



Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών

Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός

Πτυχιακή / Διπλωματική Εργασία

«Μελέτη του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της ηλεκτροκίνησης
στον τομέα των οδικών μεταφορών: Ανάλυση κύκλου ζωής και
σεναρίων εκπομπών των ηλεκτρικών οχημάτων»

Θωμάς Δερμοσόνογλου

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Ναταλία Λιώρα

Πάτρα, Ιούλιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Θωμά Δερμοσόνογλου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



«Μελέτη του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της ηλεκτροκίνησης
στον τομέα των οδικών μεταφορών: Ανάλυση κύκλου ζωής και
σεναρίων εκπομπών των ηλεκτρικών οχημάτων»

Θωμάς Δερμοσόνογλου

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Ναταλία Λιώρα

Μεταδιδακτορική ερευνήτρια ΑΠΘ &
ΕΑΠ

Συν-Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Ζωή Γαρείου

Μεταδιδακτορική ερευνήτρια ΕΑΠ

Πάτρα, Ιούλιος 2026

Στον πιο πολύτιμο, στον μοναδικό μου, στον γιό μου, στον Στεφανάκο μου...

Περίληψη

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία (ΔΕ) εξετάζει συγκριτικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα τριών τεχνολογιών που αφορούν στις οδικές μεταφορές, ήτοι οχημάτων με κινητήρες εσωτερικής καύσης (ICEVs), υβριδικών οχημάτων (HEVs) και ηλεκτρικών οχημάτων με μπαταρίες (BEVs). Για τη συγκριτική αξιολόγηση εφαρμόζεται η μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (AKZ ή Life Cycle Assessment – LCA). Η ανάλυση βασίζεται στα διεθνή πρότυπα ISO 14040, ISO 14044 και ενσωματώνει τρία ενεργειακά σενάρια – έτη αναφοράς για την Ελλάδα το 2026, το 2030 και το 2050, τα οποία αντανακλούν την πορεία απανθρακοποίησης του εθνικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η προσέγγιση που ακολουθείται είναι simplified, literature-based LCA, βασισμένη σε βιβλιογραφικά δεδομένα και επίσημους συντελεστές εκπομπών.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα ICEVs παρουσιάζουν το υψηλότερο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, κυρίως λόγω των εκπομπών καυσαερίων κατά τη χρήση. Τα HEVs εμφανίζουν βελτιωμένη περιβαλλοντική επίδοση σε σχέση με τα ICEVs, παραμένουν όμως εξαρτημένα από ορυκτά καύσιμα και, συνεπώς, δεν μπορούν να αποτελέσουν τη μακροπρόθεσμη τεχνολογική λύση για την πλήρη απανθρακοποίηση των οδικών μεταφορών. Αντιθέτως, τα BEVs εμφανίζουν σημαντικά μικρότερο αποτύπωμα κύκλου ζωής σε όλα τα σενάρια, με το συγκεκριμένο πλεονέκτημα να ενισχύεται όσο το ενεργειακό μίγμα βαίνει προς τη καθολική μετάβαση στην Πράσινη Ενέργεια.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το break-even distance, το οποίο εκφράζει την απόσταση στην οποία τα BEVs αντισταθμίζουν το υψηλότερο αρχικό αποτύπωμα παραγωγής τους, δηλαδή το σημείο ισότητας των σωρευτικών εκπομπών CO_{2e} μεταξύ BEV και συμβατικού οχήματος. Στο σενάριο για το 2026 το περιβαλλοντικό break-even (environmental break-even distance) επιτυγχάνεται εντός του κύκλου ζωής ενός τέτοιου οχήματος, στο 2030 μειώνεται αισθητά, ενώ στο 2050 σχεδόν εκμηδενίζεται, χάρη στην εκτεταμένη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Πράσινη Ενέργεια).

Τέλος, διατυπώνεται ένα σύνολο συγκεκριμένων προτάσεων και πολιτικών για την Ελλάδα, επικεντρωμένο σε στοχευμένα οικονομικά και θεσμικά μέτρα, στην ανάπτυξη υποδομών φόρτισης, στη σταδιακή ένταξη της ηλεκτροκίνησης στο ενεργειακό σύστημα και στην αξιοποίηση της κυκλικής οικονομίας. Η εργασία συμβάλλει στη συστηματική τεκμηρίωση

των περιβαλλοντικών ωφελειών της ηλεκτροκίνησης και στη διαμόρφωση πολιτικών για τη βιώσιμη μετάβαση του τομέα μεταφορών.

Η ανάλυση αφορά αποκλειστικά περιβαλλοντικό και όχι οικονομικό δείκτη εξισορρόπησης και δεν συνιστά αξιολόγηση συνολικού κόστους ιδιοκτησίας (TCO).

Λέξεις – Κλειδιά

Ανάλυση Κύκλου Ζωής, Ηλεκτρικά Οχήματα, Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα, Ενεργειακό Μίγμα Ελλάδας, Απανθρακοποίηση Μεταφορών, Break-Even Distance.

«Study of the environmental footprint of electric mobility in the road transport sector: Life cycle assessment and emission scenarios for electric vehicles»

Thomas Dermosonoglou

Abstract

This thesis provides a comparative analysis of the environmental footprint of three road transport technologies: internal combustion engine vehicles (ICEVs), hybrid vehicles (HEVs), and battery electric vehicles (BEVs). The Life Cycle Assessment (LCA) methodology is applied for the comparative evaluation. The analysis is based on the international standards ISO 14040, ISO 14044 and incorporates three energy scenarios—reference years for Greece in 2026, 2030, and 2050—which reflect the decarbonization trajectory of the national electricity generation system. The approach followed is a simplified, literature-based LCA, based on bibliographic data and official emission factors. The results show that ICEVs have the highest overall environmental footprint, mainly due to exhaust emissions during use. HEVs demonstrate improved environmental performance compared to ICEVs, but they remain dependent on fossil fuels and, therefore, cannot serve as the long-term technological solution for the complete decarbonization of road transport. In contrast, BEVs exhibit a significantly smaller life-cycle footprint across all scenarios, with this advantage becoming more pronounced as the energy mix shifts toward a comprehensive transition to Green Energy.

Of particular interest is the break-even distance, which represents the distance at which BEVs offset their higher initial production footprint—that is, the point at which the cumulative CO_{2e} emissions of a BEV and a conventional vehicle are equal. In the 2026 scenario, the environmental break-even distance is achieved within the life cycle of such a vehicle; in 2030 it is significantly reduced, while in 2050 it is virtually eliminated, thanks to the widespread adoption of Renewable Energy Sources (Green Energy).

Finally, a set of specific proposals and policies for Greece is formulated, focusing on targeted economic and institutional measures, the development of charging infrastructure, the gradual integration of electric mobility into the energy system, and the utilization of the circular economy. This study contributes to the systematic documentation of the environmental benefits of electric mobility and to the formulation of policies for the sustainable transition of the transportation sector.

The analysis focuses exclusively on environmental rather than economic balancing indicators and does not constitute a total cost of ownership (TCO) assessment.

Keywords

Life Cycle Analysis, Electric Vehicles, Environmental Footprint, Greece's Energy Mix, Transport Decarbonization, Break-Even Distance.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	v
Abstract	ix
Περιεχόμενα	xi
Κατάλογος Πινάκων	xv
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια.....	xvi
Κύρια σημεία της ΔΕ/Highlights.....	xvii
Συνεισφορά της ΔΕ.....	xviii
Πόστερ.....	xix
Άρθρο μορφής επιστημονικού περιοδικού.....	xx
Τίτλος	xx
Συγγραφέας	xx
Περίληψη.....	xx
1. Εισαγωγή.....	xxi
2. Μεθοδολογία.....	xxi
3. Αποτελέσματα.....	xxi
4. Συζήτηση.....	xxii
5. Συμπεράσματα	xxii
Βιβλιογραφία.....	xxiii
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Υπόβαθρο και σημασία του θέματος	3
1.2 Οδικές μεταφορές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις	5
1.3 Η μετάβαση στην ηλεκτροκίνηση και οι σύγχρονες προκλήσεις	6
1.4 Η δυναμική της ελληνικής ενεργειακής μετάβασης	8
1.5 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας	8
1.6 Ερευνητικά ερωτήματα και στόχοι	8
1.7 Δομή της εργασίας	9
2. Θεωρητικό πλαίσιο ηλεκτροκίνησης (η διεθνής και η Ελληνική προσέγγιση).....	10
2.1 Η κλιματική διάσταση των μεταφορών, οι τεχνολογίες κίνησης και τα βασικά χαρακτηριστικά των ICEV, των HEV και των BEV	11
2.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά τεχνολογία και η ηλεκτροκίνηση ως διεθνής στρατηγική απανθρακοποίησης	13
2.3 Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ): βασικές έννοιες, στάδια και εφαρμογή στις τεχνολογιών μεταφορών	15
2.4 Η συμβολή της παραγωγής οχήματος στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα.....	17
2.5 Η σημασία της μπαταρίας Li-ion στο αποτύπωμα των BEVs: διεθνής βιβλιογραφία	19
2.6 Ο ρόλος του ενεργειακού μίγματος στις εκπομπές χρήσης των BEVs.....	21
2.7 Το περιβαλλοντικό break-even distance στη διεθνή βιβλιογραφία	22
2.8 Κριτική αποτίμηση διεθνών μελετών LCA για ηλεκτρικά οχήματα και κενά έρευνας	24
2.9 Η εξέλιξη του ενεργειακού μίγματος στην Ελλάδα (ιστορικά στοιχεία).....	28

2.10 Απολιγνιτοποίηση και άνοδος ΑΠΕ: επιπτώσεις στις εκπομπές ηλεκτροπαραγωγής	31
2.11 Προβλέψεις για το 2026, 2030 και 2050 – εθνικοί και ευρωπαϊκοί στόχοι.....	34
2.12 Η ελληνική πραγματικότητα στις μετακινήσεις και η επίδρασή της στην ΑΚΖ	37
2.13 Επιπτώσεις του break-even distance στην Ελλάδα	39
2.14 Συμπερασματική αποτίμηση του ελληνικού πλαισίου.....	41
2.15 Τεκμηρίωση ερευνητικού κενού και ερευνητικά ερωτήματα	42
3. Μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA)	43
3.1 Μεθοδολογική προσέγγιση: simplified, literature-based LCA	43
3.2 Σκοπός και πεδίο εφαρμογής της μελέτης LCA	45
3.3 Λειτουργική μονάδα και μονάδα αναφοράς	45
3.4 Όρια συστήματος	46
3.5 Τεχνολογίες οχημάτων και βασικές υπολογιστικές παραδοχές	47
3.6 Δεδομένα κατανάλωσης και χρήσης	48
3.7 Συντελεστές εκπομπών ορυκτών καυσίμων	49
3.8 Συντελεστές εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας ανά σενάριο	50
3.9 Παραδοχές παραγωγής οχήματος και μπαταρίας.....	51
3.10 Παραδοχές συντήρησης και τέλους ζωής οχήματος	53
3.11 Υπολογιστικοί τύποι	54
3.12 Υπολογισμός break-even distance	55
3.13 Ανάλυση ευαισθησίας και αβεβαιότητας.....	58
3.14 Πηγές δεδομένων και αξιοπιστία	60
3.15 Μεθοδολογικοί περιορισμοί της μελέτης.....	62
4. Αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής	64
4.1 Εισαγωγή στα αποτελέσματα	64
4.2 Συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα ανά τεχνολογία	65
4.3 Σύγκριση συνολικών εκπομπών CO _{2e} ανά σενάριο για ICEV, HEV και BEV.....	69
4.4 Ανάλυση συμβολής σταδίων κύκλου ζωής.....	72
4.5 Απόσταση περιβαλλοντικής εξισορρόπησης (Break-even distance) για τα BEVs...	73
4.6 Ερμηνευτική ανάλυση ευαισθησίας των βασικών παραμέτρων.....	77
4.7 Σύγκριση με διεθνή βιβλιογραφία.....	81
4.8 Συνολική σύγκριση και κύρια συμπεράσματα.....	82
5.1 Εισαγωγή.....	83
5.2 Ενίσχυση της απανθρακοποίησης του ηλεκτρικού συστήματος.....	85
5.3 Ανάπτυξη εκτεταμένου και αξιόπιστου δικτύου φόρτισης.....	87
5.4 Ένταξη των BEVs στο ενεργειακό σύστημα	90
5.5 Οικονομικά κίνητρα για επιτάχυνση διείσδυσης των BEVs.....	92
5.6 Θεσμική αναβάθμιση και ψηφιακή διακυβέρνηση της ηλεκτροκίνησης	95
5.7 Προώθηση της ηλεκτροκίνησης στις δημόσιες και στις αυτοδιοικητικές υπηρεσίες	97
5.8 Ειδικές πολιτικές για τις νησιωτικές περιοχές	99
5.9 Κοινωνική διάσταση και μείωση ανισοτήτων	101
5.10 Κυκλική οικονομία & μπαταρίες	103

5.11 Συνολική αποτίμηση των προτεινόμενων πολιτικών.....	105
6. Συμπεράσματα	107
6.1 Εισαγωγή.....	107
6.2 Συνοπτική αποτίμηση της περιβαλλοντικής επίδοσης ανά τεχνολογία	109
6.3 Συμπεράσματα σχετικά με το ενεργειακό μίγμα και την ελληνική πραγματικότητα	112
6.4 Συμπεράσματα σχετικά με το break-even distance.....	114
6.5 Συνολική πολιτική και στρατηγική αποτίμηση.....	116
6.6 Μεθοδολογικές διευκρινήσεις και όρια ερμηνείας των αποτελεσμάτων.....	118
6.7 Επιστημονικά συμπεράσματα και συμβολή της εργασίας.....	119
6.8 Περιορισμοί της μελέτης και αναπάντητα ερωτήματα	121
6.9 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	123
6.10 Θεωρητικές και πρακτικές εφαρμογές των αποτελεσμάτων	125
6.11 Τελικό συμπέρασμα	126
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	128
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	132

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1-1 Το λογότυπο του ΕΑΠ, σε έγχρωμη έκδοση.....	137
Εικόνα 1-2 Το λογότυπο του ΕΑΠ, στην αγγλική γλώσσα, σε έγχρωμη έκδοση.....	139
Εικόνα 1-3 Τα λογότυπα του ΕΑΠ, σε μονόχρωμη έκδοση.....	141
Σχήμα 2-1	32
Σχήμα 4-1	73

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1 Συγκριτική αποτίμηση διεθνών μελετών LCA για ηλεκτρικά οχήματα.....	25
Πίνακας 2-2 Ιστορική εξέλιξη του ελληνικού μίγματος ηλεκτροπαραγωγής.....	29
Πίνακας 2-3 Ενεργειακά σενάρια που χρησιμοποιούνται στην παρούσα ΔΕ.....	35
Πίνακας 3-1 Βασικές παραδοχές οχήματος και χρήσης.....	47
Πίνακας 3-2 Συντελεστές εκπομπών ορυκτών καυσίμων.....	49
Πίνακας 3-3 Συντελεστές εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας ανά σενάριο.....	50
Πίνακας 3-4 Παραδοχές παραγωγής οχήματος και μπαταρίας.....	52
Πίνακας 4-1 Εκπομπές κύκλου ζωής ανά στάδιο και τεχνολογία (gCO ₂ e/km).....	65
Πίνακας 4-2 Απόσταση περιβαλλοντικής εξισορρόπησης BEV - ICEV, ανά ενεργειακό σενάριο... ..	74
Πίνακας 4-3 Ποιοτική αξιολόγηση παραμέτρων ευαισθησίας.....	78

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

Ακολουθούν κάποια παραδείγματα:

ΔΕ	Διπλωματική Εργασία
ΕΑΠ	Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο
ΘΕ	Θεματική Ενότητα
ΠΕ	Πτυχιακή Εργασία
ΠΣ	Πρόγραμμα Σπουδών
ΣΥΝ	Συντονιστής/Συντονίστρια
ΠΣΧΔΕ	Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός
ΑΚΖ	Ανάλυση Κύκλου Ζωής
LCA	Life Cycle Assessment
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle
HEV	Hybrid Electric Vehicle
BEV	Battery Electric Vehicle
CO _{2e}	Ισοδύναμο διοξειδίου του άνθρακα
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΕΣΕΚ	Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα
ΑΔΜΗΕ	Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
TCO	Total Cost of Ownership

Κύρια σημεία της ΔΕ

Highlights

1. Η ηλεκτροκίνηση μειώνει τις εκπομπές κύκλου ζωής στις οδικές μεταφορές.
2. Τα BEVs υπερτερούν περιβαλλοντικά όσο απανθρακοποιείται το ηλεκτρικό μίγμα.
3. Το break-even distance μειώνεται στα σενάρια 2026, 2030 και 2050.
4. Η παραγωγή μπαταρίας παραμένει κρίσιμο στάδιο περιβαλλοντικού φορτίου.
5. Η simplified LCA προσφέρει διαφανή σύγκριση ICEV, HEV και BEV.

Συνεισφορά της ΔΕ

Η παρούσα διπλωματική εργασία συμβάλλει στη συστηματική αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της ηλεκτροκίνησης στον τομέα των οδικών μεταφορών, συνδέοντας τη διεθνή βιβλιογραφία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής με την ελληνική ενεργειακή πραγματικότητα. Μέσω μιας απλοποιημένης, βιβλιογραφικά τεκμηριωμένης προσέγγισης Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, συγκρίνονται τα οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης, τα υβριδικά και τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα ως προς τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε όλο τον κύκλο ζωής τους. Ιδιαίτερη συνεισφορά της εργασίας αποτελεί η ενσωμάτωση τριών χρονικών σεναρίων για την Ελλάδα, για τα έτη 2026, 2030 και 2050, ώστε να αναδειχθεί η επίδραση της σταδιακής απανθρακοποίησης του ηλεκτρικού μίγματος στο περιβαλλοντικό όφελος των ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας. Επιπλέον, η εργασία εκτιμά το περιβαλλοντικό break-even distance και αναδεικνύει τις παραμέτρους που επηρεάζουν περισσότερο τα αποτελέσματα, προσφέροντας ένα διαφανές και αναπαραγώγιμο πλαίσιο ανάλυσης. Με τον τρόπο αυτό, ενισχύεται τόσο η θεωρητική κατανόηση της σχέσης μεταξύ ηλεκτροκίνησης, ενεργειακού μίγματος και εκπομπών κύκλου ζωής, όσο και η πρακτική αξιοποίηση των ευρημάτων στη χάραξη πολιτικής και στον περιβαλλοντικό σχεδιασμό των μεταφορών.

Μελέτη του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της ηλεκτροκίνησης στον τομέα των οδικών μεταφορών: Ανάλυση κύκλου ζωής και σεναρίων εκπομπών των ηλεκτρικών οχημάτων

Θωμάς Δερμοσόνου¹, Ναταλία Λιώρα²

¹ Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο – Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός»

² ΣΕΠ, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ



Η εργασία εξετάζει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της ηλεκτροκίνησης στις οδικές μεταφορές, με έμφαση στη σύγκριση επιβατικών οχημάτων ICEV, HEV και BEV σε όρους κύκλου ζωής. Η αξιολόγηση λαμβάνει υπόψη την ελληνική ενεργειακή πραγματικότητα και σεσνάγια για τα έτη 2026, 2030 και 2050.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ



Απλοποιημένη, βιβλιογραφικά τεκμηριωμένη Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA).
Λειτουργική μονάδα: gCO₂e/km.
Συνολική απόσταση αναφοράς: 200.000 km.
Όρια συστήματος: cradle-to-grave.
Στάδια: παραγωγή οχήματος, μπαταρία, χρήση, συντήρηση και τέλος ζωής.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



Τα BEV εμφανίζουν υψηλότερο περιβαλλοντικό φορτίο στο στάδιο παραγωγής, κυρίως λόγω της μπαταρίας. Σε όρους συνολικού κύκλου ζωής, τα BEV παρουσιάζουν περιβαλλοντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τα ICEV. Το περιβαλλοντικό πλεονέκτημα των BEV ενισχύεται όσο το ελληνικό ηλεκτρικό μίγμα απανθρακοποιείται. Η περιβαλλοντική απόσταση ισοτιμίας μειώνεται διαχρονικά.

ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΙΣΟΤΙΜΙΑΣ (BREAK-EVEN DISTANCE)



ΣΤΑΔΙΑ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ηλεκτροκίνηση μπορεί να συμβάλει στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των οδικών μεταφορών στην Ελλάδα, υπό την προϋπόθεση ότι συνδυάζεται με καθαρότερη ηλεκτροπαραγωγή, ορθολογικό σχεδιασμό υποδομών φόρτισης και βελτίωση της παραγωγής και ανακύκλωσης μπαταριών.

Άρθρο μορφής επιστημονικού περιοδικού

Μελέτη του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της ηλεκτροκίνησης στον τομέα των οδικών μεταφορών: Ανάλυση κύκλου ζωής και σεναρίων εκπομπών των ηλεκτρικών οχημάτων

Θωμάς Δερμοσονόγλου¹, Ναταλία Λιώρα²

¹ Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός»

² ΣΕΠ, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εξετάζει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της ηλεκτροκίνησης στον τομέα των οδικών μεταφορών, με έμφαση στη σύγκριση μεταξύ οχημάτων εσωτερικής καύσης, υβριδικών οχημάτων και αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας. Η ανάλυση βασίζεται σε απλοποιημένη, βιβλιογραφικά τεκμηριωμένη προσέγγιση Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, με λειτουργική μονάδα τις εκπομπές gCO_{2e}/km. Εξετάζονται τρία χρονικά σενάρια για την Ελλάδα, τα έτη 2026, 2030 και 2050, ώστε να αποτιμηθεί η επίδραση της σταδιακής απανθρακοποίησης του ηλεκτρικού μίγματος στο συνολικό περιβαλλοντικό όφελος των ηλεκτρικών οχημάτων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα ηλεκτρικά οχήματα εμφανίζουν υψηλότερο περιβαλλοντικό φορτίο στο στάδιο παραγωγής, κυρίως λόγω της μπαταρίας, αλλά χαμηλότερες συνολικές εκπομπές κύκλου ζωής σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα, ιδίως καθώς μειώνεται η ένταση άνθρακα της ηλεκτροπαραγωγής. Παράλληλα, το περιβαλλοντικό break-even distance μειώνεται σταδιακά από το σενάριο 2026 προς τα σενάρια 2030 και 2050. Συμπεραίνεται ότι η ηλεκτροκίνηση μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στις οδικές μεταφορές, υπό την προϋπόθεση ότι συνοδεύεται από περαιτέρω διεύρυνση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και συστηματικό περιβαλλοντικό σχεδιασμό.

Λέξεις κλειδιά: ηλεκτροκίνηση, Ανάλυση Κύκλου Ζωής, ηλεκτρικά οχήματα, εκπομπές CO_{2e}, break-even distance, ενεργειακό μίγμα, Ελλάδα.

ABSTRACT

This study examines the environmental footprint of electric mobility in road transport, focusing on the comparison between internal combustion engine vehicles, hybrid electric vehicles and battery electric vehicles. The analysis follows a simplified, literature-based Life Cycle Assessment approach, using gCO_{2e}/km as the functional unit. Three-time scenarios for Greece, namely 2026, 2030 and 2050, are considered in order to assess the effect of the gradual decarbonisation of the electricity mix on the environmental benefit of electric vehicles. The results indicate that electric vehicles present a higher environmental burden during the production stage, mainly due to battery production, but lower overall life-cycle emissions compared with conventional vehicles, particularly as the carbon intensity of electricity generation decreases. The environmental break-even distance also decreases over time. Overall, electric mobility can contribute substantially to the reduction of greenhouse gas emissions in road transport, provided that it is accompanied by further renewable energy penetration and systematic environmental planning.

Keywords: electric mobility, Life Cycle Assessment, electric vehicles, CO_{2e} emissions, break-even distance, electricity mix, Greece.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο τομέας των οδικών μεταφορών αποτελεί μία από τις βασικές πηγές εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, καθώς εξακολουθεί να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ορυκτά καύσιμα. Η μετάβαση προς την ηλεκτροκίνηση προβάλλεται διεθνώς ως μία από τις σημαντικότερες τεχνολογικές κατευθύνσεις για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των μεταφορών. Ωστόσο, η περιβαλλοντική αξιολόγηση των ηλεκτρικών οχημάτων δεν μπορεί να περιορίζεται αποκλειστικά στις μηδενικές εκπομπές κατά την κυκλοφορία τους. Αντίθετα, απαιτείται ολιστική προσέγγιση που να λαμβάνει υπόψη όλα τα στάδια του κύκλου ζωής, από την παραγωγή του οχήματος και της μπαταρίας έως τη χρήση, τη συντήρηση και το τέλος ζωής.

Στο πλαίσιο αυτό, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής αποτελεί κατάλληλο εργαλείο για τη σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών οχημάτων, καθώς επιτρέπει την εκτίμηση των συνολικών εκπομπών που συνδέονται με κάθε τεχνολογία. Η παρούσα εργασία εστιάζει στη σύγκριση οχημάτων εσωτερικής καύσης, υβριδικών οχημάτων και ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας, λαμβάνοντας υπόψη την ελληνική ενεργειακή πραγματικότητα και την αναμενόμενη εξέλιξη του ηλεκτρικού μίγματος.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μελέτη βασίζεται σε απλοποιημένη, βιβλιογραφικά τεκμηριωμένη Ανάλυση Κύκλου Ζωής. Η λειτουργική μονάδα της ανάλυσης είναι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά διανυόμενο χιλιόμετρο, εκφρασμένες σε $\text{gCO}_2\text{e/km}$. Η επιλογή της συγκεκριμένης μονάδας επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών τεχνολογιών οχημάτων σε κοινή βάση.

Τα όρια του συστήματος ακολουθούν προσέγγιση *cradle-to-grave* και περιλαμβάνουν την παραγωγή του οχήματος, την παραγωγή της μπαταρίας για τα ηλεκτρικά οχήματα, τη φάση χρήσης, τη συντήρηση και το τέλος ζωής. Η σύγκριση αφορά τρεις βασικές τεχνολογίες: συμβατικά οχήματα εσωτερικής καύσης, υβριδικά οχήματα και ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας.

Για την αποτίμηση της επίδρασης του ηλεκτρικού μίγματος, εξετάζονται τρία χρονικά σενάρια για την Ελλάδα: 2026, 2030 και 2050. Τα σενάρια αυτά αντιπροσωπεύουν διαφορετικά επίπεδα απανθρακοποίησης της ηλεκτροπαραγωγής και επιτρέπουν την αξιολόγηση της μεταβολής του περιβαλλοντικού οφέλους των ηλεκτρικών οχημάτων στον χρόνο. Επιπλέον, υπολογίζεται το περιβαλλοντικό *break-even distance*, δηλαδή η απόσταση στην οποία οι σωρευτικές εκπομπές ενός ηλεκτρικού οχήματος εξισώνονται με εκείνες ενός αντίστοιχου συμβατικού οχήματος.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα ηλεκτρικά οχήματα εμφανίζουν αυξημένες εκπομπές στο στάδιο παραγωγής σε σχέση με τα συμβατικά και υβριδικά οχήματα. Η διαφορά αυτή οφείλεται κυρίως στην παραγωγή της μπαταρίας, η οποία αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στάδια περιβαλλοντικού φορτίου για τα BEVs. Ωστόσο, η εικόνα διαφοροποιείται σημαντικά όταν εξετάζεται το σύνολο του κύκλου ζωής.

Στη φάση χρήσης, τα ηλεκτρικά οχήματα εμφανίζουν σαφώς χαμηλότερες εκπομπές, ιδίως καθώς το ηλεκτρικό μίγμα γίνεται λιγότερο ανθρακικά εντατικό. Στο σενάριο 2026, το περιβαλλοντικό όφελος των BEVs είναι

ήδη εμφανές, αλλά περιορίζεται από τη μεταβατική κατάσταση του ελληνικού ηλεκτροπαραγωγικού συστήματος. Στο σενάριο 2030, η αυξημένη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας οδηγεί σε περαιτέρω μείωση των εκπομπών χρήσης. Στο σενάριο 2050, η σχεδόν πλήρης απανθρακοποίηση του ηλεκτρικού συστήματος ενισχύει σημαντικά το περιβαλλοντικό πλεονέκτημα των ηλεκτρικών οχημάτων.

Η ανάλυση του break-even distance επιβεβαιώνει τη σημασία της εξέλιξης του ενεργειακού μίγματος. Όσο μειώνεται η ένταση άνθρακα της ηλεκτροπαραγωγής, τόσο νωρίτερα αντισταθμίζεται το αρχικό περιβαλλοντικό φορτίο παραγωγής του ηλεκτρικού οχήματος. Με βάση τα εξεταζόμενα σενάρια, η απόσταση ισοτιμίας μειώνεται σταδιακά, γεγονός που υποδηλώνει ότι η περιβαλλοντική απόδοση των BEVs βελτιώνεται διαχρονικά.

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η ανάλυση επιβεβαιώνει ότι η περιβαλλοντική αξιολόγηση των ηλεκτρικών οχημάτων εξαρτάται καθοριστικά από το ενεργειακό μίγμα που χρησιμοποιείται για τη φόρτισή τους. Η ηλεκτροκίνηση δεν αποτελεί αυτόματα λύση μηδενικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος, καθώς σημαντικές εκπομπές συνδέονται με την παραγωγή του οχήματος και της μπαταρίας. Παρ' όλα αυτά, όταν η αξιολόγηση γίνεται σε επίπεδο κύκλου ζωής, τα ηλεκτρικά οχήματα εμφανίζουν σημαντικό περιβαλλοντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα, ιδίως σε συστήματα ηλεκτροπαραγωγής που μεταβαίνουν προς χαμηλότερες εκπομπές άνθρακα.

Για την Ελλάδα, η σταδιακή απανθρακοποίηση του ηλεκτρικού

συστήματος αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ενίσχυση του περιβαλλοντικού οφέλους των BEVs. Η αύξηση της συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η μείωση της λιγνιτικής παραγωγής και η μακροπρόθεσμη στόχευση προς την κλιματική ουδετερότητα δημιουργούν ευνοϊκές προϋποθέσεις για την ηλεκτροκίνηση. Ταυτόχρονα, η μελέτη αναδεικνύει την ανάγκη για προσεκτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων, καθώς οι υπολογισμοί βασίζονται σε βιβλιογραφικούς συντελεστές και σε σενάρια μελλοντικής εξέλιξης.

Ιδιαίτερη σημασία έχει επίσης η διάκριση μεταξύ περιβαλλοντικού break-even distance και οικονομικού κόστους ιδιοκτησίας. Το break-even που εξετάζεται στην παρούσα μελέτη αφορά αποκλειστικά τις σωρευτικές εκπομπές CO₂e και δεν συνιστά οικονομικό δείκτη. Συνεπώς, τα αποτελέσματα πρέπει να ερμηνεύονται ως περιβαλλοντική σύγκριση τεχνολογιών και όχι ως ανάλυση κόστους.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία καταδεικνύει ότι η ηλεκτροκίνηση μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των οδικών μεταφορών στην Ελλάδα. Παρότι τα ηλεκτρικά οχήματα εμφανίζουν υψηλότερες εκπομπές κατά το στάδιο παραγωγής, κυρίως λόγω της μπαταρίας, το συνολικό τους αποτύπωμα σε επίπεδο κύκλου ζωής είναι χαμηλότερο από εκείνο των συμβατικών οχημάτων, ιδιαίτερα όταν το ηλεκτρικό μίγμα γίνεται καθαρότερο.

Η σύγκριση των σεναρίων 2026, 2030 και 2050 δείχνει ότι το περιβαλλοντικό όφελος των BEVs ενισχύεται διαχρονικά, καθώς η ηλεκτροπαραγωγή

απανθρακοποιείται. Παράλληλα, η μείωση του break-even distance επιβεβαιώνει ότι η αντιστάθμιση του αρχικού περιβαλλοντικού φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων επιτυγχάνεται σε μικρότερες αποστάσεις όσο βελτιώνεται το ενεργειακό μίγμα.

Συνολικά, η ηλεκτροκίνηση αποτελεί περιβαλλοντικά ευνοϊκή τεχνολογική κατεύθυνση για τις οδικές μεταφορές, υπό την προϋπόθεση ότι συνδυάζεται με καθαρότερη ηλεκτροπαραγωγή, ορθολογικό σχεδιασμό υποδομών φόρτισης, βελτίωση της παραγωγής και ανακύκλωσης μπαταριών και συνολική στρατηγική βιώσιμης κινητικότητας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

European Environment Agency. 2023. *Greenhouse gas emissions from transport in Europe*. Copenhagen: EEA.

European Commission. 2021. *Fit for 55: Delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality*. Brussels: European Commission.

Hawkins, T.R., Singh, B., Majeau-Bettez, G. and Strømman, A.H. 2013. Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1), pp. 53–64.

ICCT. 2021. *A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars*. Washington, DC: International Council on Clean Transportation.

IEA. 2023. *Global EV Outlook 2023*. Paris: International Energy Agency.

IPCC. 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press.

ISO. 2006a. *ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. Geneva: International Organization for Standardization.

ISO. 2006b. *ISO 14044: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*. Geneva: International Organization for Standardization.

Notter, D.A., Gauch, M., Widmer, R., Wäger, P., Stamp, A., Zah, R. and Althaus, H.J. 2010. Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. *Environmental Science & Technology*, 44(17), pp. 6550–6556.

1. Εισαγωγή

Η μετάβαση σε ένα κλιματικά ουδέτερο σύστημα οδικών μεταφορών αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις της σύγχρονης, μεταβατικής εποχής προς την Πράσινη Ενέργεια. Ο τομέας των οδικών μεταφορών είναι υπεύθυνος για το ένα τέταρτο, περίπου, των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση (European Commission, 2021) και χαρακτηρίζεται από μια συνεχιζόμενη αύξηση ζήτησης, ιδίως για τα επιβατηγά οχήματα. Η ανάγκη απανθρακοποίησης αυτού του τομέα καθίσταται επιτακτική, καθώς οι κλιματικοί στόχοι για το 2030 και το 2050 απαιτούν δραστική μείωση εκπομπών των αερίων αυτών.

Στο πλαίσιο αυτό, η ηλεκτροκίνηση αναδεικνύεται ως βασικός τεχνολογικός μοχλός, σε παγκόσμιο επίπεδο, ενώ η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ, Life Cycle Assessment, LCA) προσφέρει ένα αξιόπιστο επιστημονικό εργαλείο για τη συνολική αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των οχημάτων (ISO, 2006a & Hawkins et al., 2013). Αντίθετα με προσεγγίσεις που εξετάζουν μόνο τις εκπομπές της χρήσης (tail-pipe emissions), η AKZ επιτρέπει την αποτίμηση του πλήρους περιβαλλοντικού κόστους, από την παραγωγή των οχημάτων έως το τέλος ζωής τους, στοιχείο κρίσιμο για τεκμηριωμένη συγκριτική αξιολόγηση τεχνολογιών οχημάτων με διαφορετικά ενεργειακά και λειτουργικά χαρακτηριστικά.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στη σύγκριση τριών βασικών τεχνολογιών οχημάτων: των συμβατικών οχημάτων με κινητήρες εσωτερικής καύσης (**Internal Combustion Engine Vehicles, ICEVs**), των υβριδικών οχημάτων (**Hybrid Electric Vehicles, HEVs**) και των ηλεκτρικών οχημάτων με μπαταρίες (**Battery Electric Vehicles, BEVs**).

Η ενεργειακή μετάβαση που βρίσκεται σε εξέλιξη στην Ελλάδα, με την ταχεία απολιγνιτοποίηση και την εντυπωσιακή άνοδο των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), δημιουργεί ένα νέο πλαίσιο αξιολόγησης των ηλεκτρικών οχημάτων. Η περιβαλλοντική επίδοσή τους δεν είναι στατική: εξαρτάται άμεσα από το ενεργειακό μίγμα κάθε χώρας και από τη διαχρονική μεταβολή των εκπομπών της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, η ανάλυση των ετών 2026, 2030 και 2050 έχει ιδιαίτερη σημασία για την ελληνική μελέτη περίπτωσης.

Η σύγκριση πραγματοποιείται με βάση τα τρία αυτά ενεργειακά σενάρια της Ελλάδας: 2026 (μεταβατικό μίγμα), 2030 (ισχυρή διείσδυση των ΑΠΕ) και 2050 (σενάριο πολύ χαμηλής έντασης άνθρακα, σε συνθήκες σχεδόν πλήρους απανθρακοποίησης του ηλεκτροπαραγωγικού συστήματος). Τα σενάρια αυτά αντλούνται από επίσημες εθνικές και ευρωπαϊκές πηγές, όπως ο ΑΔΜΗΕ (Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας) και το ΕΣΕΚ (Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα) (IPTO/ADMIE, 2023a & Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2019).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η συστηματική εκτίμηση του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος των τεχνολογιών ICEV, HEV και BEV, υπό διαφορετικές ενεργειακές συνθήκες της ελληνικής περίπτωσης, καθώς και ο προσδιορισμός του περιβαλλοντικού break-even distance, δηλαδή της απόστασης στην οποία οι σωρευτικές εκπομπές CO_{2e} ενός BEV εξισώνονται με εκείνες ενός αντίστοιχου ICEV ή HEV.

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, το break-even distance ορίζεται ως η απόσταση στην οποία οι σωρευτικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (σε ισοδύναμα CO₂ – CO₂e) ενός ηλεκτρικού οχήματος με μπαταρία (BEV) εξισώνονται με εκείνες ενός αντίστοιχου οχήματος με κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICEV).

Ο δείκτης αυτός αποτελεί περιβαλλοντικό σημείο εξισορρόπησης εκπομπών (environmental emissions parity point) και όχι οικονομικό δείκτη κόστους ιδιοκτησίας. Από το σημείο αυτό και μετά, το BEV παρουσιάζει χαμηλότερες σωρευτικές εκπομπές CO₂e σε όλο τον υπόλοιπο κύκλο ζωής του.

Η παρούσα εργασία δεν εξετάζει οικονομικό κόστος ή συνολικό κόστος ιδιοκτησίας (Total Cost of Ownership, TCO), αλλά αποκλειστικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα κύκλου ζωής των τεχνολογιών οχημάτων μέσω της μεθοδολογίας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA).

Παράλληλα, η ΔΕ επιδιώκει να προτείνει πολιτικές κατευθύνσεις προσαρμοσμένες στην ελληνική πραγματικότητα, προκειμένου να ενισχυθεί η δίκαιη και περιβαλλοντικά αποτελεσματική διεξόδυση της ηλεκτροκίνησης στο ελληνικό σύστημα οδικών μεταφορών.

1.1 Υπόβαθρο και σημασία του θέματος

Οι οδικές μεταφορές αποτελούν έναν από τους πλέον κρίσιμους τομείς για την επίτευξη των στόχων μείωσης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ). Η αυξημένη διεθνής κινητικότητα, οι μεταφορικές ανάγκες, η εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και η σταθερή αύξηση του αριθμού ιδιωτικών, επιβατηγών οχημάτων έχουν καταστήσει τον συγκεκριμένο τομέα μία από τις βασικότερες πηγές έκλυσης αερίων του θερμοκηπίου (European Commission, 2021 & EEA, 2023). Στη σύγχρονη εποχή, η ανάγκη μεταστροφής προς τεχνολογίες χαμηλών ή ακόμη και μηδενικών εκπομπών έχει αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία, καθώς η Κλιματική Κρίση απαιτεί άμεσες και συστηματικές δράσεις σε όλους τους τομείς της Οικονομίας (IPCC, 2021).

Πέραν της συμβολής τους στην κλιματική αλλαγή, οι οδικές μεταφορές συνδέονται άμεσα και με την επιβάρυνση της ποιότητας του αέρα στα αστικά κέντρα, καθώς αποτελούν μία από τις σημαντικότερες πηγές εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x), πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) και αιωρούμενων σωματιδίων (PM) (Liora et al., 2025 & Progiou et al., 2023).

Η διεθνής και ευρωπαϊκή βιβλιογραφία έχει αναδείξει ότι η κυκλοφορία οχημάτων επιδεινώνει την αστική ατμοσφαιρική ρύπανση και επηρεάζει αρνητικά τη δημόσια υγεία, ιδίως μέσω των επιπτώσεων στο αναπνευστικό και καρδιαγγειακό σύστημα (Progiou et al., 2023). Στο πλαίσιο αυτό, η μείωση των εκπομπών από τις οδικές μεταφορές δεν αποτελεί μόνο κλιματική προτεραιότητα, αλλά και κρίσιμο πεδίο περιβαλλοντικής και κοινωνικής πολιτικής.

Η σημασία του ζητήματος είναι ιδιαίτερα εμφανής και στην ελληνική πραγματικότητα. Ειδικά για τη Θεσσαλονίκη, πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι η οδική κυκλοφορία αποτελεί κυρίαρχη πηγή αστικής ρύπανσης, με σημαντική συμβολή στις ημερήσιες συγκεντρώσεις NO₂ και PM_{2.5}, ιδίως κατά τη χειμερινή περίοδο που μπορεί να φθάνει έως 47 μg/m³ στο ημερήσιο NO₂ και έως 15 μg/m³ στο ημερήσιο PM_{2.5}, ενώ παραμένει σημαντική και τους θερινούς μήνες.

Τα ευρήματα αυτά καταδεικνύουν ότι το κυκλοφοριακό φορτίο δεν επηρεάζει μόνο τις εκπομπές CO_{2e}, αλλά και τη συνολική περιβαλλοντική ποιότητα του αστικού χώρου, ενισχύοντας την ανάγκη μετάβασης σε καθαρότερες τεχνολογίες κινητικότητας (Liora et al., 2025).

Υπό αυτή τη συνθήκη, η ηλεκτροκίνηση αναδεικνύεται ως βασική στρατηγική προτεραιότητα. Η στροφή προς την ηλεκτρική πρόωση, σε συνδυασμό με την απανθρακοποίηση του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, δημιουργεί την προοπτική δραστηκής μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των επιβατηγών οχημάτων (IEA, 2022 & European Commission, 2021).

Η τεχνολογική εξέλιξη των συσσωρευτών, η ενίσχυση των δικτύων φόρτισης (και με ταχυφοριστές), σε συνδυασμό με στοχευμένες ευρωπαϊκές πολιτικές, επιταχύνουν αυτή τη μετάβαση, όμως η πραγματική περιβαλλοντική αξία των ηλεκτρικών οχημάτων δεν είναι

αυτονόητη, είναι πολυπαραγοντική και εξαρτάται από πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ της παραγωγής τους, της χρήσης τους και του ενεργειακού μίγματος (ICCT, 2021).

Η κατεύθυνση αυτή εντάσσεται στο ευρύτερο ευρωπαϊκό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας (European Green Deal), η οποία θέτει ως στρατηγικό στόχο την κλιματική ουδετερότητα έως το 2050 και επιδιώκει μετασχηματισμό των τομέων ενέργειας, μεταφορών, βιομηχανίας και κατανάλωσης προς ένα βιώσιμο, ανταγωνιστικό και χαμηλού άνθρακα παραγωγικό μοντέλο (European Union, 2021 & European Commission, 2021).

Επομένως, η αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των τεχνολογιών οδικών μεταφορών αποκτά ιδιαίτερη σημασία όχι μόνο ως ακαδημαϊκή άσκηση, αλλά και ως εργαλείο τεκμηρίωσης δημόσιων πολιτικών (Burchart and Przytuła, 2024).

1.2 Οδικές μεταφορές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Ο τομέας των μεταφορών ευθύνεται περίπου για το ένα τέταρτο των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση, με τις οδικές μεταφορές να αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος αυτών των εκπομπών (EEA, 2023 & Eurostat, 2023). Τα οχήματα εσωτερικής καύσης (ICEVs) εκπέμπουν CO₂e άμεσα κατά τη χρήση τους, ενώ παράλληλα διαθέτουν και σημαντικό αποτύπωμα παραγωγικής διαδικασίας, λόγω της εξόρυξης πρώτων υλών, της κατασκευής επιμέρους εξαρτημάτων και των απαιτούμενων ενεργειακών διαδικασιών (EEA, 2023).

Ωστόσο, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των οδικών μεταφορών δεν περιορίζονται αποκλειστικά στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η κυκλοφορία επιβατηγών και εμπορευματικών οχημάτων επιβαρύνει σημαντικά την ποιότητα του αέρα, ιδίως σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, όπου οι συγκεντρώσεις NO₂, PM₁₀ και PM_{2.5} συνδέονται με κυκλοφοριακή συμφόρηση, υψηλή ένταση μετακινήσεων και ευρύτερη εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα (Liora et al., 2025 & Progiou et al., 2023).

Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια συνδέεται με αρνητικές επιδράσεις στο καρδιαγγειακό και στο αναπνευστικό σύστημα, ενώ έχει επίσης συσχετιστεί με πρόωρη θνησιμότητα (Progiou et al., 2023).

Στο επίπεδο της ευρωπαϊκής πολιτικής, το Zero Pollution Action Plan της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας θέτει ως στόχο τη μείωση των πρόωρων θανάτων που συνδέονται με την έκθεση σε PM_{2.5} κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030 σε σχέση με τα επίπεδα του 2005 (Progiou et al., 2023). Η στόχευση αυτή καταδεικνύει ότι η περιβαλλοντική επιβάρυνση από τις μεταφορές πρέπει να εξετάζεται ταυτόχρονα υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής και της ποιότητας του αέρα, καθώς οι δύο αυτές διαστάσεις είναι αλληλένδετες (Progiou et al., 2023).

Ακόμη και τα υβριδικά οχήματα (HEVs), τα οποία αξιοποιούν τη βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση για τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, εξακολουθούν να εξαρτώνται από τα ορυκτά καύσιμα και συνεπώς να συμβάλλουν στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (IEA, 2022). Αντιθέτως, τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα (BEVs) δεν εμφανίζουν άμεσες εκπομπές εξάτμισης κατά τη φάση χρήσης, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικά από περιβαλλοντική άποψη. Ωστόσο, η συνολική τους αποτίμηση απαιτεί Ανάλυση Κύκλου Ζωής, καθώς οι έμμεσες εκπομπές συνδέονται με την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη φόρτισή τους (ICCT, 2021).

Η ανάγκη αυτής της συνολικής αποτίμησης προκύπτει από το γεγονός ότι η απουσία εκπομπών στην εξάτμιση δεν συνεπάγεται αυτομάτως και μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Στα ηλεκτρικά οχήματα, σημαντικό μέρος των εκπομπών μετατοπίζεται στα στάδια παραγωγής του οχήματος και ιδιαίτερα της μπαταρίας, καθώς και στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη φόρτισή τους. Για τον λόγο αυτό, η σύγκριση μεταξύ ICEV, HEV και BEV δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στις άμεσες εκπομπές χρήσης, αλλά οφείλει να λαμβάνει υπόψη ολόκληρο τον κύκλο ζωής κάθε τεχνολογίας (Burchart and Przytuła, 2024 & Negri and Bieker, 2025).

1.3 Η μετάβαση στην ηλεκτροκίνηση και οι σύγχρονες προκλήσεις

Η ηλεκτροκίνηση παρουσιάζει σημαντικά οφέλη, αλλά συνοδεύεται και από προκλήσεις που σχετίζονται με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής συσσωρευτών, με τις ανάγκες πρώτων υλών (και σε σπάνιες γαίες), με την ανάπτυξη των υποδομών φόρτισης (σε πλήθος και ταχύτητα φόρτισης) και με την ανακύκλωση των επιμέρους ηλεκτρικών συστημάτων (Notter et al., 2010 & Dunn et al., 2012 & Ellingsen et al., 2016 & ICCT, 2021 & IEA, 2022).

Η διεθνής βιβλιογραφία συγκλίνει στο ότι η παραγωγή των μπαταριών αποτελεί ένα από τα πιο ενεργοβόρα στάδια του κύκλου ζωής ενός BEV, ενώ η περιβαλλοντική συνεισφορά του ηλεκτρικού παραγωγικού συστήματος εξαρτάται, σε μεγάλο βαθμό, από τη σύνθεση του ενεργειακού μίγματος της κάθε χώρας (ICCT, 2021).

Η σχετική συζήτηση στη διεθνή βιβλιογραφία έχει μετατοπιστεί από το ερώτημα του αν τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν μηδενικές εκπομπές, στο κατά πόσο εμφανίζουν χαμηλότερο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα, όταν εξετάζονται σε όλο τον κύκλο ζωής τους (Burchart and Przytuła, 2024 & Negri and Bieker, 2025).

Σύγχρονες αναλύσεις κύκλου ζωής σε ευρωπαϊκό επίπεδο δείχνουν ότι τα BEVs εμφανίζουν σημαντικά χαμηλότερες εκπομπές κύκλου ζωής από τα οχήματα βενζίνης, παρά το αυξημένο αποτύπωμα παραγωγής λόγω της μπαταρίας, και ότι το περιβαλλοντικό αυτό πλεονέκτημα ενισχύεται όσο το ηλεκτρικό μίγμα γίνεται καθαρότερο (Negri and Bieker, 2025). Παράλληλα, έχει καταδειχθεί ότι οι επιπλέον εκπομπές παραγωγής των BEVs μπορούν να αντισταθμιστούν σχετικά νωρίς στη διάρκεια ζωής του οχήματος, γεγονός που καθιστά κρίσιμο τον υπολογισμό του environmental break-even distance (Negri and Bieker, 2025).

Ειδικότερα, σύμφωνα με πρόσφατη έκθεση του ICCT για την Ευρωπαϊκή Ένωση, τα BEVs εκτιμάται ότι εμφανίζουν σημαντικά χαμηλότερες εκπομπές κύκλου ζωής από τα αντίστοιχα βενζινοκίνητα ICEVs, ενώ οι πρόσθετες εκπομπές που συνδέονται με την παραγωγή της μπαταρίας αντισταθμίζονται περίπου μετά από 17.000 km χρήσης (Negri and Bieker, 2025). Τα στοιχεία αυτά επιβεβαιώνουν ότι η αξιολόγηση της ηλεκτροκίνησης απαιτεί δυναμική και όχι στατική προσέγγιση, καθώς το ενεργειακό μίγμα μεταβάλλεται διαχρονικά και επηρεάζει καθοριστικά την τελική περιβαλλοντική επίδοση των BEVs.

Παράλληλα, σε επίπεδο αστικής πολιτικής, μελέτες για τη Θεσσαλονίκη έχουν δείξει ότι παρεμβάσεις βιώσιμης κινητικότητας, όπως η μείωση της κυκλοφορίας επιβατηγών οχημάτων και η ενίσχυση της χρήσης ηλεκτρικών λεωφορείων, μπορούν να οδηγήσουν σε ουσιαστικές μειώσεις ρύπων και εκπομπών CO₂.

Ενδεικτικά, έχει εκτιμηθεί ότι μείωση κατά 20% της κυκλοφορίας επιβατηγών οχημάτων και μοτοσυκλετών, σε συνδυασμό με ενίσχυση της δημόσιας συγκοινωνίας με ηλεκτρικά οχήματα, θα μπορούσε να επιφέρει μειώσεις ρύπων και CO₂ της τάξης του 29%–41%, καθώς και μείωση έως περίπου 65% στις μέγιστες συγκεντρώσεις NO_x. Τα ευρήματα αυτά ενισχύουν την άποψη ότι η ηλεκτροκίνηση δεν αποτελεί απλώς τεχνολογική καινοτομία,

αλλά μέρος μιας ευρύτερης στρατηγικής βιώσιμης αστικής κινητικότητας (Liora et al., 2021).

Η τεχνολογική και περιβαλλοντική αξιολόγηση των ηλεκτρικών οχημάτων δεν μπορεί, επομένως, να γίνει τμηματικά. Η AKZ αποτελεί το καταλληλότερο διαθέσιμο εργαλείο για τη συστηματική και συγκριτική εξέταση των εκπομπών σε όλα τα στάδια: βιομηχανική παραγωγή οχήματος, χρήση/λειτουργία, συντήρηση, τέλος ζωής (ICCT, 2021).

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για τέτοιου είδους συγκρίσεις, διότι επιτρέπει την αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων από την εξόρυξη πρώτων υλών και την παραγωγή, έως τη χρήση και την τελική απόσυρση του οχήματος. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγονται απλουστευτικές προσεγγίσεις που περιορίζονται μόνο στις εκπομπές εξάτμισης και αναδεικνύονται οι κρίσιμες παράμετροι που καθορίζουν την πραγματική περιβαλλοντική επίδοση κάθε τεχνολογίας, όπως η παραγωγή μπαταριών, το ενεργειακό μίγμα φόρτισης και ο χρόνος αντιστάθμισης του αρχικού αποτυπώματος παραγωγής (Burchart and Przytuła, 2024 & Negri and Bieker, 2025).

1.4 Η δυναμική της ελληνικής ενεργειακής μετάβασης

Η Ελλάδα βρίσκεται σε μια περίοδο έντονης αναδιάρθρωσης του παραγωγικού ενεργειακού της μοντέλου. Η σταδιακή απολιγνιτοποίηση, η σημαντική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ και οι επενδύσεις σε υποδομές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας έχουν οδηγήσει σε σταδιακή μείωση των εκπομπών CO₂ ανά παραγόμενη kWh (Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2019 & 2024 & IPTO/ADMIE, 2024).

Αυτή η εξέλιξη τοποθετεί τα BEVs σε ολοένα και πιο πλεονεκτική θέση, από περιβαλλοντική άποψη, στη χώρα μας καθώς οι εκπομπές της περιόδου χρήσης τους εξαρτώνται άμεσα από τις εκπομπές του ηλεκτροπαραγωγικού συστήματος.

Επομένως, η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των BEVs πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις ιδιαιτερότητες της ελληνικής περίπτωσης (πραγματικές συνθήκες) και τη δυναμική εξέλιξη των ενεργειακών σεναρίων (EEA, 2023 & European Commission, 2021).

1.5 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της εργασίας είναι η ολοκληρωμένη, συστηματική αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των ICEVs, HEVs και BEVs, με βάση τη μεθοδολογία της AKZ, υπό τις σημερινές και μελλοντικές συνθήκες της ελληνικής ενεργειακής πραγματικότητας (ICCT, 2021 & EEA, 2023). Η εργασία στοχεύει:

- να ποσοτικοποιήσει τις συνολικές εκπομπές CO_{2e} ανά στάδιο του κύκλου ζωής,
- να ενσωματώσει τα ενεργειακά σενάρια των ετών 2026, 2030 και 2050 (European Commission, 2021),
- να αναδείξει τις κρίσιμες παραμέτρους που επηρεάζουν την τελική περιβαλλοντική απόδοση,
- να προσδιορίσει το break-even distance για τα ηλεκτρικά οχήματα σε κάθε χρονική περίοδο και σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα (ICCT, 2021),
- να εξετάσει τον ρόλο της απανθρακοποίησης του ελληνικού ηλεκτροπαραγωγικού συστήματος στην περιβαλλοντική επίδοση των BEVs και
- να προτείνει στοχευμένες πολιτικές για τη βελτίωση της περιβαλλοντικής αποδοτικότητας στον τομέα των οδικών μεταφορών (European Commission, 2021).

1.6 Ερευνητικά ερωτήματα και στόχοι

Τα βασικά ερευνητικά ερωτήματα περιλαμβάνουν:

1. Ποιο είναι το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα των τριών υπό εξέταση τεχνολογιών οχημάτων;
2. Πώς επηρεάζεται το αποτύπωμα των BEVs από το ενεργειακό μίγμα της Ελλάδας;
3. Ποιοι παράγοντες καθορίζουν το break-even distance και πώς μεταβάλλεται στους τρεις χρονικούς ορίζοντες (2026, 2030 και 2050);
4. Ποιες πολιτικές μπορούν να ενισχύσουν τη βιώσιμη διεύθυνση των BEVs στην Ελλάδα (EEA, 2023 & ICCT, 2021 & IEA, 2022);

1.7 Δομή της εργασίας

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία διαρθρώνεται σε έξι βασικά κεφάλαια, τα οποία ακολουθούν μια λογική πορεία από τη θεωρητική θεμελίωση του θέματος και τη μεθοδολογία έως τα αποτελέσματα, τις προτάσεις πολιτικής και τα τελικά συμπεράσματα.

- Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζεται η εισαγωγή της εργασίας, όπου αναδεικνύονται το υπόβαθρο και η σημασία του θέματος, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των οδικών μεταφορών, η μετάβαση προς την ηλεκτροκίνηση, η δυναμική της ελληνικής ενεργειακής μετάβασης, καθώς και ο σκοπός, τα ερευνητικά ερωτήματα και οι στόχοι της μελέτης.
- Στο **Κεφάλαιο 2** αναπτύσσεται το θεωρητικό πλαίσιο της ηλεκτροκίνησης, τόσο σε διεθνές όσο και σε ελληνικό επίπεδο. Εξετάζονται οι τεχνολογίες ICEV, HEV και BEV, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους, ο ρόλος της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, η σημασία της παραγωγής οχήματος και της μπαταρίας του, η επίδραση του ενεργειακού μίγματος και η έννοια του break-even distance.
- Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA), με έμφαση στο σκοπό και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης, στα όρια του συστήματος, στη λειτουργική μονάδα, στις βασικές παραδοχές, στα δεδομένα απογραφής, στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, καθώς και στη μεθοδολογική προσέγγιση για τον υπολογισμό του break-even distance. Στο ίδιο κεφάλαιο εξετάζονται επίσης η ανάλυση ευαισθησίας, η αβεβαιότητα, η αξιοπιστία των πηγών δεδομένων και οι περιορισμοί της μελέτης.
- Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συγκριτικής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής για τις υπό εξέταση τεχνολογίες οχημάτων. Ειδικότερα, αποτιμάται το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα ανά τεχνολογία, συγκρίνονται οι εκπομπές CO_{2e} στα σενάρια των ετών 2026, 2030 και 2050 και προσδιορίζεται το break-even distance των BEVs, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας.
- Στο **Κεφάλαιο 5** διατυπώνονται προτάσεις πολιτικής για την προώθηση της ηλεκτροκίνησης στην Ελλάδα, με έμφαση στην απανθρακοποίηση του ηλεκτρικού συστήματος, στην ανάπτυξη υποδομών φόρτισης, στα οικονομικά και θεσμικά κίνητρα, στην κοινωνική διάσταση της μετάβασης και στην κυκλική οικονομία των μπαταριών.
- Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας, συνοψίζονται τα βασικά ευρήματα, αναδεικνύεται η επιστημονική συμβολή της μελέτης και επισημαίνονται οι βασικοί περιορισμοί και οι δυνατότητες μελλοντικής έρευνας.

Τέλος, μετά το κυρίως σώμα της εργασίας παρατίθενται η **Βιβλιογραφία**, σύμφωνα με το σύστημα Harvard, και τα **Παραρτήματα**, στα οποία περιλαμβάνεται το υποστηρικτικό υλικό της μελέτης.

2. Θεωρητικό πλαίσιο ηλεκτροκίνησης (η διεθνής και η Ελληνική προσέγγιση)

Το θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας εστιάζει στη συγκριτική ανάλυση των βασικών τεχνολογιών κίνησης επιβατηγών οχημάτων, δηλαδή των συμβατικών οχημάτων με κινητήρα εσωτερικής καύσης (Internal Combustion Engine Vehicles, ICEVs), των υβριδικών οχημάτων (Hybrid Electric Vehicles, HEVs) και των αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων με μπαταρία (Battery Electric Vehicles, BEVs). Η σύγκριση των τεχνολογιών αυτών δεν περιορίζεται στις άμεσες εκπομπές κατά τη φάση χρήσης, αλλά εξετάζεται σε σχέση με την ενεργειακή κατανάλωση, την τεχνολογική απόδοση και το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε όλο τον κύκλο ζωής τους.

Τα ICEVs αποτελούν την ιστορικά κυρίαρχη και τεχνολογικά ώριμη μορφή οδικής μεταφοράς, χαρακτηρίζονται από υψηλή ενεργειακή πυκνότητα καυσίμου, αλλά και από υψηλές εκπομπές CO₂e τόσο κατά τη φάση της παραγωγής τους όσο και κατά τη φάση, κυρίως, της χρήσης τους.

Τα HEVs περιορίζουν τις εκπομπές μέσω βελτιστοποιημένης χρήσης ενέργειας, χωρίς όμως να εξαλείφουν σημαντικούς παράγοντες όπως η καύση καυσίμου ή/και η εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα.

Τα BEVs διαφοροποιούνται ουσιαστικά από τις προηγούμενες τεχνολογίες, καθώς βασίζονται αποκλειστικά στην ηλεκτρική ενέργεια και δεν εμφανίζουν άμεσες εκπομπές αέριων ρύπων κατά τη χρήση τους. Ωστόσο, η περιβαλλοντική τους απόδοση δεν μπορεί να αξιολογηθεί μόνο με βάση τη φάση κυκλοφορίας. Επηρεάζεται καθοριστικά από το αποτύπωμα παραγωγής της μπαταρίας και από την ένταση άνθρακα της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη φόρτισή τους.

Η διεθνής βιβλιογραφία αναγνωρίζει ότι το break-even distance (σημείο περιβαλλοντικής εξισορρόπησης εκπομπών, αναφέρεται ως «environmental break-even distance» και «greenhouse gas parity point») μειώνεται σημαντικά σε ηλεκτρικά συστήματα κίνησης που βαίνουν προς την ολική απανθρακοποίηση, γεγονός που καθιστά την ελληνική περίπτωση εξαιρετικά ενδιαφέρουσα.

Παράλληλα, το θεωρητικό πλαίσιο ενσωματώνει βασικές έννοιες και ορισμούς της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (AKZ), όπως η λειτουργική μονάδα, τα όρια του συστήματος και η μεθοδολογική διάκριση μεταξύ των LCI και LCIA, προετοιμάζοντας το έδαφος για τη μεθοδολογία που ακολουθεί. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς η διεθνής βιβλιογραφία έχει πλέον μετατοπιστεί από την απλή σύγκριση εκπομπών κατά τη χρήση των οχημάτων προς την αποτίμηση του συνολικού ανθρακικού αποτυπώματος σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους. Σε αυτό το πλαίσιο, η αξιολόγηση των τεχνολογιών ICEV, HEV και BEV δεν εξαρτάται μόνο από τις άμεσες εκπομπές λειτουργίας, αλλά και από παραμέτρους όπως η παραγωγή της μπαταρίας, η πηγή της ηλεκτρικής ενέργειας φόρτισης, η διάρκεια ζωής του οχήματος και οι διαδικασίες ανακύκλωσης στο τέλος ζωής (Hawkins et al., 2013 & ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024).

2.1 Η κλιματική διάσταση των μεταφορών, οι τεχνολογίες κίνησης και τα βασικά χαρακτηριστικά των ICEVs, των HEVs και των BEVs

Ο τομέας των οδικών μεταφορών αποτελεί έναν από τους πλέον κρίσιμους και δύσκολους τομείς για την απανθρακοποίηση. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου προέρχονται, κατά κύριο λόγο, από την καύση ορυκτών καυσίμων, με τα επιβατηγά οχήματα να αποτελούν σημαντική επιμέρους πηγή εκπομπών στον τομέα αυτό (IEA, 2023). Η σημασία του τομέα είναι ιδιαίτερα αυξημένη και σε αστικό επίπεδο, καθώς οι οδικές μεταφορές συνδέονται όχι μόνο με τις εκπομπές CO₂e, αλλά και με την ποιότητα του αέρα, τη συγκέντρωση ατμοσφαιρικών ρύπων και τη δημόσια υγεία.

Η εξέλιξη των τεχνολογιών κίνησης των επιβατηγών οχημάτων αντανακλά την ευρύτερη διεθνή προσπάθεια μετάβασης σε καθαρότερες μορφές μετακίνησης. Τα συμβατικά οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης (Internal Combustion Engine Vehicles, ICEVs) αποτελούν την ιστορικά κυρίαρχη τεχνολογία, βασιζόμενα στην καύση ορυκτών καυσίμων, κυρίως βενζίνης ή πετρελαίου. Παρά τις τεχνολογικές βελτιώσεις στην ενεργειακή απόδοση και στον έλεγχο των ρύπων, τα ICEVs παραμένουν άμεσα εξαρτημένα από τα ορυκτά καύσιμα και συνοδεύονται από σημαντικές εκπομπές CO₂e, κυρίως κατά τη φάση χρήσης τους.

Τα υβριδικά οχήματα (Hybrid Electric Vehicles, HEVs) αποτελούν ενδιάμεση τεχνολογική λύση, καθώς συνδυάζουν θερμικό κινητήρα με ηλεκτρικό σύστημα υποβοήθησης και δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας. Η τεχνολογία αυτή μειώνει τη συνολική κατανάλωση καυσίμου και βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση, ιδίως σε αστικές συνθήκες κυκλοφορίας, χωρίς όμως να εξαλείφει τις εκπομπές CO₂e, καθώς εξακολουθεί να βασίζεται στην καύση ορυκτών καυσίμων. Για τον λόγο αυτό, τα HEVs θεωρούνται συχνά μεταβατική τεχνολογία, με περιβαλλοντικά οφέλη έναντι των ICEVs, αλλά και με περιορισμούς όταν εξετάζονται στο πλαίσιο μακροχρόνιων στόχων απανθρακοποίησης.

Τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία (Battery Electric Vehicles – BEVs) διαφοροποιούνται ουσιαστικά από τις δύο προηγούμενες τεχνολογίες, καθώς κινούνται αποκλειστικά με ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται σε μπαταρίες Li-ion. Κατά τη φάση χρήσης δεν εμφανίζουν άμεσες εκπομπές εξάτμισης, ενώ η ενεργειακή τους απόδοση είναι υψηλότερη σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα, ιδιαίτερα σε αστικές συνθήκες χαμηλών ταχυτήτων, συχνών στάσεων και εκκινήσεων.

Ωστόσο, η περιβαλλοντική αξιολόγηση των BEVs απαιτεί ολοκληρωμένη θεώρηση κύκλου ζωής, καθώς το τελικό ανθρακικό τους αποτύπωμα επηρεάζεται από την παραγωγή της μπαταρίας, την προέλευση κρίσιμων πρώτων υλών, όπως το λίθιο, το νικέλιο και το κοβάλτιο, καθώς και από την ανθρακική ένταση του ενεργειακού μίγματος που χρησιμοποιείται για τη φόρτισή τους (IEA, 2023 & ICCT, 2021 & Nordelöf et al., 2014).

Η ανάγκη αυτής της ολοκληρωμένης θεώρησης γίνεται ακόμη πιο εμφανής όταν εξετάζεται η αστική διάσταση των μεταφορών. Στην ελληνική περίπτωση, πρόσφατη μελέτη για τη Θεσσαλονίκη έδειξε ότι οι οδικές μεταφορές αποτελούν σημαντική πηγή αστικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης, με συμβολή στις ημερήσιες συγκεντρώσεις NO₂ και PM_{2.5}, ιδίως κατά τη χειμερινή περίοδο. Το εύρημα αυτό δείχνει ότι οι τεχνολογίες κίνησης δεν

επηρεάζουν μόνο την κλιματική διάσταση των εκπομπών CO₂e, αλλά και την ποιότητα του αστικού περιβάλλοντος και τη δημόσια υγεία (Liora et al., 2025).

Παράλληλα, η τοπική βιβλιογραφία για τη Θεσσαλονίκη αναδεικνύει ότι η περιβαλλοντική βελτίωση του τομέα των μεταφορών δεν εξαρτάται μόνο από την τεχνολογία του μεμονωμένου οχήματος, αλλά και από τον συνολικό σχεδιασμό της αστικής κινητικότητας. Σενάρια που συνδυάζουν μείωση της κυκλοφορίας ιδιωτικών οχημάτων, ενίσχυση της δημόσιας συγκοινωνίας και χρήση ηλεκτρικών λεωφορείων μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές μειώσεις ρύπων και CO₂, γεγονός που υπογραμμίζει τη συστημική διάσταση της ηλεκτροκίνησης σε αστικό περιβάλλον (Liora et al., 2021).

Παρά τις τεχνολογικές καινοτομίες, οι συνολικές εκπομπές του τομέα των μεταφορών δεν μειώνονται ακόμη με τον ρυθμό που απαιτείται για την επίτευξη των διεθνών κλιματικών στόχων (IPCC, 2021).

Συνεπώς, η μετάβαση σε καθαρότερες τεχνολογίες κινητικότητας δεν αποτελεί μόνο τεχνολογική επιλογή, αλλά αναγκαίο στοιχείο ενός ευρύτερου μετασχηματισμού του τομέα των μεταφορών. Ο μετασχηματισμός αυτός πρέπει να συνδυάζει τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, τον περιορισμό της κυκλοφοριακής ρύπανσης, την ενίσχυση της δημόσιας συγκοινωνίας και την ενσωμάτωση λύσεων χαμηλού άνθρακα στην αστική κινητικότητα (IPCC, 2021 & Liora et al., 2021 & Liora et al., 2025).

2.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά τεχνολογία και η ηλεκτροκίνηση ως διεθνής στρατηγική απανθρακοποίησης

ICEV

Στην περίπτωση των συμβατικών οχημάτων με κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICEVs), οι σημαντικότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις συνδέονται με τη φάση χρήσης. Η καύση βενζίνης ή πετρελαίου οδηγεί σε άμεσες εκπομπές CO_{2e}, ενώ το τελικό αποτύπωμα επηρεάζεται από την κατανάλωση καυσίμου, την ενεργειακή απόδοση του οχήματος, τις οδηγικές συνθήκες, το ετήσιο χιλιομετρικό φορτίο και τις απαιτήσεις συντήρησης. Για τον λόγο αυτό στα ICEVs το μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών κύκλου ζωής συγκεντρώνεται συνήθως στη φάση λειτουργίας, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα ευάλωτα σε πολιτικές περιορισμού της χρήσης ορυκτών καυσίμων και μείωσης των εκπομπών στον τομέα των μεταφορών (IEA, 2023 & ICCT, 2021).

HEV

Τα υβριδικά οχήματα (HEVs) εμφανίζουν χαμηλότερες εκπομπές σε σχέση με τα ICEVs, κυρίως λόγω της βελτιωμένης ενεργειακής απόδοσης, της ηλεκτρικής υποβοήθησης και της ανάκτησης ενέργειας κατά την πέδηση. Τα οφέλη αυτά είναι περισσότερο εμφανή σε αστικές συνθήκες κυκλοφορίας, όπου οι συχνές στάσεις και εκκινήσεις επιτρέπουν αποτελεσματικότερη αξιοποίηση του ηλεκτρικού συστήματος.

Ωστόσο, τα HEVs εξακολουθούν να βασίζονται στην καύση υγρών καυσίμων και, συνεπώς, δεν εξαλείφουν τις άμεσες εκπομπές κατά τη χρήση. Επιπλέον, το διπλό σύστημα κίνησης αυξάνει την τεχνική πολυπλοκότητα του οχήματος και επηρεάζει τόσο τη φάση παραγωγής όσο και τις απαιτήσεις συντήρησης. Έτσι, τα HEVs μπορούν να θεωρηθούν μεταβατική τεχνολογία, με περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα έναντι των ICEVs, αλλά με περιορισμένο ρόλο σε μακροχρόνια σενάρια πλήρους απανθρακοποίησης των μεταφορών (ICCT, 2021 & IEA, 2023 & Nordelöf et al., 2014).

BEV

Στα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία (BEVs), το περιβαλλοντικό βάρος μετατοπίζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από τη φάση χρήσης προς τη φάση παραγωγής. Η απουσία άμεσων εκπομπών εξάτμισης κατά την οδήγηση αποτελεί σημαντικό περιβαλλοντικό πλεονέκτημα, ιδιαίτερα σε αστικά περιβάλλοντα. Ωστόσο, το πλεονέκτημα αυτό δεν σημαίνει μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η παραγωγή του οχήματος και κυρίως της μπαταρίας Li-ion συνεπάγεται αυξημένες αρχικές εκπομπές CO_{2e}, οι οποίες πρέπει να αντισταθμιστούν κατά τη φάση χρήσης μέσω χαμηλότερων εκπομπών ανά χιλιόμετρο.

Κατά συνέπεια, η συνολική περιβαλλοντική επίδοση των BEVs εξαρτάται καθοριστικά από δύο παραμέτρους: το αποτύπωμα παραγωγής της μπαταρίας και την ανθρακική ένταση του ηλεκτρικού μίγματος φόρτισης (Hawkins et al., 2013 & Ellingsen et al., 2016 & ICCT, 2021 & Negri and Bieker, 2025).

Σε αυτό το πλαίσιο, η ηλεκτροκίνηση έχει αναδειχθεί σε βασικό πυλώνα της ευρωπαϊκής στρατηγικής για τη μείωση των εκπομπών στον τομέα των οδικών μεταφορών. Η σημασία της συνδέεται με την απουσία άμεσων εκπομπών κατά τη χρήση, τη δυνατότητα τροφοδότησης των BEVs από ολοένα καθαρότερα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής, τη μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενα υγρά καύσιμα και τη δυνατότητα μελλοντικής ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων σε ευφυή ενεργειακά δίκτυα.

Ωστόσο, η ηλεκτροκίνηση δεν πρέπει να παρουσιάζεται ως τεχνολογία μηδενικών επιπτώσεων, αλλά ως τεχνολογία της οποίας το περιβαλλοντικό όφελος αυξάνεται όσο μειώνεται η ανθρακική ένταση της ηλεκτρικής ενέργειας και όσο βελτιώνονται οι διαδικασίες παραγωγής και ανακύκλωσης των μπαταριών (European Commission, 2021 & ICCT, 2021).

Για την ελληνική περίπτωση, η στρατηγική σημασία της ηλεκτροκίνησης συνδέεται άμεσα με τη σταδιακή αναδιάρθρωση του ηλεκτροπαραγωγικού μίγματος. Η μείωση της συμμετοχής του λιγνίτη και η αύξηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας δημιουργούν προϋποθέσεις βελτίωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των BEVs κατά τη φάση χρήσης.

Επομένως, η αξιολόγηση της ηλεκτροκίνησης στην Ελλάδα δεν μπορεί να αποσυνδεθεί από την πορεία απανθρακοποίησης του ηλεκτρικού συστήματος και από τους στόχους της εθνικής ενεργειακής πολιτικής (IPTO/ADMIE, 2023b & Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2024).

2.3 Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ): βασικές έννοιες, στάδια και εφαρμογή στις τεχνολογιών μεταφορών

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ ή Life Cycle Assessment, LCA) αποτελεί διεθνώς καθιερωμένη μεθοδολογική προσέγγιση για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος, συστήματος ή υπηρεσίας σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του. Στην περίπτωση των οχημάτων, η AKZ επιτρέπει την αποτίμηση των επιπτώσεων όχι μόνο κατά τη φάση χρήσης, αλλά και κατά την παραγωγή του οχήματος, την παραγωγή καυσίμου ή ηλεκτρικής ενέργειας, τη συντήρηση και το τέλος ζωής. Η μεθοδολογία βασίζεται στα διεθνή πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044, τα οποία ορίζουν τέσσερα βασικά στάδια ανάλυσης (ISO, 2006a & ISO, 2006b).

1. Καθορισμός σκοπού και πεδίου εφαρμογής

Στο στάδιο αυτό προσδιορίζονται ο σκοπός της μελέτης, η λειτουργική μονάδα, τα όρια του συστήματος, οι βασικές παραδοχές και το επίπεδο λεπτομέρειας της ανάλυσης. Ουσιαστικά καθορίζεται τι ακριβώς αξιολογείται και υπό ποιες μεθοδολογικές προϋποθέσεις.

2. Απογραφή δεδομένων (Life Cycle Inventory, LCI)

Περιλαμβάνει τη συλλογή και ποσοτικοποίηση των εισροών και εκροών που σχετίζονται με το εξεταζόμενο σύστημα. Στην περίπτωση των οχημάτων, οι εισροές μπορεί να αφορούν ενέργεια, υλικά, καύσιμα ή ηλεκτρική ενέργεια, ενώ οι εκροές περιλαμβάνουν κυρίως εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και άλλες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις.

3. Εκτίμηση επιπτώσεων (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)

Στο στάδιο αυτό τα δεδομένα της απογραφής μετατρέπονται σε δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Στην παρούσα εργασία, η έμφαση δίνεται στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, εκφρασμένες ως ισοδύναμα διοξειδίου του άνθρακα (CO₂e), με βασικό δείκτη αξιολόγησης τις εκπομπές ανά διανυόμενο χιλιόμετρο.

4. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Περιλαμβάνει την ανάλυση των αποτελεσμάτων, την αξιολόγηση των περιορισμών, τον έλεγχο της συνέπειας των παραδοχών και τη διατύπωση συμπερασμάτων. Το στάδιο αυτό είναι κρίσιμο, καθώς συνδέει τα αριθμητικά ευρήματα με τον αρχικό σκοπό της μελέτης και επιτρέπει την εξαγωγή τεκμηριωμένων συμπερασμάτων.

Η AKZ χρησιμοποιείται ευρέως για την αξιολόγηση των διαφορετικών τεχνολογιών κίνησης οχημάτων. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές προσεγγίσεις Well-to-Wheel, εξετάζει:

- την παραγωγή οχήματος, του συστήματος κίνησης και, στην περίπτωση των BEVs, των μπαταριών τους,
- την παραγωγή καυσίμου ή της ηλεκτρικής ενέργειας,
- τη χρήση και την κατανάλωση ενέργειας,
- τη συντήρηση και
- το τέλος ζωής των οχημάτων και τη διαδικασία ανακύκλωσης ή διάθεσης.

Το βασικό πλεονέκτημα της AKZ είναι ότι επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση τεχνολογιών με διαφορετική λειτουργική συμπεριφορά και διαφορετική χρονική κατανομή εκπομπών. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στη σύγκριση ICEVs, HEVs και BEVs, καθώς τα συμβατικά οχήματα εμφανίζουν το μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών τους κατά τη χρήση, ενώ τα ηλεκτρικά οχήματα εμφανίζουν αυξημένο αρχικό αποτύπωμα παραγωγής, κυρίως λόγω της μπαταρίας, αλλά χαμηλότερες εκπομπές κατά τη φάση λειτουργίας.

Η σύγχρονη βιβλιογραφία για το ανθρακικό αποτύπωμα των οχημάτων επιβεβαιώνει ότι η AKZ αποτελεί κατάλληλη προσέγγιση για την αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των τεχνολογιών μεταφορών, καθώς μετατοπίζει την ανάλυση από τις άμεσες εκπομπές χρήσης σε μια συνολικότερη αποτίμηση, η οποία περιλαμβάνει την εξόρυξη πρώτων υλών, την παραγωγή, τη χρήση και το τέλος ζωής (Burchart and Przytuła, 2024).

Παράλληλα, έχει αναδειχθεί ότι η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων εξαρτάται από τη σαφή διατύπωση των ορίων του συστήματος, της λειτουργικής μονάδας και των παραδοχών για το ενεργειακό μίγμα, τη διάρκεια ζωής του οχήματος, την κατανάλωση ενέργειας, την παραγωγή μπαταριών και την πιθανή ανακύκλωση στο τέλος ζωής (ISO, 2006a & ISO, 2006b & Ekvall and Weidema, 2004 & Burchart and Przytuła, 2024). Επομένως, η διαφάνεια των παραδοχών αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αξιοπιστία μιας συγκριτικής AKZ.

Στην περίπτωση των ηλεκτρικών οχημάτων, η AKZ είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, επειδή επιτρέπει τη συνεκτίμηση τόσο των αυξημένων εκπομπών παραγωγής, ιδίως λόγω της μπαταρίας, όσο και των εκπομπών που συνδέονται με την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη φόρτιση. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγεται η μονοδιάστατη θεώρηση των BEVs ως οχημάτων «μηδενικών εκπομπών» και αναδεικνύεται η ανάγκη συνολικής αξιολόγησης σε όρους κύκλου ζωής.

Επιπλέον, οι πρόσφατες ανασκοπήσεις υπογραμμίζουν ότι δεν υπάρχει πλήρης τυποποίηση και ομοιομορφία των μεθόδων αποτίμησης του ανθρακικού αποτυπώματος των οχημάτων, γεγονός που δυσκολεύει την άμεση σύγκριση διαφορετικών μελετών. Για τον λόγο αυτό, η διαφάνεια ως προς τις παραδοχές, τις πηγές δεδομένων και τα όρια της ανάλυσης αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αξιοπιστία των συμπερασμάτων μιας LCA στον τομέα των μεταφορών (Burchart and Przytuła, 2024).

Συνεπώς, η βιβλιογραφία των τελευταίων ετών συγκλίνει στο ότι η περιβαλλοντική υπεροχή των BEVs δεν μπορεί να τεκμηριωθεί αποκλειστικά από την απουσία άμεσων εκπομπών εξάτμισης. Αντίθετα, πρέπει να αξιολογείται με βάση το αν, σε όλο τον κύκλο ζωής τους, εμφανίζουν μικρότερο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα από τα αντίστοιχα συμβατικά ή υβριδικά οχήματα. Η παραδοχή αυτή αποτελεί βασική μεθοδολογική αφετηρία της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

2.4 Η συμβολή της παραγωγής οχήματος στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα

Η παραγωγή ενός οχήματος αποτελεί σημαντικό στάδιο του συνολικού ανθρακικού αποτυπώματος, καθώς περιλαμβάνει την εξόρυξη και επεξεργασία πρώτων υλών, την παραγωγή επιμέρους εξαρτημάτων, τη συναρμολόγηση και τη μεταφορά υλικών και συστημάτων (Hawkins et al., 2013 & Nordelöf et al., 2014). Στα συμβατικά οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICEVs), το στάδιο αυτό περιλαμβάνει ενεργοβόρες διεργασίες για την κατασκευή του κινητήρα, των συστημάτων μετάδοσης, του πλαισίου, των αναρτήσεων και των υπόλοιπων μηχανικών μερών του οχήματος.

Παρότι στα ICEVs το μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών κύκλου ζωής συνδέεται συνήθως με τη φάση χρήσης, το στάδιο παραγωγής παραμένει σημαντικό για μια ολοκληρωμένη αποτίμηση κύκλου ζωής.

Στα υβριδικά οχήματα (HEVs), η φάση παραγωγής παρουσιάζει ενδιαμέσο χαρακτήρα. Από τη μία πλευρά, διατηρούν τον θερμικό κινητήρα και μεγάλο μέρος των μηχανικών συστημάτων των ICEVs. Από την άλλη, ενσωματώνουν ηλεκτρικό κινητήρα, σύστημα ανάκτησης ενέργειας και μικρότερη μπαταρία σε σχέση με τα BEVs.

Συνεπώς, το αποτύπωμα παραγωγής τους μπορεί να είναι υψηλότερο από εκείνο ενός αντίστοιχου ICEV, αλλά χαμηλότερο από ένα BEV με μεγάλη μπαταρία. Η ενδιαμέση αυτή θέση είναι σημαντική για τη συγκριτική αξιολόγηση των τριών τεχνολογιών σε όρους κύκλου ζωής (Nordelöf et al., 2014 & ICCT, 2021).

Στα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία (BEVs), το περιβαλλοντικό βάρος της παραγωγής είναι συνήθως αυξημένο σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα, κυρίως λόγω της κατασκευής της μπαταρίας Li-ion. Η παραγωγή της μπαταρίας απαιτεί εξόρυξη, επεξεργασία και μεταφορά κρίσιμων πρώτων υλών, όπως το λίθιο, το νικέλιο, το κοβάλτιο, ο γραφίτης και άλλα μέταλλα, καθώς και ενεργοβόρες βιομηχανικές διεργασίες για την κατασκευή των κυψελών και των συστοιχιών.

Για τον λόγο αυτό, τα BEVs εμφανίζουν συχνά υψηλότερο αρχικό αποτύπωμα παραγωγής, το οποίο όμως μπορεί να αντισταθμιστεί κατά τη φάση χρήσης, εφόσον οι εκπομπές φόρτισης είναι χαμηλότερες από τις αντίστοιχες εκπομπές καύσης ενός ICEV (Hawkins et al., 2013 & Ellingsen et al., 2016 & ICCT, 2021).

Η ανακύκλωση και η ανάκτηση υλικών στο τέλος ζωής μπορούν να περιορίσουν μέρος των επιπτώσεων, ιδίως όταν επιτρέπουν τη μείωση της ανάγκης για πρωτογενή εξόρυξη και παραγωγή κρίσιμων μετάλλων (Dunn et al., 2012 & European Environment Agency, 2018 & Burchart and Przytuła, 2024).

Ωστόσο, τα οφέλη αυτά εξαρτώνται από την τεχνολογία ανακύκλωσης, την απόδοση ανάκτησης υλικών και το ενεργειακό μίγμα που χρησιμοποιείται στις σχετικές διεργασίες. Επομένως, η συμβολή της ανακύκλωσης πρέπει να αντιμετωπίζεται ως δυνητικός παράγοντας μείωσης του αποτυπώματος και όχι ως αυτόματη εξουδετέρωση των επιπτώσεων παραγωγής.

Συνεπώς, η φάση παραγωγής απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στην ΑΚΖ των οχημάτων, διότι καθορίζει το αρχικό περιβαλλοντικό «χρέος» κάθε τεχνολογίας πριν από τη φάση χρήσης. Στην περίπτωση των BEVs, το αρχικό αυτό αποτύπωμα είναι αυξημένο λόγω της μπαταρίας, αλλά η τελική περιβαλλοντική αξιολόγηση εξαρτάται από το αν οι χαμηλότερες εκπομπές χρήσης μπορούν να το αντισταθμίσουν σε βάθος χρόνου και χιλιομέτρων. Η σύνδεση αυτή προετοιμάζει την ανάλυση της επόμενης ενότητας, όπου εξετάζεται ειδικότερα η σημασία των μπαταριών Li-ion στο συνολικό αποτύπωμα των ηλεκτρικών οχημάτων.

2.5 Η σημασία της μπαταρίας Li-ion στο αποτύπωμα των BEVs: διεθνής βιβλιογραφία

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου (Lithium-ion batteries, Li-ion) αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα επιμέρους συστήματα των αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων με μπαταρία (BEVs) και μία από τις βασικότερες πηγές εκπομπών CO_{2e} κατά το στάδιο παραγωγής τους. Η διεθνής βιβλιογραφία έχει τεκμηριώσει ότι η παραγωγή μπαταριών αυξάνει το αρχικό ανθρακικό αποτύπωμα των BEVs σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει απαραίτητα υψηλότερο συνολικό αποτύπωμα σε όρους κύκλου ζωής. Η τελική περιβαλλοντική αξιολόγηση εξαρτάται από τη χρήση του οχήματος, το ενεργειακό μίγμα φόρτισης, τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και τη δυνατότητα αντιστάθμισης των αρχικών εκπομπών μέσω χαμηλότερων εκπομπών κατά τη φάση λειτουργίας (Notter et al., 2010 & Dunn et al., 2012 & Hawkins et al., 2013 & Ellingsen et al., 2014)).

Το αποτύπωμα παραγωγής μίας μπαταρίας μπορεί να έχει σημαντική διακύμανση, αναλόγως με:

- τη χώρα παραγωγής και το ενεργειακό της μίγμα,
- την τεχνολογία καθόδου/ανόδου*, η οποία επηρεάζει την απόδοση, την ασφάλεια και το κόστος της μπαταρίας,
- την ενεργειακή πυκνότητα της μπαταρίας, δηλαδή την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί ανά μονάδα μάζας ή όγκου,
- τη γεωγραφική προέλευση των πρώτων υλών.

Το εύρος των εκτιμήσεων για τις εκπομπές παραγωγής μπαταριών παρουσιάζει σημαντική διακύμανση στη διεθνή βιβλιογραφία. Η διακύμανση αυτή καθιστά αναγκαία τη χρήση αντιπροσωπευτικών, τεκμηριωμένων και κατά το δυνατόν επικαιροποιημένων δεδομένων σε κάθε μελέτη AKZ.

Διαφορετικές παραδοχές για το μέγεθος της μπαταρίας, την τεχνολογία παραγωγής, το ενεργειακό μίγμα του εργοστασίου και τη διάρκεια ζωής μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές αποκλίσεις στα αποτελέσματα και, κατά συνέπεια, στα συμπεράσματα της σύγκρισης μεταξύ BEVs και ICEVs.

Οι πρόσφατες ανασκοπήσεις δείχνουν ότι η διακύμανση αυτή δεν οφείλεται μόνο στις τεχνικές προδιαγραφές της μπαταρίας, αλλά και στη μεθοδολογική διαφοροποίηση των επιμέρους μελετών. Παράγοντες όπως τα όρια του συστήματος, η λειτουργική μονάδα, η πηγή ηλεκτρικής ενέργειας του εργοστασίου παραγωγής, η απόδοση της παραγωγικής διαδικασίας, η αναμενόμενη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και η πιθανότητα αντικατάστασής της κατά τη διάρκεια ζωής του οχήματος μπορούν να μεταβάλουν αισθητά τα τελικά αποτελέσματα (Burchart and Przytuła, 2024).

* αναφέρεται στη δημιουργία των θετικών (κάθοδος) και αρνητικών (άνοδος) ηλεκτροδίων από συγκεκριμένα υλικά (οξειδία μετάλλων, γραφίτης) τα οποία επιτρέπουν την κίνηση ιόντων λιθίου (ή άλλων ιόντων όπως Na⁺) μέσω ηλεκτρολύτη, μεταφέροντας ενέργεια κατά την εκφόρτιση και αποθηκεύοντάς την κατά τη φόρτιση, καθορίζοντας κρίσιμα την απόδοση, την ασφάλεια και το κόστος της μπαταρίας (Dunn et al., 2015 & Burchart and Przytuła, 2024).

Η ανακύκλωση των μπαταριών αποτελεί επίσης κρίσιμη παράμετρο της συνολικής περιβαλλοντικής αποτίμησης. Η ανάκτηση υλικών μπορεί να μειώσει την ανάγκη για πρωτογενή εξόρυξη και να περιορίσει μέρος των εκπομπών που συνδέονται με την παραγωγή νέων μπαταριών.

Οι υδρομεταλλουργικές μέθοδοι ανακύκλωσης εμφανίζονται στη βιβλιογραφία ως λιγότερο ενεργοβόρες σε σχέση με ορισμένες πυρομεταλλουργικές προσεγγίσεις, γεγονός που ενισχύει τη σημασία της κυκλικής οικονομίας στη μελλοντική αποτίμηση των BEVs. Ωστόσο, τα περιβαλλοντικά οφέλη της ανακύκλωσης εξαρτώνται από την τεχνολογία που εφαρμόζεται, το ποσοστό ανάκτησης υλικών και το ενεργειακό μίγμα των σχετικών διεργασιών (Dunn et al., 2012 & European Environment Agency, 2018 & Burchart and Przytuła, 2024).

Για τον λόγο αυτό, η χρήση αντιπροσωπευτικών και γεωγραφικά κατάλληλων δεδομένων για την παραγωγή μπαταριών είναι απαραίτητη, ιδίως όταν η ανάλυση αποσκοπεί σε συγκρίσεις μεταξύ χωρών ή σε προβολές μελλοντικών σεναρίων απανθρακοποίησης. Στην παρούσα εργασία, η παράμετρος αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς το αυξημένο αρχικό αποτύπωμα παραγωγής των BEVs επηρεάζει άμεσα τον υπολογισμό του περιβαλλοντικού break-even distance έναντι των ICEVs και HEVs.

2.6 Ο ρόλος του ενεργειακού μίγματος στις εκπομπές χρήσης των BEVs

Το περιβαλλοντικό όφελος ενός αμιγώς ηλεκτρικού οχήματος με μπαταρία (BEV) εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την ανθρακική ένταση της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη φόρτισή του κατά τη φάση χρήσης. Παρότι τα BEVs δεν εμφανίζουν άμεσες εκπομπές εξάτμισης, οι έμμεσες εκπομπές τους συνδέονται με τον τρόπο παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η διεθνής βιβλιογραφία δείχνει ότι το ενεργειακό μίγμα φόρτισης αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν το τελικό ανθρακικό αποτύπωμα των ηλεκτρικών οχημάτων. Σε ηλεκτροπαραγωγικά συστήματα με χαμηλή ένταση άνθρακα, υψηλή συμμετοχή Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας ή άλλων πηγών χαμηλών εκπομπών, το περιβαλλοντικό πλεονέκτημα των BEVs ενισχύεται σημαντικά. Αντίθετα, σε συστήματα που εξακολουθούν να βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε άνθρακα, λιγνίτη ή άλλα ορυκτά καύσιμα, οι έμμεσες εκπομπές φόρτισης παραμένουν υψηλότερες και περιορίζουν το συνολικό όφελος των BEVs (ICCT, 2021 & IEA, 2023 & Burchart and Przytuła, 2024 & Negri and Bieker, 2025).

Η διαφοροποίηση αυτή εξηγεί γιατί το ίδιο BEV μπορεί να εμφανίζει διαφορετικό αποτύπωμα κύκλου ζωής ανάλογα με τη χώρα και τη χρονική περίοδο χρήσης του. Για παράδειγμα, η φόρτιση σε ένα ηλεκτρικό σύστημα υψηλής ανθρακικής έντασης οδηγεί σε υψηλότερες έμμεσες εκπομπές ανά kWh, ενώ η φόρτιση σε ένα σύστημα με αυξημένη συμμετοχή ΑΠΕ μειώνει τις εκπομπές χρήσης ανά χιλιόμετρο. Επομένως, το ενεργειακό μίγμα δεν αποτελεί δευτερεύουσα παράμετρο, αλλά κεντρικό στοιχείο της συγκριτικής αξιολόγησης BEVs και ICEVs σε όρους AKZ.

Η παρατήρηση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία για την παρούσα Διπλωματική Εργασία, καθώς συνδέει άμεσα την περιβαλλοντική αποτίμηση των BEVs με τη δυναμική εξέλιξη του ελληνικού ηλεκτροπαραγωγικού μίγματος. Η σταδιακή μείωση της συμμετοχής του λιγνίτη, η αύξηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και η συνολική πορεία απανθρακοποίησης του ηλεκτρικού συστήματος επηρεάζουν άμεσα τις εκπομπές που αποδίδονται στη φόρτιση των BEVs. Συνεπώς, η περιβαλλοντική επίδοση των ηλεκτρικών οχημάτων στην Ελλάδα δεν μπορεί να θεωρηθεί στατική, αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με την εξέλιξη του ενεργειακού μίγματος (IPTO/ADMIE, 2023a & Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2024 & European Commission, 2025).

Για τον λόγο αυτό, η εξέταση διαφορετικών χρονικών οριζόντων, όπως το 2026, το 2030 και το 2050, είναι μεθοδολογικά χρήσιμη, καθώς επιτρέπει την αποτύπωση της μεταβολής του ανθρακικού αποτυπώματος των BEVs υπό διαφορετικές συνθήκες ηλεκτροπαραγωγής. Η προσέγγιση αυτή συνδέει το θεωρητικό πλαίσιο της AKZ με τα σενάρια που αναπτύσσονται στη συνέχεια της εργασίας και με τον υπολογισμό του περιβαλλοντικού break-even distance.

2.7 Το περιβαλλοντικό break-even distance στη διεθνή βιβλιογραφία

Το περιβαλλοντικό break-even distance αποτελεί κρίσιμο δείκτη στη συγκριτική αξιολόγηση συμβατικών οχημάτων εσωτερικής καύσης (Internal Combustion Engine Vehicles, ICEVs) και ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας (Battery Electric Vehicles, BEVs). Ορίζεται ως η διανυόμενη απόσταση στην οποία οι σωρευτικές εκπομπές CO₂e των δύο τεχνολογιών εξισώνονται. Από το σημείο αυτό και μετά, υπό τις συγκεκριμένες παραδοχές της ανάλυσης, το BEV εμφανίζει χαμηλότερες σωρευτικές εκπομπές CO₂e από το αντίστοιχο ICEV. Ο δείκτης αυτός αφορά αποκλειστικά την περιβαλλοντική εξισορρόπηση εκπομπών και δεν πρέπει να συγχέεται με οικονομικούς δείκτες, όπως το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας ή το οικονομικό σημείο απόσβεσης (ICCT, 2021 & Negri and Bieker, 2025).

Η διεθνής βιβλιογραφία δείχνει ότι τα BEVs μπορούν να εμφανίζουν χαμηλότερο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα, ιδίως όταν η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται για τη φόρτισή τους προέρχεται από συστήματα χαμηλότερης ανθρακικής έντασης.

Ωστόσο, το μέγεθος του περιβαλλοντικού πλεονεκτήματος δεν είναι σταθερό. Επηρεάζεται από την ένταση άνθρακα της ηλεκτροπαραγωγής, το αποτύπωμα παραγωγής της μπαταρίας, την ενεργειακή κατανάλωση κατά τη χρήση, τη διάρκεια ζωής του οχήματος και τις μεθοδολογικές παραδοχές της εκάστοτε Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Ellingsen et al., 2016 & ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024 & Negri and Bieker, 2025).

Παράλληλα, το break-even distance δεν αποτελεί σταθερό μέγεθος, αλλά παρουσιάζει σημαντική διακύμανση μεταξύ διαφορετικών μελετών. Οι τιμές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία διαφοροποιούνται ανάλογα με το τεχνολογικό, γεωγραφικό και ενεργειακό πλαίσιο της ανάλυσης. Σε ηλεκτροπαραγωγικά συστήματα χαμηλής ανθρακικής έντασης, η περιβαλλοντική εξισορρόπηση μπορεί να επιτυγχάνεται σε σχετικά μικρότερες αποστάσεις, ενώ σε συστήματα με υψηλότερη εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα η απόσταση αυτή αυξάνεται.

Οι βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα είναι:

- το ενεργειακό μίγμα (ένταση άνθρακα του ενεργειακού μίγματος φόρτισης),
- το μέγεθος, η χημεία και το αποτύπωμα παραγωγής της μπαταρίας,
- η μάζα και η κατηγορία του οχήματος,
- η αποδοτικότητα του κινητήρα,
- η ενεργειακή κατανάλωση (κατά τη χρήση),
- η συνολική διάρκεια ζωής και το συνολικό χιλιομετρικό φορτίο του οχήματος,
- οι παραδοχές για συντήρηση, αντικατάσταση μπαταρίας, ανακύκλωση και τέλος ζωής.

Επομένως, το break-even distance πρέπει να ερμηνεύεται ως δυναμικός δείκτης περιβαλλοντικής σύγκρισης και όχι ως σταθερή ή καθολικά ισχύουσα τιμή. Η τιμή του μεταβάλλεται ανάλογα με τις παραδοχές της μελέτης και, κυρίως, με την εξέλιξη του ηλεκτροπαραγωγικού συστήματος στο οποίο φορτίζεται το ηλεκτρικό όχημα. Για τον λόγο

αυτό, ο δείκτης είναι ιδιαίτερα χρήσιμος σε μελέτες που εξετάζουν διαφορετικά χρονικά σενάρια απανθρακοποίησης (ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024).

Η σημασία του δείκτη αυτού ενισχύεται ιδιαίτερα στην ελληνική περίπτωση, όπου το ενεργειακό μίγμα μεταβάλλεται λόγω της σταδιακής απολιγνιτοποίησης, της αύξησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και της ευρύτερης πορείας απανθρακοποίησης του ηλεκτρικού συστήματος. Σε ένα τέτοιο πλαίσιο, η μείωση της έντασης άνθρακα της ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερη απόσταση περιβαλλοντικής εξισορρόπησης για τα BEVs στα μελλοντικά σενάρια. Επομένως, η εξέταση των ετών 2026, 2030 και 2050 επιτρέπει την αποτύπωση της επίδρασης που έχει η εξέλιξη του ελληνικού ενεργειακού μίγματος στο break-even distance (IPTO/ADMIE, 2023b & Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2024).

Οι διαφοροποιήσεις αυτές υπογραμμίζουν την ανάγκη για τοπικά προσαρμοσμένη και χρονικά διαφοροποιημένη ανάλυση. Η παρούσα Διπλωματική Εργασία υιοθετεί αυτή τη λογική, εξετάζοντας το περιβαλλοντικό break-even distance των BEVs σε σχέση με τα ICEVs και HEVs υπό διαφορετικά ελληνικά ενεργειακά σενάρια.

2.8 Κριτική αποτίμηση διεθνών μελετών LCA για ηλεκτρικά οχήματα και κενά έρευνας

Η διεθνής βιβλιογραφία για την Ανάλυση Κύκλου Ζωής των ηλεκτρικών οχημάτων παρουσιάζει σημαντική εξέλιξη κατά τις δύο τελευταίες δεκαετίες. Οι πρώτες μελέτες επικεντρώθηκαν κυρίως στη σύγκριση των συνολικών εκπομπών μεταξύ συμβατικών και ηλεκτρικών οχημάτων, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στο αυξημένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής μπαταριών και στη συμβολή του στα αρχικά στάδια του κύκλου ζωής (Notter et al., 2010 & Hawkins et al., 2013 & Ellingsen et al., 2014 & Ellingsen et al., 2016).

Μεταγενέστερες προσεγγίσεις ενσωμάτωσαν περισσότερο σύνθετες παραμέτρους, όπως η προέλευση της ηλεκτρικής ενέργειας, η διάρκεια ζωής του οχήματος, η ενεργειακή πυκνότητα των συσσωρευτών του, η ανακύκλωση και η γεωγραφική διαφοροποίηση του ενεργειακού μίγματος. Η διεύρυνση αυτή κατέστησε τις αναλύσεις πιο ολοκληρωμένες, αλλά ταυτόχρονα ανέδειξε τη μεγάλη ευαισθησία των αποτελεσμάτων σε μεθοδολογικές επιλογές και παραδοχές (ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024 & Negri and Bieker, 2025).

Η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων δεν είναι πάντα άμεση, διότι οι μελέτες διαφοροποιούνται ως προς τη λειτουργική μονάδα, τα όρια του συστήματος, τις υποθέσεις για την παραγωγή και αντικατάσταση της μπαταρίας, το ενεργειακό μίγμα φόρτισης και τον τρόπο ενσωμάτωσης της ανακύκλωσης.

Για τον λόγο αυτό, η παρούσα ενότητα δεν περιορίζεται σε απλή παράθεση συμπερασμάτων, αλλά επιχειρεί να αναδείξει τις βασικές μεθοδολογικές παραδοχές επιλεγμένων διεθνών μελετών και τα σημεία στα οποία αυτές συγκλίνουν ή αποκλίνουν μεταξύ τους.

Πίνακας 2.1. Συγκριτική αποτίμηση διεθνών μελετών LCA για ηλεκτρικά οχήματα.

Μελέτη	Περιοχή / αντικείμενο	Μέθοδος	Λειτουργική μονάδα	Παραδοχές	Κύριο αποτέλεσμα	Περιορισμός
Notter et al. (2010)	Ηλεκτρικό όχημα και μπαταρία Li-ion	LCA	km ή όχημα	Έμφαση στην παραγωγή μπαταρίας και στα υλικά της	Η μπαταρία συμβάλλει σημαντικά στο αποτύπωμα, αλλά δεν είναι ο μοναδικός καθοριστικός παράγοντας	Περιορισμένη δυναμική ανάλυση ενεργειακού μίγματος (grid mix)
Dunn et al. (2012)	Παραγωγή και ανακύκλωση μπαταριών	LCA / battery Materials	kg υλικού / μπαταρία	Πρωτογενή και ανακυκλωμένα υλικά	Η ανακύκλωση μπορεί να μειώσει σημαντικά ενεργειακές απαιτήσεις και εκπομπές	Δεν αποτελεί πλήρη LCA οχήματος
Hawkins et al. (2013)	EVs έναντι ICEVs	Comparative LCA	km κύκλου ζωής	Ευρωπαϊκό πλαίσιο, μπαταρίες Li-ion, παραγωγή και χρήση	Τα EVs έχουν υψηλότερο αποτύπωμα παραγωγής, αλλά χαμηλότερες εκπομπές χρήσης	Υψηλή ευαισθησία στο ενεργειακό μίγμα
Ellingsen et al. (2014)	Παραγωγή μπαταριών	LCA	kWh μπαταρίας	Διαφορετικά δεδομένα παραγωγής μπαταριών	Το αποτύπωμα μπαταρίας έχει μεγάλη διακύμανση	Υψηλή εξάρτηση από το παραγωγικό μίγμα της χώρας κατασκευής
ICCT (2021) / Negri and Bieker (2025)	Σύγκριση BEVs–ICEVs σε διεθνές / ευρωπαϊκό επίπεδο	Life-cycle GHG Analysis	gCO ₂ e/km	Διαφορετικά σενάρια ηλεκτρικού μίγματος	Τα BEVs εμφανίζουν χαμηλότερες εκπομπές κύκλου ζωής	Αποτελέσματα ανά ευρύτερη περιοχή, όχι ειδικά για ελληνικά έτη αναφοράς
Burchart & Przytuła	Ανασκόπηση carbon footprint οχημάτων	Literature Review	ποικίλλει	Διαφορετικά όρια συστήματος, λειτουργικές μονάδες και LCA assumptions	Η συγκρισιμότητα δυσχεραίνεται από διαφορετικές μεθοδολογικές επιλογές	Δεν παρέχει ενιαίο εθνικό σενάριο για την Ελλάδα
Negri & Bieker	Ευρωπαϊκή σύγκριση BEVs–ICEVs	LCA / ICCT approach	gCO ₂ e/km	Σύγχρονα δεδομένα ΕΕ και εξέλιξη ηλεκτρικού μίγματος	Τα BEVs αντισταθμίζουν, σχετικά νωρίς, το αυξημένο αρχικό αποτύπωμα	Δεν αναλύει σε βάθος, ειδικά, τα ελληνικά σενάρια για 2026/2030/2050

Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει των: Notter et al. (2010), Dunn et al. (2012), Hawkins et al. (2013), Ellingsen et al. (2014), ICCT (2021), Burchart and Przytuła (2024) και Negri and Bieker (2025).

Από τη σύγκριση των παραπάνω μελετών προκύπτει ότι η περιβαλλοντική υπεροχή των BEVs δεν μπορεί να αποτιμηθεί ανεξάρτητα από το ενεργειακό μίγμα που χρησιμοποιείται για τη φόρτισή τους.

Η σημασία του ενεργειακού μίγματος αναδεικνύεται ως κοινό εύρημα σε αρκετές συγκριτικές αναλύσεις LCA, καθώς οι εκπομπές χρήσης των BEVs εξαρτώνται άμεσα από τον τρόπο παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, τα ίδια οχήματα μπορούν να εμφανίζουν διαφορετικό ανθρακικό αποτύπωμα ανάλογα με τη χώρα, την περίοδο αναφοράς και την πορεία απανθρακοποίησης του ηλεκτρικού συστήματος (Hawkins et al., 2013 & ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024).

Οι μελέτες που υιοθετούν σταθερή τιμή ενεργειακού μίγματος καταλήγουν σε αποτελέσματα που αντανakλούν κυρίως τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή αναφοράς. Αντίθετα, μελέτες που ενσωματώνουν μελλοντικά ή δυναμικά σενάρια ηλεκτροπαραγωγής μπορούν να αποτυπώσουν καλύτερα τη σταδιακή απανθρακοποίηση του ηλεκτρικού συστήματος και, επομένως, τη μεταβαλλόμενη περιβαλλοντική επίδοση των BEVs. Το στοιχείο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για χώρες των οποίων το ενεργειακό μίγμα βρίσκεται σε φάση ταχείας μετάβασης.

Ένα δεύτερο κρίσιμο σημείο αφορά στις παραδοχές για την παραγωγή της μπαταρίας. Η βιβλιογραφία δείχνει ότι οι εκπομπές που προκύπτουν από την παραγωγή μπαταριών παρουσιάζουν σημαντικό εύρος τιμών, το οποίο σχετίζεται με την τεχνολογία της μπαταρίας, την ενεργειακή ένταση της παραγωγικής διαδικασίας, τη χώρα κατασκευής και τη δυνατότητα ανακύκλωσης. Επομένως, η επιλογή ενός μόνο συντελεστή παραγωγής μπαταρίας εισάγει αβεβαιότητες, οι οποίες πρέπει να αναγνωρίζονται και να εξετάζονται μέσω ανάλυσης ευαισθησίας (Dunn et al., 2012 & Ellingsen et al., 2016).

Συνολικά, η διεθνής βιβλιογραφία παρέχει ισχυρή βάση για τη σύγκριση ηλεκτρικών και συμβατικών οχημάτων, αλλά παρουσιάζει και σημαντικούς περιορισμούς ως προς τη μεταφορά των συμπερασμάτων από μία χώρα σε άλλη.

Οι διαφοροποιήσεις στη λειτουργική μονάδα, στα όρια του συστήματος, στις παραδοχές για την παραγωγή μπαταριών, στην ενσωμάτωση της ανακύκλωσης και στα σενάρια ηλεκτροπαραγωγής δυσχεραίνουν την άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, η απουσία εναρμονισμένων εθνικών προσεγγίσεων περιορίζει τη δυνατότητα ασφαλούς αξιοποίησης διεθνών συμπερασμάτων σε χώρες με ιδιαίτερα ενεργειακά και μεταφορικά χαρακτηριστικά.

Το ερευνητικό κενό που αναδεικνύεται αφορά την ανάγκη εφαρμογής μιας διαφανούς, συγκριτικής και προσαρμοσμένης στην ελληνική περίπτωση LCA. Η ελληνική περίπτωση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς συνδυάζει μεταβαλλόμενο ενεργειακό μίγμα, αυξανόμενη συμμετοχή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ιδιαίτερες συνθήκες αστικών και υπεραστικών μετακινήσεων.

Κατά συνέπεια, η αξιολόγηση των BEVs στην Ελλάδα δεν μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά σε γενικευμένες διεθνείς παραδοχές, αλλά απαιτεί ενσωμάτωση τοπικών και χρονικά διαφοροποιημένων δεδομένων.

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να καλύψει αυτό το κενό, εξετάζοντας τις τεχνολογίες ICEV, HEV και BEV σε τρία έτη αναφοράς, 2026, 2030 και 2050, με έμφαση στις εκπομπές CO_{2e} ανά χιλιόμετρο και στην απόσταση περιβαλλοντικής εξισορρόπησης των BEVs, ενώ η αναλυτική παρουσίαση των παραδοχών, των συντελεστών εκπομπών και της υπολογιστικής διαδικασίας ακολουθεί στο Κεφάλαιο 3.

2.9 Η εξέλιξη του ενεργειακού μίγματος στην Ελλάδα (ιστορικά στοιχεία)

Η ενεργειακή πραγματικότητα της Ελλάδας, κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες, χαρακτηρίζεται από σημαντικές δομικές μεταβολές, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα την περιβαλλοντική αποτίμηση της ηλεκτροκίνησης.

Η ηλεκτροπαραγωγή της χώρας βασίστηκε επί σειρά δεκαετιών σε μεγάλο βαθμό στο λιγνίτη, ο οποίος αποτέλεσε βασικό εγχώριο ενεργειακό πόρο και συνδέθηκε με την ενεργειακή ασφάλεια και την ανάπτυξη του ηλεκτροπαραγωγικού συστήματος. Ωστόσο, η υψηλή ένταση άνθρακα της λιγνιτικής παραγωγής είχε ως αποτέλεσμα τις αυξημένες εκπομπές CO₂ ανά παραγόμενη kWh, γεγονός που επιβάρυνε το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ιστορική μεταβολή του ελληνικού μίγματος ηλεκτροπαραγωγής αποτυπώνει τη σταδιακή μετάβαση από ένα σύστημα υψηλής λιγνιτικής εξάρτησης προς ένα μίγμα με αυξημένη συμμετοχή φυσικού αερίου και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Η μεταβολή αυτή έχει άμεση σημασία για την περιβαλλοντική αξιολόγηση της ηλεκτροκίνησης, καθώς οι εκπομπές χρήσης των BEVs εξαρτώνται από την ανθρακική ένταση της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη φόρτισή τους. Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζεται, ενδεικτικά, η ιστορική εξέλιξη του ελληνικού μίγματος ηλεκτροπαραγωγής σε επιλεγμένα έτη.

Πίνακας 2.2. Ιστορική εξέλιξη του ελληνικού μίγματος ηλεκτροπαραγωγής. **

Έτος / Πηγή	Λιγνίτης / άνθρακας	Φυσικό αέριο	ΑΠΕ χωρίς μεγάλα υδροηλεκτρικά	Μεγάλα υδροηλεκτρικά	Πετρέλαιο / λοιπά	Παρατήρηση / πηγή
2010 / Eurostat & ΑΔΜΗΕ	~ 48%	~ 20%	~ 5%	~ 12%	~ 15%	Περίοδος υψηλής λιγνιτικής εξάρτησης και περιορισμένης συμμετοχής ΑΠΕ
2015 / Eurostat & ΑΔΜΗΕ	~ 43%	~ 18%	~ 16%	~ 9%	~ 14%	Αρχική φάση υποχώρησης λιγνίτη και αύξησης ΑΠΕ
2020 / Eurostat & ΑΔΜΗΕ	~ 11 με 13%	~ 35 με 38%	~ 28 με 31%	~ 8 με 10%	~ 10 με 12%	Ισχυρή πτώση λιγνίτη και ενίσχυση φυσικού αερίου & ΑΠΕ
2022 / ΑΔΜΗΕ & Green Tank & Eurostat	10,9%	36,3%	35,3%	7,3%	9,7%	Σημαντική συμμετοχή ΑΠΕ, αλλά ακόμη υψηλή συμμετοχή φυσικού αερίου
2023 / ΑΔΜΗΕ	~ 8 με 9%	~ 30 με 32%	~ 42 με 44%	~ 8 με 10%	~ 7 με 9%	Έτος-ορόσημο: ΑΠΕ και υδροηλεκτρικά κάλυψαν περίπου 57% του μίγματος, σύμφωνα με τον ΑΔΜΗΕ
2024 / Green Tank, βάσει ΑΔΜΗΕ & ΔΕΔΔΗΕ & ΔΑΠΕΕΠ	5,7%	37,5%	44,4%	6,1%	6,8%	Ιστορικό χαμηλό λιγνίτη, αλλά αυξημένη χρήση φυσικού αερίου

Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει Eurostat (2024), IPTO/ADMIE (2023a), IPTO/ADMIE (2024) και The Green Tank (2025). Τα στοιχεία για το 2023 δείχνουν ότι οι ΑΠΕ και τα υδροηλεκτρικά κάλυψαν περίπου το 57% του ελληνικού ενεργειακού μίγματος, υπερβαίνοντας τις 25 TWh, έναντι 50,12% το 2022. Για το 2024, τα στοιχεία του Green Tank, βάσει δεδομένων ΑΔΜΗΕ, ΔΕΔΔΗΕ και ΔΑΠΕΕΠ, καταγράφουν συμμετοχή ΑΠΕ 44,4%, μεγάλων υδροηλεκτρικών 6,1%, φυσικού αερίου 37,5%, πετρελαίου 6,8% και λιγνίτη 5,7%.

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 2.2, η σύνθεση του ελληνικού μίγματος ηλεκτροπαραγωγής μεταβλήθηκε σημαντικά κατά την τελευταία δεκαπενταετία. Η συμμετοχή του λιγνίτη μειώθηκε δραστικά, ενώ αυξήθηκε η συμβολή των ΑΠΕ και, σε ενδιάμεσο στάδιο, του φυσικού αερίου.

** Οι τιμές του Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται ως ενδεικτική αποτύπωση της ιστορικής τάσης του ελληνικού μίγματος ηλεκτροπαραγωγής και όχι ως υπολογιστικές τιμές του μοντέλου LCA. Οι τιμές έχουν στρογγυλοποιηθεί και χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την αποτύπωση της ιστορικής τάσης. Οι ακριβείς συντελεστές που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3.

Ενδεικτικά, το 2022 η ηλεκτροπαραγωγή της χώρας χαρακτηριζόταν από υψηλή συμμετοχή φυσικού αερίου και ΑΠΕ, με τον λιγνίτη να έχει ήδη περιοριστεί σημαντικά. Το 2023 αποτέλεσε έτος-ορόσημο για την καθαρή ηλεκτρική ενέργεια, καθώς οι ΑΠΕ μαζί με τα υδροηλεκτρικά κάλυψαν περίπου το 57% του ενεργειακού μίγματος. Το 2024 η τάση περιορισμού του λιγνίτη συνεχίστηκε, με τη συμμετοχή του να υποχωρεί σε ιστορικά χαμηλά επίπεδα, ενώ οι ΑΠΕ διατήρησαν υψηλή συμμετοχή στην κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας (IPTO/ADMIE, 2024 & Green Tank, 2025). Η μεταβολή αυτή είναι κρίσιμη για την παρούσα εργασία, διότι η σταδιακή μείωση της ανθρακικής έντασης του ηλεκτρικού συστήματος οδηγεί σε χαμηλότερες έμμεσες εκπομπές κατά τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Από τα μέσα της δεκαετίας του 2010 και μετά, το ελληνικό ενεργειακό μίγμα άρχισε να μεταβάλλεται με ταχύτερους ρυθμούς. Η σταδιακή μείωση της συμμετοχής του λιγνίτη, η αυξανόμενη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, κυρίως αιολικών και φωτοβολταϊκών, η ενίσχυση των ηλεκτρικών διασυνδέσεων και η διαφοροποίηση των πηγών παραγωγής συνέβαλαν στη μείωση της ανθρακικής έντασης της ηλεκτροπαραγωγής. Η εξέλιξη αυτή εντάσσεται στο ευρύτερο πλαίσιο της ευρωπαϊκής και εθνικής ενεργειακής πολιτικής για την απανθρακοποίηση του τομέα της ενέργειας και τη σταδιακή μετάβαση σε ένα καθαρότερο ενεργειακό σύστημα (Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2024).

Η σημασία της μεταβολής αυτής για την Ανάλυση Κύκλου Ζωής των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ιδιαίτερα κρίσιμη. Σε αντίθεση με τα οχήματα εσωτερικής καύσης, στα οποία οι εκπομπές χρήσης συνδέονται άμεσα με την καύση ορυκτού καυσίμου, τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα δεν παράγουν άμεσες εκπομπές κατά την κυκλοφορία τους. Ωστόσο, το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα, κατά τη φάση χρήσης τους, εξαρτάται από τις εκπομπές που σχετίζονται με την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία χρησιμοποιείται για τη φόρτισή τους. Συνεπώς, όσο μειώνεται η ένταση άνθρακα του ηλεκτρικού μίγματος, τόσο περιορίζονται και οι έμμεσες εκπομπές χρήσης των BEVs.

Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία, το ενεργειακό μίγμα αποτελεί έναν από τους καθοριστικότερους παράγοντες διαφοροποίησης των αποτελεσμάτων μεταξύ κρατών και χρονικών περιόδων.

Σε συστήματα ηλεκτροπαραγωγής με υψηλή εξάρτηση από άνθρακα ή λιγνίτη, το περιβαλλοντικό πλεονέκτημα των BEVs περιορίζεται, καθώς οι εκπομπές φόρτισης παραμένουν υψηλές. Αντίθετα, σε ηλεκτρικά συστήματα με αυξημένη συμμετοχή ΑΠΕ και χαμηλότερη ένταση άνθρακα, τα BEVs εμφανίζουν σαφώς βελτιωμένη περιβαλλοντική επίδοση σε όρους εκπομπών κύκλου ζωής (EEA, 2023).

Για τον λόγο αυτό, η ελληνική περίπτωση παρουσιάζει ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον. Η σταδιακή μετάβαση από ένα ιστορικά λιγνιτικό ενεργειακό σύστημα προς ένα μίγμα με την αυξημένη συμμετοχή των ΑΠΕ δημιουργεί μεταβαλλόμενες συνθήκες για την περιβαλλοντική αξιολόγηση της ηλεκτροκίνησης. Έτσι, η ανάλυση των BEVs δεν μπορεί να βασίζεται σε στατικές παραδοχές, αλλά πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη χρονική εξέλιξη του ενεργειακού μίγματος και τις προβλεπόμενες μεταβολές της ηλεκτροπαραγωγικής διαδικασίας.

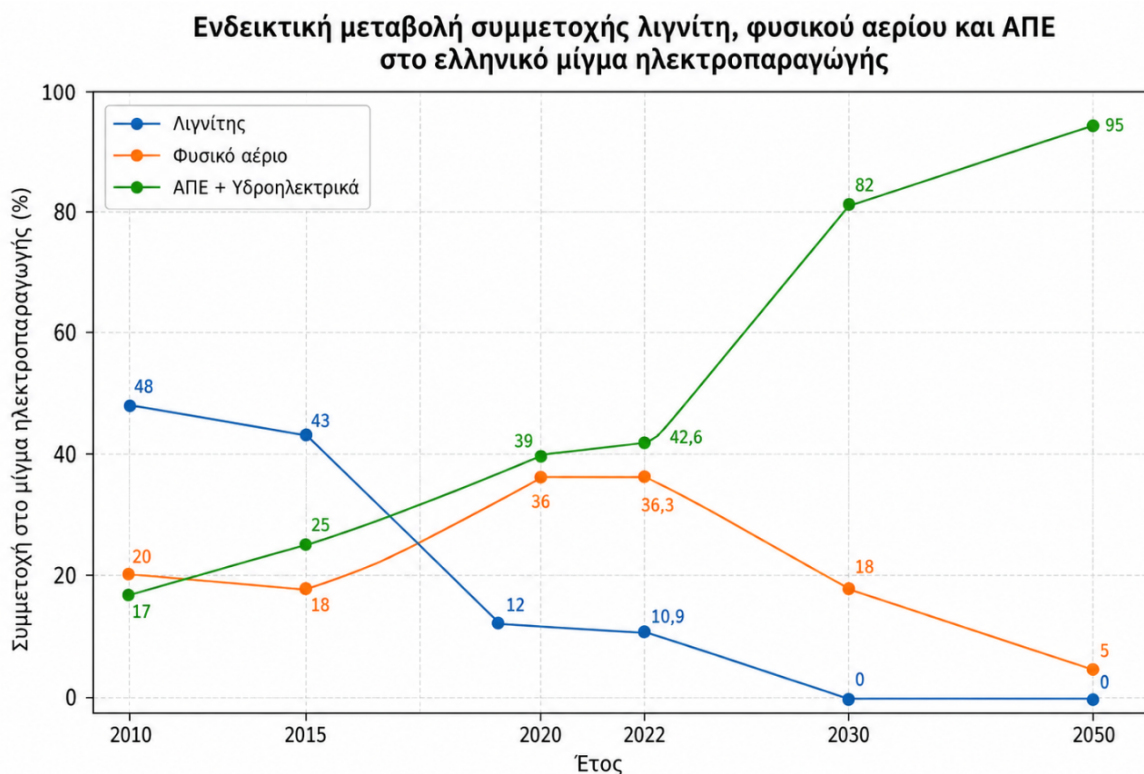
2.10 Απολιγνιτοποίηση και άνοδος ΑΠΕ: επιπτώσεις στις εκπομπές ηλεκτροπαραγωγής

Η απολιγνιτοποίηση αποτελεί έναν από τους βασικούς άξονες της ελληνικής ενεργειακής στρατηγικής και συνδέεται άμεσα με τη μείωση των εκπομπών CO₂ από τον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής. Η σταδιακή απόσυρση των λιγνιτικών μονάδων, σε συνδυασμό με την αύξηση της παραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, οδηγεί σε μείωση της έντασης άνθρακα του ηλεκτρικού συστήματος, καθώς μέρος της παραγωγής υψηλών εκπομπών υποκαθίσταται από καθαρότερες μορφές ηλεκτροπαραγωγής. Η εξέλιξη αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία για την παρούσα μελέτη, καθώς οι εκπομπές που σχετίζονται με τη φόρτιση των BEVs αποτελούν βασικό τμήμα του περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος κατά τη φάση χρήσης.

Η μείωση της εξάρτησης από τον λιγνίτη έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών ανά παραγόμενη kWh, γεγονός που βελτιώνει την περιβαλλοντική επίδοση της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Επομένως, η περιβαλλοντική αποδοτικότητα των BEVs δεν αποτελεί σταθερό μέγεθος, αλλά μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την εξέλιξη του ηλεκτρικού συστήματος (Hellenic Ministry of Environment & Energy, 2024).

Η ενδεικτική μεταβολή της συμμετοχής του λιγνίτη, του φυσικού αερίου και των ΑΠΕ στο ελληνικό μίγμα ηλεκτροπαραγωγής παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1. Η απεικόνιση αυτή αποτυπώνει τη σταδιακή υποχώρηση των συμβατικών πηγών υψηλότερης ανθρακικής έντασης και την αντίστοιχη ενίσχυση των καθαρότερων μορφών ηλεκτροπαραγωγής.

Σχήμα 2.1. Ενδεικτική μεταβολή συμμετοχής λιγνίτη, φυσικού αερίου και ΑΠΕ στο ελληνικό μίγμα ηλεκτροπαραγωγής.



Πηγή: Επεξεργασία βάσει Hellenic Ministry of Environment and Energy (2024) και IPTO/ADMIE (2023).

Για τη μελέτη της ηλεκτροκίνησης, αυτή η μεταβολή έχει διττή σημασία. Αφενός, μειώνει τις έμμεσες εκπομπές χρήσης των BEVs, καθώς η φόρτιση πραγματοποιείται σταδιακά με ηλεκτρική ενέργεια χαμηλότερης ανθρακικής έντασης. Αφετέρου, επιταχύνει την επίτευξη του περιβαλλοντικού break-even έναντι των οχημάτων εσωτερικής καύσης, καθώς οι χαμηλότερες εκπομπές φόρτισης επιτρέπουν την ταχύτερη αντιστάθμιση των υψηλότερων αρχικών εκπομπών παραγωγής των BEVs.

Η σχέση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την παρούσα εργασία, καθώς το break-even των BEVs εξετάζεται αποκλειστικά ως περιβαλλοντικό σημείο ισορροπίας, δηλαδή ως σημείο στο οποίο οι σωρευτικές εκπομπές CO_{2e} ενός ηλεκτρικού οχήματος γίνονται χαμηλότερες από τις αντίστοιχες ενός οχήματος εσωτερικής καύσης. Δεν πρόκειται, επομένως, για οικονομικό δείκτη κόστους ιδιοκτησίας, αλλά για δείκτη περιβαλλοντικής απόδοσης σε όρους εκπομπών κύκλου ζωής.

Στο συγκεκριμένο πλαίσιο, η απολιγνιτοποίηση και η άνοδος των ΑΠΕ δεν αποτελούν απλώς στοιχεία της εθνικής ενεργειακής πολιτικής, αλλά κρίσιμες παραμέτρους της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής των ηλεκτρικών οχημάτων στην Ελλάδα.

Η μελλοντική μείωση των εκπομπών της ηλεκτροπαραγωγικής διαδικασίας αναμένεται να ενισχύσει περαιτέρω το περιβαλλοντικό πλεονέκτημα των BEVs, ιδίως σε σενάρια όπου η συμμετοχή των ΑΠΕ αυξάνεται σημαντικά και η χρήση λιγνίτη περιορίζεται δραστικά. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση της ηλεκτροκίνησης στην ελληνική περίπτωση πρέπει να συνδέεται άμεσα με τα σενάρια εξέλιξης του ενεργειακού μίγματος και τους αντίστοιχους συντελεστές εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας (Hellenic Ministry of Environment & Energy, 2024).

2.11 Προβλέψεις για το 2026, 2030 και 2050 – εθνικοί και ευρωπαϊκοί στόχοι

Η αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των BEVs στην παρούσα εργασία βασίζεται σε τρία χρονικά σενάρια, τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικά στάδια εξέλιξης του ελληνικού ηλεκτροπαραγωγικού συστήματος.

Τα έτη 2026, 2030 και 2050 δεν χρησιμοποιούνται μόνο ως χρονολογικά ορόσημα, αλλά ως ενδεικτικές καταστάσεις διαφορετικής έντασης άνθρακα του ηλεκτρικού μίγματος, σύμφωνα με την πορεία της απολιγνιτοποίησης, της αύξησης των ΑΠΕ και της μακροπρόθεσμης απανθρακοποίησης που αποτυπώνεται στα εθνικά και ευρωπαϊκά ενεργειακά κείμενα στρατηγικής (IPTO/ADMIE, 2023 & Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2024 & European Commission, 2025).

Η επιλογή αυτή είναι κρίσιμη για την Ανάλυση Κύκλου Ζωής των BEVs, καθώς οι εκπομπές της φάσης χρήσης τους εξαρτώνται άμεσα από τον συντελεστή εκπομπών της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη φόρτισή τους.

Η διεθνής βιβλιογραφία δείχνει ότι το ίδιο ηλεκτρικό όχημα μπορεί να εμφανίζει διαφορετικό ανθρακικό αποτύπωμα κύκλου ζωής ανάλογα με το εθνικό ή περιφερειακό ηλεκτρικό μίγμα, το οποίο επηρεάζει κυρίως τις εκπομπές κατά τη φάση χρήσης (Hawkins et al., 2013 & ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024 & Negri and Bieker, 2025).

Πίνακας 2.3. Ενεργειακά σενάρια που χρησιμοποιούνται στην παρούσα ΔΕ.

Σενάριο	Έτος αναφοράς	Χαρακτήρας σεναρίου	Βάση τεκμηρίωσης	Αναμενόμενη επίδραση
Σενάριο Α	2026	Μεταβατικό μίγμα	ΑΔΜΗΕ/ΕΣΕΚ	Μέτρια ένταση άνθρακα
Σενάριο Β	2030	Ισχυρή διείσδυση ΑΠΕ	ΕΣΕΚ/ΕΕ	Μειωμένες εκπομπές λόγω φόρτισης
Σενάριο Γ	2050	Πολύ χαμηλή ένταση άνθρακα	Κλιματική Ουδετερότητα / Net Zero	Ελάχιστες έμμεσες εκπομπές χρήσης

Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει IPTO/ADMIE (2023a & 2023b), Hellenic Ministry of Environment and Energy (2024), European Commission (2025) και European Union (2021). Οι συντελεστές εκπομπών αποτελούν παραδοχές μοντελοποίησης της παρούσας ΔΕ και χρησιμοποιούνται για συγκριτική ανάλυση σεναρίων.

Οι παραπάνω συντελεστές εκπομπών δεν παρουσιάζονται ως αυτούσιες επίσημες τιμές πρόβλεψης του ΕΣΕΚ ή άλλου θεσμικού κειμένου, αλλά ως παραδοχές μοντελοποίησης της παρούσας simplified, literature-based LCA. Η επιλογή τους βασίζεται στη γενική κατεύθυνση των εθνικών και ευρωπαϊκών ενεργειακών στόχων, δηλαδή στη μείωση της συμμετοχής του λιγνίτη, στην αύξηση των ΑΠΕ και στη σταδιακή μείωση της έντασης άνθρακα της ηλεκτροπαραγωγής.

Με τον τρόπο αυτό, τα σενάρια χρησιμοποιούνται συγκριτικά, ώστε να εκτιμηθεί η επίδραση της απανθρακοποίησης του ηλεκτρικού συστήματος στις εκπομπές χρήσης των BEVs (Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2024 & European Commission, 2025 & ICCT, 2021).

Το σενάριο του 2026 αντιπροσωπεύει μια ενδιάμεση κατάσταση της ελληνικής ενεργειακής μετάβασης. Στο στάδιο αυτό, το ηλεκτρικό μίγμα θεωρείται καθαρότερο από το παρελθόν, αλλά εξακολουθεί να περιλαμβάνει σημαντική συμμετοχή συμβατικών πηγών, κυρίως φυσικού αερίου. Για τον λόγο αυτό, οι εκπομπές χρήσης των BEVs μειώνονται σε σχέση με ένα περισσότερο λιγνιτικό μίγμα, αλλά δεν προσεγγίζουν ακόμη τις τιμές ενός πλήρως απανθρακοποιημένου συστήματος.

Το σενάριο του 2030 αντιστοιχεί σε φάση ισχυρότερης διείσδυσης των ΑΠΕ και σημαντικής μείωσης της έντασης άνθρακα της ηλεκτροπαραγωγής. Η επιλογή του 2030 είναι συμβατή με τον χρονικό ορίζοντα των ευρωπαϊκών και εθνικών στόχων για μείωση εκπομπών, αύξηση των ΑΠΕ και βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας (European Commission, 2024 & Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2024).

Στο πλαίσιο της παρούσας ΔΕ, το σενάριο αυτό χρησιμοποιείται για να εξεταστεί πώς η βελτίωση του ηλεκτρικού μίγματος επηρεάζει τις εκπομπές χρήσης των BEVs και την απόσταση περιβαλλοντικής εξισορρόπησης.

Το σενάριο του 2050 δεν πρέπει να ερμηνεύεται ως κατάσταση μηδενικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος, αλλά ως σενάριο ηλεκτροπαραγωγής πολύ χαμηλής έντασης άνθρακα, σε ευθυγράμμιση με τη μακροχρόνια ευρωπαϊκή κατεύθυνση προς την κλιματική ουδετερότητα (European Union, 2021 & Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2024).

Ακόμη και σε ένα τέτοιο σενάριο, οι εκπομπές κύκλου ζωής των BEVs δεν μηδενίζονται, καθώς παραμένουν εκπομπές από την παραγωγή του οχήματος, την παραγωγή της μπαταρίας, τη συντήρηση και το τέλος ζωής.

Ωστόσο, η σημαντική μείωση του συντελεστή εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας περιορίζει αισθητά τις εκπομπές της φάσης χρήσης και βελτιώνει τη συνολική περιβαλλοντική επίδοση των BEVs.

Συνεπώς, τα τρία σενάρια επιτρέπουν τη συγκριτική αποτίμηση της ηλεκτροκίνησης υπό διαφορετικές συνθήκες ενεργειακής μετάβασης. Με τον τρόπο αυτό, η παρούσα εργασία δεν εξετάζει τα BEVs ως στατική τεχνολογία, αλλά τα αξιολογεί σε συνάρτηση με τη μεταβολή του ελληνικού ηλεκτροπαραγωγικού συστήματος.

Οι αριθμητικές τιμές των συντελεστών εκπομπής και ο τρόπος ενσωμάτωσής τους στους υπολογισμούς παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

2.12 Η ελληνική πραγματικότητα στις μετακινήσεις και η επίδρασή της στην AKZ

Η αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των ηλεκτρικών οχημάτων στην Ελλάδα δεν μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά σε γενικευμένες ευρωπαϊκές παραδοχές, καθώς οι εθνικές ιδιαιτερότητες μετακίνησης, το επίπεδο ανάπτυξης των υποδομών φόρτισης και η εξέλιξη του εγχώριου ενεργειακού μίγματος επηρεάζουν ουσιαστικά τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.

Η υιοθέτηση ηλεκτρικών οχημάτων στην Ελλάδα ακολουθεί ανοδική πορεία, ωστόσο παραμένει χαμηλότερη σε σχέση με τον ευρωπαϊκό μέσο όρο, γεγονός που συνδέεται με παράγοντες όπως η περιορισμένη (ακόμη) ανάπτυξη των δημόσιων υποδομών φόρτισης, το υψηλό αρχικό κόστος κτίσης, οι κοινωνικές επιφυλάξεις και η ελλιπής ενημέρωση των καταναλωτών (IEA, 2023 & European Environment Agency, 2023 & European Commission, 2025).

Παρά τους παραπάνω περιορισμούς, η σταδιακή αναδιάρθρωση του ελληνικού ηλεκτροπαραγωγικού συστήματος δημιουργεί ευνοϊκότερες προϋποθέσεις για τη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος των BEVs κατά τη φάση χρήσης. Τα δεδομένα και οι προβλέψεις του ΑΔΜΗΕ, σε συνδυασμό με τους στόχους του ΕΣΕΚ, δείχνουν ότι η αύξηση της συμμετοχής των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και η σταδιακή μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα μπορούν να μειώσουν την ένταση άνθρακα της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων (Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2019 & IPTO/ADMIE, 2023b & Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2024). Επομένως, η περιβαλλοντική απόδοση των BEVs στην Ελλάδα αναμένεται να βελτιώνεται διαχρονικά, ιδίως στα σενάρια του 2030 και του 2050.

Ιδιαίτερη σημασία έχει και το ελληνικό πρότυπο μετακινήσεων. Η πλειονότητα των καθημερινών μετακινήσεων αφορά μικρές ή μεσαίες αποστάσεις, κυρίως σε αστικό και περιαστικό περιβάλλον. Το χαρακτηριστικό αυτό μπορεί να ευνοήσει τα BEVs, ως προς την ενεργειακή τους αποδοτικότητα, καθώς τα ηλεκτρικά οχήματα εμφανίζουν συγκριτικά καλύτερη συμπεριφορά σε συνθήκες χαμηλών ταχυτήτων, συχνών στάσεων και αστικής κυκλοφορίας (ICCT, 2021 & IEA, 2023).

Ωστόσο, όταν το μέσο ετήσιο χιλιομετρικό φορτίο παραμένει χαμηλό, η περιβαλλοντική απόσβεση του υψηλότερου αρχικού αποτυπώματος παραγωγής των BEVs, κυρίως λόγω της μπαταρίας τους, μπορεί να απαιτεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (Hawkins et al., 2013 & Ellingsen et al., 2016 & ICCT, 2021).

Η παρατήρηση αυτή είναι κρίσιμη για την AKZ. Σε οχήματα που διανύουν λιγότερα χιλιόμετρα σε όλη τη διάρκεια ζωής τους, η φάση παραγωγής αποκτά μεγαλύτερη σχετική βαρύτητα στο συνολικό ενεργειακό τους αποτύπωμα. Αντίθετα, όσο αυξάνεται η συνολική χιλιομετρική χρήση, τόσο μεγαλύτερη σημασία αποκτά η φάση λειτουργίας, όπου τα BEVs μπορούν να εμφανίσουν σημαντικό περιβαλλοντικό πλεονέκτημα έναντι των συμβατικών οχημάτων, ιδιαίτερα όταν η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από μίγμα χαμηλότερης έντασης άνθρακα (Hawkins et al., 2013 & Ellingsen et al., 2016 & ICCT, 2021). Συνεπώς, το break-even των BEVs δεν εξαρτάται μόνο από τις εκπομπές παραγωγής και την

κατανάλωση ενέργειας, αλλά και από το πραγματικό πρότυπο χρήσης των οχημάτων στην ελληνική περίπτωση.

Σε επίπεδο αστικής κινητικότητας, μελέτες για τη Θεσσαλονίκη δείχνουν ότι συνδυασμένες πολιτικές περιορισμού της κυκλοφορίας ιδιωτικών οχημάτων και ενίσχυσης της δημόσιας συγκοινωνίας μπορούν να έχουν σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη.

Ειδικότερα, σενάρια που περιλαμβάνουν μείωση της κυκλοφορίας ΙΧ και μοτοσυκλετών κατά 20%, αύξηση της συχνότητας των δρομολογίων και χρήση ηλεκτρικών λεωφορείων οδηγούν σε εκτιμώμενες μειώσεις ρύπων και CO₂ από 26% έως 41% (Liora et al., 2021). Το εύρημα αυτό δείχνει ότι η ηλεκτροκίνηση δεν πρέπει να εξετάζεται μόνο σε επίπεδο μεμονωμένου οχήματος, αλλά και στο πλαίσιο του συνολικού συστήματος μεταφορών, όπου οι επιλογές μετακίνησης, η δημόσια συγκοινωνία και η πολιτική μεταφορών επηρεάζουν άμεσα το τελικό περιβαλλοντικό αποτέλεσμα.

Συνολικά, οι ελληνικές συνθήκες καθιστούν απαραίτητη την ενσωμάτωση τοπικών δεδομένων στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής. Η εξέλιξη του ηλεκτρικού μίγματος, το επίπεδο ανάπτυξης των υποδομών φόρτισης, το πραγματικό ετήσιο χιλιομετρικό φορτίο και το αστικό πρότυπο μετακινήσεων αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους που μπορούν να διαφοροποιήσουν τα αποτελέσματα σε σχέση με διεθνείς ή γενικευμένες ευρωπαϊκές μελέτες (Hawkins et al., 2013 & Ellingsen et al., 2016 & ICCT, 2021 & IPTO/ADMIE, 2023b).

Για τον λόγο αυτό, η παρούσα εργασία εξετάζει τα BEVs μέσα από εθνικά σενάρια και όχι ως τεχνολογία ανεξάρτητη από το ενεργειακό και το μεταφορικό πλαίσιο στο οποίο εντάσσεται.

2.13 Επιπτώσεις του break-even distance στην Ελλάδα

Η έννοια του *break-even distance* αποτελεί κρίσιμο δείκτη για την αξιολόγηση του περιβαλλοντικού οφέλους των ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς εκφράζει την απόσταση στην οποία οι αρχικά υψηλότερες εκπομπές παραγωγής ενός BEV, κυρίως λόγω της μπαταρίας του, αντισταθμίζονται από τις χαμηλότερες εκπομπές κατά τη φάση χρήσης του. Στο πλαίσιο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, το *break-even distance* δεν αποτελεί οικονομικό μέγεθος, αλλά περιβαλλοντικό σημείο εξισορρόπησης, το οποίο σχετίζεται με τις σωρευτικές εκπομπές CO_{2e} ανά τεχνολογία οχήματος (Hawkins et al., 2013 & Ellingsen et al., 2016 & ICCT, 2021).

Στην ελληνική περίπτωση, η απόσταση αυτή επηρεάζεται καθοριστικά από την ένταση άνθρακα της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη φόρτιση των BEVs. Σε ένα ηλεκτροπαραγωγικό σύστημα με υψηλή εξάρτηση από λιγνίτη ή άλλα ορυκτά καύσιμα, το περιβαλλοντικό όφελος των BEVs περιορίζεται διότι οι εκπομπές της φάσης χρήσης παραμένουν υψηλότερες.

Αντίθετα, όσο αυξάνεται η συμμετοχή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και μειώνεται η ανθρακική ένταση του ηλεκτρικού μίγματος, τόσο συντομότερα επιτυγχάνεται η περιβαλλοντική εξισορρόπηση έναντι των συμβατικών οχημάτων (ICCT, 2021 & European Environment Agency, 2024a).

Τα στοιχεία του ΑΔΜΗΕ και οι στόχοι του αναθεωρημένου ΕΣΕΚ δείχνουν ότι η Ελλάδα κινείται προς υψηλότερη συμμετοχή ΑΠΕ και σταδιακή μείωση της εξάρτησής της από ορυκτά καύσιμα, γεγονός που επηρεάζει άμεσα τη φάση χρήσης των ηλεκτρικών οχημάτων (IPTO/ADMIE, 2023b & European Commission, 2025).

Στο σενάριο του 2026, το *break-even distance* αναμένεται να επηρεάζεται ακόμη από τη μεταβατική κατάσταση του ελληνικού ηλεκτροπαραγωγικού συστήματος. Η παρουσία του φυσικού αερίου και των λοιπών ορυκτών καυσίμων στο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής σημαίνει ότι οι εκπομπές φόρτισης των BEVs δεν είναι μηδενικές. Ωστόσο, σε σύγκριση με ένα παλαιότερο λιγνιτικό σύστημα, η βελτίωση του ηλεκτρικού μίγματος μειώνει ήδη τις εκπομπές χρήσης και επιτρέπει την επίτευξη του περιβαλλοντικού σημείου εξισορρόπησης σε μικρότερες αποστάσεις.

Στο σενάριο του 2030, η αυξημένη διείσδυση των ΑΠΕ και η περαιτέρω αποκλιμάκωση της έντασης άνθρακα της ηλεκτροπαραγωγικής διαδικασίας οδηγούν σε σαφή περιβαλλοντική υπεροχή των BEVs. Η μείωση των εκπομπών ανά kWh περιορίζει το λειτουργικό αποτύπωμα της φόρτισης και, κατά συνέπεια, μειώνει την απόσταση που απαιτείται για να αντισταθμιστεί το αυξημένο αποτύπωμα της παραγωγής τους.

Η διεθνής βιβλιογραφία επιβεβαιώνει ότι τα BEVs εμφανίζουν μεγαλύτερο περιβαλλοντικό πλεονέκτημα, όσο καθαρότερο γίνεται το ηλεκτρικό μίγμα, ενώ το όφελος αυτό ενισχύεται σε μελλοντικά σενάρια απανθρακοποίησης της ηλεκτροπαραγωγής (ICCT, 2021 & European Environment Agency, 2024a).

Στο σενάριο του 2050, όπου ο ευρωπαϊκός και εθνικός σχεδιασμός προσανατολίζεται σε ένα σύστημα πολύ χαμηλών ή σχεδόν μηδενικών εκπομπών ρύπων, το *break-even distance* των BEVs αναμένεται να μειωθεί ακόμη περισσότερο. Σε αυτό το πλαίσιο, το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού αποτυπώματος των BEVs θα σχετίζεται κυρίως με τη φάση παραγωγής τους, ενώ η φάση χρήσης θα επιβαρύνει πολύ λιγότερο το συνολικό ισοζύγιο εκπομπών.

Συνεπώς, η περιβαλλοντική υπεροχή των BEVs έναντι των συμβατικών οχημάτων καθίσταται πιο εμφανής, υπό την προϋπόθεση ότι η ηλεκτροπαραγωγή και η παραγωγή μπαταριών ακολουθούν πορεία χαμηλότερης ανθρακικής έντασης (Ellingsen et al., 2016 & ICCT, 2021 & European Environment Agency, 2024).

Ωστόσο, στην Ελλάδα το *break-even distance* δεν εξαρτάται μόνο από το ηλεκτρικό μίγμα, αλλά και από το πραγματικό πρότυπο χρήσης των οχημάτων αυτών. Εάν ένα όχημα διανύει περιορισμένο αριθμό χιλιομέτρων ετησίως, τότε η περιβαλλοντική εξισορρόπηση μπορεί να απαιτεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, ακόμη και αν η απαιτούμενη απόσταση σε χιλιόμετρα μειώνεται. Αντίθετα, σε περιπτώσεις υψηλότερης χιλιομετρικής χρήσης, όπως σε επαγγελματικά οχήματα, ταξί ή οχήματα αστικών διανομών, το περιβαλλοντικό όφελος των BEVs μπορεί να εμφανιστεί ταχύτερα, επειδή οι χαμηλότερες εκπομπές χρήσης συσσωρεύονται σε μικρότερο χρονικό διάστημα.

Επομένως, η ελληνική περίπτωση παρουσιάζει μια ιδιαίτερη διττή επίδραση. Από τη μία πλευρά, η σταδιακή απανθρακοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής μειώνει το *break-even distance* και ενισχύει το περιβαλλοντικό όφελος των BEVs. Από την άλλη πλευρά, το σχετικά χαμηλότερο ετήσιο χιλιομετρικό φορτίο ορισμένων ιδιωτικών οχημάτων μπορεί να επιμηκύνει τον χρόνο που απαιτείται για την επίτευξη αυτού του σημείου.

Για τον παραπάνω λόγο, η παρούσα εργασία εξετάζει το *break-even distance* όχι ως σταθερό και γενικευμένο μέγεθος, αλλά ως αποτέλεσμα που μεταβάλλεται ανάλογα με το έτος αναφοράς, το ηλεκτρικό μίγμα, τις εκπομπές παραγωγής της μπαταρίας και το πραγματικό πρότυπο χρήσης του οχήματος.

Συνολικά, η διεθνής βιβλιογραφία και η θεωρητική σχέση μεταξύ έντασης άνθρακα της ηλεκτροπαραγωγικής διαδικασίας και των εκπομπών χρήσης των BEVs δείχνουν ότι η μείωση του συντελεστή εκπομπών του ηλεκτρικού μίγματος μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερη απόσταση περιβαλλοντικής εξισορρόπησης. Για την ελληνική περίπτωση, όπου το ενεργειακό μίγμα βρίσκεται σε φάση μετάβασης, η εξέταση διαφορετικών χρονικών σεναρίων αποτελεί χρήσιμη μεθοδολογική επιλογή. Η ποσοτικοποίηση της σχέσης αυτής πραγματοποιείται στα επόμενα κεφάλαια, με βάση τους συντελεστές εκπομπών και τις παραδοχές που παρουσιάζονται στη μεθοδολογία.

2.14 Συμπερασματική αποτίμηση του ελληνικού πλαισίου

Η ανάλυση του ελληνικού ενεργειακού και μεταφορικού πλαισίου δείχνει ότι η περιβαλλοντική αξιολόγηση της ηλεκτροκίνησης στην Ελλάδα δεν μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά σε γενικευμένα διεθνή αποτελέσματα. Η ελληνική περίπτωση παρουσιάζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, τα οποία επηρεάζουν άμεσα το ανθρακικό αποτύπωμα των ηλεκτρικών οχημάτων κατά τη φάση χρήσης τους.

Βασικοί παράγοντες που διαφοροποιούν την ελληνική περίπτωση είναι η σταδιακή απανθρακοποίηση του ηλεκτρικού συστήματος, η αυξανόμενη συμμετοχή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, η ανάπτυξη έργων αποθήκευσης και ευελιξίας του δικτύου, καθώς και η μακροπρόθεσμη στόχευση για κλιματική ουδετερότητα έως το 2050 (Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2024 & Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2020).

Παράλληλα, οι σχετικά μικρές αποστάσεις καθημερινής μετακίνησης και τα χαρακτηριστικά του ελληνικού στόλου οχημάτων καθιστούν αναγκαία την προσαρμογή των διεθνών παραδοχών στα ελληνικά δεδομένα.

Οι παράγοντες αυτοί διαμορφώνουν ένα πλαίσιο στο οποίο τα BEVs μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη μείωση των εκπομπών CO_{2e}, υπό την προϋπόθεση ότι η αξιολόγηση γίνεται με συστηματικό και διαφανή τρόπο.

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής αποτελεί κατάλληλο εργαλείο για την εκτίμηση αυτής της συμβολής, καθώς επιτρέπει τη συνεκτίμηση όχι μόνο των εκπομπών κατά τη χρήση, αλλά και των επιπτώσεων που συνδέονται με την παραγωγή του οχήματος, την παραγωγή της μπαταρίας του, τη συντήρηση και το τέλος ζωής του.

Συνεπώς, η ελληνική περίπτωση αναδεικνύει τη σημασία των τοπικών δεδομένων και των παραδοχών των σεναρίων που την αφορούν. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ηλεκτροκίνησης δεν μπορούν να εκτιμηθούν με ενιαίες και γενικευμένες παραδοχές, αλλά απαιτούν προσαρμοσμένη ανάλυση, η οποία να ενσωματώνει την εξέλιξη του ελληνικού ηλεκτρικού μίγματος, τις τεχνολογικές διαφοροποιήσεις μεταξύ ICEVs, HEVs και BEVs και τις ιδιαιτερότητες των μετακινήσεων στην Ελλάδα.

Αυτή η διαπίστωση οδηγεί άμεσα στην ανάγκη διατύπωσης των ερευνητικών ερωτημάτων της παρούσας εργασίας, τα οποία παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα.

2.15 Τεκμηρίωση ερευνητικού κενού και ερευνητικά ερωτήματα

Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία και την ανάλυση του ελληνικού ενεργειακού πλαισίου, αναδεικνύεται ένα συγκεκριμένο ερευνητικό κενό: η ανάγκη για συγκριτική, διαφανή και προσαρμοσμένη στην ελληνική περίπτωση εκτίμηση των εκπομπών κύκλου ζωής διαφορετικών τεχνολογιών οχημάτων, υπό διακριτά σενάρια εξέλιξης του ηλεκτρικού μίγματος.

Μολονότι η διεθνής βιβλιογραφία έχει τεκμηριώσει εκτενώς ότι τα BEVs μπορούν να εμφανίζουν χαμηλότερες εκπομπές κύκλου ζωής σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα, τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται σημαντικά ανάλογα με το ενεργειακό μίγμα, τις τεχνολογικές παραδοχές, την παραγωγή της μπαταρίας τους και τις συνθήκες χρήσης τους.

Οι περισσότερες διεθνείς μελέτες παρέχουν γενικά, ευρωπαϊκά ή/και περιφερειακά αποτελέσματα, τα οποία δεν αποτυπώνουν πάντοτε με ακρίβεια τις ιδιαιτερότητες της ελληνικής μελέτης περίπτωσης.

Η Ελλάδα βρίσκεται σε φάση ταχείας μεταβολής του ηλεκτρικού της συστήματος, με σταδιακή απολιγνιτοποίηση, αυξανόμενη συμμετοχή των ΑΠΕ και μακροπρόθεσμο στόχο την κλιματική ουδετερότητα. Επομένως, η αξιολόγηση της ηλεκτροκίνησης απαιτεί προσαρμογή των διεθνών παραδοχών στα ελληνικά δεδομένα και εξέταση διαφορετικών χρονικών σεναρίων.

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία επιχειρεί να καλύψει το παραπάνω κενό μέσω μιας απλοποιημένης, βιβλιογραφικά τεκμηριωμένης Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, με έμφαση στις εκπομπές CO_{2e} ανά χιλιόμετρο. Η ανάλυση επικεντρώνεται στη σύγκριση συμβατικών, υβριδικών και αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων, λαμβάνοντας υπόψη την εξέλιξη του ελληνικού ηλεκτρικού μίγματος στα σενάρια 2026, 2030 και 2050.

Τα βασικά ερευνητικά ερωτήματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

1. Ποιο είναι το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα κύκλου ζωής των ICEVs, HEVs και BEVs, εκφρασμένο σε gCO_{2e}/km;
2. Πώς μεταβάλλεται το αποτύπωμα των BEVs υπό τα ελληνικά ενεργειακά σενάρια 2026, 2030 και 2050;
3. Ποια είναι η απόσταση περιβαλλοντικής εξισορρόπησης των BEVs σε σχέση με τα ICEVs και τα HEVs ανά σενάριο;
4. Ποιες παράμετροι επηρεάζουν περισσότερο τα αποτελέσματα της απλοποιημένης, βιβλιογραφικά τεκμηριωμένης Ανάλυσης Κύκλου Ζωής;
5. Ποιες πολιτικές και τεχνολογικές κατευθύνσεις προκύπτουν για την ενίσχυση της αποδοτικότητας της ηλεκτροκίνησης στην Ελλάδα ως προς το περιβαλλοντικό της αποτύπωμα;

Τα παραπάνω ερευνητικά ερωτήματα καθοδηγούν τη μεθοδολογική προσέγγιση που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο και συνδέουν τη βιβλιογραφική επισκόπηση με την ποσοτική συγκριτική ανάλυση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

3. Μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA)

3.1 Μεθοδολογική προσέγγιση: simplified, literature-based LCA

Η παρούσα εργασία βασίζεται στη μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής — Life Cycle Assessment (LCA), η οποία αποτελεί ένα από τα πλέον διαδεδομένα εργαλεία για τη συστηματική αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων προϊόντων, υπηρεσιών και τεχνολογιών.

Η εφαρμογή της LCA στον τομέα των οδικών μεταφορών επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση τεχνολογιών που διαφέρουν σημαντικά τόσο ως προς την παραγωγή όσο και ως προς τη φάση χρήσης τους, όπως τα οχήματα εσωτερικής καύσης (Internal Combustion Engine Vehicles, ICEVs), τα υβριδικά οχήματα (Hybrid Electric Vehicles, HEVs) και τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία (Battery Electric Vehicles, BEVs).

Η μεθοδολογική λογική της παρούσας μελέτης ακολουθεί τις βασικές αρχές των προτύπων ISO 14040 και ISO 14044, τα οποία ορίζουν τη δομή μιας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής σε τέσσερα βασικά στάδια: τον καθορισμό σκοπού και πεδίου εφαρμογής, την απογραφή κύκλου ζωής, την εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων (ISO, 2006a & ISO, 2006b).

Ωστόσο, η εργασία δεν συνιστά πλήρη βιομηχανική LCA με χρήση εξειδικευμένων λογισμικών, όπως SimaPro ή openLCA, ούτε αποσκοπεί στην πιστοποίηση συγκεκριμένου προϊόντος ή εμπορικού μοντέλου οχήματος.

Αντιθέτως, η προσέγγιση της μελέτης ταξινομείται ως **simplified, literature-based LCA**, δηλαδή ως απλοποιημένη Ανάλυση Κύκλου Ζωής βασισμένη σε βιβλιογραφικά και θεσμικά δεδομένα. Η επιλογή αυτή θεωρείται κατάλληλη, καθώς το αντικείμενο της εργασίας είναι η συγκριτική αξιολόγηση κατηγοριών τεχνολογιών οχημάτων και όχι η πλήρης περιβαλλοντική αποτύπωση ενός συγκεκριμένου οχήματος ή του κατασκευαστή του. Για τον λόγο αυτό, η απογραφή κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory, LCI) συγκροτείται από δημοσιευμένες επιστημονικές μελέτες, διεθνείς βάσεις δεδομένων, εκθέσεις ευρωπαϊκών και διεθνών οργανισμών και επίσημους εθνικούς συντελεστές εκπομπών (Hawkins et al., 2013 & ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024).

Η χρήση δευτερογενών δεδομένων είναι μεθοδολογικά αποδεκτή σε συγκριτικές μελέτες τεχνολογιών, εφόσον δηλώνονται με σαφήνεια οι πηγές, τα όρια του συστήματος, οι λειτουργικές μονάδες και οι βασικές παραδοχές.

Στην περίπτωση των ηλεκτρικών οχημάτων, η ανάγκη αυτής της διαφάνειας είναι ιδιαίτερα σημαντική, επειδή τα αποτελέσματα της LCA επηρεάζονται έντονα από το ενεργειακό μίγμα της φόρτισης, την ενεργειακή ένταση παραγωγής της μπαταρίας τους, τη διάρκεια ζωής του οχήματος και τις παραδοχές σχετικά με την ανακύκλωση και το τέλος ζωής (ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024).

Κατά συνέπεια, η παρούσα μεθοδολογία δεν επιδιώκει να παράγει απόλυτες τιμές εκπομπών για ένα συγκεκριμένο μοντέλο οχήματος, αλλά να εκτιμήσει συγκριτικές τάσεις μεταξύ ICEV, HEV και BEV υπό διαφορετικά ενεργειακά σενάρια για την Ελλάδα.

Με αυτόν τον τρόπο, η LCA λειτουργεί ως εργαλείο περιβαλλοντικής αξιολόγησης και ταυτόχρονα ως εργαλείο ερμηνείας πολιτικής, καθώς συνδέει την τεχνολογική μετάβαση στις μεταφορές με την απανθρακοποίηση του ηλεκτροπαραγωγικού συστήματος (Burchart and Przytula, 2024).

3.2 Σκοπός και πεδίο εφαρμογής της μελέτης LCA

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η ποσοτική σύγκριση των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου των τεχνολογιών ICEV, HEV και BEV σε όρους ισοδυνάμου διοξειδίου του άνθρακα (CO_{2e}), με βάση την προσέγγιση του πλήρους κύκλου ζωής. Η σύγκριση πραγματοποιείται υπό διαφορετικά ενεργειακά σενάρια για την Ελλάδα, τα οποία αντιστοιχούν στα έτη 2026, 2030 και 2050.

Το πεδίο εφαρμογής της μελέτης αφορά επιβατηγά οχήματα μεσαίας κατηγορίας, αντιπροσωπευτικά της κατηγορίας C-segment. Η επιλογή αυτή επιτρέπει τη σύγκριση τεχνολογιών με βάση τυπικές και όχι ακραίες τεχνικές παραδοχές, ώστε τα αποτελέσματα να έχουν ερμηνευτική αξία σε επίπεδο στόλου και περιβαλλοντικής πολιτικής.

Η μελέτη επικεντρώνεται αποκλειστικά στο ανθρακικό αποτύπωμα και ειδικότερα στην κατηγορία επιπτώσεων **Global Warming Potential σε χρονικό ορίζοντα 100 ετών (GWP100)**. Η επιλογή αυτή είναι συμβατή με μεγάλο μέρος της διεθνούς βιβλιογραφίας για την ηλεκτροκίνηση, όπου οι συγκρίσεις μεταξύ τεχνολογιών πραγματοποιούνται κυρίως με βάση τις συνολικές εκπομπές CO_{2e} ανά χιλιόμετρο (ISO, 2006a & ISO, 2006b & ICCT, 2021 & IPCC, 2021).

Η παρούσα μελέτη δεν εξετάζει άλλες περιβαλλοντικές κατηγορίες, όπως οξίνιση, ευτροφισμό, τοξικότητα, κατανάλωση νερού ή εξάντληση πρώτων υλών. Ο περιορισμός αυτός είναι συνειδητός και συνδέεται με τον βασικό στόχο της εργασίας, ο οποίος είναι η αξιολόγηση της συμβολής των διαφορετικών τεχνολογιών οχημάτων στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

3.3 Λειτουργική μονάδα και μονάδα αναφοράς

Στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής η λειτουργική μονάδα αποτελεί τη βασική μονάδα αναφοράς, στην οποία κανονικοποιούνται όλες οι εισροές και εκροές του συστήματος. Η ορθή επιλογή της είναι κρίσιμη, καθώς διασφαλίζει ότι τα συγκρινόμενα συστήματα παρέχουν ισοδύναμη λειτουργία.

Στην παρούσα εργασία, ως λειτουργική μονάδα ορίζεται:

«Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, εκφρασμένες σε ισοδύναμα CO₂ (gCO_{2e}) ανά διανυθέν χιλιόμετρο επιβατηγού οχήματος, κατά τον πλήρη κύκλο ζωής του οχήματος».

Επομένως, η βασική μονάδα παρουσίασης των αποτελεσμάτων είναι σε: **gCO_{2e}/km**

Για την κανονικοποίηση των εκπομπών παραγωγής, συντήρησης και τέλους ζωής υιοθετείται συνολική διάρκεια ζωής οχήματος ίση με **200.000 km**. Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται συχνά σε συγκριτικές LCA επιβατηγών οχημάτων και θεωρείται κατάλληλη για την αποτύπωση της περιβαλλοντικής επίδοσης σε επίπεδο κύκλου ζωής (ISO, 2006a & ISO, 2006b & Hawkins et al., 2013 & ICCT, 2021).

Η επιλογή του δείκτη ανά χιλιόμετρο μετακίνησης είναι κατάλληλη για τον τομέα των μεταφορών διότι συνδέει τις εκπομπές με την παρεχόμενη υπηρεσία, δηλαδή τη μετακίνηση. Παράλληλα επιτρέπει τη σύγκριση τεχνολογιών με διαφορετικές ενεργειακές πηγές, όπως τα ορυκτά καύσιμα και η ηλεκτρική ενέργεια.

3.4 Όρια συστήματος

Η παρούσα μελέτη υιοθετεί όρια συστήματος τύπου **cradle-to-grave**, δηλαδή από την εξόρυξη και την επεξεργασία των πρώτων υλών έως το τέλος της ζωής του οχήματος. Η επιλογή αυτή είναι αναγκαία διότι τα ηλεκτρικά οχήματα εμφανίζουν διαφορετική κατανομή εκπομπών σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα (ISO, 2006a & ISO, 2006b & Ekvall and Weidema, 2004 & Hawkins et al., 2013).

Συγκεκριμένα, τα BEVs έχουν υψηλότερο αρχικό αποτύπωμα παραγωγής, κυρίως λόγω της μπαταρίας τους, αλλά χαμηλότερες εκπομπές κατά τη φάση χρήσης τους, ιδίως όταν το ηλεκτρικό μίγμα απανθρακοποιείται.

Στα όρια του συστήματος περιλαμβάνονται τα ακόλουθα στάδια:

- **Παραγωγή πρώτων υλών και κατασκευή οχήματος**, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής μετάλλων, πολυμερών, ηλεκτρονικών συστημάτων, μηχανικών μερών και της τελικής συναρμολόγησής του.
- **Παραγωγή μπαταρίας**, η οποία εφαρμόζεται κυρίως στα BEVs και, σε μικρότερο βαθμό, στα HEVs. Για τα BEVs, η παραγωγή της μπαταρίας ιόντων λιθίου αποτελεί σημαντική συνιστώσα των αρχικών εκπομπών.
- **Παραγωγή και διάθεση ενεργειακού φορέα**, δηλαδή παραγωγή, διύλιση, μεταφορά και διανομή καυσίμων για τα ICEVs και τα HEVs, καθώς και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τα BEVs.
- **Φάση χρήσης**, η οποία περιλαμβάνει τις άμεσες εκπομπές καύσης για τα ICEVs και τα HEVs και τις έμμεσες εκπομπές της ηλεκτροπαραγωγικής τους διαδικασίας για τα BEVs.
- **Συντήρηση και αναλώσιμα**, όπως ελαστικά, λιπαντικά, ανταλλακτικά και εργασίες περιοδικής συντήρησης.
- **Τέλος ζωής και ανακύκλωση**, συμπεριλαμβανομένης της αποσυναρμολόγησης, της ανάκτησης υλικών και της τελικής διάθεσης των υπολειμμάτων τους.

Δεν περιλαμβάνονται η κατασκευή οδικών υποδομών, η συντήρηση του οδικού δικτύου, η κατασκευή των πρατηρίων καυσίμων ή των σταθμών φόρτισης, καθώς οι υποδομές αυτές θεωρούνται κοινό υπόβαθρο του συστήματος και δεν μεταβάλλουν αποφασιστικά τη συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των εξεταζόμενων τεχνολογιών (ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024).

Επίσης, δεν λαμβάνονται υπόψη διαφοροποιήσεις οδηγικής συμπεριφοράς, ιδιαίτερες κλιματικές συνθήκες ή ειδικά προφίλ αστικής/υπεραστικής χρήσης, ώστε να διατηρηθεί σε αποδεκτά πλαίσια η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων.

3.5 Τεχνολογίες οχημάτων και βασικές υπολογιστικές παραδοχές

Η μελέτη εξετάζει τρεις βασικές τεχνολογίες επιβατηγών οχημάτων:

ICEV: Συμβατικό όχημα με κινητήρα εσωτερικής καύσης, το οποίο χρησιμοποιεί υγρό καύσιμο και εμφανίζει άμεσες εκπομπές κατά τη φάση χρήσης του.

HEV: Υβριδικό όχημα, το οποίο συνδυάζει κινητήρα εσωτερικής καύσης και μικρό ηλεκτρικό σύστημα υποβοήθησης. Η τεχνολογία αυτή εμφανίζει χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου από ένα αντίστοιχο ICEV, αλλά εξακολουθεί να εξαρτάται από ορυκτό καύσιμο.

BEV: Αμιγώς ηλεκτρικό όχημα με μπαταρία, το οποίο δεν εμφανίζει άμεσες εκπομπές κατά τη χρήση, αλλά οι συνολικές εκπομπές του εξαρτώνται από την παραγωγή της μπαταρίας και από το ενεργειακό μίγμα κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

Για λόγους συγκρισιμότητας, υιοθετούνται κοινές βασικές παραδοχές ως προς την κατηγορία οχήματος, τη διάρκεια ζωής και το γενικό προφίλ χρήσης.

Πίνακας 3.1. Βασικές παραδοχές οχήματος και χρήσης.

Παράμετρος	ICEV	HEV	BEV	Μονάδα	Πηγή
Κατηγορία οχήματος	Επιβατικό, κατηγορία C	Επιβατικό, κατηγορία C	Επιβατικό, κατηγορία C	-	ICCT (2021) & Negri and Bieker (2025)
Συνολική διάρκεια ζωής	200.000	200.000	200.000	km	Hawkins et al. (2013) & ICCT (2021) & Negri and Bieker (2025)
Ενεργειακή κατανάλωση (μέση)	Τυπική τιμή στόλου	Μειωμένη έναντι ICEV	Τυπική τιμή BEV	L/100 km ή kWh/100 km	EEA (2023) & ICCT (2021) & Negri and Bieker (2025)
Χωρητικότητα συσσωρευτή	-	1–2	50–60	kWh	Negri and Bieker (2025) & ICCT (2021)
Παραγωγή οχήματος	Περιλαμβάνεται	Περιλαμβάνεται	Περιλαμβάνεται	kgCO ₂ e/όχημα	Hawkins et al. (2013) & Ellingsen et al. (2016) & ICCT (2021)
Παραγωγή μπαταρίας	Δεν εφαρμόζεται	Περιορισμένη	Περιλαμβάνεται ρητά	kgCO ₂ e/kWh	Notter et al. (2010) & Dunn et al. (2015) & Ellingsen et al. (2014) & ICCT (2021)

Οι παραπάνω παραδοχές επιλέχθηκαν ώστε να αναπαριστούν ένα τυπικό επιβατηγό όχημα μεσαίας κατηγορίας (C-segment) και όχι ειδικές ή ακραίες περιπτώσεις οχημάτων, επιτρέποντας συγκρίσιμη αξιολόγηση μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών κίνησης. Η χρήση αντιπροσωπευτικών τιμών στόλου είναι σύμφωνη με τη μεθοδολογία συγκριτικών LCA μεταφορών, όπου ο στόχος είναι η συστημική αξιολόγηση τεχνολογιών και όχι η αποτίμηση συγκεκριμένου μοντέλου οχήματος (ICCT, 2021).

3.6 Δεδομένα κατανάλωσης και χρήσης

Τα δεδομένα κατανάλωσης αποτελούν βασική είσοδο του υπολογιστικού μοντέλου, καθώς καθορίζουν τις εκπομπές της φάσης χρήσης. Για τα ICEV και HEV οι εκπομπές χρήσης υπολογίζονται από την κατανάλωση καυσίμου εκπεφρασμένη σε λίτρα καυσίμου ανά 100 km και τον συντελεστή εκπομπών καυσίμου, ενώ για τα BEVs εκφράζεται σε kWh ανά 100 km.

Για τα οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης, οι εκπομπές χρήσης προκύπτουν από τη σχέση:

$$E_{use} = FC \cdot EF_{fuel}$$

Όπου:

FC = κατανάλωση καυσίμου σε (L/km)

EF_{fuel} = εκπομπές καυσίμου σε (kgCO_{2e}/L)

Οι συντελεστές εκπομπών προέρχονται από ευρωπαϊκές βάσεις δεδομένων εκπομπών καυσίμων (EEA, 2023 & ICCT, 2021) και περιλαμβάνουν τόσο τις άμεσες εκπομπές καύσης όσο και τις πηγές εκπομπών παραγωγής καυσίμου (well-to-tank).

Για τα BEVs, οι εκπομπές χρήσης δεν προκύπτουν από άμεσες εκπομπές εξάτμισης, αλλά από την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη φόρτισή τους. Συνεπώς, οι εκπομπές χρήσης υπολογίζονται από τη σχέση:

$$E_{BEVuse} = EC \cdot EF_{grid}$$

Όπου:

EC = κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε (kWh/km)

EF_{grid} = συντελεστής εκπομπών ηλεκτρικού δικτύου σε (kgCO_{2e}/kWh)

Ο συντελεστής EF_{grid} λαμβάνεται από εθνικά δεδομένα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και διαφοροποιείται ανά ενεργειακό σενάριο έτσι ώστε να αποτυπώνεται η επίδραση της μεταβολής του ελληνικού ενεργειακού μίγματος (IPTO/ADMIE, 2023a & EEA, 2023 & Eurostat, 2024).

Τα BEVs δεν εμφανίζουν άμεσες εκπομπές στο σημείο χρήσης τους, ωστόσο το αποτύπωμά τους εξαρτάται από την ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται για τη φόρτισή τους. Για τον λόγο αυτό, το ενεργειακό μίγμα αποτελεί κρίσιμη μεταβλητή στη συγκριτική αξιολόγηση της ηλεκτροκίνησης (ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024).

Σε συστήματα όπου το δίκτυο παραμένει έντονα εξαρτημένο από ορυκτά καύσιμα, το αποτύπωμα χρήσης των BEVs είναι αισθητά υψηλότερο, ενώ σε συστήματα με μεγάλη συμμετοχή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μειώνεται σημαντικά (Burchart and Przytuła, 2024).

3.7 Συντελεστές εκπομπών ορυκτών καυσίμων

Οι συντελεστές εκπομπών καυσίμων χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των εκπομπών των ICEVs και των HEVs κατά τη φάση χρήσης τους. Στην παρούσα μελέτη λαμβάνονται υπόψη τόσο οι άμεσες εκπομπές καύσης όσο και όπου κριθεί απαραίτητο, οι προς τα επάνω εκπομπές παραγωγής και διανομής καυσίμου.

Οι άμεσες εκπομπές καύσης βασίζονται σε ευρωπαϊκές βάσεις δεδομένων και τυπικούς συντελεστές εκπομπών (EEA, 2023). Για τη βενζίνη χρησιμοποιείται ενδεικτικός συντελεστής περίπου **2,31 kgCO₂/L**, ενώ για το πετρέλαιο κίνησης περίπου **2,68 kgCO₂/L**. Για την προσέγγιση well-to-wheel, εφαρμόζεται πρόσθετη προσαύξηση για τις εκπομπές παραγωγής, διύλισης και διανομής καυσίμου.

Πίνακας 3.2. Συντελεστές εκπομπών ορυκτών καυσίμων.

Μεταβλητή	Τιμή	Μονάδα	Πηγή
Εκπομπές βενζίνης (well-to-wheel) (TTW / combustion factor)	2,31	kgCO ₂ e/L	EEA (2023) & IPCC (2021)
Εκπομπές πετρελαίου κίνησης (TTW / combustion factor)	2,68	kgCO ₂ e/L	EEA (2023) & IPCC (2021)
Εκπομπές παραγωγής καυσίμου (upstream adjustment, WTW)	+15% με 20%	—	ICCT (2021) & Burchart and Przytuła (2024)

3.8 Συντελεστές εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας ανά σενάριο

Οι εκπομπές χρήσης των BEVs εξαρτώνται από τον συντελεστή εκπομπών της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη φόρτισή τους. Για τον λόγο αυτό, η παρούσα μελέτη ενσωματώνει τρία διακριτά ενεργειακά σενάρια για την Ελλάδα: 2026, 2030 και 2050.

Τα σενάρια αυτά δεν χρησιμοποιούνται απλώς ως χρονολογικά ορόσημα, αλλά ως αντιπροσωπευτικές καταστάσεις διαφορετικής έντασης άνθρακα του ελληνικού ηλεκτρικού συστήματος. Το 2026 αντιστοιχεί σε μεταβατική φάση, το 2030 σε αυξημένη συμμετοχή ΑΠΕ σύμφωνα με τους εθνικούς και ευρωπαϊκούς στόχους, ενώ το 2050 αντιστοιχεί σε συνθήκες σχεδόν πλήρους απανθρακοποίησης.

Πίνακας 3.3. Συντελεστές εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας ανά σενάριο.

Μεταβλητή	Τιμή	Μονάδα	Πηγή
Συντελεστής εκπομπών ηλεκτρικού δικτύου – 2026	0,45	kgCO ₂ e/kWh	IPTO/ADMIE (2023a; 2023b) & Hellenic Ministry of Environment and Energy (2024)
Συντελεστής εκπομπών ηλεκτρικού δικτύου – 2030	0,25	kgCO ₂ e/kWh	Hellenic Ministry of Environment and Energy (2019) & Hellenic Ministry of Environment and Energy (2024) & European Commission (2025)
Συντελεστής εκπομπών ηλεκτρικού δικτύου – 2050	0,05	kgCO ₂ e/kWh	IEA (2023) & Hellenic Ministry of Environment and Energy (2020) & European Union (2021)

Οι τιμές του Πίνακα 3.3 αποτελούν υπολογιστικές παραδοχές σεναρίων και όχι επίσημες προβλέψεις ακριβούς μελλοντικού συντελεστή εκπομπών του ελληνικού δικτύου. Χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την εκτίμηση της επίδρασης που έχει η μείωση του συντελεστή εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας στις εκπομπές χρήσης των BEVs και στο περιβαλλοντικό break-even distance.

Οι συντελεστές εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας βασίζονται σε εθνικές ενεργειακές προβλέψεις και σε σενάρια απανθρακοποίησης του ηλεκτρικού τομέα (IPTO/ADMIE, 2023b & Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2024 & European Commission, 2025 & IEA, 2023). Χρησιμοποιούνται, δηλαδή ως υπολογιστικές παραδοχές σεναρίων και όχι ως απόλυτες προβλέψεις.

Η διάκριση αυτή είναι σημαντική, επειδή οι μελλοντικοί συντελεστές εκπομπών ηλεκτροπαραγωγής εξαρτώνται από την πραγματική εξέλιξη του ενεργειακού μίγματος, την ανάπτυξη των ΑΠΕ, την αποθήκευση ενέργειας, τη ζήτηση ηλεκτρισμού και τις πολιτικές απανθρακοποίησης. Η χρήση διαφοροποιημένων τιμών για τα έτη 2026, 2030 και 2050 επιτρέπει τη δυναμική αξιολόγηση της επίδρασης της ενεργειακής μετάβασης στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα των οδικών μεταφορών.

3.9 Παραδοχές παραγωγής οχήματος και μπαταρίας

Οι εκπομπές παραγωγής περιλαμβάνουν την εξόρυξη και επεξεργασία πρώτων υλών, την παραγωγή μετάλλων και πολυμερών, την κατασκευή σασί, κινητήρα συστημάτων μετάδοσης, την παραγωγή πλήθους άλλων μηχανικών και ηλεκτρονικών συστημάτων και την τελική συναρμολόγησή τους. Για λόγους απλοποίησης και συγκρισιμότητας, ως εκπομπές παραγωγής των οχημάτων κατηγορίας C-segment χωρίς μπαταρία, υιοθετούνται οι μέσες τιμές βιβλιογραφίας από ενοποιημένες LCA μελέτες ευρωπαϊκών οχημάτων (Hawkins et al., 2013 & Ellingsen et al., 2016 & ICCT, 2021).

Τα BEVs παρουσιάζουν υψηλότερες εκπομπές κατασκευής λόγω της μπαταρίας, ενώ τα HEVs εμφανίζουν ενδιάμεσες τιμές, όπως επιβεβαιώνεται σε meta-data αναλύσεις κύκλου ζωής επιβατηγών αυτοκινήτων (Nordelöf et al., 2014 & Dunn et al., 2015 & Burchart and Przytuła, 2024).

Η παραγωγή της μπαταρίας ιόντων λιθίου μοντελοποιείται ως συνάρτηση της ενεργειακής χωρητικότητας:

$$E_{battery} = C_{battery} \cdot EF_{battery}$$

Όπου:

$C_{battery}$ = χωρητικότητα μπαταρίας σε (kWh)

$EF_{battery}$ = εκπομπές παραγωγής ανά kWh μπαταρίας σε (kgCO₂e/kWh)

Η διεθνής βιβλιογραφία παρουσιάζει σημαντική διακύμανση τιμών (50–120 kgCO₂e/kWh) για τις εκπομπές παραγωγής μπαταριών, λόγω διαφορών στην τεχνολογία κυψελών, λόγω της χώρας παραγωγής και λόγω διαφορών στο ενεργειακό μίγμα παραγωγής (Notter et al., 2010 & Ellingsen et al., 2014 & Dunn et al., 2015 & ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024).

Στην παρούσα εργασία υιοθετείται η ενδεικτική μέση ευρωπαϊκή τιμή των 85 kgCO₂e/kWh, η οποία χρησιμοποιείται ως αντιπροσωπευτική παραδοχή για την παραγωγή μπαταρίας σε συνθήκες μερικώς απανθρακοποιημένου ενεργειακού μίγματος (Notter et al., 2010 & Ellingsen et al., 2014 & Dunn et al., 2015 & ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024).

Πίνακας 3.4. Παραδοχές παραγωγής οχήματος και μπαταρίας.

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα	Πηγή
Παραγωγή οχήματος χωρίς μπαταρία	7.000	kgCO ₂ e/όχημα	Hawkins et al. (2013) & Ellingsen et al. (2016) & ICCT (2021)
Χωρητικότητα μπαταρίας BEV	50 - 60	kWh	ICCT (2021) & Negri and Bieker (2025)
Εκπομπές παραγωγής μπαταρίας	85	kgCO ₂ e/kWh	Notter et al. (2010) & Ellingsen et al. (2014) & Dunn et al. (2015) & ICCT (2021)
Συνολική διάρκεια ζωής	200.000	km	Hawkins et al. (2013) & ICCT (2021) & Negri and Bieker (2025)

Η επιλογή μέσης τιμής για την παραγωγή μπαταρίας δεν αναιρεί την αβεβαιότητα της παραμέτρου. Αντίθετα, η αβεβαιότητα αυτή αντιμετωπίζεται στη συνέχεια μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας.

3.10 Παραδοχές συντήρησης και τέλους ζωής οχήματος

Η συντήρηση περιλαμβάνει εκπομπές που συνδέονται με αναλώσιμα, ανταλλακτικά, ελαστικά, λιπαντικά και περιοδικές εργασίες συντήρησης. Τα BEVs εμφανίζουν γενικά χαμηλότερες απαιτήσεις συντήρησης σε σχέση με τα ICEVs, λόγω της απουσίας κινητήρα εσωτερικής καύσης, συστήματος εξάτμισης και λιπαντικών κινητήρα, όπως αναφέρεται σε συγκριτικές LCA μεταφορών (IEA, 2022 & Burchart and Przytuła, 2024).

Ωστόσο, για λόγους συντηρητικής αποτίμησης, η παρούσα μελέτη αντιμετωπίζει τις εκπομπές συντήρησης με απλοποιημένο τρόπο και τις κατανέμει αναλογικά στη συνολική διανυθείσα απόσταση.

Το τέλος ζωής περιλαμβάνει αποσυναρμολόγηση, ανακύκλωση μετάλλων, ανάκτηση υλικών και τελική διάθεση των υπολειμμάτων των αποσυρόμενων οχημάτων. Η ανακύκλωση μετάλλων οδηγεί σε πιστωτική μείωση εκπομπών λόγω ανάκτησης υλικών υψηλής ενεργειακής έντασης.

Στην περίπτωση των BEVs, ιδιαίτερη σημασία έχει η διαχείριση της μπαταρίας, καθώς η ανάκτηση υλικών όπως το λίθιο, το νικέλιο, το κοβάλτιο και ο χαλκός μπορεί να μειώσει το καθαρό ανθρακικό αποτύπωμα (Dunn et al., 2012 & European Environment Agency, 2018 & Burchart and Przytuła, 2024). Η καθαρή επίδραση εκτιμάται ως ποσοστιαία μείωση των συνολικών εκπομπών κύκλου ζωής, σύμφωνα με διεθνείς αναλύσεις.

Στην παρούσα εργασία, οι διεργασίες τέλους ζωής και ανακύκλωσης ενσωματώνονται με απλοποιημένες παραδοχές, καθώς τα διαθέσιμα δεδομένα παρουσιάζουν σημαντική αβεβαιότητα και διαφοροποίηση μεταξύ μελετών. Η επιλογή αυτή είναι συμβατή με τον χαρακτήρα της εργασίας ως simplified LCA και λαμβάνεται υπόψη στην ενότητα των μεθοδολογικών περιορισμών.

3.11 Υπολογιστικοί τύποι

Οι συνολικές εκπομπές κύκλου ζωής υπολογίζονται ως άθροισμα των επιμέρους σταδίων:

$$E_{total} = E_{manufacturing} + E_{battery} + E_{use} + E_{maintenance} + E_{end-of-life}$$

$E_{manufacturing}$ = εκπομπές παραγωγής οχήματος

$E_{battery}$ = εκπομπές παραγωγής μπαταρίας

E_{use} = εκπομπές φάσης χρήσης

$E_{maintenance}$ = εκπομπές συντήρησης

$E_{end-of-life}$ = εκπομπές τέλους ζωής

και κανονικοποιούνται στη λειτουργική μονάδα:

$$E_{LCA} = \frac{E_{total}}{L} (gCO_2e/km)$$

Η κανονικοποίηση στη λειτουργική μονάδα γίνεται με βάση τη συνολική διάρκεια ζωής:

$$E_{LCA} = \frac{E_{total}}{L}$$

όπου:

E_{LCA} = συνολικές εκπομπές κύκλου ζωής σε gCO_2e/km

L = συνολική διανυθείσα απόσταση σε km

Για τα ICEVs και HEVs (βλ. § 3.6):

$$E_{use} = FC \times EF_{fuel} \times L$$

Για τα BEVs (βλ. § 3.6):

$$E_{use} = EC \times EF_{grid} \times L$$

Η παραμετρική αυτή δομή επιτρέπει την εφαρμογή διαφορετικών σεναρίων για τον συντελεστή εκπομπών του ηλεκτρικού δικτύου, καθώς και την ανάλυση ευαισθησίας ως προς κρίσιμες μεταβλητές.

Η υπολογιστική αυτή διαδικασία επιτρέπει την άμεση σύγκριση τεχνολογιών και την αξιολόγηση της επίδρασης της απανθρακοποίησης του ηλεκτρικού τομέα στο αποτύπωμα των μεταφορών.

Η δομή αυτή ακολουθεί τη λογική κανονικοποίησης ανά λειτουργική μονάδα που εφαρμόζεται σε συγκριτικές LCA μεταφορών (ISO, 2006b & Hawkins et al., 2013 & ICCT, 2021).

3.12 Υπολογισμός break-even distance

Το **break-even distance**, ή απόσταση περιβαλλοντικής εξισορρόπησης, αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους δείκτες της παρούσας μελέτης. Ως **απόσταση περιβαλλοντικής εξισορρόπησης** ορίζεται η απόσταση d^* (km) για την οποία οι **σωρευτικές** εκπομπές κύκλου ζωής (ή, στην πράξη, κατασκευής & χρήσης) ενός BEV εξισώνονται με τις αντίστοιχες ενός συμβατικού οχήματος αναφοράς (συνήθως ICEV, εναλλακτικά HEV):

$$E_{BEV,cum}(d^*) = E_{REF,cum}(d^*)$$

Όπου:

d^* = απόσταση break-even σε km

REF = όχημα αναφοράς, δηλαδή ICEV ή HEV

Η λογική αυτή ακολουθείται και σε σχετικές βιβλιογραφικές προσεγγίσεις του δείκτη (ICCT, 2021 & Shafiei, Dauphin & Yugo, 2022 & Negri and Bieker, 2025).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, επειδή οι εκπομπές τέλους ζωής και συντήρησης έχουν μικρότερη επίδραση σε σχέση με την κατασκευή και τη χρήση (και συχνά αντιμετωπίζονται με ενοποιημένες παραδοχές), το break-even αποτυπώνεται με διαφανή παραμετρικό τρόπο, εστιάζοντας στις δύο κυρίαρχες συνιστώσες (ISO, 2006b):

(α) αρχικές εκπομπές παραγωγής και

(β) εκπομπές χρήσης ανά km.

Έστω ότι:

- E_{BEV}^0 : αρχικές εκπομπές (kgCO₂e) από παραγωγή οχήματος BEV, συμπεριλαμβανομένης της μπαταρίας.
- E_{REF}^0 : αρχικές εκπομπές (kgCO₂e) από παραγωγή οχήματος αναφοράς (ICEV ή HEV).
- e_{BEV} : εκπομπές χρήσης ανά km (kgCO₂e/km) για BEV.
- e_{REF} : εκπομπές χρήσης ανά km (kgCO₂e/km) για όχημα αναφοράς.

Τότε οι σωρευτικές εκπομπές ως προς την απόσταση d γράφονται:

$$\begin{aligned} E_{BEV,cum}(d) &= E_{BEV}^0 + e_{BEV} \cdot d \\ E_{REF,cum}(d) &= E_{REF}^0 + e_{REF} \cdot d \end{aligned}$$

Η απόσταση break-even d^* προκύπτει από την εξίσωση:

$$E_{BEV}^0 + e_{BEV} \cdot d^* = E_{REF}^0 + e_{REF} \cdot d^*$$

άρα:

$$d^* = \frac{E_{BEV}^0 - E_{REF}^0}{e_{REF} - e_{BEV}}$$

Η παραπάνω σχέση είναι ερμηνεύσιμη και ελέγχεται από εξεταστική επιτροπή:

- ο αριθμητής $E_{BEV}^0 - E_{REF}^0$ εκφράζει το **manufacturing overhead** του BEV (κυρίως battery overhead) (Hawkins et al., 2013 & Ellingsen et al., 2016; ICCT, 2021).
- ο παρονομαστής $e_{REF} - e_{BEV}$ εκφράζει το **λειτουργικό πλεονέκτημα** του BEV στη χρήση (ανά km), το οποίο εξαρτάται, κυρίως, από το ενεργειακό μίγμα (ICCT, 2021 & IEA, 2023 & Burchart and Przytuła, 2024).

Όσο χαμηλότερος είναι ο συντελεστής εκπομπών του ηλεκτρικού δικτύου, τόσο μικρότερη γίνεται η απόσταση του break-even.

Σημείωση: Η αριθμητική υλοποίηση του υπολογιστικού μοντέλου πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον υπολογιστικού φύλλου, ενώ οι παράμετροι εισόδου και η δομή του μοντέλου παρουσιάζονται στο **Παράρτημα Α**.

Για να αποτυπωθεί ρεαλιστικά η εξέλιξη των εκπομπών χρήσης των BEVs, ο παράγοντας EF_{grid} εφαρμόζεται σε **διακριτά σενάρια** (π.χ. 2026/2030/2050), αντιπροσωπεύοντας μεταβατικό μίγμα, αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ και σχεδόν πλήρη απανθρακοποίηση αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο, το break-even distance υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε σενάριο:

$$d^*(s) = \frac{E_{BEV}^0 - E_{REF}^0}{e_{REF} - EC \cdot EF_{grid}(s)}$$

όπου s το σενάριο του 2026, 2030 ή 2050.

Η διατύπωση αυτή καθιστά την ανάλυση **δυναμική ως προς τον ηλεκτρικό τομέα** και επιτρέπει την ερμηνεία αποτελεσμάτων πολιτικής: όσο μειώνεται το EF_{grid} , μειώνεται το d^* , άρα η ηλεκτροκίνηση υπερέχει περιβαλλοντικά **νωρίτερα** στη διάρκεια ζωής του οχήματος (ICCT, 2021 & IEA, 2023).

Ερμηνευτική σημείωση: Για να υπάρχει πεπερασμένο break-even απαιτείται $e_{REF} > e_{BEV}$. Σε ενεργειακά μίγματα πολύ υψηλής έντασης άνθρακα, το e_{BEV} μπορεί να προσεγγίσει ή/και να υπερβεί το e_{REF} , καθιστώντας το break-even πολύ μεγάλο ή μη επιτεύξιμο, εύρημα που επίσης αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως ευαισθησία στο grid intensity (ICCT, 2021).

Σε επίπεδο χώρας και ειδικότερα στην ελληνική περίπτωση, ο δείκτης break-even συνδέει άμεσα την τεχνολογική επιλογή (battery overhead, κατανάλωση kWh/km) με την ενεργειακή πολιτική (ένταση άνθρακα ηλεκτροπαραγωγής).

Έτσι, λειτουργεί ως γέφυρα μεταξύ μεταφορικού και ενεργειακού τομέα, κάτι που αποτελεί κεντρικό αντικείμενο των σύγχρονων αξιολογήσεων ηλεκτροκίνησης (IEA, 2023) και των συγκριτικών life-cycle αναλύσεων επιβατηγών αυτοκινήτων (ICCT, 2021).

Υπό αυτή την έννοια, ο δείκτης break-even λειτουργεί ως συνθετικός δείκτης διατομεακής αξιολόγησης, επειδή συμπυκνώνει σε μία παράμετρο τόσο τις τεχνολογικές παραμέτρους του οχήματος όσο και τη δομή του ενεργειακού συστήματος. Αυτό τον καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμο για τη σύνδεση πολιτικών μεταφορών και πολιτικών απανθρακοποίησης ηλεκτροπαραγωγικής διαδικασίας, σε εθνικό επίπεδο (Burchart and Przytuła, 2024).

Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι το break-even distance της παρούσας εργασίας είναι **αμιγώς περιβαλλοντικός δείκτης**. Δεν αφορά οικονομικό σημείο ισορροπίας, κόστος ιδιοκτησίας ή χρόνο απόσβεσης αγοράς, αλλά αποκλειστικά την εξίσωση σωρευτικών εκπομπών CO_{2e} μεταξύ τεχνολογιών.

3.13 Ανάλυση ευαισθησίας και αβεβαιότητας

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής εμπεριέχει αναπόφευκτα αβεβαιότητες που σχετίζονται με την ποιότητα δεδομένων, τις μεθοδολογικές παραδοχές και τις μελλοντικές ενεργειακές εξελίξεις του ενεργειακού συστήματος.

Η ανάγκη ανάλυσης ευαισθησίας είναι ιδιαίτερα έντονη στις LCA ηλεκτροκίνησης, καθώς η βιβλιογραφία δείχνει ότι μικρές μεταβολές σε παραμέτρους όπως το ενεργειακό μίγμα, η παραγωγή μπαταρίας ή οι συνθήκες χρήσης μπορούν να οδηγήσουν σε αισθητές διαφορές στο τελικό ανθρακικό αποτύπωμα. Για τον λόγο αυτό, η διερεύνηση της σταθερότητας των συμπερασμάτων εντός ρεαλιστικού εύρους τιμών θεωρείται αναγκαίο στοιχείο μεθοδολογικής εγκυρότητας και όχι ως μοναδικά ή απολύτως σταθερά αποτελέσματα (Burchart and Przytuła, 2024).

Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14044 (ISO, 2006b), απαιτείται αξιολόγηση της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων ως προς κρίσιμες παραμέτρους, ώστε να διασφαλίζεται η αξιοπιστία της ερμηνείας των συμπερασμάτων.

Στην παρούσα μελέτη πραγματοποιείται ποιοτική και ερμηνευτική ανάλυση ευαισθησίας, με στόχο την ανάδειξη των παραμέτρων που επηρεάζουν περισσότερο τα αποτελέσματα της LCA και την απόσταση περιβαλλοντικής εξισορρόπησης. Η προσέγγιση βασίζεται στη δομή του υπολογιστικού μοντέλου και στα ευρήματα της διεθνούς βιβλιογραφίας, χωρίς να αποτελεί πλήρη αριθμητική παραμετρική διερεύνηση όλων των δυνατών συνδυασμών τιμών.

Οι παράμετροι που εξετάζονται επιλέχθηκαν βάσει της διεθνούς βιβλιογραφίας ως οι σημαντικότερες για το αποτύπωμα των ηλεκτρικών οχημάτων (ICCT, 2021 & IEA, 2023 & Burchart and Przytuła, 2024 & Negri and Bieker, 2025):

α) Ένταση άνθρακα ηλεκτρικού δικτύου (EF_{grid} , $kgCO_2e/kWh$).

Αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα των εκπομπών χρήσης των BEVs και αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα διαφοροποίησης μεταξύ των σεναρίων 2026, 2030 και 2050. Μεταβολές στο ενεργειακό μίγμα επηρεάζουν άμεσα τόσο το συνολικό αποτύπωμα όσο και την απόσταση εξισορρόπησης.

β) Εκπομπές παραγωγής μπαταρίας ($EF_{battery}$, $kgCO_2e/kWh$).

Η παραγωγή μπαταρίας παρουσιάζει μεγάλη αβεβαιότητα στη διεθνή βιβλιογραφία και σχετίζεται με τον τόπο παραγωγής, την τεχνολογία κυψελών και την ενεργειακή ένταση των εργοστασίων, δηλαδή της παραγωγής (Notter et al., 2010 & Ellingsen et al., 2014 & Dunn et al., 2015 & Burchart and Przytuła, 2024).

γ) Κατανάλωση ενέργειας οχήματος (EC , kWh/km).

Επηρεάζεται από τη μάζα του οχήματος, την ταχύτητα, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (βλ. κλιματικές συνθήκες) και τον κύκλο οδήγησης.

Επιπλέον, στη διεθνή βιβλιογραφία επισημαίνεται ότι οι πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας, η συμφόρηση, οι συχνές στάσεις και επιταχύνσεις, καθώς και η αστική

πραγματικότητα του οδικού δικτύου μπορούν να μεταβάλουν σημαντικά τις εκπομπές και την ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με πιο στατικές ή μέσες παραδοχές. Ειδικά σε περιβάλλοντα έντονης κυκλοφοριακής συμφόρησης, τα δυναμικά μοντέλα τείνουν να αποδίδουν υψηλότερες εκπομπές σε σχέση με τα στατικά μοντέλα μέσης ταχύτητας, γεγονός που αναδεικνύει την ύπαρξη επιπρόσθετης αβεβαιότητας όταν χρησιμοποιούνται γενικευμένα προφίλ χρήσης (Liora et al., 2021).

δ) Συνολική διάρκεια ζωής (Life-time distance).

Η αύξηση της συνολικής διανυθείσας απόστασης μειώνει τη σχετική επίδραση των εκπομπών κατά την παραγωγική διαδικασία επειδή αυτές κατανέμονται σε περισσότερα χιλιόμετρα (Hawkins et al., 2013 & ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024).

Πέραν των παραπάνω, πρέπει να επισημανθεί ότι οι παράμετροι αυτές δεν λειτουργούν πλήρως ανεξάρτητα μεταξύ τους. Για παράδειγμα, η ενεργειακή κατανάλωση του οχήματος και η ένταση άνθρακα του δικτύου αλληλεπιδρούν ως προς το αποτύπωμα χρήσης, ενώ η διάρκεια ζωής του οχήματος επηρεάζει άμεσα τη βαρύτητα του αρχικού αποτυπώματος παραγωγής.

Η επίδραση κάθε παραμέτρου αξιολογείται τόσο στις συνολικές εκπομπές κύκλου ζωής (gCO₂e/km) όσο και στην απόσταση break-even (km). Τα αποτελέσματα μπορούν να παρουσιαστούν με διάγραμμα τύπου **tornado**, ώστε να αναδειχθεί η σχετική βαρύτητα κάθε παραμέτρου.

Η επιλογή της μονοπαραγοντικής μεταβολής προτιμάται στην παρούσα μελέτη λόγω της απλότητάς της, της διαφάνειας στην ερμηνεία και της καταλληλότητάς της για συγκριτικές αναλύσεις τεχνολογιών, όπου επιδιώκεται η ανάδειξη της σχετικής βαρύτητας κάθε βασικής παραμέτρου.

Η διεθνής βιβλιογραφία και η δομή του υπολογιστικού μοντέλου υποδεικνύουν ότι η ένταση άνθρακα του ηλεκτρικού δικτύου αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για τα αποτελέσματα των BEVs. Η ποσοτική επίδραση της παραμέτρου αυτής εξετάζεται στο Κεφάλαιο 4 μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας.

Η ύπαρξη ανάλυσης ευαισθησίας είναι κρίσιμη για τη μεθοδολογική εγκυρότητα, διότι επιβεβαιώνει ότι τα συμπεράσματα δεν αποτελούν αποτέλεσμα μίας συγκεκριμένης παραδοχής αλλά παραμένουν σταθερά εντός ρεαλιστικού εύρους τιμών, όπως προτείνεται από τη διεθνή πρακτική LCA (ISO, 2006b).

Κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης πρέπει να ερμηνεύονται ως εύλογες συγκριτικές εκτιμήσεις υπό ρητά δηλωμένες παραδοχές και όχι ως αμετάβλητες τιμές. Η ένταξη της ευαισθησίας στη μεθοδολογία ενισχύει ακριβώς αυτή τη διαφάνεια, επιτρέποντας να διαπιστωθεί ποιες μεταβλητές καθορίζουν περισσότερο τη συνολική εικόνα της ηλεκτροκίνησης στην ελληνική περίπτωση (Burchart and Przytuła, 2024).

Η ανάλυση ευαισθησίας δεν λειτουργεί μόνο ως τεχνικό συμπλήρωμα της LCA, αλλά και ως βασικό εργαλείο ερμηνείας των αποτελεσμάτων, καθώς επιτρέπει τη διάκριση μεταξύ σταθερών τάσεων και μεταβλητών που επηρεάζονται περισσότερο από τη μεθοδολογική ή ενεργειακή αβεβαιότητα.

3.14 Πηγές δεδομένων και αξιοπιστία

Για την εξασφάλιση αξιοπιστίας και επαναληψιμότητας, χρησιμοποιούνται αποκλειστικά:

- δεδομένα EEA, Eurostat και IEA για τις εκπομπές,
- ICCT για τη LCA των BEVs και τις ειδικές εκτιμήσεις μπαταριών,
- Hellenic Statistical Authority / ELSTAT, IPTO/ADMIE, Hellenic Ministry of Environment and Energy / NECP, για την ελληνική περίπτωση και την εξέλιξη του εθνικού ηλεκτροπαραγωγικού συστήματος.

Η διαφάνεια των πηγών είναι κρίσιμη για την αποδοχή της μελέτης, καθώς διαφορετικές LCA συχνά παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση λόγω μεθοδολογικών διαφορών και διαφοροποιήσεων (Notter et al., 2010 & Hawkins et al., 2013 & Burchart and Przytuła, 2024).

Η σχετική βιβλιογραφία για την αποτίμηση carbon footprint στα οχήματα υπογραμμίζει ότι η αξιοπιστία μιας μελέτης δεν εξαρτάται μόνο από την αριθμητική τιμή των συντελεστών εκπομπών, αλλά και από το κατά πόσο οι μέθοδοι, τα όρια του συστήματος, οι υποθέσεις και οι πηγές δεδομένων παρουσιάζονται με συνέπεια και διαφάνεια.

Η έλλειψη πλήρους τυποποίησης στις μεθόδους αποτίμησης οδηγεί συχνά σε αποκλίσεις μεταξύ διαφορετικών μελετών, γεγονός που καθιστά ακόμη σημαντικότερη τη σαφή τεκμηρίωση της επιλεγμένης μεθοδολογικής προσέγγισης (Burchart and Przytuła, 2024).

Η παρατήρηση αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία στην περίπτωση της παρούσας μελέτης, όπου η αξιοπιστία μιας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα, την ιχνηλασιμότητα και τη διαφάνεια των δεδομένων εισόδου. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιούνται αποκλειστικά δεδομένα από θεσμικούς οργανισμούς, διεθνείς ενεργειακούς φορείς και δημοσιευμένες επιστημονικές εργασίες (ISO, 2006a & ISO, 2006b & Burchart and Przytuła, 2024).

Οι συντελεστές εκπομπών καυσίμων και ηλεκτρικής ενέργειας προέρχονται από ευρωπαϊκές βάσεις δεδομένων και επίσημους οργανισμούς παρακολούθησης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, οι οποίοι εφαρμόζουν εναρμονισμένες μεθοδολογίες απογραφής. Η χρήση τέτοιων δεδομένων εξασφαλίζει συγκρισιμότητα αποτελεσμάτων μεταξύ χωρών και τεχνολογιών, όπως προτείνεται στις κατευθυντήριες οδηγίες περιβαλλοντικών απογραφών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EEA, 2023).

Για τα ηλεκτρικά οχήματα, οι εκπομπές κύκλου ζωής και ιδιαίτερα των μπαταριών τους βασίζονται σε συγκριτικές διεθνείς μελέτες και meta-data αναλύσεις, οι οποίες συνθέτουν αποτελέσματα πολλαπλών ερευνητικών εργασιών και μειώνουν την επίδραση μεμονωμένων υποθέσεων (ICCT, 2021).

Αντίστοιχα, τα ενεργειακά σενάρια ηλεκτροπαραγωγής λαμβάνονται από ενεργειακές προβλέψεις διεθνών οργανισμών και ευρωπαϊκές εκθέσεις ενεργειακής μετάβασης (IEA, 2023).

Η χρήση δευτερογενών δεδομένων αποτελεί μια αποδεκτή πρακτική σε συγκριτικές LCA τεχνολογιών όταν ο στόχος είναι η αξιολόγηση συστημικών επιπτώσεων και όχι η πιστοποίηση συγκεκριμένου προϊόντος. Σε αυτές τις περιπτώσεις η ποιότητα της μελέτης διασφαλίζεται μέσω της τεκμηρίωσης των πηγών και της δυνατότητας επαναληψιμότητας των υπολογισμών (ISO, 2006b).

Η επιλογή δημοσιοποιημένων συντελεστών εκπομπών και σαφώς δηλωμένων παραδοχών επιτρέπει την πλήρη αναπαραγωγή των αποτελεσμάτων και την επικαιροποίησή τους σε περίπτωση μεταβολής του ενεργειακού μίγματος.

Κατά συνέπεια, η αξιοπιστία της μελέτης βασίζεται στη μεθοδολογική συνέπεια και στη διαφάνεια της διαδικασίας υπολογισμού και όχι στην ακρίβεια μεμονωμένων αριθμητικών τιμών.

Με αυτή την έννοια, η παρούσα μελέτη επιδιώκει να εστιάσει περισσότερο στην αναπαραγωγή και ερμηνεία παρά να είναι εξαντλητικά λεπτομερής, χαρακτηριστικό που συνάδει με τον συγκριτικό και policy-oriented χαρακτήρα μιας simplified LCA τεχνολογιών μεταφορών (Burchart and Przytuła, 2024).

3.15 Μεθοδολογικοί περιορισμοί της μελέτης

Παρά τη συστηματική εφαρμογή της μεθοδολογίας LCA, η παρούσα εργασία υπόκειται σε περιορισμούς που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα δεδομένων, τη μοντελοποίηση σύνθετων διεργασιών και την αβεβαιότητα μελλοντικών ενεργειακών εξελίξεων και οι οποίοι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Επίσης, κάθε LCA υπάγεται σε περιορισμούς:

- Η διαθεσιμότητα ακριβών δεδομένων παραγωγής μπαταρίας (Ellingsen et al., 2014 & Ellingsen et al., 2016 & Dunn et al., 2015 & Burchart and Przytuła, 2024). Τα δεδομένα παραγωγής μπαταριών παρουσιάζουν σημαντική διακύμανση στη διεθνή βιβλιογραφία, καθώς εξαρτώνται από τον τόπο παραγωγής, την τεχνολογία κυψελών και το ενεργειακό μίγμα των εργοστασίων παραγωγής. Η αβεβαιότητα αυτή αναγνωρίζεται σε πολλές LCA ηλεκτρικών οχημάτων και αποτελεί έναν από τους βασικούς παράγοντες διαφοροποίησης αποτελεσμάτων.
- Η αβεβαιότητα των μακροχρόνιων ενεργειακών προβλέψεων (IEA, 2023 & Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2024 & European Commission, 2025). Τα ενεργειακά σενάρια ηλεκτροπαραγωγής για το 2030 και το 2050 αποτελούν προβλέψεις μακροχρόνιου ορίζοντα και όχι βέβαιες εξελίξεις. Συνεπώς εμπεριέχουν αβεβαιότητα ως προς τον ρυθμό διείσδυσης των ΑΠΕ και την εξέλιξη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Η αβεβαιότητα αυτή επηρεάζει κυρίως τα αποτελέσματα των BEVs, καθώς οι εκπομπές χρήσης τους εξαρτώνται άμεσα από το ηλεκτροπαραγωγικό μίγμα.
- Η ετερογενής χρήση των οχημάτων (οδήγηση πόλης/αυτοκινητοδρόμου) (ICCT, 2021 & Liora et al., 2021). Η μελέτη βασίζεται σε αντιπροσωπευτικά δεδομένα στόλου και όχι σε πραγματικές μετρήσεις οδήγησης συγκεκριμένων χρηστών. Στην πράξη, οι εκπομπές μπορούν να διαφοροποιηθούν λόγω διαφορετικών κύκλων οδήγησης, κλιματικών συνθηκών και ταχυτήτων κίνησης, παράγοντες που έχουν επισημανθεί σε συγκριτικές μελέτες ηλεκτροκίνησης του παρελθόντος. Η αβεβαιότητα αυτή ενισχύεται από το γεγονός ότι οι πραγματικές εκπομπές και η πραγματική κατανάλωση ενέργειας μπορεί να διαφοροποιούνται σημαντικά σε συνθήκες αστικής συμφόρησης, συχνών στάσεων και επιταχύνσεων ή χαμηλών ταχυτήτων κυκλοφορίας.

Μελέτες μικρής κλίμακας για τη Θεσσαλονίκη έχουν δείξει ότι δυναμικά μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τη μεταβλητότητα της ταχύτητας και της κυκλοφορίας παράγουν συχνά υψηλότερες εκτιμήσεις εκπομπών από τα στατικά μοντέλα μέσης ταχύτητας, κάτι που καταδεικνύει τους περιορισμούς των τυποποιημένων παραδοχών σε πραγματικές αστικές συνθήκες (Liora et al., 2021).

- Η απλοποίηση συστημάτων συντήρησης και ανακύκλωσης (Dunn et al., 2012 & European Environment Agency, 2018 & Burchart and Przytuła, 2024). Η ανάλυση απλοποιεί διεργασίες συντήρησης, ανακύκλωσης και δευτερογενούς χρήσης μπαταριών, οι οποίες βρίσκονται ακόμη σε φάση τεχνολογικής εξέλιξης και δεν διαθέτουν πλήρως εναρμονισμένα δεδομένα απογραφής.

- Η εργασία επικεντρώνεται αποκλειστικά στην κατηγορία GWP100 και δεν εξετάζει άλλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως εξάντληση πρώτων υλών, τοξικότητα, χρήση νερού ή επιπτώσεις από την εξόρυξη κρίσιμων μετάλλων (IPCC, 2021 & ISO, 2006b). Επομένως, τα συμπεράσματα αφορούν κυρίως το ανθρακικό αποτύπωμα και όχι το σύνολο των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Οι παραπάνω περιορισμοί δεν αναιρούν τη μεθοδολογική εγκυρότητα της μελέτης και δεν ακυρώνουν την αξιοπιστία της μελέτης, αλλά υποδηλώνουν ότι τα αποτελέσματα πρέπει να ερμηνεύονται ως συγκριτικές τάσεις μεταξύ τεχνολογιών και όχι ως απόλυτες τιμές εκπομπών για κάποιο συγκεκριμένο όχημα.

Η ρητή αναγνώρισή τους αποτελεί αναγκαίο στοιχείο της επιστημονικής τεκμηρίωσης, καθώς επιτρέπει την ορθότερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων και αποτρέπει την υπεραπλούστευση των συγκριτικών συμπερασμάτων.

Στη σύγχρονη βιβλιογραφία επισημαίνεται επίσης ότι ένας επιπλέον περιορισμός των συγκριτικών LCA ηλεκτρικών οχημάτων είναι η μεθοδολογική ετερογένεια των ίδιων των μελετών. Διαφορετικές λειτουργικές μονάδες, διαφορετικά όρια συστήματος, διαφορετικές παραδοχές για ανακύκλωση, διάρκεια ζωής ή κατανομή πιστώσεων τέλους ζωής μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές αποκλίσεις, ακόμη και όταν μελετώνται παρόμοιες κατηγορίες οχημάτων (Burchart and Przytuła, 2024).

Παρά τις αβεβαιότητες, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής παραμένει η πλέον ολοκληρωμένη, διαθέσιμη και διεθνώς αποδεκτή μέθοδος αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των οδικών μεταφορών.

Παράλληλα, η εξάρτηση των αποτελεσμάτων από τις εθνικές διαδρομές ενεργειακής μετάβασης σημαίνει ότι τα ευρήματα μιας μελέτης δεν μεταφέρονται αυτομάτως, αυτούσια, από μία χώρα σε άλλη. Οι διαφοροποιήσεις στα ενεργειακά μίγματα και στις στρατηγικές απανθρακοποίησης μπορούν να αλλάξουν ουσιαστικά τόσο το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα όσο και την απόσταση περιβαλλοντικής εξισορρόπησης των BEVs, γεγονός που ενισχύει την ανάγκη για εθνικά προσαρμοσμένες αναλύσεις, όπως η παρούσα (ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024).

Για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας πρέπει να αναγνωσθούν, πρωτίτως, ως συγκριτικά και ερμηνευτικά ευρήματα για την ελληνική περίπτωση και όχι ως μηχανικά μεταφερόμενα συμπεράσματα σε άλλα εθνικά ενεργειακά περιβάλλοντα.

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές, το υπολογιστικό μοντέλο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής εφαρμόζεται στα εξεταζόμενα ενεργειακά σενάρια για την Ελλάδα. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών, τόσο ως συνολικές εκπομπές κύκλου ζωής όσο και ως απόσταση περιβαλλοντικής εξισορρόπησης μεταξύ των υφιστάμενων τεχνολογιών.

4. Αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

4.1 Εισαγωγή στα αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (AKZ) για τις τρεις κατηγορίες/τεχνολογίες επιβατηγών οχημάτων, οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICEVs), υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (HEVs) και αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία (BEVs), υπό τα τρία διακριτά ενεργειακά σενάρια ηλεκτροπαραγωγής που αντιστοιχούν στις χρονικές περιόδους **2026, 2030 και 2050**.

Η ανάλυση των σεναρίων βασίζεται στις ενεργειακές προβλέψεις εξέλιξης του ηλεκτρικού συστήματος της Ελλάδας, σύμφωνα με στοιχεία του ΑΔΜΗΕ και του Εθνικού Σχεδίου για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), (IPTO/ADMIE, 2023b & Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2024 & European Commission, 2025) και στη διεθνή βιβλιογραφία.

Τα αποτελέσματα αφορούν αποκλειστικά στις εκπομπές του ισοδυνάμου διοξειδίου του άνθρακα (CO_{2e}), σύμφωνα με την κατηγορία επιπτώσεων Global Warming Potential (GWP100), δηλαδή σύμφωνα με τη μεθοδολογική προσέγγιση που περιγράφεται στο 3ο Κεφάλαιο.

Αν και το παρόν κεφάλαιο δίνει έμφαση κυρίως στην ερμηνεία και στη συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων, περιλαμβάνει και τις βασικές ποσοτικές εκτιμήσεις που προκύπτουν από το υπολογιστικό μοντέλο της LCA, καθώς και τις βασικές τάσεις που αναδεικνύονται από την εφαρμογή του υπολογιστικού μοντέλου της μελέτης.

Η διεθνής βιβλιογραφία αξιοποιείται στο παρόν κεφάλαιο, επικουρικά, με στόχο τη σύγκριση και ερμηνεία των τάσεων που προκύπτουν από το υπολογιστικό μοντέλο της παρούσας μελέτης, και όχι για την άμεση παραγωγή των αριθμητικών αποτελεσμάτων.

Η προσέγγιση αυτή είναι συμβατή με τη λογική συγκριτικών LCA μελετών, όπου η έμφαση δίνεται όχι μόνο στις απόλυτες αριθμητικές τιμές, αλλά και στη συνέπεια των σχετικών διαφορών μεταξύ τεχνολογιών υπό διαφορετικά ενεργειακά συστήματα.

Στη σύγχρονη βιβλιογραφία, τα αποτελέσματα των BEVs, των HEVs και των ICEVs αξιολογούνται συχνά με όρους τάσεων και σχετικής μεταβολής του ανθρακικού αποτυπώματος, καθώς οι ακριβείς τιμές επηρεάζονται από τις παραδοχές της εκάστοτε μελέτης, το ενεργειακό μίγμα, το μέγεθος της μπαταρίας και τα όρια του συστήματος (ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024 & Negri and Bieker, 2025).

Κατά συνέπεια, το παρόν κεφάλαιο εστιάζει, πρωτίστως, στην ερμηνεία των σχετικών διαφορών μεταξύ των τεχνολογιών και στη σύνδεσή τους με τη δυναμική εξέλιξη του ελληνικού ενεργειακού μίγματος, διατηρώντας τη βιβλιογραφία ως σημείο αναφοράς για τη συμβατότητα των ευρημάτων και όχι ως πηγή παραγωγής των ίδιων των αποτελεσμάτων.

4.2 Συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα ανά τεχνολογία

Τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, κανονικοποιημένα στη λειτουργική μονάδα ($\text{gCO}_2\text{e/km}$), παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1. Εκπομπές κύκλου ζωής ανά στάδιο και τεχνολογία ($\text{gCO}_2\text{e/km}$).

Στάδιο κύκλου ζωής	ICEV	HEV	BEV 2026	BEV 2030	BEV 2050
Παραγωγή οχήματος	35	40	37	37	37
Παραγωγή μπαταρίας	0	0,6	23	23	23
Χρήση	150	104	77	43	8,5
Συντήρηση	10	8	6	6	6
Τέλος ζωής	-5	-5	-5	-5	-5
Σύνολο	190	148	138	104	70

Πηγή: Ιδία επεξεργασία, βάσει των παραδοχών και συντελεστών του Κεφαλαίου 3.

Οι τιμές του Πίνακα 4.1 είναι αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου της παρούσας εργασίας, με βάση τις παραδοχές και τους συντελεστές που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3. Δεν αποτελούν απόλυτες τιμές για συγκεκριμένο εμπορικό μοντέλο οχήματος, αλλά συγκριτικές εκτιμήσεις για τυπικά οχήματα μεσαίας κατηγορίας.

4.2.1 Οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης (ICEVs)

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα ICEVs παρουσιάζουν σταθερά το υψηλότερο συνολικό αποτύπωμα εκπομπών CO_2e σε όλα τα εξεταζόμενα ενεργειακά σενάρια.

Το μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών προέρχεται από τη φάση χρήσης, δηλαδή την καύση ορυκτού καυσίμου κατά τη λειτουργία του οχήματος, λόγω:

- των άμεσων εκπομπών καύσης καυσίμων, όπως βενζίνης και πετρελαίου,
- των σημαντικών εκπομπών παραγωγής καυσίμου, ανά λίτρο καυσίμου,
- της υψηλής εξάρτησης των εκπομπών από τις πραγματικές οδηγικές συνθήκες,
- της συνεχούς εξάρτησης του συστήματος κίνησης από ορυκτούς ενεργειακούς πόρους.

Οι εκπομπές που προέρχονται από τη χρήση μπορούν να αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του κύκλου ζωής ενός ICEV, όπως καταγράφεται σε συγκριτικές LCA επιβατηγών οχημάτων (ICCT, 2021 & Negri and Bieker, 2025).

Η φάση παραγωγής συμβάλλει μεν στο συνολικό αποτύπωμα, αλλά παραμένει δευτερεύουσας σημασίας σε σχέση με τις εκπομπές λειτουργίας και εκτιμάται, για οχήματα μεσαίας κατηγορίας, σε επίπεδα της τάξης των 6–9 $\text{t CO}_2\text{e}$ (ICCT, 2021). Αντίθετα, οι

σωρευτικές εκπομπές λειτουργίας υπερβαίνουν κατά πολύ τις εκπομπές παραγωγής σε όλη τη διάρκεια ζωής του οχήματος (EEA, 2023).

Αυτό είναι σύμφωνο με τη διεθνή βιβλιογραφία, η οποία καταγράφει ότι το 70–85% του συνολικού αποτυπώματος ενός ICEV παράγεται κατά τη χρήση (ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024).

Η σχετική σταθερότητα του προφίλ εκπομπών των ICEVs αποτελεί κοινό εύρημα στη βιβλιογραφία, καθώς το μεγαλύτερο μέρος του ανθρακικού τους αποτυπώματος παραμένει συνδεδεμένο με την καύση ορυκτού καυσίμου κατά τη χρήση και όχι με εξωγενείς μεταβολές του ηλεκτρικού τομέα. Για τον λόγο αυτό, οι συγκριτικές LCA μελέτες καταγράφουν συνήθως περιορισμένη διαφοροποίηση των ICEVs μεταξύ σεναρίων που αφορούν μεταβολές στην ηλεκτροπαραγωγή, σε αντίθεση με ό,τι συμβαίνει στα BEVs (Burchart and Przytuła, 2024).

Η περιβαλλοντική επίδοση των ICEVs παραμένει ουσιαστικά ανεξάρτητη από την εξέλιξη του ηλεκτρικού συστήματος, καθώς η τεχνολογία δεν συνδέεται με το μίγμα ηλεκτροπαραγωγής.

4.2.2 Υβριδικά οχήματα (HEVs)

Τα HEVs εμφανίζουν σημαντικά μειωμένο αποτύπωμα, σε σχέση με τα ICEVs. Η μείωση αυτή συντελείται κυρίως λόγω:

- της βελτιωμένης ενεργειακής απόδοσης του συστήματος κίνησης,
- της ανάκτησης ενέργειας κατά την πέδηση,
- της δυνατότητας λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος σε χαμηλά φορτία,
- της προσωρινής ηλεκτρικής κίνησης σε χαμηλές ταχύτητες,
- της περιορισμένης κατανάλωσης καυσίμου σε αστικές συνθήκες.

Ωστόσο, οι εκπομπές χρήσης παραμένουν σημαντικές καθώς τα οχήματα εξακολουθούν να εξαρτώνται από την καύση ορυκτού καυσίμου και άρα δεν μπορούν να επιτύχουν μηδενικές εκπομπές στη φάση της χρήσης (IEA, 2023).

Οι εκπομπές παραγωγής βρίσκονται σε παρόμοια επίπεδα με εκείνες των ICEVs (ICCT, 2021), ενώ το συνολικό αποτύπωμα καθορίζεται και πάλι κυρίως από τη φάση χρήσης, αν και σε μειωμένο βαθμό. Έτσι, η περιβαλλοντική τους απόδοση βελτιώνεται σε αστικές συνθήκες, αλλά παραμένει περιορισμένη σε διαδρομές μεγάλων αποστάσεων.

Η ενδιάμεση αυτή θέση των HEVs στη συγκριτική ιεράρχηση τεχνολογιών καταγράφεται συστηματικά και στη διεθνή βιβλιογραφία, όπου τα υβριδικά οχήματα θεωρούνται μεταβατική τεχνολογία: βελτιώνουν την ενεργειακή απόδοση και μειώνουν τις εκπομπές έναντι των ICEVs, χωρίς όμως να βρίσκονται σε φάση απεξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα, ούτε να επωφελούνται στον ίδιο βαθμό με τα BEVs από την απανθρακοποίηση του ηλεκτροπαραγωγικού τομέα (Nordelöf et al., 2014 & ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024).

Οι εκπομπές παραγωγής των HEVs παραμένουν σε συγκρίσιμα επίπεδα με εκείνες των ICEVs, με μικρές διαφοροποιήσεις που συνδέονται με την πρόσθετη ηλεκτρική υποβοήθηση και τη μικρή μπαταρία τους (Nordelöf et al., 2014 & ICCT, 2021).

4.2.3 Ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία (BEVs)

Τα BEVs παρουσιάζουν διαφορετική κατανομή εκπομπών στον κύκλο ζωής σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες, με το χαμηλότερο συνολικό αποτύπωμα CO_{2e} στα σενάρια του 2030 και, ακόμη περισσότερο, σε αυτά του 2050.

Το μεγαλύτερο μέρος του αρχικού αποτυπώματος των BEVs εντοπίζεται στη φάση παραγωγής και ιδίως στην κατασκευή της μπαταρίας, η οποία μπορεί να αντιπροσωπεύει εκπομπές της τάξης των 10–15 t CO_{2e}, ανάλογα με τις τεχνολογικές και μεθοδολογικές παραδοχές της ανάλυσης (Notter et al., 2010 & Dunn et al., 2012 & Ellingsen et al., 2014 & Dunn et al., 2015). Όμως, η συμβολή αυτή μπορεί να αντισταθμιστεί σε βάθος χρήσης, υπό τις παραδοχές της παρούσας ανάλυσης, μέσω των χαμηλότερων εκπομπών κατά τη φάση λειτουργίας τους.

Η περιβαλλοντική τους επίδοση οφείλεται κυρίως στο ότι:

- δεν εμφανίζουν άμεσες εκπομπές εξάτμισης κατά τη χρήση, ενώ οι έμμεσες εκπομπές τους εξαρτώνται από το μίγμα ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιείται για τη φόρτιση,
- η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας συνδέεται με σταθερή μείωση εκπομπών στο ενεργειακό μίγμα (εξάρτηση από το ενεργειακό μίγμα φόρτισης).

Οι εκπομπές χρήσης εξαρτώνται, αποκλειστικά, από το μίγμα της ηλεκτροπαραγωγής:

- 2026: τα BEVs εμφανίζουν χαμηλότερο συνολικό αποτύπωμα από τα ICEVs και τα HEVs, αλλά το πλεονέκτημά τους παραμένει πιο περιορισμένο σε σχέση με τα επόμενα σενάρια.
- 2030: μεγάλη βελτίωση λόγω ΑΠΕ.
- 2050: πολύ χαμηλές έμμεσες εκπομπές χρήσης, λόγω σχεδόν πλήρους απανθρακοποίησης του ηλεκτρικού συστήματος (IEA, 2023 & European Union, 2021 & Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2020).

Η προοδευτική αυτή βελτίωση δεν αποτελεί ιδιότητα του ίδιου του οχήματος μεμονωμένα, αλλά αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ τεχνολογίας οχήματος και δομής του ενεργειακού συστήματος. Για τον λόγο αυτό, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων για τα BEVs οφείλει να γίνεται πάντα σε συνάρτηση με το εκάστοτε σενάριο ηλεκτροπαραγωγής και όχι με στατικό ή γενικευμένο τρόπο (Burchart and Przytuła, 2024).

Η παραπάνω κατανομή επιβεβαιώνει ότι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των BEVs εξαρτάται από το ενεργειακό σύστημα στο οποίο εντάσσονται, εύρημα που καταγράφεται ευρέως στη διεθνή βιβλιογραφία συγκριτικών LCA μεταφορών (ICCT, 2021).

Το εύρημα αυτό συμφωνεί πλήρως με τις πρόσφατες ανασκοπήσεις carbon footprint, σύμφωνα με τις οποίες τα BEVs εμφανίζουν ένα διπλό περιβαλλοντικό προφίλ: υψηλότερο αρχικό αποτύπωμα παραγωγής, κυρίως λόγω της μπαταρίας, αλλά σημαντικά χαμηλότερες εκπομπές στη φάση χρήσης, όταν η ηλεκτροπαραγωγή βασίζεται σε χαμηλότερης έντασης πηγές άνθρακα. Ως εκ τούτου, η συνολική τους επίδοση βελτιώνεται παράλληλα με την απανθρακοποίηση του συστήματος φόρτισης (ICCT, 2021 & IEA, 2023 & Burchart and Przytuła, 2024 & Negri and Bieker, 2025).

4.3 Σύγκριση συνολικών εκπομπών CO_{2e} ανά σενάριο για ICEV, HEV και BEV

Η επίδοση των τεχνολογιών διαφοροποιείται σημαντικά μεταξύ των τριών ενεργειακών σεναρίων, καθώς τα ICEVs και τα HEVs εξαρτώνται κυρίως από το καύσιμο, ενώ τα BEVs εξαρτώνται άμεσα από το μίγμα της ηλεκτροπαραγωγής. Η σύγκριση πραγματοποιείται με βάση τις συνολικές εκπομπές κύκλου ζωής (gCO_{2e}/km), όπως προκύπτουν από το υπολογιστικό μοντέλο της AKZ.

4.3.1 Σενάριο 2026

Στο σενάριο του 2026, η ηλεκτροπαραγωγή της Ελλάδας βρίσκεται σε μεταβατικό στάδιο. Αντιπροσωπεύει ένα ενεργειακό σύστημα, στο οποίο η ηλεκτροπαραγωγή εξακολουθεί να περιλαμβάνει σημαντικό ποσοστό θερμικών μονάδων, παρά την αυξανόμενη συμμετοχή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Σε αυτές τις συνθήκες, τα BEVs εμφανίζουν χαμηλότερες συνολικές εκπομπές από τα ICEVs, ενώ τα HEVs καταλαμβάνουν ενδιάμεση θέση, αλλά η διαφορά δεν είναι ακόμη μέγιστη, καθώς οι εκπομπές ηλεκτροπαραγωγής (ανά kWh) παραμένουν σχετικά υψηλές.

Η κατανομή εκπομπών των BEVs χαρακτηρίζεται από υψηλή συμβολή της κατασκευής τους και μικρότερη της χρήσης τους, σε αντίθεση με τα ICEVs όπου η χρήση παραμένει η κυρίαρχη συνιστώσα.

Αντίστοιχα ευρήματα αναφέρονται σε συγκριτικές μελέτες για χώρες με μεταβατικό ενεργειακό μίγμα, όπου τα ηλεκτρικά οχήματα εμφανίζουν πλεονέκτημα, αλλά όχι σε μεγάλο βαθμό (ICCT, 2021).

Η βιβλιογραφία δείχνει ότι σε μεταβατικά ενεργειακά συστήματα, όπου η ηλεκτροπαραγωγή εξακολουθεί να περιλαμβάνει σημαντικό ποσοστό ορυκτών καυσίμων, τα BEVs διατηρούν συνήθως συγκριτικό πλεονέκτημα έναντι των ICEVs, αλλά το μέγεθος αυτού του πλεονεκτήματος παραμένει περιορισμένο σε σχέση με πιο ώριμα συστήματα υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ. Αυτό ακριβώς αντανακλάται και στην παρούσα μελέτη για το ελληνικό σενάριο του 2026 (ICCT, 2021 & IEA, 2023 & Burchart and Przytuła, 2024).

Ωστόσο, ακόμη και στο σενάριο αυτό (του 2026):

- τα BEVs υπερτερούν των ICEVs,
- τα HEVs βρίσκονται μεταξύ των δύο τεχνολογιών,
- το break-even distance για τα BEVs επιτυγχάνεται σε αποστάσεις μεσαίου εύρους.

4.3.2 Σενάριο 2030

Στο σενάριο του 2030 προβλέπεται σημαντική αύξηση της συμμετοχής των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, σύμφωνα με τους στόχους του Εθνικού Σχεδίου για την Ενέργεια και το Κλίμα (Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2019 & Hellenic Ministry of

Environment and Energy, 2024 & European Commission, 2025). Επομένως αναμένεται σημαντική μείωση των εκπομπών ηλεκτροπαραγωγής. Η μείωση της έντασης άνθρακα της ηλεκτροπαραγωγής θα έχει άμεση και θετική επίδραση στις εκπομπές χρήσης και, κατ' επέκταση, στο συνολικό αποτύπωμα των BEVs.

Σε αυτό το σενάριο:

- τα BEVs εμφανίζουν σαφή υπεροχή έναντι όλων των άλλων τεχνολογιών,
- το break-even distance μειώνεται αισθητά,
- η διαφορά εκπομπών μεταξύ BEV και ICEV διευρύνεται.

Τα αποτελέσματα δείχνουν σαφή μείωση των συνολικών εκπομπών των BEVs σε σχέση με το σενάριο 2026. Η διαφορά μεταξύ BEVs και ICEVs διευρύνεται, ενώ τα HEVs εξακολουθούν να εμφανίζουν βελτιωμένη επίδοση έναντι των ICEVs, χωρίς όμως να προσεγγίζουν τις τιμές των BEVs.

Έτσι, τα HEVs συνεχίζουν να αποτελούν καλύτερη επιλογή από τα ICEVs, αλλά όχι συγκρίσιμη (ακόμη) με τα BEVs.

Η μεταβολή αυτή συνάδει με διεθνείς αναλύσεις που δείχνουν ότι η περιβαλλοντική επίδοση των ηλεκτρικών οχημάτων βελτιώνεται όσο μειώνεται ο συντελεστής εκπομπών της ηλεκτρικής ενέργειας (ICCT, 2021 & IEA, 2023 & Burchart and Przytuła, 2024 & Negri and Bieker, 2025).

Η βελτίωση αυτή είναι μεθοδολογικά αναμενόμενη, καθώς οι σχετικές μελέτες δείχνουν ότι όσο μειώνεται ο συντελεστής εκπομπών της ηλεκτρικής ενέργειας, το ποσοστό συμμετοχής της φάσης χρήσης, στο συνολικό αποτύπωμα των BEVs, περιορίζεται αισθητά. Ως αποτέλεσμα, οι περί των BEVs τεχνολογίες τείνουν να αποκτούν σαφή περιβαλλοντική υπεροχή, ήδη, με μεσοπρόθεσμο ορίζοντα ενεργειακής μετάβασης (Burchart and Przytuła, 2024).

4.3.3 Σενάριο 2050

Το σενάριο του 2050 αντιστοιχεί σε ηλεκτρικό σύστημα πολύ χαμηλής έντασης άνθρακα, σε ηλεκτροπαραγωγή σχεδόν μηδενικού ανθρακικού αποτυπώματος που βασίζεται κυρίως σε ανανεώσιμες πηγές και τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών.

Σε αυτό το πλαίσιο:

- τα BEVs επιτυγχάνουν το χαμηλότερο δυνατό αποτύπωμα,
- η φάση χρήσης συμβάλλει ελάχιστα στις συνολικές εκπομπές,
- το αποτύπωμα παραγωγής γίνεται πλέον ο κυρίαρχος παράγοντας.

Επομένως, οι εκπομπές χρήσης των BEVs μειώνονται σημαντικά και η συνολική επίδοση καθορίζεται κυρίως από τις εκπομπές κατά την κατασκευή.

Αντιθέτως, οι εκπομπές των ICEVs και των HEVs παραμένουν υψηλές, καθώς η λειτουργία τους εξακολουθεί να βασίζεται στην καύση ορυκτού καυσίμου.

Το αποτέλεσμα είναι η μέγιστη διαφοροποίηση μεταξύ των τεχνολογιών, με τα BEVs να εμφανίζουν το χαμηλότερο συνολικό αποτύπωμα, τα ICEVs να παρουσιάζουν το υψηλότερο αποτύπωμα από όλες τις τεχνολογίες, ενώ τα HEVs να διατηρούν ενδιάμεση θέση. Ανάλογη εξέλιξη καταγράφεται και σε ευρωπαϊκές LCA μελέτες για ενεργειακά συστήματα υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ (European Union, 2021 & Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2020 & ICCT, 2021 & IEA, 2023 & Negri and Bieker, 2025).

Σε τέτοιες συνθήκες σχεδόν πλήρους απανθρακοποίησης, η βιβλιογραφία δείχνει ότι η φάση χρήσης των BEVs παύει να αποτελεί την κυρίαρχη πηγή εκπομπών και το κέντρο βάρους του αποτυπώματος μεταφέρεται οριστικά στην κατασκευή, κυρίως στην παραγωγή του οχήματος και της μπαταρίας. Το γεγονός αυτό δεν μειώνει το συγκριτικό τους πλεονέκτημα, αλλά αλλάζει τη δομή του συνολικού ανθρακικού αποτυπώματος, κάτι που αποτυπώνεται καθαρά και στα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας (Burchart and Przytuła, 2024).

4.4 Ανάλυση συμβολής σταδίων κύκλου ζωής

Η ανάλυση της συμβολής των επιμέρους σταδίων του κύκλου ζωής δείχνει ουσιαστικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των τεχνολογιών. Στα ICEVs, το κυρίαρχο στάδιο είναι η χρήση. Η καύση ορυκτού καυσίμου κατά τη λειτουργία του οχήματος καθορίζει το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού αποτυπώματος, ενώ η παραγωγή του οχήματος, η συντήρηση και το τέλος ζωής του έχουν μικρότερη σχετική συμβολή (ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024).

Στα HEVs, η φάση χρήσης παραμένει επίσης κυρίαρχη, αλλά με χαμηλότερη ένταση σε σχέση με τα ICEVs. Η υβριδική τεχνολογία μειώνει την κατανάλωση ορυκτού καυσίμου, ιδίως σε αστικές συνθήκες, χωρίς όμως να εξαλείφει τις εκπομπές λειτουργίας. Επομένως, η συμβολή της χρήσης εξακολουθεί να είναι η σημαντικότερη συνιστώσα του κύκλου ζωής.

Στα BEVs, η εικόνα είναι διαφορετική. Η παραγωγή του οχήματος και της μπαταρίας έχουν μεγαλύτερη σχετική συμμετοχή στο συνολικό αποτύπωμα, ιδίως όσο μειώνονται οι εκπομπές χρήσης. Στο σενάριο του 2026, η χρήση εξακολουθεί να έχει αξιόλογη συμβολή, επειδή το ηλεκτρικό μίγμα δεν έχει ακόμη απανθρακοποιηθεί πλήρως. Στο 2030, η συμμετοχή της χρήσης μειώνεται αισθητά. Στο 2050, η χρήση παύει να αποτελεί κυρίαρχη πηγή εκπομπών και το αποτύπωμα του BEV καθορίζεται κυρίως από την παραγωγή (Hawkins et al., 2013 & Ellingsen et al., 2016 & ICCT, 2021).

Η μετατόπιση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία. Δείχνει ότι, όσο καθαρότερο γίνεται το ηλεκτρικό σύστημα, τόσο περισσότερο η περιβαλλοντική βελτίωση των BEVs θα εξαρτάται από την παραγωγή των μπαταριών τους, την προέλευση των υλικών κατασκευής, την ενεργειακή ένταση της βιομηχανικής παραγωγής και τις πρακτικές ανακύκλωσης. Συνεπώς, η μελλοντική μείωση του αποτυπώματος των BEVs δεν θα προκύψει μόνο από καθαρότερη φόρτιση, αλλά και από καθαρότερη παραγωγική αλυσίδα (Dunn et al., 2012 & Dunn et al., 2015 & Burchart and Przytuła, 2024).

4.5 Απόσταση περιβαλλοντικής εξισορρόπησης (Break-even distance) για τα BEVs

Η απόσταση περιβαλλοντικής εξισορρόπησης (break-even distance) αποτελεί δείκτη σύγκρισης μεταξύ BEVs και συμβατικών οχημάτων. Εκφράζει τη διανυθείσα απόσταση στην οποία οι σωρευτικές εκπομπές ενός οχήματος BEV γίνονται ίσες με εκείνες ενός οχήματος ICEV ή HEV. Κατά συνέπεια, το break-even distance αποτελεί βασικό δείκτη περιβαλλοντικής επίδοσης.

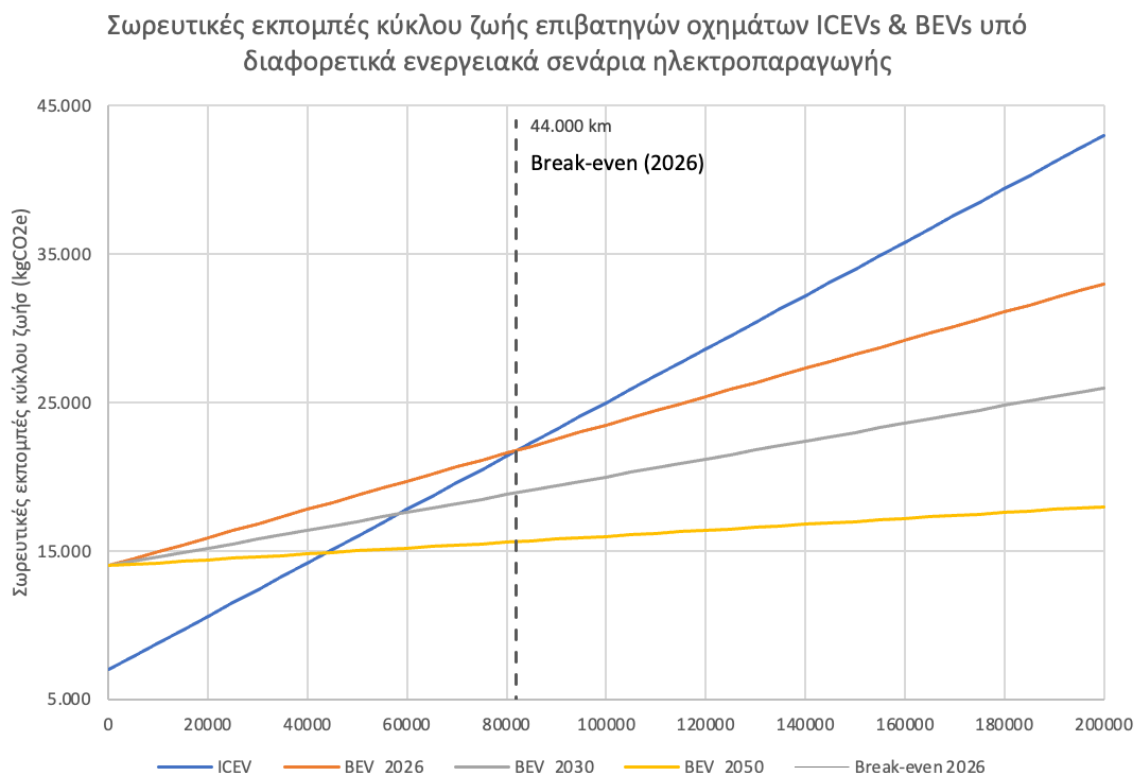
Το όχημα BEV εμφανίζει, αρχικά, υψηλότερες εκπομπές λόγω της παραγωγής της μπαταρίας του. Ωστόσο, κατά τη χρήση οι εκπομπές ανά χιλιόμετρο είναι χαμηλότερες, με αποτέλεσμα οι σωρευτικές εκπομπές να συγκλίνουν όσο αυξάνεται η διανυθείσα απόσταση.

Η εξέλιξη των σωρευτικών εκπομπών κύκλου ζωής ως προς τη διανυθείσα απόσταση παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. Το σημείο τομής των καμπυλών BEV–ICEV αντιστοιχεί στην απόσταση περιβαλλοντικής εξισορρόπησης (break-even distance).

Στη διεθνή βιβλιογραφία, ο δείκτης αυτός χρησιμοποιείται ως κρίσιμο εργαλείο ερμηνείας των συγκριτικών LCA τεχνολογιών οχημάτων, επειδή συμπυκνώνει σε μία μετρική τόσο το αυξημένο αρχικό αποτύπωμα παραγωγής του BEV όσο και το λειτουργικό του πλεονέκτημα κατά τη χρήση.

Ως εκ τούτου, το break-even distance δεν αποτελεί σταθερό γνώρισμα ενός τύπου οχήματος, αλλά δυναμικό αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ τεχνολογίας μπαταρίας, κατανάλωσης ενέργειας και έντασης άνθρακα του συστήματος φόρτισης (ICCT, 2021 & IEA, 2023 & Burchart and Przytuła, 2024 & Negri and Bieker, 2025).

Σχήμα 4.1. Σωρευτικές εκπομπές κύκλου ζωής (kgCO_{2e}) ως συνάρτηση της διανυθείσας απόστασης και προσδιορισμός της απόστασης περιβαλλοντικής εξισορρόπησης (break-even distance) για τα BEVs σε σύγκριση με τα ICEVs για τα ενεργειακά σενάρια 2026, 2030 και 2050.



Οι υπολογισμοί του break-even βασίζονται σε αντιπροσωπευτικές τιμές στόλου και όχι σε συγκεκριμένο μοντέλο οχήματος. Οι παράμετροι παραγωγής και κατανάλωσης επιλέχθηκαν εντός του εύρους τιμών που καταγράφονται σε ευρωπαϊκές συγκριτικές LCA επιβατηγών οχημάτων (ICCT, 2021 & Negri and Bieker, 2025).

Η ανάλυση σωρευτικών εκπομπών δείχνει ότι το ηλεκτρικό όχημα παρουσιάζει υψηλότερο ανθρακικό αποτύπωμα στο στάδιο παραγωγής, λόγω της κατασκευής της μπαταρίας του. Ωστόσο, λόγω των σημαντικά χαμηλότερων εκπομπών κατά τη φάση χρήσης του, οι συνολικές εκπομπές του εξισώνονται με εκείνες του οχήματος εσωτερικής καύσης, μετά από περίπου 82.300 km, για το ενεργειακό μίγμα του 2026.

Η απόσταση αυτή μειώνεται σε περίπου 58.300 km για το σενάριο του 2030 και σε 43.800 km για το σενάριο του 2050, γεγονός που αναδεικνύει τον καθοριστικό ρόλο της απανθρακοποίησης της ηλεκτροπαραγωγικής διαδικασίας στην περιβαλλοντική απόδοση της ηλεκτροκίνησης.

Πίνακας 4.2. Απόσταση περιβαλλοντικής εξισορρόπησης BEV - ICEV, ανά ενεργειακό σενάριο.

Σενάριο	Χαρακτήρας ηλεκτρικού μίγματος	Break-even BEV - ICEV
2026	Μεταβατικό μίγμα ηλεκτροπαραγωγής	82.300 km
2030	Αυξημένη συμμετοχή ΑΠΕ και χαμηλότερη ένταση άνθρακα	58.300 km
2050	Πολύ χαμηλή ένταση άνθρακα ηλεκτροπαραγωγής	43.800 km

Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει του υπολογιστικού μοντέλου της παρούσας εργασίας.

Οι τιμές του Πίνακα 4.2 αφορούν αποκλειστικά περιβαλλοντικό break-even distance, δηλαδή σημείο εξίσωσης σωρευτικών εκπομπών CO_{2e} μεταξύ BEV και ICEV. Δεν εκφράζουν είτε οικονομικό χρόνο απόσβεσης είτε συνολικό κόστος ιδιοκτησίας είτε χρηματοοικονομικό σημείο ισορροπίας.

Η συστηματική μείωση της απόστασης περιβαλλοντικής εξισορρόπησης από το 2026 προς το 2050 είναι πλήρως συνεπής με τη λογική των συγκριτικών μελετών carbon footprint, στις οποίες η επιτάχυνση της απανθρακοποίησης του ηλεκτρικού τομέα οδηγεί σε ολοένα ταχύτερη αντιστάθμιση του αρχικού αποτυπώματος κατασκευής των BEVs. Με άλλα λόγια, όσο καθαρότερο γίνεται το δίκτυο, τόσο νωρίτερα το ηλεκτρικό όχημα υπερτερεί περιβαλλοντικά του συμβατικού (ICCT, 2021 & IEA, 2023 & Burchart and Przytuła, 2024).

4.5.1 Σενάριο 2026

Στο μεταβατικό ενεργειακό μίγμα, η μείωση εκπομπών ανά χιλιόμετρο είναι περιορισμένη. Ως αποτέλεσμα, η απόσταση εξισορρόπησης επιτυγχάνεται μετά από σημαντική χρήση του οχήματος (βλ. 82.300 km). Το BEV καθίσταται περιβαλλοντικά συγκρίσιμο με το ICEV, μόνο μετά από διανυθείσα απόσταση μεσαίου εύρους (βλ. Σχ. 4.1).

4.5.2 Σενάριο 2030

Με τη μείωση του συντελεστή εκπομπών της ηλεκτροπαραγωγής, η διαφορά εκπομπών ανά χιλιόμετρο αυξάνεται. Η εξισορρόπηση επιτυγχάνεται σε μικρότερη απόσταση (58.300 km), καθώς οι εκπομπές χρήσης μειώνονται σημαντικά (βλ. Σχ. 4.1).

4.5.3 Σενάριο 2050

Σε ηλεκτρικό σύστημα πολύ χαμηλών εκπομπών, οι εκπομπές χρήσης των BEVs είναι ελάχιστες. Η σύγκλιση των σωρευτικών εκπομπών πραγματοποιείται σε μικρή απόσταση από την έναρξη χρήσης του οχήματος (βλ. 43.800 km). Στην περίπτωση αυτή, το αποτύπωμα κύκλου ζωής καθορίζεται σχεδόν αποκλειστικά από την παραγωγή (βλ. Σχ. 4.1).

Η εξέλιξη της απόστασης εξισορρόπησης, σε σχέση με το ενεργειακό μίγμα, επιβεβαιώνεται από διεθνείς συγκριτικές αναλύσεις κύκλου ζωής, οι οποίες δείχνουν ότι όσο μειώνεται η ένταση άνθρακα της ηλεκτροπαραγωγής, τόσο ταχύτερα τα BEVs εμφανίζουν χαμηλότερες σφαιρικές εκπομπές από τα συμβατικά οχήματα (ICCT, 2021 & IEA, 2023 & Negri and Bieker, 2025).

Επομένως, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η απόσταση, στην οποία ένα BEV αντισταθμίζει το αρχικό αποτύπωμα παραγωγής του, μειώνεται σημαντικά από το 2026 στο 2030 και ακόμη περισσότερο στο 2050.

Αυτή η εξέλιξη είναι απόλυτα συμβατή με διεθνή ευρήματα που καταγράφουν βέλτιστη απόδοση των BEVs σε ηλεκτροπαραγωγικά συστήματα με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ.

Η παρατήρηση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία για την ερμηνεία πολιτικής, καθώς δείχνει ότι η περιβαλλοντική επιτυχία της ηλεκτροκίνησης δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την αντικατάσταση της τεχνολογίας οχήματος, αλλά και από την παράλληλη πρόοδο της ενεργειακής μετάβασης. Έτσι, η μείωση του break-even distance μπορεί να θεωρηθεί και ως ένδειξη της αποτελεσματικότητας της συνδυασμένης πολιτικής μεταφορών και απανθρακοποίησης της ηλεκτροπαραγωγής (Burchart and Przytuła, 2024).

4.6 Ερμηνευτική ανάλυση ευαισθησίας των βασικών παραμέτρων

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει ερμηνευτική και ποιοτική ανάλυση ευαισθησίας των βασικών παραμέτρων του υπολογιστικού μοντέλου. Δεν πραγματοποιείται πλήρης αριθμητική παραμετρική διερεύνηση όλων των πιθανών συνδυασμών, αλλά εξετάζεται η κατεύθυνση και η σχετική σημασία των μεταβλητών που, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και τη δομή του μοντέλου, επηρεάζουν περισσότερο τις συνολικές εκπομπές κύκλου ζωής και το break-even distance.

4.6.1 Ένταση άνθρακα ηλεκτρικού δικτύου

Η παράμετρος με τη μεγαλύτερη επίδραση είναι ο συντελεστής εκπομπών της ηλεκτροπαραγωγής ($\text{CO}_2\text{e/kWh}$). Μικρές μεταβολές στην ένταση άνθρακα του ηλεκτρικού συστήματος προκαλούν σημαντική διαφοροποίηση των εκπομπών χρήσης των BEVs. Καθώς ο συντελεστής μειώνεται, μειώνεται αναλογικά και το αποτύπωμα κύκλου ζωής και η απόσταση εξισορρόπησης.

Η υψηλή ευαισθησία των BEVs στο ενεργειακό μίγμα έχει καταγραφεί και σε διεθνείς συγκριτικές μελέτες, οι οποίες δείχνουν ότι η περιβαλλοντική τους επίδοση εξαρτάται άμεσα από την ηλεκτροπαραγωγική διαδικασία της χώρας λειτουργίας (ICCT, 2021 & IEA, 2023 & Burchart and Przytuła, 2024 & Negri and Bieker, 2025).

Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται και από πρόσφατες ανασκοπήσεις της βιβλιογραφίας, στις οποίες η ένταση άνθρακα της ηλεκτρικής ενέργειας αναγνωρίζεται ως ο σημαντικότερος καθοριστικός παράγοντας του τελικού carbon footprint των ηλεκτρικών οχημάτων. Η επίδρασή της είναι τόσο ισχυρή, ώστε μικρές διαφοροποιήσεις στο ενεργειακό μίγμα μπορούν να μεταβάλουν αισθητά όχι μόνο τις συνολικές εκπομπές, αλλά και τη χρονική ή χιλιομετρική στιγμή περιβαλλοντικής εξισορρόπησης των BEVs (Burchart and Przytuła, 2024).

4.6.2 Εκπομπές παραγωγής μπαταρίας

Η δεύτερη σημαντική παράμετρος είναι οι εκπομπές παραγωγής της μπαταρίας. Η αύξηση της τιμής εκπομπών ανά kWh μπαταρίας αυξάνει το αρχικό αποτύπωμα των BEVs και μετατοπίζει την απόσταση εξισορρόπησης σε μεγαλύτερα χιλιόμετρα. Αντίθετα, βελτιωμένες τεχνολογίες παραγωγής ή καθαρότερο ενεργειακό μίγμα κατασκευής μειώνουν την αρχική περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Η διακύμανση αυτή αναγνωρίζεται στη βιβλιογραφία ως ένας από τους κύριους παράγοντες αβεβαιότητας στις LCA ηλεκτρικών οχημάτων (Notter et al., 2010 & Ellingsen et al., 2014 & Ellingsen et al., 2016 & Dunn et al., 2015 & Burchart and Przytuła, 2024).

Η σημασία της παραμέτρου αυτής σχετίζεται και με τη μεγάλη ετερογένεια των διαθέσιμων δεδομένων στη βιβλιογραφία. Οι διαφορές στην τεχνολογία κυψελών, στο γεωγραφικό πλαίσιο παραγωγής, στο ενεργειακό υπόβαθρο των εργοστασίων και στις παραδοχές τέλους ζωής μπορούν να δημιουργήσουν αισθητή απόκλιση μεταξύ διαφορετικών εκτιμήσεων ανθρακικού αποτυπώματος των μπαταριών (Burchart and Przytuła, 2024).

4.6.3 Κατανάλωση ενέργειας και συνθήκες χρήσης

Η κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο επηρεάζει άμεσα τις εκπομπές χρήσης των BEVs και των HEVs. Μεταβολές που σχετίζονται με τη μάζα του οχήματος, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τον οδηγικό κύκλο, οδηγούν σε διακριτή διαφοροποίηση των εκπομπών. Σε αστικές συνθήκες, τα HEVs και τα BEVs εμφανίζουν χαμηλότερες εκπομπές λόγω ανάκτησης ενέργειας και υψηλότερης απόδοσης, ενώ στα ICEVs οι εκπομπές παρουσιάζουν μεγαλύτερη μεταβλητότητα (ICCT, 2021 & Liora et al., 2021 & Burchart and Przytuła, 2024).

Η μεταβλητότητα αυτή γίνεται ακόμη πιο εμφανής σε αστικά περιβάλλοντα έντονης κυκλοφοριακής συμφόρησης, όπου η πραγματική κατανάλωση και οι πραγματικές εκπομπές μπορεί να αποκλίνουν από τις τιμές που αντιστοιχούν σε μέσους ή τυποποιημένους κύκλους οδήγησης. Μελέτες για τη Θεσσαλονίκη έχουν δείξει ότι η ενσωμάτωση δυναμικών προφίλ ταχύτητας και συμφόρησης μεταβάλλει αισθητά τις εκτιμώμενες εκπομπές οδικών μεταφορών, γεγονός που ενισχύει τη σημασία των πραγματικών συνθηκών χρήσης στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων ευαισθησίας (Liora et al., 2021).

Κατά συνέπεια, η κατανάλωση ενέργειας δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται ως σταθερό τεχνικό μέγεθος, αλλά ως παράμετρος που επηρεάζεται από το πραγματικό περιβάλλον κυκλοφορίας και, συνεπώς, από το ίδιο το αστικό περιβάλλον μέσα στο οποίο λειτουργεί το όχημα.

4.6.4 Διάρκεια ζωής οχήματος

Η συνολική διανυθείσα απόσταση επηρεάζει κυρίως τα BEVs, καθώς η αρχική επιβάρυνση κατά την κατασκευή τους κατανέμεται σε περισσότερα χιλιόμετρα. Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής οδηγεί σε χαμηλότερες εκπομπές ανά km, ενώ μικρότερη χρήση αυξάνει τη σχετική συμβολή της παραγωγής τους.

Η παράμετρος αυτή είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για τα BEVs, επειδή η κατανομή του αυξημένου αρχικού αποτυπώματος παραγωγής σε μεγαλύτερο αριθμό χιλιομέτρων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την πλήρη περιβαλλοντική αξιοποίησή τους. Για τον λόγο αυτό, η διάρκεια ζωής του οχήματος και η συνολική διανυθείσα απόσταση αποτελούν σταθερά έναν από τους σημαντικούς δείκτες ευαισθησίας στις συγκριτικές LCA της ηλεκτροκίνησης (Hawkins et al., 2013 & ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024).

Επίσης, η παράμετρος αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία στην ελληνική περίπτωση, όπου το ετήσιο χιλιομετρικό φορτίο των ιδιωτικών οχημάτων μπορεί να διαφοροποιείται αισθητά από χώρα σε χώρα, επηρεάζοντας τη χρονική στιγμή κατά την οποία η ηλεκτροκίνηση αποδίδει το πλήρες περιβαλλοντικό της όφελος.

Επομένως, η ανάλυση δείχνει ότι η ένταση άνθρακα της ηλεκτροπαραγωγικής διαδικασίας αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα διαφοροποίησης των αποτελεσμάτων, ενώ οι παράμετροι παραγωγής μπαταρίας και χρήσης επηρεάζουν κυρίως το σημείο εξισορρόπησης.

Πίνακας 4.3. Ποιοτική αξιολόγηση παραμέτρων ευαισθησίας.

Παράμετρος	Επίδραση στο αποτέλεσμα	Κατεύθυνση επίδρασης	Σημασία
Ένταση άνθρακα ηλεκτρικού δικτύου	Επηρεάζει τις εκπομπές χρήσης των BEVs	Όσο μειώνεται, μειώνεται το αποτύπωμα BEV και το break-even distance	Πολύ υψηλή
Εκπομπές παραγωγής μπαταρίας	Επηρεάζουν το αρχικό αποτύπωμα των BEVs	Όσο αυξάνονται, αυξάνεται το break-even distance	Υψηλή
Κατανάλωση ενέργειας οχήματος	Επηρεάζει τις εκπομπές χρήσης	Μεγαλύτερη κατανάλωση οδηγεί σε υψηλότερες εκπομπές χρήσης	Μέτρια έως υψηλή
Συνολική διάρκεια ζωής	Επηρεάζει την κατανομή των εκπομπών παραγωγής ανά km	Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μειώνει τις εκπομπές παραγωγής ανά km	Μέτρια

Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει ICCT (2021), Burchart and Przytuła (2024) και Negri and Bieker (2025).

Ο Πίνακας 4.3 δεν αποτελεί αριθμητική παραμετρική ανάλυση ευαισθησίας, αλλά συνοπτική ποιοτική αποτύπωση των βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν τα αποτελέσματα της LCA.

Συνοπτικά, η ερμηνευτική ανάλυση ευαισθησίας αναδεικνύει την επίδραση βασικών παραμέτρων στα τελικά αποτελέσματα:

α) Ενεργειακό μίγμα

Μικρές μεταβολές στο CO_{2e}/kWh έχουν μεγάλη επίδραση στις συνολικές εκπομπές των BEVs, το πιο σημαντικό στοιχείο ευαισθησίας.

β) Μέγεθος και τεχνολογία μπαταρίας

Μεγαλύτερες μπαταρίες αυξάνουν, κυρίως, το αποτύπωμα παραγωγής και μπορούν να μεταβάλουν την ενεργειακή κατανάλωση λόγω αυξημένης μάζας.

γ) Οδηγικές συνθήκες και κατανάλωση

Η αστική οδήγηση ευνοεί τα BEVs και τα HEVs, ενώ τα ICEVs παρουσιάζουν υψηλές μεταβολές ανάλογα με το προφίλ χρήσης.

Συνολικά, η ερμηνευτική ανάλυση ευαισθησίας υποδεικνύει ότι τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης είναι περισσότερο ευαίσθητα σε παραμέτρους συστημικού χαρακτήρα, όπως το ενεργειακό μίγμα και η παραγωγή μπαταριών, παρά σε δευτερεύουσες επιμέρους

παραδοχές. Αυτό ενισχύει την ερμηνεία ότι η περιβαλλοντική επίδοση των BEVs συνδέεται στενά με την πορεία απανθρακοποίησης του ενεργειακού συστήματος και με τη βελτίωση των τεχνολογιών παραγωγής τους (Burchart and Przytuła, 2024).

Η παρατήρηση αυτή ενισχύει τη βασική ερμηνεία της παρούσας εργασίας, σύμφωνα με την οποία η περιβαλλοντική αποδοτικότητα των BEVs δεν αποτελεί στατικό χαρακτηριστικό της τεχνολογίας, αλλά αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ ενεργειακού συστήματος, τεχνολογίας οχήματος και πραγματικών συνθηκών χρήσης.

4.7 Σύγκριση με διεθνή βιβλιογραφία

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης εμφανίζουν υψηλή συμβατότητα με τη διεθνή βιβλιογραφία των συγκριτικών LCA για οχήματα εσωτερικής καύσης, υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα. Η συμφωνία αυτή αφορά κυρίως τη σχετική ιεράρχηση των τεχνολογιών και λιγότερο την απόλυτη ταύτιση των αριθμητικών τιμών, καθώς οι τιμές gCO₂e/km διαφοροποιούνται ανάλογα με τα όρια του συστήματος, τη λειτουργική μονάδα, τη διάρκεια ζωής, το ενεργειακό μίγμα και τις παραδοχές παραγωγής μπαταριών.

Οι μελέτες των Notter et al. (2010), Dunn et al. (2012), Hawkins et al. (2013), Ellingsen et al. (2014) και Ellingsen et al. (2016) ανέδειξαν ήδη από νωρίς ότι τα BEVs έχουν αυξημένο αποτύπωμα παραγωγής, κυρίως λόγω της μπαταρίας, αλλά χαμηλότερες εκπομπές κατά τη χρήση τους. Το εύρημα αυτό επιβεβαιώνεται και στην παρούσα μελέτη, όπου η παραγωγή μπαταρίας αποτελεί σημαντική συνιστώσα του αποτυπώματος των BEVs, χωρίς όμως να αναιρεί το συνολικό τους πλεονέκτημα σε βάθος χρόνου που αντιστοιχεί στον κύκλο ζωής τους.

Η μελέτη του ICCT (2021) και η νεότερη ευρωπαϊκή επικαιροποίηση των Negri and Bieker (2025) καταγράφουν ότι τα BEVs εμφανίζουν χαμηλότερες εκπομπές κύκλου ζωής σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα, ιδίως σε ενεργειακά συστήματα που κινούνται προς χαμηλότερη ένταση άνθρακα. Αντίστοιχα, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας δείχνουν ότι το πλεονέκτημα των BEVs αυξάνεται από το 2026 προς το 2030 και το 2050, καθώς μειώνεται ο συντελεστής εκπομπών ρύπων της ηλεκτροπαραγωγικής διαδικασίας.

Η ανασκόπηση των Burchart and Przytuła (2024) επιβεβαιώνει ότι οι βασικοί καθοριστικοί παράγοντες του carbon footprint των ηλεκτρικών οχημάτων είναι το ενεργειακό μίγμα φόρτισης, η παραγωγή της μπαταρίας, η κατανάλωση ενέργειας και τα όρια του κύκλου ζωής. Οι ίδιοι παράγοντες αναδείχθηκαν και στην παρούσα ανάλυση ευαισθησίας, γεγονός που ενισχύει τη μεθοδολογική συνέπεια των αποτελεσμάτων.

Επιπλέον, η διεθνής βιβλιογραφία δείχνει ότι τα HEVs επιτυγχάνουν μείωση εκπομπών σε σχέση με τα ICEVs, χωρίς όμως να διαθέτουν το μακροπρόθεσμο δυναμικό απανθρακοποίησης των BEVs, όπως καταγράφεται σε συγκριτικές αναλύσεις των τεχνολογιών ICEV, HEV και BEV (Nordelöf et al., 2014 & ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024). Το αποτέλεσμα αυτό αποτυπώνεται και στην παρούσα μελέτη, όπου τα HEVs εμφανίζονται σταθερά ως η ενδιάμεση τεχνολογία, αυτή η περιβαλλοντικά καλύτερη από τα ICEVs, αλλά λιγότερο αποδοτική από τα BEVs σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια.

Συνεπώς, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας μπορούν να θεωρηθούν βιβλιογραφικά εύλογα. Δεν αποκλίνουν από τη διεθνή τάση, αλλά την εξειδικεύουν στο ελληνικό ενεργειακό πλαίσιο, αναδεικνύοντας ότι η περιβαλλοντική επίδοση της ηλεκτροκίνησης ενισχύεται όσο προχωρά η απανθρακοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής.

4.8 Συνολική σύγκριση και κύρια συμπεράσματα

Η συνολική σύγκριση των αποτελεσμάτων αναδεικνύει σαφή ιεράρχηση των τεχνολογιών ως προς τις εκπομπές κύκλου ζωής. Τα ICEVs εμφανίζουν το υψηλότερο αποτύπωμα, κυρίως λόγω της φάσης χρήσης και της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα. Τα HEVs καταλαμβάνουν ενδιάμεση θέση, καθώς επιτυγχάνουν μείωση κατανάλωσης και εκπομπών σε σχέση με τα ICEVs, χωρίς όμως να απεξαρτώνται από τη χρήση ορυκτών καυσίμων (Nordelöf et al., 2014 & ICCT, 2021 & Negri and Bieker, 2025).

Η συνέπεια αυτή αφορά κυρίως τη γενική ιεράρχηση των τεχνολογιών και όχι την απόλυτη ταύτιση αριθμητικών τιμών, καθώς η βιβλιογραφία δείχνει ότι οι ακριβείς εκπομπές μεταβάλλονται ανάλογα με τις μεθοδολογικές παραδοχές κάθε μελέτης.

Τα BEVs εμφανίζουν το χαμηλότερο συνολικό αποτύπωμα στα εξεταζόμενα σενάρια, με το περιβαλλοντικό τους πλεονέκτημα να ενισχύεται όσο μειώνεται η ανθρακική ένταση της ηλεκτροπαραγωγής. Η μείωση των συνολικών εκπομπών από 138 gCO_{2e}/km στο σενάριο 2026 σε 104 gCO_{2e}/km το 2030 και 70 gCO_{2e}/km το 2050 δείχνει ότι η περιβαλλοντική επίδοση των ηλεκτρικών οχημάτων εξαρτάται άμεσα από την πορεία απανθρακοποίησης του ηλεκτρικού συστήματος. Η τάση αυτή είναι συνεπής με τη διεθνή βιβλιογραφία, σύμφωνα με την οποία η μείωση της ανθρακικής έντασης του ηλεκτρικού μίγματος βελτιώνει σημαντικά το συνολικό αποτύπωμα των BEVs (ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024 & Negri and Bieker, 2025).

Αντίστοιχα, η απόσταση περιβαλλοντικής εξισορρόπησης μειώνεται από 82.300 km το 2026 σε 58.300 km το 2030 και 43.800 km το 2050, επιβεβαιώνοντας ότι το αρχικό αποτύπωμα παραγωγής των BEVs αντισταθμίζεται ταχύτερα όσο καθαρότερο γίνεται το ενεργειακό μίγμα.

Το συγκεκριμένο συμπέρασμα είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την ελληνική πραγματικότητα, καθώς δείχνει ότι η ηλεκτροκίνηση δεν αποτελεί μόνο μελλοντική επιλογή, αλλά ήδη από το μεταβατικό σενάριο του 2026 εμφανίζει περιβαλλοντικό πλεονέκτημα έναντι των συμβατικών τεχνολογιών, το οποίο ενισχύεται σημαντικά στα σενάρια 2030 και 2050.

Συνεπώς, τα αποτελέσματα του παρόντος κεφαλαίου δείχνουν ότι η περιβαλλοντική υπεροχή των BEVs δεν αποτελεί στατικό χαρακτηριστικό της τεχνολογίας, αλλά εξαρτάται από τη συνδυασμένη εξέλιξη της τεχνολογίας οχημάτων, της παραγωγής μπαταριών και της απανθρακοποίησης της ηλεκτροπαραγωγής (Burchart and Przytuła, 2024). Η διαπίστωση αυτή δημιουργεί τη βάση για τις προτάσεις πολιτικής που παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

5. Προτάσεις Πολιτικής για την Προώθηση της Ηλεκτροκίνησης στην Ελλάδα

5.1 Εισαγωγή

Η ηλεκτροκίνηση αποτελεί διατομεακή πολιτική, η οποία συνδέει την ενεργειακή πολιτική, τον αστικό σχεδιασμό, τη βιομηχανική πολιτική και την κοινωνική συνοχή. Το παρόν κεφάλαιο διατυπώνει προτάσεις πολιτικής που βασίζονται στα αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής του Κεφαλαίου 4 και στη διεθνή εμπειρία εφαρμογής πολιτικών ηλεκτροκίνησης, προσαρμοσμένες στα χαρακτηριστικά της ελληνικής οικονομίας, του ελληνικού ενεργειακού συστήματος και της γεωγραφίας της χώρας (European Commission, 2021 & IEA, 2023).

Τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4 δείχνουν ότι οι εκπομπές των ηλεκτρικών οχημάτων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ένταση άνθρακα του ηλεκτρικού συστήματος. Η ανάλυση αναδεικνύει ότι η ηλεκτροκίνηση μπορεί να αποτελέσει μία από τις αποτελεσματικότερες στρατηγικές για τη μείωση των εκπομπών CO_{2e} στον τομέα των οδικών μεταφορών στην Ελλάδα, υπό την προϋπόθεση ότι συνδυάζεται με τη σταδιακή απανθρακοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής.

Ειδικότερα, καθώς το ενεργειακό μίγμα απανθρακοποιείται, το αποτύπωμα κύκλου ζωής των BEVs μειώνεται σημαντικά, ενώ η διαφορά εκπομπών έναντι των συμβατικών τεχνολογιών διευρύνεται.

Η διαπίστωση αυτή είναι συνεπής με τη διεθνή βιβλιογραφία, σύμφωνα με την οποία η ηλεκτροκίνηση αποδίδει το μέγιστο περιβαλλοντικό όφελος όταν δεν αντιμετωπίζεται ως μεμονωμένη τεχνολογική παρέμβαση, αλλά ως μέρος μιας ολοκληρωμένης στρατηγικής που συνδέει την απανθρακοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής, την ανάπτυξη υποδομών φόρτισης, τον αστικό σχεδιασμό και τις πολιτικές βιώσιμης κινητικότητας (European Commission, 2020 & European Commission, 2021 & IEA, 2023 & Burchart and Przytuła, 2024).

Συνδυαστικά, τα ευρήματα του 4ου Κεφαλαίου δείχνουν, επίσης, ότι η περιβαλλοντική υπεροχή των BEVs δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από την ένταση άνθρακα του ηλεκτρικού συστήματος. Η απόσταση περιβαλλοντικής εξισορρόπησης (break-even distance) εκτιμάται σε περίπου 82.300 km για το ενεργειακό μίγμα του 2026, μειώνεται σε περίπου 58.300 km στο σενάριο 2030 και σε περίπου 43.800 km στο σενάριο 2050.

Η μείωση αυτή τεκμηριώνει ότι η πολιτική ηλεκτροκίνησης μεγιστοποιεί το κλιματικό της όφελος όταν εξελίσσεται παράλληλα με την απανθρακοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής, την ανάπτυξη αξιόπιστων υποδομών φόρτισης και την έξυπνη διαχείριση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Παρά την πρόοδο που έχει ήδη σημειωθεί, η περαιτέρω ενσωμάτωση της ηλεκτροκίνησης απαιτεί συνολική στρατηγική πολιτική, ενίσχυση υποδομών, αποτελεσματικά κίνητρα και διοικητική οργάνωση.

Η ανάγκη αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη στα ελληνικά αστικά κέντρα, όπου η οδική κυκλοφορία συνδέεται όχι μόνο με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, αλλά και με σημαντική επιβάρυνση της ποιότητας του αέρα. Στην περίπτωση της Θεσσαλονίκης, πρόσφατες μελέτες αναδεικνύουν τη σημασία της χωρικής και χρονικής αποτύπωσης των εκπομπών από τις οδικές μεταφορές, καθώς και την ανάγκη στοχευμένων πολιτικών για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των υπερβάσεων αιωρούμενων σωματιδίων (Liora et al., 2025 & Progiou et al., 2023).

Για τον λόγο αυτό, οι πολιτικές ηλεκτροκίνησης στην Ελλάδα πρέπει να σχεδιάζονται ταυτόχρονα ως πολιτικές κλιματικής μετάβασης και ως πολιτικές αστικής περιβαλλοντικής προστασίας.

5.2 Ενίσχυση της απανθρακοποίησης του ηλεκτρικού συστήματος

Η ερμηνευτική ανάλυση ευαισθησίας της LCA (βλ. Κεφ. 4.6) ανέδειξε ότι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες διαφοροποίησης των εκπομπών κύκλου ζωής των BEVs είναι ο συντελεστής εκπομπών της ηλεκτροπαραγωγής (CO₂e/kWh).

Επομένως, η περιβαλλοντική αποτελεσματικότητα της ηλεκτροκίνησης, ως μέτρο μείωσης εκπομπών, εξαρτάται άμεσα από την πορεία απανθρακοποίησης του ηλεκτρικού συστήματος. Το εύρημα αυτό έχει σαφή πολιτική σημασία, καθώς δείχνει ότι η προώθηση των BEVs δεν αρκεί από μόνη της, εάν η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται για τη φόρτισή τους εξακολουθεί να παράγεται με υψηλής έντασης άνθρακα.

Η συσχέτιση αυτή αποτυπώνεται και στη μείωση της περιβαλλοντικής απόστασης εξισορρόπησης από το 2026 έως το 2050. Η μείωση του break-even distance επιβεβαιώνει ότι οι πολιτικές ηλεκτροκίνησης και ενεργειακής μετάβασης πρέπει να σχεδιάζονται ως ενιαίο πλαίσιο παρέμβασης και όχι ως δύο παράλληλες αλλά ανεξάρτητες πολιτικές.

Η διαπίστωση αυτή συμφωνεί και με τη διεθνή βιβλιογραφία για το ανθρακικό αποτύπωμα των ηλεκτρικών οχημάτων, όπου ο συντελεστής εκπομπών της ηλεκτροπαραγωγής αναγνωρίζεται ως ο σημαντικότερος προσδιοριστικός παράγοντας της τελικής περιβαλλοντικής τους επίδοσης. Κατά συνέπεια, η απανθρακοποίηση του ηλεκτρικού τομέα δεν λειτουργεί απλώς υποστηρικτικά προς την ηλεκτροκίνηση, αλλά αποτελεί προϋπόθεση για τη μεγιστοποίηση του κλιματικού της οφέλους (Burchart and Przytuła, 2024).

Η διεθνής εμπειρία καταδεικνύει ότι χώρες με χαμηλή ένταση άνθρακα ηλεκτροπαραγωγής και που πέτυχαν υψηλά ποσοστά υιοθέτησης BEVs διέθεταν σταθερό μακροπρόθεσμο πλαίσιο και ξεκάθαρους στόχους (European Commission, 2020 & European Commission, 2021 & European Union, 2021).

Για την ελληνική περίπτωση, η πολιτική ενίσχυσης της ηλεκτροκίνησης πρέπει να συνδεθεί άμεσα με τις ακόλουθες κατευθύνσεις ενεργειακής πολιτικής:

1. **Επιτάχυνση της ένταξης ΑΠΕ με έμφαση σε αιολικά και φωτοβολταϊκά συστήματα.**

Η αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ οδηγεί σε χαμηλότερο συντελεστή εκπομπών ανά kWh και, συνεπώς, σε άμεση μείωση του αποτυπώματος χρήσης των BEVs. Η παρέμβαση αυτή αποτελεί τον πιο άμεσο μηχανισμό μέσω του οποίου η ενεργειακή μετάβαση μεταφράζεται σε χαμηλότερες εκπομπές στον τομέα των οδικών μεταφορών.

2. **Ενίσχυση της αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες – αντλησιοταμίευση).**

Η αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη υποδομών αποθήκευσης, ώστε να αντιμετωπίζεται η μεταβλητότητα της παραγωγής και να αξιοποιείται μεγαλύτερο ποσοστό καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας. Η αποθήκευση μπορεί να συμβάλει έμμεσα και στην καθαρότερη φόρτιση των BEVs, ιδίως όταν συνδυάζεται με έξυπνη διαχείριση της ζήτησης.

3. **Διασύνδεση των νησιών με το ηπειρωτικό ηλεκτροπαραγωγικό σύστημα.**

Η αντικατάσταση τοπικών πετρελαϊκών μονάδων μειώνει δραστικά το αποτύπωμα

BEV στις νησιωτικές περιοχές. Η κατεύθυνση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία για την Ελλάδα, καθώς το νησιωτικό γεωγραφικό ανάγλυφο δημιουργεί διαφοροποιημένες ενεργειακές και μεταφορικές ανάγκες.

4. Αναβάθμιση δικτύου για έξυπνη φόρτιση (Smart charging).

Η αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από τα BEVs απαιτεί έγκαιρο σχεδιασμό των δικτύων, ενίσχυση υποσταθμών και δυνατότητες διαχείρισης φορτίων. Η έξυπνη φόρτιση μπορεί να περιορίσει τις αιχμές ζήτησης και να επιτρέψει μεγαλύτερη αξιοποίηση ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, ενισχύοντας έτσι το περιβαλλοντικό όφελος της ηλεκτροκίνησης (IPTO/ADMIE, 2023b & Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2024 & European Commission, 2025).

Συνεπώς, η περαιτέρω απανθρακοποίηση του ελληνικού ενεργειακού μίγματος αποτελεί βασική πολιτική προτεραιότητα για την ουσιαστική περιβαλλοντική απόδοση της ηλεκτροκίνησης. Οι παρεμβάσεις αυτές δεν αποτελούν μόνο ενεργειακή πολιτική αλλά και πολιτική μεταφορών, καθώς μειώνουν άμεσα τις εκπομπές χρήσης των BEVs.

Υπό αυτή την έννοια, η απανθρακοποίηση του ηλεκτρικού συστήματος και η προώθηση της ηλεκτροκίνησης δεν πρέπει να σχεδιάζονται ως δύο ανεξάρτητες πολιτικές, αλλά ως ενιαίο πλαίσιο παρέμβασης. Όσο χαμηλότερο είναι το αποτύπωμα της παραγόμενης kWh, τόσο μεγαλύτερο είναι το περιβαλλοντικό πλεονέκτημα των BEVs σε όρους κύκλου ζωής και τόσο μικρότερη η απόσταση περιβαλλοντικής εξισορρόπησης (Burchart and Przytuła, 2024).

5.3 Ανάπτυξη εκτεταμένου και αξιόπιστου δικτύου φόρτισης

Παρότι τα BEVs εμφανίζουν χαμηλότερες εκπομπές χρήσης, η πραγματική περιβαλλοντική τους απόδοση προϋποθέτει τη δυνατότητα ευρείας καθημερινής χρήσης. Η LCA δείχνει ότι το πλήρες περιβαλλοντικό όφελος των BEVs αποτυπώνεται σε βάθος χρήσης, όταν το όχημα διανύσει επαρκή απόσταση ώστε να αντισταθμίσει το αυξημένο αρχικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα παραγωγής του.

Επομένως, η ύπαρξη αξιόπιστων υποδομών φόρτισης αποτελεί βασική προϋπόθεση περιβαλλοντικής αποτελεσματικότητας της ηλεκτροκίνησης, διότι επιτρέπει στα BEVs να χρησιμοποιούνται σε βαθμό που καθιστά εφικτή την αντιστάθμιση του υψηλότερου αρχικού αποτυπώματος παραγωγής τους.

Η διεθνής βιβλιογραφία αναγνωρίζει ότι η έλλειψη επαρκών και αξιόπιστων υποδομών φόρτισης αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους ανασταλτικούς παράγοντες στην υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς συνδέεται με την αβεβαιότητα χρήσης και την «ανησυχία αυτονομίας» των οδηγών (BloombergNEF, 2023 & IEA, 2023).

Η υποδομή φόρτισης δεν αποτελεί μόνο τεχνική προϋπόθεση για τη χρήση των BEVs, αλλά και κρίσιμο στοιχείο της κοινωνικής και χωρικής δικαιοσύνης της μετάβασης. Σε αστικά περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας, όπως η Αθήνα και η Θεσσαλονίκη, σημαντικό μέρος των νοικοκυριών δεν διαθέτει ιδιωτικό χώρο στάθμευσης ή δυνατότητα οικιακής φόρτισης, γεγονός που καθιστά το δημόσιο ή τη σύμπραξη δημόσιου και ιδιωτικού δικτύου φόρτισης βασικό όρο ισότιμης πρόσβασης στην ηλεκτροκίνηση (World Bank, 2020 & Transport & Environment, 2022).

Το ζήτημα αυτό συνδέεται και με την «ανησυχία αυτονομίας» (range anxiety), η οποία μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τις αποφάσεις αγοράς, ιδιαίτερα όταν οι χρήστες δεν έχουν πρόσβαση σε σταθερό και προβλέψιμο σημείο φόρτισης.

Δεδομένου ότι το κλιματικό όφελος των BEVs αυξάνεται όσο μειώνεται η ένταση άνθρακα του δικτύου, η πολιτική φόρτισης δεν πρέπει να περιορίζεται στη χωροθέτηση φορτιστών, αλλά να διασφαλίζει ότι η φόρτιση θα είναι διαθέσιμη, αξιόπιστη και κατά το δυνατόν χρονικά συντονισμένη με καθαρότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω έξυπνης φόρτισης (European Commission, 2021 & IEA, 2023).

Είναι επιτακτική η ανάπτυξη επαρκούς δικτύου φόρτισης με τρόπο χωροταξικά ισορροπημένο, τεχνικά αξιόπιστο και συμβατό με τις ανάγκες των επόμενων δεκαετιών (Bloomberg NEF, 2023).

Η ανάπτυξη υποδομών φόρτισης πρέπει να ακολουθεί τρεις αρχές:

1. τη χωρική επάρκεια,
2. την τεχνική αξιοπιστία και
3. τη διαλειτουργικότητα.

Η χωρική επάρκεια αφορά τη δίκαιη γεωγραφική κατανομή των σημείων φόρτισης, ενώ η τεχνική αξιοπιστία συνδέεται με τη διαθεσιμότητα, τη συντήρηση και την ισχύ των φορτιστών. Η διαλειτουργικότητα αφορά τη δυνατότητα χρήσης διαφορετικών παρόχων και συστημάτων πληρωμής χωρίς διοικητικά ή τεχνικά εμπόδια.

Παράλληλα, η ανάπτυξη υποδομών πρέπει να εντάσσεται σε ένα ευρύτερο πλαίσιο βιώσιμης αστικής κινητικότητας και όχι να περιορίζεται στην απλή αναπαραγωγή του σημερινού μοντέλου μετακινήσεων με διαφορετική τεχνολογία οχημάτων. Ιδίως σε αστικά περιβάλλοντα με υψηλή κυκλοφοριακή επιβάρυνση, όπως η Θεσσαλονίκη, η χωροθέτηση υποδομών φόρτισης μπορεί να συνδεθεί με περιοχές αυξημένων μεταφορικών ροών και ατμοσφαιρικής επιβάρυνσης, ώστε η ηλεκτροκίνηση να λειτουργεί και ως εργαλείο αστικής περιβαλλοντικής πολιτικής (Liora et al., 2025 & Progiou et al., 2023).

Προτεινόμενες παρεμβάσεις:

- Υποχρεωτική εγκατάσταση φορτιστών σε νέες οικοδομές και σε υφιστάμενες που υπόκεινται σε εκτεταμένες παρεμβάσεις ή/και μεγάλες ανακαινίσεις.**
Η παρέμβαση αυτή προϋποθέτει προσαρμογή του οικοδομικού κανονισμού στα ευρωπαϊκά πρότυπα και σταδιακή ενσωμάτωση της φόρτισης στον πολεοδομικό σχεδιασμό. Με τον τρόπο αυτό, η δυνατότητα φόρτισης δεν αντιμετωπίζεται εκ των υστέρων ως τεχνικό πρόβλημα, αλλά ως βασική υποδομή κατοικίας και εργασίας.
- Ανάπτυξη δημόσιων φορτιστών σε κομβικά σημεία.**
Οι φορτιστές πρέπει να χωροθετούνται σε δήμους, λιμάνια, σταθμούς μετρό, χώρους στάθμευσης, εμπορικές ζώνες, υπεραστικά δίκτυα και εθνικές οδούς. Ιδιαίτερη σημασία έχει η ανάπτυξη δικτύου ταχυφορτιστών υψηλής ισχύος (HPC) σε τακτά διαστήματα κατά μήκος βασικών εθνικών αξόνων, ώστε να διευκολύνεται η υπεραστική μετακίνηση και να μειώνεται η αβεβαιότητα των χρηστών. Η χρηματοδότηση μπορεί να υποστηριχθεί από εθνικούς και ευρωπαϊκούς πόρους, όπως το ΕΣΠΑ και το Ταμείο Ανάκαμψης.
- Ενθάρρυνση ιδιωτικών επενδύσεων στην αγορά ταχυφορτιστών.**
Η ανάπτυξη δικτύου DC και HPC φορτιστών απαιτεί σημαντικές επενδύσεις και δεν μπορεί να στηριχθεί αποκλειστικά στον δημόσιο τομέα. Για τον λόγο αυτό, μπορούν να αξιοποιηθούν φορολογικά κίνητρα, επιδοτήσεις κεφαλαίου και απλοποίηση των αδειοδοτικών διαδικασιών, ώστε να μειωθεί το επενδυτικό ρίσκο και να επιταχυνθεί η ανάπτυξη της αγοράς.
- Εθνικό μητρώο φορτιστών με real-time δεδομένα διαθεσιμότητας.**
Το μητρώο πρέπει να περιλαμβάνει πληροφορίες για τη θέση, τη διαθεσιμότητα, την ισχύ, την τιμολόγηση και τη λειτουργική κατάσταση των φορτιστών. Η διαλειτουργικότητα όλων των συστημάτων φόρτισης και η διαφάνεια στην πληροφόρηση μπορούν να μειώσουν την αβεβαιότητα του χρήστη και να βελτιώσουν τη λειτουργικότητα του δικτύου (European Commission, 2021).
- Θεσμικό πλαίσιο για «φορτιστές σε πολυκατοικίες».**
Η παρέμβαση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ελληνική αστική πραγματικότητα, όπου η κατοικία σε πολυκατοικίες αποτελεί κυρίαρχο οικιστικό

πρότυπο. Το πλαίσιο πρέπει να μειώνει τη γραφειοκρατία, να προστατεύει τον συνιδιοκτήτη που επιθυμεί την εγκατάσταση φορτιστή και να προβλέπει, όπου είναι εφικτό, κάλυψη μέρους του κόστους εγκατάστασης. Με τον τρόπο αυτό, η ηλεκτροκίνηση δεν θα περιορίζεται μόνο σε χρήστες που διαθέτουν ιδιωτική θέση στάθμευσης ή μονοκατοικία.

Ο ΑΔΜΗΕ επισημαίνει, μέσω μελετών διαχείρισης ηλεκτρικών δικτύων, την ανάγκη ενίσχυσης του δικτύου μέσης και χαμηλής τάσης καθώς η φόρτιση των EVs αυξάνεται (IPTO/ADMIE, 2023b). Αυτό απαιτεί:

- έγκαιρο σχεδιασμό,
- αναβάθμιση υποσταθμών,
- έξυπνη διαχείριση φορτίων.

Ιδιαίτερα για την ελληνική περίπτωση, η ανάπτυξη χωρικά ισόρροπου και αξιόπιστου δικτύου φόρτισης αποτελεί προϋπόθεση ώστε το περιβαλλοντικό όφελος που τεκμηριώνεται στη LCA να μεταφραστεί σε πραγματική διείσδυση της τεχνολογίας. Χωρίς επαρκείς υποδομές, το θεωρητικό περιβαλλοντικό πλεονέκτημα των BEVs δεν μπορεί να αξιοποιηθεί πλήρως στην πράξη (Burchart and Przytuła, 2024).

5.4 Ένταξη των BEVs στο ενεργειακό σύστημα

Η σύνδεση μεταφορών και ηλεκτρικού συστήματος, που αναδείχθηκε από τον δείκτη της περιβαλλοντικής απόστασης εξισορρόπησης, υποδηλώνει ότι τα ηλεκτρικά οχήματα δεν πρέπει να αντιμετωπίζονται μόνο ως μέσα μετακίνησης, αλλά και ως δυναμικά φορτία ή δυνητικοί ενεργειακοί πόροι. Για τον λόγο αυτό, η ένταξή τους στο ενεργειακό σύστημα αποτελεί κρίσιμο στοιχείο πολιτικής, ιδίως σε ένα περιβάλλον αυξανόμενης διείσδυσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

Η ενσωμάτωση των BEVs στο ενεργειακό σύστημα δεν αφορά μόνο την επάρκεια ισχύος, αλλά και τη μεγιστοποίηση του περιβαλλοντικού οφέλους που τεκμηριώθηκε στο Κεφάλαιο 4. Η περιβαλλοντική αποδοτικότητα της φόρτισης εξαρτάται όχι μόνο από το μέσο ετήσιο ενεργειακό μίγμα, αλλά και από τη χρονική στιγμή κατά την οποία πραγματοποιείται η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Επομένως, η μετατόπιση της φόρτισης σε χρονικές περιόδους υψηλής διαθεσιμότητας ΑΠΕ μπορεί να μειώσει περαιτέρω το πραγματικό ανθρακικό αποτύπωμα χρήσης των BEVs και να αυξήσει τη συμβολή τους στην ευελιξία του ηλεκτρικού συστήματος (European Commission, 2021 & IEA, 2023 & Burchart and Przytuła, 2024).

5.4.1 Smart charging

Η χρήση έξυπνης φόρτισης επιτρέπει την:

- εξομάλυνση φορτίου δικτύου,
- μείωση κόστους για τον χρήστη,
- ενίσχυση της αξιοποίησης ΑΠΕ (European Commission, 2021 & IEA, 2023 & IPTO/ADMIE, 2023b).

Μέσω κατάλληλων σημάτων τιμολόγησης, αυτοματισμών και ψηφιακής διαχείρισης, η φόρτιση μπορεί να μετατοπίζεται σε χρονικές περιόδους χαμηλότερης ζήτησης ή υψηλότερης παραγωγής από ΑΠΕ, περιορίζοντας τις αιχμές και βελτιώνοντας τη συνολική λειτουργία του συστήματος (European Commission, 2021 & IEA, 2023 & IPTO/ADMIE, 2023b).

Η έξυπνη φόρτιση αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε συστήματα που κινούνται προς υψηλή διείσδυση ΑΠΕ, καθώς επιτρέπει στα BEVs να λειτουργούν ως ευέλικτα φορτία και να απορροφούν καθαρότερη ηλεκτρική ενέργεια σε ώρες αυξημένης παραγωγής. Με τον τρόπο αυτό, η πολιτική φόρτισης μετατρέπεται σε κρίσιμο κρίκο μεταξύ ενεργειακής και μεταφορικής πολιτικής, ενώ ενισχύει τη σύνδεση μεταξύ του περιβαλλοντικού οφέλους της ηλεκτροκίνησης και της πραγματικής λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος (European Commission, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024).

Για την ελληνική περίπτωση, η προώθηση της έξυπνης φόρτισης μπορεί να περιλαμβάνει δυναμικά τιμολόγια, τεχνικές προδιαγραφές για νέους φορτιστές, ψηφιακή παρακολούθηση φορτίων και κίνητρα για φόρτιση σε ώρες αυξημένης παραγωγής από ΑΠΕ. Με τον τρόπο

αυτό, η φόρτιση των BEVs μπορεί να μετατραπεί από δυνητική πρόσθετη πίεση στο δίκτυο σε εργαλείο καλύτερης διαχείρισης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

5.4.2 Vehicle-to-Grid (V2G)

Η τεχνολογία Vehicle-to-Grid (V2G) επιτρέπει τη διπλής κατεύθυνσης ροή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ οχήματος και δικτύου. Με τον τρόπο αυτό, τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν, υπό κατάλληλες τεχνικές και ρυθμιστικές προϋποθέσεις, να λειτουργούν ως αποκεντρωμένες μονάδες αποθήκευσης, ενισχύοντας την ευστάθεια του συστήματος σε περιόδους υψηλής μεταβλητότητας της παραγωγής από ΑΠΕ (IEA, 2023 & European Commission, 2021).

Για την ελληνική περίπτωση, προτείνεται η σταδιακή διερεύνηση του V2G μέσα από πιλοτικά προγράμματα με την τοπική αυτοδιοίκηση, δημοτικούς στόλους, δημόσια κτίρια και νησιωτικές περιοχές.

Παράλληλα, απαιτείται η δημιουργία κατάλληλου ρυθμιστικού πλαισίου αγοράς, το οποίο θα καθορίζει τους όρους συμμετοχής των χρηστών, την αποζημίωση για υπηρεσίες ευελιξίας, την προστασία της διάρκειας ζωής της μπαταρίας και τις τεχνικές προδιαγραφές ασφαλούς λειτουργίας.

Αν και η πλήρης αξιοποίηση του V2G προϋποθέτει ώριμο ρυθμιστικό και τεχνικό πλαίσιο, η σταδιακή ανάπτυξή του μπορεί να λειτουργήσει ως πολλαπλασιαστής περιβαλλοντικού οφέλους, ιδίως σε χώρες όπου η μεταβλητότητα της παραγωγής από ΑΠΕ αυξάνεται. Σε αυτή την προοπτική, τα BEVs παύουν να αντιμετωπίζονται μόνο ως φορτία του δικτύου και εντάσσονται στη λογική της ενεργειακής ευελιξίας και της αποκεντρωμένης αποθήκευσης (IEA, 2023 & European Commission, 2021).

Συνολικά, η ένταξη των BEVs στο ενεργειακό σύστημα αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για τη μεγιστοποίηση της περιβαλλοντικής απόδοσης της ηλεκτροκίνησης. Η έξυπνη φόρτιση και, σε πιο προχωρημένο στάδιο, το V2G μπορούν να ενισχύσουν τη σύνδεση μεταξύ ηλεκτροκίνησης και απανθρακοποίησης, μετατρέποντας τα ηλεκτρικά οχήματα από απλούς καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας σε ενεργά στοιχεία ενός πιο ευέλικτου και καθαρότερου ενεργειακού συστήματος.

5.5 Οικονομικά κίνητρα για επιτάχυνση διείσδυσης των BEVs

Οι οικονομικές πολιτικές αποτελούν βασικό παράγοντα διείσδυσης της ηλεκτροκίνησης. Μελέτες και η διεθνής εμπειρία δείχνουν ότι η υιοθέτηση ηλεκτρικών οχημάτων και η αγορά BEVs αυξάνονται δραστικά όταν τα οικονομικά κίνητρα είναι σταθερά και προβλέψιμα (Breetz, Salon and Williams, 2018 & World Bank, 2020 & Transport & Environment, 2022).

Ωστόσο, η διεθνής εμπειρία δείχνει επίσης ότι η αποτελεσματικότητα των κινήτρων εξαρτάται όχι μόνο από το ύψος τους, αλλά και από τη διάρκειά τους, τη διοικητική τους απλότητα και τη σαφήνεια των δικαιούχων.

Παράλληλα, οι ομάδες χαμηλότερου εισοδήματος αντιμετωπίζουν τα μεγαλύτερα εμπόδια στην υιοθέτηση των BEVs, καθώς επηρεάζονται περισσότερο από το υψηλό αρχικό κόστος αγοράς, την περιορισμένη πρόσβαση σε ιδιωτική φόρτιση και την αβεβαιότητα ως προς το συνολικό κόστος χρήσης (World Bank, 2020 & Transport & Environment, 2022). Για τον λόγο αυτό, η σχεδίαση οικονομικών κινήτρων οφείλει να έχει κοινωνική στόχευση και να μην περιορίζεται σε οριζόντια μέτρα που ευνοούν, κυρίως, όσους έχουν ήδη μεγαλύτερη αγοραστική δυνατότητα.

Επομένως, τα οικονομικά μέτρα δεν πρέπει να στοχεύουν απλώς στην αύξηση του αριθμού πωλήσεων, αλλά στη δίκαιη πρόσβαση στην τεχνολογία και στη μεγιστοποίηση του περιβαλλοντικού οφέλους ανά μονάδα δημόσιας δαπάνης (Breetz, Salon and Williams, 2018 & World Bank, 2020 & Burchart and Przytuła, 2024).

Σε σχέση με τα αποτελέσματα της παρούσας LCA, τα οικονομικά κίνητρα πρέπει να κατευθύνονται κατά προτεραιότητα σε χρήσεις όπου το περιβαλλοντικό όφελος μπορεί να πραγματοποιηθεί ουσιαστικά. Για παράδειγμα, οχήματα με υψηλή ετήσια χιλιομετρική χρήση ή στόλοι που αντικαθιστούν παλαιότερα οχήματα εσωτερικής καύσης μπορούν να επιτύχουν ταχύτερα την περιβαλλοντική εξισορρόπηση και να αποδώσουν μεγαλύτερη μείωση εκπομπών CO₂e ανά μονάδα δημόσιας δαπάνης.

Στην ελληνική περίπτωση, τα κίνητρα πρέπει να προσαρμοστούν στη φορολογική πραγματικότητα, στο διαθέσιμο εισόδημα των νοικοκυριών, στην ηλικία του στόλου οχημάτων και στις διαφοροποιήσεις πρόσβασης σε ιδιωτική ή δημόσια φόρτιση. Η ανάγκη αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς το υψηλό αρχικό κόστος αγοράς των BEVs εξακολουθεί να αποτελεί έναν από τους βασικότερους περιορισμούς διάχυσης της τεχνολογίας, ιδίως για μεσαία και χαμηλότερα εισοδήματα.

Για την Ελλάδα, προτείνονται τα ακόλουθα οικονομικά μέτρα:

1. Διατήρηση, αλλά και επανασχεδιασμός της επιδότησης αγοράς BEVs.

Η επιδότηση πρέπει να είναι κλιμακωτή, με τέτοιο ανώτατο όριο αξίας οχήματος ώστε να αποφεύγεται η ενίσχυση πολύ ακριβών μοντέλων και να κατευθύνονται περισσότεροι πόροι σε ομάδες χαμηλότερων και μεσαίων εισοδηματικών κριτηρίων. Μια τέτοια προσέγγιση μπορεί να ενισχύσει τη διάχυση της τεχνολογίας χωρίς να δημιουργεί δυσανάλογη επιβάρυνση στον δημόσιο προϋπολογισμό.

2. Μείωση των τελών ταξινόμησης και των τελών κυκλοφορίας για BEVs.

Η διατήρηση μειωμένων ή μηδενικών τελών κυκλοφορίας για συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα, για παράδειγμα έως το 2030, μπορεί να ενισχύσει την προβλεψιμότητα για τους χρήστες και να μειώσει το αντιλαμβανόμενο κόστος ιδιοκτησίας. Παράλληλα, τα μέτρα αυτά πρέπει να επανεξετάζονται περιοδικά, ώστε να ευθυγραμμίζονται με την εξέλιξη της αγοράς και των δημοσιονομικών δυνατοτήτων.

3. Φορολογικά κίνητρα για εταιρείες που ανανεώνουν το στόλο τους με BEVs.

Η αντικατάσταση εταιρικών και επαγγελματικών οχημάτων μπορεί να έχει σημαντικό περιβαλλοντικό όφελος, ιδίως όταν αφορά οχήματα με υψηλή ετήσια χρήση. Προτείνονται φορολογικές απαλλαγές, ταχύτερη απόσβεση επενδύσεων και κίνητρα για εταιρείες που εγκαθιστούν παράλληλα υποδομές φόρτισης στις εγκαταστάσεις τους.

4. Αντιμετώπιση κόστους αγοράς μεταχειρισμένου BEV.

Η δημιουργία αξιόπιστης αγοράς μεταχειρισμένων ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να μειώσει το κόστος πρόσβασης στην ηλεκτροκίνηση για ευρύτερες κοινωνικές ομάδες. Για τον σκοπό αυτό, απαιτείται μηχανισμός πιστοποίησης της κατάστασης της μπαταρίας, διαφάνεια ως προς το ιστορικό χρήσης και, όπου είναι εφικτό, φορολογικές ελαφρύνσεις για μεταχειρισμένα οχήματα χαμηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

5. Επιστροφή μέρους του κόστους φόρτισης για νοικοκυριά χωρίς πρόσβαση σε ιδιωτικό χώρο στάθμευσης.

Ιδιαίτερα στα μεγάλα αστικά κέντρα, πολλά νοικοκυριά δεν έχουν δυνατότητα οικιακής φόρτισης. Για τον λόγο αυτό, μπορεί να εξεταστεί η επιστροφή μέρους του κόστους δημόσιας φόρτισης, η πρόσβαση σε δημοτικούς φορτιστές με μειωμένη τιμολόγηση ή η παροχή ειδικών καρτών φόρτισης για κοινωνικά ευάλωτες ομάδες.

Ιδιαίτερα σημαντικό είναι τα οικονομικά αυτά μέτρα να μη σχεδιάζονται οριζόντια, αλλά κλιμακωτά και κοινωνικά στοχευμένα, ώστε να ενισχύουν περισσότερο τις κατηγορίες χρηστών που αντιμετωπίζουν μεγαλύτερα οικονομικά ή χωρικά εμπόδια εισόδου στην συγκεκριμένη τεχνολογία.

Με τον τρόπο αυτό, η οικονομική πολιτική υπέρ της ηλεκτροκίνησης μπορεί να λειτουργήσει όχι μόνο ως μηχανισμός ενίσχυσης της αγοράς, αλλά και ως εργαλείο δίκαιης μετάβασης.

Τα κίνητρα πρέπει επίσης να συνδέονται με σαφείς περιβαλλοντικούς στόχους και με το πραγματικό αποτέλεσμα σε όρους κύκλου ζωής. Η απλή επιδότηση της τεχνολογίας, χωρίς σύνδεση με την ενεργειακή αποδοτικότητα, τη χρήση του οχήματος, το αποτύπωμα φόρτισης και την αντικατάσταση παλαιότερων οχημάτων, ενδέχεται να οδηγήσει σε περιορισμένο περιβαλλοντικό όφελος. Αντίθετα, μια πολιτική που λαμβάνει υπόψη το συνολικό αποτύπωμα κύκλου ζωής μπορεί να κατευθύνει τους δημόσιους πόρους σε παρεμβάσεις με μετρήσιμο κλιματικό αποτέλεσμα.

Με άλλα λόγια, η οικονομική πολιτική υπέρ της ηλεκτροκίνησης πρέπει να σχεδιάζεται όχι μόνο ως μέτρο ενίσχυσης της αγοράς, αλλά και ως εργαλείο δίκαιης και περιβαλλοντικά αποδοτικής μετάβασης.

Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα των οικονομικών κινήτρων δεν είναι απεριόριστη. Αν δεν συνδυάζονται με αξιόπιστες υποδομές φόρτισης, καθαρότερο ενεργειακό μίγμα και κοινωνικά στοχευμένη εφαρμογή, υπάρχει κίνδυνος να λειτουργήσουν κυρίως υπέρ ομάδων που έχουν ήδη μεγαλύτερη οικονομική ευμάρεια και δυνατότητα πρόσβασης στην τεχνολογία. Για τον λόγο αυτό, τα οικονομικά μέτρα πρέπει να σχεδιάζονται με σαφή περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια, ώστε να υπηρετούν ταυτόχρονα τη μείωση εκπομπών, τη δίκαιη πρόσβαση και την αποτελεσματική χρήση των δημόσιων πόρων (World Bank, 2020 & Transport & Environment, 2022 & Burchart and Przytuła, 2024).

5.6 Θεσμική αναβάθμιση και ψηφιακή διακυβέρνηση της ηλεκτροκίνησης

Η επιτυχία της ηλεκτροκίνησης δεν εξαρτάται μόνο από τις υποδομές φόρτισης και τα οικονομικά κίνητρα, αλλά και από την ποιότητα της θεσμικής και ψηφιακής διακυβέρνησης. Τα αποτελέσματα της παρούσας LCA ανέδειξαν ότι η περιβαλλοντική επίδοση των BEVs εξαρτάται από μεταβαλλόμενους παράγοντες, όπως η ένταση άνθρακα του ηλεκτρικού μίγματος, η πραγματική χρήση των οχημάτων, η ανάπτυξη των υποδομών φόρτισης και η δυνατότητα έξυπνης διαχείρισης της ζήτησης. Επομένως, απαιτείται συντονισμός φορέων, απλοποίηση διαδικασιών, διαφάνεια στην αγορά φόρτισης και συστηματική παρακολούθηση δεδομένων.

Η θεσμική διάσταση της ηλεκτροκίνησης είναι ιδιαίτερα σημαντική, επειδή η μετάβαση αυτή αφορά πολλαπλούς φορείς και επίπεδα διοίκησης. Υπουργεία, ρυθμιστικές αρχές, διαχειριστές δικτύων, δήμοι, πάροχοι φόρτισης, κατασκευαστές, επενδυτές και χρήστες εμπλέκονται σε διαφορετικά στάδια της ίδιας διαδικασίας. Χωρίς σαφή κατανομή αρμοδιοτήτων και λειτουργικό μηχανισμό συντονισμού, υπάρχει κίνδυνος καθυστερήσεων, επικαλύψεων και αποσπασματικής εφαρμογής των πολιτικών.

Για την ελληνική περίπτωση, προτείνονται οι ακόλουθες παρεμβάσεις:

1. **Δημιουργία ενιαίου εθνικού μηχανισμού συντονισμού της ηλεκτροκίνησης.**

Ο μηχανισμός αυτός θα μπορούσε να έχει αρμοδιότητες συντονισμού πολιτικών, παρακολούθησης της ανάπτυξης των υποδομών, πιστοποίησης τεχνικών προδιαγραφών φορτιστών και δημοσίευσης ετήσιων εκθέσεων αξιολόγησης της προόδου της ηλεκτροκίνησης (European Commission, 2020 & European Commission, 2021 & IEA, 2023).

2. **Ενοποίηση όλων των αδειοδοτικών διαδικασιών.**

Απαιτείται ενοποίηση και ψηφιοποίηση των αδειοδοτικών διαδικασιών για την εγκατάσταση φορτιστών, με διαλειτουργικότητα μεταξύ Δήμων, ΔΕΔΔΗΕ, ΡΑΑΕΥ και ΥΠΕΝ. Η ψηφιακή υποβολή αιτήσεων, η παρακολούθηση της πορείας αδειοδότησης και η τυποποίηση των απαιτούμενων δικαιολογητικών μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις καθυστερήσεις και την αβεβαιότητα για επενδυτές και χρήστες.

3. **Διαφάνεια στην τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας για φόρτιση.**

Η διαφάνεια στην τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας για φόρτιση αποτελεί κρίσιμο στοιχείο προστασίας του καταναλωτή και εμπιστοσύνης στην αγορά ηλεκτρικού ρεύματος. Οι πάροχοι φόρτισης πρέπει να δημοσιοποιούν σε πραγματικό χρόνο την τιμή, τη διαθεσιμότητα και τους όρους χρήσης κάθε σημείου φόρτισης. Παράλληλα, η τιμολόγηση ανά kWh πρέπει να αποτελεί βασικό κανόνα, ώστε ο χρήστης να μπορεί να συγκρίνει με σαφήνεια το κόστος μεταξύ των παρόχων και των σημείων φόρτισης (European Commission, 2021 & BloombergNEF, 2023).

4. Εθνικό πρόγραμμα κατάρτισης τεχνικών ηλεκτροκίνησης.

Η ανάπτυξη εθνικού προγράμματος κατάρτισης τεχνικών ηλεκτροκίνησης είναι απαραίτητη, καθώς η αύξηση των BEVs και των υποδομών φόρτισης δημιουργεί ανάγκη για πιστοποιημένους εγκαταστάτες, τεχνικούς υψηλής τάσης, προσωπικό συντήρησης φορτιστών και εξειδικευμένα συνεργεία. Η έλλειψη κατάλληλα εκπαιδευμένου ανθρώπινου δυναμικού μπορεί να λειτουργήσει ως πρακτικό εμπόδιο στην ασφαλή και αξιόπιστη ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης.

Η παρακολούθηση δεικτών, όπως η διείσδυση BEVs, η γεωγραφική κατανομή των υποδομών φόρτισης, η ένταση άνθρακα του ηλεκτρικού δικτύου, η πραγματική χρήση φορτιστών και η εξέλιξη του στόλου οχημάτων, επιτρέπει την περιοδική επικαιροποίηση των παραδοχών LCA και τη διαφάνεια ως προς το πραγματικό κλιματικό όφελος της πολιτικής. Με τον τρόπο αυτό, η πολιτική ηλεκτροκίνησης μπορεί να αξιολογείται όχι μόνο ως προς τον αριθμό των οχημάτων ή των φορτιστών, αλλά και ως προς το πραγματικό περιβαλλοντικό της αποτέλεσμα.

Η θεσμική αυτή διάσταση είναι κρίσιμη και από επιστημονική άποψη, διότι επιτρέπει τη σύνδεση της πολιτικής με πραγματικά δεδομένα περιβαλλοντικής απόδοσης. Με άλλα λόγια, η αποτελεσματική διακυβέρνηση της ηλεκτροκίνησης δεν αφορά μόνο στην αδειοδότηση και στη λειτουργία της αγοράς, αλλά και στη δυνατότητα διαρκούς τεκμηρίωσης του πραγματικού κλιματικού οφέλους των παρεμβάσεων, μέσα από επικαιροποιημένα δεδομένα δικτύου, στόλου και φόρτισης (European Commission, 2020 & IEA, 2023 & Burchart and Przytuła, 2024).

Συνεπώς, η ψηφιακή διακυβέρνηση και η θεσμική ωρίμανση αποτελούν βασική υποδομή της ίδιας της περιβαλλοντικής αξιοπιστίας της πολιτικής ηλεκτροκίνησης. Χωρίς διαφανές και λειτουργικό πλαίσιο παρακολούθησης, η μετάβαση κινδυνεύει να αποσυνδεθεί από τους δηλωμένους κλιματικούς της στόχους (European Commission, 2020 & IEA, 2023 & Burchart and Przytuła, 2024).

Αντίθετα, ένα σύστημα διακυβέρνησης βασισμένο σε δεδομένα μπορεί να ενισχύσει τη λογοδοσία, την αποτελεσματικότητα των μέτρων και την προσαρμογή της πολιτικής στις πραγματικές εξελίξεις της αγοράς και του ηλεκτρικού συστήματος (European Commission, 2020 & IEA, 2023 & Burchart and Przytuła, 2024).

5.7 Προώθηση της ηλεκτροκίνησης στις δημόσιες και στις αυτοδιοικητικές υπηρεσίες

Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι η δημόσια διοίκηση πρέπει να λειτουργήσει ως **κορυφαίος χρήστης** (lead adopter), δίνοντας το παράδειγμα και επιταχύνοντας τη διάχυση τεχνολογιών (European Commission, 2020 & European Commission, 2021 & IEA, 2023).

Η επιλογή αυτή συνδέεται και με τα αποτελέσματα της παρούσας LCA, καθώς οι δημόσιοι και δημοτικοί στόλοι χαρακτηρίζονται συχνά από επαναλαμβανόμενες διαδρομές, προβλέψιμη ημερήσια χρήση και δυνατότητα κεντρικά οργανωμένης φόρτισης. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν ευκολότερη την αξιοποίηση των BEVs σε βαθμό που μπορεί να επιταχύνει την περιβαλλοντική εξισορρόπηση έναντι των συμβατικών οχημάτων.

Η επιλογή αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία και για την ελληνική πραγματικότητα, καθώς ο δημόσιος και αυτοδιοικητικός τομέας μπορεί να λειτουργήσει όχι μόνο ως πρώτος χρήστης, αλλά και ως πεδίο πιλοτικής εφαρμογής ολοκληρωμένων λύσεων βιώσιμης κινητικότητας. Ειδικά σε αστικά κέντρα όπως η Θεσσαλονίκη, η ενίσχυση ηλεκτρικών στόλων δημοσίων υπηρεσιών και δημόσιων συγκοινωνιών μπορεί να συμβάλει ταυτόχρονα στη μείωση εκπομπών CO₂ και στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα (Liora et al., 2021 & Liora et al., 2025 & Progiou et al., 2023).

Ενδεικτικές παρεμβάσεις προς την κατεύθυνση αυτή είναι οι ακόλουθες:

- **Σταδιακή ένταξη BEVs στις νέες προμήθειες οχημάτων του Δημοσίου.**
Η δημόσια διοίκηση μπορεί να θέσει συγκεκριμένους στόχους για την αύξηση του ποσοστού ηλεκτρικών οχημάτων στις νέες προμήθειες, ιδίως για επιβατικά και ελαφρά επαγγελματικά οχήματα. Με τον τρόπο αυτό, το Δημόσιο λειτουργεί ως πρώτος χρήστης της τεχνολογίας και συμβάλλει στη δημιουργία σταθερής ζήτησης στην αγορά.
- **Αντικατάσταση επιλεγμένων δημόσιων και δημοτικών στόλων με BEVs ή μικρά ηλεκτρικά vans.**
Προτεραιότητα μπορεί να δοθεί σε στόλους με προβλέψιμα δρομολόγια και συχνή αστική χρήση, όπως οχήματα ΕΛΤΑ, δημοτικής αστυνομίας, κοινωνικών υπηρεσιών, μικρά οχήματα καθαριότητας και ελαφρά επαγγελματικά οχήματα δημοτικών υπηρεσιών. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η αντικατάσταση με BEVs είναι τεχνικά πιο εφικτή και περιβαλλοντικά πιο αποδοτική, επειδή τα οχήματα κινούνται κυρίως εντός αστικού ιστού και μπορούν να φορτίζονται σε κεντρικές εγκαταστάσεις.
- **Δημιουργία δημοτικών hubs φόρτισης για στόλους και κατοίκους.**
Τα δημοτικά σημεία φόρτισης μπορούν να εξυπηρετούν τόσο τους στόλους των δήμων όσο και τους κατοίκους, ιδίως σε περιοχές όπου η οικιακή φόρτιση είναι δύσκολη λόγω έλλειψης ιδιωτικών θέσεων στάθμευσης. Έτσι, οι δημοτικές υποδομές μπορούν να λειτουργήσουν ταυτόχρονα ως εργαλείο υποστήριξης της δημόσιας διοίκησης και ως μηχανισμός κοινωνικά δίκαιης πρόσβασης στην ηλεκτροκίνηση.

- **Εθνικό πρόγραμμα για ηλεκτρικά σχολικά λεωφορεία και μικρές δημόσιες μεταφορές σε νησιωτικές ή ευαίσθητες περιοχές.**

Η παρέμβαση αυτή μπορεί να έχει ιδιαίτερη σημασία σε νησιά, μικρούς δήμους και περιοχές με αυξημένη περιβαλλοντική πίεση, όπου οι διαδρομές είναι συχνά μικρές και επαναλαμβανόμενες. Τα ηλεκτρικά σχολικά λεωφορεία και τα μικρά δημοτικά οχήματα μεταφοράς μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές και να λειτουργήσουν ως ορατό παράδειγμα καθαρής κινητικότητας για την τοπική κοινωνία.

Η υιοθέτηση BEVs από τον δημόσιο τομέα ενισχύει την αγορά, μειώνει τις εκπομπές και δημιουργεί κλίμα εμπιστοσύνης στους πολίτες. Παράλληλα, μπορεί να επιταχύνει την ανάπτυξη υποδομών φόρτισης, να δημιουργήσει τεχνική εμπειρία στους δημόσιους φορείς και να διευκολύνει την εφαρμογή πιο σύνθετων λύσεων, όπως η έξυπνη φόρτιση σε δημοτικούς στόλους.

Η σχετική βιβλιογραφία για τη Θεσσαλονίκη δείχνει ότι η αναβάθμιση του δημόσιου συγκοινωνιακού συστήματος με καθαρότερες τεχνολογίες μπορεί να οδηγήσει σε αισθητές μειώσεις ρύπων και εκπομπών CO₂, γεγονός που ενισχύει τη σκοπιμότητα αντίστοιχων παρεμβάσεων σε επίπεδο δήμων και δημοσίων υπηρεσιών. Επομένως, η υιοθέτηση BEVs δεν αποτελεί μόνο συμβολική πολιτική επιλογή, αλλά παρέμβαση με μετρήσιμο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε επίπεδο πόλης (Liora et al., 2021 & Liora et al., 2025 & Progiou et al., 2023).

Συνολικά, ο δημόσιος και αυτοδιοικητικός τομέας μπορεί να λειτουργήσει ως καταλύτης για την προώθηση της ηλεκτροκίνησης στην Ελλάδα. Μέσω στοχευμένων προμηθειών, δημοτικών υποδομών φόρτισης και πιλοτικών εφαρμογών σε αστικές και νησιωτικές περιοχές, η ηλεκτροκίνηση μπορεί να περάσει από το επίπεδο της ατομικής επιλογής στο επίπεδο της οργανωμένης δημόσιας πολιτικής.

5.8 Ειδικές πολιτικές για τις νησιωτικές περιοχές

Η γεωγραφική ιδιαιτερότητα της Ελλάδας επιτρέπει την εφαρμογή τοπικών ενεργειακών συστημάτων μικρής κλίμακας. Η δυνατότητα αυτή έχει ιδιαίτερη αξία σε περιοχές όπου οι μετακινήσεις είναι μικρής ή μεσαίας απόστασης και το τοπικό ενεργειακό σύστημα μπορεί να συνδεθεί άμεσα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή με συστήματα μικροδικτύων.

Η διαπίστωση αυτή συνδέεται και με τα αποτελέσματα της παρούσας LCA, καθώς σε περιοχές με χαμηλότερη ένταση άνθρακα ηλεκτροπαραγωγικής διαδικασίας και σχετικά περιορισμένες ημερήσιες αποστάσεις, το περιβαλλοντικό πλεονέκτημα των BEVs μπορεί να ενισχύεται σημαντικά, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με τοπική παραγωγή καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε τέτοιες περιπτώσεις, τα BEVs εμφανίζουν ισχυρό συγκριτικό πλεονέκτημα, καθώς η ίδια η γεωγραφία και το ενεργειακό προφίλ της περιοχής ευνοούν την ταχύτερη περιβαλλοντική εξισορρόπηση και τη χαμηλότερη ένταση εκπομπών κατά τη χρήση (IPTO/ADMIE, 2023b & Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2024 & European Commission, 2025).

Σε νησιά με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ, τα BEVs μπορούν να εμφανίζουν ιδιαίτερα χαμηλό αποτύπωμα κατά τη φάση χρήσης και σαφώς βελτιωμένη συνολική περιβαλλοντική επίδοση, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλα για τοπικές μετακινήσεις. Επιπλέον, οι σχετικά σύντομες αποστάσεις, η προβλέψιμη καθημερινή κινητικότητα και η δυνατότητα οργάνωσης της φόρτισης σε τοπικό επίπεδο καθιστούν τα νησιά κατάλληλο πεδίο πιλοτικής εφαρμογής ολοκληρωμένων πολιτικών ηλεκτροκίνησης.

Επομένως, η Ελλάδα, λόγω της ιδιαίτερης νησιωτικής της γεωγραφίας, απαιτεί στοχευμένες παρεμβάσεις πολιτικής για την προώθηση της ηλεκτροκίνησης. Οι παρεμβάσεις αυτές δεν πρέπει να είναι οριζόντιες, αλλά να λαμβάνουν υπόψη τις ιδιαιτερότητες των νησιωτικών συστημάτων, όπως η ενεργειακή απομόνωση, η εποχική αύξηση της ζήτησης, η τουριστική πίεση και οι διαφοροποιήσεις ως προς την ωριμότητα των τοπικών ενεργειακών υποδομών.

Για την ελληνική περίπτωση, μπορούν να προταθούν οι ακόλουθες κατευθύνσεις πολιτικής:

1. Mini “Green Islands” προγράμματα.

Τα προγράμματα αυτά μπορούν να περιλαμβάνουν αυξημένα ποσοστά επιδότησης για αγορά BEV στα μικρά νησιά, ιδίως όταν η προμήθεια οχήματος συνδέεται με τοπική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, ενεργειακές κοινότητες ή μικρής κλίμακας συστήματα αποθήκευσης. Με τον τρόπο αυτό, η οικονομική στήριξη της ηλεκτροκίνησης συνδέεται άμεσα με τη μείωση της έντασης άνθρακα κατά τη φόρτιση και με την ενίσχυση της τοπικής ενεργειακής αυτονομίας. Παράλληλα, τέτοιες παρεμβάσεις μπορούν να λειτουργήσουν ως πρότυπα πιλοτικά μοντέλα για μελλοντική εφαρμογή και σε άλλα νησιωτικά συστήματα.

2. Δίκτυα φόρτισης μικρής κλίμακας με έξυπνη διαχείριση.

Η ανάπτυξη τοπικών δικτύων φόρτισης σε νησιά πρέπει να σχεδιάζεται με γνώμονα τις πραγματικές μεταφορικές ανάγκες και τη διαθέσιμη ηλεκτρική υποδομή. Η αξιοποίηση μικροδικτύων (microgrids), συστημάτων αποθήκευσης και έξυπνης φόρτισης μπορεί να διευκολύνει την καλύτερη ενσωμάτωση των BEVs στα τοπικά ενεργειακά συστήματα και να μειώσει τις πιέσεις στα δίκτυα κατά τις περιόδους υψηλής ζήτησης. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε νησιά που βρίσκονται σε διαδικασία ενεργειακής μετάβασης ή ενίσχυσης των ηλεκτρικών τους διασυνδέσεων (IPTO/ADMIE, 2023b & European Commission, 2021 & IEA, 2023).

3. Ηλεκτροκίνηση στόλων των τουριστικών επιχειρήσεων.

Η παρέμβαση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία σε νησιά με υψηλή τουριστική πίεση, όπου οι μετακινήσεις ενοικιαζόμενων οχημάτων, μικρών βαν, «δορυφορικών» υπηρεσιών, οχημάτων ξενοδοχειακών μονάδων και δημοτικών μεταφορών αυξάνονται σημαντικά κατά τους θερινούς μήνες. Η σταδιακή ένταξη ηλεκτρικών οχημάτων σε αυτούς τους στόλους μπορεί να μειώσει το τοπικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του τουρισμού και να ενισχύσει τη σύνδεση της ηλεκτροκίνησης με ένα πιο βιώσιμο μοντέλο νησιωτικής ανάπτυξης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορούν να εξεταστούν και ειδικά κίνητρα ή υποχρεωτικοί στόχοι για μέρος των επαγγελματικών στόλων σε περιοχές υψηλής τουριστικής επιβάρυνσης.

Η ηλεκτροκίνηση στις νησιωτικές περιοχές δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται μόνο ως μέτρο μεταφορών, αλλά ως τμήμα μιας ευρύτερης στρατηγικής για την τοπική ενεργειακή μετάβαση. Η σύνδεσή της με τις ΑΠΕ, τα μικροδίκτυα, την αποθήκευση ενέργειας και τις βιώσιμες τουριστικές πρακτικές μπορεί να μετατρέψει τα νησιά σε χώρους πιλοτικής εφαρμογής ολοκληρωμένων λύσεων χαμηλών εκπομπών.

Συνολικά, οι νησιωτικές περιοχές προσφέρουν στην Ελλάδα μια ιδιαίτερη ευκαιρία για στοχευμένη και ορατή εφαρμογή της ηλεκτροκίνησης. Εφόσον οι πολιτικές σχεδιαστούν με βάση τις τοπικές συνθήκες, τα BEVs μπορούν να συνεισφέρουν ουσιαστικά τόσο στη μείωση εκπομπών όσο και στη βελτίωση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας των νησιών (Burchart and Przytuła, 2024 & IEA, 2023 & Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2024).

5.9 Κοινωνική διάσταση και μείωση ανισοτήτων

Η κοινωνική διάσταση της ηλεκτροκίνησης είναι συχνά παραγνωρισμένη, παρότι αποτελεί κρίσιμη προϋπόθεση για την επιτυχία της μετάβασης. Μια πολιτική ηλεκτροκίνησης που δεν ενσωματώνει κριτήρια κοινωνικής δικαιοσύνης κινδυνεύει να ενισχύσει τις υφιστάμενες ανισότητες στην πρόσβαση και στις καθαρότερες τεχνολογίες μετακίνησης.

Η ισότιμη πρόσβαση σε υποδομές φόρτισης, σε οικονομικά κίνητρα και σε αξιόπιστη πληροφόρηση αποτελεί βασική προϋπόθεση ώστε η μετάβαση να μην περιοριστεί σε ομάδες υψηλότερου εισοδήματος ή σε νοικοκυριά με ιδιωτικό χώρο στάθμευσης. Το ζήτημα αυτό είναι ιδιαίτερα οξύ στα μεγάλα ελληνικά αστικά κέντρα, όπου σημαντικό τμήμα του πληθυσμού κατοικεί σε πολυκατοικίες χωρίς ιδιωτική θέση στάθμευσης ή χωρίς δυνατότητα οικιακής φόρτισης.

Επομένως, η κοινωνική διάσταση της ηλεκτροκίνησης συνδέεται άμεσα με τη χωρική οργάνωση των πόλεων, την πρόσβαση σε δημόσιες υποδομές φόρτισης και τον σχεδιασμό οικονομικών μέτρων που δεν αποκλείουν τα χαμηλότερα και μεσαία εισοδήματα (World Bank, 2020 & Transport & Environment, 2022).

Η διάσταση αυτή έχει και περιβαλλοντική σημασία. Εάν η ηλεκτροκίνηση παραμείνει προνόμιο περιορισμένων κοινωνικών ομάδων τότε η διείσδυση των BEVs θα είναι βραδύτερη και το συνολικό κλιματικό όφελος στον τομέα των μεταφορών θα περιοριστεί. Αντίθετα, μια κοινωνικά δίκαιη πολιτική μπορεί να διευρύνει τη βάση των χρηστών, να αυξήσει την αποδοχή της τεχνολογίας και να επιταχύνει την αντικατάσταση παλαιότερων και πιο ρυπογόνων οχημάτων. Σε αστικά περιβάλλοντα με έντονη κυκλοφοριακή επιβάρυνση, η διάσταση αυτή συνδέεται επίσης με τη μείωση της έκθεσης του πληθυσμού σε τοπικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους, ιδίως όταν οι παρεμβάσεις κατευθύνονται σε περιοχές ή χρήσεις υψηλής κυκλοφοριακής έντασης (Progiou et al., 2023 & Liora et al., 2025).

Η έλλειψη ενημέρωσης αποτελεί επίσης σημαντικό εμπόδιο για την υιοθέτηση των BEVs, καθώς οι πολίτες συχνά δεν διαθέτουν επαρκή γνώση για το πραγματικό κόστος χρήσης, τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, τις δυνατότητες φόρτισης, την ασφάλεια και το περιβαλλοντικό όφελος σε όρους κύκλου ζωής (Breetz, Salon and Williams, 2018 & Transport & Environment, 2022).

Στο πλαίσιο αυτό, προτείνονται οι ακόλουθες παρεμβάσεις:

- **Ενημερωτικές καμπάνιες βασισμένες σε επιστημονικά δεδομένα LCA.**
Οι καμπάνιες πρέπει να εξηγούν ότι η περιβαλλοντική αξιολόγηση των BEVs δεν περιορίζεται στις μηδενικές εκπομπές εξάτμισης, αλλά αφορά το συνολικό αποτύπωμα κύκλου ζωής. Με τον τρόπο αυτό, οι πολίτες μπορούν να κατανοήσουν καλύτερα τη σχέση μεταξύ παραγωγής οχήματος, μπαταρίας, χρήσης, ενεργειακού μίγματος και τελικού περιβαλλοντικού οφέλους.
- **Κατάρτιση τεχνικών συνεργείων για τη συντήρηση των EVs.**
Η μετάβαση στην ηλεκτροκίνηση απαιτεί τεχνικούς που γνωρίζουν τη συντήρηση EVs, τα συστήματα υψηλής τάσης, τους φορτιστές και τις βασικές αρχές ασφάλειας.

Η επαρκής τεχνική υποστήριξη είναι απαραίτητη ώστε οι χρήστες να αισθάνονται εμπιστοσύνη στην τεχνολογία και να μην αντιμετωπίζουν την ηλεκτροκίνηση ως αβέβαιη ή δυσπρόσιτη επιλογή.

- **Ενημέρωση για την πυρασφάλεια και την ανακύκλωση των μπαταριών.**
Η δημόσια συζήτηση γύρω από τις μπαταρίες συχνά περιλαμβάνει ανησυχίες για την ασφάλεια, την υποβάθμιση της χωρητικότητας και τη διαχείριση στο τέλος ζωής. Η τεκμηριωμένη πληροφόρηση μπορεί να μειώσει την αβεβαιότητα και να ενισχύσει την κοινωνική αποδοχή της ηλεκτροκίνησης.
- **Ειδικά προγράμματα επιδότησης για ευάλωτες και χαμηλότερου εισοδήματος ομάδες.**
Οι επιδοτήσεις πρέπει να σχεδιάζονται με κοινωνικά κριτήρια, ώστε να μην ωφελούν κυρίως τους ήδη οικονομικά ισχυρότερους χρήστες. Η κλιμακωτή ενίσχυση, τα εισοδηματικά κριτήρια και η σύνδεση με την αντικατάσταση παλαιότερων οχημάτων μπορούν να αυξήσουν τόσο την κοινωνική δικαιοσύνη όσο και το περιβαλλοντικό όφελος της πολιτικής.
- **Υποστήριξη νοικοκυριών χωρίς ιδιωτικό χώρο στάθμευσης.**
Για τα νοικοκυριά που δεν έχουν δυνατότητα οικιακής φόρτισης, απαιτείται πρόσβαση σε δημοτικούς ή δημόσιους φορτιστές με διαφανή και προσιτή τιμολόγηση. Η παρέμβαση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για πόλεις με πυκνή δόμηση και εκτεταμένη κατοικία σε πολυκατοικίες.
- **Διαφανείς διαδικασίες αγοράς μεταχειρισμένων BEVs.**
Η ανάπτυξη αξιόπιστης αγοράς μεταχειρισμένων ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να διευρύνει την πρόσβαση στην ηλεκτροκίνηση. Για τον σκοπό αυτό, απαιτείται πιστοποίηση της κατάστασης της μπαταρίας, σαφές ιστορικό χρήσης και προστασία του καταναλωτή, ώστε τα μεταχειρισμένα BEVs να αποτελέσουν πραγματική επιλογή για περισσότερα νοικοκυριά.

Κατά συνέπεια, η κοινωνική αποδοχή της ηλεκτροκίνησης δεν εξαρτάται μόνο από τις τεχνικές δυνατότητες της τεχνολογίας, αλλά και από το αν οι πολίτες αντιλαμβάνονται ότι η μετάβαση είναι δίκαιη, προσβάσιμη και αξιόπιστη. Η ενημέρωση, η διαφάνεια, η πρόσβαση σε υποδομές φόρτισης και η κοινωνικά στοχευμένη οικονομική πολιτική πρέπει να αποτελούν βασικά στοιχεία της εθνικής στρατηγικής, ώστε η ηλεκτροκίνηση να μην εξελιχθεί σε προνόμιο υψηλότερων εισοδηματικών ομάδων, αλλά σε εργαλείο περιβαλλοντικά αποτελεσματικής και κοινωνικά δίκαιης μετάβασης.

5.10 Κυκλική οικονομία & μπαταρίες

Η κυκλική οικονομία των μπαταριών αποτελεί κρίσιμη διάσταση της πολιτικής ηλεκτροκίνησης, καθώς το στάδιο παραγωγής της μπαταρίας συνεισφέρει σημαντικά στο αρχικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα των BEVs. Όπως ανέδειξε η Ανάλυση Κύκλου Ζωής, το υψηλότερο αποτύπωμα παραγωγής των ηλεκτρικών οχημάτων συνδέεται σε μεγάλο βαθμό με την παραγωγή της μπαταρίας, γεγονός που καθιστά τη διαχείριση του κύκλου ζωής της καθοριστική για τη συνολική περιβαλλοντική επίδοση της τεχνολογίας.

Η επαναχρησιμοποίηση μπαταριών σε στατικές εφαρμογές αποθήκευσης μπορεί να μειώσει την ανάγκη για νέα παραγωγή συστημάτων αποθήκευσης και να περιορίσει το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Notter et al., 2010 & Ellingsen et al., 2014 & Dunn et al., 2012 & Burchart and Przytuła, 2024).

Παράλληλα, η ευρωπαϊκή πολιτική προωθεί ισχυρότερο πλαίσιο για τη συλλογή, ανακύκλωση και ανάκτηση κρίσιμων μετάλλων από μπαταρίες, αναγνωρίζοντας τη στρατηγική σημασία των υλικών αυτών για την ενεργειακή μετάβαση και την ηλεκτροκίνηση (Dunn et al., 2012 & European Environment Agency, 2018 & European Commission, 2023).

Η διάσταση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς η βιβλιογραφία για το carbon footprint των BEVs δείχνει ότι το στάδιο παραγωγής της μπαταρίας αποτελεί έναν από τους βασικότερους συντελεστές του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Επομένως, η επαναχρησιμοποίηση, η ανακύκλωση και η ανάκτηση κρίσιμων μετάλλων δεν αποτελούν μόνο βιομηχανικές ή περιβαλλοντικές επιλογές διαχείρισης αποβλήτων, αλλά κρίσιμα εργαλεία βελτίωσης της συνολικής περιβαλλοντικής επίδοσης της ηλεκτροκίνησης (Burchart and Przytuła, 2024).

5.10.1 Second-life εφαρμογές

Οι μπαταρίες BEVs μπορούν μετά το τέλος της αυτοκινητιστικής τους χρήσης να αξιοποιηθούν ως στατικές μονάδες αποθήκευσης, μειώνοντας τις ανάγκες για νέες εγκαταστάσεις (Dunn et al., 2012). Η δυνατότητα αυτή αποκτά ιδιαίτερη αξία σε συστήματα υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ, όπου η αποθήκευση αποτελεί βασική προϋπόθεση για την καλύτερη αξιοποίηση της μεταβλητής παραγωγής από φωτοβολταϊκά και αιολικά συστήματα.

Οι εφαρμογές second-life αποκτούν ιδιαίτερη αξία όταν συνδέονται με την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε συστήματα υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ, καθώς παρατείνουν τον ωφέλιμο κύκλο ζωής της μπαταρίας και κατανέμουν το αρχικό περιβαλλοντικό κόστος παραγωγής σε ευρύτερο χρονικό ορίζοντα. Με τον τρόπο αυτό, παρατείνεται η λειτουργική αξία της μπαταρίας, βελτιώνεται η αποδοτικότητα χρήσης των υλικών και περιορίζεται η ανάγκη άμεσης παραγωγής νέων συστημάτων αποθήκευσης (Burchart and Przytuła, 2024).

Για την ελληνική περίπτωση, οι second-life εφαρμογές μπορούν να συνδεθούν με δημοτικά κτίρια, ενεργειακές κοινότητες, μικροδίκτυα, νησιωτικά συστήματα και εγκαταστάσεις ΑΠΕ. Η αξιοποίηση μεταχειρισμένων μπαταριών σε τέτοιες εφαρμογές θα μπορούσε να

ενισχύσει την αποθήκευση ενέργειας και να συμβάλει στη μείωση του συνολικού αποτυπώματος της ηλεκτροκίνησης, υπό την προϋπόθεση ότι διασφαλίζονται κατάλληλα τεχνικά πρότυπα ασφάλειας, πιστοποίησης και παρακολούθησης της κατάστασης των μπαταριών.

5.10.2 Ανακύκλωση

Η Ευρωπαϊκή Ένωση προωθεί ισχυρό πλαίσιο ανακύκλωσης μπαταριών για την ανάκτηση των κρίσιμων μετάλλων και τη μείωση της εξάρτησης από πρωτογενείς πρώτες ύλες (European Commission, 2023 & European Environment Agency, 2022 & European Commission, 2021). Η πολιτική αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ηλεκτροκίνηση, καθώς η αυξανόμενη διείσδυση των BEVs θα οδηγήσει μεσοπρόθεσμα σε αυξημένες ροές μπαταριών προς επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση ή τελική διαχείριση.

Για την Ελλάδα, η συγκεκριμένη πολιτική μπορεί να εξειδικευθεί μέσα από οργανωμένο εθνικό σύστημα συλλογής, ιχνηλασιμότητας και ανακύκλωσης μπαταριών.

Η ανάπτυξη οργανωμένου εθνικού συστήματος συλλογής, ιχνηλασιμότητας και ανακύκλωσης μπαταριών μπορεί να ενισχύσει την περιβαλλοντική βιωσιμότητα της ηλεκτροκίνησης, αλλά και τη βιομηχανική και τεχνολογική ετοιμότητα της χώρας σε έναν τομέα αυξανόμενης στρατηγικής σημασίας, που συνδέεται με την ασφάλεια εφοδιασμού, την κυκλική οικονομία και τη μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενες κρίσιμες πρώτες ύλες.

Η ιχνηλασιμότητα των μπαταριών είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επιτρέπει την παρακολούθηση της προέλευσης, της χρήσης, της κατάστασης υγείας και της τελικής διαχείρισής τους.

Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι οι τεχνολογίες ανακύκλωσης δεν είναι περιβαλλοντικά ισοδύναμες. Σε αρκετές περιπτώσεις, οι υδρομεταλλουργικές μέθοδοι εμφανίζουν χαμηλότερη ενεργειακή ένταση και μικρότερο ανθρακικό αποτύπωμα σε σχέση με τις πυρομεταλλουργικές διαδικασίες, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία όχι μόνο της ύπαρξης ανακύκλωσης, αλλά και της ποιότητας της επιλεγμένης τεχνολογίας ανάκτησης υλικών (Dunn et al., 2012 & European Environment Agency, 2018 & European Environment Agency, 2022 & Burchart and Przytuła, 2024).

Κατά συνέπεια, η πολιτική για τις μπαταρίες πρέπει να αντιμετωπίζεται ως αναπόσπαστο τμήμα της πολιτικής ηλεκτροκίνησης και όχι ως μεταγενέστερο ζήτημα διαχείρισης αποβλήτων. Η κυκλική οικονομία των μπαταριών επηρεάζει άμεσα το συνολικό αποτύπωμα κύκλου ζωής των BEVs και, συνεπώς, τη μακροπρόθεσμη περιβαλλοντική βιωσιμότητα της μετάβασης. Για τον λόγο αυτό, η επαναχρησιμοποίηση, η ιχνηλασιμότητα και η ανακύκλωση πρέπει να ενσωματώνονται ήδη από τον αρχικό σχεδιασμό της πολιτικής ηλεκτροκίνησης (Dunn et al., 2012 & European Environment Agency, 2018 & European Environment Agency, 2022 & Burchart and Przytuła, 2024).

5.11 Συνολική αποτίμηση των προτεινόμενων πολιτικών

Οι προτεινόμενες πολιτικές συνδέονται άμεσα με τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. Το βασικό εύρημα του Κεφαλαίου 4 είναι ότι η περιβαλλοντική επίδοση των BEVs εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ένταση άνθρακα του ηλεκτρικού συστήματος, το αποτύπωμα παραγωγής της μπαταρίας και τη δυνατότητα πραγματικής χρήσης του οχήματος σε επαρκή χιλιομετρικό ορίζοντα. Συνεπώς, όσο μειώνεται η ένταση άνθρακα του ενεργειακού συστήματος και όσο οργανώνεται αποτελεσματικότερα η διείσδυση της ηλεκτροκίνησης, τόσο μεγαλύτερη μπορεί να είναι η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα των οδικών μεταφορών.

Οι πολιτικές αυτές δεν λειτουργούν ανεξάρτητα, αλλά αλληλοσυμπληρώνονται. Η ενεργειακή απανθρακοποίηση αυξάνει το περιβαλλοντικό όφελος των BEVs, οι υποδομές φόρτισης επιτρέπουν την πραγματική χρήση της τεχνολογίας, η έξυπνη φόρτιση συνδέει την ηλεκτροκίνηση με τη λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος, τα οικονομικά κίνητρα μειώνουν τα εμπόδια εισόδου, ενώ η θεσμική και κοινωνική υποστήριξη διασφαλίζουν ότι η μετάβαση μπορεί να είναι σταθερή, αξιόπιστη και κοινωνικά δίκαιη. Παράλληλα, η κυκλική οικονομία των μπαταριών περιορίζει το περιβαλλοντικό βάρος της παραγωγής και ενισχύει τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα της ηλεκτροκίνησης.

Οι πολιτικές παρεμβάσεις που προτείνονται βασίζονται σε επιστημονικά ευρήματα, είναι συμβατές με τις ευρωπαϊκές κατευθύνσεις για τη μείωση εκπομπών στις μεταφορές, μπορούν να επιταχύνουν την επίτευξη των εθνικών και ευρωπαϊκών κλιματικών στόχων και, παράλληλα, να ενισχύσουν την τεχνολογική και οικονομική προσαρμογή της χώρας στη μετάβαση προς μεταφορές χαμηλών εκπομπών (European Commission, 2020 & European Commission, 2021 & European Union, 2021 & Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2024 & IEA, 2023).

Η εφαρμογή συνδυασμού ενεργειακών, οικονομικών, θεσμικών και κοινωνικών μέτρων μπορεί να επιταχύνει τη μετάβαση σε μεταφορές χαμηλών εκπομπών, συμβάλλοντας στους εθνικούς και ευρωπαϊκούς κλιματικούς στόχους. Η προσέγγιση αυτή είναι σημαντική, διότι το περιβαλλοντικό όφελος της ηλεκτροκίνησης δεν εξαρτάται από έναν μόνο παράγοντα, αλλά από την ταυτόχρονη εξέλιξη του ηλεκτρικού μίγματος, των υποδομών, της χρήσης των οχημάτων και της κοινωνικής αποδοχής.

Η βιβλιογραφία συγκλίνει στο ότι η αποτελεσματική προώθηση της ηλεκτροκίνησης απαιτεί συνδυασμό παρεμβάσεων και όχι μεμονωμένα μέτρα. Η απλή αντικατάσταση τεχνολογίας οχήματος, χωρίς ταυτόχρονη πρόοδο στο ενεργειακό σύστημα, στις υποδομές φόρτισης, στη διοικητική οργάνωση και στην κοινωνική αποδοχή, δεν αρκεί για να εξασφαλίσει το μέγιστο δυνατό περιβαλλοντικό όφελος (Burchart and Przytuła, 2024 & IEA, 2023).

Επιπλέον, στα αστικά κέντρα, η ηλεκτροκίνηση πρέπει να εντάσσεται σε ευρύτερες πολιτικές βιώσιμης κινητικότητας και βελτίωσης της ποιότητας του αέρα, ιδίως σε περιοχές όπου οι οδικές μεταφορές συνδέονται με σημαντική χωρική και χρονική επιβάρυνση εκπομπών (Liora et al., 2025 & Progiou et al., 2023).

Σε συνδυασμό με τη σταδιακή απανθρακοποίηση του ηλεκτροπαραγωγικού συστήματος, η εφαρμογή των παραπάνω πολιτικών μπορεί να ενισχύσει σημαντικά τη θέση της Ελλάδας στη μετάβαση προς μεταφορές χαμηλών εκπομπών, ιδίως εάν αξιοποιηθούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της χώρας, όπως η αυξημένη συμμετοχή ΑΠΕ, η νησιωτική μορφολογία και η ανάγκη αναβάθμισης της αστικής κινητικότητας.

Υπό αυτή την προοπτική, η Ελλάδα μπορεί να αξιοποιήσει την τρέχουσα φάση ενεργειακής μετάβασης ως παράθυρο ευκαιρίας, ώστε η προώθηση της ηλεκτροκίνησης να μη λειτουργήσει απλώς ως τεχνολογικός εκσυγχρονισμός του στόλου, αλλά ως μοχλός συνδυασμένης περιβαλλοντικής, ενεργειακής και αστικής πολιτικής.

Κατά συνέπεια, η προώθηση της ηλεκτροκίνησης στην Ελλάδα δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται ως μεμονωμένη περιβαλλοντική παρέμβαση, αλλά ως μέρος μιας συνολικής στρατηγικής για τη βιώσιμη κινητικότητα, την ενεργειακή μετάβαση και τη μείωση των περιβαλλοντικών πιέσεων στα αστικά κέντρα.

Με αυτόν τον τρόπο, οι προτάσεις πολιτικής του παρόντος κεφαλαίου συνδέουν τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής με ένα ευρύτερο πλαίσιο πρακτικών παρεμβάσεων για τη μετάβαση σε διαδικασίες μεταφοράς χαμηλότερου περιβαλλοντικού αποτυπώματος και δείχνουν ότι η ηλεκτροκίνηση απαιτεί συνδυασμό ενεργειακής, μεταφορικής, κοινωνικής και βιομηχανικής πολιτικής.

6. Συμπεράσματα

6.1 Εισαγωγή

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εξέτασε το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της ηλεκτροκίνησης στον τομέα των οδικών μεταφορών μέσω της εφαρμογής της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, Life Cycle Assessment (AKZ/LCA), με επίκεντρο τη συγκριτική αξιολόγηση τριών βασικών τεχνολογιών επιβατηγών οχημάτων: των οχημάτων με κινητήρα εσωτερικής καύσης (Internal Combustion Engine Vehicles, ICEVs), των υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων (Hybrid Electric Vehicles, HEVs) και των αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων με μπαταρία (Battery Electric Vehicles, BEVs).

Η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε βασίστηκε σε simplified, literature-based LCA, προσαρμοσμένη στα χαρακτηριστικά του ελληνικού ενεργειακού πλαισίου και στις προβλεπόμενες εξελίξεις του μίγματος ηλεκτροπαραγωγής για τα έτη 2026, 2030 και 2050 (ISO, 2006a & ISO, 2006b & ICCT, 2021). Με τον τρόπο αυτό, η εργασία επιχείρησε να αποτυπώσει όχι μόνο τη σημερινή περιβαλλοντική επίδοση των διαφορετικών τεχνολογιών οχημάτων, αλλά και τη δυναμική μεταβολή της επίδοσης αυτής υπό συνθήκες σταδιακής απανθρακοποίησης του ηλεκτρικού συστήματος.

Η επιλογή της συγκεκριμένης προσέγγισης επέτρεψε τη συστηματική αποτίμηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των τριών τεχνολογιών σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους, δηλαδή από την παραγωγή και τη χρήση έως το τέλος ζωής, αναδεικνύοντας με σαφήνεια ότι η περιβαλλοντική σύγκριση μεταξύ τεχνολογιών μεταφορών δεν μπορεί να περιορίζεται μόνο στις άμεσες εκπομπές εξάτμισης. Αντίθετα, απαιτείται ευρύτερη θεώρηση, η οποία να ενσωματώνει τόσο τις εκπομπές της παραγωγικής διαδικασίας όσο και τις έμμεσες εκπομπές που συνδέονται με την παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας.

Ιδίως στην περίπτωση των BEVs, η αξιολόγηση μόνο της φάσης χρήσης μπορεί να οδηγήσει σε μερική ή παραπλανητική εικόνα, καθώς το αυξημένο αρχικό αποτύπωμα παραγωγής αντισταθμίζεται σταδιακά κατά τη χρήση, ανάλογα με την ένταση άνθρακα της ηλεκτρικής ενέργειας.

Παράλληλα, η εργασία δεν αντιμετώπισε την ηλεκτροκίνηση αποκλειστικά ως τεχνολογικό ζήτημα, αλλά ως στοιχείο μιας ευρύτερης ενεργειακής, περιβαλλοντικής και πολιτικής μετάβασης. Αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία για την ελληνική περίπτωση, όπου η ταχεία μεταβολή του ενεργειακού μίγματος, η αυξανόμενη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και η ανάγκη περιορισμού των εκπομπών από τις μεταφορές δημιουργούν ένα δυναμικό πλαίσιο, στο οποίο η ηλεκτροκίνηση μπορεί να λειτουργήσει ως ουσιαστικός μοχλός απανθρακοποίησης.

Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε επίσης στον δείκτη του περιβαλλοντικού break-even distance, δηλαδή στην απόσταση κατά την οποία οι σωρευτικές εκπομπές CO_{2e} ενός BEV εξισώνονται με εκείνες ενός αντίστοιχου ICEV. Ο δείκτης αυτός αποτέλεσε βασικό εργαλείο ερμηνείας των αποτελεσμάτων, καθώς επιτρέπει την κατανόηση του χρόνου ή της απόστασης που απαιτείται ώστε το αρχικά υψηλότερο αποτύπωμα παραγωγής ενός ηλεκτρικού οχήματος να αντισταθμιστεί από τις χαμηλότερες εκπομπές κατά τη χρήση του.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το break-even distance εξετάστηκε αποκλειστικά ως περιβαλλοντικός δείκτης εκπομπών CO₂e και όχι ως οικονομικό μέτρο κόστους ή συνολικού κόστους ιδιοκτησίας.

Επιπλέον, πρόσφατες μελέτες για τη Θεσσαλονίκη δείχνουν ότι η οδική κυκλοφορία εξακολουθεί να αποτελεί σημαντική πηγή αστικής ρύπανσης, με ουσιαστική συμβολή στις συγκεντρώσεις NO₂ και PM_{2.5}, γεγονός που προσδίδει στην ηλεκτροκίνηση όχι μόνο κλιματική, αλλά και άμεση, περιβαλλοντική και υγειονομική διάσταση (Liora et al., 2021 & Liora et al., 2025 & Progiou et al., 2023). Υπό αυτή την έννοια, η ηλεκτροκίνηση δεν συνδέεται μόνο με τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, αλλά και με τη βελτίωση της ποιότητας του αστικού περιβάλλοντος, ιδίως όταν εντάσσεται σε ένα ευρύτερο πλαίσιο βιώσιμης κινητικότητας.

Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται τα βασικά ευρήματα της εργασίας, ερμηνεύονται τα αποτελέσματα υπό το πρίσμα της διεθνούς βιβλιογραφίας και διατυπώνονται τα τελικά επιστημονικά και πολιτικά συμπεράσματα που προκύπτουν για την ελληνική πραγματικότητα.

Παράλληλα, αναδεικνύονται οι βασικοί περιορισμοί της μελέτης και διατυπώνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα, με στόχο την περαιτέρω ενίσχυση της επιστημονικής τεκμηρίωσης γύρω από τον ρόλο της ηλεκτροκίνησης στη μετάβαση προς ένα χαμηλότερου άνθρακα σύστημα μεταφορών.

6.2 Συνοπτική αποτίμηση της περιβαλλοντικής επίδοσης ανά τεχνολογία

6.2.1 Οχήματα εσωτερικής καύσης (ICEVs)

Η ανάλυση κατέδειξε ότι τα οχήματα εσωτερικής καύσης παρουσιάζουν το υψηλότερο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα από τις τρεις εξεταζόμενες τεχνολογίες, σε όλα τα σενάρια ενεργειακής εξέλιξης που εξετάστηκαν. Η διαπίστωση αυτή επιβεβαιώνει ότι, παρά τις επιμέρους τεχνολογικές βελτιώσεις που έχουν επιτευχθεί τα τελευταία χρόνια στους κινητήρες εσωτερικής καύσης, η συγκεκριμένη τεχνολογία εξακολουθεί να συνδέεται με υψηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε επίπεδο κύκλου ζωής.

Το βασικό χαρακτηριστικό των ICEVs είναι ότι το μεγαλύτερο μέρος των συνολικών εκπομπών τους συγκεντρώνεται στη φάση χρήσης, δηλαδή στην καύση ορυκτών καυσίμων κατά τη λειτουργία του οχήματος. Η παραγωγή του οχήματος και το τέλος ζωής έχουν σαφώς μικρότερη σχετική συμβολή σε σύγκριση με τις εκπομπές που παράγονται κατά τη μακροχρόνια κατανάλωση καυσίμου. Αυτό σημαίνει ότι, ακόμη και όταν επιτυγχάνονται τεχνολογικές βελτιώσεις στην κατανάλωση καυσίμου ή στην ενεργειακή απόδοση, το βασικό δομικό χαρακτηριστικό της τεχνολογίας παραμένει αμετάβλητο: η άμεση εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα οδηγεί σε σταθερά υψηλές εκπομπές CO_{2e}.

Η διαπίστωση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία για τη στρατηγική αξιολόγηση της τεχνολογίας. Τα ICEVs δεν επηρεάζονται ουσιαστικά από τη βελτίωση του ηλεκτρικού μίγματος, σε αντίθεση με τα BEVs, και συνεπώς παραμένουν περιβαλλοντικά «σταθερά», σε ένα πλαίσιο που μεταβαίνει προς χαμηλότερη ένταση άνθρακα.

Με άλλα λόγια, όσο το ηλεκτρικό σύστημα απανθρακοποιείται, το σχετικό μειονέκτημα των ICEVs γίνεται εντονότερο, επειδή η δική τους περιβαλλοντική επίδοση δεν βελτιώνεται με τον ίδιο ρυθμό.

Επιπλέον, η εξάρτηση των ICEVs από τη χρήση βενζίνης ή πετρελαίου δημιουργεί έναν περιορισμό που δεν είναι μόνο περιβαλλοντικός, αλλά και ενεργειακός. Η τεχνολογία αυτή παραμένει συνδεδεμένη με την κατανάλωση εισαγόμενων ορυκτών καυσίμων, γεγονός που περιορίζει τη δυνατότητά της να ενταχθεί σε ένα μελλοντικό σύστημα μεταφορών χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Συνεπώς, η περιβαλλοντική τους επίδοση δεν μπορεί να μεταβληθεί ριζικά χωρίς αλλαγή του ίδιου του τεχνολογικού υποδείγματος.

Η διεθνής βιβλιογραφία για το ανθρακικό αποτύπωμα των οχημάτων δείχνει ότι, σε όρους κύκλου ζωής, οι τεχνολογίες εσωτερικής καύσης παραμένουν οι πλέον, περιβαλλοντικά, επιβαρυντικές όταν εξετάζονται σε μεσομακροπρόθεσμο ορίζοντα απανθρακοποίησης (Hawkins et al., 2013 & Ellingsen et al., 2016 & ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024, Negri and Bieker, 2025).

Η παρούσα εργασία επιβεβαιώνει αυτή τη γενική τάση και στο ελληνικό πλαίσιο, όπου η σταδιακή βελτίωση του ενεργειακού μίγματος ενισχύει περαιτέρω τη σχετική υστέρηση των ICEVs έναντι των ηλεκτροκίνητων τεχνολογιών.

6.2.2 Υβριδικά οχήματα (HEVs)

Τα HEVs αναδείχθηκαν ως τεχνολογία ενδιάμεσης περιβαλλοντικής επίδοσης. Η βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση, η ανάκτηση ενέργειας κατά την πέδηση και η μερική υποβοήθηση από ηλεκτρικό σύστημα συμβάλλουν σε αισθητή μείωση του συνολικού αποτυπώματος σε σχέση με τα ICEVs. Η μείωση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε συνθήκες αστικής κυκλοφορίας, όπου η συχνή επιτάχυνση και επιβράδυνση επιτρέπει στο υβριδικό σύστημα να αξιοποιεί καλύτερα τα πλεονεκτήματά του.

Ωστόσο, η τεχνολογία εξακολουθεί να βασίζεται, σε τελική ανάλυση, στην καύση ορυκτού καυσίμου και, κατά συνέπεια, δεν μπορεί να απαλλαγεί από το δομικό όριο που συνεπάγεται η φάση χρήσης. Αν και οι εκπομπές ανά χιλιόμετρο είναι χαμηλότερες από εκείνες των συμβατικών οχημάτων, η λειτουργία των HEVs εξακολουθεί να παράγει άμεσες εκπομπές CO₂e. Επομένως, η περιβαλλοντική τους βελτίωση είναι μεν ουσιαστική, αλλά όχι αρκετή ώστε να τα καταστήσει τεχνολογία μηδενικών ή σχεδόν μηδενικών εκπομπών.

Αυτό σημαίνει ότι τα HEVs αποτελούν βελτιωμένη, αλλά κατεξοχήν μεταβατική τεχνολογία. Μπορούν να προσφέρουν ορισμένα βραχυπρόθεσμα ή μεσοπρόθεσμα περιβαλλοντικά οφέλη, ιδίως σε περιόδους όπου οι υποδομές φόρτισης δεν έχουν ακόμη αναπτυχθεί πλήρως ή όταν το ηλεκτρικό μίγμα παραμένει σχετικά επιβαρυνμένο. Ωστόσο, δεν μπορούν να αποτελέσουν την τελική στρατηγική επιλογή για ένα πλήρως απανθρακοποιημένο σύστημα μεταφορών, ακριβώς επειδή διατηρούν τη σύνδεσή τους με τα ορυκτά καύσιμα.

Σε σύγκριση με τα ICEVs, τα HEVs εμφανίζουν σαφώς καλύτερη περιβαλλοντική επίδοση. Σε σύγκριση όμως με τα BEVs, το πλεονέκτημά τους περιορίζεται, ιδίως όσο το ηλεκτρικό μίγμα γίνεται καθαρότερο. Η ανάλυση των σεναρίων δείχνει ότι η βελτίωση του ελληνικού συστήματος ηλεκτροπαραγωγής ευνοεί κυρίως τα BEVs και όχι τα HEVs, καθώς τα τελευταία δεν αξιοποιούν στον ίδιο βαθμό τη μείωση της έντασης άνθρακα της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η βιβλιογραφία συγκλίνει στο ότι η θέση των HEVs βρίσκεται μεταξύ των ICEVs και των BEVs: αποτελούν βήμα βελτίωσης, αλλά όχι τεχνολογία ικανή να υποκαταστήσει την ανάγκη πλήρους μετάβασης σε μορφές κινητικότητας χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών άνθρακα (Nordelöf et al. 2014 & ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024).

Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, τα HEVs μπορούν να θεωρηθούν χρήσιμη μεταβατική λύση, αλλά όχι επαρκής απάντηση στον μακροπρόθεσμο στόχο της απανθρακοποίησης των οδικών μεταφορών.

6.2.3 Ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία (BEVs)

Τα BEVs εμφάνισαν τη χαμηλότερη συνολική επιβάρυνση κύκλου ζωής και, επομένως, την καλύτερη συνολική περιβαλλοντική επίδοση μεταξύ των τριών εξεταζόμενων τεχνολογιών. Η υπεροχή τους ενισχύεται όσο το ηλεκτρικό μίγμα της Ελλάδας μεταβαίνει προς καθαρότερες μορφές παραγωγής, γεγονός που αναδεικνύει τον στενό δεσμό μεταξύ ηλεκτροκίνησης και ενεργειακής μετάβασης.

Το κρίσιμο σημείο στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι ότι η περιβαλλοντική τους υπεροχή δεν πηγάζει από μια «μηδενική» περιβαλλοντική ταυτότητα, αλλά από μια διαφορετική κατανομή εκπομπών στον κύκλο ζωής. Τα BEVs δεν είναι περιβαλλοντικά ουδέτερα, καθώς η παραγωγή τους και ιδιαίτερα η παραγωγή της μπαταρίας συνδέονται με σημαντικό αρχικό αποτύπωμα. Ωστόσο, η απουσία άμεσων εκπομπών εξάτμισης και η χαμηλότερη επιβάρυνση κατά τη φάση χρήσης οδηγούν σε σαφώς καλύτερη συνολική επίδοση, ιδίως όταν η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται όλο και περισσότερο από χαμηλού άνθρακα πηγές.

Στα BEVs, η παραγωγή και, ιδιαίτερα, η παραγωγή της μπαταρίας επιβαρύνουν αισθητά το αρχικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η επιβάρυνση αυτή αποτελεί ένα από τα βασικά σημεία κριτικής στη διεθνή συζήτηση για την ηλεκτροκίνηση. Ωστόσο, η φάση χρήσης είναι δραστικά καθαρότερη, ιδίως όταν η φόρτιση βασίζεται σε μίγμα χαμηλότερης έντασης άνθρακα. Έτσι, το αρχικό «περιβαλλοντικό χρέος» της παραγωγής αντισταθμίζεται σταδιακά κατά τη λειτουργία του οχήματος (Notter et al., 2010 & Dunn et al., 2012 & Ellingsen et al. 2014 & Dunn et al., 2015 & Hawkins et al., 2013 & ICCT, 2021).

Καθώς η Ελλάδα κινείται προς μεγαλύτερη συμμετοχή ΑΠΕ και μειωμένη εξάρτηση από λιγνιτική και λοιπή θερμική ηλεκτροπαραγωγή, το λειτουργικό αποτύπωμα των BEVs περιορίζεται ακόμη περισσότερο. Σε αυτό ακριβώς το σημείο τα BEVs αποκτούν σαφές στρατηγικό και περιβαλλοντικό πλεονέκτημα έναντι των άλλων τεχνολογιών. Η βελτίωση του ηλεκτρικού μίγματος δεν αποτελεί απλώς εξωτερική παράμετρο, αλλά βασική προϋπόθεση για τη μεγιστοποίηση του περιβαλλοντικού οφέλους της ηλεκτροκίνησης.

Η ανάλυση έδειξε ότι τα BEVs είναι η μόνη από τις τρεις εξεταζόμενες τεχνολογίες της οποίας η περιβαλλοντική επίδοση μπορεί να βελτιώνεται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου, χωρίς να απαιτείται αλλαγή του ίδιου του οχήματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η χρήση τους εξαρτάται από την ένταση άνθρακα της ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, όσο η ηλεκτροπαραγωγή απανθρακοποιείται, τόσο μειώνεται και το αποτύπωμα χρήσης των BEVs.

Η σχετική βιβλιογραφία τονίζει ότι η περιβαλλοντική απόδοση των BEVs πρέπει να ερμηνεύεται δυναμικά και όχι στατικά: το ίδιο όχημα μπορεί να εμφανίζει διαφορετικό συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα, ανάλογα με το ενεργειακό μίγμα της χώρας και τη χρονική περίοδο στην οποία χρησιμοποιείται. Η εργασία αυτή επιβεβαιώνει ακριβώς αυτή τη λογική, στο ελληνικό πλαίσιο, δείχνοντας ότι η ηλεκτροκίνηση αποκτά ολοένα ισχυρότερο περιβαλλοντικό πλεονέκτημα όσο προχωρά η απανθρακοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής (ICCT, 2021 & IEA, 2023 & Burchart and Przytuła, 2024 & Negri and Bieker, 2025).

Συνολικά, τα BEVs μπορούν να θεωρηθούν η τεχνολογία με τη μεγαλύτερη συμβατότητα προς ένα μελλοντικό σύστημα μεταφορών χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Η περιβαλλοντική τους υπεροχή, ωστόσο, δεν πρέπει να θεωρείται αυτόματη ή ανεξάρτητη από το ευρύτερο ενεργειακό πλαίσιο. Αντίθετα, εξαρτάται από την ταχύτητα απανθρακοποίησης της ηλεκτροπαραγωγικής διαδικασίας, τη βελτίωση της παραγωγής μπαταριών, την ανάπτυξη υποδομών φόρτισης και τη δυνατότητα ανακύκλωσης ή επαναχρησιμοποίησης κρίσιμων υλικών.

6.3 Συμπεράσματα σχετικά με το ενεργειακό μίγμα και την ελληνική πραγματικότητα

Ένα από τα σημαντικότερα συμπεράσματα της εργασίας είναι ότι η περιβαλλοντική αξία της ηλεκτροκίνησης στην Ελλάδα εξαρτάται καθοριστικά από την εξέλιξη του εθνικού ενεργειακού μίγματος. Η ανάλυση έδειξε ότι όσο μειώνεται η ένταση άνθρακα της ηλεκτροπαραγωγής, τόσο βελτιώνεται η περιβαλλοντική επίδοση των BEVs, τόσο σε όρους συνολικών εκπομπών κύκλου ζωής όσο και σε όρους απόστασης περιβαλλοντικής εξισορρόπησης (break-even distance). Η διαπίστωση αυτή επιβεβαιώνει ότι η ηλεκτροκίνηση δεν μπορεί να αξιολογείται ανεξάρτητα από το ευρύτερο ενεργειακό σύστημα μέσα στο οποίο εντάσσεται.

Η ελληνική περίπτωση παρουσιάζει ιδιαίτερο ερευνητικό και πολιτικό ενδιαφέρον, επειδή η χώρα βρίσκεται σε περίοδο ταχείας ενεργειακής μετάβασης. Η μείωση της συμμετοχής του λιγνίτη, η διεύρυνση της εγκατεστημένης ισχύος από ΑΠΕ, η ενίσχυση των διασυνδέσεων και οι ενεργειακές προβλέψεις για το 2030 και το 2050 συγκροτούν ένα πλαίσιο στο οποίο η ηλεκτροκίνηση μπορεί να αποκτήσει πολύ μεγαλύτερη περιβαλλοντική αποτελεσματικότητα σε σχέση με χώρες ή περιόδους όπου το ηλεκτρικό μίγμα παραμένει περισσότερο ανθρακικά επιβαρυνόμενο (Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2019 & IPTO/ADMIE, 2023a & IPTO/ADMIE, 2023b & IPTO/ADMIE, 2024 & Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2024 & European Commission, 2025).

Συνεπώς, η περιβαλλοντική υπεροχή των BEVs στην Ελλάδα δεν είναι στατική, αλλά ενισχύεται δυναμικά όσο προχωρά η απανθρακοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής.

Η σχετική βιβλιογραφία καταγράφει με σαφήνεια ότι το ενεργειακό μίγμα είναι ο σημαντικότερος καθοριστικός παράγοντας του carbon footprint των BEVs και ότι η απανθρακοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής αποτελεί προϋπόθεση για την πλήρη περιβαλλοντική αξιοποίηση της τεχνολογίας (Burchart and Przytuła, 2024).

Υπό αυτό το πρίσμα, η παρούσα εργασία επιβεβαιώνει ότι η ηλεκτροκίνηση και η ενεργειακή μετάβαση δεν αποτελούν δύο ανεξάρτητες πολιτικές κατευθύνσεις, αλλά δύο αλληλένδετες διαστάσεις της ίδιας στρατηγικής απανθρακοποίησης (EEA, 2023 & EEA, 2024a).

Παράλληλα, η ελληνική πραγματικότητα των μετακινήσεων και ιδίως η αστική κινητικότητα σε μητροπολιτικά κέντρα όπως η Αθήνα και η Θεσσαλονίκη, ευνοεί σε αρκετές περιπτώσεις τις τεχνολογίες ηλεκτροκίνησης. Οι μικρές και μεσαίες διαδρομές, η υψηλή πυκνότητα κυκλοφορίας, η έντονη συμφόρηση και η ανάγκη περιορισμού της αστικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης ενισχύουν περαιτέρω τη σημασία των BEVs. Σε τέτοιο περιβάλλον η ηλεκτροκίνηση δεν σχετίζεται μόνο με τη μείωση των εκπομπών CO₂e, αλλά και με τη δυνατότητα περιορισμού των τοπικών ρύπων που επιβαρύνουν άμεσα την ποιότητα ζωής των κατοίκων.

Δεν πρόκειται, επομένως, μόνο για τεχνολογία κλιματικής μετάβασης, αλλά και για δυναμικό εργαλείο βελτίωσης της ποιότητας του αέρα στα μεγάλα αστικά κέντρα. Αυτό τεκμηριώνεται και από πρόσφατες μελέτες των Liora et al. για τη Θεσσαλονίκη, οι οποίες

δείχνουν ότι η οδική κυκλοφορία παραμένει σημαντική πηγή NO₂ και PM_{2.5}, ενώ σενάρια μείωσης ιδιωτικής κυκλοφορίας και ενίσχυσης καθαρών δημόσιων μεταφορών μπορούν να επιφέρουν ουσιαστικές μειώσεις ρύπων και CO₂ (Liora et al., 2021 & Liora et al., 2025 & Progiou et al., 2023).

Η διάσταση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ελληνική περίπτωση, όπου η περιβαλλοντική πολιτική οφείλει να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τη συμβολή των μεταφορών στην κλιματική αλλαγή, αλλά και τις τοπικές επιπτώσεις στην υγεία και στο αστικό περιβάλλον.

Το συμπέρασμα αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο, καθώς στην ελληνική περίπτωση, η περιβαλλοντική αξία της ηλεκτροκίνησης δεν εξαντλείται στη μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, αλλά συνδέεται άμεσα και με την ανάγκη προστασίας του αστικού περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας. Με άλλα λόγια, η ηλεκτροκίνηση αποκτά στην Ελλάδα διπλή περιβαλλοντική σημασία: αφενός ως μέσο περιορισμού του ανθρακικού αποτυπώματος των οδικών μεταφορών και αφετέρου ως εργαλείο υποστήριξης μιας καθαρότερης και πιο βιώσιμης αστικής κινητικότητας.

Συνολικά, η παρούσα εργασία αναδεικνύει ότι το πραγματικό περιβαλλοντικό όφελος της ηλεκτροκίνησης στην Ελλάδα εξαρτάται από τη συνέργεια μεταξύ τεχνολογικής μετάβασης στις μεταφορές και διαρθρωτικής μετάβασης στο ενεργειακό σύστημα. Όσο οι δύο αυτές διαδικασίες προχωρούν παράλληλα, τόσο ενισχύεται η δυνατότητα της χώρας να επιτύχει ουσιαστική μείωση εκπομπών, βελτίωση της ποιότητας του αέρα και μετάβαση προς ένα πιο βιώσιμο μοντέλο κινητικότητας.

6.4 Συμπεράσματα σχετικά με το break-even distance

Η ανάλυση της απόστασης περιβαλλοντικής εξισορρόπησης αποτέλεσε κεντρικό στοιχείο της παρούσας εργασίας, καθώς επέτρεψε τη δυναμική σύγκριση των σωρευτικών εκπομπών κύκλου ζωής μεταξύ BEVs και ICEVs. Ο δείκτης αυτός εκφράζει το σημείο στο οποίο το αυξημένο αρχικό αποτύπωμα παραγωγής ενός ηλεκτρικού οχήματος με μπαταρία, κυρίως λόγω της παραγωγής της μπαταρίας, αντισταθμίζεται από τις χαμηλότερες εκπομπές κατά τη φάση χρήσης σε σύγκριση με ένα αντίστοιχο όχημα εσωτερικής καύσης.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το break-even distance εξετάστηκε αποκλειστικά ως περιβαλλοντικός δείκτης. Δεν αφορά οικονομική εξισορρόπηση, κόστος αγοράς, κόστος λειτουργίας ή συνολικό κόστος ιδιοκτησίας, (Total Cost of Ownership, TCO). Η διευκρίνιση αυτή είναι ουσιώδης, καθώς ο δείκτης χρησιμοποιείται εδώ για να αποτυπώσει μόνο τη χρονική ή χιλιομετρική στιγμή κατά την οποία οι σωρευτικές εκπομπές CO_{2e} των δύο τεχνολογιών εξισώνονται.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στο ελληνικό σενάριο του 2026 το break-even επιτυγχάνεται σε απόσταση που παραμένει μεν σημαντική, αλλά απολύτως ρεαλιστική για τον κύκλο ζωής ενός επιβατικού οχήματος. Η απόσταση αυτή αποτυπώνει το γεγονός ότι, κατά τα πρώτα στάδια χρήσης, το BEV φέρει ένα υψηλότερο ενσωματωμένο περιβαλλοντικό φορτίο λόγω της παραγωγής του οχήματος και της μπαταρίας του. Ωστόσο, όσο αυξάνεται η απόσταση που διανύεται, οι χαμηλότερες εκπομπές χρήσης οδηγούν, σταδιακά, σε αντιστάθμιση αυτού του αρχικού αποτυπώματος.

Στο σενάριο του 2030 η απαιτούμενη απόσταση περιβαλλοντικής εξισορρόπησης μειώνεται αισθητά, ενώ στο σενάριο του 2050 περιορίζεται ακόμη περισσότερο.

Συγκεκριμένα, η απόσταση περιβαλλοντικής εξισορρόπησης εκτιμήθηκε περίπου σε 82.300 km για το σενάριο 2026, 58.300 km για το σενάριο 2030 και 43.800 km για το σενάριο 2050. Η διαδοχική αυτή μείωση αποτυπώνει με σαφήνεια τη θετική επίδραση της σταδιακής απανθρακοποίησης του ηλεκτρικού συστήματος στη συνολική περιβαλλοντική απόδοση των BEVs.

Η εξέλιξη αυτή αναδεικνύει τη στενή σύνδεση του break-even distance με την πορεία απανθρακοποίησης της ηλεκτροπαραγωγής. Όσο μειώνεται η ένταση άνθρακα του ηλεκτρικού μίγματος, τόσο χαμηλότερες γίνονται οι εκπομπές χρήσης των BEVs και, επομένως, τόσο συντομότερα επιτυγχάνεται η περιβαλλοντική εξισορρόπηση έναντι των ICEVs.

Η σημασία του συγκεκριμένου ευρήματος είναι διττή. Πρώτον, επιβεβαιώνει ότι η ηλεκτροκίνηση στην Ελλάδα δεν αποτελεί απλώς μελλοντική υπόσχεση, αλλά ήδη περιβαλλοντικά αποτελεσματική επιλογή, υπό ρεαλιστικές συνθήκες χρήσης. Ακόμη και στο σενάριο του 2026, όπου το ηλεκτρικό μίγμα δεν έχει ακόμη πλήρως απανθρακοποιηθεί, το BEV καταφέρνει να αντισταθμίσει το αρχικό του αποτύπωμα εντός μιας απόστασης που μπορεί να ενταχθεί στον συνήθη κύκλο ζωής ενός επιβατικού οχήματος.

Δεύτερον, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η περιβαλλοντική αποτελεσματικότητα των BEVs δεν είναι σταθερή ή δεδομένη, αλλά ενισχύεται δυναμικά καθώς βελτιώνεται το ενεργειακό υπόβαθρο της χώρας. Η ίδια τεχνολογία οχήματος μπορεί να εμφανίζει διαφορετική συνολική περιβαλλοντική επίδοση ανάλογα με τη χρονική περίοδο χρήσης της και την ένταση άνθρακα της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνει. Συνεπώς, η αξιολόγηση των BEVs πρέπει να γίνεται σε συνάρτηση με την εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος και όχι ως στατική τεχνολογική σύγκριση.

Το break-even distance μπορεί, συνεπώς, να θεωρηθεί όχι μόνο τεχνικός δείκτης LCA, αλλά και δείκτης πολιτικής ωριμότητας του ενεργειακού συστήματος. Όσο καθαρότερο είναι το δίκτυο, τόσο νωρίτερα τα ηλεκτρικά οχήματα υπερτερούν περιβαλλοντικά έναντι των συμβατικών. Αντίθετα, σε συστήματα ηλεκτροπαραγωγής υψηλής έντασης άνθρακα, η απόσταση περιβαλλοντικής εξισορρόπησης μπορεί να αυξάνεται σημαντικά, περιορίζοντας ή καθυστερώντας το συνολικό όφελος της ηλεκτροκίνησης.

Η σχετική βιβλιογραφία υπογραμμίζει ακριβώς αυτή τη δυναμική διάσταση: το break-even distance δεν αποτελεί μία αμετάβλητη ιδιότητα ενός οχήματος, αλλά εξαρτάται από σειρά παραμέτρων, όπως η ένταση άνθρακα του ηλεκτρισμού, το μέγεθος και η τεχνολογία της μπαταρίας, η κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο, η διάρκεια ζωής του οχήματος, το ετήσιο προφίλ χρήσης και οι παραδοχές που αφορούν την παραγωγή και το τέλος ζωής (Hawkins et al., 2013 & Ellingsen et al., 2016 & ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024 & Negri and Bieker, 2025). Για τον λόγο αυτό, η ερμηνεία του δείκτη πρέπει πάντοτε να συνοδεύεται από σαφή αναφορά στις παραδοχές της ανάλυσης.

Στην παρούσα εργασία, η σταδιακή μείωση του break-even distance από το σενάριο του 2026 προς τα σενάρια του 2030 και του 2050 αποτελεί ένα από τα πιο καθαρά ευρήματα υπέρ της ηλεκτροκίνησης, στο ελληνικό πλαίσιο. Η εξέλιξη αυτή δείχνει ότι η περιβαλλοντική υπεροχή των BEVs δεν περιορίζεται μόνο στη σημερινή σύγκριση με τα ICEVs, αλλά ενισχύεται όσο προχωρά η μετάβαση της χώρας προς ένα καθαρότερο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής.

Συνεπώς, το βασικό συμπέρασμα είναι σαφές: η συνεχής μείωση της απόστασης περιβαλλοντικής εξισορρόπησης τεκμηριώνει ότι η ηλεκτροκίνηση στην Ελλάδα καθίσταται όχι μόνο τεχνολογικά ωριμότερη, αλλά και ολοένα περιβαλλοντικά αποτελεσματικότερη. Η περιβαλλοντική της απόδοση εξαρτάται άμεσα από τη συνέχιση της απανθρακοποίησης του ηλεκτρικού συστήματος, γεγονός που καθιστά την παράλληλη ανάπτυξη καθαρής ηλεκτροπαραγωγής και ηλεκτροκίνησης κρίσιμη προϋπόθεση για τη μείωση των εκπομπών στις οδικές μεταφορές.

6.5 Συνολική πολιτική και στρατηγική αποτίμηση

Τα αποτελέσματα της εργασίας στηρίζουν με σαφήνεια την ανάγκη ενίσχυσης των πολιτικών ηλεκτροκίνησης στην Ελλάδα. Ωστόσο, εξίσου σαφές είναι ότι η επιτυχία της ηλεκτροκίνησης δεν μπορεί να βασιστεί σε μία μόνο παρέμβαση, όπως η επιδότηση αγοράς οχημάτων ή η αποσπασματική ανάπτυξη υποδομών φόρτισης.

Η εργασία έδειξε ότι το περιβαλλοντικό όφελος των BEVs εξαρτάται από ένα σύνολο αλληλένδετων παραγόντων, οι οποίοι πρέπει να αντιμετωπίζονται συνδυαστικά. Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι το ενεργειακό μίγμα, η διαθεσιμότητα και η χωρική κατανομή των υποδομών φόρτισης, η οργάνωση και αξιοπιστία του δικτύου, η διάρκεια ζωής των οχημάτων, η διαχείριση των μπαταριών, η δυνατότητα ανακύκλωσης ή επαναχρησιμοποίησης κρίσιμων υλικών και το ευρύτερο θεσμικό πλαίσιο που ρυθμίζει τη μετάβαση προς καθαρότερες μεταφορές (Dunn et al., 2012 & Dunn et al., 2015 & European Environment Agency, 2018 & Burchart and Przytuła, 2024).

Συνεπώς, η ηλεκτροκίνηση δεν μπορεί να αξιολογηθεί ως μεμονωμένη τεχνολογική επιλογή, αλλά ως μέρος ενός ευρύτερου συστήματος ενέργειας, μεταφορών και περιβαλλοντικής πολιτικής.

Αυτό σημαίνει ότι η ηλεκτροκίνηση πρέπει να αντιμετωπίζεται ως διατομεακή πολιτική. Συνδέεται άμεσα με την ενεργειακή πολιτική, διότι το αποτύπωμα χρήσης των BEVs εξαρτάται από την ένταση άνθρακα της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνουν. Όσο πιο καθαρή είναι η παραγόμενη kWh, τόσο μεγαλύτερο είναι το πραγματικό περιβαλλοντικό όφελος από τη χρήση ηλεκτρικών οχημάτων. Επομένως, η προώθηση της ηλεκτροκίνησης χωρίς ταυτόχρονη απανθρακοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής θα περιορίζε σημαντικά το συνολικό της δυναμικό.

Παράλληλα, η ηλεκτροκίνηση συνδέεται με την αστική και μεταφορική πολιτική, διότι η πραγματική αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο εντάσσεται σε βιώσιμα πρότυπα κινητικότητας. Η αντικατάσταση συμβατικών οχημάτων από ηλεκτρικά μπορεί να μειώσει τις εκπομπές CO_{2e} και τους τοπικούς ρύπους, αλλά δεν αρκεί από μόνη της για να αντιμετωπίσει ζητήματα όπως η κυκλοφοριακή συμφόρηση, η υπερβολική εξάρτηση από το ιδιωτικό αυτοκίνητο και η υποβάθμιση του αστικού χώρου. Για τον λόγο αυτό, η ηλεκτροκίνηση πρέπει να συνδυάζεται με πολιτικές ενίσχυσης των δημόσιων συγκοινωνιών, της μικροκινητικότητας, της ενεργής μετακίνησης και του ολοκληρωμένου αστικού σχεδιασμού.

Η ηλεκτροκίνηση συνδέεται επίσης με τη βιομηχανική και αναπτυξιακή πολιτική, κυρίως μέσω της αλυσίδας αξίας των μπαταριών. Η παραγωγή, η συντήρηση, η δεύτερη χρήση και η ανακύκλωση των μπαταριών αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για τη μείωση του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος των BEVs. Η μετάβαση προς την ηλεκτροκίνηση δημιουργεί, συνεπώς, νέες ανάγκες σε επίπεδο τεχνογνωσίας, υποδομών, ελέγχου υλικών ροών και κυκλικής οικονομίας. Ιδίως για μια χώρα όπως η Ελλάδα, η ανάπτυξη σχετικών υποδομών και υπηρεσιών μπορεί να έχει όχι μόνο περιβαλλοντική, αλλά και αναπτυξιακή σημασία.

Τέλος, η ηλεκτροκίνηση συνδέεται με την κοινωνική πολιτική, διότι η πρόσβαση σε καθαρές τεχνολογίες μετακίνησης δεν είναι αυτονόητα ισότιμη. Το κόστος αγοράς ηλεκτρικών οχημάτων, η δυνατότητα πρόσβασης σε ιδιωτική ή δημόσια φόρτιση, η γεωγραφική κατανομή των υποδομών και οι εισοδηματικές ανισότητες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το ποιοι πολίτες ωφελούνται πρώτοι από τη μετάβαση. Επομένως, οι πολιτικές ηλεκτροκίνησης πρέπει να σχεδιάζονται με τρόπο που να αποφεύγουν τη δημιουργία νέων μορφών ανισότητας και να ενισχύουν την πρόσβαση σε καθαρότερες μεταφορές για ευρύτερα κοινωνικά στρώματα.

Η διεθνής βιβλιογραφία υπογραμμίζει ότι η περιβαλλοντική υπεροχή των BEVs μπορεί να περιοριστεί ή να υπονομευθεί αν η μετάβαση γίνει χωρίς ενεργειακή απανθρακοποίηση, χωρίς αξιόπιστο δίκτυο φόρτισης, χωρίς κοινωνική στόχευση και χωρίς πολιτικές κυκλικής οικονομίας για τις μπαταρίες. Με άλλα λόγια, η τεχνολογική μετάβαση δεν εγγυάται από μόνη της τη μέγιστη περιβαλλοντική απόδοση. Απαιτείται συνεκτικό πλαίσιο πολιτικής, το οποίο θα συνδέει την προώθηση των BEVs με την παραγωγή καθαρής ενέργειας, την ορθολογική χρήση των πόρων και τη βιώσιμη οργάνωση των μετακινήσεων (European Commission, 2020 & European Commission, 2021 & European Union, 2021 & IEA, 2023 & Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2024 & European Commission, 2025).

Παράλληλα, πρόσφατες μελέτες για τη Θεσσαλονίκη δείχνουν ότι παρεμβάσεις που περιορίζουν την ιδιωτική κυκλοφορία και ενισχύουν καθαρές δημόσιες συγκοινωνίες μπορούν να προσφέρουν όχι μόνο κλιματικό, αλλά και άμεσο όφελος στην ποιότητα του αέρα (Liora et al., 2021 & Liora et al., 2025 & Progiou et al., 2023).

Η διάσταση αυτή είναι κρίσιμη, διότι δείχνει ότι η πολιτική ηλεκτροκίνησης δεν πρέπει να περιορίζεται στην αλλαγή τύπου οχήματος, αλλά να εντάσσεται σε μια συνολικότερη στρατηγική βιώσιμης αστικής κινητικότητας.

Επομένως, η στρατηγική αποτίμηση της ηλεκτροκίνησης για την Ελλάδα οδηγεί σε ένα βασικό συμπέρασμα: η τεχνολογία είναι αναγκαία, αλλά δεν είναι από μόνη της επαρκής. Τα BEVs αποτελούν σημαντικό εργαλείο για τη μείωση των εκπομπών στις οδικές μεταφορές, όμως το τελικό περιβαλλοντικό αποτέλεσμα εξαρτάται από το πλαίσιο μέσα στο οποίο θα ενταχθούν. Το κρίσιμο ζήτημα δεν είναι μόνο η αύξηση του αριθμού των ηλεκτρικών οχημάτων, αλλά ο σχεδιασμός ενός συνεκτικού πλαισίου πολιτικής που θα επιτρέπει στην ηλεκτροκίνηση να αποδίδει το πλήρες περιβαλλοντικό της δυναμικό.

Υπό αυτή την προοπτική, η ηλεκτροκίνηση μπορεί να λειτουργήσει ως ενοποιητικός άξονας πολιτικής, συνδέοντας τη μείωση εκπομπών, τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα, τον εκσυγχρονισμό των μεταφορών, την ανάπτυξη καθαρών ενεργειακών υποδομών και την ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας.

Για την Ελλάδα, η πρόκληση δεν είναι μόνο η υιοθέτηση της ηλεκτροκίνησης, αλλά η ένταξή της σε ένα ολοκληρωμένο και δίκαιο μοντέλο ενεργειακής και μεταφορικής μετάβασης. Μόνο υπό αυτές τις προϋποθέσεις μπορεί η ηλεκτροκίνηση να συμβάλει ουσιαστικά στη διαμόρφωση ενός συστήματος μεταφορών χαμηλότερου ανθρακικού αποτυπώματος και υψηλότερης περιβαλλοντικής ποιότητας.

6.6 Μεθοδολογικές διευκρινήσεις και όρια ερμηνείας των αποτελεσμάτων

Το *break-even distance* που υπολογίζεται στην παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά περιβαλλοντικό δείκτη σύγκρισης σωρευτικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, εκφρασμένων σε CO_{2e}, μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών οχημάτων. Ο δείκτης εκφράζει την απόσταση στην οποία οι σωρευτικές εκπομπές κύκλου ζωής ενός ηλεκτρικού οχήματος με μπαταρία (Battery Electric Vehicle, BEV) εξισώνονται με εκείνες ενός αντίστοιχου οχήματος με κινητήρα εσωτερικής καύσης (Internal Combustion Engine Vehicle, ICEV).

Η ερμηνεία του δείκτη πρέπει να γίνεται αποκλειστικά στο πλαίσιο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment, LCA) (ISO, 2006a & ISO, 2006b). Στην παρούσα εργασία, το *break-even distance* δεν εκφράζει οικονομικό σημείο απόσβεσης, αλλά περιβαλλοντικό σημείο εξισορρόπησης εκπομπών. Με άλλα λόγια, δείχνει το σημείο μετά το οποίο, υπό τις συγκεκριμένες παραδοχές της μελέτης, το BEV εμφανίζει χαμηλότερες σωρευτικές εκπομπές CO_{2e} σε σχέση με το αντίστοιχο ICEV.

Η παρούσα εργασία δεν περιλαμβάνει οικονομική αξιολόγηση κόστους, ανάλυση κόστους αγοράς, κόστους συντήρησης, κόστους φόρτισης ή συνολικού κόστους ιδιοκτησίας (Total Cost of Ownership, TCO). Συνεπώς, τα αποτελέσματα δεν πρέπει να ερμηνεύονται ως οικονομική σύγκριση τεχνολογιών ή ως ένδειξη οικονομικής απόσβεσης της αγοράς ηλεκτρικού οχήματος. Η αξιολόγηση περιορίζεται στη συγκριτική περιβαλλοντική επίδοση των τεχνολογιών σε όρους κύκλου ζωής.

Επιπλέον, τα αποτελέσματα του *break-even distance* εξαρτώνται από τις παραδοχές της μελέτης, όπως η κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο, ο συντελεστής εκπομπών του ηλεκτρικού μίγματος, το αποτύπωμα παραγωγής της μπαταρίας, η διάρκεια ζωής του οχήματος και το συνολικό διανυθέν χιλιομετρικό έργο (ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024 & Negri and Bieker, 2025).

Για τον λόγο αυτό, οι τιμές που προκύπτουν στην παρούσα εργασία πρέπει να ερμηνεύονται ως ενδεικτικές εκτιμήσεις συγκριτικής περιβαλλοντικής αξιολόγησης και όχι ως απόλυτες ή καθολικά εφαρμόσιμες τιμές για κάθε τύπο οχήματος και κάθε συνθήκη χρήσης.

Κατά συνέπεια, η συμβολή του δείκτη έγκειται κυρίως στην ανάδειξη της σχέσης μεταξύ ηλεκτροκίνησης, ενεργειακού μίγματος και συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Η μείωση του *break-even distance* στα σενάρια 2030 και 2050 δεν σημαίνει οικονομική επιτάχυνση της απόσβεσης, αλλά περιβαλλοντική βελτίωση της επίδοσης των BEVs λόγω της υποτιθέμενης μείωσης της έντασης άνθρακα της ηλεκτροπαραγωγής. Με αυτή την έννοια, ο δείκτης χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία ως εργαλείο περιβαλλοντικής ερμηνείας και όχι ως εργαλείο οικονομικής αξιολόγησης.

6.7 Επιστημονικά συμπεράσματα και συμβολή της εργασίας

Η παρούσα εργασία συνεισφέρει ουσιαστικά στη σχετική ελληνική βιβλιογραφία και στη συζήτηση για την περιβαλλοντική αποτίμηση της ηλεκτροκίνησης, καθώς επιχειρεί να συνδέσει τη διεθνή επιστημονική γνώση για την Ανάλυση Κύκλου Ζωής με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της ελληνικής ενεργειακής και μεταφορικής πραγματικότητας. Η συμβολή της δεν περιορίζεται στη σύγκριση τριών τεχνολογιών οχημάτων, αλλά επεκτείνεται στη διαμόρφωση ενός συνεκτικού πλαισίου ερμηνείας για το πώς η ηλεκτροκίνηση μπορεί να αξιολογηθεί περιβαλλοντικά στην Ελλάδα, υπό συνθήκες σταδιακής απανθρακοποίησης της ηλεκτροπαραγωγής, μέσα από τις ακόλουθες βασικές διαστάσεις.

Πρώτον, εφαρμόζει μια συστηματική και διαφανή simplified, literature-based LCA προσέγγιση, ειδικά προσαρμοσμένη στα ελληνικά ενεργειακά δεδομένα και στα εθνικά σενάρια εξέλιξης της ηλεκτροπαραγωγής (ISO, 2006a & ISO, 2006b & ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024).

Η επιλογή αυτή επιτρέπει μία πιο ρεαλιστική αποτίμηση της τεχνολογίας στο πλαίσιο της ελληνικής ενεργειακής μετάβασης, χωρίς να περιορίζεται σε γενικές ή διεθνείς παραδοχές που δεν αντανakλούν πλήρως τις ιδιαιτερότητες της χώρας. Παράλληλα, η διαφάνεια των παραδοχών ενισχύει την ερμηνευτική αξία των αποτελεσμάτων, καθώς καθιστά σαφές από ποια δεδομένα και από ποιους συντελεστές προκύπτουν οι συγκρίσεις.

Δεύτερον, ενσωματώνει δυναμικά ενεργειακά σενάρια για τα έτη 2026, 2030 και 2050, αντί να περιορίζεται σε στατικές συγκρίσεις. Αυτό έχει ιδιαίτερη επιστημονική σημασία, διότι η σχετική βιβλιογραφία δείχνει ότι η αξιολόγηση των BEVs πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη χρονική μεταβολή του ενεργειακού μίγματος και να μην βασίζεται σε μία μόνο χρονική τομή (ICCT, 2021 & Burchart and Przytuła, 2024 & Negri and Bieker, 2025).

Με αυτόν τον τρόπο, η εργασία αναδεικνύει ότι η περιβαλλοντική επίδοση των ηλεκτρικών οχημάτων δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με την εξέλιξη του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής.

Τρίτον, η εργασία τεκμηριώνει με σαφήνεια ότι η περιβαλλοντική υπεροχή των BEVs στην Ελλάδα δεν είναι θεωρητική ούτε περιορίζεται αποκλειστικά σε ένα μελλοντικό πλαίσιο. Αντίθετα, εμφανίζεται ήδη υπό ρεαλιστικές συνθήκες χρήσης και ενισχύεται σταδιακά όσο μειώνεται η ένταση άνθρακα του ηλεκτρικού μίγματος. Το εύρημα αυτό αποκτά πρόσθετη σημασία όταν συνδυάζεται με τη δυναμική της ελληνικής ενεργειακής μετάβασης, καθώς δείχνει ότι η ηλεκτροκίνηση μπορεί να λειτουργήσει ως ουσιαστικό εργαλείο μείωσης των εκπομπών στον τομέα των οδικών μεταφορών, ιδίως εφόσον συνοδευθεί από περαιτέρω ανάπτυξη των ΑΠΕ και περιορισμό της θερμικής ηλεκτροπαραγωγής.

Τέταρτον, η εργασία εισάγει και αξιοποιεί τον δείκτη break-even distance ως εργαλείο ερμηνείας και πολιτικής ανάγνωσης των αποτελεσμάτων της LCA. Ο δείκτης αυτός επιτρέπει την κατανόηση της απόστασης στην οποία το αρχικά υψηλότερο αποτύπωμα παραγωγής ενός BEV αντισταθμίζεται από τις χαμηλότερες εκπομπές κατά τη χρήση. Η συμβολή της εργασίας έγκειται στο ότι δεν αντιμετωπίζει το break-even distance απλώς ως αριθμητικό αποτέλεσμα, αλλά ως δείκτη που αποτυπώνει τη σχέση μεταξύ τεχνολογίας

οχήματος και ενεργειακού συστήματος. Έτσι, αναδεικνύεται ότι η περιβαλλοντική αποτελεσματικότητα των BEVs βελτιώνεται όσο εξελίσσεται το ενεργειακό υπόβαθρο της χώρας.

Πέμπτον, η εργασία συνδέει την ανάλυση κύκλου ζωής με την ελληνική περιβαλλοντική πραγματικότητα των αστικών κέντρων. Η ενσωμάτωση πορισμάτων από μελέτες για τη Θεσσαλονίκη ενισχύει τη σημασία της ανάλυσης, διότι δείχνει ότι η ηλεκτροκίνηση μπορεί να ιδωθεί όχι μόνο ως εργαλείο μείωσης των εκπομπών CO₂e, αλλά και ως στοιχείο ευρύτερης πολιτικής για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα και της αστικής βιωσιμότητας (Liora et al., 2021 & Liora et al., 2025 & Progiou et al., 2023).

Η διάσταση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς μετατοπίζει τη συζήτηση από το στενό επίπεδο της τεχνολογικής σύγκρισης στο ευρύτερο πεδίο της περιβαλλοντικής διαχείρισης των πόλεων.

Έκτον, η εργασία αναδεικνύει τα όρια μιας μονοδιάστατης προσέγγισης της ηλεκτροκίνησης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αντικατάσταση των συμβατικών οχημάτων από BEVs μπορεί να μειώσει σημαντικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των μεταφορών, αλλά το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται από παράγοντες όπως η καθαρότητα της ηλεκτρικής ενέργειας, η διάρκεια ζωής των οχημάτων, η παραγωγή και διαχείριση των μπαταριών, η ανάπτυξη υποδομών φόρτισης και η ένταξη της ηλεκτροκίνησης σε ευρύτερες πολιτικές βιώσιμης κινητικότητας. Με τον τρόπο αυτό, η εργασία αποφεύγει μια απλουστευτική ή απόλυτη θεώρηση της ηλεκτροκίνησης και την αντιμετωπίζει ως μέρος ενός σύνθετου συστήματος περιβαλλοντικής μετάβασης.

Συνολικά, η παρούσα εργασία δεν συμβάλλει μόνο στη σύγκριση τεχνολογιών οχημάτων, αλλά και στη συγκρότηση ενός επιστημονικού πλαισίου για την τεκμηρίωση πολιτικών επιλογών στην Ελλάδα. Η βασική της συμβολή είναι ότι δείχνει πως η ηλεκτροκίνηση μπορεί να προσφέρει ουσιαστικό περιβαλλοντικό όφελος, υπό την προϋπόθεση ότι αξιολογείται σε επίπεδο κύκλου ζωής και συνδέεται με την εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος. Παράλληλα, αναδεικνύει ότι η μετάβαση προς ηλεκτρικά οχήματα δεν πρέπει να εξετάζεται απομονωμένα, αλλά ως τμήμα μιας συνολικής στρατηγικής για χαμηλότερες εκπομπές, καθαρότερη ενέργεια, βιώσιμες μεταφορές και βελτίωση της ποιότητας ζωής στα αστικά κέντρα.

Κατά συνέπεια, η επιστημονική συμβολή της εργασίας εντοπίζεται τόσο στο μεθοδολογικό όσο και στο εφαρμοσμένο επίπεδο. Σε μεθοδολογικό επίπεδο, προσφέρει ένα διαφανές και προσαρμοσμένο στην ελληνική περίπτωση πλαίσιο simplified LCA. Σε εφαρμοσμένο επίπεδο, παρέχει τεκμηριωμένα συμπεράσματα που μπορούν να αξιοποιηθούν για τη χάραξη πολιτικών ηλεκτροκίνησης, ενεργειακής μετάβασης και βιώσιμης αστικής κινητικότητας. Με αυτόν τον τρόπο, η εργασία συμβάλλει στη συζήτηση για τον ρόλο της ηλεκτροκίνησης στην Ελλάδα όχι μόνο ως τεχνολογικής επιλογής, αλλά ως βασικού στοιχείου μιας ευρύτερης περιβαλλοντικής και αναπτυξιακής στρατηγικής.

6.8 Περιορισμοί της μελέτης και αναπάντητα ερωτήματα

Η παρούσα LCA βασίστηκε σε δευτερογενή βιβλιογραφικά δεδομένα, αντιπροσωπευτικές τιμές στόλου και γενικευμένα προφίλ χρήσης. Η επιλογή αυτή ήταν κατάλληλη για τον σκοπό της εργασίας, καθώς επέτρεψε τη συγκριτική αξιολόγηση ICEVs, HEVs και BEVs στο ελληνικό πλαίσιο, με διαφανείς και αναπαραγώγιμες παραδοχές. Ωστόσο, τα ευρήματα πρέπει να ερμηνεύονται κυρίως ως συγκριτικές τάσεις μεταξύ τεχνολογιών και όχι ως απόλυτες τιμές για συγκεκριμένο όχημα, χρήστη ή πραγματικό προφίλ διαδρομής (ISO, 2006a & ISO, 2006b & Hawkins et al., 2013 & Ellingsen et al., 2016 & Burchart and Przytuła, 2024).

Ένας βασικός περιορισμός αφορά τις παραδοχές για την παραγωγή των οχημάτων και, ειδικότερα, για την παραγωγή των μπαταριών. Η διεθνής βιβλιογραφία υπογραμμίζει ότι το αποτύπωμα παραγωγής μπαταριών μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τη χημεία της μπαταρίας, τη χώρα παραγωγής, το ενεργειακό μίγμα της βιομηχανικής διαδικασίας, την ενεργειακή ένταση της παραγωγής και τις τεχνολογικές εξελίξεις. Επομένως, οι τιμές που χρησιμοποιούνται σε μια simplified LCA πρέπει να αντιμετωπίζονται ως αντιπροσωπευτικές εκτιμήσεις και όχι ως απόλυτα σταθερές παράμετροι (Notter et al., 2010 & Ellingsen et al., 2014 & Dunn et al., 2015 & Burchart and Przytuła, 2024).

Αντίστοιχα, το ενεργειακό μίγμα φόρτισης αποτελεί κρίσιμη πηγή αβεβαιότητας. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν σενάρια για τα έτη 2026, 2030 και 2050, ώστε να αποτυπωθεί η δυναμική μεταβολή της ελληνικής ηλεκτροπαραγωγής.

Ωστόσο, οι πραγματικές μελλοντικές εκπομπές ανά kWh θα εξαρτηθούν από την ταχύτητα ανάπτυξης των ΑΠΕ, τη λειτουργία μονάδων φυσικού αερίου, τις ανάγκες ευστάθειας του συστήματος, τις εισαγωγές και εξαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας, την αποθήκευση και τη διαχείριση της ζήτησης. Συνεπώς, τα σενάρια πρέπει να ερμηνεύονται ως εύλογες υποθέσεις εργασίας και όχι ως βέβαιη πρόβλεψη.

Επιπλέον, οι υποθέσεις σχετικά με το τέλος ζωής των οχημάτων και των μπαταριών αποτελούν ακόμη έναν σημαντικό περιορισμό. Η ανακύκλωση, η ανάκτηση κρίσιμων μετάλλων, η δεύτερη χρήση των μπαταριών σε στατικές εφαρμογές και η τεχνολογική εξέλιξη των σχετικών διαδικασιών μπορούν να μεταβάλουν ουσιαστικά το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα των BEVs (Dunn et al., 2012 & European Environment Agency, 2018 & European Environment Agency, 2022).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, οι παράμετροι αυτές ενσωματώθηκαν σε γενικό επίπεδο, χωρίς να αναπτυχθεί αναλυτικό μοντέλο κυκλικής οικονομίας για κάθε πιθανό σενάριο τέλους ζωής.

Σημαντικός περιορισμός αφορά επίσης στις συνθήκες πραγματικής χρήσης. Οι αστικές συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης, οι συχνές στάσεις και εκκινήσεις, οι επιταχύνσεις, η χρήση κλιματισμού ή θέρμανσης, η μορφολογία του οδικού δικτύου και τα τοπικά προφίλ ταχύτητας μπορούν να επηρεάσουν την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές περισσότερο απ' όσο αποτυπώνουν τα τυποποιημένα ή γενικευμένα προφίλ. Αυτό αναδεικνύεται και στις μελέτες για τη Θεσσαλονίκη, όπου η ενσωμάτωση δυναμικών

κυκλοφοριακών προφίλ οδηγεί σε πιο ρεαλιστική αποτύπωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης της οδικής κυκλοφορίας (Liora et al., 2021 & Liora et al., 2025 & Burchart and Przytuła, 2024).

Με βάση τους παραπάνω περιορισμούς, παραμένουν ορισμένα ερευνητικά ερωτήματα που δεν μπορούν να απαντηθούν πλήρως στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

Ενδεικτικά, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση για το:

- πώς θα μεταβάλλονταν τα αποτελέσματα εάν χρησιμοποιούνταν πραγματικά δεδομένα φόρτισης από ελληνικούς χρήστες BEVs,
- πώς διαφοροποιείται το αποτύπωμα όταν λαμβάνεται υπόψη η ωριαία και όχι μόνο η μέση ετήσια ένταση άνθρακα του ηλεκτρικού συστήματος,
- πώς επηρεάζεται το break-even distance από διαφορετικές χημείες μπαταριών και χώρες παραγωγής, καθώς και
- ποια είναι η πραγματική συμβολή της ανακύκλωσης και των second-life εφαρμογών στη μείωση του συνολικού αποτυπώματος κύκλου ζωής.

6.9 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Με βάση τα παραπάνω, η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να κινηθεί προς τέσσερις βασικές κατευθύνσεις:

Πρώτον, θα ήταν χρήσιμη η ενσωμάτωση πραγματικών δεδομένων φόρτισης και χρήσης, διαχωρισμένων ανά τυπολογία μετακίνησης, όπως αστική, περιαστική, υπεραστική και νησιωτική χρήση (BloombergNEF, 2023 & IEA, 2023). Η διαφοροποίηση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία για την Ελλάδα, όπου οι συνθήκες κινητικότητας δεν είναι ενιαίες, αλλά μεταβάλλονται σημαντικά μεταξύ μητροπολιτικών κέντρων, μικρότερων πόλεων, αγροτικών και νησιωτικών περιοχών.

Δεύτερον, η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να διεκδικεί την ανάλυση προς κοινωνικοοικονομικές και θεσμικές διαστάσεις της ηλεκτροκίνησης. Η περιβαλλοντική αξιολόγηση είναι απαραίτητη, αλλά δεν αρκεί από μόνη της για την πλήρη αποτίμηση της μετάβασης. Ζητήματα όπως η κοινωνική αποδοχή, η οικονομική προσβασιμότητα, η γεωγραφική κατανομή των υποδομών φόρτισης, η δυνατότητα συμμετοχής χαμηλότερων εισοδηματικών ομάδων και η θεσμική αποτελεσματικότητα των πολιτικών ενίσχυσης αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για τη δίκαιη και αποτελεσματική διάχυση της ηλεκτροκίνησης (World Bank, 2020 & Transport & Environment, 2022).

Τρίτον, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η συστηματική μελέτη της αγοράς μεταχειρισμένων BEVs στην Ελλάδα. Η συγκεκριμένη αγορά ενδέχεται να παίξει καθοριστικό ρόλο στη μελλοντική διάχυση της τεχνολογίας, καθώς μπορεί να μειώσει το κόστος πρόσβασης για μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού. Παράλληλα, όμως, δημιουργεί νέα ερωτήματα σχετικά με την υπολειπόμενη χωρητικότητα των μπαταριών (την «υγεία» της μπαταρίας), την αξιοπιστία, τη διάρκεια δεύτερης χρήσης, την ανάγκη ελέγχων και πιστοποιήσεων και την τελική περιβαλλοντική αποδοτικότητα των οχημάτων σε παρατεταμένο κύκλο ζωής.

Τέταρτον, απαιτείται περαιτέρω ενσωμάτωση της κυκλικής οικονομίας των μπαταριών στις μελλοντικές LCA. Οι second-life εφαρμογές, η ανακύκλωση, η ανάκτηση λιθίου, νικελίου, κοβαλτίου και άλλων κρίσιμων μετάλλων, καθώς και η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών μπαταριών μπορούν να μεταβάλουν ουσιαστικά το συνολικό αποτύπωμα κύκλου ζωής των BEVs (ICCT, 2021 & IEA, 2023 & Burchart and Przytuła, 2024).

Η βιβλιογραφία δείχνει ότι τα στάδια αυτά μπορούν να περιορίσουν μέρος του αρχικού περιβαλλοντικού φορτίου της παραγωγής, υπό την προϋπόθεση ότι αναπτύσσονται αποτελεσματικές τεχνικές, θεσμικές και οικονομικές υποδομές διαχείρισης (Dunn et al., 2012 & Dunn et al., 2015 & European Environment Agency, 2018 & European Environment Agency, 2022 & Burchart and Przytuła, 2024).

Πέρα από τις τέσσερις αυτές κατευθύνσεις, χρήσιμη θα ήταν και η ανάπτυξη πιο σύνθετων σεναρίων που να συνδυάζουν την ηλεκτροκίνηση με ευρύτερες αλλαγές στα πρότυπα μετακίνησης. Για παράδειγμα, μελλοντικές εργασίες θα μπορούσαν να εξετάσουν όχι μόνο την αντικατάσταση των ICEVs από τα BEVs, αλλά και σενάρια μείωσης της ιδιωτικής αυτοκίνησης, ενίσχυσης δημόσιων συγκοινωνιών, κοινόχρηστης κινητικότητας και

μικροκινητικότητας. Με τον τρόπο αυτό, η ηλεκτροκίνηση θα μπορούσε να αξιολογηθεί όχι απομονωμένα, αλλά ως μέρος ενός συνολικού συστήματος βιώσιμης κινητικότητας.

Συνολικά, οι παραπάνω κατευθύνσεις θα μπορούσαν να ενισχύσουν περαιτέρω την ακρίβεια, τον ρεαλισμό και τη χρησιμότητα των μελλοντικών αναλύσεων. Η παρούσα εργασία παρέχει ένα διαφανές και τεκμηριωμένο πλαίσιο συγκριτικής αποτίμησης, αλλά η εξέλιξη της τεχνολογίας, των ενεργειακών συστημάτων και των πολιτικών μεταφορών καθιστά αναγκαία τη συνεχή επικαιροποίηση των δεδομένων και των παραδοχών. Μελλοντικές έρευνες που θα ενσωματώνουν πιο λεπτομερή δεδομένα χρήσης, φόρτισης, κυκλικής οικονομίας και κοινωνικής διάστασης μπορούν να υποστηρίξουν ακόμη πιο στοχευμένες πολιτικές αποφάσεις για την ελληνική περίπτωση.

6.10 Θεωρητικές και πρακτικές εφαρμογές των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας μπορούν να αξιοποιηθούν τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Σε θεωρητικό επίπεδο, η εργασία συμβάλλει στη συζήτηση για την εφαρμογή simplified, literature-based LCA σε εθνικά πλαίσια όπου δεν είναι πάντα διαθέσιμα πλήρη πρωτογενή δεδομένα ή εξειδικευμένα λογισμικά Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.

Η προσέγγιση που εφαρμόστηκε δείχνει ότι, ακόμη και με βιβλιογραφικά δεδομένα και διαφανείς παραδοχές, είναι δυνατή η παραγωγή χρήσιμων συγκριτικών συμπερασμάτων για την περιβαλλοντική επίδοση διαφορετικών τεχνολογιών οχημάτων, υπό την προϋπόθεση ότι οι περιορισμοί της μεθόδου δηλώνονται με σαφήνεια (ISO, 2006a & ISO, 2006b & Hawkins et al., 2013 & Ellingsen et al., 2016 & Burchart and Przytuła, 2024).

Σε πρακτικό επίπεδο, τα αποτελέσματα μπορούν να υποστηρίξουν τον σχεδιασμό πολιτικών ηλεκτροκίνησης στην Ελλάδα, ιδίως ως προς την ανάγκη σύνδεσης της προώθησης των BEVs με την απανθρακοποίηση του ηλεκτρικού συστήματος παραγωγής. Η μείωση του αποτυπώματος των BEVs, στα σενάρια 2030 και 2050, δείχνει ότι η ενεργειακή πολιτική και η πολιτική μεταφορών δεν πρέπει να σχεδιάζονται ανεξάρτητα, αλλά ως αλληλένδετες παρεμβάσεις.

Συνεπώς, τα ευρήματα της εργασίας μπορούν να αξιοποιηθούν στη χάραξη πολιτικών για την ανάπτυξη ΑΠΕ, την έξυπνη φόρτιση, την αναβάθμιση υποδομών δικτύων και τη χωρικά δίκαιη ανάπτυξη υποδομών φόρτισης (IEA, 2023 & European Commission, 2021 & IPTO/ADMIE, 2023).

Τα αποτελέσματα έχουν επίσης εφαρμογή στον αστικό σχεδιασμό και στη βιώσιμη κινητικότητα. Η ηλεκτροκίνηση μπορεί να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών CO₂e, αλλά και στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα, ιδίως σε μεγάλα αστικά κέντρα όπου η οδική κυκλοφορία αποτελεί σημαντική πηγή ρύπανσης.

Για την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, η αξιοποίηση των ευρημάτων μπορεί να συνδεθεί με πολιτικές ενίσχυσης καθαρών δημόσιων συγκοινωνιών, στόλων ηλεκτρικών οχημάτων της τοπικής αυτοδιοίκησης, υποδομών φόρτισης σε περιοχές υψηλής ζήτησης και περιορισμού της εξάρτησης από το ιδιωτικό/συμβατικό αυτοκίνητο (Liora et al., 2021 & Liora et al., 2025 & Progiou et al., 2023).

Τέλος, η εργασία μπορεί να αξιοποιηθεί ως βάση για πολιτικές κυκλικής οικονομίας που αφορούν τις μπαταρίες των ηλεκτρικών οχημάτων. Δεδομένου ότι η παραγωγή μπαταριών αποτελεί σημαντικό τμήμα του αρχικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος των BEVs, η ανακύκλωση, η ανάκτηση κρίσιμων μετάλλων και οι εφαρμογές second-life μπορούν να βελτιώσουν περαιτέρω τη συνολική περιβαλλοντική επίδοση της ηλεκτροκίνησης. Υπό αυτή την έννοια, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας δεν περιορίζονται στη σύγκριση τεχνολογιών οχημάτων, αλλά μπορούν να υποστηρίξουν και έναν ευρύτερο σχεδιασμό πολιτικών για καθαρή ενέργεια, βιώσιμες μεταφορές και κυκλική διαχείριση υλικών (Dunn et al., 2012 & European Commission, 2023 & Burchart and Przytuła, 2024).

6.11 Τελικό συμπέρασμα

Η συνολική αποτίμηση της παρούσας εργασίας οδηγεί σε ένα σαφές και επιστημονικά τεκμηριωμένο συμπέρασμα: η ηλεκτροκίνηση αναδεικνύεται ως η περιβαλλοντικά ευνοϊκότερη τεχνολογική κατεύθυνση, ως προς τις εκπομπές CO₂e κύκλου ζωής, για τη μετάβαση της Ελλάδας προς ένα σύστημα οδικών μεταφορών χαμηλότερων εκπομπών.

Η διαπίστωση αυτή δεν βασίζεται σε μια αποσπασματική θεώρηση της φάσης χρήσης, αλλά στην αξιολόγηση του πλήρους κύκλου ζωής των εξεταζόμενων τεχνολογιών, δηλαδή από την παραγωγή και τη χρήση έως το τέλος ζωής.

Η υπεροχή αυτή δεν προκύπτει από μια απλοϊκή θεώρηση «μηδενικών ρύπων», αλλά από την ανάλυση του συνολικού περιβαλλοντικού ισοζυγίου. Η παρούσα εργασία έδειξε ότι, παρά το υψηλότερο αρχικό αποτύπωμα παραγωγής, κυρίως λόγω της μπαταρίας τους, τα BEVs εμφανίζουν χαμηλότερες συνολικές σωρευτικές εκπομπές CO₂e σε επίπεδο κύκλου ζωής, υπό τις παραδοχές της παρούσας ανάλυσης. Το πλεονέκτημα αυτό καθίσταται ακόμη ισχυρότερο όσο το ελληνικό ενεργειακό σύστημα απανθρακοποιείται και όσο αυξάνεται η συμμετοχή ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλότερης έντασης άνθρακα.

Το βασικό εύρημα της εργασίας είναι ότι η ηλεκτροκίνηση δεν πρέπει να αξιολογείται στατικά, αλλά δυναμικά. Η περιβαλλοντική επίδοση ενός BEV εξαρτάται άμεσα από το ενεργειακό μίγμα που το τροφοδοτεί, από τη διάρκεια ζωής του, από την ενεργειακή του κατανάλωση, από την παραγωγή και τη διαχείριση της μπαταρίας, καθώς και από το ευρύτερο σύστημα μεταφορών στο οποίο εντάσσεται. Με αυτή την έννοια, η ηλεκτροκίνηση δεν αποτελεί μεμονωμένη τεχνολογική λύση, αλλά μέρος μιας ευρύτερης μετάβασης που συνδέει την ενέργεια, τις μεταφορές, την περιβαλλοντική πολιτική και την αστική βιωσιμότητα.

Η ελληνική πραγματικότητα προσδίδει στην ηλεκτροκίνηση ακόμη μεγαλύτερη στρατηγική αξία. Η πορεία του ενεργειακού μίγματος, η σημασία της αστικής ρύπανσης στα μεγάλα κέντρα, η δυνατότητα έξυπνης ενσωμάτωσης των BEVs στο ηλεκτρικό σύστημα και η προοπτική ανάπτυξης κυκλικής οικονομίας γύρω από τις μπαταρίες δημιουργούν συνθήκες στις οποίες **η ηλεκτροκίνηση μπορεί να λειτουργήσει ως πολλαπλασιαστής περιβαλλοντικού οφέλους.**

Οι σχετικές μελέτες για τη Θεσσαλονίκη καθιστούν σαφές ότι η πολιτική ηλεκτροκίνησης δεν αφορά μόνο τη μείωση CO₂e, αλλά και την ποιότητα του αέρα, την αστική βιωσιμότητα και, τελικά, την ποιότητα ζωής (Liora et al., 2021 & Liora et al., 2025 & Progiou et al., 2023). Υπό αυτή την έννοια, η ηλεκτροκίνηση αποκτά διπλή σημασία: αφενός συμβάλλει στον περιορισμό του ανθρακικού αποτυπώματος των οδικών μεταφορών και αφετέρου μπορεί να υποστηρίξει τη βελτίωση του αστικού περιβάλλοντος, ιδίως όταν συνδυάζεται με καθαρές δημόσιες συγκοινωνίες, περιορισμό της ιδιωτικής κυκλοφορίας και βιώσιμα πρότυπα κινητικότητας.

Ωστόσο, το τελικό συμπέρασμα της εργασίας δεν είναι ότι «τα BEVs αρκούν». Αντιθέτως, η εργασία καταλήγει στο ότι η ηλεκτροκίνηση μπορεί να αποδώσει πλήρως μόνο υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις: υπό όρους ενεργειακής μετάβασης, θεσμικής συνέπειας,

υποδομών φόρτισης, κοινωνικής δικαιοσύνης και κυκλικής διαχείρισης των μπαταριών. Χωρίς αυτές τις προϋποθέσεις, το περιβαλλοντικό δυναμικό της τεχνολογίας μπορεί να περιοριστεί ή να αξιοποιηθεί μόνο μερικώς.

Με άλλα λόγια, η πραγματική επιτυχία της ηλεκτροκίνησης στην Ελλάδα θα εξαρτηθεί από το αν θα αντιμετωπιστεί ως μέρος μιας συνολικής στρατηγικής και όχι ως αποσπασματική αντικατάσταση τεχνολογίας οχημάτων. Η απλή μετάβαση από τα ICEVs στα BEVs δεν αρκεί, εάν δεν συνοδεύεται από καθαρότερη ηλεκτροπαραγωγή, χωρικά δίκαιη ανάπτυξη υποδομών φόρτισης, πολιτικές περιορισμού της αστικής συμφόρησης, ενίσχυση των δημόσιων μεταφορών και αποτελεσματική διαχείριση των υλικών και των μπαταριών στο τέλος ζωής τους.

Η μετάβαση έχει ήδη ξεκινήσει. Το ζητούμενο πλέον δεν είναι αν η ηλεκτροκίνηση έχει περιβαλλοντικό νόημα για την Ελλάδα, καθώς η παρούσα εργασία δείχνει, με σαφήνεια, ότι έχει. Το ουσιαστικό ζητούμενο είναι η επιτάχυνση, η ορθολογική οργάνωση και η μακροπρόθεσμη πολιτική δέσμευση που θα επιτρέψουν στην τεχνολογία αυτή να αποδώσει το πλήρες περιβαλλοντικό και κοινωνικό της δυναμικό.

Συνολικά, η ηλεκτροκίνηση μπορεί να αποτελέσει έναν από τους βασικούς άξονες της μετάβασης της Ελλάδας προς ένα πιο καθαρό, αποδοτικό και βιώσιμο σύστημα μεταφορών. Η συμβολή της, όμως, θα είναι ουσιαστική μόνο εφόσον ενταχθεί σε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο ενεργειακής απανθρακοποίησης, βιώσιμης κινητικότητας, κυκλικής οικονομίας και κοινωνικά δίκαιης περιβαλλοντικής πολιτικής. Αυτό αποτελεί και το κεντρικό συμπέρασμα της παρούσας εργασίας: η ηλεκτροκίνηση έχει σαφές περιβαλλοντικό πλεονέκτημα, αλλά η πλήρης αξιοποίησή του προϋποθέτει συντονισμένη, μακροπρόθεσμη και συστημική προσέγγιση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

BloombergNEF (2023). *EV Charging Infrastructure Outlook*. BNEF.

Breetz, H., Salon, D. & Williams, J. (2018). *Electric Vehicle Policy in the U.S.: A review of the literature*. *Transport Policy*, 76, 93–112.

Brousek, J., Petr, T. and Brabec, P. (2026). *Comparative analysis of CO₂ emissions from conventional internal combustion engine vehicles, battery electric vehicles and fuel cell electric vehicles in selected Central European countries*, *Journal of Cleaner Production*, 544, 147706.

Burchart, D. and Przytula, K. (2024) *Carbon Footprint of Electric Vehicles—Review of Methodologies and Determinants*, *Energies*, 17(22), 5667.

Dunn, J.B., Gaines, L., Kelly, J.C., James, C. & Gallagher, K.G. (2015). *The significance of battery manufacturing*. *Journal of Power Sources*, 282, 347–355.

Dunn, J.B., Gaines, L., Sullivan, J. and Wang, M.Q. (2012) ‘Impact of recycling on cradle-to-gate energy consumption and greenhouse gas emissions of automotive lithium-ion batteries’, *Environmental Science & Technology*, 46(22), pp. 12704–12710.

Ekvall, T. & Weidema, B.P. (2004). *System boundaries and input data in consequential life cycle inventory analysis*. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 9(3), 161–171.

Ellingsen, L.A.W., Majeau-Bettez, G., Singh, B., Srivastava, A.K., Valøen, L.O. and Strømman, A.H. (2014). *Life cycle assessment of a lithium-ion battery vehicle pack*, *Journal of Industrial Ecology*, 18(1), pp. 113–124.

Ellingsen, L.A-W., Singh, B. & Strømman, A.H. (2016). *The size and range effect: Life cycle greenhouse gas emissions of electric vehicles*. *Environmental Research Letters*, 11(5), 054010.

European Commission (2020). *Sustainable and Smart Mobility Strategy*. Brussels: European Commission.

European Commission (2021). *Fit for 55: delivering the EU’s 2030 Climate Target on the way to climate neutrality*. COM (2021) 550 final. Brussels: European Commission.

European Commission (2023). *Country Report – Greece. Institutional Paper 232*. Brussels: European Commission.

European Commission (2024) *National Energy and Climate Plans*. Brussels: European Commission.

European Commission (2025) *Commission Assessment of the Final Updated National Energy and Climate Plan of Greece*. Brussels: European Commission.

European Environment Agency (EEA, 2016). *Electric vehicles and the energy sector – impacts on Europe’s future emissions*. Copenhagen: European Environment Agency.

European Environment Agency (EEA, 2018). *Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives – TERM 2018*. EEA Report No 13/2018. Copenhagen: European Environment Agency.

European Environment Agency (EEA, 2022). *Resource nexus and the European Green Deal*. Copenhagen: European Environment Agency.

European Environment Agency (EEA, 2023) *Greenhouse gas emissions from transport in Europe*. Copenhagen: European Environment Agency.

European Environment Agency (EEA, 2024a). “*Electric vehicles*”, *In-depth topics*. Copenhagen: European Environment Agency.

European Environment Agency (EEA, 2024b). “*Road transport*”, *In-depth topics*. Copenhagen: European Environment Agency.

European Union (2021) *Regulation (EU) 2021/1119 establishing the framework for achieving climate neutrality (European Climate Law)*. Official Journal of the European Union.

Eurostat (2023). *Climate change – driving forces*. Luxembourg: Eurostat.

Eurostat (2024). *Greenhouse gas emission statistics – air emissions accounts*. Luxembourg: Eurostat.

Eurostat (2026). *2024: nearly 50% of EU electricity came from renewables*, Eurostat News, 14 January.

Hawkins, T.R., Singh, B., Majeau-Bettez, G. & Strømman, A.H. (2013). *Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles*. Journal of Industrial Ecology, 17(1), 53–64.

Hellenic Ministry of Environment and Energy (2019). *National Energy and Climate Plan (NECP)*. Athens: Greek Government.

Hellenic Ministry of Environment and Energy (2020). *Long-term Strategy for 2050*. Athens: Hellenic Ministry of Environment and Energy.

Hellenic Ministry of Environment and Energy (2024) *Updated National Energy and Climate Plan*. Athens: Hellenic Republic.

Hellenic Statistical Authority (2022). *Transport Indicators in Greece 2022*. Athens: ELSTAT.

International Council on Clean Transportation (ICCT, 2021). *A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars.* Berlin: International Council on Clean Transportation.

IEA (2022). *Global EV Outlook 2022.* Paris: International Energy Agency.

IEA (2023). *Global EV Outlook 2023: Catching up with climate ambitions.* Paris: International Energy Agency.

International Energy Agency (IEA) (2023). *Greece 2023: Energy Policy Review.* Paris: IEA.

IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis.* Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPTO/ADMIE (2023a). *Greek Electricity Transmission System Annual Data Report.* Athens: Independent Power Transmission Operator.

IPTO/ADMIE (2023b). *Ten-Year Network Development Plan of the Hellenic Electricity Transmission System 2024–2033.* Athens: Independent Power Transmission Operator.

IPTO/ADMIE (2024). *2023, a record year for clean energy in Greece.* Athens: Independent Power Transmission Operator.

ISO (2006a). *ISO 14040: Environmental Management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework.* Geneva: International Organization for Standardization.

ISO (2006b). *ISO 14044: Environmental Management — Life Cycle Assessment — Requirements and Guidelines.* Geneva: International Organization for Standardization.

Liora, N., Kontos, S., Tsiaousidis, D., Salanova Grau, J.M., Siomos, A. and Melas, D. (2025). *Spatiotemporal variability of road transport emissions based on vehicle speed profiles—impacts on urban air quality: A case study for Thessaloniki, Greece, Atmosphere, 16(12), 1337.*

Liora, N., Poupkou, A., Kontos, S., Meleti, C., Chrysostomou, K., Aifadopoulou, G., Zountsa, S., Kalogirou, C., Chacartegui, R., Liguori, F., Bressan, M., Almeida, S.M. and Melas, D. (2021). *‘Estimating Road Transport Pollutant Emissions Under Traffic-Congested Conditions with an Integrated Modelling Tool—Emissions Reduction Scenarios Analysis’*, Emission Control Science and Technology.

Negri, M. and Bieker, G. (2025). *Life-cycle greenhouse gas emissions from passenger cars in the European Union: A 2025 update and key factors to consider.* Washington, DC: International Council on Clean Transportation (ICCT).

Nordelöf, A., Messagie, M., Tillman, A.M., Söderman, M.L. and Van Mierlo, J. (2014). *Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can*

we learn from life cycle assessment? International Journal of Life Cycle Assessment, 19, pp. 1866–1890.

Notter, D.A., Gauch, M., Widmer, R., Wäger, P., Stamp, A., Zah, R. and Althaus, H.J. (2010). *Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles.* Environmental Science & Technology, 44(17), pp. 6550–6556.

Progiou, A., Liora, N., Sebos, I., Chatzimichail, C. and Melas, D. (2023). *Measures and Policies for Reducing PM Exceedances through the Use of Air Quality Modeling: The Case of Thessaloniki, Greece*, Sustainability, 15, 930.

Rey, J. & Cremades, L. V. (2023). *Evaluation of the power generation impact for the mobility of battery electric vehicles.* Energy, 263, 125673.

Shafiei, E., Dauphin, R. & Yugo, M. (2022). *Optimal electrification level of passenger cars in Europe in a battery-constrained future.* Transportation Research Part D: Transport and Environment, 102, 103135.

Transport & Environment (2022). *How to Ensure a Fair and Inclusive Transition to Electric Mobility.* Brussels: T&E.

The Green Tank. (2025) *Trends in electricity production – December 2024.* Athens: The Green Tank.

World Bank (2020). *Electric Mobility and Social Equity.* Washington, D.C.

Wörner, R., Morozov, I., Cao, D. & Schneider, D. (2021). *Analysis and prediction of electromobility and energy supply by the example of Stuttgart.* Energies, 14(9), 2552.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Υπολογιστικό μοντέλο προσδιορισμού της απόστασης περιβαλλοντικής εξισορρόπησης.

Για τον υπολογισμό της απόστασης περιβαλλοντικής εξισορρόπησης (break-even distance) αναπτύχθηκε ένα υπολογιστικό μοντέλο σε περιβάλλον του Microsoft Excel. Το μοντέλο βασίζεται στη γραμμική συσχέτιση σωρευτικών εκπομπών και διανυθείσας απόστασης:

$$E(d) = E_0 + e \cdot d$$

όπου:

- E_0 : εκπομπές παραγωγής οχήματος (kgCO₂e)
- e : εκπομπές χρήσης ανά km (kgCO₂e/km)

Για την αριθμητική υλοποίηση του υπολογιστικού μοντέλου σε περιβάλλον Microsoft Excel χρησιμοποιήθηκε σύνολο παραμέτρων εισόδου που αντιστοιχούν σε αντιπροσωπευτικές τιμές κύκλου ζωής επιβατηγών οχημάτων μεσαίας κατηγορίας.

Οι παράμετροι αυτές χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τη λειτουργία και την επαλήθευση του μοντέλου υπολογισμού των σωρευτικών εκπομπών και της απόστασης περιβαλλοντικής εξισορρόπησης (break-even distance).

Πίνακας Α.1. Παράμετροι εισόδου υπολογιστικού μοντέλου σωρευτικών εκπομπών κύκλου ζωής.

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή (ενδεικτική για λειτουργία μοντέλου)
E0_ICEV	Εκπομπές παραγωγής ICEV	7.000 kgCO ₂ e
E0_BEV	Εκπομπές παραγωγής BEV	14.000 kgCO ₂ e
e_ICEV	Εκπομπές χρήσης ICEV	0,180 kgCO ₂ e/km
e_BEV_2026	Εκπομπές χρήσης BEV	0,095 kgCO ₂ e/km
e_BEV_2030	Εκπομπές χρήσης BEV	0,060 kgCO ₂ e/km
e_BEV_2050	Εκπομπές χρήσης BEV	0,020 kgCO ₂ e/km

Οι τιμές του Πίνακα Α.1 χρησιμοποιήθηκαν για τη λειτουργική επαλήθευση (functional validation) του μοντέλου και δεν αποτελούν αποτελέσματα της παρούσας έρευνας/εργασίας. Τα τελικά αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής προκύπτουν από τις παραμέτρους που περιγράφονται στο 3ο Κεφάλαιο και παρουσιάζονται στο 4ο Κεφάλαιο.

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.