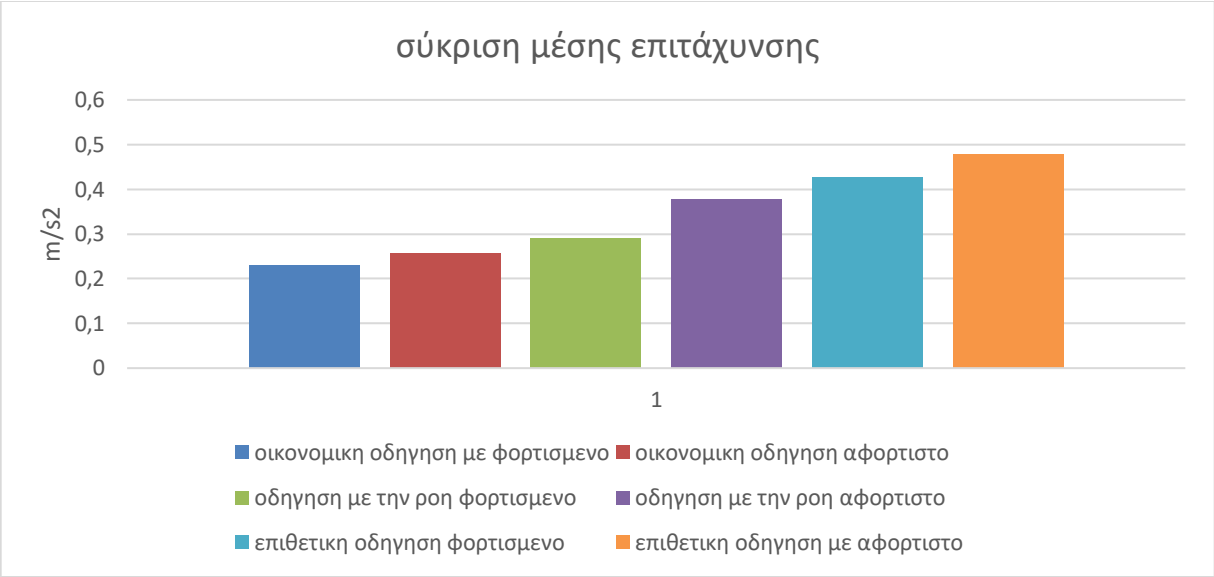


Διάγραμμα 7: Σύγκριση μέση ταχύτητα χωρίς στάση

Σε αυτόν το διάγραμμα βλέπουμε τις τιμές των ταχυτήτων σε συνεχόμενη κίνηση. Οι τιμές αυτές προκύπτουν αφαιρώντας τις μηδενικές τιμές ταχύτητας από τις μετρήσεις, έτσι δημιουργούμε μία συνεχόμενη εν κίνησή διαδρομή. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήσαμε την μέση ταχύτητα «χωρίς στάση».

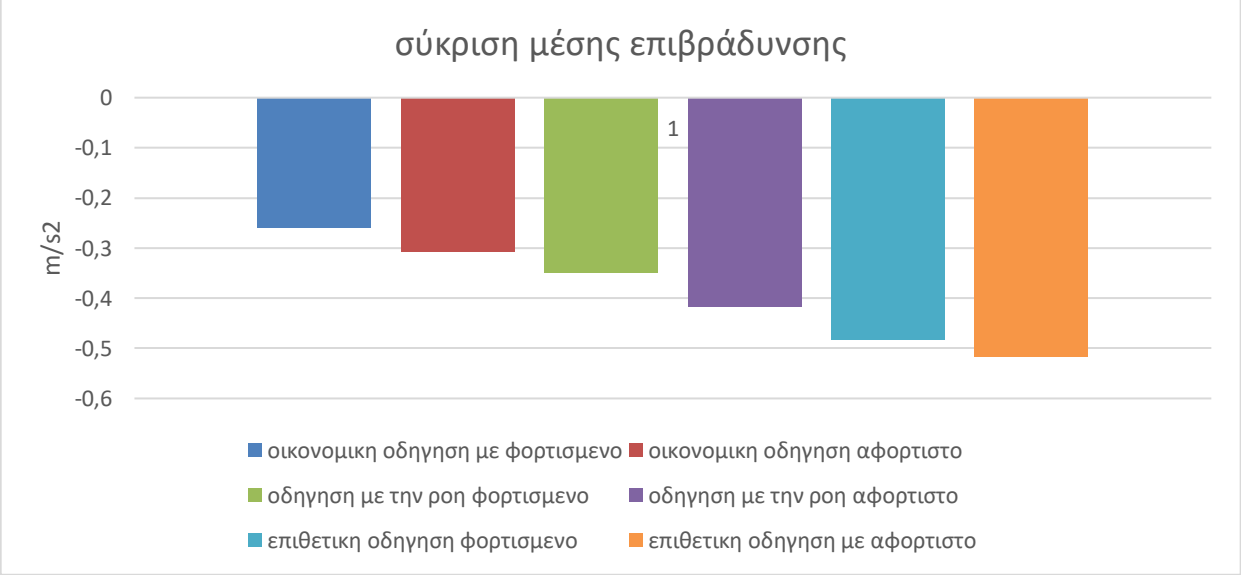
Η απεικόνιση των μέσων οριακών ταχυτήτων στο παραπάνω διάγραμμα καθιστά ευκολότερη τη μεταξύ τους σύγκριση. Όπως παρατηρείται, οι ταχύτητες είναι εμφανώς υψηλότερες σε σχέση με το προηγούμενο διάγραμμα, με την υψηλότερη να φτάνει τα 39.28(km/h) και την χαμηλότερη τα 30.07(km/h).

Ακολουθούν οι υπολογισμοί και οι γραφικές παραστάσεις των μέσων τιμών της επιτάχυνσης και της επιβράδυνσης. Οι τιμές αυτές προκύπτουν από τη διαφορά δύο διαδοχικών τιμών ταχύτητας. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε μέτρηση ταχύτητας αφαιρείται η επόμενη από την προηγούμενη στη σειρά των μετρήσεων, αφού πρώτα η ταχύτητα έχει μετατραπεί από km/h σε m/s. Εάν το αποτέλεσμα της αφαίρεσης είναι θετικό, τότε η κίνηση θεωρείται επιταχυνόμενη, ενώ εάν είναι αρνητικό, αντιστοιχεί σε επιβράδυνση.



Διάγραμμα 8: Σύγκριση μέσης επιτάχυνσης

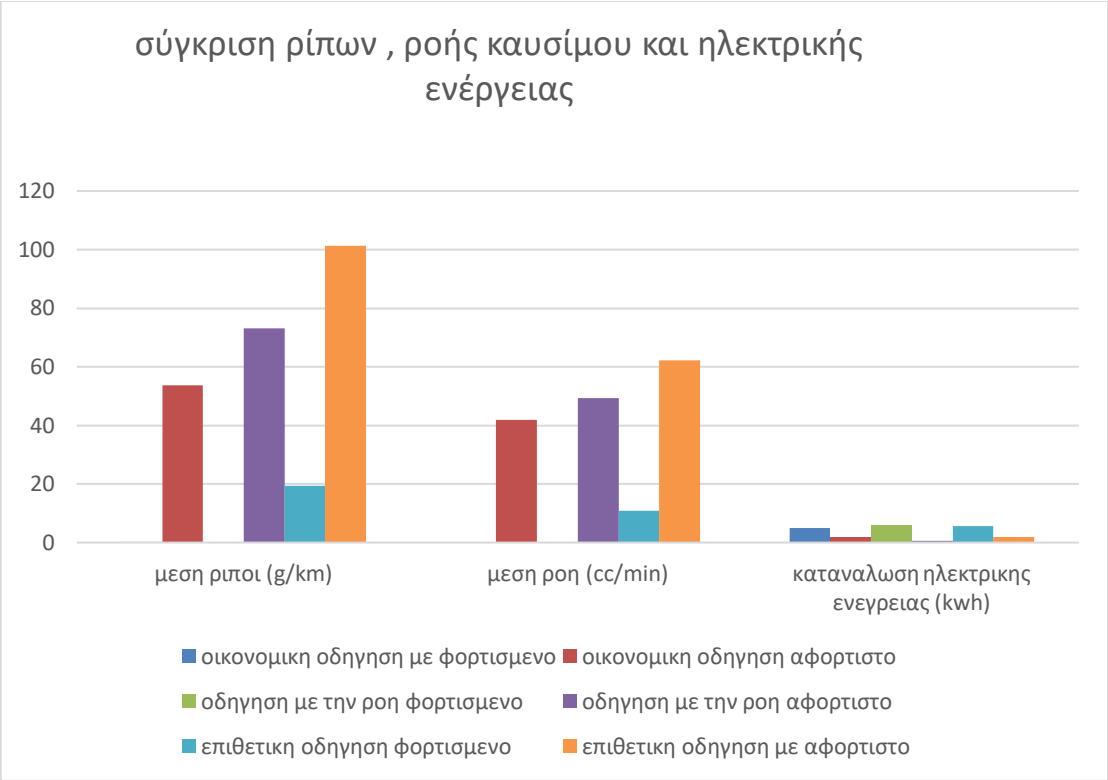
Από αυτό το διάγραμμα βλέπουμε μια σχετικά ομαλή αύξηση της επιτάχυνσης καθώς αλλάζει το στυλ οδήγησης. Επίσης βλέπουμε ότι δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά στις επιταχύνσεις όταν αλλάζει η κατάσταση από φορτισμένο σε αφόρτιστο με εξαίρεση στο οδικό στυλ με την ροή της κυκλοφορίας .



Διάγραμμα 9: Σύγκριση μέσης επιβράδυνσης

Και σε αυτό το διάγραμμα όπως και με το προηγούμενο βλέπουμε την ίδια ομαλότητα και στην επιβράδυνση.

Στο παρακάτω διάγραμμα θα δούμε συγκεντρωτικά την σύγκρισή των εκπομπών CO_2 με την ροή καυσίμου και την κατανάλωση ηλεκτρική ενέργειας

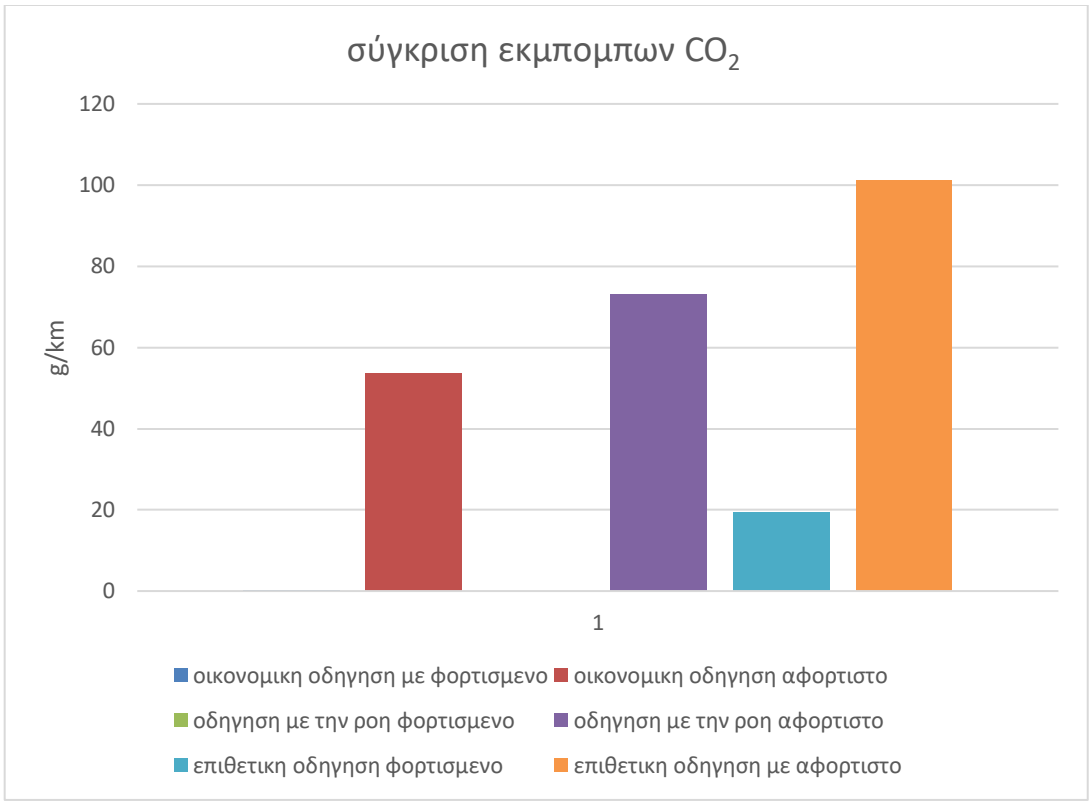


Διάγραμμα 10: Σύγκριση ρίπων, Ροής καυσίμου και Ηλεκτρικής ενέργειας

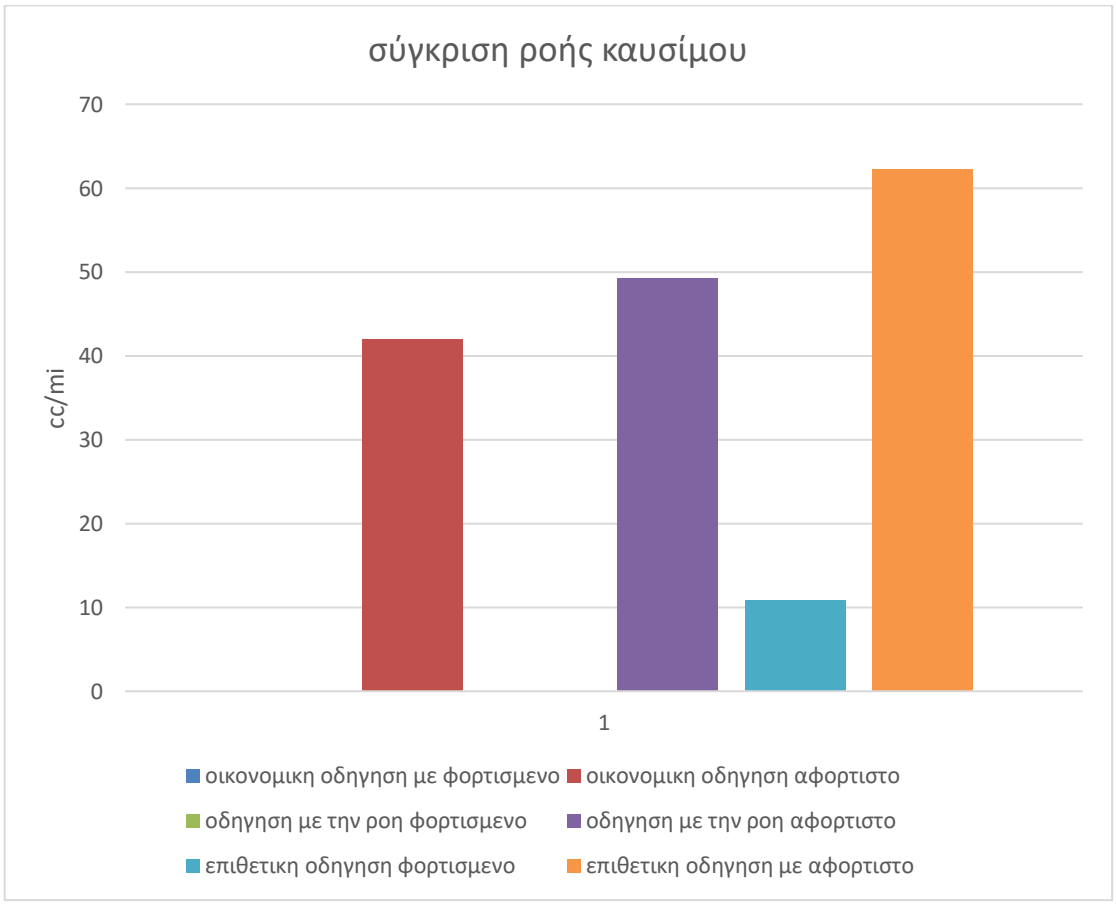
Από το παραπάνω διάγραμμα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι όταν ένα PHEV όχημα είναι φορτισμένο στο στυλ οικονομικής οδήγησης αλλά και στην οδήγηση με την ροή της κυκλοφορίας στην διαδρομή που ακολουθήσαμε για την πόλη του Ηρακλείου δεν έχει καθόλου παραγωγή ρίπων CO2 όπως και δεν υπάρχει καθόλου ροή καυσίμου στον θερμικό κινητήρα. Με απλά λόγια κινείται 100% με ηλεκτρική ισχύ.

Επίσης κάτι άλλο το οποίο συμπεραίνουμε από το παραπάνω διάγραμμα είναι ότι ακόμα και στην κατάσταση που το όχημα ήταν αφόρτιστο στις διαδρομές κατά την επιβράδυνση ανακτούσε ενέργεια που μετά την αξιοποιούσε σε κίνηση οπού με ένα συμβατικό όχημα αυτή η κινητική ενέργεια θα πήγαινε χαμένη το PHEV μας την επιστρέφει και κινούμαστε ηλεκτρικά μειώνοντας έτσι τους εκπεμπόμενους ρίπους CO_2.

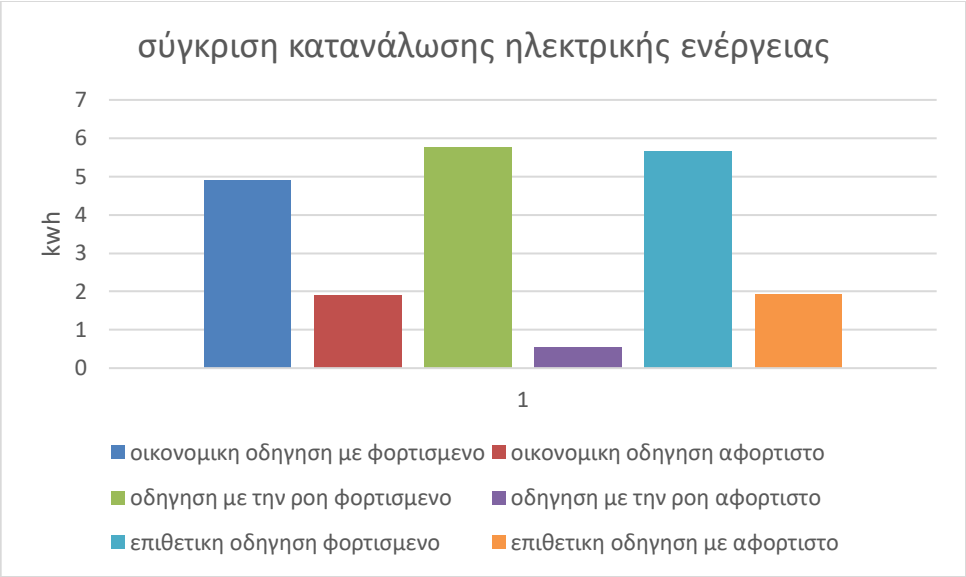
Πιο αναλυτικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα των ρίπων, της ροής καυσίμου και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.



Διάγραμμα 12: Σύγκριση εκπομπών CO_2



Διάγραμμα 13: Σύγκριση ροής καυσίμου

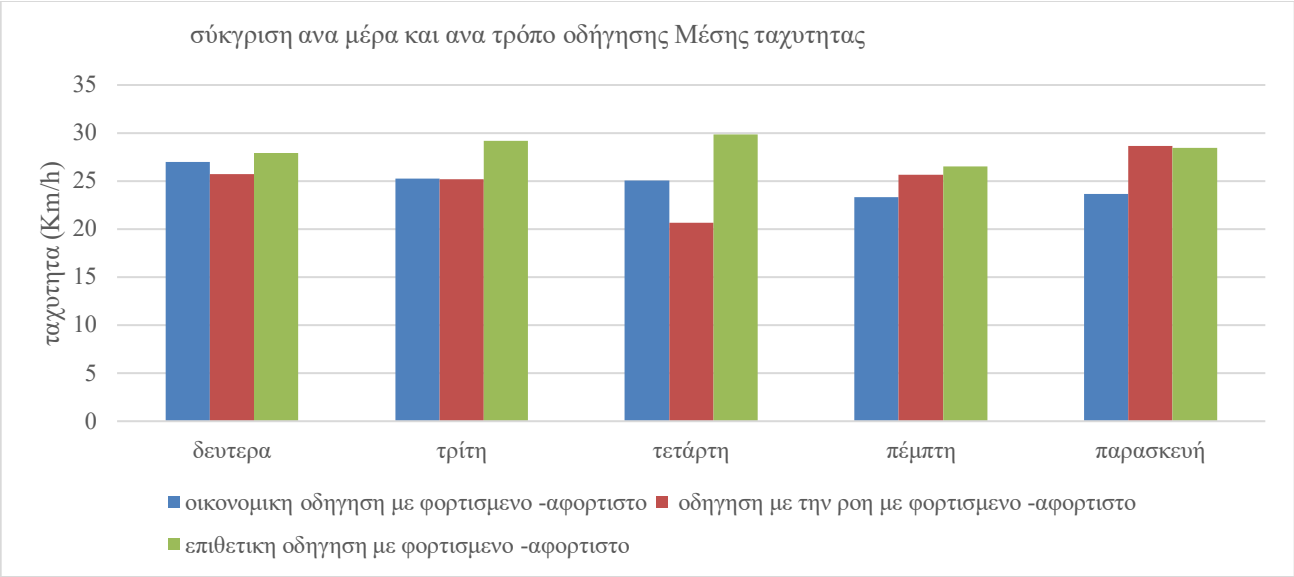


Διάγραμμα 14: Σύγκριση κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας

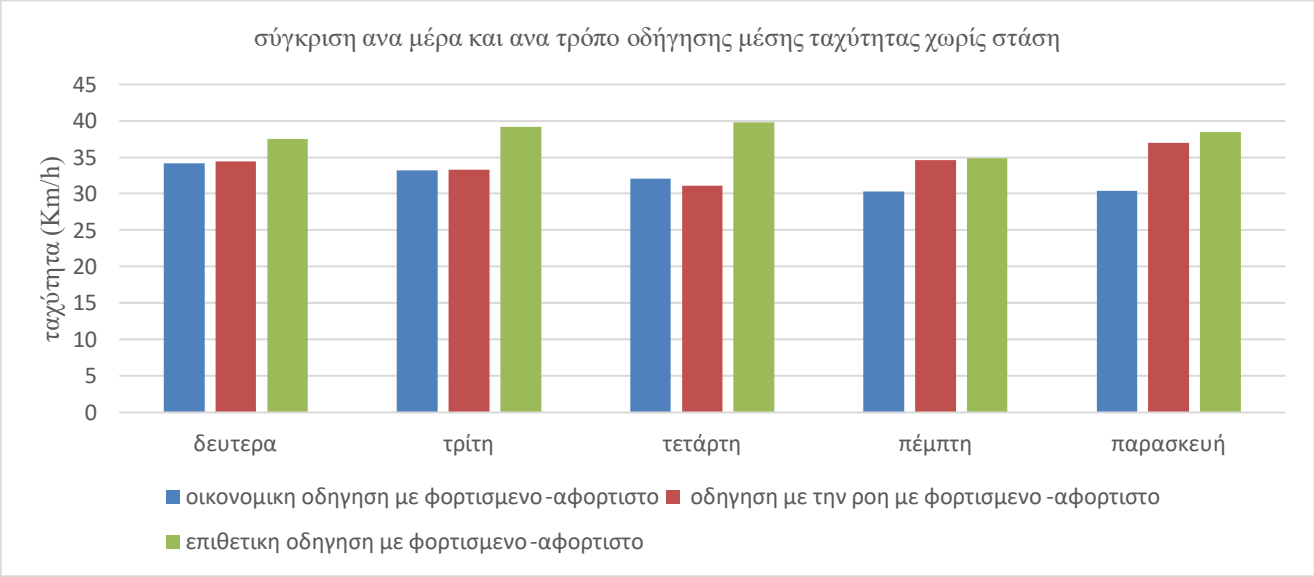
Στον παρακάτω πίνακα που θα ακολουθήσει θα δούμε τους μέσους όρους των τιμών της ταχύτητας ,της ταχύτητας χωρίς στάση , της επιτάχυνσης και της επιβράδυνσης ανά τρόπο οδήγησης και τα επιμέρους διαγράμματα

	Μέση Ταχ. (km/h)	Μέση Ταχ. Χωρις Στ. (km/h)	Μέση Επιτ. (m/s^2)	Μέση Επιβρ.(m/s^2)
	οικονομική οδήγηση με φορτισμένο -αφόρτιστο			
Δευτέρα	26.955	34.14	0.285	-0.315
Τρίτη	25.25	33.175	0.245	-0.28
Τετάρτη	25.03	32.02	0.235	-0.29
Πέμπτη	23.355	30.275	0.255	-0.295
Παρασκευή	23.655	30.365	0.22	-0.255
	οδήγηση με την ροή με φορτισμένο -αφόρτιστό			
Δευτέρα	25.735	34.39	0.325	-0.365
Τρίτη	25.16	33.25	0.325	-0.38
Τετάρτη	20.69	31.06	0.315	-0.37
Πέμπτη	25.63	34.63	0.34	-0.38
Παρασκευή	28.635	36.98	0.365	-0.44
	επιθετική οδήγηση με φορτισμένο - αφόρτιστο			
Δευτέρα	27.945	37.53	0.41	-0.455
Τρίτη	29.155	39.21	0.47	-0.515
Τετάρτη	29.83	39.805	0.49	-0.49
Πέμπτη	26.51	34.835	0.455	-0.51
Παρασκευή	28.425	38.455	0.465	-0.535

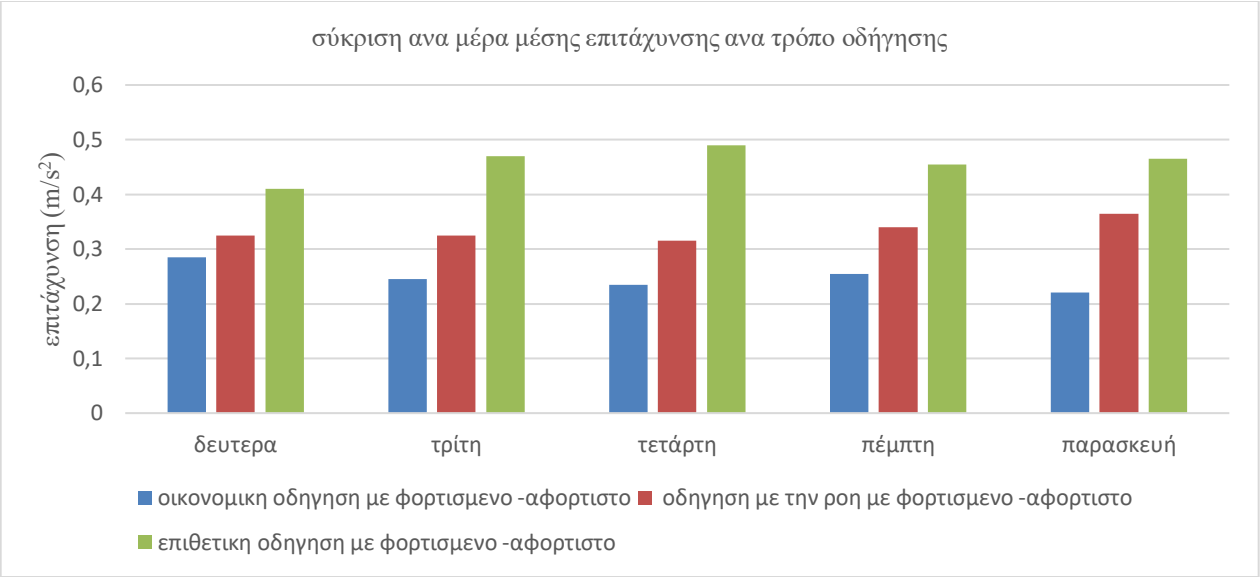
Πίνακάς 5: Πίνακας δεδομένων μέσων τιμών ανά ημέρα και προφίλ οδήγησης



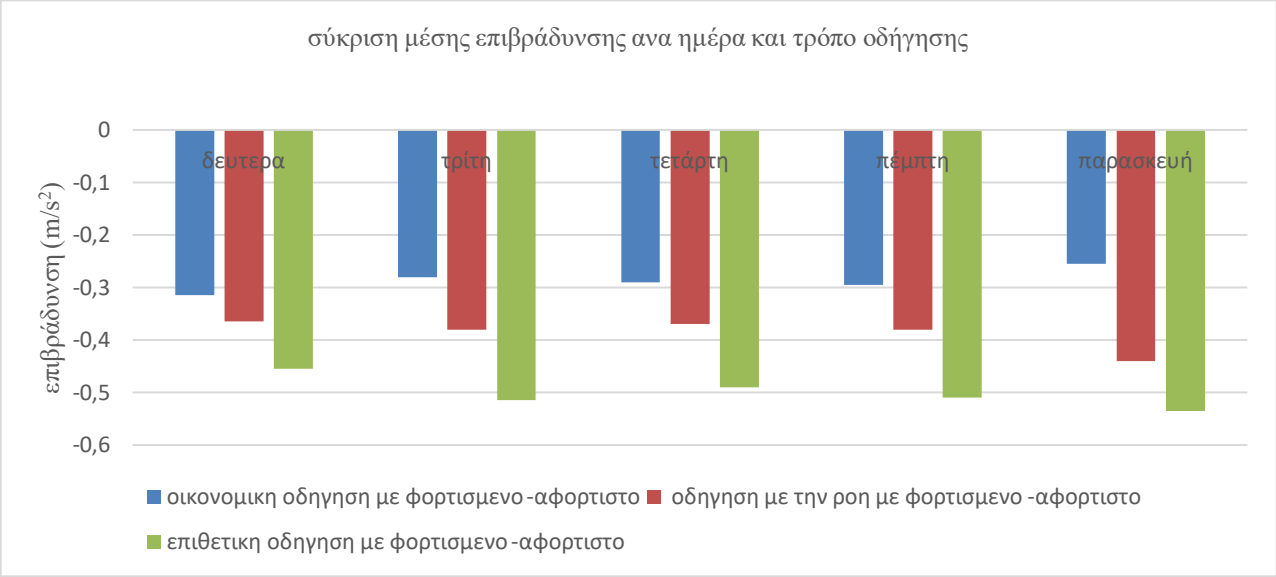
Διάγραμμα 15: Σύγκριση μέσων ταχυτήτων



Διάγραμμα 16: Σύγκριση μέσων ταχυτήτων χωρίς στάση



Διάγραμμα 17: Σύγκριση μέσης επιτάχυνσης

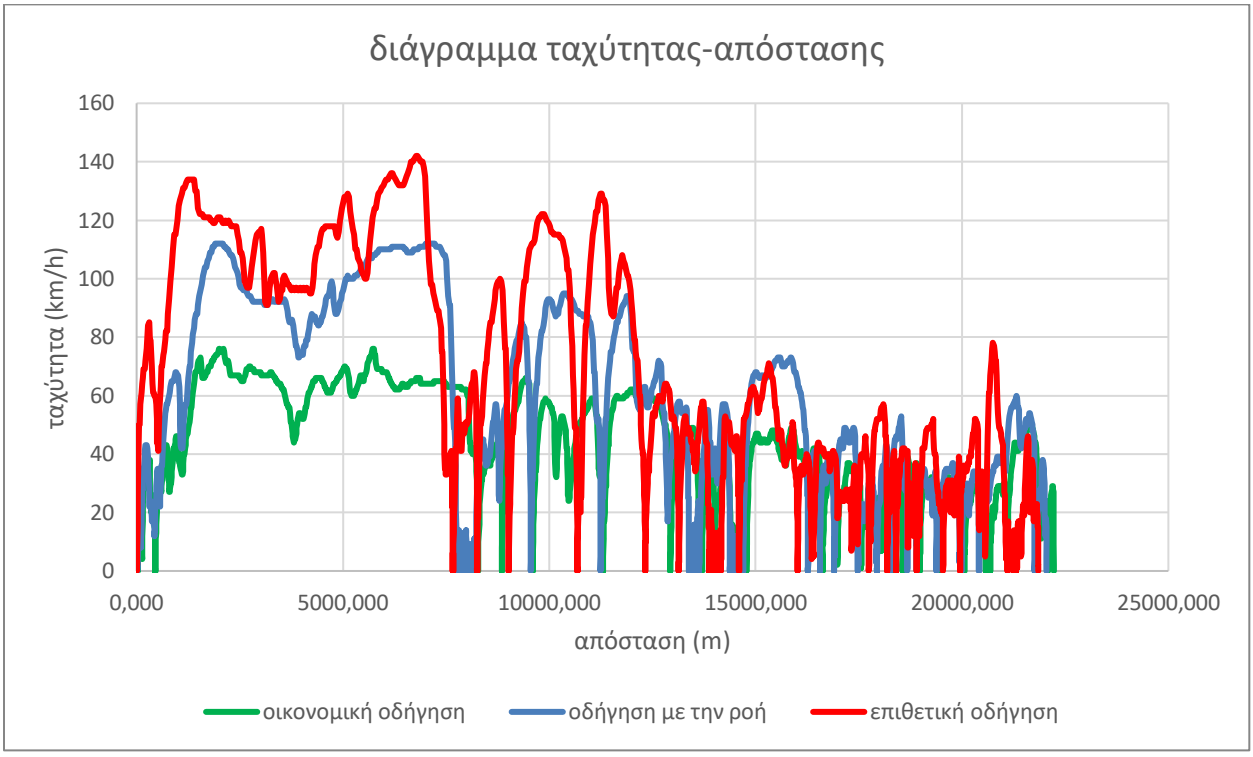


Διάγραμμα 18: Σύγκριση μέσης επιβράδυνσης

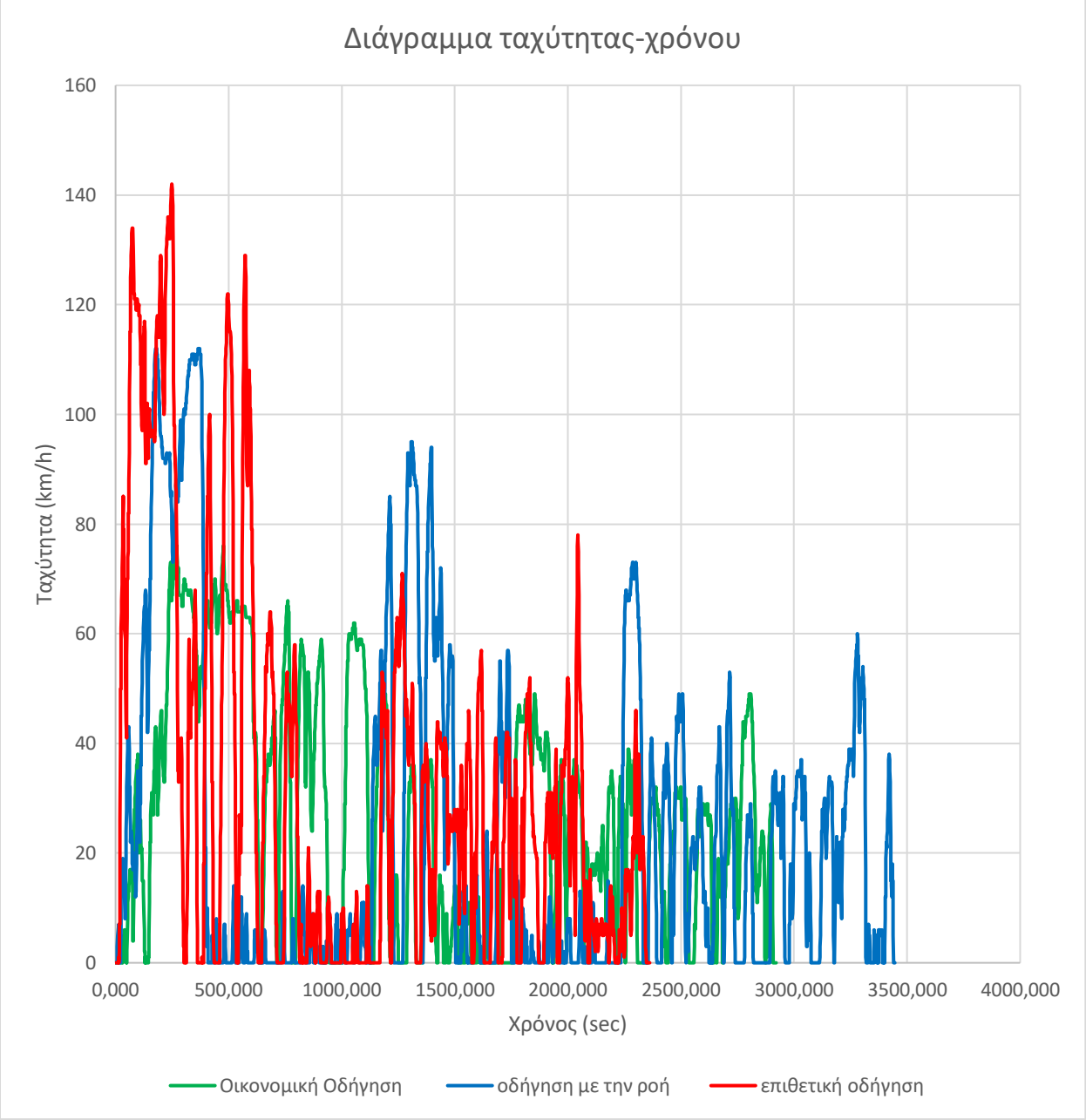
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε κάτι που περιμέναμε, δηλαδή ότι οι τιμές των επιταχύνσεων και των επιβραδύνσεων όσο αλλάζει το προφίλ οδήγησης αλλάζουν και αυτές και αυξάνονται όσο πηγαίνουμε από την οικονομική οδήγηση στην οδήγηση με την ροή και στην επιθετική.
Το ίδιο όμως δεν παρατηρούμε στις τιμές της ταχύτητας. Κυρίως στις τιμές της οικονομικής με την οδήγηση με την ροή. Οι τιμές της επιθετικής οδήγησης παραμένουν ως αναμενόμενο υψηλότερες από τα άλλα προφίλ οδήγησης με μια μικρής απόκλιση στο διάγραμμα 15 όπου η τιμή της οδήγησης με την ροή είναι ελαφρός μεγαλύτερη από την τιμή της επιθετικής οδήγησης. Αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί σε δύο παράγοντες. Ο ένας από αυτούς είναι οι μοναδικές συνθήκες οδήγησης στην πόλη του Ηρακλείου, μην ξεχνάμε ότι η λήψη των μετρήσεων έγιναν παράλληλα με το άνοιγμα της θερινής περιόδου που σημαίνει ραγδαία

αύξηση στον όγκο των οχημάτων που κυκλοφορούν. Ο δεύτερος παράγοντας είναι ο όγκος των δεδομένων προς ανάλυση. Εάν τα δεδομένα μας ήταν περισσότερα αυτή η διαφοροποίηση να μην υπήρχε .

Παρακάτω θα παρατεθούν δύο ενδεικτικά διαγράμματα που δείχνου τα προφίλ οδήγησης



Διάγραμμα 19: Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-απόστασης των προφίλ οδήγησης

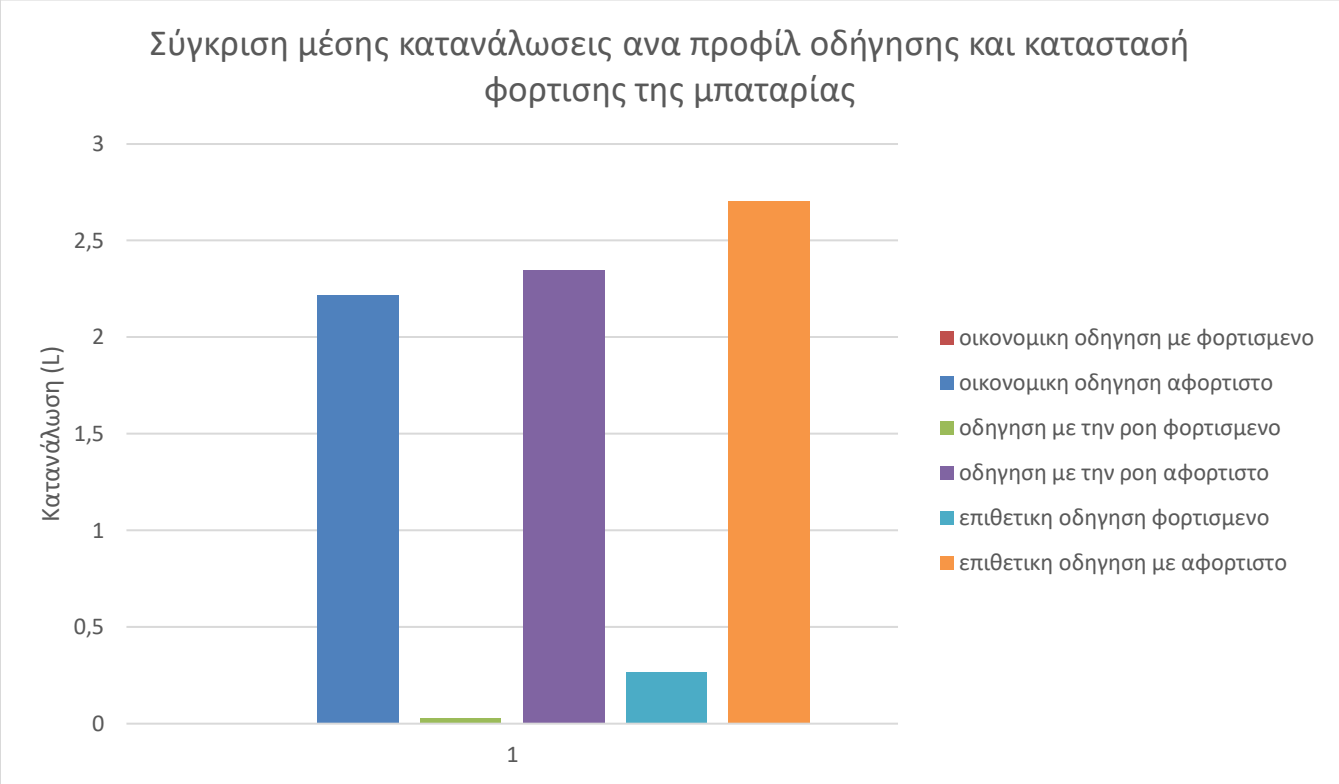


Διάγραμμα 20: Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου των προφίλ οδήγησης

Από τα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε ότι με την αλλαγή στο προφίλ οδήγησης για την ίδια απόσταση έχουμε μεγαλύτερες ταχύτητες όσο προχωράμε από την οικονομική στην οδήγηση με την ροή και στην επιθετική, καθώς και ότι ο απαιτούμενος χρόνος της διαδρομής μειώνετε αρκετά. Αποτελέσματα που τα περιμέναμε

Καταναλώσεις καυσίμων

Παρακάτω θα δούμε μια σύγκριση της καταναλώσεις καυσίμου.



Διάγραμμα 21:Συγκριτικό διάγραμμα καταναλώσεων ανά προφίλ οδήγησης και κατάσταση φόρτισης μπαταρίας

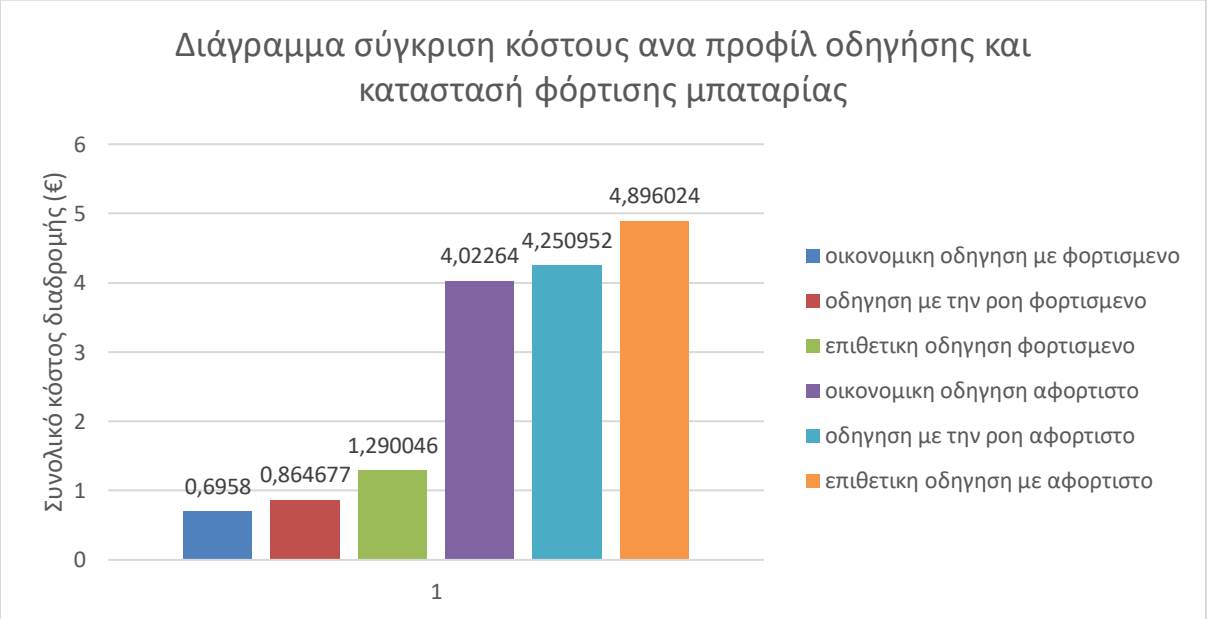
Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι όταν το όχημα δεν ήταν φορτισμένο υπάρχει κατανάλωση καυσίμου και ότι την μεγαλύτερη την έχουμε στο προφίλ επιθετικής οδήγησης, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο. Επίσης βλέπουμε ότι όταν το όχημα ήταν φορτισμένο και οδηγούνταν επιθετικά υπάρχει και πάλι μια μικρή κατανάλωση ενώ στην βλέπουμε επίσης στην οδήγηση με την ροή και φορτισμένο ότι υπάρχει μια απειροελάχιστη κατανάλωση για την διαδρομή.

Παρακάτω ακολουθεί ένας πίνακας με τα μέση κόστη ανά διαδρομή και τα συγκριτικά διαγράμματα .

Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (€)	Κόστος Καυσίμου(€)	Συνολικό Κόστος(€)
οικονομική οδήγηση με φορτισμένο		
0,6958	0	0,6958
οικονομική οδήγηση αφόρτιστο		
0	4,02264	4,02264
οδήγηση με την ροή φορτισμένο		
0,817565	0,047112	0,864677
οδήγηση με την ροή αφόρτιστο		
0	4,250952	4,250952
επιθετική οδήγηση φορτισμένο		
0,80443	0,485616	1,290046
επιθετική οδήγηση με αφόρτιστο		
0	4,896024	4,896024

Πίνακας 6: Δεδομένα κόστος ανά διαδρομή

Για τα παραπάνω θεωρήσαμε 0,142€/kwh και 1,812€/L



Διάγραμμα 22: Διάγραμμα σύγκριση κόστους ανά προφίλ οδήγησης και κατάστασή φόρτισης μπαταρίας

Από αυτό το διάγραμμα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το μεγαλύτερο κόστος ανά διαδρομή το είχαμε όταν είχαμε στην επιθετική οδήγηση με την μπαταρία αφόρτιστη και το χαμηλότερο κόστος με την οικονομική οδήγηση και την

μπαταρία φορτισμένη.

Συμπεράσματα

Το πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας ανέδειξε σημαντικές παρατηρήσεις σχετικά με τη λειτουργία και την αποδοτικότητα ενός Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) σε πραγματικές συνθήκες οδήγησης. Μέσω της καταγραφής δεδομένων από τον εγκέφαλο του οχήματος (ECU) με χρήση αντάπτορα OBD-II και εξειδικευμένων εφαρμογών (Torque, Torque Pro), συγκεντρώθηκαν πληροφορίες για την ταχύτητα, την επιτάχυνση και επιβράδυνση, την κατανάλωση καυσίμου, τις εκπομπές CO_2, καθώς και την κατανάλωση και ανάκτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Από την ανάλυση των δεδομένων προέκυψε ότι η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά του οχήματος. Όταν η μπαταρία ήταν πλήρως φορτισμένη, το όχημα κινήθηκε αμιγώς ηλεκτρικά για σημαντικό τμήμα της διαδρομής, γεγονός που οδήγησε σε μηδενικές εκπομπές CO_2 και μηδενική κατανάλωση καυσίμου. Αυτό αποδεικνύει τη σημασία της τακτικής φόρτισης ενός PHEV, καθώς η αξιοποίηση του ηλεκτροκινητήρα σε αστικές συνθήκες μειώνει δραστικά τόσο την κατανάλωση καυσίμου όσο και τις εκπομπές. Αντίθετα, όταν η μπαταρία ήταν αφόρτιστη, το όχημα στηρίχθηκε στον κινητήρα εσωτερικής καύσης, με αποτέλεσμα την εμφάνιση εκπομπών και κατανάλωσης καυσίμου. Ωστόσο, ακόμη και σε αυτή την περίπτωση, παρατηρήθηκε αξιοσημείωτη μείωση των εκπομπών σε σχέση με ένα αντίστοιχο συμβατικό όχημα, χάρη στην ανάκτηση ενέργειας κατά την επιβράδυνση και την επαναχρησιμοποίηση της μέσω ηλεκτρικής υποβοήθησης. Η διαδικασία αυτή οδήγησε σε βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης και μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Επιπλέον, η διαφοροποίηση του στυλ οδήγησης (οικονομικό, με ροή κυκλοφορίας, επιθετικό) επηρέασε άμεσα τα αποτελέσματα. Η οικονομική οδήγηση, ειδικά σε συνδυασμό με πλήρη φόρτιση, επέφερε τις καλύτερες επιδόσεις όσον αφορά τη μείωση των ρύπων και τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης. Αντίθετα, η πιο "επιθετική" οδήγηση αύξησε την κατανάλωση και τις εκπομπές, αν και σε χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με ένα αμιγώς θερμικό όχημα.

Συνολικά, το πειραματικό μέρος επιβεβαίωσε ότι τα PHEV μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη μείωση των εκπομπών στις αστικές μετακινήσεις, υπό την προϋπόθεση ότι γίνεται συστηματική φόρτιση της μπαταρίας και υιοθετείται ένα πιο ήπιο στυλ οδήγησης. Παράλληλα, αναδείχθηκε η σημασία της συλλογής δεδομένων σε πραγματικές συνθήκες, καθώς τα αποτελέσματα αποκλίνουν από τα εργαστηριακά σενάρια, αποτυπώνοντας πιο πιστά την καθημερινή χρήση. Η διαπίστωση αυτή υπογραμμίζει την ανάγκη συνδυασμού θεωρητικών υπολογισμών με πειραματικές μετρήσεις, ώστε να εξασφαλίζεται μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής απόδοσης των υβριδικών και ηλεκτρικών

οχημάτων.

Επίλογος

Το πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας ανέδειξε σημαντικές παρατηρήσεις σχετικά με τη λειτουργία και την αποδοτικότητα ενός Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) σε πραγματικές συνθήκες οδήγησης. Μέσω της καταγραφής δεδομένων από τον εγκέφαλο του οχήματος (ECU) με χρήση αντάπτορα OBD-II και εξειδικευμένων εφαρμογών (Torque Pro), συγκεντρώθηκαν πληροφορίες για την ταχύτητα, την επιτάχυνση και επιβράδυνση, την κατανάλωση καυσίμου, τις εκπομπές CO_2, καθώς και την κατανάλωση και ανάκτηση ηλεκτρικής ενέργειας.
Από τα διαγράμματα και τα δεδομένα που προέκυψαν, αποδείχθηκε ότι όταν το PHEV είναι πλήρως φορτισμένο και κινείται σε στυλ οικονομικής οδήγησης ή με τη ροή της κυκλοφορίας, μπορεί να καλύψει αποστάσεις αποκλειστικά με ηλεκτρική ισχύ, χωρίς παραγωγή ρύπων CO_2 και χωρίς κατανάλωση καυσίμου. Ακόμα και όταν το όχημα είναι αφόρτιστο, η ανάκτηση ενέργειας κατά την επιβράδυνση συνέβαλε στην ηλεκτρική υποβοήθηση της κίνησης, μειώνοντας έτσι τις εκπομπές. Συνολικά, το πείραμα επιβεβαίωσε ότι τα PHEV μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη μείωση των εκπομπών στις αστικές μετακινήσεις, υπό την προϋπόθεση ότι γίνεται συστηματική φόρτιση της μπαταρίας και υιοθετείται ένα πιο ήπιο στυλ οδήγησης. Παράλληλα, αναδείχθηκε η σημασία της συλλογής δεδομένων σε πραγματικές συνθήκες, καθώς τα αποτελέσματα αποκλίνουν από τα εργαστηριακά σενάρια, αποτυπώνοντας πιο πιστά την καθημερινή χρήση. Η διαπίστωση αυτή υπογραμμίζει την ανάγκη συνδυασμού θεωρητικών υπολογισμών με πειραματικές μετρήσεις, ώστε να εξασφαλίζεται μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής απόδοσης των υβριδικών και ηλεκτρικών οχημάτων

Βιβλιογραφία

- Euro 7: Έκδοση νέων κανόνων από το Συμβούλιο σχετικά με τα όρια εκπομπών για τα αυτοκίνητα, τα ημιφορτηγά και τα φορτηγά - Consilium

- https://www.consilium.europa.eu/el/press/press-releases/2024/04/12/euro-7-council-adopts-new-rules-on-emission-limits-for- cars-vans-and-trucks/

- theicct.org
- https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/03/ID-116-%E2%80%93-Euro-7-standard_final.pdf

- Κλίμα - Consilium
- https://www.consilium.europa.eu/el/topics/climate/

- U-turn on EU’s Emissions Trading System for road transport and buildings carries huge environmental, social and economic price tag - Carbon Market Watch
  https://carbonmarketwatch.org/2025/01/24/u-turn-on-eus-emissions-trading-system-for-road-transport-and-buildings-carries- huge-environmental-social-and-economic-price-tag/

  - What is the EU CO2 target for 2025
- https://autovista24.autovistagroup.com/news/what-is-the-eu-co2-target-for-2025/

- CO2 emissions performance of new passenger cars in Europe
- https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/co2-performance-of-new-passenger

- Transport and mobility | European Environment Agency's home page

- https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/transport-and-mobility
    - Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure - Wikipedia
- https://en.wikipedia.org/wiki/Worldwide_Harmonised_Light_Vehicles_Test_Procedure
- Adamas Intelligence. (2023). Average PHEV battery capacity rises 27% YoY. Retrieved from https://www.adamasintel.com
- BloombergNEF. (2023). Tracking the revival of plug-in hybrids. Retrieved from https://about.bnef.com
- International Council on Clean Transportation (ICCT). (2022). Real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles in the U.S. Retrieved from https://theicct.org
- Li, X. et al. (2024). Real-world performance of PHEV vehicles in China. arXiv:2405.07308.
- Panasonic Corp. (2025). Development plans for anode-free EV batteries. Reuters.
- Wikipedia. (2025). All-electric range. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/All-electric_range
- Xu, Y. et al. (2024). Battery degradation patterns in EVs and PHEVs. ScienceDirect.
- Heywood, J.B. (1988). Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill.
- Miller, R.H. (1947). Supercharged Engine Operation. SAE Technical Paper 1947-01-0326.
- Stone, R. (2012). Introduction to Internal Combustion Engines. Palgrave Macmillan.
- Pulkrabek, W.W. (2013). Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. Pearson.
- Ferguson, C.R., & Kirkpatrick, A.T. (2015). Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences. Wiley.
- Zhao, F. et al. (2010). Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development. Woodhead Publishing.
- Costa, M., & Catapano, F. (2018). Analysis of Miller Cycle for Advanced Gasoline Engines. Energy Procedia, 148, 632-639.

- Kobayashi, T. et al. (2020). Application of the Miller Cycle in Hybrid Powertrains. SAE Technical Paper 2020-01-1123.