



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΕΥΚΑΜΠΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ



ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ-ΛΕΩΝΙΔΑΣ

Επιβλέπουσα: Χριστίνα Πλατή, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2023

Φωτογραφία εξωφύλλου:

«BMW i4 M50 and Ionity Charger», BMW Group (www.press.bmwgroup.com)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την παρούσα διπλωματική εργασία κλείνει ένας κύκλος σπουδών που μου έδωσε πολλές γνώσεις και εμπειρίες. Ήταν ένα ταξίδι απαιτητικό και δύσκολο αλλά συγχρόνως όμορφο και ικανοποιητικό.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κα. Χριστίνα Πλατή, Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για την εμπιστοσύνη της και τη συνεχή καθοδήγησή της σε όλα τα στάδια της εργασίας, αλλά και για όλες τις γνώσεις που μου μετέδωσε με τη διδασκαλία της κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Κωνσταντίνο Γκυρτή για τη βοήθεια που μου προσέφερε για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Φυσικά, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω και σε όλα τα μέλη του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής για όσα με δίδαξαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στην κατεύθυνση του Συγκοινωνιολόγου Μηχανικού και για τις συμβουλές ζωής που μου παρείχαν.

Δεν θα μπορούσα να ξεχάσω τους φίλους μου, Ανδρέα και Δημήτρη, που πάντα είναι πρόθυμοι να συζητάμε τους προβληματισμούς μου.

Κλείνοντας, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου. Στον πατέρα μου, Στέλιο, για την υποστήριξή του όλα τα χρόνια των σπουδών μου, στην αδερφή μου, Βάγια, για την ενθάρρυνση και τη συμπαράστασή της και ιδιαίτερα στη μητέρα μου, Δέσποινα, που σε όλες μου τις προσπάθειες είναι πάντα ακούραστα δίπλα μου και με στηρίζει. Το δίπλωμα του Πολιτικού Μηχανικού αφιερώνεται σε εκείνη.

Αθήνα, Νοέμβριος 2023

Λεωνίδα Σταυρουλάκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια ο κλάδος της αυτοκίνησης βρίσκεται σε μια μεταβατική περίοδο. Η αύξηση των τιμών των ορυκτών καυσίμων λόγω της μείωσης των αποθεμάτων τους όπως, επίσης, και οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί για μείωση των εκπομπών ρύπων έχουν ωθήσει τις αυτοκινητοβιομηχανίες στην κατασκευή ηλεκτροκίνητων οχημάτων. Τα ηλεκτροκίνητα οχήματα βρίσκονται ήδη σε κυκλοφορία και τα ποσοστά των πωλήσεών τους αυξάνονται εκθετικά. Η μελλοντική επιρροή τους, λοιπόν, τόσο στην ηλεκτρική όσο και στην οδική υποδομή, έχει γίνει αντικείμενο μελέτης και ερευνών.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία συγκεντρώνονται και παρουσιάζονται οι πρώτες ενδείξεις των μελετών της επίδρασης των ηλεκτρικών οχημάτων στα οδοστρώματα. Στο επίκεντρο των ερευνών βρίσκεται το αυξημένο βάρος και η ροπή στρέψης των οχημάτων αυτών και οι επιπτώσεις τους στη δομική επάρκεια και στην επιφανειακή κατάσταση των οδοστρωμάτων αντίστοιχα. Συμπληρωματικά, αναλύεται και η επιρροή των αυτόνομων ηλεκτρικών οχημάτων, εξαιτίας της σταθερής τροχιάς κίνησής τους. Επιπλέον, εξετάζεται η ενσωμάτωση συστημάτων επαγωγικής φόρτισης στα οδοστρώματα και ο αντίκτυπός της στο χρόνο ζωής και στις διαδικασίες συντήρησής τους. Αναφορά γίνεται και στην ενδεχόμενη ανάγκη νέου ακουστικού σχεδιασμού των οδοστρωμάτων, λόγω αλλαγών στο φάσμα των ακουστικών συχνοτήτων και στα εκπεμπόμενα επίπεδα του θορύβου. Τέλος, σχολιάζεται και η επίδραση των χαρακτηριστικών των οδοστρωμάτων στην κατανάλωση ενέργειας και στο κόστος συντήρησης των ηλεκτρικών οχημάτων.

Ολοκληρώνοντας τη μελέτη, πραγματοποιείται, με δεδομένη κυκλοφορία, ανάλυση εντατικής κατάστασης τριών σεναρίων σε τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος, για μεταβαλλόμενα μέτρα δυσκαμψίας και πάχη των ασφαλικών στρώσεων, προκειμένου να διερευνηθεί και να ποσοτικοποιηθεί η επιρροή του εξηλεκτρισμού του στόλου των επιβατικών οχημάτων στα οδοστρώματα. Τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα περιλαμβάνονται αναλυτικά στο τεύχος της εργασίας.

Λέξεις κλειδιά: ηλεκτρικά οχήματα, οδοστρώματα, βάρος, ροπή στρέψης, συστήματα επαγωγικής φόρτισης, θόρυβος, συχνότητα, ακουστικός σχεδιασμός, αυτόνομα οχήματα, τροχιά κίνησης, κατανάλωση ενέργειας, κόστος συντήρησης, ανάλυση εντατικής κατάστασης, δομική επάρκεια

ABSTRACT

Lately, the automotive industry finds itself in a transition mode. The rising prices of fossil fuels due to the reduction of their reserves as well as contemporary environmental regulations for emission reductions are forcing auto industries to build electric vehicles. Electric vehicles are already on the market and their sale rates are increasing exponentially. This is why their future influence on both electricity and road infrastructure has been the subject of further study and research.

In this thesis, the first findings from studies on the effect of electric vehicles on pavements are gathered and presented. Research mainly focuses on the increased weight and torque of such vehicles as well as their impact on structural adequacy and the surface condition of pavements respectively. Moreover, the influence of autonomous electric vehicles is analyzed, owing to their fixed vehicle trajectory. In addition, the integration of inductive charging systems in pavements along with its impact on their life time and maintenance procedures are examined. The possible need for a new acoustic design of pavements, due to changes in the spectrum of acoustic frequencies and the emitted noise levels is also under consideration. Finally, reference is made on the impact of the characteristics of pavements on energy consumption and maintenance costs of electric vehicles.

To conclude the study, a stress–strain analysis of three scenarios on a standard cross-section of flexible pavement is carried out for different measures of stiffness and thickness of asphalt layers, so that the influence of the electrification of passenger vehicle fleets on pavement can further be investigated and quantified. The results and conclusions are properly included in detail in the issue of this paper.

Key words: electric vehicles, pavements, weight, torque, inductive charging systems, noise, frequency, acoustic design, autonomous vehicles, trajectory, energy consumption, maintenance costs, stress-strain analysis, structural adequacy

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	Αντικείμενο.....	1
1.2	Στόχος διπλωματικής	2
1.3	Δομή εργασίας	3
2.	ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ.....	4
2.1	Ιστορική αναδρομή	4
2.2	Τύποι ηλεκτρικών οχημάτων - Περιγραφή βασικών χαρακτηριστικών	7
2.3	Βασικά μέρη αμιγώς ηλεκτρικού οχήματος.....	9
2.4	Ευρωπαϊκές πολιτικές	15
2.4.1	Ευρωπαϊκά πρότυπα εκπομπών καυσαερίων	16
2.4.2	Λευκή Βίβλος των μεταφορών.....	17
2.4.3	Ευρωπαϊκή στρατηγική για την κινητικότητα χαμηλών εκπομπών.....	17
2.4.4	Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία	17
2.4.5	Στρατηγική για βιώσιμη και έξυπνη κινητικότητα – Οι ευρωπαϊκές μεταφορές σε τροχιά μέλλοντος.....	18
2.4.6	Το πακέτο «Fit for 55».....	19
2.5	Νομοθεσία και κίνητρα για ηλεκτροκίνηση στην Ελλάδα	21
2.6	Στατιστικά στοιχεία	24
2.6.1	Στοιχεία αύξησης κυκλοφορίας ηλεκτρικών οχημάτων	24
2.6.2	Στοιχεία αύξησης διαθέσιμων μοντέλων ηλεκτρικών οχημάτων.....	39
2.6.3	Στοιχεία τάσεων για τα ηλεκτρικά βαρέα οχήματα.....	43
2.6.4	Στοιχεία ανάπτυξης των υποδομών φόρτισης.....	46
3.	ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ.....	49
3.1	Γενικά	49
3.2	Διαφορές χαρακτηριστικών ηλεκτρικών και θερμικών οχημάτων.....	50
3.2.1	Βάρος.....	50
3.2.2	Ροπή στρέψης ηλεκτροκινητήρα	58
3.3	Ενσωμάτωση επαγωγικών συστημάτων φόρτισης στα οδοστρώματα.....	61
3.4	Ακουστικός σχεδιασμός οδοστρωμάτων	70
3.5	Τεχνολογία αυτόνομων ηλεκτρικών οχημάτων.....	75
3.6	Χαρακτηριστικά οδοστρωμάτων και ηλεκτρικά οχήματα	78
3.6.1	Κατανάλωση ενέργειας.....	79
3.6.1.1	Αντίσταση κύλισης οδοστρώματος.....	79

3.6.1.2	Ομαλότητα Οδοστρώματος	80
3.6.1.3	Γεωμετρική κλίση οδοστρώματος.....	80
3.6.2	Κόστος συντήρησης.....	80
4.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	82
4.1	Γενικά	82
4.2	Λογισμικό 3D-Move Analysis	82
4.3	Διατομή οδοστρώματος.....	83
4.4	Ανάλυση κυκλοφορίας.....	84
4.4.1	Πρωτογενή δεδομένα κυκλοφορίας.....	84
4.4.2	Συντελεστές ισοδυναμίας	85
4.4.2.1	Φορτίο σχεδιασμού	85
4.4.2.2	Κανόνας της 4 ^{ης} Δύναμης	86
4.4.2.3	Συντελεστές ισοδυναμίας βαρέων οχημάτων	87
4.4.2.4	Συντελεστές ισοδυναμίας επιβατικών οχημάτων.....	89
4.4.3	Ισοδύναμοι Τυπικοί Άξονες - Σενάρια κυκλοφορίας	91
4.5	Κρίσιμες θέσεις αστοχίας εύκαμπτου οδοστρώματος	93
4.6	Εξεταζόμενες φθορές και αστοχίες.....	94
5.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	99
5.1	Οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις.....	99
5.2	Κατακόρυφες παραμορφώσεις.....	101
5.3	Φθορές και αστοχίες.....	103
5.3.1	Γενικά	103
5.3.2	Ρηγμάτωση ασφαλτικής στρώσης από πάνω προς τα κάτω (AC top-down cracking).....	103
5.3.3	Ρηγμάτωση ασφαλτικής στρώσης από κάτω προς τα πάνω (AC bottom-up cracking).....	103
5.3.4	Αυλάκωση ασφαλτικής στρώσης (AC rutting)	107
5.3.5	Παραμένουσα παραμόρφωση στρώσης βάσης (Base rutting).....	111
5.3.6	Παραμένουσα παραμόρφωση στρώσης έδρασης (Subgrade rutting)	113
6.	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ.....	118
6.1	Γενικά	118
6.2	Σύγκριση σεναρίων 1 και 2	118
6.3	Σύγκριση σεναρίων 1 και 3	121
6.4	Στατιστική και πρακτική σημαντικότητα.....	124

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	130
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	135

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Το πρώτο πλήρως λειτουργικό ηλεκτρικό όχημα του Thomas Parker (1895)	5
Εικόνα 2.2: Το Tesla Model S στην πρώτη παρουσίαν του στην έκθεση της Φρανκφούρτης (2009)	7
Εικόνα 2.3: Ενδεικτική σύγκριση τύπων μπαταριών ως προς την πυκνότητα ισχύος και την ενεργειακή πυκνότητα	10
Εικόνα 2.4: Πτώση τιμής ανά κιλοβατώρα των μπαταριών λιθίου στο χρόνο	11
Εικόνα 2.5: Εξέλιξη αποθηκεύσιμης ενέργειας μπαταριών για σταθερό όγκο και βάρος.....	12
Εικόνα 2.6: Εξέλιξη μέσης αυτονομίας αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων (BEVs)	14
Εικόνα 2.7: Βασικά εξαρτήματα ηλεκτρικού αυτοκινήτου (BEV)	15
Εικόνα 2.8: Διαφορές NEDC και WLTP	16
Εικόνα 2.9: Αριθμός BEVs και PHEVs που κυκλοφορούν στους δρόμους.....	25
Εικόνα 2.10: Αριθμός BEVs που κυκλοφορούν στους δρόμους	26
Εικόνα 2.11: Αριθμός PHEVs που κυκλοφορούν στους δρόμους.....	26
Εικόνα 2.12: Παγκόσμιες πωλήσεις BEV και PHEV ανά έτος.....	27
Εικόνα 2.13: Ποσοστό πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων παγκοσμίως επί του συνόλου των πωλήσεων ανά έτος	28
Εικόνα 2.14: Πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων (BEV και PHEV) στην Κίνα ανά έτος.....	29
Εικόνα 2.15: Ποσοστό πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων στην Κίνα επί του συνόλου των πωλήσεων ανά έτος	29
Εικόνα 2.16: Πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων (BEV και PHEV) στην Ευρώπη ανά έτος.....	30
Εικόνα 2.17: Ποσοστό πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων στην Ευρώπη επί του συνόλου των πωλήσεων ανά έτος	30
Εικόνα 2.18: Πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων (BEV και PHEV) στις ΗΠΑ ανά έτος.....	32
Εικόνα 2.19: Ποσοστό πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων στις ΗΠΑ επί του συνόλου των πωλήσεων ανά έτος	32
Εικόνα 2.20: Αριθμός πωλήσεων PHEVs και BEVs και ποσοστά επί των συνολικών πωλήσεων	33
Εικόνα 2.21: Αριθμός πωλήσεων BEVs	34
Εικόνα 2.22: Αριθμός πωλήσεων PHEVs	34
Εικόνα 2.23: Πιθανός μελλοντικός αριθμός BEVs και PHEVs σε κυκλοφορία παγκοσμίως με βάση το STEPS	35
Εικόνα 2.24: Πιθανό μελλοντικό ποσοστό EVs σε κυκλοφορία παγκοσμίως επί του συνόλου των οχημάτων με βάση το STEPS.....	36
Εικόνα 2.25: Πιθανές μελλοντικές πωλήσεις BEVs & PHEVs παγκοσμίως με βάση το STEPS	36
Εικόνα 2.26: Πιθανό μελλοντικό μερίδιο πωλήσεων EVs παγκοσμίως με βάση το STEPS	37
Εικόνα 2.27: Πιθανός μελλοντικός αριθμός BEVs και PHEVs σε κυκλοφορία παγκοσμίως με βάση το APS.....	37
Εικόνα 2.28: Πιθανό μελλοντικό ποσοστό EVs σε κυκλοφορία παγκοσμίως επί του συνόλου των οχημάτων με βάση το APS	38
Εικόνα 2.29: Πιθανές μελλοντικές πωλήσεις BEVs & PHEVs παγκοσμίως με βάση το APS ...	38
Εικόνα 2.30: Πιθανό μελλοντικό μερίδιο πωλήσεων EVs παγκοσμίως με βάση το APS.....	39

Εικόνα 2.31: Αριθμός διαθέσιμων μοντέλων ηλεκτρικών οχημάτων και μερίδιο πωλήσεων ανά χώρα για τα έτη 2016 και 2021.....	41
Εικόνα 2.32: Διαθέσιμα μοντέλα ανά κατηγορία και ανά χώρα τα έτη 2018 και 2022	42
Εικόνα 2.33: Μερίδιο πωλήσεων οχημάτων ανά κατηγορία και ανά κινητήρα	42
Εικόνα 2.34: Αριθμός ηλεκτρικών λεωφορείων σε κυκλοφορία και ποσοστό πωλήσεων επί του συνόλου 2015-2022.....	44
Εικόνα 2.35: Αριθμός ηλεκτρικών φορτηγών σε κυκλοφορία και ποσοστό πωλήσεων επί του συνόλου 2015-2022	44
Εικόνα 2.36: Αριθμός δημοσίων σημείων φόρτισης παγκοσμίως και μελλοντική εκτίμηση (STEPS).....	47
Εικόνα 2.37: Αριθμός δημοσίων σημείων φόρτισης στην Ευρώπη και μελλοντική εκτίμηση (STEPS).....	47
Εικόνα 2.38: Αριθμός δημοσίων σημείων φόρτισης στις ΗΠΑ και μελλοντική εκτίμηση (STEPS).....	48
Εικόνα 2.39: Αριθμός δημοσίων σημείων φόρτισης στην Κίνα και μελλοντική εκτίμηση (STEPS).....	48
Εικόνα 3.1: Σύγκριση σε αριθμό μηχανικών μερών.....	50
Εικόνα 3.2: Βάρη μοντέλων οχημάτων αναλόγως του τύπου κίνησης	51
Εικόνα 3.3: Τυπικές καμπύλες ροπής-ισχύος ηλεκτροκινητήρα	59
Εικόνα 3.4: Τυπικές καμπύλες ροπής-ισχύος θερμικού κινητήρα.....	59
Εικόνα 3.5: Μετάδοση ενέργειας στο όχημα με ηλεκτροφόρες ράγες (a) και παντογράφους (b)	62
Εικόνα 3.6: Διάταξη ασύρματης επαγωγικής φόρτισης οχήματος (1)	62
Εικόνα 3.7: Διάταξη ασύρματης επαγωγικής φόρτισης οχήματος (2)	63
Εικόνα 3.8: Τεχνική μικροορύγματος για την εγκατάσταση πηνίων στο οδόστρωμα	63
Εικόνα 3.9: Γεωμετρία εργαστηριακού δοκιμίου	65
Εικόνα 3.10: Διατομή ελέγχου με την μέθοδο FEM.....	66
Εικόνα 3.11: Προτεινόμενη λύση για την ενσωμάτωση πηνίων επαγωγικής φόρτισης στα οδοστρώματα.....	67
Εικόνα 3.12: Τομή του τμήματος που περιέχει το πρωτεύον πηνίο φόρτισης (Διαστάσεις:110x70x4.5 cm).....	67
Εικόνα 3.13: Γράφημα μείωσης θορύβου ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων σε σχέση με τα συμβατικά.....	71
Εικόνα 3.14: Τοποθέτηση θορύβων στο ηχητικό φάσμα για οδόστρωμα χαμηλού θορύβου	73
Εικόνα 3.15: Γράφημα στάθμησης-A ήχου για το εύρος συχνοτήτων 1-100000 Hz	74
Εικόνα 3.16: Επίδραση της μηδενικής πλευρικής μετατόπισης των τροχών των αυτόνομων βαρέων οχημάτων στη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος.....	76
Εικόνα 3.17: Θέση εντός λωρίδας (a) και κατανομή περιπλάνησης τροχού (b) μη αυτόνομων οχημάτων	77
Εικόνα 4.1: Διατομή μελέτης εύκαμπτου οδοστρώματος.....	84
Εικόνα 4.2: Διαγραμματική παρουσίαση Ισοδύναμου Τυπικού Άξονα κατά AASHTO	86
Εικόνα 4.3: Σχέση ενεργειακής χωρητικότητας και βάρους των μπαταριών	90
Εικόνα 4.4: Κρίσιμες θέσεις εύκαμπτου οδοστρώματος.....	93
Εικόνα 4.5: Κρίσιμα σημεία ανάλυσης	94

Εικόνα 4.6: Top-Down Cracking	95
Εικόνα 4.7: Αλιγατορικές ρωγμές.....	95
Εικόνα 4.8: Τροχοαυλάκωση ασφαλτικών στρώσεων.....	96
Εικόνα 4.9: Επιφανειακή φθορά λόγω παραμένουσας παραμόρφωσης στρώσης έδρασης	97
Εικόνα 5.1: Οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις σε σχέση με το πάχος και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης.....	99
Εικόνα 5.2: Κατακόρυφες παραμορφώσεις σε σχέση με το πάχος και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης	101
Εικόνα 5.3: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ποσοστών ρηγμάτωσης ασφαλτικής στρώσης	107
Εικόνα 5.4: Συγκεντρωτικό διάγραμμα χιλιοστών αυλάκωσης ασφαλτικής στρώσης.....	111
Εικόνα 5.5: Συγκεντρωτικό διάγραμμα χιλιοστών παραμένουσας παραμόρφωσης στρώσης βάσης.....	113
Εικόνα 5.6: Συγκεντρωτικό διάγραμμα χιλιοστών παραμένουσας παραμόρφωσης στρώσης έδρασης.....	117

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Ποιοτικά χαρακτηριστικά των μπαταριών ανάλογα με τον τύπο τους.....	11
Πίνακας 2.2: Πολιτικές της Ε.Ε. που συντελούν στην ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης άμεσα ή έμμεσα.....	20
Πίνακας 2.3: Ποσοστό ηλεκτρικών επί του συνόλου των πωλήσεων οχημάτων για συγκεκριμένες χώρες της Ευρώπης (2022).....	31
Πίνακας 2.4: Πλάνα κατασκευαστών οχημάτων σχετικά με την ηλεκτροκίνηση.....	40
Πίνακας 2.5 Εκτιμήσεις σεναρίων STEPS και APS για τα αμιγώς ηλεκτρικά βαρέα οχήματα και λεωφορεία παγκοσμίως.....	45
Πίνακας 3.1: Ενεργειακά στοιχεία βενζίνης και πετρελαίου κίνησης	51
Πίνακας 3.2: Βάρη εξαρτημάτων βαρέων οχημάτων diesel	53
Πίνακας 3.3: Εκτίμηση μελλοντικής αυτονομίας και ενεργειακής χωρητικότητας μπαταριών βαρέων αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων.....	54
Πίνακας 3.4: Εκτίμηση βάρους εξαρτημάτων βαρέων αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων	54
Πίνακας 3.5: Χαρακτηριστικά βαρέων οχημάτων με κυψέλες υδρογόνου.....	55
Πίνακας 3.6: Εκτίμηση βάρους εξαρτημάτων βαρέων οχημάτων με κυψέλες υδρογόνου (FCEV)	55
Πίνακας 3.7: Εκτίμηση διαφορών βάρους βαρέων οχημάτων φυσικού αερίου (NGV) σε σχέση με τα diesel	56
Πίνακας 3.8: Αλλαγές κατανομής βάρους στα βαρέα οχήματα νέας τεχνολογίας σε σχέση με τα diesel του 2020	56
Πίνακας 3.9: Εκτίμηση βαρέων οχημάτων σε κυκλοφορία ανά τύπο, έτος και σενάριο.....	57
Πίνακας 3.10: Επίπεδα παραγόμενου θορύβου ηλεκτρικών και θερμικών οχημάτων ανά ταχύτητα κίνησης	72
Πίνακας 4.1: Κατηγορίες οχημάτων των στοιχείων μέτρησης διελεύσεων	85
Πίνακας 4.2: Διελεύσεις οχημάτων ανά κατηγορία	85
Πίνακας 4.3: Ταξινόμηση και κατηγορίες εμπορικών οχημάτων	88
Πίνακας 4.4: Συντελεστές Ισοδυναμίας βαρέων οχημάτων	89
Πίνακας 4.5: Συντελεστές Ισοδυναμίας επιβατικών οχημάτων	91
Πίνακας 4.6: Σενάριο 1 – Διελεύσεις Ισοδύναμων Τυπικών Αξόνων	92
Πίνακας 4.7: Σενάριο 2 – Διελεύσεις Ισοδύναμων Τυπικών Αξόνων	92
Πίνακας 4.8: Σενάριο 3 – Διελεύσεις Ισοδύναμων Τυπικών Αξόνων	93
Πίνακας 5.1: Μεταβολή σε micro-strain των οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων λόγω αύξησης του πάχους της ασφαλικής στρώσης	100
Πίνακας 5.2: Μεταβολή σε micro-strain των οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων λόγω αύξησης του μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης	100
Πίνακας 5.3: Μεταβολή σε micro-strain των κατακόρυφων παραμορφώσεων λόγω αύξησης του πάχους της ασφαλικής στρώσης	102
Πίνακας 5.4: Μεταβολή σε micro-strain των κατακόρυφων παραμορφώσεων λόγω αύξησης του μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης	102
Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα ελέγχου ρηγμάτωσης ασφαλικής στρώσης.....	104
Πίνακας 5.6: Μεταβολή ποσοστών ρηγμάτωσης ασφαλικής στρώσης λόγω αύξησης του πάχους της.....	105

Πίνακας 5.7: Μεταβολή ποσοστών ρηγμάτωσης ασφαλικής στρώσης λόγω αύξησης του μέτρου δυσκαμψίας της.....	106
Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα ελέγχου αυλάκωσης ασφαλικής στρώσης	108
Πίνακας 5.9: Μεταβολή βάθους αυλάκωσης ασφαλικής στρώσης λόγω αύξησης του πάχους της ασφαλικής στρώσης	109
Πίνακας 5.10: Μεταβολή βάθους αυλάκωσης ασφαλικής στρώσης λόγω αύξησης του μέτρου δυσκαμψίας της.....	110
Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα ελέγχου παραμένουσας παραμόρφωσης στρώσης βάσης ..	112
Πίνακας 5.12: Μεταβολή παραμένουσας παραμόρφωσης στρώσης βάσης λόγω αύξησης του πάχους της ασφαλικής στρώσης	112
Πίνακας 5.13: Μεταβολή παραμένουσας παραμόρφωσης στρώσης βάσης λόγω αύξησης του μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης	112
Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα ελέγχου παραμένουσας παραμόρφωσης στρώσης έδρασης	114
Πίνακας 5.15: Μεταβολή παραμένουσας παραμόρφωσης στρώσης έδρασης λόγω αύξησης του πάχους της ασφαλικής στρώσης	115
Πίνακας 5.16: Μεταβολή παραμένουσας παραμόρφωσης στρώσης έδρασης λόγω αύξησης του μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης	116
Πίνακας 6.1: Σύγκριση σεναρίων 1 και 2 ως προς τη ρηγμάτωση της ασφαλικής στρώσης	119
Πίνακας 6.2: Σύγκριση σεναρίων 1 και 2 ως προς την παραμένουσα παραμόρφωση της στρώσης έδρασης.....	120
Πίνακας 6.3: Σύγκριση σεναρίων 1 και 3 ως προς τη ρηγμάτωση της ασφαλικής στρώσης	122
Πίνακας 6.4: Σύγκριση σεναρίων 1 και 3 ως προς την παραμένουσα παραμόρφωση της στρώσης έδρασης.....	123
Πίνακας 6.5: t-test ρηγμάτωσης ασφαλικής στρώσης για σενάρια 1-2	125
Πίνακας 6.6: t-test παραμένουσας παραμόρφωσης στρώσης έδρασης για σενάρια 1-2 ...	125
Πίνακας 6.7: t-test ρηγμάτωσης ασφαλικής στρώσης για σενάρια 1-3	126
Πίνακας 6.8: t-test παραμένουσας παραμόρφωσης στρώσης έδρασης για σενάρια 1-3 ...	126
Πίνακας 6.9: Κλίμακα ερμηνείας συντελεστή Cohen (d)	128
Πίνακας 6.10: Συντελεστής d για ρηγμάτωση ασφαλικής στρώσης – Σενάρια 1-2	128
Πίνακας 6.11: Συντελεστής d για παραμένουσα παραμόρφωση στρώσης έδρασης – Σενάρια 1-2.....	128
Πίνακας 6.12: Συντελεστής d για ρηγμάτωση ασφαλικής στρώσης – Σενάρια 1-3	128
Πίνακας 6.13: Συντελεστής d για παραμένουσα παραμόρφωση στρώσης έδρασης – Σενάρια 1-3.....	128

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο

Η αυξανόμενη προσφορά και διάδοση των ηλεκτρικών οχημάτων και οι αλλαγές που αυτά θα προκαλέσουν αποτελεί έναν εξέχοντα τομέα ενδιαφέροντος τα τελευταία χρόνια. Οι κυβερνήσεις παγκοσμίως έχουν υποστηρίξει τη μετάβαση σε ηλεκτρικά οχήματα μέσω διαφόρων κινήτρων όπως επιδοτήσεις, προωθητικά μέτρα και φορολογικές ελαφρύνσεις. Παράλληλα, η ανάγκη για μείωση των βλαβερών, για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία, εκπομπών ρύπων και ο περιορισμός της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα δίνουν στην ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης περαιτέρω ώθηση. Νέες τεχνολογίες μελετώνται, αλλά και υποδομές κατασκευάζονται συνεχώς ή βρίσκονται σε στάδια έρευνας, προκειμένου να εξυπηρετηθεί αυτή η νέα κατηγορία οχημάτων. Ωστόσο, η αυξανόμενη χρήση ηλεκτρικών οχημάτων έχει, επίσης, αναδείξει και ανησυχίες σχετικά με την επίδρασή τους σε διάφορους τομείς, ένας εκ των οποίων είναι τα οδοστρώματα και γενικότερα η οδική υποδομή.

Τα ηλεκτρικά οχήματα διαφέρουν αρκετά ως προς το μηχανολογικό τους μέρος σε σχέση με τα οχήματα που κυκλοφορούσαν έως τώρα. Οι συστοιχίες ηλεκτρικών συσσωρευτών, που διαθέτουν και αυξάνουν σημαντικά το βάρος τους, όπως και οι ηλεκτροκινητήρες τους, όντας πιο έντονοι και άμεσοι σε απόδοση ισχύος, εγείρουν ερωτήματα σχετικά με τις αλλαγές στη φθορά που προκαλούν στα οδοστρώματα. Επιπλέον, η τεχνολογία της αυτόνομης οδήγησης που αναμένεται να κορυφωθεί με τα ηλεκτρικά οχήματα παρουσιάζει και αυτή τις ιδιαιτερότητες της, όσον αφορά τα μοτίβα κίνησης επί της οδού και επομένως χρειάζεται να μελετηθεί ως προς την επιρροή της.

Η ενσωμάτωση επαγωγικών συστημάτων φόρτισης στα οδοστρώματα προκειμένου να παρέχουν στα ηλεκτρικά οχήματα ενέργεια για τη φόρτιση των μπαταριών τους εν κινήσει πρόκειται για μια τεχνολογία που αναπτύσσεται και δοκιμάζεται αυτή την περίοδο. Αποτελεί, όμως, πρόκληση για τους μηχανικούς, τόσο ως προς τη σωστή τοποθέτηση και μετέπειτα απόδοσή της εντός των οδών, όσο και ως προς την εναρμόνιση των υλικών με τα υλικά του οδοστρώματος, για να αποφευχθούν δυσλειτουργίες και πρόωρες φθορές.

Ο ακουστικός σχεδιασμός των οδοστρωμάτων ενδεχομένως να υποστεί και αυτός αλλαγές, αφού θα μεταβληθεί το ηχητικό φάσμα, λόγω της απουσίας των συνηθισμένων μηχανικών θορύβων αλλά και της ύπαρξης -πλέον- του Συστήματος Ηχητικής Ειδοποίησης πεζών στις χαμηλές ταχύτητες.

Ερωτήματα, έχουν δημιουργηθεί και για το πώς τα ίδια τα χαρακτηριστικά των οδοστρωμάτων μπορούν να επηρεάσουν με τη σειρά τους την απόδοση των ηλεκτρικών οχημάτων και τη μακροζωία του συστήματος των ηλεκτρικών συσσωρευτών τους.

Τέλος, έχει κριθεί σκόπιμο να διερευνηθούν οι αλλαγές που πιθανόν να χρειαστούν στον παραδοσιακό δομικό σχεδιασμό των οδοστρωμάτων, ώστε να ανταποκριθεί στις νέες απαιτήσεις. Η προσοχή επικεντρώνεται στα επιβατικά οχήματα που έως τώρα δεν λαμβάνονταν υπόψη κατά τον σχεδιασμό λόγω της αμελητέας επίδρασης τους. Η αύξηση, όμως, του βάρους τους λόγω του εξηλεκτρισμού τους δημιουργεί νέα δεδομένα.

1.2 Στόχος διπλωματικής

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επιρροής των ηλεκτρικών οχημάτων στα εύκαμπτα οδοστρώματα. Για την επίτευξη του υπόψη στόχου, αρχικά, γίνεται περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών αυτής της νέας κατηγορίας οχημάτων και παρουσίαση των στατιστικών στοιχείων σχετικά με την αύξηση της κυκλοφορίας τους. Εν συνεχεία, καταγράφονται τα αποτελέσματα των πρώτων ερευνών και μελετών της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με την επιρροή στα οδοστρώματα, τόσο των οχημάτων αυτών, όσο και των υποδομών που δημιουργούνται για να τα εξυπηρετήσουν. Τέλος, πραγματοποιείται πειραματική ανάλυση εντατικής κατάστασης με θεώρηση της κυκλοφορίας των ηλεκτρικών επιβατικών οχημάτων στον σχεδιασμό του οδοστρώματος, βάσει των αρχών της μηχανιστικής – εμπειρικής μεθόδου.

Η πειραματική ανάλυση αφορά σε τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος, με μεταβαλλόμενα πάχη και μέτρα δυσκαμψίας της ασφατικής στρώσης. Μέσω των διαφορετικών σεναρίων κυκλοφορίας, που εξετάζονται και συγκρίνονται, επιδιώκεται να ποσοτικοποιηθεί η επιρροή των ηλεκτρικών επιβατικών οχημάτων στα οδοστρώματα, ώστε να απαντηθεί το ερώτημα για το αν θα πρέπει αυτά να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων, σε αντίθεση με τα θερμικά επιβατικά που η επίδρασή τους θεωρείται αμελητέα. Η ανάλυση στοχεύει

στη συγκριτική διερεύνηση των αποτελεσμάτων που επιφέρει το αυξημένο αξονικό φορτίο των ηλεκτρικών επιβατικών οχημάτων στην εντατική κατάσταση που αναπτύσσεται στο οδόστρωμα.

1.3 Δομή εργασίας

Συμπεριλαμβανομένου του παρόντος, η εργασία αποτελείται από 8 κεφάλαια.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια σύντομη αναδρομή στην ανάπτυξη και εξέλιξη των ηλεκτρικών οχημάτων και παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά και μέρη τους. Στη συνέχεια, αναφέρονται οι πολιτικές που συντελούν στην αυξανόμενη διάδοσή τους και παρατίθενται τα σχετικά στατιστικά στοιχεία.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η επίδραση των χαρακτηριστικών των ηλεκτρικών οχημάτων στα οδοστρώματα, όπως και των νέων τεχνολογιών που δημιουργούνται για να τα εξυπηρετήσουν. Γίνεται αναφορά τόσο σε έρευνες που έχουν ολοκληρωθεί, όσο και σε άλλες που είναι σε εξέλιξη.

Στο κεφάλαιο 4 έχοντας θεωρήσει το αυξημένο βάρος ως το βασικότερο χαρακτηριστικό των επιβατικών ηλεκτρικών οχημάτων που θα επηρεάσει αμεσότερα τα οδοστρώματα από οποιοδήποτε άλλο, πραγματοποιείται, με δεδομένη κυκλοφορία, ανάλυση εντατικής κατάστασης για τρία σενάρια κυκλοφοριακής θεώρησης, σε τυπικές διατομές οδοστρώματος, διαφορετικών μέτρων δυσκαμψίας και παχών της ασφαλικής στρώσης.

Στο Κεφάλαιο 5 παρατίθενται σε πίνακες και διαγράμματα τα αποτελέσματα της ανάλυσης συνοδευόμενα από σύντομο σχολιασμό.

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται συγκριτική αξιολόγηση των τριών σεναρίων που μελετήθηκαν, προκειμένου να διερευνηθεί ενδεχόμενη επιβάρυνση των οδοστρωμάτων από τον εξηλεκτρισμό του στόλου των επιβατικών οχημάτων.

Το Κεφάλαιο 7 περιλαμβάνει τα συμπεράσματα της εργασίας όπως και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Στο κεφάλαιο 8 παρατίθεται η βιβλιογραφία που αξιοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

2.1 Ιστορική αναδρομή

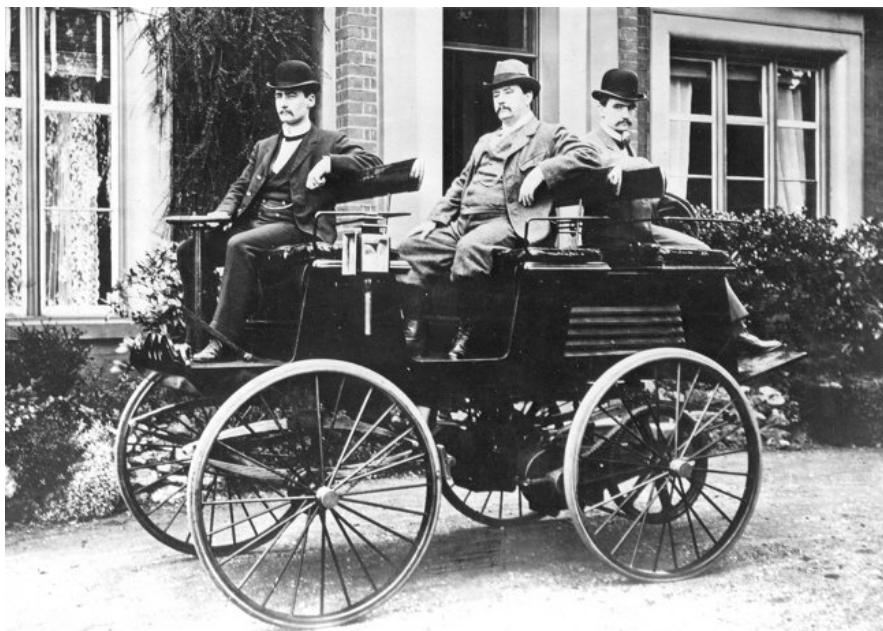
Τα τελευταία χρόνια παρατηρούμε την συνεχώς αυξανόμενη παραγωγή και πώληση ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, τα ηλεκτροκίνητα οχήματα πρωτοεμφανίστηκαν αρκετά χρόνια πριν και συγκεκριμένα στα μέσα 19^{ου} αιώνα. Οι πρώτες προσπάθειες για τη δημιουργία ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου ξεκίνησαν το 1830 με σημαντικότερες αυτές των Thomas Davenport (1834), Robert Anderson (1835) και Sibrandus Straitingh (1835), οι οποίοι κατασκεύασαν μικρού μεγέθους οχήματα που κινούνταν από ηλεκτρικούς κινητήρες με ενέργεια που παρέχόταν μέσω μη επαναφορτιζόμενων ηλεκτρικών συσσωρευτών. Όλες οι παραπάνω απόπειρες είχαν καθαρά πειραματικό χαρακτήρα, αφού τα οχήματα που κατασκευάστηκαν είχαν πολύ μικρή αυτονομία και κανένα δεν ξεπερνούσε την ταχύτητα των 12 km/h. Πολλές φορές μάλιστα οι κινητήρες τους δυσκολεύονταν να μεταφέρουν το βάρος των μπαταριών. Παρ' όλα αυτά αποτέλεσαν το έναυσμα για την περαιτέρω εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης.

Το 1847 ο Moses Farmer κατασκεύασε ένα όχημα χωρητικότητας δύο ατόμων ενώ το 1851 ο Charles Grafton Page ένα όχημα χωρητικότητας 12 ατόμων με ταχύτητα κίνησης έως και 30 km/h. Αμφότερα, όμως, κρίθηκαν ασύμφορα και αμφιβόλου εμπορικής επιτυχίας, αφού τα βασικά προβλήματα των ηλεκτρικών συσσωρευτών (μεγάλος όγκος, μεγάλο βάρος, μικρή αυτονομία, αδυναμία επαναφόρτισης) παρέμεναν.

Όλα άλλαξαν το 1859, όταν ο Γάλλος φυσικός Gaston Plante εφηύρε τον πρώτο ηλεκτρικό συσσωρευτή με δυνατότητα επαναφόρτισης αντικαθιστώντας τα στοιχεία που χρησιμοποιούνταν έως τότε με το στοιχείο Μολύβδου-Οξέως (Lead-Acid). Η ανακάλυψη αυτή ήταν η αρχή της δεύτερης περιόδου ανάπτυξης των ηλεκτρικών οχημάτων. Όμως, τα πρώτα οχήματα με επαναφορτιζόμενους ηλεκτρικούς συσσωρευτές έκαναν την εμφάνισή τους αρκετά χρόνια αργότερα και συγκεκριμένα μετά το 1881 όταν ο χημικός μηχανικός Camille Alphonse Faure βελτίωσε τον σχεδιασμό αυτού του τύπου μπαταριών και αύξησε την ενεργειακή χωρητικότητα τους οδηγώντας έτσι στην παραγωγή τους σε βιομηχανική κλίμακα.

Στις δεκαετίες που ακολούθησαν ολοένα και περισσότεροι εφευρέτες και κατασκευαστές (Gustave Trouve, Thomas Parker, William Morrison) παρουσίαζαν

ηλεκτρικά οχήματα (Βλ. Εικόνα 2.1) που πλέον ήταν και πρακτικά για τις αστικές μετακινήσεις, ενώ παράλληλα συνεχιζόταν η εξέλιξη των στοιχείων των συσσωρευτών με νέα, όπως το στοιχείο Νικελίου-Σιδήρου (Ni-Fe) που επέτρεπε ταχύτερη φόρτιση και προσέδιδε μεγαλύτερη αντοχή.



Εικόνα 2.1: Το πρώτο πλήρως λειτουργικό ηλεκτρικό όχημα του Thomas Parker (1895)
Πηγή: (Parker, 1999)

Μέχρι το 1914 τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα επικρατούσαν έναντι των ατμοκίνητων και των βενζινοκίνητων, αφού τα πρώτα δεν ήταν πρακτικά για τις αστικές μετακινήσεις, επειδή χρειάζονταν αρκετό χρόνο προθέρμανσης της μηχανής τους και συνεχή ανεφοδιασμό με νερό, και τα δεύτερα ήταν ρυπογόνα, θορυβώδη και επιπλέον ήταν απαραίτητη η χειροκίνητη εκκίνησή τους με μανιβέλα.

Από το 1914 και μετά, η βελτίωση του οδικού δικτύου (ιδίως στις Η.Π.Α.) που δημιούργησε την ανάγκη για υπεραστικές μετακινήσεις και μεγάλες αυτονομίες, η εξέλιξη των βενζινοκίνητων οχημάτων και των μηχανών εσωτερικής καύσης και η γραμμή παραγωγής του Henry Ford είναι οι σημαντικότεροι λόγοι που οδήγησαν στην πτώση των ηλεκτρικών οχημάτων που ήταν ακριβότερα και με μικρές αυτονομίες για τις ανάγκες των μετακινήσεων πλέον. Η εγκατάλειψη της ηλεκτροκίνησης συνεχίστηκε και στην Ευρώπη ιδιαίτερα μετά το τέλος του Β' Παγκοσμίου πολέμου (1945), αφού κατά τη διάρκειά του θεωρούταν σημαντική για την εξοικονόμηση βενζίνης για στρατιωτικούς σκοπούς.

Η ηλεκτροκίνηση παρέμεινε στην αφάνεια μέχρι το 1973 όπου η πετρελαϊκή κρίση και το εμπάργκο των Αράβων πετρελαιοπαραγωγών στις Η.Π.Α. αναζωπύρωσε τις

σκέψεις για την εκ νέου εξέλιξη των ηλεκτρικών οχημάτων. Σκέψεις που κορυφώθηκαν τις επόμενες δεκαετίες λόγω των συντονισμένων προσπάθειών από τις πολιτικές ηγεσίες όλων των κρατών για μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων. Τα αμιγώς ηλεκτροκίνητα οχήματα όμως που σχεδιάζονταν και κατασκευάζονταν εξακολουθούσαν να έχουν τα προβλήματα του παρελθόντος (μικρή αυτονομία, υψηλή τιμή, χαμηλή μέγιστη ταχύτητα) τη στιγμή μάλιστα που τα βενζινοκίνητα εξελίσσονταν όλο και περισσότερο. Οπότε κατέληξαν να είναι όλα απλοί πειραματισμοί. Η πίεση, ωστόσο, για μείωση των ρύπων και σταθεροποίηση των επιπέδων CO₂ μέσω διεθνών συμβάσεων οδήγησε στην κατασκευή των πρώτων υβριδικών οχημάτων που κινούνταν με συνδυασμό ηλεκτρισμού και βενζίνης με πιο διαδεδομένο το Toyota Prius (1997).

Σταδιακά, από το 2000 και μετά, σε ορισμένα κράτη οι αυτοκινητοβιομηχανίες υποχρεώνονταν σε παραγωγή Οχημάτων Μηδενικών Εκπομπών (ZEV: Zero Emissions Vehicles) κατά ένα ποσοστό επί των πωλήσεών τους όπως, επίσης, και σε περιορισμό των εκπεμπόμενων ρύπων του συνόλου των οχημάτων παραγωγής τους. Ήταν φανερό, πως για να το πετύχουν αυτό θα έπρεπε ο στόλος τους να εξηλεκτριστεί. Ταυτόχρονα, οι ειδικές νομοθεσίες που εισήγαγαν φοροαπαλλαγές στους οδηγούς οχημάτων μηδενικών εκπομπών ρύπων τόσο κατά την αγορά όσο και κατά τη χρήση του οχήματός τους, όπως επίσης και η άνοδος της τιμής του πετρελαίου κίνησης και της βενζίνης, οδήγησαν τα τελευταία χρόνια στην ραγδαία αύξηση του ενδιαφέροντος για ηλεκτρικά οχήματα. Σε αυτό συνέβαλαν, επίσης, η εξέλιξη της τεχνολογίας των μπαταριών τα τελευταία έτη όπως και η ίδρυση της Tesla Motors (2003) που ασχολείται αποκλειστικά με τα ηλεκτροκίνητα οχήματα και που με την παραγωγή του Tesla Model S (2011) (Βλ. Εικόνα 2.2) έλυσε σε μεγάλο βαθμό τα προβλήματα της αυτονομίας και της αργής φόρτισης και έδωσε την ώθηση για μια δεύτερη χρυσή εποχή της ηλεκτροκίνησης.



Εικόνα 2.2: Το Tesla Model S στην πρώτη παρουσίασή του στην έκθεση της Φρανκφούρτης (2009)
Πηγή: www.iaa-mobility.com

2.2 Τύποι ηλεκτρικών οχημάτων - Περιγραφή βασικών χαρακτηριστικών

Με τον όρο ηλεκτρικό όχημα εννοούμε κάθε αυτοκινούμενη κατασκευή που χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια και ηλεκτροκινητήρα για τις ανάγκες κίνησής της. Ωστόσο, υπάρχουν διαφορετικοί τύποι και δομές ηλεκτρικών οχημάτων που δημιουργήθηκαν, καθώς εξελισσόταν η τεχνολογία της ηλεκτροκίνησης:

1. *Αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα (Electric Vehicles-EVs):* Χρησιμοποιούν για την κίνηση τους έναν ή περισσότερους ηλεκτροκινητήρες και η ηλεκτρική ενέργεια τους παρέχεται:

α) είτε μέσω μπαταριών που είναι συνήθως τοποθετημένες στο πάτωμα του αμαξώματος και η επαναφόρτιση τους γίνεται από εξωτερική πηγή ενέργειας ή μέσω της ανάκτησης κατά την πέδηση του οχήματος. Σε αυτή την περίπτωση, το όχημα ονομάζεται ηλεκτρικό όχημα με μπαταρία και συμβολίζεται με αρχικά BEV (Battery Electric Vehicle). Τα BEVs όπως φάνηκε και από το Κεφάλαιο 2.1 αποτελούν την παλαιότερη διάταξη κίνησης σε όχημα. Λόγω απουσίας μηχανής εσωτερικής καύσης και μηδενική παραγωγή καυσαερίων, θεωρούνται τα καθαρότερα από άποψη ρύπων οχήματα.

β) είτε μέσω κυψελών καυσίμου. Δεν πρόκειται για τόσο διαδεδομένη κατηγορία ηλεκτρικών οχημάτων, αφού κυκλοφορούν ελάχιστα, ενώ οι κατασκευαστές έχουν

ρίξει τη βαρύτητα των ερευνών τους στα BEVs. Τα οχήματα αυτής της κατηγορίας ονομάζονται ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλες καυσίμου και συμβολίζονται με τα αρχικά FCEVs (Fuel Cell Electric Vehicles). Πρόκειται όπως και με τα BEVs για οχήματα μηδενικών ρύπων. Βασικό καύσιμο σε αυτή τη διάταξη είναι το υδρογόνο το οποίο αποθηκεύεται είτε σε δεξαμενές υψηλής πίεσης (200, 350 ή 700 bar), είτε σε υγρή κρυογονική μορφή στους -253°C (και πίεση δεξαμενής 3-5bar) και μέσω αυτού παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια που τροφοδοτεί την μπαταρία και τον ηλεκτροκινητήρα. Οι περισσότεροι κατασκευαστές, όπως η Volkswagen, έχουν δηλώσει πως η συγκεκριμένη τεχνολογία δεν έχει μέλλον στον χώρο του αυτοκινήτου εξαιτίας i) των ακριβών σταθμών ανεφοδιασμού, ii) της πτητικότητας του υδρογόνου και iii) της ενέργειας που χρειάζεται για την παραγωγή του, που το καθιστά ασύμφορο τόσο οικονομικά (αν γίνεται μέσω ηλεκτρόλυσης) όσο και περιβαλλοντικά (αν γίνεται μέσω φυσικού αερίου). Μόλις 3 μοντέλα FCEVs είναι σε εμπορική διάθεση αυτή την περίοδο και κυκλοφορούν σε συγκεκριμένες μόνο αγορές σε ιδιαίτερα υψηλές τιμές. Πρόκειται, μάλιστα, για μεσαίου και μεγάλου μεγέθους οχήματα, λόγω του όγκου που χρειάζεται η δεξαμενή υδρογόνου και επομένως όχι τόσο ιδανικά για κίνηση εντός πόλης.

2. *Υβριδικά οχήματα (Hybrid Vehicles-HV)*: Χρησιμοποιούν για την κίνηση τους την ηλεκτρική σε συνδυασμό με κάποια άλλη μορφή ενέργειας. Τα οχήματα αυτά διαθέτουν εκτός από ηλεκτροκινητήρα και μπαταρία και έναν συμβατικό κινητήρα εσωτερικής καύσης. Αποτέλεσαν τον προπομπό των αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων όταν η τεχνολογία των μπαταριών για σκοπούς κίνησης ήταν ακόμα σε αρχικό στάδιο. Όσο βελτιώνεται η τεχνολογία των μπαταριών και κατ' επέκταση η αυτονομία που παρέχουν μειώνεται η παραγωγή και η κυκλοφορία τους. Διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

α) Ελαφρώς υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (mild Hybrid Electric Vehicles - MHEVs): Διαθέτουν μπαταρία πολύ μικρής χωρητικότητας και έναν ηλεκτροκινητήρα χαμηλής ισχύος (integrated starter generator (ISG)) που δεν μπορεί να παρέχει κίνηση στο όχημα μόνος του και δρα πάντα υποστηρικτικά στην μηχανή εσωτερικής καύσης ιδιαίτερα κατά την εκκίνηση του οχήματος όπως και σε περιπτώσεις αύξησης φορτίου. Συνήθως το ηλεκτρικό σύστημα των οχημάτων αυτών είναι 48V (αντί για 12V που έχουμε στα συμβατικά οχήματα).

β) Πλήρως υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (full Hybrid Electric Vehicles - FHEVs): Τα οχήματα αυτά μπορούν να κινούνται είτε με τον ηλεκτροκινητήρα, είτε με τη μηχανή

εσωτερικής καύσης, είτε με ταυτόχρονη λειτουργία και των δύο. Τα οχήματα αυτής της κατηγορίας χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες:

i) Τα απλά υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (HEVs). Διαθέτουν μια μικρή μπαταρία (ενέργειας περίπου 1 kWh) και έναν ηλεκτροκινητήρα χαμηλής ισχύος που όμως δύναται να κινήσει το αμάξωμα αυτόνομα (χωρίς τη συνδρομή της συμβατικής μηχανής εσωτερικής καύσης) για μικρές ταχύτητες (50km/h το μέγιστο) και περιορισμένη απόσταση (1.5km το μέγιστο). Τα οχήματα αυτά επαναφορτίζουν την μπαταρία τους μέσω της ανάκτησης ενέργειας κατά την πέδηση ή όπου αυτό δεν είναι δυνατό με τη συμβολή της θερμικής μηχανής. Δεν συνδέονται με εξωτερική πηγή ενέργειας για την επαναφόρτιση.

ii) Τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα με δυνατότητα επαναφόρτισης από εξωτερική πηγή (Plug-in Hybrid Electric Vehicles – PHEVs). Πρόκειται για οχήματα που διαθέτουν έναν αρκετά δυνατό ηλεκτροκινητήρα και μπαταρία ικανοποιητικής ενέργειας (10-25 kWh). Στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι δυνατή η επίτευξη μεγαλύτερων αποστάσεων (30-60km) αποκλειστικά με τη χρήση του ηλεκτροκινητήρα, όπως επίσης και η δυνατότητα μεγαλύτερων ταχυτήτων (100-140 km/h). Η επαναφόρτιση της μπαταρίας γίνεται είτε μέσω της ανάκτησης ενέργειας κατά την πέδηση, είτε μέσω της μηχανής εσωτερικής καύσης, είτε μέσω της σύνδεσης του οχήματος σε απλή πρίζα του δικτύου ηλεκτροδότησης.

Είναι εμφανές ότι σήμερα με την εξέλιξη της τεχνολογίας των μπαταριών αναφέροντας τον όρο «ηλεκτρικά οχήματα» εννοούμε κυρίως αυτά της κατηγορίας 1α (BEVs).

2.3 Βασικά μέρη αμιγώς ηλεκτρικού οχήματος

Τα βασικά μέρη ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι:

♦ Η μπαταρία (ή συστοιχία ηλεκτρικών συσσωρευτών έλξης). Χρησιμεύει για την αποθήκευση χημικής ενέργειας, η οποία αποδεδεσμεύεται μετά ως ηλεκτρική που είναι απαραίτητη για την κίνηση του οχήματος. Η χωρητικότητα μιας μπαταρίας μετριέται σε αμπερώρια (Ah) και η ενέργεια που αποθηκεύει εξαρτάται από την τάση -Volts (V)- που λειτουργεί και μετριέται σε βατώρια (Wh), όπου:

$$Wh = V \cdot Ah \quad (2.1)$$

Ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους διακρίνονται σε:

i) Μπαταρίες Μολύβδου-Οξέος (Lead-Acid)

- ii) Μπαταρίες Νικελίου-Υδριδίου Μετάλλου (Ni-MH)
- iii) Μπαταρίες Λιθίου (Li-Ion)

Το υλικό κατασκευής επηρεάζει και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά μιας μπαταρίας και οι όροι που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή τους είναι οι παρακάτω:

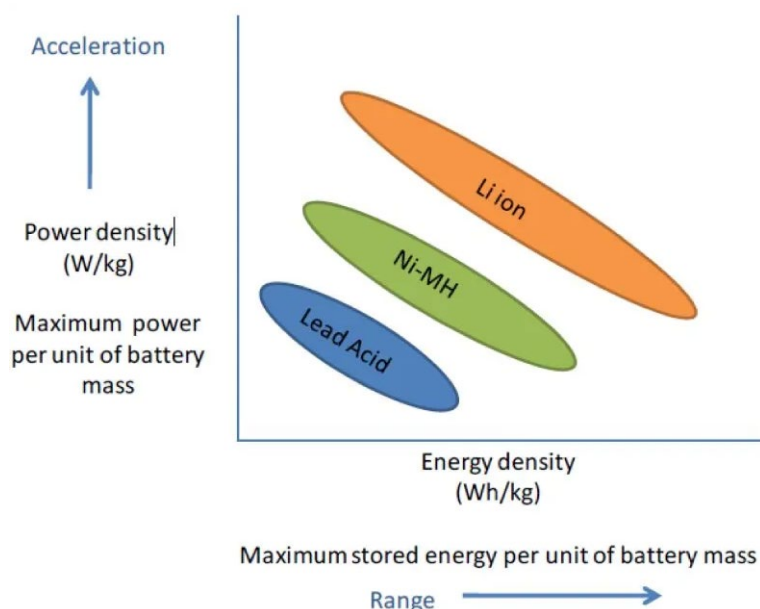
α) Ενεργειακή πυκνότητα μάζας (Wh/kg): η ενέργεια που αποθηκεύει ανά μονάδα βάρους της μπαταρίας (Βλ. Εικόνα 2.3).

β) Ενεργειακή πυκνότητα όγκου (Wh/l): δηλαδή η ενέργεια που αποθηκεύεται ανά μονάδα όγκου της μπαταρίας.

γ) Πυκνότητα ισχύος (W/kg): η ισχύς που δίνεται ανά μονάδα βάρους της μπαταρίας (Βλ. Εικόνα 2.3).

δ) Βαθμός απόδοσης: εκφράζει το ποσοστό της χημικής ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική και αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των ηλεκτρικών οχημάτων έναντι των θερμικών.

ε) Διάρκεια ζωής: οι κύκλοι φόρτισης και αποφόρτισης που μπορεί να εκτελέσει η μπαταρία, χωρίς να μειωθεί η χωρητικότητα περισσότερο από ένα καθορισμένο ποσοστό.



Εικόνα 2.3: Ενδεικτική σύγκριση τύπων μπαταριών ως προς την πυκνότητα ισχύος και την ενεργειακή πυκνότητα

Πηγή: (Lowe, M., Tokuoka, S., Trigg, T., Gereffi, G., 2010)

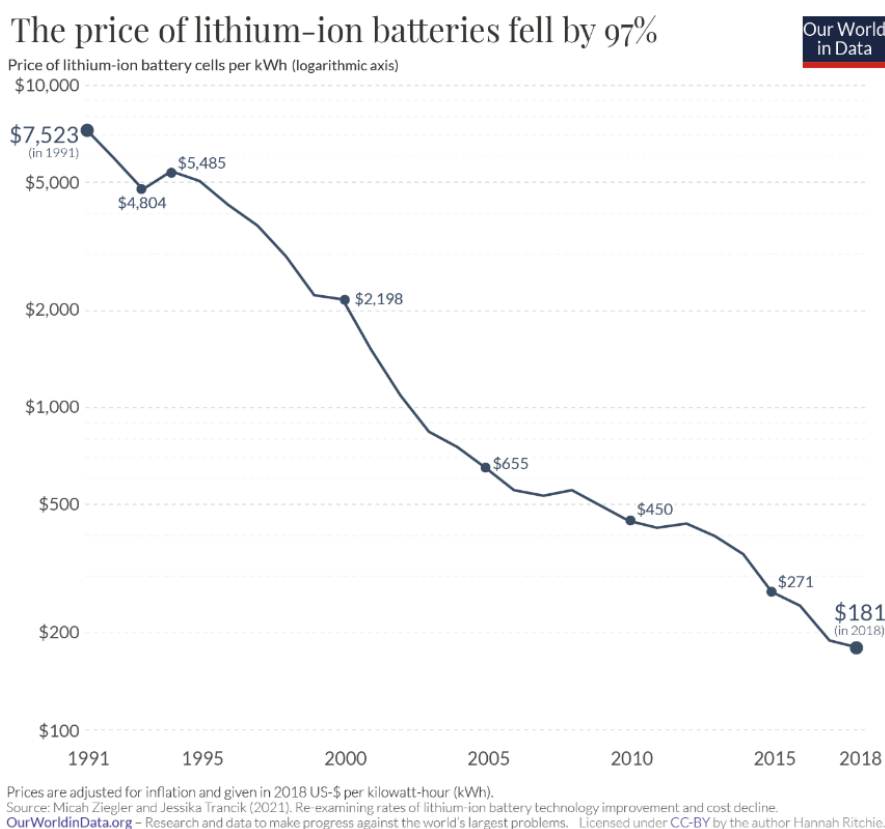
Στον Πίνακα 2.1 παρατίθενται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά κάθε τύπου μπαταρίας (από αυτούς που όπως αναφέρθηκε χρησιμοποιούνται συχνότερα σήμερα στην κατασκευή οχημάτων). Να σημειωθεί πως ο πίνακας είναι ενδεικτικός και πρέπει να

υπόκειται σε διαρκή αναθεώρηση αφού, η εξέλιξη της τεχνολογίας μεταβάλλει τόσο τα υλικά των μπαταριών όσο και τα χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας 2.1: Ποιοτικά χαρακτηριστικά των μπαταριών ανάλογα με τον τύπο τους
Πηγή: (Siang Fui Tie, Chee Wei Tan, 2013)

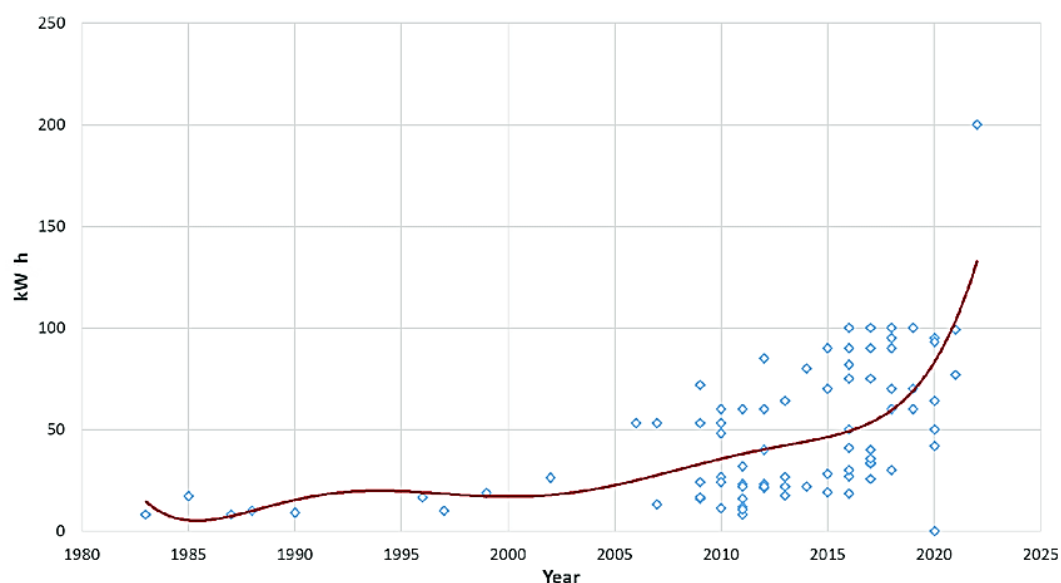
Τύπος Μπαταρίας	Ενεργειακή πυκνότητα μάζας (Wh/kg)	Ενεργειακή πυκνότητα όγκου (Wh/l)	Πυκνότητα ισχύος (W/kg)	Βαθμός απόδοσης (%)	Διάρκεια ζωής (κύκλοι πλήρους φόρτισης)
Lead-Acid	35	100	180	>80	1000
Ni-MH	70-95	180-220	200-300	70	<3000
Li-Ion	118-250	200-400	200-430	>95	2000

Τα τελευταία χρόνια επικρατούν λόγω των χαρακτηριστικών τους οι μπαταρίες ιόντων λιθίου και προτιμώνται από τους κατασκευαστές. Αυτό έχει οδηγήσει σε πτώση της τιμής τους (Βλ. Εικόνα 2.4). Εκτιμήσεις δείχνουν πως το 2022 η μέση τιμή ανά kWh ήταν 153€ (U.S. Department of Energy, 2023). Η πτώση αυτή με τη σειρά της οδηγεί σε πιο οικονομικά και προσιτά ηλεκτρικά οχήματα.



Εικόνα 2.4: Πτώση τιμής ανά κιλοβατώρα των μπαταριών λιθίου στο χρόνο
Πηγή: (Ziegler Micah ,Trancik Jessika, 2021)

Παράλληλα, λόγω της εξέλιξης της τεχνολογίας και των ερευνών πάνω στις μπαταρίες έχει αυξηθεί σημαντικά και η ενέργεια που μπορούν να αποθηκεύσουν για σταθερό όγκο και βάρος (Βλ. Εικόνα 2.5).



Εικόνα 2.5: Εξέλιξη αποθηκεύσιμης ενέργειας μπαταριών για σταθερό όγκο και βάρος
Πηγή: (Sanguesa, J., Torres, V., Garrido, P., Martinez, F. & Marquez-Barja, J., 2021)

Παρ' όλα αυτά, η μπαταρία εξακολουθεί να αποτελεί το ακριβότερο και βαρύτερο (κατά μέσο όρο το 26% του συνολικού βάρους και κατά μέγιστο το 32%) εξάρτημα ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου.

♦ Το Σύστημα Διαχείρισης Μπαταρίας (BMS – Battery Management System). Η μπαταρία, όντας το πιο ακριβό εξάρτημα του ηλεκτρικού αυτοκινήτου, σε περίπτωση λανθασμένου χειρισμού μπορεί να υποστεί σημαντική βλάβη που θα μειώσει τη διάρκεια ζωής της. Επίσης, υπό συγκεκριμένες συνθήκες, μπορεί να αποτελέσει κίνδυνο για την ασφάλεια για το ίδιο το αυτοκίνητο και το πλήρωμά του. Είναι, λοιπόν, σημαντικό να διασφαλίζονται οι κατάλληλες συνθήκες και οι απαραίτητοι έλεγχοι για τη συστοιχία των μπαταριών αλλά και για κάθε μία μεμονωμένα. Αυτό αναλαμβάνει να φέρει εις πέρας το BMS. Πρόκειται, δηλαδή, για ένα σύστημα παρακολούθησης, επέμβασης και προστασίας της μπαταρίας. Βασικές του λειτουργίες είναι:

- α) Έλεγχος της μπαταρίας κατά τη φόρτιση και την αποφόρτιση.
- β) Προσδιορισμός της τρέχουσας κατάστασης της μπαταρίας (επίπεδο φόρτισης, θερμοκρασία, τάση).
- γ) Προσδιορισμός επιπέδου φθοράς της μπαταρίας.

δ) Εξισορρόπηση της φόρτισης και της εκφόρτισης μεμονωμένων κελιών της μπαταρίας, ώστε να αποφεύγεται η υπερφόρτιση ή η πλήρης αποφόρτισή τους.

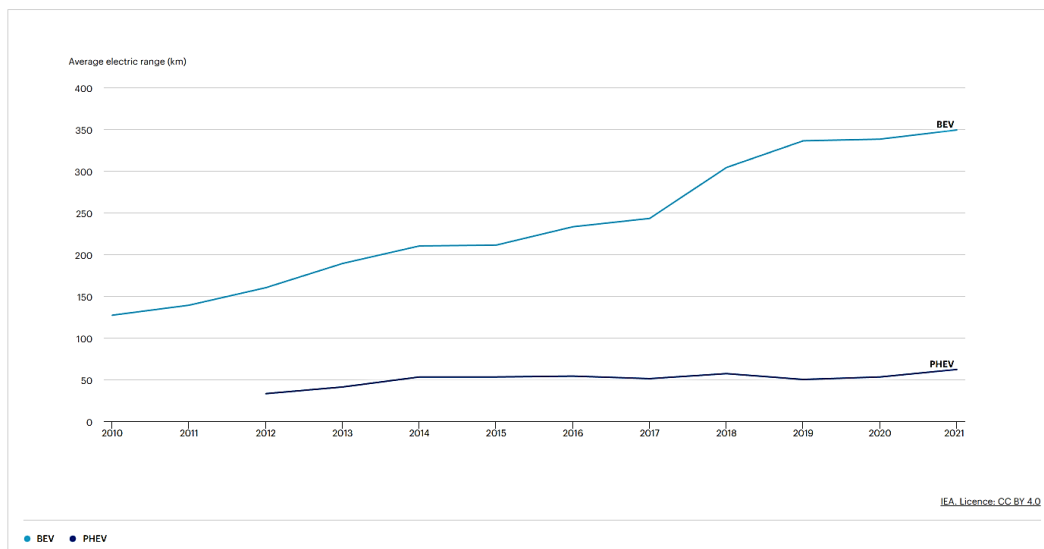
ε) Καταγραφή όλων των τιμών κατάστασης της μπαταρίας και της γενικότερης λειτουργίας της.

♦ Ο Ηλεκτρικός Κινητήρας. Μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στην μπαταρία σε μηχανική, ώστε να δώσει κίνηση στο όχημα. Είναι ιδιαίτερα αποδοτικός, ειδικά σε σχέση με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης (ΚΕΚ), αφού μετατρέπει άνω του 90% της ενέργειας που λαμβάνει από την μπαταρία σε κινητική. Επιπλέον, έχει υψηλή αντοχή, λόγω των πολύ λιγότερων κινούμενων μερών που διαθέτει σε σχέση με τους ΚΕΚ και επομένως είναι και ελαφρύτερος. Έχει μηδενικό κόστος συντήρησης και παράγει ελάχιστο θόρυβο κατά τη λειτουργία του.

♦ Ο Ελεγκτής Ηλεκτρονικών Ισχύος. Ελέγχει μέσω ποτενσιόμετρων την ηλεκτρική ενέργεια που θα σταλεί από τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές προς τον ηλεκτροκινητήρα. Καθορίζει με αυτό τον τρόπο την ισχύ και τη ροπή του.

♦ Το Σύστημα Αναγεννητικής Πέδησης. Όταν το όχημα κινείται και φρενάρει, το συμβατικό σύστημα πέδησης αναπτύσσει δυνάμεις τριβής για να μετατρέψει την κινητική ενέργεια σε θερμότητα και να ακινητοποιήσει το όχημα. Αυτή την ενέργεια που θα χανόταν ως θερμότητα στο περιβάλλον το σύστημα αναγεννητικής πέδησης αναλαμβάνει κατά ένα μέρος να την επιστρέψει στη μπαταρία παράγοντας, συνήθως μέσω μιας ηλεκτρογεννήτριας, ρεύμα κατά την επιβράδυνση του οχήματος.

Η διαρκής εξέλιξη των μπαταριών και της ποσότητας ενέργειας που μπορούν να αποθηκεύσουν, όπως, επίσης και η βελτίωση της αποδοτικότητας των ηλεκτροκινητήρων, των ελεγκτών ισχύος και των συστημάτων αναγεννητικής πέδησης έχουν οδηγήσει σε αύξηση της χιλιομετρικής αυτονομίας των ηλεκτρικών οχημάτων. Μάλιστα, ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος, σύμφωνα με μελέτη του, θεωρούσε ήδη από το 2016 πως τα περισσότερα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα που κυκλοφορούσαν ήταν επαρκή για τη συντριπτική πλειοψηφία των μετακινήσεων (European Environment Agency, 2016). Από το 2016 έως σήμερα η αυτονομία έχει αυξηθεί ακόμα περισσότερο (Βλ. Εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6: Εξέλιξη μέσης αυτονομίας αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων (BEVs)

Πηγή: www.iea.org

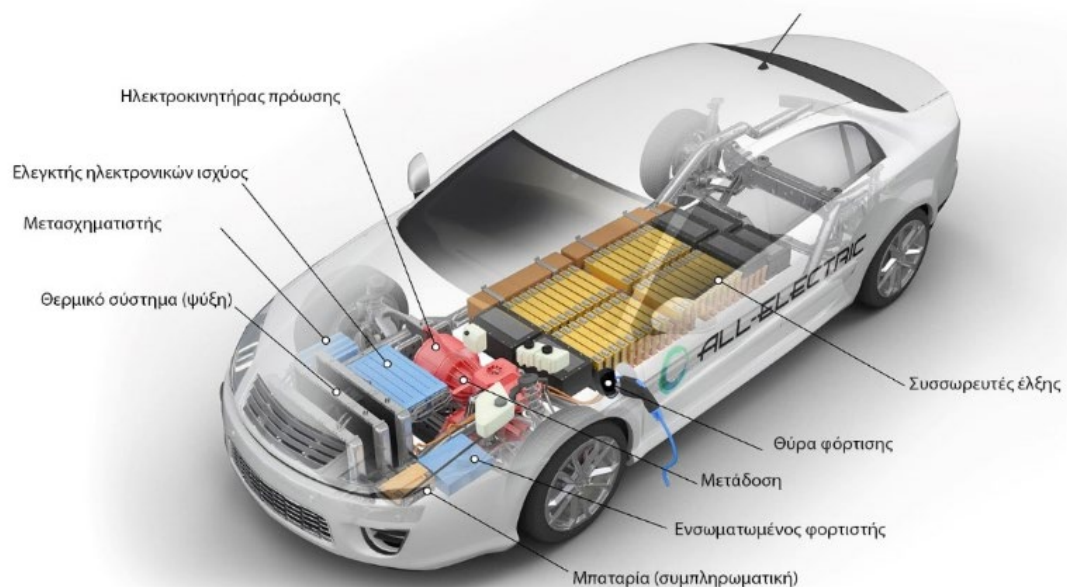
Εκτός των προαναφερθέντων βασικών τμημάτων του ηλεκτρικού αυτοκινήτου (που το κάνουν να ξεχωρίζει από τα συμβατικά), υπάρχουν και κάποια δευτερεύοντα όπως:

- Βοηθητική/Συμπληρωματική μπαταρία. Πρόκειται για τη γνωστή μπαταρία 12V που έχουν και τα συμβατικά οχήματα και που τροφοδοτεί δευτερεύουσες λειτουργίες και συστήματα του οχήματος (φωτισμός, σύστημα ήχου κλπ.)
- Θύρα Φόρτισης. Εδώ γίνεται η σύνδεση του αυτοκινήτου με εξωτερική πηγή ρεύματος προκειμένου να επαναφορτιστούν οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές έλξης.
- Ενσωματωμένος Φορτιστής (Onboard Charger). Μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) που λαμβάνει το όχημα από τη θύρα φόρτισης σε συνεχές (DC), προκειμένου να φορτιστούν οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές έλξης. Κατά τη φόρτιση του οχήματος από εξωτερική πηγή ρεύματος παρακολουθεί την τάση και την ένταση του ρεύματος, τη θερμοκρασία, την κατάσταση φόρτισης και γενικά τη ροή ρεύματος προς τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές.
- Μετασχηματιστής. Η συστοιχία ηλεκτρικών συσσωρευτών έλξης παρέχει συνεχώς ρεύμα με σταθερή τάση. Όμως, τα διαφορετικά εξαρτήματα του οχήματος έχουν διαφορετικές απαιτήσεις. Ο μετασχηματιστής διαμορφώνει την τάση εξόδου που προέρχεται από την μπαταρία έλξης στο απαιτούμενο επίπεδο μετατρέποντας την από υψηλή σε χαμηλή. Επίσης, μετατρέπει, όπου χρειάζεται, το συνεχές ρεύμα (DC) σε εναλλασσόμενο (AC). Τέλος, παρέχει στην βοηθητική/συμπληρωματική μπαταρία την τάση που απαιτείται για τη φόρτισή της.

□ Θερμικό Σύστημα. Το σύστημα θερμικής διαχείρισης είναι υπεύθυνο για τη διατήρηση των σωστών θερμοκρασιών λειτουργίας στα συστήματα του ηλεκτρικού οχήματος (ηλεκτροκινητήρας, μπαταρία, ηλεκτρονικά ισχύος). Αν χρειαστεί, λειτουργεί και κατά τη διάρκεια της φόρτισης του οχήματος.

□ Μετάδοση. Μεταφέρει την ενέργεια του ηλεκτροκινητήρα στους τροχούς μέσω ενός κιβωτίου με 1 σχέση μετάδοσης (ή 2 σε κάποιες περιπτώσεις).

Στην Εικόνα 2.7 απεικονίζεται η διάταξη των εξαρτημάτων του ηλεκτρικού οχήματος.



Εικόνα 2.7: Βασικά εξαρτήματα ηλεκτρικού αυτοκινήτου (BEV)

Πηγή: [U.S. Department Of Energy](#)

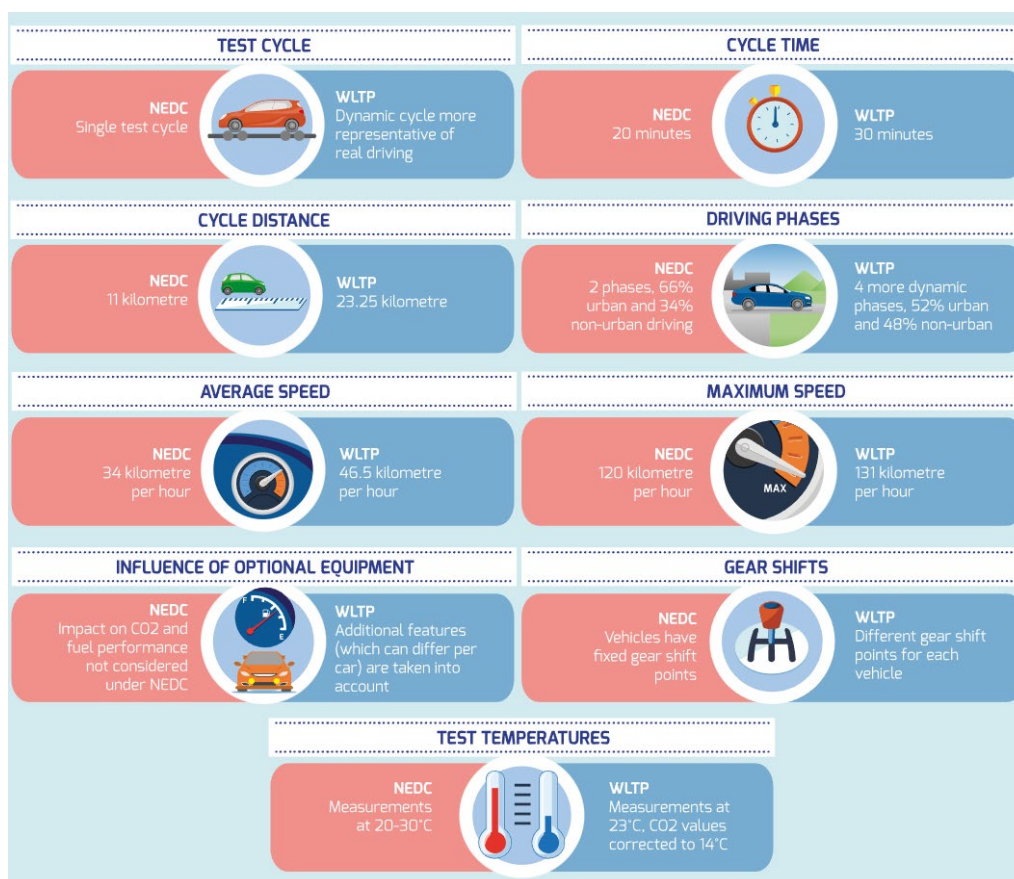
2.4 Ευρωπαϊκές πολιτικές

Ένας από τους στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής είναι ο περιορισμός των εκπομπών ρύπων στην ατμόσφαιρα, με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα και της δημόσιας υγείας. Για να επιτευχθεί αυτό θεσπίζονται μια σειρά από μέτρα μεταξύ των οποίων είναι και η απανθρακοποίηση του συστήματος μεταφορών. Τα μέτρα αυτά ωθούν τους κατασκευαστές οχημάτων στην εξέλιξη ηλεκτροκίνητων μοντέλων και στον σταδιακό εξηλεκτρισμό του στόλου τους (Matulka, 2014).

2.4.1 Ευρωπαϊκά πρότυπα εκπομπών καυσαερίων

Ήδη από το 1992 δημιουργήθηκαν τα ευρωπαϊκά πρότυπα εκπομπών καυσαερίων (EURO X) τα οποία θέτουν συγκεκριμένα όρια μονοξειδίου του άνθρακα (CO), οξειδίων του αζώτου (NOx), υδρογονανθράκων (HC) και σωματιδίων (PM) στα οποία επιβάλλεται να συμμορφώνονται όλα τα οχήματα που ταξινομούνται εντός της Ε.Ε.. Τα όρια αυτά με την πάροδο των ετών γίνονται όλο και πιο αυστηρά.

Επιπλέον, αυστηρότερη γίνεται και η μέθοδος προσδιορισμού και μέτρησης των ρύπων, αφού το 2018 τέθηκε σε ισχύ η χρήση της μεθόδου World Harmonised Light Vehicle Test Procedure (WLTP) αντικαθιστώντας την New European Driving Cycle (NEDC) που όντας περισσότερο εργαστηριακή (βλ. Εικόνα 2.8) έδινε πολύ χαμηλότερες τιμές (έως και 22%) από τις πραγματικές. Στην WLTP εισάγονται περισσότερες παράμετροι που δίνουν μεγαλύτερη ακρίβεια στη μέτρηση (European Automobile Manufacturers Association, 2017) και παρά το ότι εξακολουθεί να υπάρχει απόκλιση με την πραγματικότητα, πλέον είναι αρκετά πιο μικρή (European Environment Agency, 2022).



Εικόνα 2.8: Διαφορές NEDC και WLTP
Πηγή: (European Automobile Manufacturers Association, 2017)

2.4.2 Λευκή Βίβλος των μεταφορών

Στη Λευκή Βίβλο του 2011 ([COM/2011/0144](#)) για το μέλλον των μεταφορών στην Ε.Ε., γίνεται σύσταση για μείωση 20% των εκπομπών των μεταφορών από το 2008 έως το 2030 και μείωση τουλάχιστον κατά 60% από το 1990 έως το 2050. Επιπλέον, αναφέρεται ότι το 50% των οχημάτων που χρησιμοποιούνται στις αστικές μεταφορές δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα έως το 2030, με μεταγενέστερο στόχο το ποσοστό αυτό να φτάσει το 100% έως το 2050 (Pernice, 2022).

2.4.3 Ευρωπαϊκή στρατηγική για την κινητικότητα χαμηλών εκπομπών

Οι στόχοι της Λευκής Βίβλου για τις μεταφορές κρίθηκαν ανεπαρκείς σε σχέση με αυτούς που τέθηκαν στη Διάσκεψη του Παρισιού για το κλίμα (COP21) το 2015 αφού, ακόμα και αν επιτευχθεί η συνιστώμενη μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου το 2030, πάλι οι εκπομπές των μεταφορών θα ξεπερνούν κατά 4.5% τα επίπεδα του 1990. (Pernice, 2022).

Η Επιτροπή το 2016 εξέδωσε την ανακοίνωση με τίτλο «Ευρωπαϊκή στρατηγική για την κινητικότητα χαμηλών εκπομπών» ([COM\(2016\)0501](#)), όπου προτείνονταν μέτρα για την επίσπευση της απανθρακοποίησης των μεταφορών εντός της Ε.Ε.. Σημαντική ήταν και η βελτίωση της μεθόδου μέτρησης των εκπομπών των οχημάτων που αναφέρθηκε παραπάνω στο Κεφάλαιο 2.4.1 και εφαρμόζεται από το 2018 έως σήμερα.

2.4.4 Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή επανήλθε το 2019 με ένα νέο σχέδιο δράσης που ονομάστηκε Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία ([COM/2019/0640](#)). Στόχος είναι οι πολιτικές δεσμεύσεις όσον αφορά το κλίμα να μετατραπούν σε νομικές υποχρεώσεις, ώστε να μειωθούν δραστικά οι εκπομπές των μεταφορών και ο αντίκτυπός τους στο περιβάλλον αξιοποιώντας την τεχνολογία και τις σύγχρονες υποδομές. (Pernice, 2022).

Η [Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία](#) έχει στόχο τις μηδενικές καθαρές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου έως το 2050 και την αποσύνδεση της οικονομικής ανάπτυξης από τη χρήση πόρων με την συμμετοχή όλων των κρατών μελών της Ε.Ε. σε αυτό το εγχείρημα, ώστε να μην υπάρξουν περιφέρειες που θα μείνουν στο περιθώριο. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει εγκρίνει μια σειρά από προτάσεις για να προσαρμοστούν οι πολιτικές των κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις μεταφορές, το κλίμα και τη φορολογία, ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας (European Commission, 2019).

Όσον αφορά τον τομέα μεταφορών, οι προτάσεις αυτές θεωρούν πως η βοήθεια της τεχνολογίας με τα ευφυή συστήματα μεταφορών, η αύξηση πωλήσεων οχημάτων μηδενικών εκπομπών και η δημιουργία δικτύων δημοσίων σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι σημαντικοί παράγοντες για την απανθρακοποίησή του και τελικά για την επίτευξη των στόχων που τέθηκαν (European Commission, 2019).

2.4.5 Στρατηγική για βιώσιμη και έξυπνη κινητικότητα – Οι ευρωπαϊκές μεταφορές σε τροχιά μέλλοντος

Το Δεκέμβριο του 2020 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ανακοίνωσε τη Στρατηγική για βιώσιμη και έξυπνη κινητικότητα ([COM/2020/789](#)) που αποτελείται από ένα σύνολο οδηγιών των οποίων ο συνδυασμός μπορεί να εξασφαλίσει μείωση έως 90% στις εκπομπές του τομέα μεταφορών μέχρι το 2050 και έτσι να επιτευχθούν οι στόχοι της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και να καταστεί η Ε.Ε. μια κλιματικά ουδέτερη οικονομία (European Commission, 2020).

Και σε αυτές τις οδηγίες γίνεται εμφανής η υποστήριξη της ηλεκτροκίνησης, αφού προωθείται η ανάπτυξη οχημάτων χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών και η αύξηση της διείσδυσής τους στην αγορά μέσω:

α) της περαιτέρω αυστηροποίησης των προτύπων για τις εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων στα βενζινοκίνητα και πετρελαιοκίνητα οχήματα

β) της ανάπτυξης των υποδομών φόρτισης

γ) της παροχής κινήτρων για την αγορά τέτοιων οχημάτων (επιδοτήσεις, φορολογικές ελαφρύνσεις)

δ) της εφαρμογής της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» (European Commission, 2020).

Επιπλέον, στη στρατηγική αυτή ορίζονται διάφορα ορόσημα που ευνοούν τα ηλεκτρικά οχήματα, όπως:

α) Έως το 2030, τουλάχιστον 30 εκατομμύρια οχήματα μηδενικών εκπομπών θα τεθούν σε κυκλοφορία στις ευρωπαϊκές οδούς

β) Έως το 2030, 100 ευρωπαϊκές πόλεις θα καταστούν κλιματικά ουδέτερες

γ) Έως το 2050, σχεδόν το σύνολο των αυτοκινήτων, των ημιφορτηγών, των λεωφορείων, καθώς και τα νέα βαρέα οχήματα θα είναι μηδενικών εκπομπών (European Commission, 2020).

2.4.6 Το πακέτο «Fit for 55»

Το 2021 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υπέβαλε μια σειρά νομοθετικών προτάσεων και επισκοπήσεων στον τομέα των μεταφορών για την επίτευξη του στόχου της μείωσης των καθαρών εκπομπών κατά 55% το 2030 σε σχέση με το 1990. Το πακέτο [«Fit for 55»](#), όπως ονομάστηκε, αποτελεί μια αναθεώρηση του Συστήματος Εμπορίας Δικαιωμάτων των Εκπομπών (Σ.Ε.Δ.Ε.) αυξάνοντας τα κίνητρα για χρήση καθαρότερων καυσίμων. Παράλληλα, αναθεωρεί τα πρότυπα επιδόσεων για τις εκπομπές CO₂ για νέα αυτοκίνητα και ημιφορτηγά, με απώτερο σκοπό τη μείωση των συνολικών εκπομπών. Ακόμα, στηρίζει τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την εξοικονόμησή της, όπως επίσης και τις πωλήσεις μη ρυπογόνων οχημάτων. Τέλος, με τη φορολόγηση της προέλευσης της ενέργειας εφαρμόζει στην πράξη την πολιτική «ο ρυπαίνων πληρώνει» (European Commission, 2021).

Αναμένονται και άλλες προτάσεις για την ανάπτυξη προτύπων εκπομπών για αυτοκίνητα, ημιφορτηγά, φορτηγά και λεωφορεία για τη μετά Euro 6/VI εποχή (Pernice, 2022) αφού με βάση τα σημερινά δεδομένα οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου αναμένεται να μειωθούν λιγότερο από το προσδοκώμενο για το 2050 (European Environment Agency, 2022). Αντίστοιχα μέτρα και στόχοι υπάρχουν και στην Κίνα όπως και στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Στον Πίνακα 2.2 απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι βασικές πολιτικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης κατά τύπο, στόχο, έτος και κατηγορία.

Πίνακας 2.2: Πολιτικές της Ε.Ε. που συντελούν στην ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης άμεσα ή έμμεσα
Πηγή: European Commission

Τύπος Πολιτικής	Βασικά μέτρα και στόχοι	Έτος Ανακοίνωσης	Κατηγορία
Στρατηγική Ανάπτυξης	Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία: 13εκ. Επιβατικά οχήματα χαμηλών εκπομπών έως το 2025	2019	Ελαφριά Οχήματα (αυτοκίνητα και φορτηγά)
Στόχος	Στόχος για τα μεσαία/βαρέως τύπου οχήματα ώστε το 2026 το 6% με 10% των πωλήσεων να είναι χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών και το 2031 το 7% με 15%.	2019	Μεσαίου και Βαρέως τύπου οχήματα (φορτηγά και επαγγελματικά οχήματα)
Στόχος	Στόχος για 27% με 45% μερίδιο πωλήσεων "καθαρών" λεωφορείων έως το 2026 και 33% με 65% έως το 2031 εκ των οποίων το 50% πρέπει να είναι μηδενικών ρύπων.	2019	Λεωφορεία
Στόχος	Στόχος για τα οχήματα που προμηθεύεται το δημόσιο ώστε το 17,6% με 38,5% να είναι ηλεκτρικά μέχρι το 2025.	2019	Ελαφριά Οχήματα (αυτοκίνητα και φορτηγά)
Στρατηγική Ανάπτυξης	30 εκ. επιβατικά οχήματα μηδενικών ρύπων έως το 2030 και σχεδόν όλα τα επιβατικά και επαγγελματικά οχήματα έως το 2050 (Στρατηγική Βιώσιμης και Έξυπνης Κινητικότητας).	2020	Ελαφριά Οχήματα (αυτοκίνητα και φορτηγά)
Στρατηγική Ανάπτυξης	1 εκ. σημεία επαναφόρτισης προσβάσιμα από το κοινό έως το 2025 και 3 εκατομμύρια έως το 2030 (Στρατηγική για τη βιώσιμη και έξυπνη κινητικότητα).	2020	Υποδομές Φόρτισης
Νόμος	Νόμος για τις κρίσιμες πρώτες ύλες που στοχεύει στη μείωση της εξάρτησης από εξωτερικούς προμηθευτές με έμφαση στην τοπική παραγωγή και ικανότητα ανακύκλωσης.	2022	Βιομηχανία-Κατασκευές
Πρόταση	Οι κανονισμοί Euro 7 ενοποιούν τα όρια για ελαφριά και βαρέα οχήματα, επιδιώκοντας μείωση 35% και 13% των εκπομπών NOx και του συτήματος εξαγωγής αντίστοιχα από τα ελαφριά οχήματα και 56% και 39% από τα βαρέα σε σχέση με το Euro 6/VI. Εισάγονται πρότυπα ελάχιστης αντοχής για τις μπαταρίες αυτοκινήτων και συγκεκριμένα με διατηρητέα απόδοση 80% έως το έτος 5 (ή 100.000 km) και απόδοση 70% μεταξύ 5 και 8 ετών (ή 160.000 km). Ρυθμίζονται επίσης οι εκπομπές από ελαστικά και φρένα για πρώτη φορά.	2022	Ελαφριά Οχήματα (αυτοκίνητα και φορτηγά)
Νόμος	Πρότυπα εκπομπών CO2: 15% μείωση εκπομπών CO2 τόσο για νέα αυτοκίνητα όσο και για φορτηγά έως το 2025 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2021, 55% για τα αυτοκίνητα και 50% για τα φορτηγά μείωση έως το 2030, μείωση 100% έως το 2035.	2022	Ελαφριά Οχήματα (αυτοκίνητα και φορτηγά)
Πρόταση	Η Οδηγία της ΕΕ για τις μπαταρίες αναθεωρείται με επικαιροποιημένη εστίαση στην παραγωγή, τη βιωσιμότητα, την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση των μπαταριών.	2022	Βιομηχανία-Κατασκευές
Πρόταση	Ολοκληρωμένος κανονισμός που ορίζει, μεταξύ άλλων, τη μέγιστη απόσταση μεταξύ των σταθμών φόρτισης, τον ελάχιστο αριθμό και τις απαιτήσεις ισχύος σε διάφορες τοποθεσίες κατά μήκος του μεγάλου οδικού δικτύου της ΕΕ (TEN-T core) και των δευτερευουσών δρόμων της ΕΕ (TEN-T comprehensive) τόσο για ελαφριά όσο και για βαρέα οχήματα, καθώς και ο ορισμός ελάχιστης συνολικής χρέωσης σε κάθε περιοχή με βάση τη διείσδυση των BEV και PHEV (Κανονισμός Εναλλακτικής Υποδομής Καυσίμων).	2022	Υποδομές Φόρτισης
Νόμος	Ο νόμος EU Net Zero Industry Act επισημοποιεί πολλούς από τους στόχους του Πράσινου Βιομηχανικού Σχεδίου, όπως οι καθαρές τεχνολογίες, η επιτάχυνση της δέσμευσης ορίων CO2, η βελτίωση της πρόσβασης στην αγορά, η ενίσχυση των δεξιοτήτων και η προώθηση της καινοτομίας.	2023	Βιομηχανία-Κατασκευές
Πρόταση	Βιομηχανικό Σχέδιο Πράσινης Συμφωνίας: Αποσκοπεί στην αύξηση της ταχύτητας με την οποία η Ευρωπαϊκή Ένωση μπορεί να αναπτύξει net zero projects, βελτιώνοντας την απαραίτητη χρηματοδότηση, την αδειοδότηση, την ανάπτυξη δεξιοτήτων και το εμπόριο.	2023	Βιομηχανία-Κατασκευές
Πρόταση	Πρότυπα εκπομπών CO2: Μέσες μειώσεις κατά 45% έως το 2030, 65% έως το 2035 και 90% έως το 2040. Όλα τα νέα αστικά λεωφορεία θα είναι μηδενικών ρύπων έως το 2030.	2023	Μεσαίου και Βαρέως τύπου οχήματα (φορτηγά και επαγγελματικά οχήματα)

2.5 Νομοθεσία και κίνητρα για ηλεκτροκίνηση στην Ελλάδα

Η αυξανόμενη ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης παγκοσμίως σε συνδυασμό με τις οδηγίες της Ε.Ε. προς τα κράτη-μέλη της οδήγησε στην ανάγκη διαμόρφωσης ενός σύγχρονου νομοθετικού πλαισίου στην Ελλάδα.

Παρακάτω αναφέρονται οι Νόμοι και τα σημαντικότερα σημεία τους σχετικά με τα ηλεκτρικά οχήματα:

[Νόμος 4233/2014](#): Με τις ρυθμιστικές διατάξεις του άρθρου 15 δίνεται η δυνατότητα σε πρατήρια καυσίμων, σε στεγασμένους και υπαίθριους σταθμούς αυτοκινήτων, σε συνεργεία συντήρησης-επισκευών και στα Κ.Τ.Ε.Ο. να μπορούν να εγκαθιστούν σταθμούς φόρτισης για ηλεκτροκίνητα οχήματα.

[Νόμος 4439/2016](#): Με το νόμο αυτό ενσωματώθηκε στην ελληνική νομοθεσία η Οδηγία 2014/94 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, η οποία θεσπίζει μέτρα για την ανάπτυξη υποδομών εναλλακτικών καυσίμων, αλλά και σημείων φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Παράλληλα, ορίζονται και οι απαιτούμενες ελάχιστες προδιαγραφές. Ουσιαστικά γίνεται η αρχή για τη δημιουργία ενός ικανοποιητικού αριθμού σημείων φόρτισης, ώστε να είναι δυνατές και μεγαλύτερες χιλιομετρικές αποστάσεις με ηλεκτρικά οχήματα.

[Νόμος 4513/2018](#): Με το άρθρο 17 είναι πλέον δυνατή η εγκατάσταση σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε δημόσιους κοινόχρηστους χώρους.

[Νόμος 4643/2019](#): Ορίζονται οι βασικοί κανόνες για τους ενδιαφερόμενους όσον αφορά την αγορά της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.

[ΚΥΑ 42863/438/27.5.19](#): Γίνεται καθορισμός των όρων και των τεχνικών προδιαγραφών για την εγκατάσταση συσκευών φόρτισης σε εγκαταστάσεις εξυπηρέτησης οχημάτων, σε χώρους στάθμευσης (ιδιωτικούς και δημόσιους) και σε σημεία δημοσίως προσβάσιμα κατά μήκος του αστικού, υπεραστικού και εθνικού οδικού δικτύου.

[Νόμος 4685/2020](#): Ολοκληρώνεται η ενσωμάτωση της Οδηγίας 2018/844 της Ε.Ε. στην ελληνική νομοθεσία, που είχε ξεκινήσει με το Νόμο 4513/2018. Απλοποιείται η διαδικασία και αίρονται τα ρυθμιστικά εμπόδια για την εγκατάσταση υποδομών φόρτισης σε νέα και υφιστάμενα κτίρια.

[Νόμος 4710/2020](#): Πρόκειται για το σημαντικότερο νόμο για την προώθηση της ηλεκτροκίνησης έως σήμερα, αφού παρέχει οικονομικά και φορολογικά κίνητρα για την αγορά, μίσθωση και χρήση ηλεκτρικών οχημάτων. Επιπλέον, δημιουργείται το

Μητρώο Υποδομών και Φορέων Αγοράς Ηλεκτροκίνησης και ενισχύεται ο χωροταξικός και πολεοδομικός σχεδιασμός των υποδομών για την ηλεκτροκίνηση με πρόβλεψη για τη χωροθέτηση θέσεων στάθμευσης για ηλεκτρικά οχήματα με παράλληλη δυνατότητα φόρτισής τους στις θέσεις αυτές. Τέλος, με το νόμο αυτό συστήνεται αυτοτελές τμήμα ηλεκτροκίνησης στο Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας.

Τα οικονομικά κίνητρα που προβλέπει ο νόμος είναι:

- Απαλλαγή από τα τέλη στάθμευσης σε θέσεις ελεγχόμενης στάθμευσης για τα ηλεκτρικά οχήματα ή όσα εκπέμπουν έως 50 gr CO₂/χλμ.
- Κίνητρα σε επιχειρήσεις παραγωγής ηλεκτρικών οχημάτων και αγαθών ή ειδών σχετικών με τα ηλεκτρικά οχήματα στην Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας και στην περιφερειακή ενότητα Αρκαδίας της Περιφέρειας Πελοποννήσου
- Επιβολή περιβαλλοντικού τέλους και απαγόρευση εισαγωγής σε μεταχειρισμένα οχήματα που κρίνονται παλαιά και ρυπογόνα.

Τα φορολογικά κίνητρα που προβλέπει ο νόμος είναι:

- Απαλλαγές από το εισόδημα για δαπάνες ή παραχώρηση οχήματος μηδενικών ή χαμηλών ρύπων έως 50 γρ. CO₂/χλμ.
- Προσαυξημένη έκπτωση για συγκεκριμένες δαπάνες οχημάτων μηδενικών ή χαμηλών ρύπων που αφορούν στους εργαζόμενους, τις επιχειρήσεις και την προστασία του περιβάλλοντος
- Φορολογικές αποσβέσεις στα μέσα μεταφοράς μηδενικών ή χαμηλών ρύπων.
- Εξαίρεση αγοράς αυτοκινήτου μηδενικών ρύπων από την ετήσια αντικειμενική δαπάνη και δαπάνη απόκτησης περιουσιακών στοιχείων.

(Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, 2020)

[Νόμος 4936/2022](#): Με το άρθρο 12 του Εθνικού Κλιματικού Νόμου για μετάβαση στην κλιματική ουδετερότητα και την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή διατυπώνονται μελλοντικοί στόχοι και προτάσεις που αφορούν την ηλεκτροκίνηση, σημαντικότεροι εκ των οποίων είναι οι εξής:

- Εξασφάλιση επαρκών σημείων φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.
- Το 25% των νέων εταιρικών αυτοκινήτων θα έχει εκπομπές λιγότερες από 50g CO₂/km από το 2023.

- Το 33% των νέων επιβατηγών αυτοκινήτων δημόσιας χρήσης (ΤΑΞΙ) και των μισθωμένων οχημάτων θα έχουν μηδενικές εκπομπές από το 2025
- Το 2030 θα επιτρέπεται η πώληση μόνο οχημάτων μηδενικών εκπομπών όσον αφορά τα νέα επιβατικά και ελαφρά επαγγελματικά οχήματα.

Εκτός των ανωτέρω η Ελληνική Κυβέρνηση στις 7 Αυγούστου 2020 προκήρυξε τη δράση «Κινούμαι Ηλεκτρικά» ([ΥΠΕΝ/ΕΣΠΑΕΝ/77472/520](#)) που αποτελούσε την πρώτη επιδότηση για την αγορά ηλεκτρικών οχημάτων και φορτιστών. Το πρόγραμμα της δράσης ενισχύθηκε με νέα ΚΥΑ στις 27 Ιουλίου 2022 ([ΥΠΕΝ/ΑΤΗ/70517/238](#)). Στη δράση «Κινούμαι Ηλεκτρικά 2» σχεδόν αυξήθηκε το συνολικό ποσό της επιδότησης που δινόταν στον πρώτο κύκλο της δράσης. Βασικά χαρακτηριστικά του 2^{ου} κύκλου του προγράμματος είναι:

- Επιδοτείται το 30% της αγοράς ηλεκτρικού οχήματος με μέγιστο ποσό επιδότησης τις 8000€.
- Ομοίως επιδοτούνται οι μακροχρόνιες μισθώσεις, χωρίς να υπάρχει υποχρέωση εξαγοράς.
- Επιπλέον δίνονται 1000€ στο ποσό της επιδότησης, αν γίνει απόσυρση παλαιού οχήματος.
- Επιπλέον επιδότηση 1000€ στην αγορά οχήματος από ΑΜΕΑ.
- Επιπλέον 1000€ για τρίτεκνες οικογένειες (όπου και τρία τέκνα είναι εξαρτώμενα) και πρόσθετα 1000€ ανά επιπλέον εξαρτώμενο τέκνο με μέγιστο ποσό τις 4000€
- Επιπλέον 1000€ για αγορά αυτοκινήτου σε νέους έως 29 ετών.
- Επιδότηση 500€ στην αγορά φορτιστή.

Επιδότησεις δίνονται εκτός από ιδιώτες και σε εταιρείες:

- 30% κατά την αγορά ηλεκτρικού αυτοκινήτου με μέγιστο ποσό τις 8.000€ για έως 20 οχήματα και 20% με μέγιστο ποσό τις 6.000€ για 21 οχήματα και πάνω [ομοίως ισχύει και αν η αγορά του οχήματος γίνεται για λόγους επίδειξης (test drive)].
- 1000 € ανά όχημα επιβράβευση απόσυρσης.
- Επιδότηση 30% και έως 8.000€ για μακροχρόνιες μισθώσεις, χωρίς υποχρέωση εξαγοράς για έως 20 οχήματα και 20% επιδότηση και έως 6.000€ για 21 οχήματα και πάνω.

- Σε εταιρείες που δραστηριοποιούνται σε νησιά δίνονται επιπλέον 4000€ ανά αυτοκίνητο.
- Επιδότηση 400€ για ηλεκτρικό φορτιστή ανά σημείο φόρτισης.

Να επισημάνουμε πως με βάση τα όσα ισχύουν σήμερα (2023) στην Ελλάδα, τα αμιγώς ηλεκτρικά αυτοκίνητα δεν καταβάλλουν τέλος ταξινόμησης, τεκμήριο και φόρο πολυτελείας για εργοστασιακή τιμή έως 50.000€. Επίσης, απαλλάσσονται από την καταβολή τελών κυκλοφορίας και μπορούν να κινούνται ελεύθερα στον δακτύλιο Αθηνών.

Παρόμοια είναι και τα μέτρα ενίσχυσης της ηλεκτροκίνησης που έχουν θεσπιστεί και σε άλλες χώρες της Ευρώπης αλλά και σε Κίνα και Η.Π.Α.. Είναι, λοιπόν, εμφανής η προσπάθεια προώθησης των οχημάτων μηδενικών εκπομπών από όλα τα κράτη και σε συνδυασμό με την τεχνολογική υπεροχή τους έναντι των συμβατικών οχημάτων και του μικρότερου λειτουργικού κόστους (Rezvani, Z., Jansson, J. & Bodin, J, 2015) εξηγείται η διαρκής αύξηση των πωλήσεων και του μεριδίου τους στην αγορά κατά τα τελευταία έτη (Statista, 2022).

2.6 Στατιστικά στοιχεία

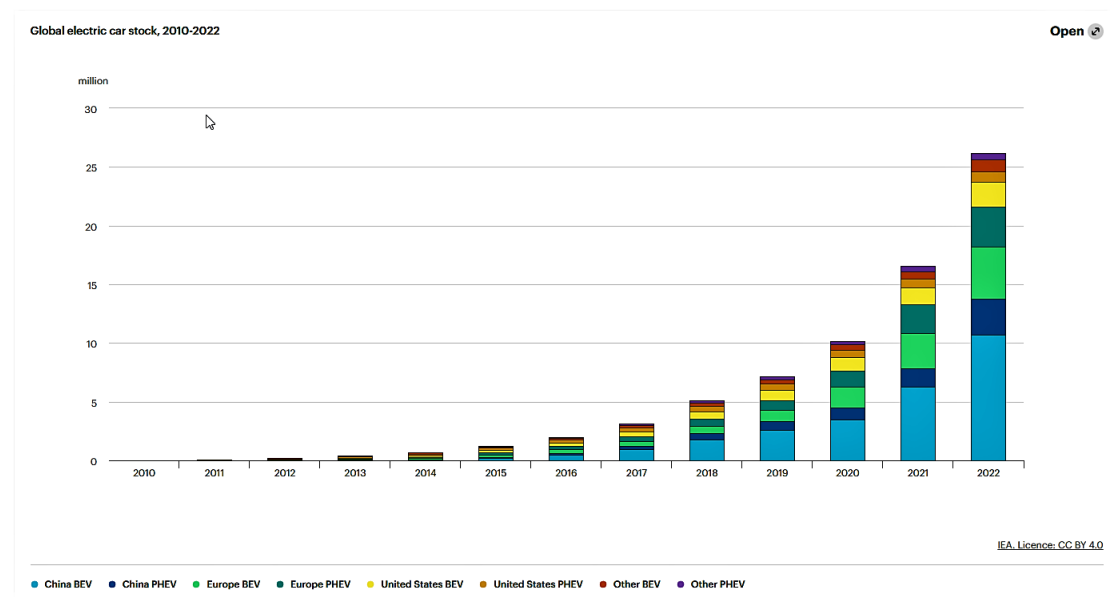
Σταδιακά από το 2015 και έπειτα τα οχήματα με ηλεκτρικούς συσσωρευτές καταλαμβάνουν την αγορά αυτοκινήτων. Οι πολιτικές προώθησής τους, η αυστηροποίηση των ορίων εκπομπών ρύπων, η τάση απεξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και η βελτίωση της τεχνολογίας των μπαταριών οδήγησαν σε αυτή την άνοδο (Muratori, M., Alexander, M., Arent, D. et al, 2021). Παράλληλα, αυξάνονται και οι δημόσιοι σταθμοί φόρτισης που κάνουν δυνατή την πραγματοποίηση μεγαλύτερων χιλιομετρικών αποστάσεων, όπως και η διαθεσιμότητα νέων μοντέλων διευρύνοντας έτσι τις διαθέσιμες επιλογές των καταναλωτών.

2.6.1 Στοιχεία αύξησης κυκλοφορίας ηλεκτρικών οχημάτων

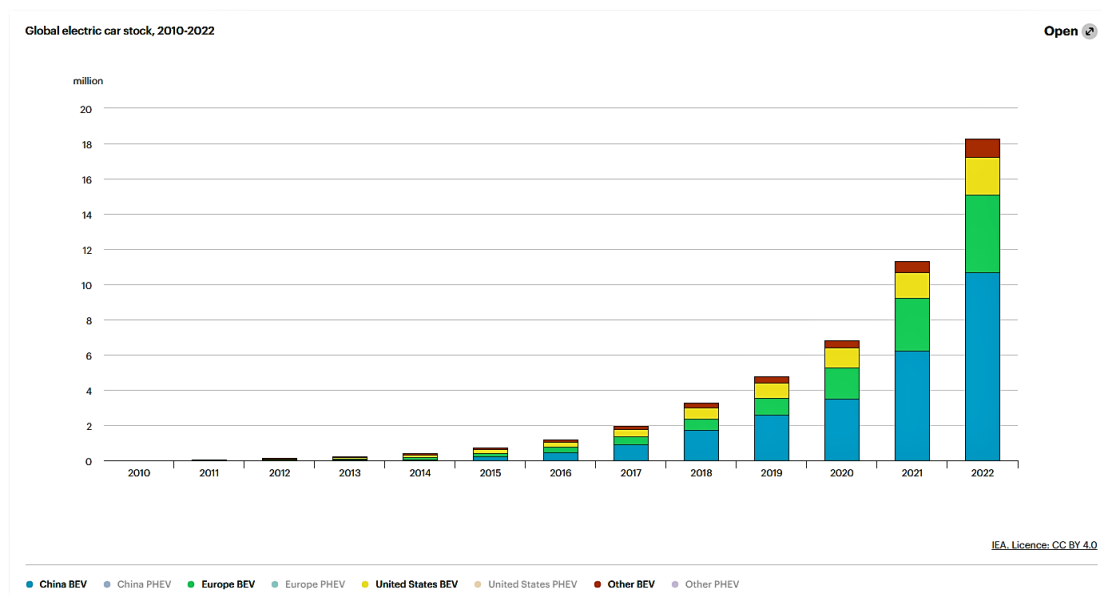
Το 2021 οι πωλήσεις ηλεκτρικών αυτοκινήτων έκαναν νέο ρεκόρ παρά την πανδημία του Covid-19 και τα προβλήματα που δημιούργησε στην αλυσίδα εφοδιασμού και τις ελλείψεις σε τσιπ ημιαγωγών. Σύμφωνα με τη Διεθνή Οργάνωση Ενέργειας (International Energy Agency – IEA) το 2012 πουλήθηκαν 120.000 ηλεκτρικά οχήματα όλο το χρόνο ενώ το 2021 τόσα είχαν πουληθεί σε μία μόλις εβδομάδα! Έτσι, το 2021 κυκλοφορούσαν στους δρόμους 16,5 εκατομμύρια ηλεκτρικά (BEVs – Battery Electric Vehicles) και υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (PHEVs - Plug-In Hybrid Electric Vehicles).

Η ίδια αυξητική τάση συνεχίστηκε και το 2022 παρά τη μακροοικονομική και πολιτική αβεβαιότητα και την άνοδο των τιμών στα υλικά και την ενέργεια. Το 2022 πουλήθηκαν 10 εκατομμύρια ηλεκτρικά οχήματα (BEVs και PHEVs), αύξηση 55% σε σχέση με το 2021 και ο συνολικός αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων σε κυκλοφορία στους δρόμους έφτασε τα 26,5 εκατομμύρια (αύξηση 60% από το 2021). Συνέβη, μάλιστα, την ίδια χρονιά που οι πωλήσεις οχημάτων γενικά παρουσίασαν πτώση 3%.

Στα διαγράμματα των Εικόνων 2.9, 2.10, 2.11 φαίνεται η ετήσια αύξηση των ηλεκτρικών (BEVs) και των υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων (PHEVs).

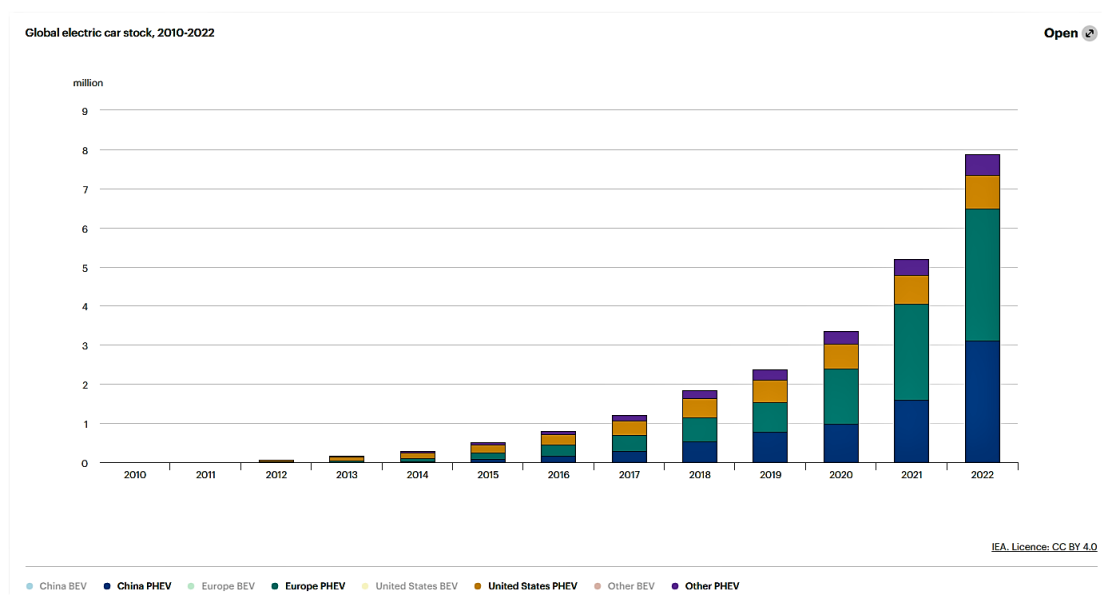


Εικόνα 2.9: Αριθμός BEVs και PHEVs που κυκλοφορούν στους δρόμους
Πηγή: www.iea.org



Εικόνα 2.10: Αριθμός BEVs που κυκλοφορούν στους δρόμους

Πηγή: www.iea.org

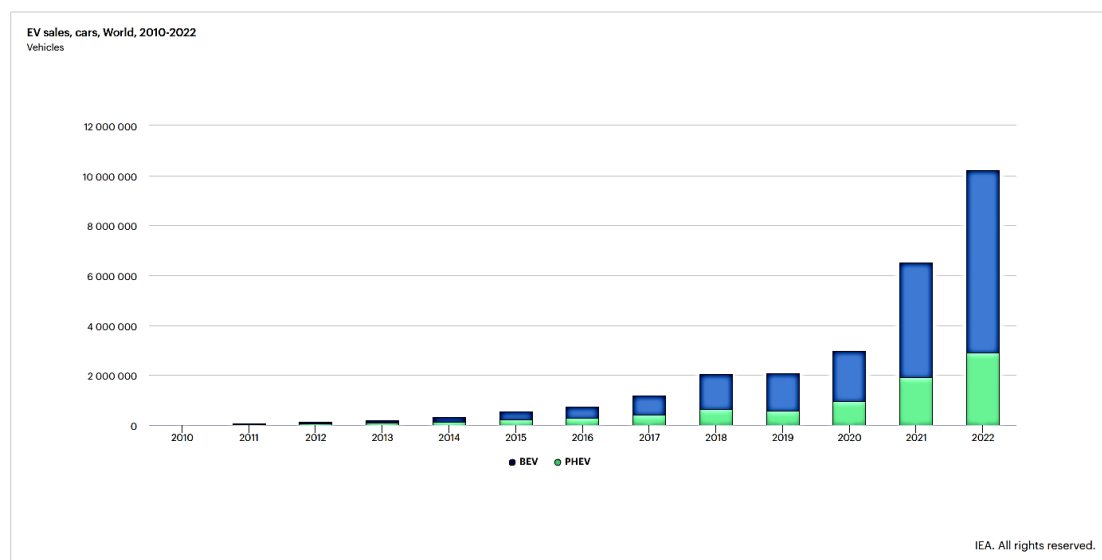


Εικόνα 2.11: Αριθμός PHEVs που κυκλοφορούν στους δρόμους

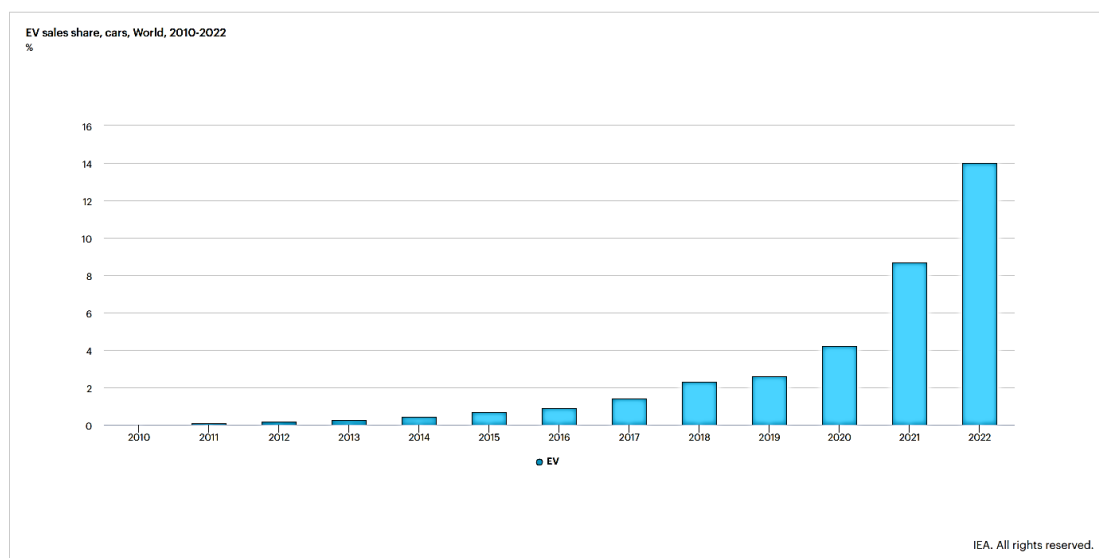
Πηγή: www.iea.org

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι την πενταετία 2017-2022 οι πωλήσεις των ηλεκτρικών οχημάτων αυξήθηκαν από 1 εκατομμύριο σε περισσότερα από 10, ενώ την πενταετία 2012-2017 είχαν αυξηθεί από 100.000 σε μόλις 1 εκατομμύριο! Το ποσοστό πωλήσεων των ηλεκτρικών αυτοκινήτων εκτινάχθηκε από το 9% το 2021 στο 14% το 2022, ποσοστό δεκαπλάσιο σε σχέση με το 2017 (International Energy Agency (IEA), 2023).

Τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα (BEVs), αποτελούν το 70% της ετήσιας ανάπτυξης ηλεκτρικών οχημάτων (EVs) για το έτος 2022, κάτι που περίπου συνέβαινε και τα προηγούμενα χρόνια (Βλ. Εικόνες 2.12, 2.13), αφού από το 2017 η αύξηση της αυτονομίας, των σημείων φόρτισης και των διαθέσιμων πλήρως ηλεκτρικών μοντέλων (BEVs) συνέβαλαν στο να μειωθεί το ενδιαφέρον για τα υβριδικά ηλεκτρικά μοντέλα (PHEVs). Μελλοντικά αναμένεται να περιοριστεί η παραγωγή PHEVs, αφού με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, η χωρητικότητα των μπαταριών και η ταχύτητα φόρτισής τους θα καταστήσει τα BEVs ικανά να μπορούν να εκτελούν οποιαδήποτε απόσταση και επομένως τα PHEVs θα είναι εντελώς περιττά (Statista, 2022). Ήδη οι κατασκευαστές οχημάτων τα τελευταία τέσσερα έτη έχουν ρίξει το μεγαλύτερο μέρος των επενδύσεων τους στη δημιουργία νέων αμιγώς ηλεκτρικών μοντέλων και κάποιοι έχουν εγκαταλείψει εντελώς την μελέτη και κατασκευή PHEVs (European Automobile Manufacturers Association, 2023).



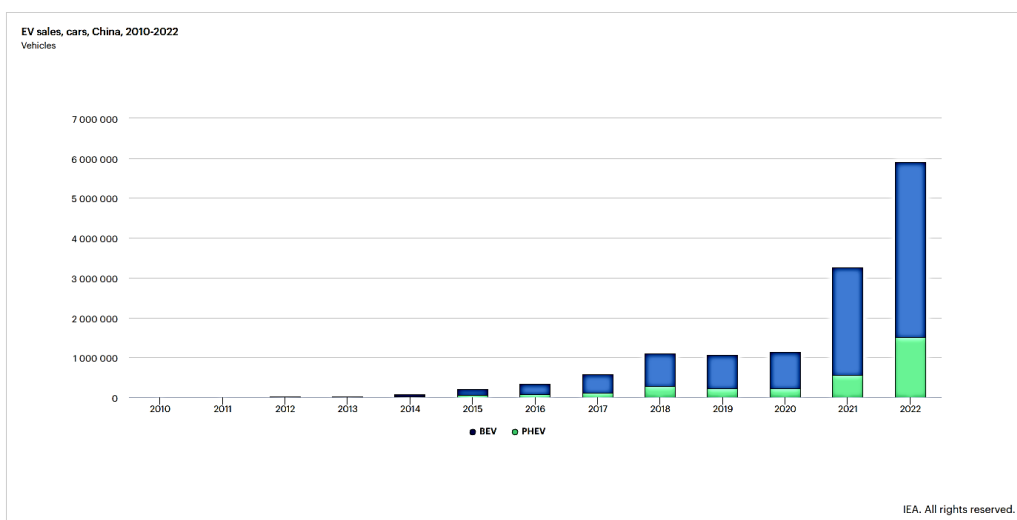
Εικόνα 2.12: Παγκόσμιες πωλήσεις BEV και PHEV ανά έτος
Πηγή: www.iea.org



Εικόνα 2.13: Ποσοστό πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων παγκοσμίως επί του συνόλου των πωλήσεων ανά έτος

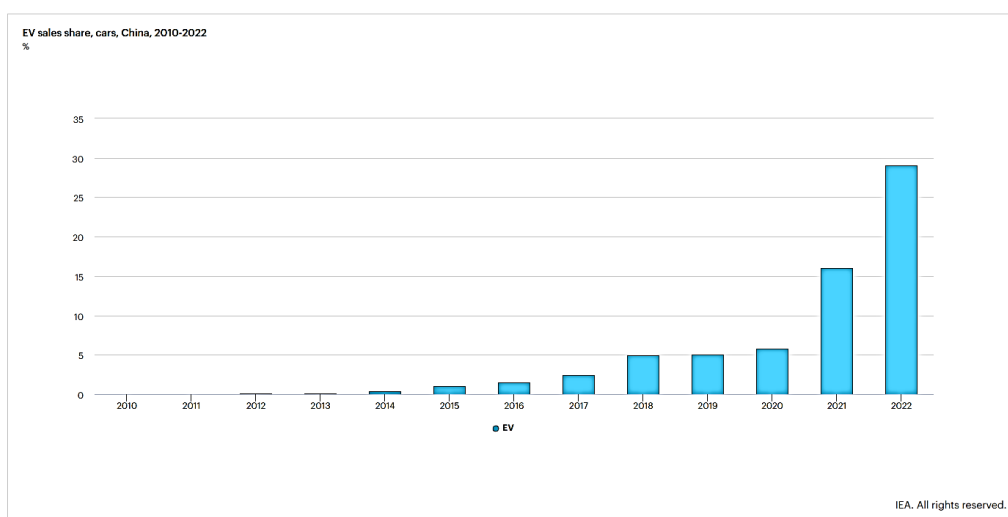
Πηγή: www.iea.org

Η Κίνα αποτελεί πρωτοπόρο στην κυκλοφορία ηλεκτρικών οχημάτων με συνολικά 13,8 εκατομμύρια οχήματα (BEVs και PHEVs) να βρίσκονται στους δρόμους της στο τέλος του 2022 (Βλ. Εικόνα 2.14). Μάλιστα, σε σχέση με το 2021 οι πωλήσεις αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων αυξήθηκαν κατά 60% φτάνοντας τα 4,5 εκατομμύρια οχήματα ενώ τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα σχεδόν τριπλασιάστηκαν φτάνοντας τα 1,5 εκατομμύρια. Το μερίδιο των ηλεκτρικών οχημάτων για το 2022 στις εγχώριες πωλήσεις ήταν 29% σε σχέση με το 19% το 2021 (Βλ. Εικόνα 2.15). Η αύξηση που παρουσιάζεται είναι εν μέρει και αποτέλεσμα μιας υποστηρικτικής πολιτικής απέναντι στην ηλεκτροκίνηση παρόμοια με αυτήν που εφαρμόζεται και σε Ευρώπη. Στόχος της Κίνας είναι μερίδιο πωλήσεων των ηλεκτρικών αυτοκινήτων να είναι 50% στις «περιοχές ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης» και 40% σε ολόκληρη τη χώρα έως το 2030. Στόχος που αναμένεται να επιτευχθεί, αφού σε πρώτη φάση το πλάνο ήταν για μερίδιο πωλήσεων 20% το 2025 και ήδη από το 2022 κατάφερε 29%.



Εικόνα 2.14: Πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων (BEV και PHEV) στην Κίνα ανά έτος

Πηγή: www.iea.org

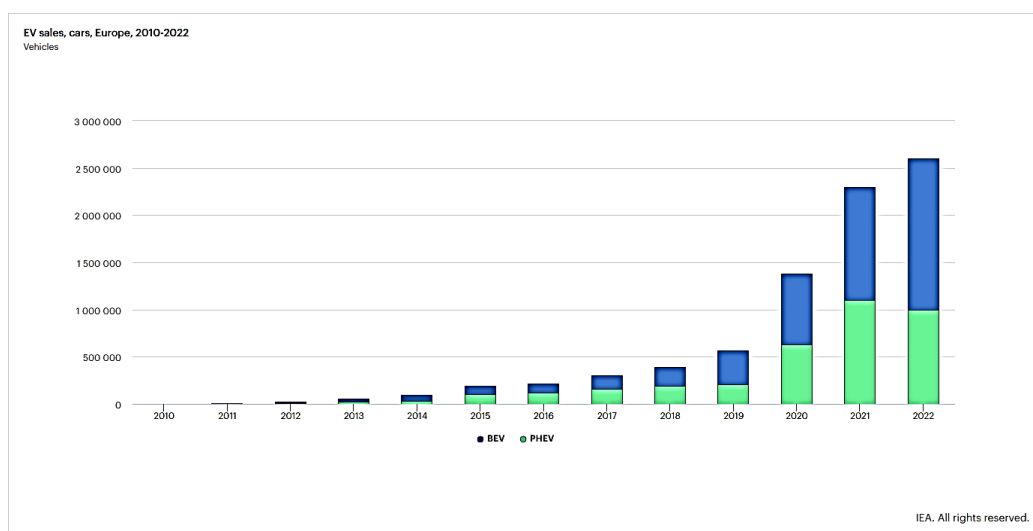


Εικόνα 2.15: Ποσοστό πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων στην Κίνα επί του συνόλου των πωλήσεων ανά έτος

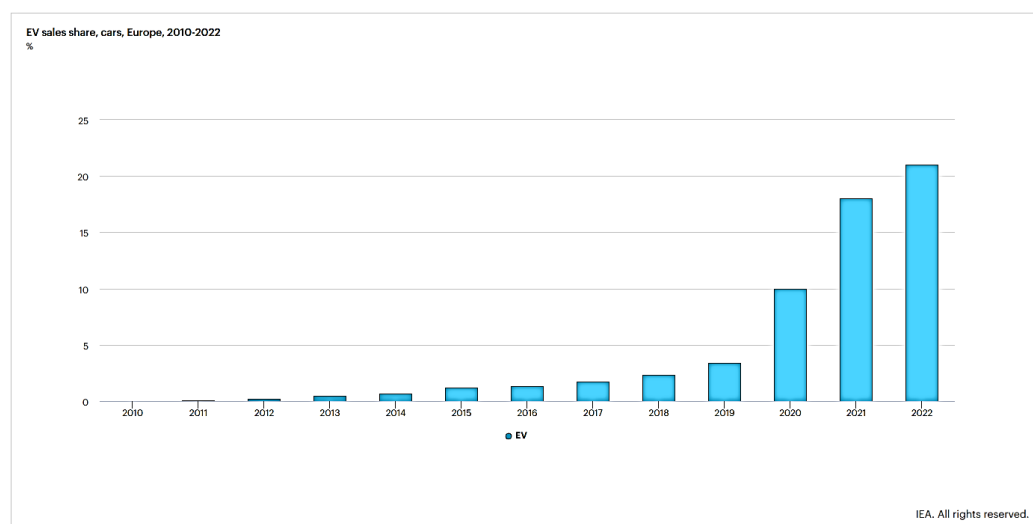
Πηγή: www.iea.org

Η Ευρώπη ακολουθεί την Κίνα στη δεύτερη θέση με σταθερή ανάπτυξη παρά τις διαταραχές. Οι πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων αυξήθηκαν κατά 15% το 2022 σε σχέση με το 2021 φτάνοντας τα 2,8 εκατομμύρια (Βλ. Εικόνα 2.16). Ωστόσο, τα προηγούμενα χρόνια η ετήσια αύξηση πωλήσεων ήταν μεγαλύτερη. Συγκεκριμένα, το 2021 ήταν 65% ενώ ο μέσος όρος της τριετίας 2017-2019 ήταν 40%. Η επιβράδυνση αυτή μπορεί να οφείλεται στην πολύ μεγάλη αύξηση πωλήσεων που σημειώθηκε το 2020 και 2021 σε συνδυασμό με την άνοδο των τιμών της ενέργειας (ρεύμα και φυσικό αέριο) το 2022 που οδήγησαν τους καταναλωτές σε μεγαλύτερη επιφυλακτικότητα. Επιπλέον, η αύξηση αυτή στην ενέργεια οδήγησε και σε αύξηση στις τιμές των αυτοκινήτων. Το 2022 τα BEVs στην Ευρώπη αυξήθηκαν κατά 30% (σε σχέση με 65% το 2021), ενώ τα PHEVs μειώθηκαν κατά 3%. Όπως φαίνεται στο

διάγραμμα της Εικόνας 2.17 το μερίδιο των πωλήσεων των ηλεκτρικών οχημάτων (BEVs και PHEVs) έφτασε το 21% (από 18% το 2021 και 10% το 2020) με τις Νορβηγία, Σουηδία, Ολλανδία, Γερμανία, Αγγλία και Γαλλία να έχουν τα μεγαλύτερα ποσοστά ηλεκτρικών επί του συνόλου των πωλήσεων αυτοκινήτων (Βλ. Πίνακα 2.3). Σε όρους όγκου πωλήσεων η Γερμανία είναι η μεγαλύτερη αγορά στην Ευρώπη με 830.000 πωλήσεις ηλεκτρικών. Ακολουθείται από Αγγλία (370.000) και Γαλλία (330.000). Οι πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων στην Ευρώπη αναμένεται να συνεχίσουν να αυξάνονται ιδίως μετά τις απαιτήσεις και τους κανόνες του πακέτου «Fit for 55» και τα αυστηρότερα όρια εκπομπών CO₂ που εισάγονται αλλά το μηχανισμό επιβράβευσης των κατασκευαστών αυτοκινήτων που πετυχαίνουν μερίδιο ηλεκτρικών αυτοκινήτων 25% επί του συνόλου των πωλήσεών τους.



Εικόνα 2.16: Πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων (BEV και PHEV) στην Ευρώπη ανά έτος
Πηγή: www.iea.org



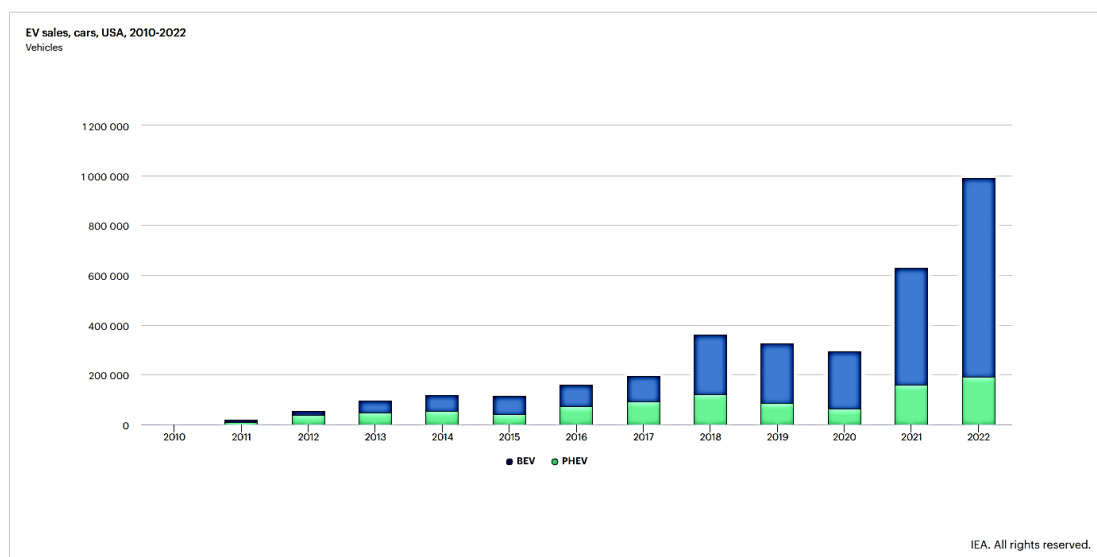
Εικόνα 2.17: Ποσοστό πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων στην Ευρώπη επί του συνόλου των πωλήσεων ανά έτος
Πηγή: www.iea.org

Πίνακας 2.3: Ποσοστό ηλεκτρικών επί του συνόλου των πωλήσεων οχημάτων για συγκεκριμένες χώρες της Ευρώπης (2022)

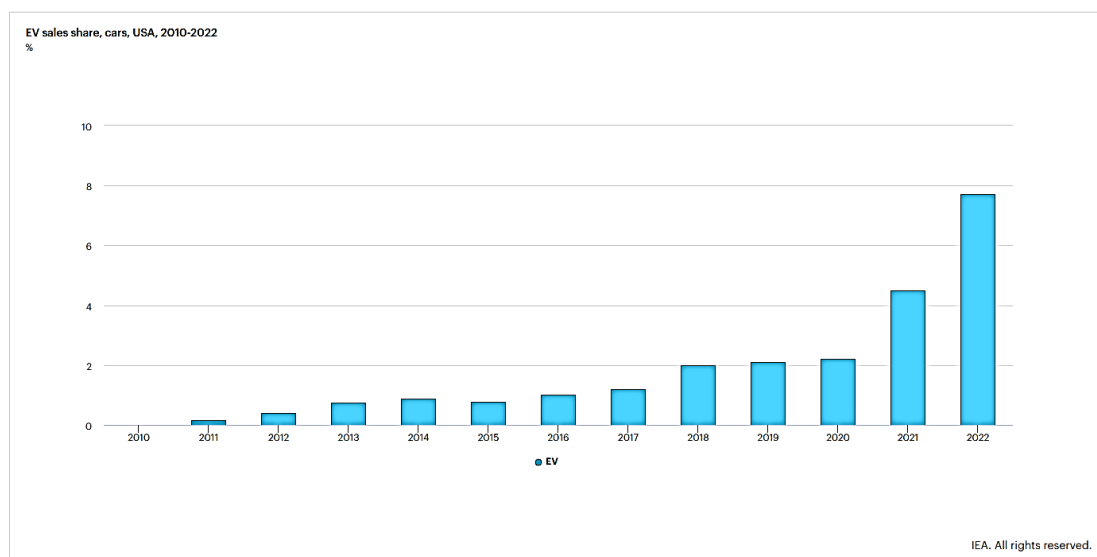
Πηγή: www.iea.org

ΧΩΡΑ	Ποσοστό
Νορβηγία	88%
Σουηδία	54%
Ολλανδία	35%
Γερμανία	31%
Αγγλία	23%
Γαλλία	21%

Οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής έρχονται τρίτες στην προσπάθεια του εξηλεκτρισμού του στόλου οχημάτων τους. Οι πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων αυξήθηκαν το 2022 κατά 55% σε σχέση με το 2021 (Βλ. Εικόνα 2.18). Πρωταγωνιστές και εδώ ήταν τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα (BEVs) που οι πωλήσεις τους αυξήθηκαν κατά 70% φτάνοντας τις 800.000 ενώ των PHEVs αυξήθηκαν κατά 15%. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι ότι αυτές οι πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων επιτεύχθηκαν παρόλο που οι συνολικές πωλήσεις αυτοκινήτων μειώθηκαν κατά 8%, ποσοστό πολύ μεγαλύτερο από τον παγκόσμιο μέσο όρο (-3%). Το σύνολο των ηλεκτρικών οχημάτων που κυκλοφορούν στους δρόμους των Η.Π.Α. έφτασε τα 3 εκατομμύρια αυξημένο κατά 40% σε σχέση με το 2021, ενώ το μερίδιο των ηλεκτρικών επί του συνόλου των πωλήσεων οχημάτων άγγιξε το 8% από 5% που ήταν το 2021 (Βλ. Εικόνα 2.19). Η αγορά ηλεκτρικών οχημάτων στις Η.Π.Α. εξελίσσεται πιο αργά -παρά την πολύ καλή υποδομή σε σταθμούς φόρτισης- λόγω των μεγάλων αποστάσεων που δημιουργούν ανησυχίες στους οδηγούς. Ωστόσο, οι πωλήσεις αναμένεται να αυξηθούν περισσότερο με τη νέα πολιτική για απανθρακοποίηση των Η.Π.Α. (U.S. Department of Energy, 2023).



Εικόνα 2.18: Πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων (BEV και PHEV) στις ΗΠΑ ανά έτος
Πηγή: www.iea.org

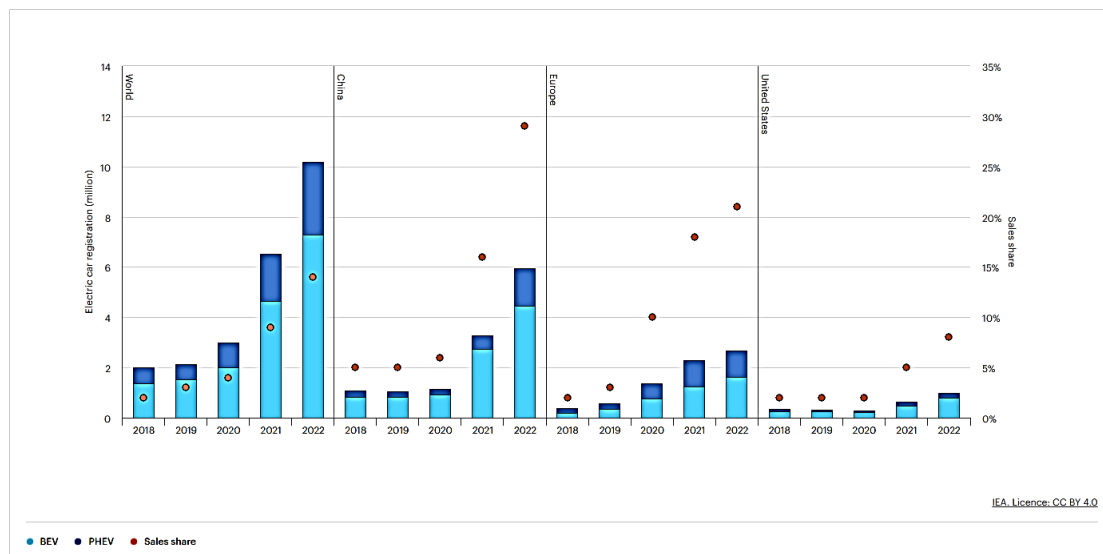


Εικόνα 2.19: Ποσοστό πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων στις ΗΠΑ επί του συνόλου των πωλήσεων ανά έτος
Πηγή: www.iea.org

Το 2023-2024 αναμένεται ευνοϊκό για την περαιτέρω εξάπλωση της ηλεκτροκίνησης. Ήδη οι πρώτες εκτιμήσεις δείχνουν πωλήσεις 14 εκατομμυρίων ηλεκτρικών οχημάτων παγκοσμίως που ισοδυναμούν με αύξηση 35% σε σχέση με το 2022. Αν αυτό επιτευχθεί, τότε το παγκόσμιο μερίδιο πωλήσεων ηλεκτρικών αυτοκινήτων θα αυξηθεί σε 18% από 14% το 2022. Η άνοδος της τιμής του πετρελαίου αλλά και οι νέες εξελίξεις όπως η πρόταση της Υπηρεσίας Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α. (Environment Protection Agency – EPA) για περαιτέρω αυστηροποίηση των ορίων

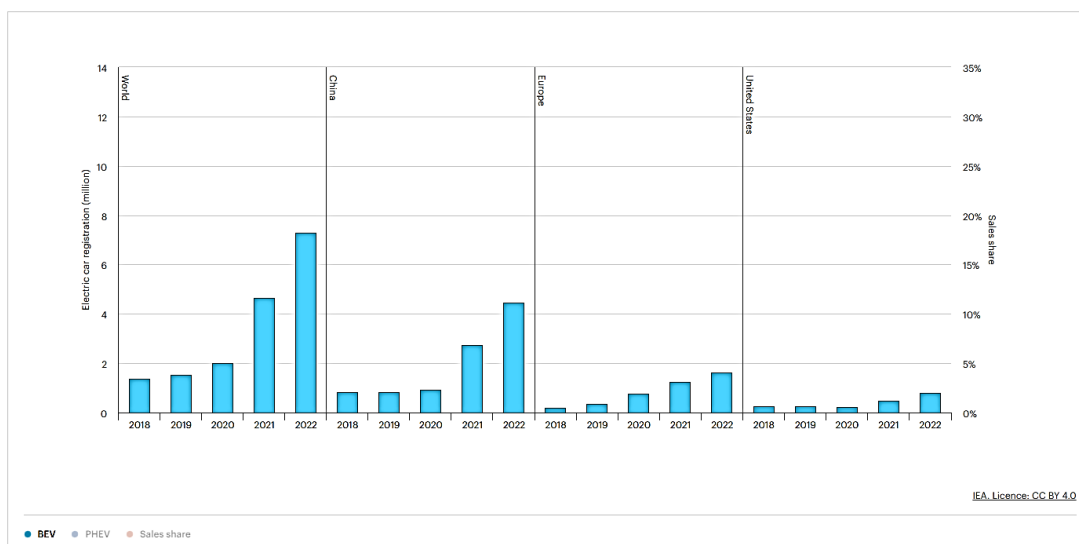
εκπομπών ρύπων για τα αυτοκίνητα είναι παράγοντες που ενισχύουν τις προβλέψεις αυτές (International Energy Agency (IEA), 2023). Σημαντικό είναι να αναφερθεί και η έκρηξη στην ηλεκτροκίνηση που παρουσιάστηκε το 2022 σε κάποιες αναδυόμενες αγορές. Στην Ινδία, την Ταϊλάνδη και την Ινδονησία συνολικά οι πωλήσεις ηλεκτρικών αυτοκινήτων υπερτριπλασιάστηκαν σε σχέση με το 2021, φτάνοντας σχεδόν τις 80.000. Οι πωλήσεις το 2022 ήταν 7 φορές υψηλότερες από ό,τι το 2019, πριν από την πανδημία Covid-19. Πρόκειται για κάτι αξιοσημείωτο, αφού στις περιοχές αυτές λόγω της υψηλής τιμής των ηλεκτρικών οχημάτων σε σχέση με τα συμβατικά αυτοκίνητα, της έλλειψης κρατικών επιδοτήσεων, όπως επίσης, και των ανύπαρκτων υποδομών φόρτισης, αυτοί οι δείκτες ανάπτυξης αναμενόταν να παρουσιαστούν πιο μετέπειτα χρονικά (International Energy Agency (IEA), 2023).

Στα επόμενα διαγράμματα των Εικόνων 2.20, 2.21, και 2.22 δίνεται μια συγκεντρωτική εικόνα όσων αναφέρθηκαν παραπάνω.



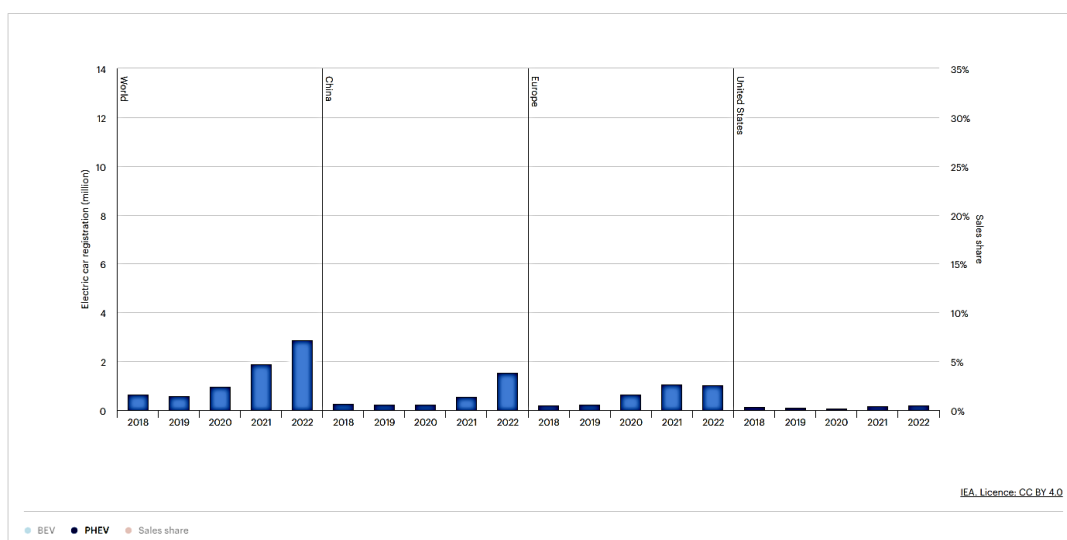
Εικόνα 2.20: Αριθμός πωλήσεων PHEVs και BEVs και ποσοστά επί των συνολικών πωλήσεων

Πηγή: www.iea.org



Εικόνα 2.21: Αριθμός πωλήσεων BEVs

Πηγή: www.iea.org



Εικόνα 2.22: Αριθμός πωλήσεων PHEVs

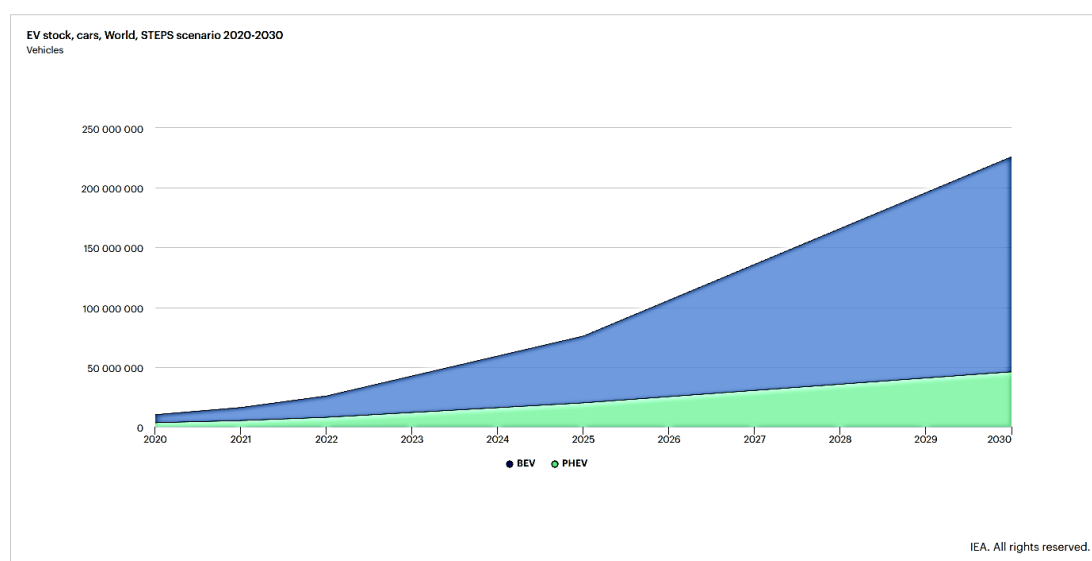
Πηγή: www.iea.org

Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας [International Energy Agency (IEA)] για να μπορέσει να προσεγγίσει και να εξετάσει το μέλλον της ηλεκτροκίνησης έχει αναπτύξει το μοντέλο σεναρίων GEC 2022 (Global Energy and Climate 2022). Τα σενάρια αυτά δεν είναι προβλέψεις, δεν περιέχουν μια ενιαία άποψη σχετικά με το τι μπορεί να γίνει στο μακροπρόθεσμο μέλλον. Αντίθετα, αυτό που επιδιώκουν να κάνουν είναι να επιτρέψουν στους ενδιαφερόμενους να συγκρίνουν διαφορετικές πιθανές εκδοχές του μέλλοντος. Βασίζονται στα πιο πρόσφατα δεδομένα της αγοράς, τις ανακοινωμένες πολιτικές/φιλοδοξίες, τις τεχνολογικές προοπτικές και τις τάσεις της αγοράς μέχρι το πρώτο τρίμηνο του 2023. Λαμβάνουν υπόψη μακροοικονομικούς παράγοντες όπως ο πληθυσμός, οι οικονομικές εξελίξεις και οι τιμές, καθώς και

τεχνοοικονομικές εισροές, όπως οι πόροι ορυκτών καυσίμων ή το κόστος τεχνολογίας.

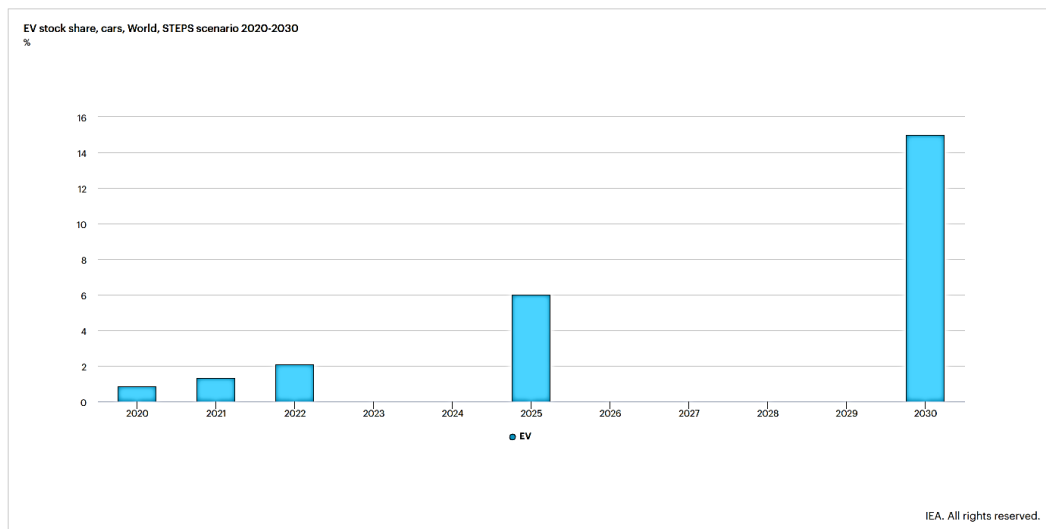
Βασικά σενάρια στο GEC 2022 είναι το APS (Announced Pledges Scenario) και το STEPS (Stated Policies Scenario). Στο APS θεωρείται ότι οι χώρες εφαρμόζουν πλήρως τους εθνικούς τους στόχους ενώ στο STEPS δεν θεωρείται δεδομένο ότι οι κυβερνήσεις θα επιτύχουν όλους τους ανακοινωθέντες στόχους. Το STEPS, πραγματοποιεί μια πιο αναλυτική, ανά τομέα, εξέταση του τι έχει πράγματι τεθεί σε εφαρμογή για την επίτευξη αυτών και άλλων στόχων που σχετίζονται με την ενέργεια, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο τις υπάρχουσες πολιτικές και μέτρα αλλά και εκείνα που βρίσκονται υπό ανάπτυξη. Επομένως, το STEPS αποτελεί μια πιο συντηρητική προσέγγιση.

Σύμφωνα με το σενάριο STEPS ο συνολικός στόλος των ηλεκτρικών οχημάτων (εξαιρουμένων των δικύκλων/τρικύκλων) αυξάνεται από σχεδόν 30 εκατομμύρια το 2022 σε περίπου 225 εκατομμύρια το 2030 (Βλ. Εικόνα 2.23) επιτυγχάνοντας μέσο ετήσιο ρυθμό αύξησης περίπου 30%. Σε αυτό το σενάριο, τα EV αντιπροσωπεύουν πάνω από το 14% του στόλου των οχημάτων σε κυκλοφορία μέχρι το 2030 (Βλ. Εικόνα 2.24). Οι συνολικές πωλήσεις EV φθάνουν πάνω από 20 εκατομμύρια το 2025 και πάνω από 35 εκατομμύρια το 2030 (Βλ. Εικόνα 2.25), αντιπροσωπεύοντας πάνω από το 20% και το 35% του συνόλου των πωλήσεων οχημάτων, αντίστοιχα (Βλ. Εικόνα 2.26).

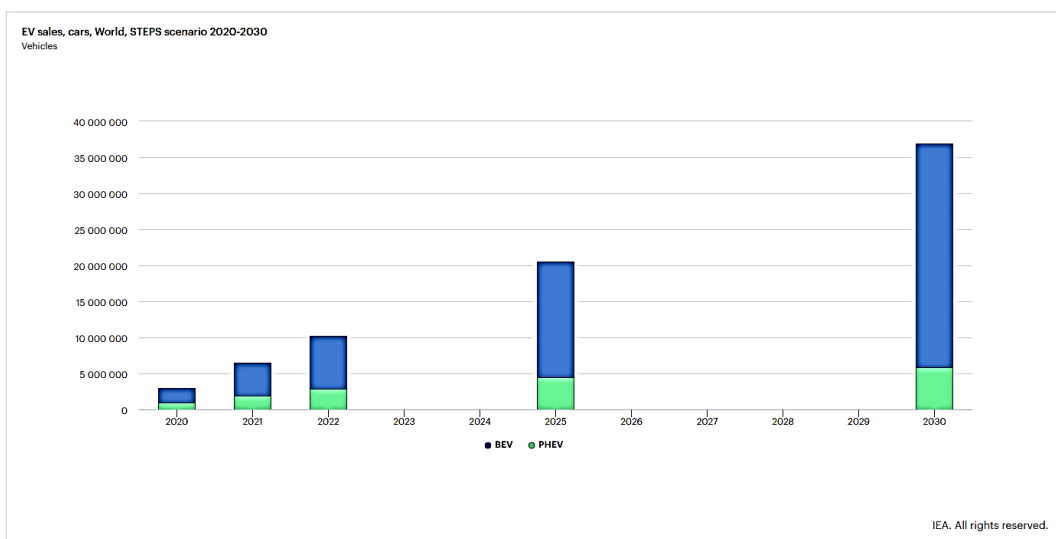


Εικόνα 2.23: Πιθανός μελλοντικός αριθμός BEVs και PHEVs σε κυκλοφορία παγκοσμίως με βάση το STEPS

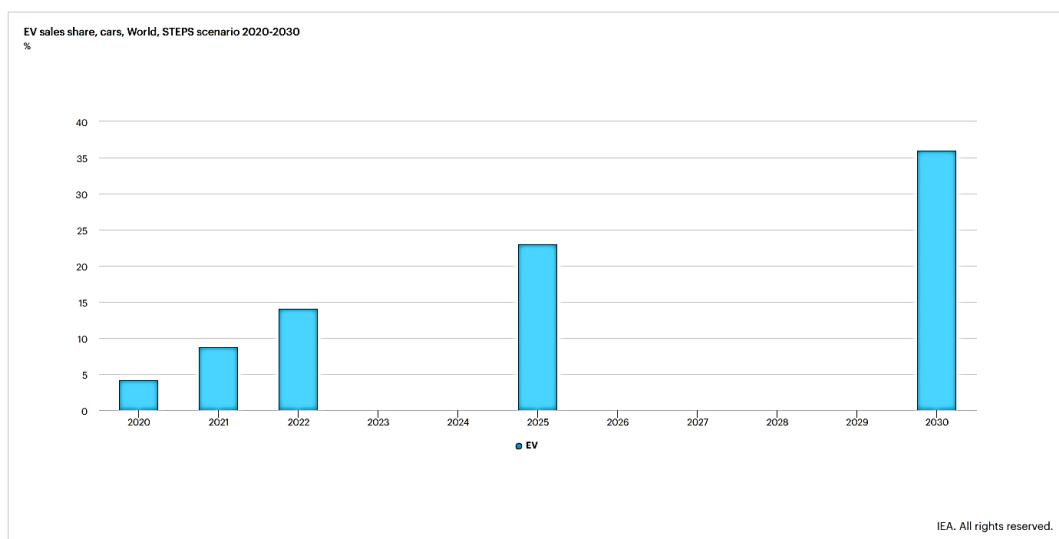
Πηγή: www.iea.org



Εικόνα 2.24: Πιθανό μελλοντικό ποσοστό EVs σε κυκλοφορία παγκοσμίως επί του συνόλου των οχημάτων με βάση το STEPS
Πηγή: www.iea.org



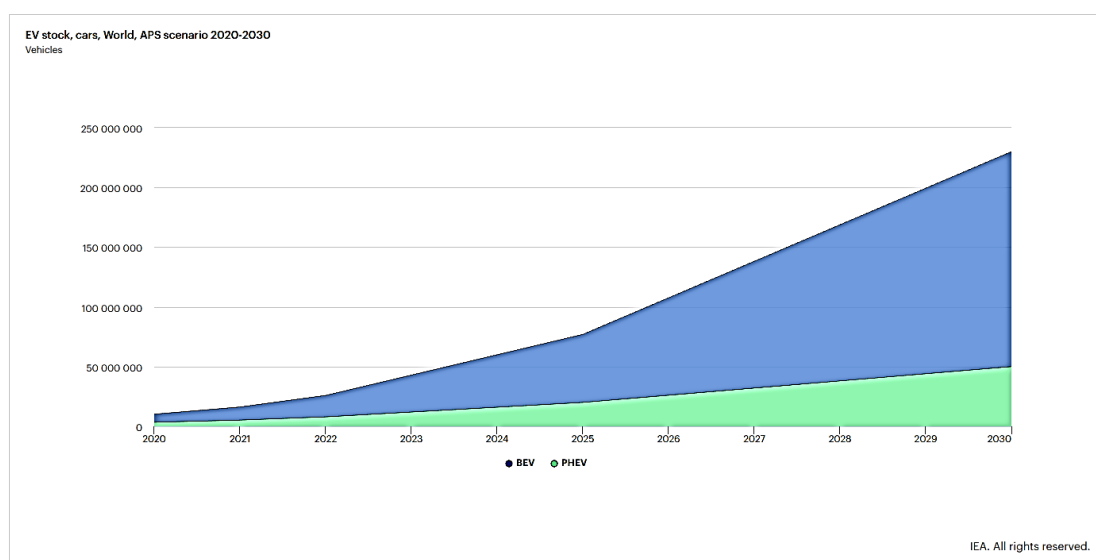
Εικόνα 2.25: Πιθανές μελλοντικές πωλήσεις BEVs & PHEVs παγκοσμίως με βάση το STEPS
Πηγή: www.iea.org



Εικόνα 2.26: Πιθανό μελλοντικό μερίδιο πωλήσεων EVs παγκοσμίως με βάση το STEPS

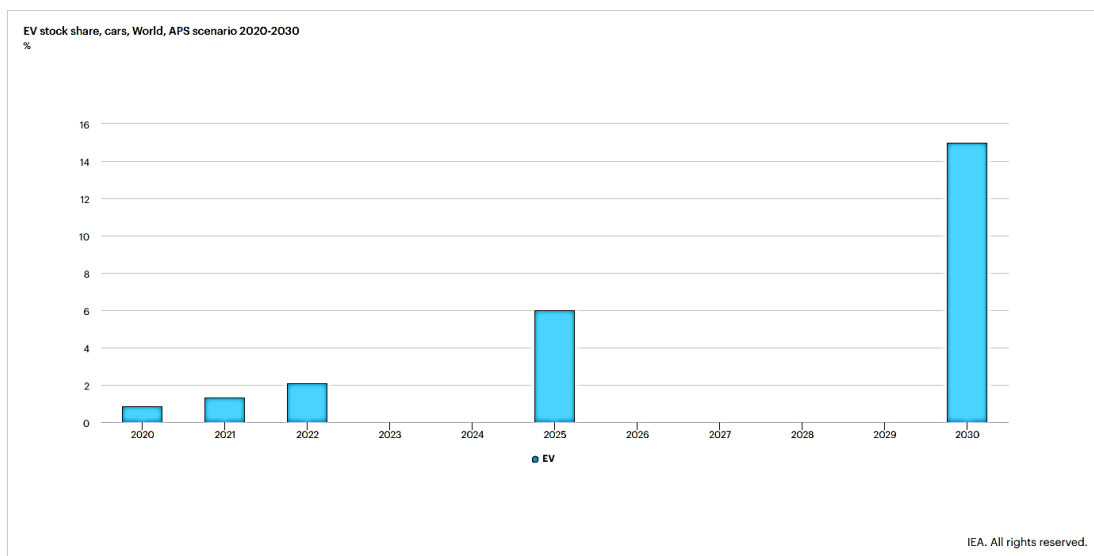
Πηγή: www.iea.org

Σύμφωνα με το σενάριο APS, ο παγκόσμιος στόλος EV (εξαιρουμένων των δικύκλων/τρικύκλων) φτάνει σχεδόν τα 235 εκατομμύρια το 2030 (βλ. Εικόνα 2.27), περίπου 5% υψηλότερος από ό,τι στα STEPS. Ο μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης στο APS είναι σχεδόν 35%, με αποτέλεσμα ένα στα επτά οχήματα στο δρόμο να είναι EV το 2030 (βλ. Εικόνα 2.28). Οι συνολικές πωλήσεις EV φτάνουν τα 41 εκατομμύρια το 2030 (βλ. Εικόνα 2.29), αντιπροσωπεύοντας πάνω από το 40% του συνόλου των πωλήσεων οχημάτων (βλ. Εικόνα 2.30).

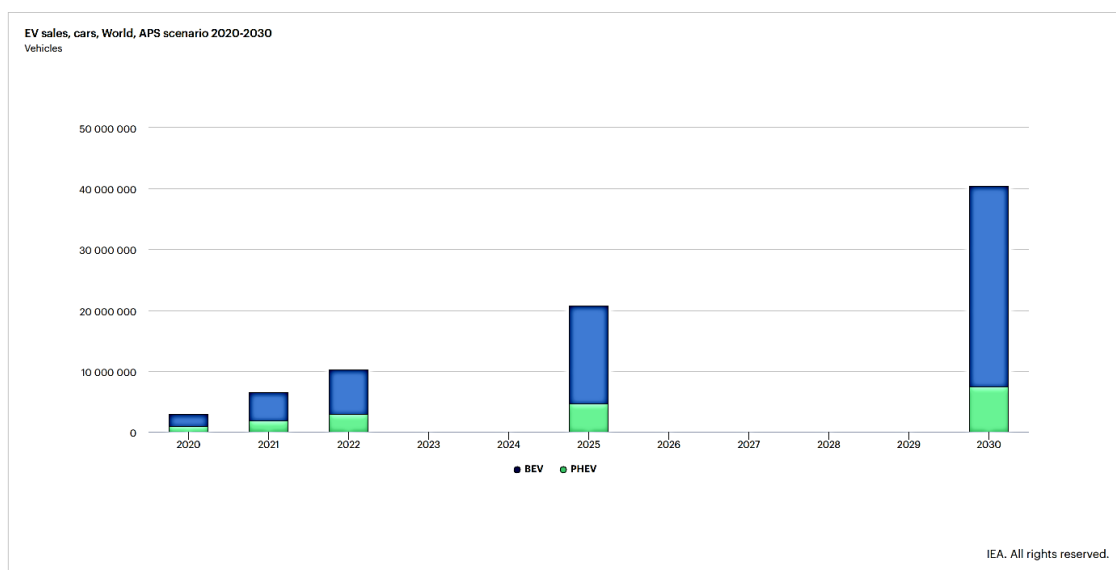


Εικόνα 2.27: Πιθανός μελλοντικός αριθμός BEVs και PHEVs σε κυκλοφορία παγκοσμίως με βάση το APS

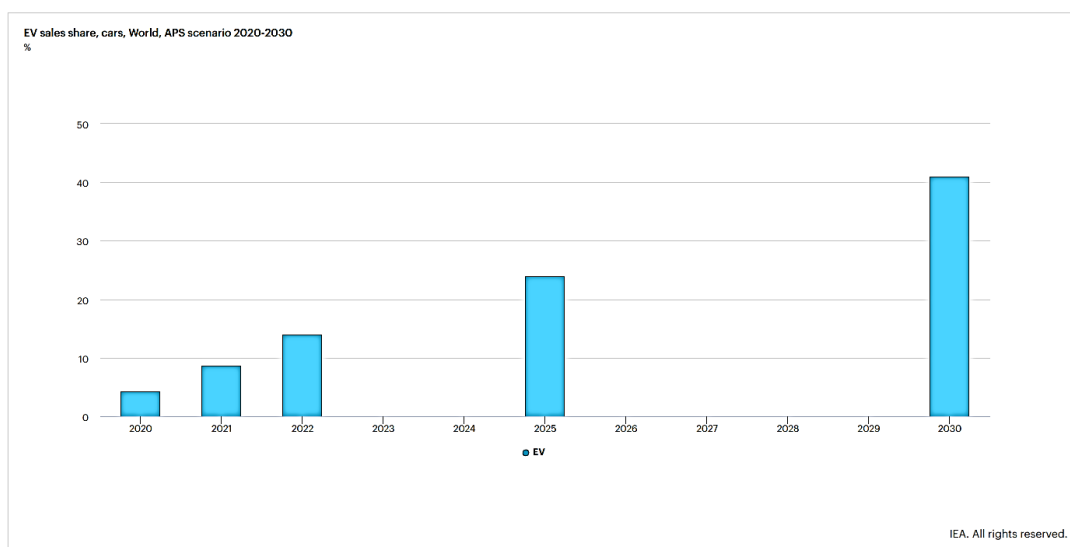
Πηγή: www.iea.org



Εικόνα 2.28: Πιθανό μελλοντικό ποσοστό EVs σε κυκλοφορία παγκοσμίως επί του συνόλου των οχημάτων με βάση το APS
Πηγή: www.iea.org



Εικόνα 2.29: Πιθανές μελλοντικές πωλήσεις BEVs & PHEVs παγκοσμίως με βάση το APS
Πηγή: www.iea.org



Εικόνα 2.30: Πιθανό μελλοντικό μερίδιο πωλήσεων EVs παγκοσμίως με βάση το APS

Πηγή: www.iea.org

Τα αποτελέσματα των σεναρίων αυτών επανεξετάζονται ετησίως λόγω των διαρκών αλλαγών (οικονομικών και πολιτικών) που συμβαίνουν. Όσα αναλύθηκαν και παρουσιάστηκαν παραπάνω, σχετικά με το μέλλον της ηλεκτροκίνησης στα επιβατικά οχήματα, προέκυψαν με δεδομένα έως και το τέλος του 2022. Μάλιστα, αναφέρεται πως με τα δεδομένα του 2023 οι προβλέψεις αναμένεται να αναθεωρηθούν προς τα πάνω (International Energy Agency (IEA), 2023).

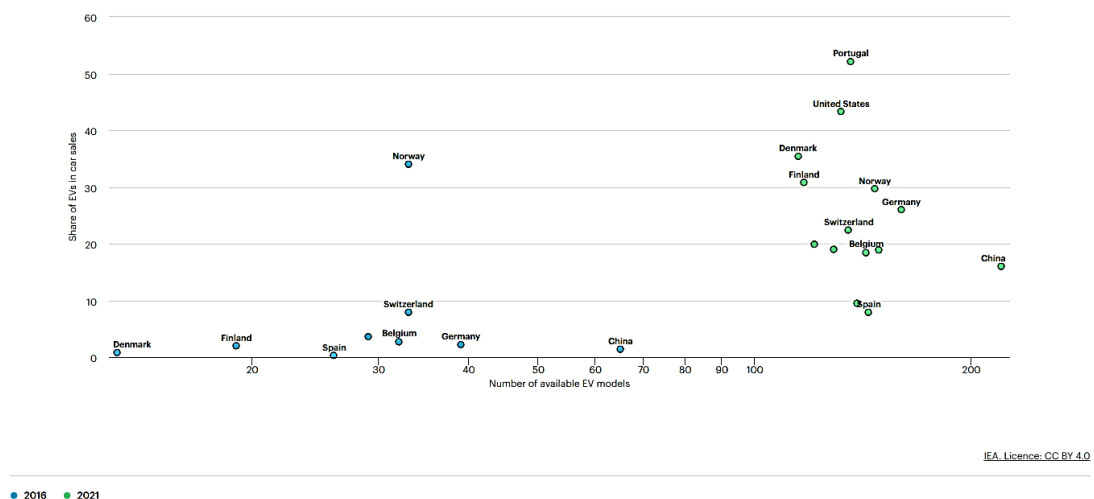
2.6.2 Στοιχεία αύξησης διαθέσιμων μοντέλων ηλεκτρικών οχημάτων

Τα τελευταία χρόνια οι μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες βλέποντας τα όρια εκπομπών ρύπων να γίνονται όλο και πιο αυστηρά, αλλά και τις πολιτικές των κρατών για μηδενικές εκπομπές μελλοντικά, επιταχύνουν τα σχέδιά τους σχετικά με την ηλεκτροκίνηση, στοχεύοντας στον πλήρη εξηλεκτρισμό του στόλου τους. Παράλληλα, η αύξηση του ενδιαφέροντος των καταναλωτών για ηλεκτρικά οχήματα αποτελεί μια ευκαιρία για κατάκτηση μεριδίου πωλήσεων και δημιουργία ενός ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος. Το 2021 αρκετές αυτοκινητοβιομηχανίες ανακοίνωσαν τα σχέδια τους για τη μετάβαση προς ένα πλήρως ηλεκτρικό μέλλον (Βλ. Πίνακα 2.4) και υπάρχουν και περιπτώσεις που οι φιλοδοξίες των κατασκευαστών είναι μεγαλύτερες από αυτές των κυβερνήσεων.

Πίνακας 2.4: Πλάνα κατασκευαστών οχημάτων σχετικά με την ηλεκτροκίνηση
Πηγή: Επίσημοι ιστότοποι κατασκευαστών

Κατασκευαστής	Πláνο-Εκτιμήσεις
Toyota	Ανάπτυξη 30 BEV και στόχος 3,5εκ ετήσιες πωλήσεις μέχρι το 2030.
Lexus	Στόχος 100% πωλήσεις BEV το 2035.
VW	Το 2030 οι πωλήσεις BEV θα φθάσουν το 70% στην Ευρωπαϊκή και το 50% στην Κινέζικη και Αμερικάνικη αγορά. Το 2040 το 100% των πωλήσεων θα είναι μηδενικών ρύπων.
Ford	Αναμένει το 50% των πωλήσεων της να είναι ηλεκτρικά οχήματα μέχρι το 2030.
Volvo	Δέσμευση να μετατραπεί σε εταιρεία πλήρως ηλεκτρικών οχημάτων έως το 2030.
Geely	Στόχος 30% να είναι πωλήσεις BEV έως το 2025.
BMW	Στόχος 50% να είναι πωλήσεις BEV έως το 2030.
Mercedes	Από το 2025 και έπειτα τα περισσότερα νέα μοντέλα οχημάτων θα είναι πλήρως ηλεκτρικά.
General Motors	Σχεδιασμός 30 νέων μοντέλων EV και απανθρακοποίηση του στόλου οχημάτων έως το 2040.
Stellantis	Στόχος το 100% των πωλήσεων στην Ευρώπη και το 50% στις ΗΠΑ να είναι BEV μέχρι το 2030.
Hyundai	Στόχος σε πωλήσεις 1,9εκ. BEV ετησίως μέχρι το 2030. Εξασφάλιση μεριδίου 7% στην παγκόσμια αγορά ηλεκτρικών και παύση πωλήσεων οχημάτων με μηχανές εσωτερικής καύσης το 2035.
Kia	Στόχος για αύξηση πωλήσεων BEV σε 1,2εκ. το 2030.

Το 2022 ο αριθμός των διαθέσιμων μοντέλων ηλεκτρικών οχημάτων έφτασε τα 500 από 450 που ήταν το 2021 και υπερδιπλασιάστηκε σε σχέση με το 2019. Παρά την αύξηση οι διαθέσιμες επιλογές σε ηλεκτρικά οχήματα υπολείπονται σε σχέση με τα θερμικά οχήματα που αριθμούν τις 1300 ακόμα και μετά τη σταθερή πτώση τους κατά τα τελευταία έτη (ο αριθμός των διαθέσιμων μοντέλων θερμικών οχημάτων μειωνόταν με μέσο ρυθμό 2% ετησίως για το 2016-2022 ενώ των ηλεκτρικών αυξανόταν κατά 30%) (ev-volumes.com, 2023). Μελλοντικά, όμως, ο αριθμός νέων μοντέλων θερμικών οχημάτων αναμένεται να συρρικνωθεί αφού οι κατασκευαστές θα επικεντρωθούν στην ηλεκτροκίνηση (International Energy Agency (IEA), 2023). Στην Εικόνα 2.31 αναπαριστάται η εξέλιξη που υπήρξε από το 2016 στο 2021 όσον αφορά τα διαθέσιμα ηλεκτρικά μοντέλα και το μερίδιο πωλήσεων τους ανά χώρα.

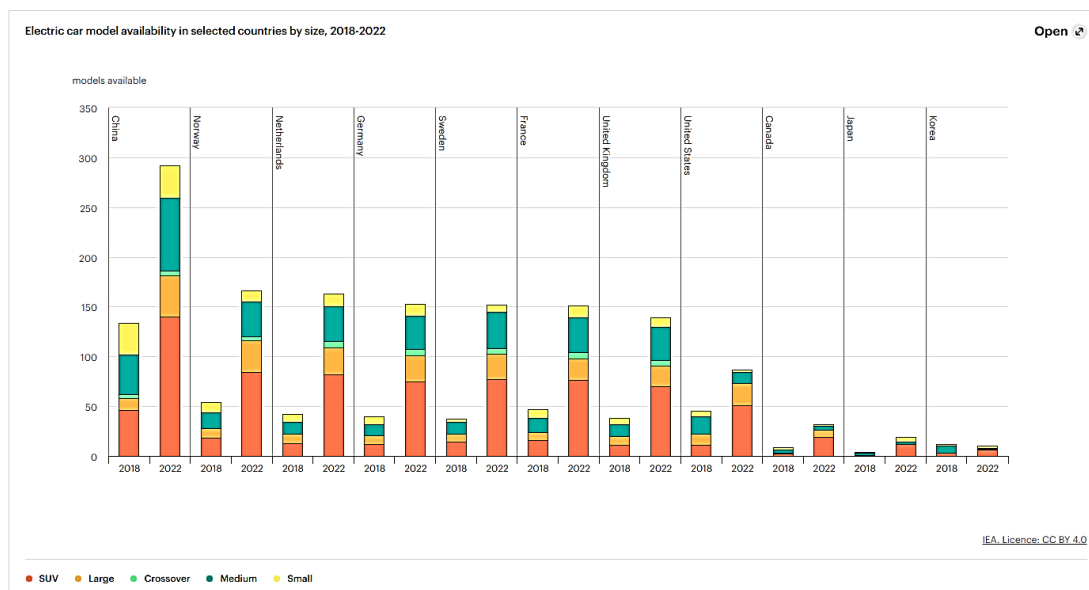


Εικόνα 2.31: Αριθμός διαθέσιμων μοντέλων ηλεκτρικών οχημάτων και μερίδιο πωλήσεων ανά χώρα για τα έτη 2016 και 2021

Πηγή: www.iea.org

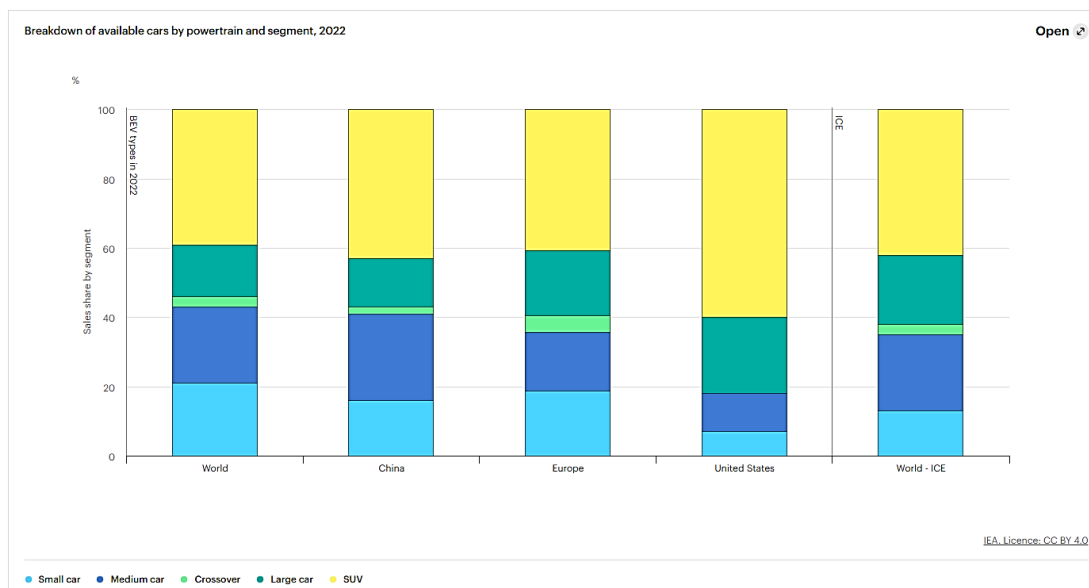
Συντριπτική είναι η κυριαρχία των SUV (Sport Utility Vehicle) τόσο ανάμεσα στα νέα και διαθέσιμα μοντέλα ηλεκτρικών οχημάτων (βλ. Εικόνα 2.32) όσο και στην προτίμηση των οδηγών (βλ. Εικόνα 2.33). Αυτό συμβαίνει και λόγω της απήχησης τους στο καταναλωτικό κοινό αλλά και λόγω των περιθωρίων κέρδους των αυτοκινητοβιομηχανιών με τα συγκεκριμένα μοντέλα. Ωστόσο, τα οχήματα αυτά:

- είναι πιο ακριβά και επομένως όχι προσιτά σε πολλούς
- ανεβάζουν το μέσο όρο βάρους που κυκλοφορεί στα οδοστρώματα και επομένως τη επιταχύνουν τη φθορά τους και
- δημιουργούν προβλήματα στις αλυσίδες εφοδιασμού αφού είναι εξοπλισμένα με μεγαλύτερες μπαταρίες που απαιτούν περισσότερα σπάνια μέταλλα (μέση χωρητικότητα μπαταρίας μικρού οχήματος 40 kWh, μέση χωρητικότητα μπαταρίας SUV 75 kWh).



Εικόνα 2.32: Διαθέσιμα μοντέλα ανά κατηγορία και ανά χώρα τα έτη 2018 και 2022

Πηγή: www.iea.org



Εικόνα 2.33: Μερίδιο πωλήσεων οχημάτων ανά κατηγορία και ανά κινητήρα

Πηγή: www.iea.org

Η μετάβαση από τα θερμικά μοντέλα οχημάτων στα ηλεκτρικά αποτελεί προτεραιότητα για την επίτευξη του στόχου μηδενικών εκπομπών ρύπων, ανεξάρτητα από το μέγεθος του οχήματος, αλλά ο μετριασμός των επιπτώσεων των υψηλότερων μεγεθών μπαταριών και του επιπλέον βάρους των οχημάτων είναι επίσης σημαντικός. Στη Γαλλία, τη Γερμανία και το Ηνωμένο Βασίλειο το 2022, το σταθμισμένο κατά τις πωλήσεις μέσο βάρος ενός ηλεκτρικού SUV με μπαταρία ήταν 1,5 φορές υψηλότερο από το μέσο ηλεκτρικό αυτοκίνητο μικρής μπαταρίας και απαιτούσε μεγαλύτερες ποσότητες χάλυβα, αλουμινίου και πλαστικού. Η μπαταρία

του SUV ήταν διπλάσια, απαιτώντας περίπου 75% περισσότερα σπάνια μέταλλα (International Energy Agency (IEA), 2023).

Από το 2025 και έπειτα αναμένονται μοντέλα ηλεκτρικών οχημάτων με πιο επιθετική τιμολόγηση αφού η τιμή των ηλεκτρικών συσσωρευτών μειώνεται όλο και περισσότερο (U.S. Department of Energy, 2023) και αναπτύσσεται μια ευρύτερη ομάδα διαθέσιμων επιλογών (ev-volumes.com, 2023).

2.6.3 Στοιχεία τάσεων για τα ηλεκτρικά βαρέα οχήματα

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται άνοδος στο ενδιαφέρον για τα ηλεκτρικά λεωφορεία από τις κυβερνήσεις και για τα ηλεκτρικά φορτηγά από τη βιομηχανία. Το 2022, πουλήθηκαν 66.000 ηλεκτρικά λεωφορεία (Βλ. Εικόνα 2.34) και 60.000 μεσαία και βαρέα φορτηγά (Βλ. Εικόνα 2.35) παγκοσμίως, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 4,5% του συνόλου των πωλήσεων λεωφορείων και το 1,2% των πωλήσεων φορτηγών παγκοσμίως. Συνολικά, το 2022, υπήρχαν περισσότερα από 800.000 ηλεκτρικά λεωφορεία στο δρόμο, που αντιπροσωπεύουν πάνω από το 3% όλων των λεωφορείων και 320.000 ηλεκτρικά φορτηγά, που αντιπροσωπεύουν περίπου το 0,5% όλων των φορτηγών (International Energy Agency (IEA), 2023).

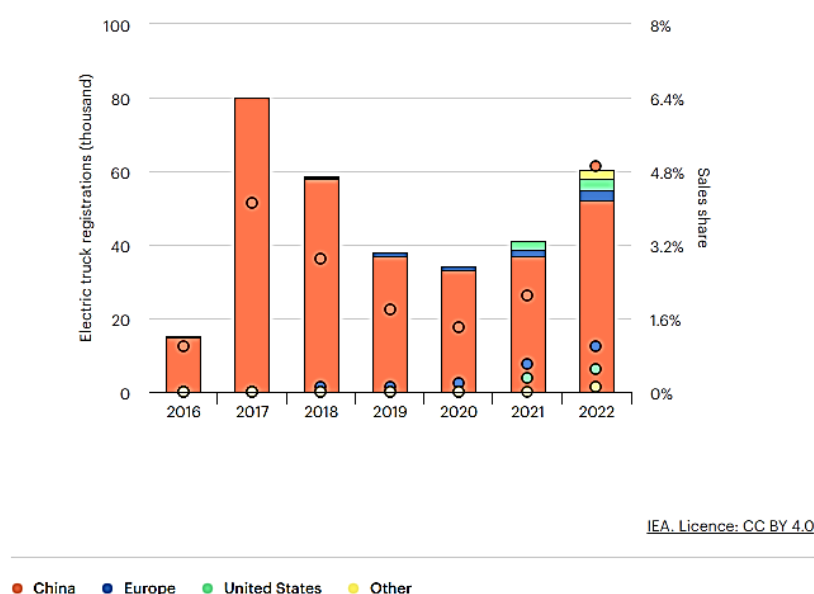
Electric bus registrations and sales share by region, 2015-2022

Open 

Εικόνα 2.34: Αριθμός ηλεκτρικών λεωφορείων σε κυκλοφορία και ποσοστό πωλήσεων επί του συνόλου 2015-2022

Πηγή: www.iea.org

Electric truck registrations and sales share by region, 2015-2022

Open 

Εικόνα 2.35: Αριθμός ηλεκτρικών φορτηγών σε κυκλοφορία και ποσοστό πωλήσεων επί του συνόλου 2015-2022

Πηγή: www.iea.org

Αν και προς το παρόν η Κίνα κατέχει το συντριπτικό ποσοστό ηλεκτρικών λεωφορείων και φορτηγών, αυτό αναμένεται να αλλάξει στο μέλλον. Η δημιουργία Ζωνών Μηδενικών Ρύπων στα κέντρα μεγάλων πόλεων αλλά και η ανάγκη συμμόρφωσης

των εταιρειών για χαμηλές ή μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου θα μετατρέψουν τα ηλεκτρικά λεωφορεία και φορτηγά σε ένα μέσο για την επίτευξη αυτών των στόχων. Η επιθυμία, επίσης, για καλύτερη ποιότητα αέρα και λιγότερο θόρυβο, ειδικά στις αστικές περιοχές οδηγούν στην ανάπτυξη βαρέων ηλεκτρικών οχημάτων. Τέλος, ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η αποδοτικότητα των μεταφορών. Επειδή τα ηλεκτρικά φορτηγά δεν παράγουν καυσαέρια, μπορούν να πραγματοποιούν παραδόσεις σε ζώνες μηδενικών εκπομπών και μπορούν να έχουν πρόσβαση σε περισσότερες τοποθεσίες από τα αντίστοιχα diesel. Το γεγονός ότι είναι αθόρυβα, σημαίνει ότι μπορούν να λειτουργούν σε πόλεις τη νύχτα όταν δεν επιτρέπεται σε άλλα βαρέα οχήματα. Ως αποτέλεσμα, τα ηλεκτρικά φορτηγά μπορούν να αυξήσουν την αποδοτικότητα μιας επιχείρησης. Τα φορτηγά μπορούν να είναι στο δρόμο όταν υπάρχει λιγότερη συμφόρηση και να κάνουν τις παραδόσεις πιο γρήγορα και εύκολα. Βελτιώνουν επίσης την παραγωγικότητα, επειδή μπορούν να κάνουν περισσότερα ταξίδια σε περιόδους που υπάρχει λιγότερη κίνηση και να πλησιάσουν ακόμη περισσότερο το τελικό σημείο παράδοσης (όπως, για παράδειγμα, το εσωτερικό κτιρίων) λόγω της αθόρυβης λειτουργίας τους. Για τους οδηγούς τα ηλεκτρικά φορτηγά προσφέρουν καλύτερο περιβάλλον εργασίας λόγω των λιγότερων κραδασμών και της αθόρυβης λειτουργίας (Volvo, 2023).

Στον Πίνακα 2.5 δίνονται οι εκτιμήσεις των σεναρίων STEPS και APS της IEA για τα αμιγώς ηλεκτρικά βαρέα οχήματα και λεωφορεία παγκοσμίως:

Πίνακας 2.5 Εκτιμήσεις σεναρίων STEPS και APS για τα αμιγώς ηλεκτρικά βαρέα οχήματα και λεωφορεία παγκοσμίως
Πηγή: www.iea.org

		STEPS		APS	
		2025	2030	2025	2030
BUSES	sales	260000	350000	270000	480000
	sales share	13%	17%	13%	22%
	stock	1300000	2500000	1300000	2900000
	stock share	5%	9%	5%	11%
TRUCKS	sales	210000	420000	240000	750000
	sales share	4%	9%	5%	13%
	stock	790000	2400000	830000	3300000
	stock share	1%	3%	1%	4%

2.6.4 Στοιχεία ανάπτυξης των υποδομών φόρτισης

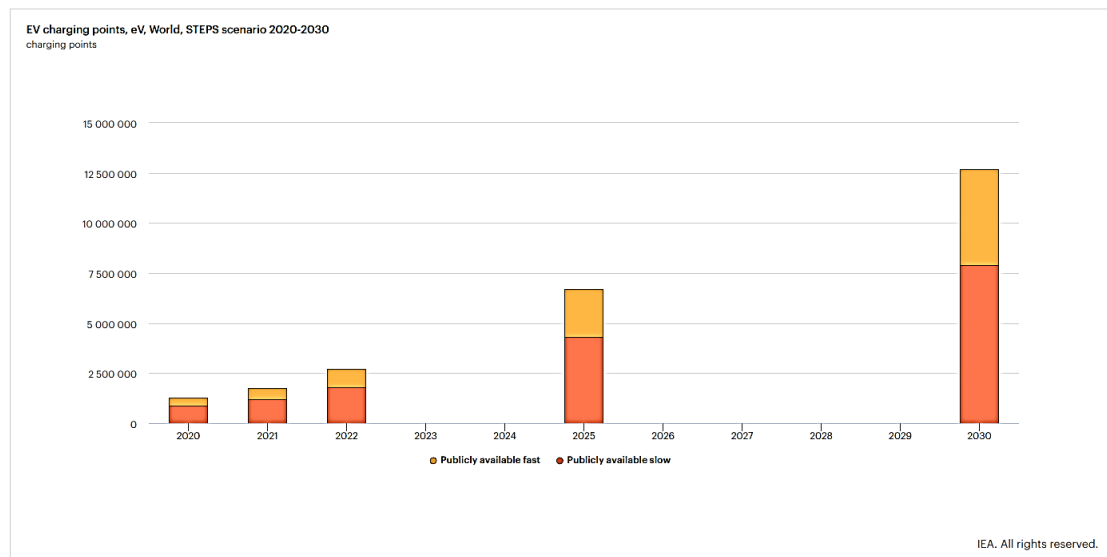
Με την αγορά των EVs να διογκώνεται, η πρόσβαση σε δημόσιους φορτιστές θα χρειαστεί και αυτή να επεκταθεί. Σήμερα οι περισσότερες φορτίσεις των ηλεκτρικών οχημάτων γίνονται στις κατοικίες ή στους χώρους εργασίας. Για να καταστεί όμως δυνατή η πραγματοποίηση κάθε χιλιομετρικής απόστασης και κατ' επέκταση η καθολική υιοθέτηση της ηλεκτροκίνησης, οι καταναλωτές αναμένουν όσα σημεία ανεφοδιασμού συναντούν με το θερμικά τους οχήματα αντίστοιχα να έχουν και για τα ηλεκτρικά. Επιπλέον, είναι αναγκαίο ο χρόνος φόρτισης να γίνει ανταγωνιστικός του χρόνου πλήρωσης ενός ρεζερβουάρ βενζίνης ή diesel.

Προς αυτή την κατεύθυνση κινούνται εταιρείες όπως η Ionity, ChargeNet Holdings, AddEnergie Technologies, Wirelane, Fastned, Tesla αλλά και τοπικοί πάροχοι ηλεκτρισμού που επεκτείνουν διαρκώς τα δίκτυα φορτιστών τους, τοποθετώντας μάλιστα σε αρκετά σημεία υποδομές φορτιστών ισχύος 250 kW αλλά και 350 kW. Ομοίως, οι κατασκευαστές οχημάτων σε συνεργασία με τους εξοπλίζουν τα οχήματα τους με ηλεκτρικούς συσσωρευτές και συστήματα προκειμένου να μπορούν να εκμεταλλευτούν στο έπακρο τις υποδομές αυτές. Η Storedot, μία από τις μεγαλύτερες εταιρίες κατασκευής μπαταριών για ηλεκτρικά οχήματα αναφέρει πως το 1991 για να φορτιστεί το 80% μιας μπαταρίας 82 kWh χρειάζονταν 13 ώρες, ενώ το 2022 χρειάζονται μόλις 30 λεπτά.

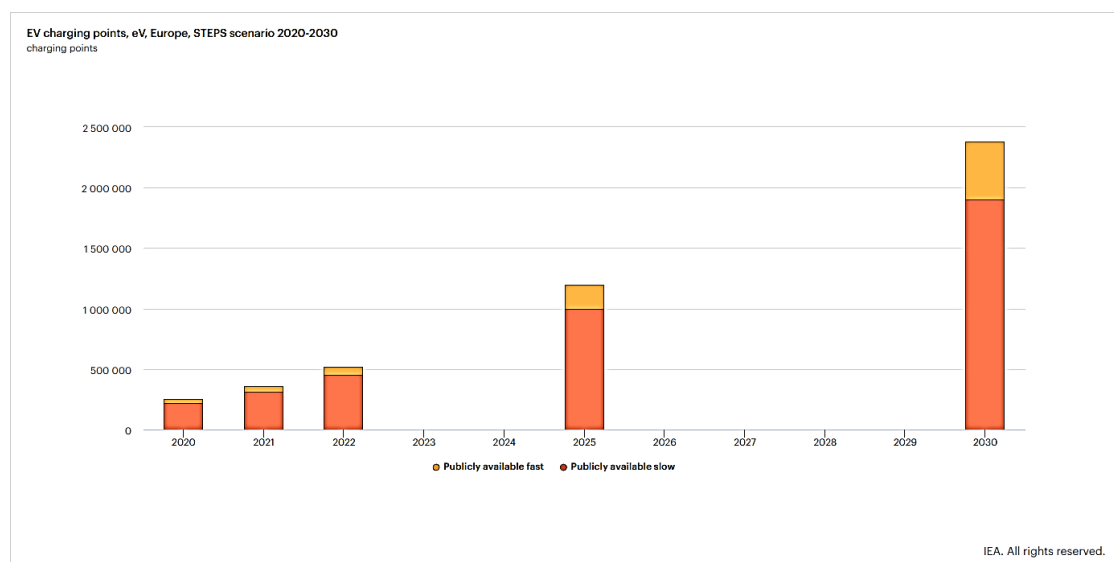
Στα τέλη του 2022, υπήρχαν 2,7 εκατομμύρια δημόσια σημεία φόρτισης παγκοσμίως, περισσότερα από 900.000 εξ αυτών εγκαταστάθηκαν το 2022, αύξηση περίπου 55% σε σχέση με τα σημεία που υπήρχαν το 2021 και ρυθμός ανάπτυξης συγκρίσιμος με τον μέσο ρυθμό (50%) της περιόδου 2015-2019 πριν από την πανδημία. Από τα 900.000 σημεία φόρτισης τα 330.000 αποτελούνταν από ταχυφορτιστές. Η ανάπτυξη αναμένεται να επιταχυνθεί τα επόμενα χρόνια με βάση τις πολιτικές των κρατών αλλά και τα επιχειρηματικά πλάνα των εταιρειών φόρτισης (International Energy Agency (IEA), 2023). Προς το παρόν ενώ αυξάνεται ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων που χρησιμοποιούνται, τα δίκτυα φόρτισης αναπτύσσονται με διαφορετικές ταχύτητες και μάλιστα αρκετές χώρες δεν πληρούν και τη μέση αναλογία EV προς φορτιστή που έχει οριστεί από διεθνείς οδηγίες. Για παράδειγμα, όσον αφορά την Ευρώπη, οι χώρες του δυτικού τμήματος καταγράφουν τη μεγαλύτερη πυκνότητα σε φορτιστές ενώ οι χώρες του νότιου τμήματος τη μικρότερη (European Court of Auditors, 2021).

Στην Εικόνα 2.36 απεικονίζεται ο αριθμός δημοσίων σταθμών φόρτισης ανά έτος από το 2020 και παρατίθεται και μελλοντική πρόβλεψη της IEA για το έτος 2030. Ομοίως,

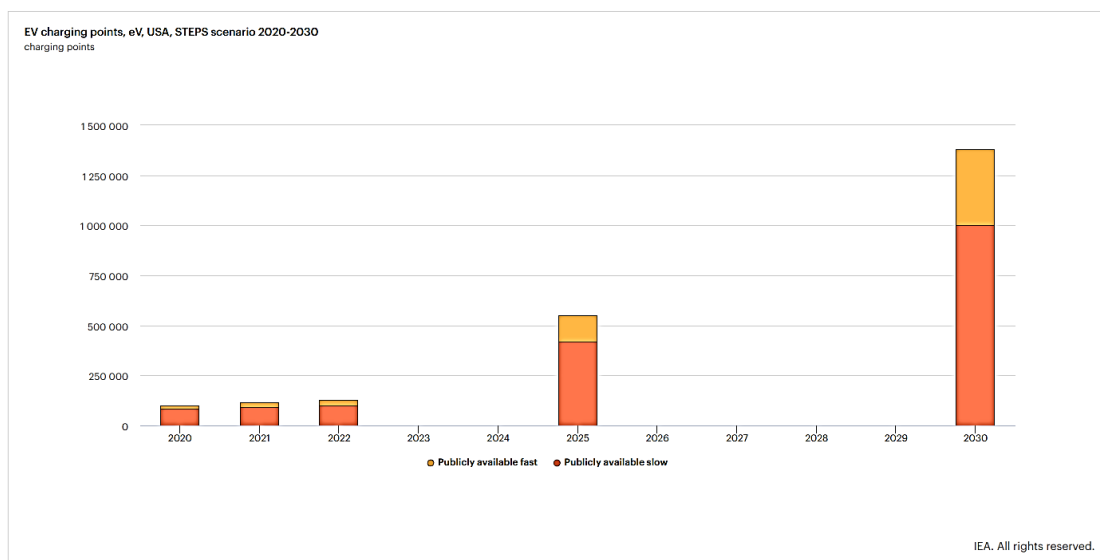
στις Εικόνες 2.37, 2.38 και 2.39 απεικονίζεται ο αριθμός δημοσίων σταθμών φόρτισης ανά έτος από το 2020 και παρατίθεται και μελλοντική πρόβλεψη για Ευρώπη, ΗΠΑ και Κίνα αντίστοιχα.



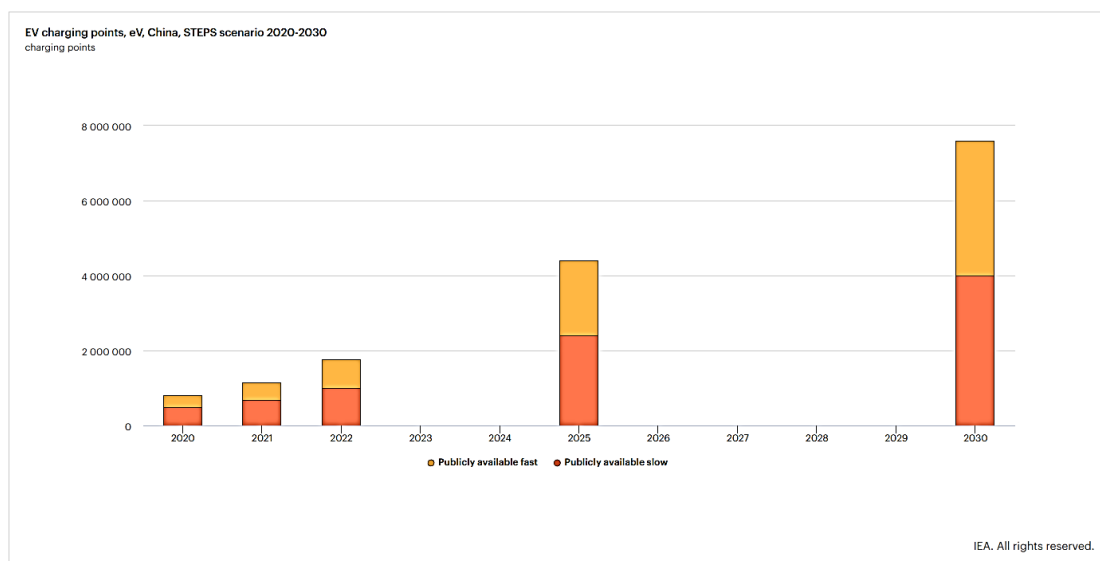
Εικόνα 2.36: Αριθμός δημοσίων σημείων φόρτισης παγκοσμίως και μελλοντική εκτίμηση (STEPS)
Πηγή: www.iea.org



Εικόνα 2.37: Αριθμός δημοσίων σημείων φόρτισης στην Ευρώπη και μελλοντική εκτίμηση (STEPS)
Πηγή: www.iea.org



Εικόνα 2.38: Αριθμός δημοσίων σημείων φόρτισης στις ΗΠΑ και μελλοντική εκτίμηση (STEPS)
Πηγή: www.iea.org



Εικόνα 2.39: Αριθμός δημοσίων σημείων φόρτισης στην Κίνα και μελλοντική εκτίμηση (STEPS)
Πηγή: www.iea.org

Η κατασκευή και η εγκατάσταση δημοσίων σταθμών φόρτισης κοστίζει από 28000\$ για σταθμό ισχύος 50 kW και μπορεί να φτάσει έως 140000\$ για σταθμό ισχύος 350 kW (International Council on Clean Transportation, 2019).

3. ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ

3.1 Γενικά

Η αύξηση των ηλεκτρικών οχημάτων έχει δημιουργήσει ανησυχίες σε σχέση με τις υφιστάμενες υποδομές. Μια σημαντική ανησυχία είναι το αν το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας θα μπορέσει να διαχειριστεί όλο αυτό το φορτίο μελλοντικά χωρίς να υπάρχουν προβλήματα με τη σταθερότητά του. Διάφορες μελέτες έχουν γίνει και υπάρχουν αντικρουόμενα ευρήματα σχετικά με την επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων στα δίκτυα διανομής (Richardson, 2013). Τα ευρήματα αυτά εξαρτώνται, συνήθως, από την υφιστάμενη δυναμική του δικτύου αλλά και τα ποσοστά εξηλεκτρισμού του στόλου των αυτοκινήτων.

Ταυτόχρονα, προτείνονται διάφορες λύσεις για την υποστήριξη του δικτύου, όπως τα έξυπνα σχέδια φόρτισης και η [επιστροφή](#) ενέργειας από τα ηλεκτρικά οχήματα στο δίκτυο (U.S. Department of energy, 2023). Μάλιστα κάποιοι κατασκευαστές έχουν ήδη εφοδιάσει τα οχήματα τους με τη δυνατότητα να μπορούν να επιστρέφουν την ενέργεια που έχουν αποθηκεύσει αν και αρχικά αυτό επιτρέπεται μόνο για τη φόρτιση και χρήση συσκευών (λειτουργία [V2L](#)).

Εκτός, όμως, του δικτύου ηλεκτροδότησης γεννάται και το ερώτημα για το κατά πόσο η υπάρχουσα οδική υποδομή, η οποία σε πολλές περιπτώσεις έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί με δεδομένα χαρακτηριστικών οχημάτων και κυκλοφορίας που ίσχυαν πριν 25 ή παραπάνω έτη, θα μπορέσει να ανταποκριθεί στις νέες απαιτήσεις. Δημιουργείται, λοιπόν, η ανάγκη διερεύνησης αυτού του ερωτήματος που για να απαντηθεί πρέπει πρώτα να επισημανθούν οι διαφορές ηλεκτρικών και συμβατικών οχημάτων όσον αφορά την αλληλεπίδραση τους με το οδόστρωμα. Επιπλέον, η έρευνα προσανατολίζεται και σε νέες τεχνολογίες που ενσωματώνονται στα οδοστρώματα προκειμένου να αξιοποιηθούν από τα ηλεκτρικά οχήματα και στο πώς αυτές ενδέχεται να επηρεάσουν την δομική τους ικανότητα, αλλά και γενικά στις αλλαγές στο σχεδιασμό που μπορεί να απαιτηθούν λόγω των νέων συνθηκών που δημιουργούνται.

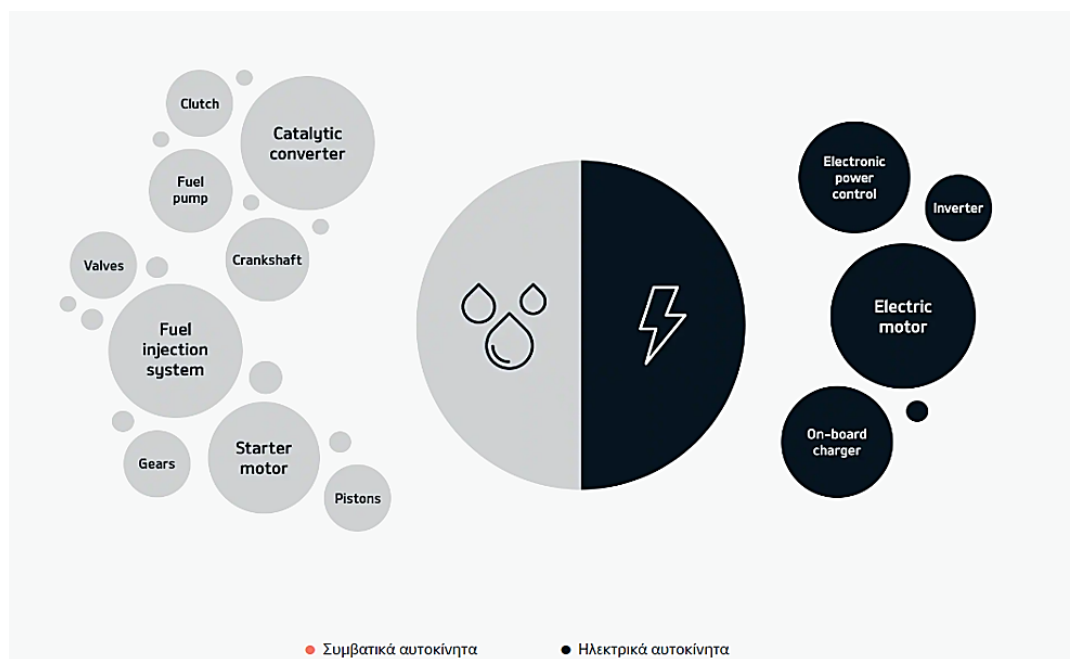
3.2 Διαφορές χαρακτηριστικών ηλεκτρικών και θερμικών οχημάτων

Τα παραδοσιακά θερμικά οχήματα διαφέρουν σε αρκετά σημεία σε σχέση με τα ηλεκτρικά. Ωστόσο, στην ενότητα αυτή θα ασχοληθούμε με τις διαφορές οι οποίες επηρεάζουν άμεσα την αλληλεπίδραση του οχήματος με την οδική υποδομή.

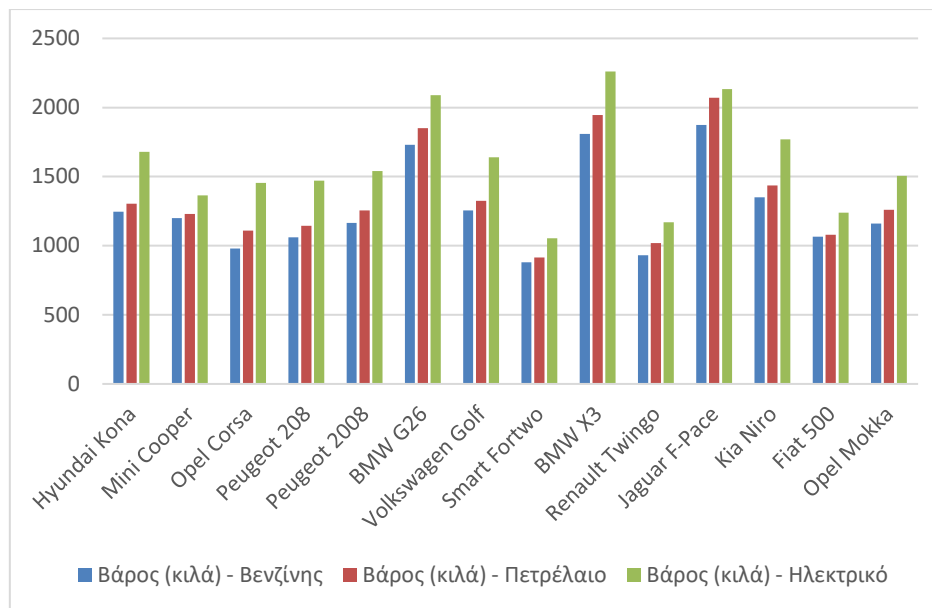
3.2.1 Βάρος

Βασική παράμετρος για το σχεδιασμό μιας οδού είναι η αποτίμηση του κυκλοφοριακού φόρτου. Συγκεκριμένα, για το καθορισμό του πάχους και των μηχανικών χαρακτηριστικών κάθε στρώσης είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του αριθμού και του βάρους των οχημάτων. Τα οχήματα που χρησιμοποιούν μια οδό χωρίζονται σε επιβατικά (ΙΧ) και εμπορικά (ΕΟ).

Παρόλο που τα ηλεκτρικά επιβατικά οχήματα διαθέτουν λιγότερα μηχανικά μέρη (Βλ. Εικόνα 3.1) και οι κινητήρες τους είναι μικρότεροι και ελαφρύτεροι, τελικά ζυγίζουν 20-35% παραπάνω από τα αντίστοιχου μεγέθους και εξοπλισμού θερμικά οχήματα (Denton, 2020). Στην Εικόνα 3.2 δίνονται τα βάρη για ενδεικτικές πλατφόρμες οχημάτων, που μπορούν να φιλοξενήσουν και τους τρεις τύπους κίνησης (βενζίνη, πετρέλαιο, ηλεκτρισμό) και επιβεβαιώνουν το ποσοστιαίο εύρος που αναφέρθηκε (Τα βάρη μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με την έκδοση, τον εξοπλισμό και τη χώρα προορισμού. Οι αριθμοί στο διάγραμμα είναι μέσοι όροι βάσει των διαθέσιμων πληροφοριών από τον εκάστοτε κατασκευαστή).



Εικόνα 3.1: Σύγκριση σε αριθμό μηχανικών μερών
Πηγή: www.kia.com



Εικόνα 3.2: Βάρη μοντέλων οχημάτων αναλόγως του τύπου κίνησης
Πηγή: Επίσημοι ιστότοποι κατασκευαστών

Το αυξημένο βάρος των ηλεκτροκίνητων επιβατικών οχημάτων οφείλεται κατά βάση στην μπαταρία (ή συστοιχία ηλεκτρικών συσσωρευτών έλξης) που χρησιμοποιούν για την κίνησή τους. Περίπου το 60 έως 75 % του συνολικού βάρους μιας μπαταρίας προέρχεται από τις κυψέλες και τα υλικά που περιέχουν, ενώ το υπόλοιπο 25 έως 40% προέρχεται από το μεταλλικό περίβλημα, τα καλώδια και τα συστήματα διαχείρισης θερμότητας και μπαταρίας (TMS και BMS). Αν και τα τελευταία χρόνια η ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα μάζας (Wh/kg) βελτιώνεται, ο αγώνας των κατασκευαστών να προσφέρουν αυτονομίες στον αυτοκινητόδρομο αντάξιες των θερμικών οχημάτων, τους αναγκάζει να κρατούν το βάρος σταθερό προσφέροντας όλο και καλύτερες ενεργειακά μπαταρίες στα ηλεκτρικά οχήματα.

Στον Πίνακα 3.1 δίνονται στοιχεία υπολογισμού της ωφέλιμης ενέργειας για τα δύο είδη θερμικών κινητήρων για ένα μέσο όγκο δεξαμενής θερμικού οχήματος:

Πίνακας 3.1: Ενεργειακά στοιχεία βενζίνης και πετρελαίου κίνησης

Καύσιμο	Ενεργειακή πυκνότητα ανά λίτρο (kWh/l)	Μέση απόδοση κινητήρα	Ωφέλιμη Ενέργεια (kWh/l)	Ωφέλιμη Ενέργεια για μέσο όγκο δεξαμενής 60 λίτρα (kWh)
Βενζίνη	9,5	25%	2,4	144
Diesel	10,25	35%	3,6	216

Αν ληφθεί υπόψη το ειδικό βάρος της βενζίνης (0,75 kg/L) και του πετρελαίου κίνησης (0,85 kg/L), προκύπτει ότι με 45 kg (βάρος 60 λίτρων) βενζίνης παράγεται ωφέλιμη ενέργεια 144 kWh ενώ για 51 kg (βάρος 60 λίτρων) diesel, 216 kWh! Σε ένα ηλεκτροκίνητο όχημα με μέση χωρητικότητα μπαταρίας 65 kWh η ωφέλιμη ενέργεια, για μέση απόδοση ηλεκτροκινητήρα 90%, θα ήταν 58,5 kWh και ισοδυναμεί με μπαταρία βάρους 433 kg (με την υπόθεση ότι έχουμε μπαταρία τύπου Li-Ion με μια μέση τιμή ενεργειακής πυκνότητας μάζας 150 Wh/kg). Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι το βάρος της μπαταρίας ενός ηλεκτροκίνητου επιβατικού οχήματος μένει πάντα σταθερό ανεξάρτητα με την αποθηκευμένη σε αυτήν ενέργεια. Αντίθετα, στα θερμικά οχήματα το βάρος του καυσίμου μειώνεται κατά τη χρήση. Σχετικά, όμως, με τα μηχανικά μέρη, στα θερμικά οχήματα ο κινητήρας έχει βάρος από 150 έως 320 κιλά και το σύστημα μετάδοσης (multi speed transmission) από 45 έως 180 κιλά. Στα ηλεκτρικά οχήματα ο ηλεκτροκινητήρας ζυγίζει 30-35 κιλά ενώ το σύστημα μετάδοσης (single speed transmission) 20-25 κιλά. Οπότε, στον υπολογισμό του επιπλέον βάρους θα πρέπει και οι παραπάνω διαφορές να λαμβάνονται υπόψη. Έως τώρα, η επιβάρυνση των επιβατικών οχημάτων θεωρούταν αμελητέα. Με τα νέα δεδομένα, όμως, και τον σταδιακό εξηλεκτρισμό του στόλου των επιβατικών δημιουργείται ανάγκη διερεύνησης εκ νέου της επιβάρυνσης που προκαλούν στο οδόστρωμα.

Όσον αφορά τα εμπορικά βαρέα ηλεκτρικά οχήματα, αν και το ποσοστό αυτών που είναι σε κυκλοφορία είναι αρκετά χαμηλό, όπως είδαμε (Βλ. Κεφάλαιο 2.6.3) αναμένεται να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια. Τα οχήματα αυτά έχουν τη μεγαλύτερη καταστροφική ικανότητα απέναντι στο οδόστρωμα και αποτελούν αντικείμενο πολλών μελετών τα τελευταία χρόνια.

Σύμφωνα με τους κατασκευαστές βαρέων οχημάτων εμπορικής χρήσης, στην παρούσα φάση, οι μπαταρίες των ηλεκτρικών μοντέλων τους ζυγίζουν από 2525 (450 kWh) έως 3030 κιλά (540 kWh) (αναλόγως της διαθέσιμης αυτονομίας και του μοντέλου) και έτσι ξεπερνούν σε συνολικό βάρος τα αντίστοιχα diesel μοντέλα γεγονός που σε κάποια κράτη οδηγεί τις εταιρίες που τα χρησιμοποιούν πολλές φορές να πρέπει να μειώνουν το ωφέλιμο φορτίο που αυτά μεταφέρουν ώστε να είναι εντός του κανονισμού συνολικού βάρους (Volvo, 2023). Μάλιστα, για να μετριασθεί το πρόβλημα του μειωμένου ωφέλιμου φορτίου, το 2019 στις Η.Π.Α. αποφασίστηκε τροποποίηση του κανονισμού αυξάνοντας το όριο βάρους για τα ηλεκτροκίνητα βαρέα οχήματα κατά 2000 λίβρες (≈907 κιλά) (Federal Highway Administration, 2019) και ομοίως αύξηση του ορίου υπήρξε και στην Ευρωπαϊκή Ένωση με την Οδηγία 2015/719 και τον [Κανονισμό 2019/1242](#) φτάνοντας μάλιστα

τους επιπλέον 2 τόνους σε σχέση με τα θερμικά! Παρόλα αυτά, το πλάνο των κατασκευαστών να ενσωματώσουν μπαταρίες που θα ζυγίζουν έως και 4 τόνους έως το 2030, οδηγεί σε νέες συζητήσεις και έρευνες σχετικά με νομοσχέδια όπως το HR471 στις ΗΠΑ που αυξάνει τα όρια βάρους για τα ηλεκτρικά βαρέα οχήματα σε διακρατικούς δρόμους και δρόμους του Εθνικού Συστήματος Αυτοκινητοδρόμων κατά 5,5 τόνους (από 80.000 σε 91.000 λίβρες) (American Journal of Transportation, 2023). Σύμφωνα με τους ερευνητές αυτό θέτει σε κίνδυνο όχι μόνο την αντοχή των οδοστρωμάτων, αλλά και των γεφυρών (Bailey, R., Harvill, J., et al., 2023).

Έρευνα του πανεπιστημίου της Καλιφόρνια που δημοσιεύτηκε το 2020 μελέτησε την επίδραση της αύξησης του βάρους των ηλεκτρικών βαρέων οχημάτων στα οδοστρώματα. Οι μελετητές ασχολήθηκαν με τρεις τύπους βαρέων οχημάτων (long-haul tractor, short-haul tractor, medium-duty urban) και έλεγξαν τρία σενάρια διείσδυσης τους στην αγορά (χαμηλή, βασική, υψηλή). Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε για 2 έτη-στόχους (2030 και 2050) και συγκρίθηκαν οι τεχνολογίες 3 ειδών εναλλακτικών καυσίμων (ηλεκτρισμού, υδρογόνου και φυσικού αερίου) με το diesel.

Αρχικά, έγινε εκτίμηση του βάρους των εξαρτημάτων ενός βαρέος οχήματος diesel που δεν υπάρχουν στα αντίστοιχα βαρέα οχήματα μηδενικών εκπομπών ρύπων (ZEV = Zero Emission Vehicles) χρησιμοποιώντας μέσες τιμές. Συγκεκριμένα, εκτίμησαν τα βάρη του κινητήρα, της δεξαμενής καυσίμου, του συστήματος μετεπεξεργασίας καυσαερίων και της δεξαμενής DEF (Diesel Exhaust Fluid – AdBlue) για κάθε ένα από τα 3 είδη οχημάτων και προέκυψαν τα στοιχεία του Πίνακα 3.2:

Πίνακας 3.2: Βάρη εξαρτημάτων βαρέων οχημάτων diesel
Πηγή: (Harvey, J., Saboori, A., Miller, M., Kim, C., Jaller, M., Lea, J., et al, 2020)

Truck Type	Engine Weight (kg)	Four Components Removed (kg)*
Long-haul tractor	1,430	1,700
Short-haul tractor	1,430	1,700
Medium-duty urban	284	379

* The engine, fuel tank, exhaust after-treatment system, and diesel-exhaust fluid tank.

Έπειτα, εκτιμήθηκε το βάρος των εξαρτημάτων των ηλεκτρικών οχημάτων (BEV), δηλαδή της μπαταρίας και των ηλεκτρονικών ισχύος, λαμβάνοντας πάντα υπόψη την πρόοδο της τεχνολογίας όσον αφορά την ενεργειακή πυκνότητα μάζας των ηλεκτρικών συσσωρευτών ανά τα χρόνια. Έτσι, προέκυψε η εκτιμώμενη αυτονομία και ενεργειακή χωρητικότητα των μπαταριών των αμιγώς ηλεκτρικών βαρέων

οχημάτων (Βλ. Πίνακα 3.3) και τα εκτιμώμενα βάρη των εξαρτημάτων τους για τα έτη 2030 και 2050 (Βλ. Πίνακα 3.4 - Η τρίτη στήλη απεικονίζει τη διαφορά του αθροίσματος βάρους μπαταρίας και ηλεκτρονικών ισχύος με τα 4 εξαρτήματα των diesel του Πίνακα 3.2):

Πίνακας 3.3: Εκτίμηση μελλοντικής αυτονομίας και ενεργειακής χωρητικότητας μπαταριών βαρέων αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων

Πηγή: (Harvey, J., Saboori, A., Miller, M., Kim, C., Jaller, M., Lea, J., et al, 2020)

Model Year	2030	2050
Long-haul range (miles)	300	500
Long-haul battery energy (kWh)	680	945
Long-haul efficiency improvement 2030 to 2050		1.2
Short-haul range (miles)	150	200
Short-haul battery energy (kWh)	350	402
Short-haul efficiency improvement 2030 to 2050		1.16
Medium-duty urban range (miles)	150	150
Medium-duty urban battery energy (kWh)	150	127
Medium-duty urban efficiency improvement 2030 to 2050		1.18

Πίνακας 3.4: Εκτίμηση βάρους εξαρτημάτων βαρέων αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων

Πηγή: (Harvey, J., Saboori, A., Miller, M., Kim, C., Jaller, M., Lea, J., et al, 2020)

Truck type/MY	Battery weight (kg)	Power electronics weight (kg)	Total extra truck weight (kg)
Long-haul 2030	3,672	450	2,422
Long-haul 2050	3,189	450	1,939
Short-haul 2030	1,890	450	640
Short-haul 2050	1,358	450	108
Medium-duty urban 2030	810	225	656
Medium-duty urban 2050	429	225	275

Ομοίως, συνέβη και με τα οχήματα κυψελών καυσίμου (FCEV = Fuel Cell Electric Vehicles). Οι ερευνητές τα θεώρησαν ως υβριδικά, αφού διαθέτουν κυψέλες καυσίμου και μπαταρίες και κατέληξαν στις εκτιμήσεις που δίνονται στους Πίνακες

3.5 και 3.6 για τα χαρακτηριστικά και τα βάρη τους (Η τελευταία στήλη του Πίνακα 3.6 απεικονίζει τη διαφορά του αθροίσματος βάρους των εξαρτημάτων των FCEV με τα 4 εξαρτήματα των diesel του Πίνακα 3.2) .

Πίνακας 3.5: Χαρακτηριστικά βαρέων οχημάτων με κυψέλες υδρογόνου
Πηγή: (Harvey, J., Saboori, A., Miller, M., Kim, C., Jaller, M., Lea, J., et al, 2020)

Parameter	Value
Long-haul	
Range (miles)	500
Fuel cell power (kW)	250
Battery pack (kWh)	40
Hydrogen storage (kg)	62
Short-haul	
Range (miles)	150
Fuel cell power (kW)	250
Battery pack (kWh)	20
Hydrogen storage (kg)	25
Medium-duty urban	
Range (miles)	150
Fuel cell power (kW)	125
Battery pack (kWh)	6
Hydrogen storage (kg)	8.5

Πίνακας 3.6: Εκτίμηση βάρους εξαρτημάτων βαρέων οχημάτων με κυψέλες υδρογόνου (FCEV)
Πηγή: (Harvey, J., Saboori, A., Miller, M., Kim, C., Jaller, M., Lea, J., et al, 2020)

Truck Type/MY	Fuel Cell Weight (kg)	Power Electronics Weight (kg)	Hydrogen Storage Weight (kg)	Battery Weight (kg)	Total extra truck weight (kg)
Long-haul					
2030	977	450	1088	216	1028
2050	500	450	827	135	211
Short-haul					
2030	977	450	439	108	273
2050	500	450	333	68	-348
Medium-duty urban					
2030	488	225	149	32	515
2050	250	225	113	20	229

Για τα οχήματα με φυσικό αέριο (NGV = Natural Gas Vehicles) οι ερευνητές κατέληξαν στο ότι τα βάρη τους δεν αναμένεται να μεταβληθούν στα επόμενα έτη, αφού το βάρος των δεξαμενών και εξαρτημάτων παραμένει σταθερό. Οπότε, θεώρησαν τις

(σταθερές) διαφορές βάρους σε σχέση με τα diesel που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.7:

Πίνακας 3.7: Εκτίμηση διαφορών βάρους βαρέων οχημάτων φυσικού αερίου (NGV) σε σχέση με τα diesel

Πηγή: (Harvey, J., Saboori, A., Miller, M., Kim, C., Jaller, M., Lea, J., et al, 2020)

Truck Type	Total extra truck weight (kg)
Long-haul	227
Short-haul	455
Medium-duty urban	909

Το τελευταίο μέρος της ανάλυσης του πρόσθετου βάρους ήταν ο προσδιορισμός της φόρτισης των αξόνων του οχήματος κάθε τύπου. Τα βάρη των εξαρτημάτων θεωρήθηκε ότι βρίσκονται πάνω από τον μπροστινό άξονα (δηλαδή κάτω από το καπό) ή μεταξύ του μπροστινού και του πίσω άξονα (δηλαδή πίσω από την καμπίνα ή στη ράγα του πλαισίου). Οι εκτιμήσεις για τις αλλαγές στην κατανομή βαρών σε σχέση με τα diesel βαρέα οχήματα αποτυπώνονται στον Πίνακα 3.8:

Πίνακας 3.8: Αλλαγές κατανομής βάρους στα βαρέα οχήματα νέας τεχνολογίας σε σχέση με τα diesel του 2020

Πηγή: (Harvey, J., Saboori, A., Miller, M., Kim, C., Jaller, M., Lea, J., et al, 2020)

	Long-haul: 2030 (kg)	Long-haul: 2050 (kg)	Short-haul: 2030 (kg)	Short-haul: 2050 (kg)	Medium-Duty Urban:2050 (kg)	Medium-Duty Urban:2050 (kg)
Battery Electric						
Under hood	-978	-978	-978	-978	-59	-59
Behind Cab	3394	2913	1616	1085	714	334
Fuel cell						
Under hood	-762	-344	-870	-412	-27	211
Behind Cab	1790	556	1142	63	541	19
Natural Gas						
Under hood	0	0	0	0	0	0
Behind Cab	907	907	454	454	227	227

Τέλος, με βάση ένα μοντέλο που λάμβανε υπόψιν τα μερίδια πωλήσεων των βαρέων οχημάτων νέας τεχνολογίας μέχρι τη στιγμή της μελέτης, προέβησαν σε εκτιμήσεις του αριθμού των οχημάτων -κάθε κατηγορίας- σε κυκλοφορία για τα 2 έτη-στόχους. Τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων παρέχονται στον Πίνακα 3.9.

Πίνακας 3.9: Εκτίμηση βαρέων οχημάτων σε κυκλοφορία ανά τύπο, έτος και σενάριο
Πηγή: (Harvey, J., Saboori, A., Miller, M., Kim, C., Jaller, M., Lea, J., et al, 2020)

Truck Scenario	2020 Total	2030 Total	2030 BEV	2030 FC	2030 NG	2050 Total	2050 BEV	2050 FC	2050 NG
LH 1	148,000	156,000	255	255	0	181,000	13,785	124,065	0
LH 2	148,000	156,000	170	170	0	181,000	9,190	82,710	0
LH 3	148,000	156,000	85	85	0	181,000	4,595	41,355	0
SH 1	44,000	48,000	4,845	242	495	56,000	24,080	31,920	0
SH 2	44,000	48,000	3,230	162	330	56,000	18,900	25,100	0
SH 3	44,000	48,000	1,615	81	165	56,000	9,450	12,550	0
MD 1	302,000	347,000	37,350	7,410	37,650	426,000	202,740	199,470	22,890
MD 2	302,000	347,000	24,900	4,940	25,100	426,000	186,000	183,000	21,000
MD 3	302,000	347,000	12,450	2,470	12,550	426,000	93,000	91,500	10,500

Note: BEV = battery electric; FC = fuel cell; NG = natural gas; LH = long haul; SH = short haul; MD = medium-duty urban;
 1 = high market penetration scenario; 2 = baseline scenario; 3 = low market penetration scenario

Ενώ για το έτος 2030 στα οχήματα της κατηγορίας long-haul παρουσιάζεται ίδια διείσδυση των BEV και των FCEV, το 2050 η διείσδυση των BEV είναι μόλις το 10% των FCEV γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με τις τελευταίες εκτιμήσεις της IEA. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στις τελευταίες εξελίξεις σχετικά με τις νέες τεχνολογίες ηλεκτρικών συσσωρευτών (μπαταρίες στερεού ηλεκτρολύτη) αλλά και την ταχεία επέκταση του δικτύου ταχυφορτιστών εν αντιθέσει με τα δίκτυα ανεφοδιασμού υδρογόνου. Χαρακτηριστική, επίσης, είναι η σταδιακή συρρίκνωση της παρουσίας των βαρέων οχημάτων φυσικού αερίου.

Τα δεδομένα της μελέτης πάρθηκαν από 132 σταθμούς WIM (Weigh In Motion) που το Υπουργείο Μεταφορών της Καλιфорνίας λειτουργεί σε καίρια σημεία αυτοκινητοδρόμων. Αυτοί οι σταθμοί συλλέγουν δεδομένα κυκλοφορίας, ταχυτήτων, μεικτών βαρών (GVW-Gross Vehicle Weight) και φορτίων αξόνων. Για την εκτίμηση των ζημιών του οδοστρώματος, χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα CalMe (για την ανάλυση ασφαλικών οδοστρωμάτων) και AASHTO Pavement Me (για τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα).

Τα συμπεράσματα ήταν συνοπτικά τα παρακάτω:

- Η επέκταση των βαρύτερων εμπορικών οχημάτων εναλλακτικών καυσίμων αναμένεται να οδηγήσει σε ελάχιστες πρόσθετες ζημιές στα οδοστρώματα

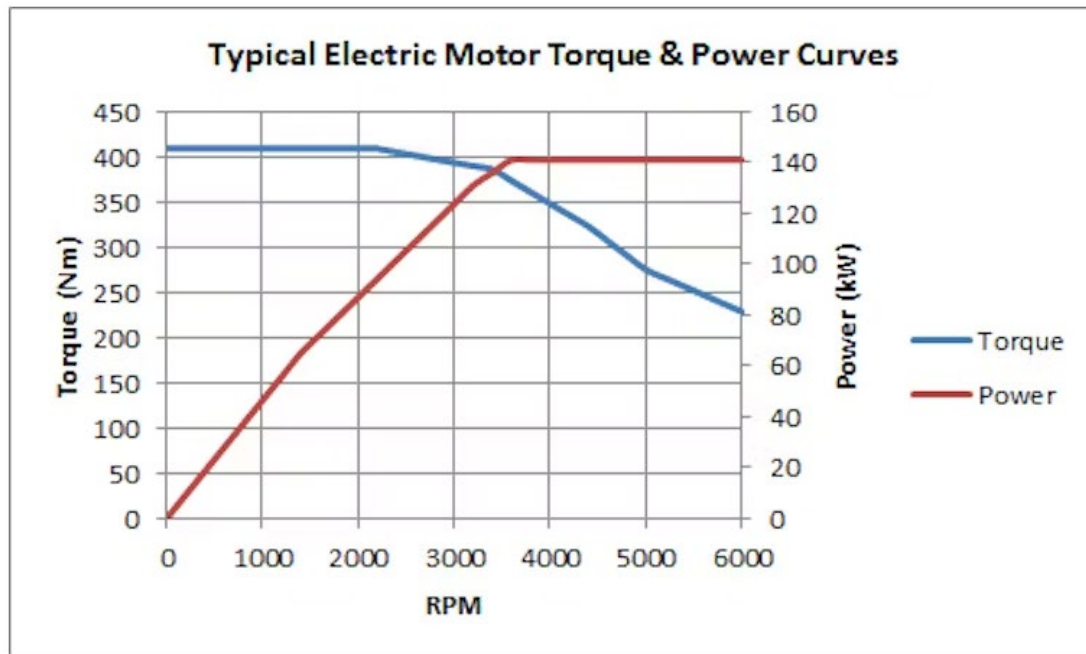
των τοπικών οδών και των αυτοκινητοδρόμων (<1%) . Η έκταση των ζημιών είναι ανάλογη της δομής του οδοστρώματος και του σεναρίου που εξετάζεται.

- Τα EV και FCEV βαρέα οχήματα θα παραμείνουν έως το 2030 βαρύτερα από τα diesel. Η εξέλιξη, όμως, της τεχνολογίας θα οδηγήσει τα βάρη τους σε πολύ κοντινά επίπεδα σε σχέση με τα σημερινά diesel έως το 2050. Σε συνδυασμό με τη μικρή διείσδυση τους έως το 2030 είναι ένας από τους λόγους χαμηλών φθορών στα οδοστρώματα.
- Με βάση τα νέα φορτία των αξόνων παρατηρείται ότι σε πολύ λίγες περιπτώσεις αυτά ξεπερνούν τα όρια και κρίνονται επιζήμια για τα οδοστρώματα. Επίσης, η αύξηση αυτή παρατηρείται μόνο στις κατηγορίες long-haul και short-haul και μόνο όσον αφορά τον εμπρός άξονα.
- Τα οχήματα φυσικού αερίου δεν αναμένεται να γίνουν ελαφρύτερα, αλλά η διείσδυση τους στην αγορά είναι πολύ μικρή και φθίνουσα.
- Η μελέτη έδειξε, επίσης, ότι τα οχήματα νέας τεχνολογίας θα προκαλέσουν προβλήματα μόνο με χρήση σε μεγάλη κλίμακα και πριν από την αναμενόμενη μείωση του βάρους τους. Σε αυτή την περίπτωση το κόστος δομικής αναβάθμισης των οδοστρωμάτων αναμένεται να αυξηθεί περίπου 20% σε σχέση με το αντίστοιχο, αν τα οχήματα ήταν πετρελαιοκίνητα.
- Το πιο επιθετικό σενάριο διείσδυσης στην αγορά των νέων οχημάτων οδήγησε σε μείωση των εκπομπών από την κίνηση βαρέων οχημάτων κατά 2700 kT CO₂-e ετησίως έως το 2030 και 34000 kT έως το 2050 σε σύγκριση με τη διατήρηση των diesel βαρέων οχημάτων (για το χαμηλό σενάριο διείσδυσης υπολογίστηκε αντίστοιχα σε 1200 kT ετησίως έως το 2030 και 6300 kT έως το 2050). Για σύγκριση, οι συνολικές εκπομπές το 2016 από τον τομέα των μεταφορών ήταν 175000 kT που αποτελεί με τη σειρά του το 41% του συνόλου της περιοχής μελέτης. Οι εκπομπές που σχετίζονται με την αποκατάσταση των οδοστρωμάτων λόγω του αυξημένου βάρους των οχημάτων εκτιμήθηκαν ότι είναι 70 έως 900 φορές μικρότερες σε σχέση με το κέρδος που θα υπάρξει από τη λειτουργία τους.

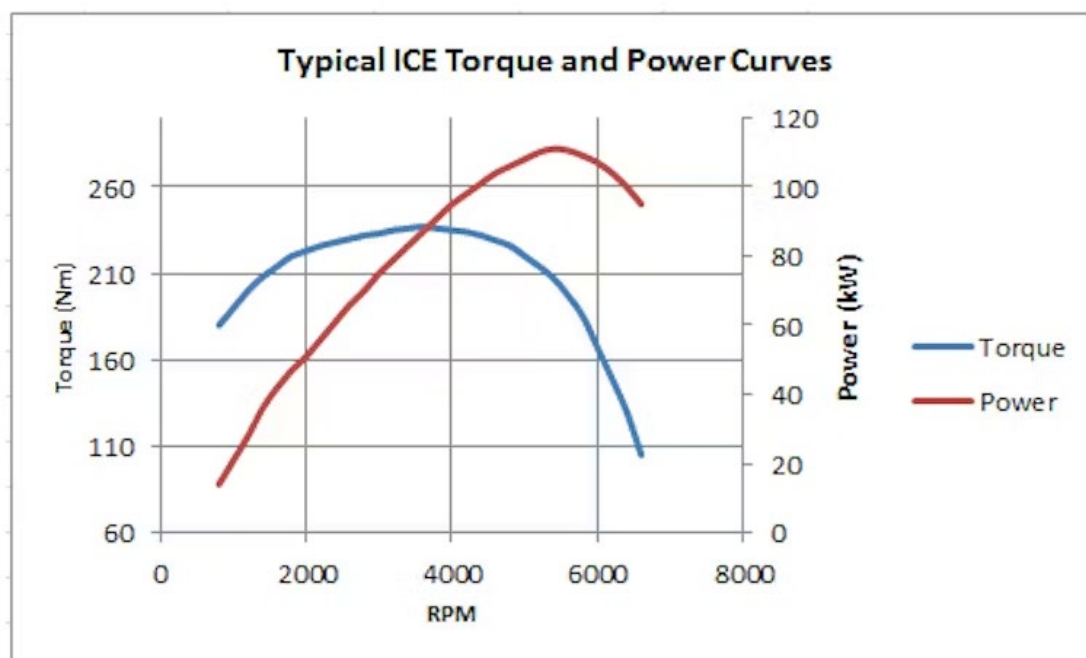
3.2.2 Ροπή στρέψης ηλεκτροκινητήρα

Όσον αφορά τα οχήματα, το μέγεθος της ροπής του κινητήρα δείχνει την ικανότητα παραγωγής έργου μια δεδομένη χρονική στιγμή. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες γενικά παράγουν υψηλότερα ποσά ροπής από τους θερμικούς και μάλιστα διαθέσιμα άμεσα κατά την εκκίνηση και σταθερά για όλο το φάσμα λειτουργίας τους. Αντίθετα,

οι θερμικοί κινητήρες λόγω της αδράνειας των μηχανικών μερών τους παράγουν μικρότερα ποσά ροπής χωρίς αυτά να είναι σταθερά στο φάσμα λειτουργίας τους. Στα διαγράμματα των Εικόνων 3.3 και 3.4 δίνονται ενδεικτικά για έναν ηλεκτροκινητήρα και έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης οι καμπύλες ροπής-ισχύος:



Εικόνα 3.3: Τυπικές καμπύλες ροπής-ισχύος ηλεκτροκινητήρα
Πηγή: (Barreto, 2015)



Εικόνα 3.4: Τυπικές καμπύλες ροπής-ισχύος θερμικού κινητήρα
Πηγή: (Barreto, 2015)

Παρατηρούμε ότι ο ηλεκτροκινητήρας παράγει το μέγιστο της ροπής του ήδη από τις 0 στροφές ανά λεπτό και ότι παραμένει σταθερό για ένα μεγάλο εύρος στροφών έως ότου επιτευχθεί η μέγιστη ισχύς του η οποία μάλιστα παραμένει σταθερή στη συνέχεια. Αντίθετα, ο θερμικός κινητήρας έχει ένα εύρος αδράνειας στην αρχή και η καμπύλη ροπής του παρουσιάζει αύξουσα και φθίνουσα τάση. Αυτό σημαίνει, ότι οι ηλεκτροκινητήρες παράγουν την ισχύ τους άμεσα και άρα τα ηλεκτροκίνητα οχήματα έχουν πιο άμεσες επιταχύνσεις και πιο απότομες εκκινήσεις από στάση.

Η σχέση που συνδέει τα μεγέθη της ροπής (torque), της ισχύος (power) και της ταχύτητας (speed) του κινητήρα σε στροφές ανά λεπτό (Rotations Per Minute – RPM) είναι η εξής (στην παρένθεση η μονάδα μέτρησης κάθε μεγέθους):

$$\text{Torque (Nm)} = \frac{\text{Power (Hp)} \times 7120}{\text{Speed (RPM)}} \quad (3.1)$$

Η πρόσθετη ροπή των ηλεκτρικών οχημάτων και η ως επακόλουθο μεγαλύτερη δύναμη και επομένως επιτάχυνση έχει προξενήσει το ενδιαφέρον των ερευνητών τόσο όσον αφορά το θέμα της οδικής ασφάλειας όσο και το θέμα της κατασκευής και συντήρησης των οδοστρωμάτων.

Το τμήμα μεταφορών του πανεπιστημίου του Illinois διεξάγει μελέτη, ώστε να αξιολογήσει τον αντίκτυπο των ηλεκτρικών βαρέων οχημάτων στο κόστος κύκλου ζωής των εύκαμπτων οδοστρωμάτων και να προτείνει τροποποιήσεις στο σχεδιασμό και τη συντήρηση του οδοστρώματος. Μέρος της μελέτης είναι η ποσοτικοποίηση της αύξησης της δύναμης που ασκούν τα ελαστικά στο οδόστρωμα λόγω του αυξημένου βάρους και της αυξημένης ροπής των ηλεκτρικών οχημάτων. Επιπλέον, θα περιλαμβάνει στρατηγικές για να αντιμετωπιστεί η αυξημένη καταπόνηση λόγω αυτών των αλλαγών. Τέτοιες στρατηγικές μπορεί να είναι τροποποιήσεις σε ασφαλικά μείγματα για την κατασκευή οδοστρωμάτων ή ακόμα και νέες διαδικασίες συντήρησης. Η μελέτη ξεκίνησε τον Αύγουστο του 2022 και αναμένεται να ολοκληρωθεί τον Φεβρουάριο του 2025 (Jayme, A., Al-Qadi, I., Hernandez, J., Mohamed Ali, U., 2022).

3.3 Ενσωμάτωση επαγωγικών συστημάτων φόρτισης στα οδοστρώματα

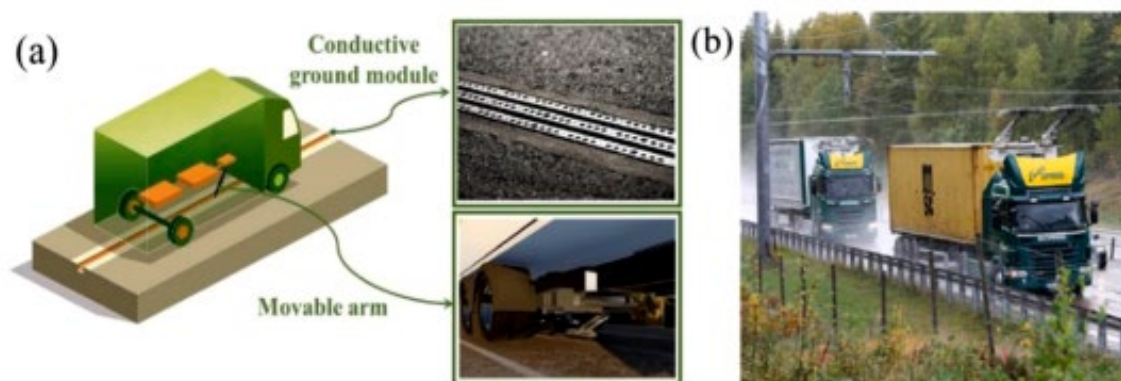
Η αύξηση των ηλεκτροκίνητων οχημάτων έχει οδηγήσει σε έρευνες για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και υποδομών για να τα εξυπηρετήσουν. Μία τέτοια έρευνα είναι και το ευρωπαϊκό πρόγραμμα [INCIT-EV](#) που στοχεύει να επιδείξει ένα καινοτόμο σύνολο υποδομών φόρτισης, τεχνολογιών και συναφών επιχειρηματικών μοντέλων, ώστε να βελτιώσει την εμπειρία των χρηστών ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Το πρόγραμμα ξεκίνησε την 1^η Ιανουαρίου 2020 και αναμένεται να ολοκληρωθεί στις 30 Ιουνίου 2024. Είναι χρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Ένωση και αποτελείται από 33 εταίρους μεταξύ των οποίων 6 πάροχοι τεχνολογιών φόρτισης, 5 δημόσιες αρχές, 2 εταιρίες οδικών υποδομών και 2 εταιρίες ανάλυσης της συμπεριφοράς και των προτιμήσεων των χρηστών. Η επίδειξη των νέων τεχνολογιών θα γίνει σε 5 ευρωπαϊκές πόλεις (European Commission, 2019).

Μία από τις τεχνολογίες που θα αναπτυχθούν και αποτελεί ξεχωριστό αντικείμενο μελέτης για τους ερευνητές είναι η ενσωμάτωση, στα ασφαλικά οδοστρώματα, τεχνολογίας ασύρματης επαγωγικής φόρτισης των οχημάτων ακόμα και όταν αυτά θα είναι εν κινήσει. Η ιδέα πίσω από αυτά τα συστήματα (ERS - Electric Road Systems) είναι να φορτίζει το όχημα ενώ κινείται, επεκτείνοντας έτσι την αυτονομία του χωρίς να απαιτείται πολύ μεγάλη χωρητικότητα μπαταρίας και χωρίς απώλεια χρόνου που απαιτείται για στατική φόρτιση. Προς το παρόν οι μόνες τεχνολογίες που βρίσκονται σε εφαρμογή και παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε οχήματα καθοδόν, αφορούν βαρέα οχήματα δημόσιας χρήσης (Βλ. Εικόνα 3.5). Οι τεχνολογίες αυτές είναι:

α) Ηλεκτροφόρες ράγες ενσωματωμένες στο οδόστρωμα που παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε μία μονάδα εγκατεστημένη στο όχημα (τραμ, μετρό).

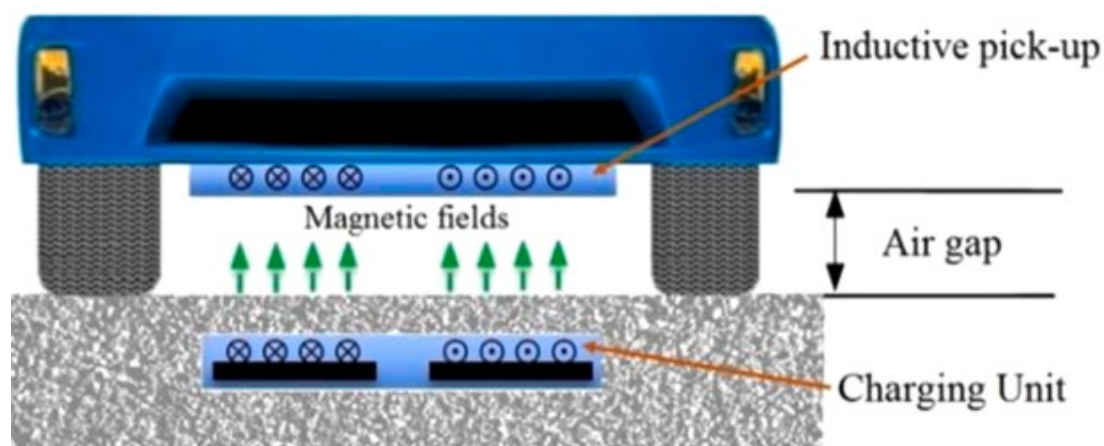
β) Διατάξεις (παντογράφοι) που τοποθετούνται στην κορυφή ενός ηλεκτρικού τρένου, τραμ ή λεωφορείου και αντλούν ηλεκτρική ενέργεια από εναέρια καλώδια.

Και οι δύο τεχνολογίες, όμως, απαιτούν φυσική επαφή των υλικών για την μετάδοση της ενέργειας και απευθύνονται σε επαγγελματίες οδηγούς.

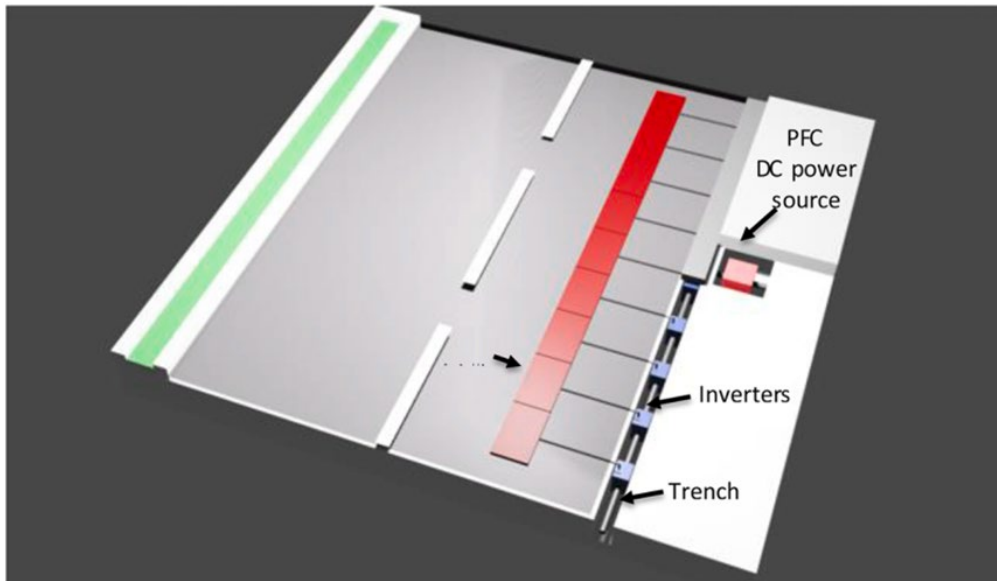


Εικόνα 3.5: Μετάδοση ενέργειας στο όχημα με ηλεκτροφόρες ράγες (a) και παντογράφους (b)
 Πηγή: (Mazhoud B., Gabet T., Kadem K., Meira Z., Sanzel A., Coquelle E., Horny P., 2022)

Η τεχνολογία της ασύρματης επαγωγικής φόρτισης βασίζεται στην ανέπαφη μετάδοση ηλεκτρικής ενέργειας που επιτυγχάνεται μέσω μαγνητικής σύζευξης που αναπτύσσεται μεταξύ ενός πρωτεύοντος πηνίου που είναι εγκατεστημένο στο οδόστρωμα και ενός δευτερεύοντος πηνίου που βρίσκεται στο όχημα (Βλ. Εικόνες 3.6 και 3.7).



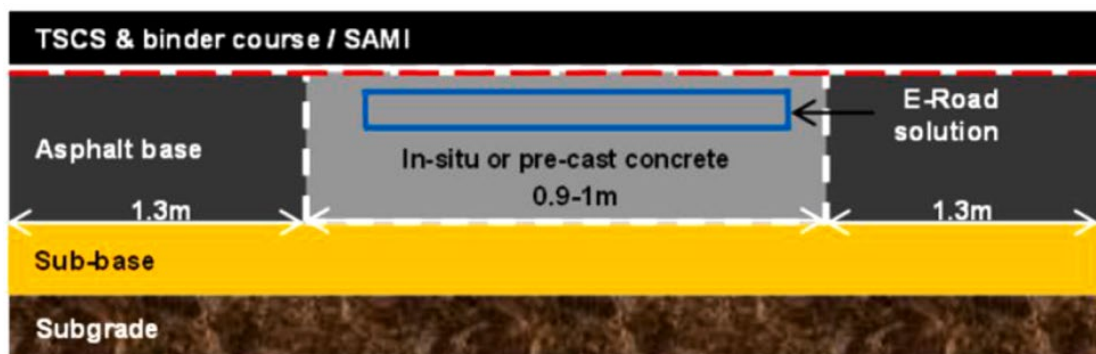
Εικόνα 3.6: Διάταξη ασύρματης επαγωγικής φόρτισης οχήματος (1)
 Πηγή: (Mazhoud B., Gabet T., Kadem K., Meira Z., Sanzel A., Coquelle E., Horny P., 2022)



Εικόνα 3.7: Διάταξη ασύρματης επαγωγικής φόρτισης οχήματος (2)
 Πηγή: (Mazhoud B., Gabet T., Kadem K., Meira Z., Sanzel A., Coquelle E., Horny P., 2022)

Τα πρωτεύοντα πηνία είναι ενσωματωμένα στο οδόστρωμα στη μέση της λωρίδας και κοντά στην επιφάνεια. Διάφορες λύσεις έχουν προταθεί και εξακολουθούν να προτείνονται για την τοποθέτηση των πηνίων στο οδόστρωμα. Κάποιες από αυτές είναι:

α) Η τοποθέτηση των πηνίων σε τάφρο/μικρορύγγμα (βλ. Εικόνα 3.8) που δημιουργείται στο μέσον της λωρίδας και έπειτα γεμίζεται με σκυρόδεμα, για την ενοποίηση με το ασφαλτόμιγμα, και στη συνέχεια επικαλύπτεται με νέο τμήμα ασφαλτομίγματος.



Εικόνα 3.8: Τεχνική μικρορύγματος για την εγκατάσταση πηνίων στο οδόστρωμα
 Πηγή: (Chen, 2016)

Αν και πρόκειται για μια μέθοδο που μπορεί να εφαρμοστεί και σε υπάρχοντα οδοστρώματα, η επαφή διαφορετικών υλικών (άσφαλτος και σκυρόδεμα) μεταξύ τους ελλοχεύει κινδύνους φθοράς στις εναλλαγές θερμοκρασιών.

β) Η τοποθέτηση των πηνίων σε κατασκευές πλήρους πλάτους λωρίδας από σκυρόδεμα. Η μέθοδος αυτή παρέχει καλή προστασία των πηνίων, ακριβέστερη

τοποθέτηση, μειωμένο χρόνο εγκατάστασης και επιπλέον αποφεύγονται οι ασυνέχειες και οι ενώσεις που προκύπτουν εγκάρσια της λωρίδας όταν συνυπάρχουν διαφορετικά υλικά. Ωστόσο, πρόκειται για ακριβή μέθοδο με εφαρμογή μόνο σε νέες κατασκευές.

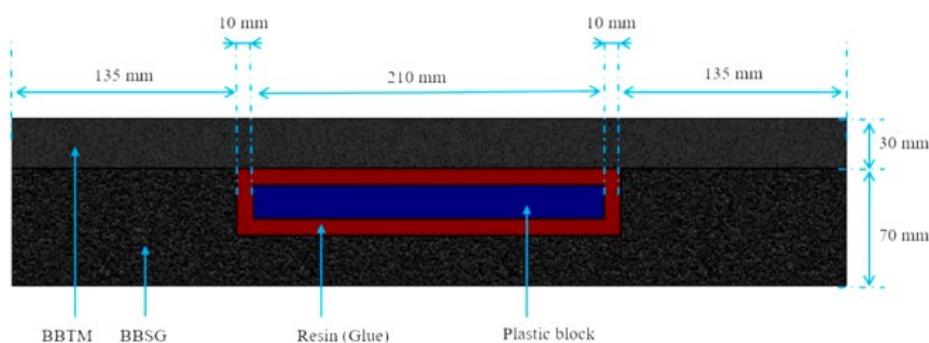
Η ενσωμάτωση στα οδοστρώματα ολοκληρωμένων συστημάτων ασύρματης επαγωγικής φόρτισης αποτελεί πρόκληση για τους μελετητές μηχανικούς και τους κατασκευαστές, αφού:

- Τα υλικά των διαφορετικών συστημάτων που είναι ενσωματωμένα στο δρόμο και τα υλικά του οδοστρώματος πρέπει να είναι συμβατά μεταξύ τους.
- Οι ασυνέχειες και οι αρμοί μεταξύ υλικών με διαφορετικές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες μπορεί να οδηγήσει σε ρωγμές και φθορά.
- Τα πρωτεύοντα επαγωγικά πηνία πρέπει να τοποθετηθούν σε σχετικά χαμηλό βάθος (ιδανικά 5 με 6 cm) κάτω από την επιφάνεια του οδοστρώματος έτσι ώστε να μην υπάρχει μεγάλο διάκενο που θα δυσκολεύει την μαγνητική σύζευξη τους με τα δευτερεύοντα πηνία του οχήματος. Ο περιορισμός στο πάχος αυτού του τμήματος στο οδόστρωμα μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη αντοχή, κίνδυνο κόπωσης και ρωγμές. Ιδιαίτερα, αν τα υλικά στα οποία τοποθετούνται τα συστήματα φόρτισης παρουσιάζουν χαμηλότερη ακαμψία ή αν οι συγκολλήσεις δεν είναι επαρκείς.
- Όταν το σύστημα φόρτισης είναι σε λειτουργία τα πηνία θερμαίνονται και ανεβάζουν θερμοκρασία λόγω του φαινομένου Joule. Μεγαλύτερη ισχύς φόρτισης συνεπάγεται και μεγαλύτερη έκλυση θερμότητας. Η άνοδος της θερμοκρασίας του συστήματος φόρτισης μπορεί, εν δυνάμει, να οδηγήσει και σε σημαντική αύξηση θερμοκρασίας των υλικών του οδοστρώματος. Πρέπει, λοιπόν οι μέγιστες θερμοκρασίες που μπορεί να φτάσει το σύστημα και το οδόστρωμα να αξιολογηθούν και να επιλεγούν υλικά συμβατά με αυτές τις θερμοκρασίες, λαμβάνοντας πάντα υπόψη και την άνοδο της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος κατά τη θερινή περίοδο και ανάλογα την περιοχή (Mazhoud B., Gabet T., Kadem K., Meira Z., Sanzel A., Coquelle E., Horny P., 2022).

Μελέτη σχετικά με την ενσωμάτωση των επαγωγικών βρόγχων φόρτισης σε πλάκα από σκυρόδεμα που πραγματοποιήθηκε μέσω μοντελοποίησης FEM (Finite Element Modeling), έδειξε ότι η παρουσία της άκαμπτης πλάκας στο οδόστρωμα τροποποιεί

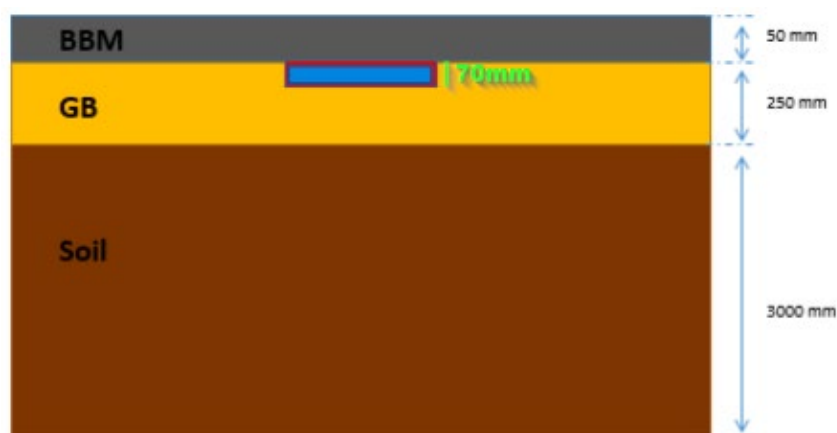
σημαντικά τη μηχανική του απόκριση υπό κυκλοφοριακή φόρτιση και αυξάνει τον κίνδυνο αστοχίας. Αυτό συμβαίνει, επειδή δημιουργούνται μεγάλες διατμητικές τάσεις κοντά στις επιφάνειες και στις γωνίες της πλάκας σκυροδέματος. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα, η λύση που προτάθηκε ήταν η μείωση της ακαμψίας της πλάκας και κατ' επέκταση η αντικατάσταση του σκυροδέματος με άλλο υλικό (πολυαιθυλένιο, πολυουρεθάνιο) (Chen, 2016) ή συνδυασμός του σκυροδέματος με άλλα υλικά (ρητίνες).

Σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος INCIT-EV και αφορούσε υλικά κατάλληλα για την αντικατάσταση του σκυροδέματος ή τη χρήση σε συνδυασμό με αυτό, επιλέχθηκε η άκαμπτη ρητίνη στεγανοποίησης Plastiroc. Προηγήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές και μοντελοποίηση (Βλ. Εικόνες 3.9 και 3.10). Η μηχανική συμπεριφορά του πηνίου που είναι ενσωματωμένο στο οδόστρωμα αξιολογήθηκε σε εργαστηριακή κλίμακα με δοκιμές παρακολούθησης τροχών σε πλάκες οδοστρώματος που έδειξαν ισχυρή επίδραση της ακαμψίας των ενσωματωμένων στοιχείων στις μόνιμες παραμορφώσεις του οδοστρώματος. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων προκειμένου να επαληθευτεί η αντοχή συγκόλλησης μεταξύ του πηνίου και της ρητίνης που επιλέχθηκε για την ενσωμάτωσή του στο οδόστρωμα. Μέσω της μεθόδου FEM αξιολογήθηκε η μηχανική και θερμική συμπεριφορά του ηλεκτρικού οδικού συστήματος υπό φόρτιση με βαρέα οχήματα. Συνοψίζοντας, το συμπέρασμα που προέκυψε ήταν πως η κατασκευή παρουσίαζε καλή μηχανική συμπεριφορά όταν η ακαμψία των ενσωματωμένων στοιχείων δεν ήταν πολύ διαφορετική από την ακαμψία των στρωμάτων ασφάλτου.



Εικόνα 3.9: Γεωμετρία εργαστηριακού δοκιμίου

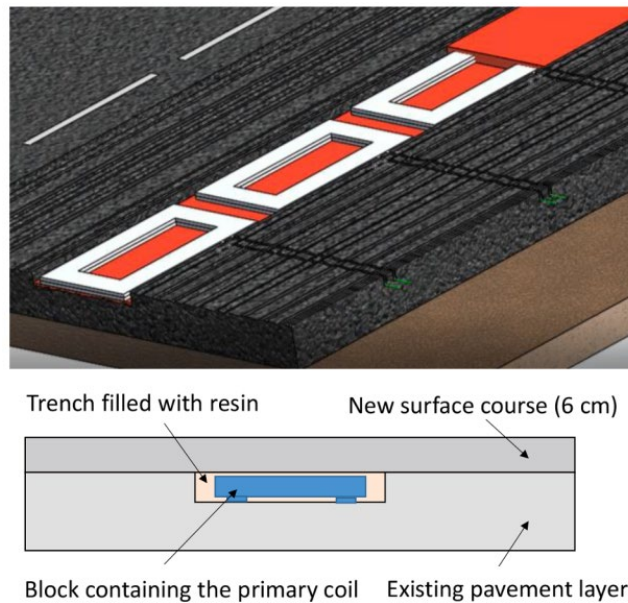
Πηγή: (Mazhoud B., Gabet T., Kadem K., Meira Z., Sanzel A., Coquelle E., Hornych P., 2022)



Εικόνα 3.10: Διατομή ελέγχου με την μέθοδο FEM

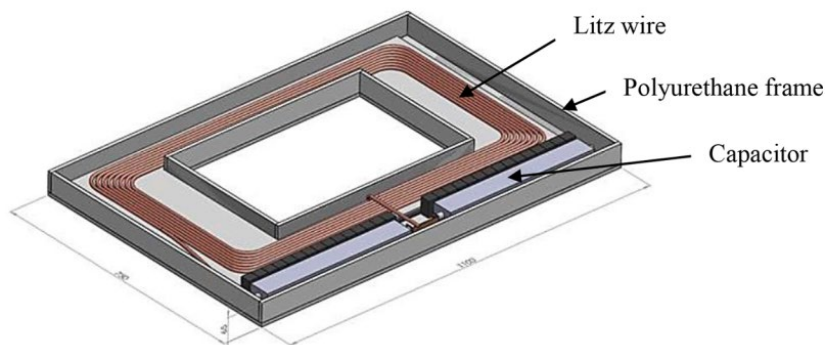
Πηγή: (Mazhoud B., Gabet T., Kadem K., Meira Z., Sanzel A., Coquelle E., Hornych P., 2022)

Έτσι, η επιλογή μιας άκαμπτης ρητίνης (Plastiroc) ως επικάλυψη του μπλοκ των πηνίων (Βλ. Εικόνες 3.11 και 3.12) κρίθηκε καταλληλότερη σε σχέση με άλλες λιγότερο άκαμπτες (VA60), αφού είχε την ικανότητα να διαχέει τις αναπτυσσόμενες τάσεις. Όσον αφορά τη θερμική συμπεριφορά, τονίστηκε ότι σε υψηλή ισχύ φόρτισης τα πηνία θερμαίνονται σημαντικά και έτσι, ανάλογα με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και το σενάριο φόρτισης, η θερμοκρασία του οδοστρώματος θα μπορούσε να υπερβεί τους 60°C που συνεπάγεται κίνδυνο τροχοαυλάκωσης των ασφατικών στρωμάτων (Mazhoud B., Gabet T., Kadem K., Meira Z., Sanzel A., Coquelle E., Hornych P., 2022). Σε μελέτη που δημοσιεύτηκε το 2023, η χρήση σκυροδέματος στο μπλοκ των πηνίων (με επικάλυψη από την ρητίνη Plastiroc) κρίθηκε ως καλή επιλογή αφού, λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας και της χαμηλότερης θερμικής διαστολής, συνέβαλε στη μείωση των μέγιστων τάσεων και καταπονήσεων στα ασφατικά στρώματα (Gabet T., Mazhoud B., Kadem K., Meira Z., Sanzel A., Coquelle E., Sedran T., Hornych P., 2023). Η θερμική συμπεριφορά της κατασκευής σαν σύνολο είναι κάτι που χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση καθώς απαιτείται και συσχετισμός των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας με τις περιπτώσεις αυξημένου κυκλοφοριακού φόρτου (κίνδυνος υπερθέρμανσης).



Εικόνα 3.11: Προτεινόμενη λύση για την ενσωμάτωση πηνίων επαγωγικής φόρτισης στα οδοστρώματα

Πηγή: (Mazhoud B., Gabet T., Kadem K., Meira Z., Sanzel A., Coquelle E., Hornych P., 2022)



Εικόνα 3.12: Τομή του τμήματος που περιέχει το πρωτεύον πηνίο φόρτισης (Διαστάσεις: 110x70x4.5 cm)

Πηγή: (Mazhoud B., Gabet T., Kadem K., Meira Z., Sanzel A., Coquelle E., Hornych P., 2022)

Η ενσωμάτωση ασύρματων συστημάτων δυναμικής φόρτισης στα οδοστρώματα, εκτός των μελετών για τη συμβατότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται για την εγκατάσταση των πηνίων, οδήγησε και σε μελέτες για την απόδοση της ασύρματης μετάδοσης ενέργειας. Τα πρωτεύοντα πηνία (πομποί) για λόγους προστασίας δεν μπορούν να εκτεθούν απευθείας στην επιφάνεια του δρόμου. Η τοποθέτησή τους γίνεται κάτω από το στρώμα της κυκλοφορίας και έτσι αυξάνεται η απόστασή τους από τα δευτερεύοντα πηνία (δέκτες) των οχημάτων. Επιπλέον, κάθε υλικό κατασκευής του οδοστρώματος έχει έναν συγκεκριμένο συντελεστή διηλεκτρικής απώλειας που μάλιστα αυξάνεται όταν το οδόστρωμα είναι βρεγμένο (Chen, F.,

Taylor, N., Balieu, R. and Kringos, N., 2017) (Venugopal, P., Shekhar, A., Visser, E., Scheele, N., Mouli, G.R.C., Bauer, P. and Silvester, S., 2018). Τέλος, η υπάρχουσα κατασκευή οδοστρώματος μπορεί να οδηγήσει σε αναντιστοιχία συχνότητας μεταξύ των συζευγμένων κυκλωμάτων (Chen, F., Taylor, N., Balieu, R. and Kringos, N., 2017) (Sun, X., Chen, Y., Feng, J. and Li, F., 2020). Όλα τα παραπάνω οδηγούν σε μείωση ή απώλεια ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης κατά την ασύρματη μεταφορά ισχύος.

Προκειμένου, η απόδοση της ηλεκτρομαγνητικής μετάδοσης να βελτιωθεί γίνονται μελέτες για αλλαγή της θέσης των πηνίων, αλλαγή του πάχους των στρώσεων ή τροποποίηση των υλικών του οδοστρώματος. Ωστόσο, οι περισσότερες δεν μελετάνε πώς επηρεάζεται η δομική αντοχή του οδοστρώματος από αυτές τις αλλαγές κάτι που σύμφωνα με άλλους ερευνητές είναι πολύ σημαντικό, αφού αλλαγές στο βάθος και στον τρόπο ενσωμάτωσης των πηνίων φόρτισης σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα προκαλούν σημαντική διαφορά στο μέγεθος και στη θέση των κρίσιμων βλαβών σε σύγκριση με ένα συμβατικό οδόστρωμα (Marghani A., Wilson D.J., Larkin T., 2019).

Μια καινοτόμα μελέτη αφορά στο σχεδιασμό μερικώς μαγνητισμένου οδοστρώματος, δηλαδή οδοστρώματος που θα διαθέτει μια διαδρομή που να μπορεί να οδηγήσει καλύτερα τη μαγνητική ροή και τη σύνδεση μεταξύ πομπού και δέκτη. Ήδη από το 2017 είχε μελετηθεί η χρήση στην κατασκευή των δρόμων, των σύνθετων υλικών από Μαγνητίσιμο Σκυρόδεμα (MagCon) που επρόκειτο για ανάμειξη τσιμέντου με μαγνητικό υλικό (όπως κονιοποιημένο φερρίτη ή μαγνητίτη) και άλλα αδρανή (R. Tavanoli et al., 2017). Η ανάλυση έδειξε βελτίωση της απόδοσης κατά 1,5% όταν το πηνίο βρίσκεται σε βάθος 0,1 m με δυνατότητα να φτάσει έως το 12% εάν το στρώμα μαγνητισμένου οδοστρώματος πάνω από το πηνίο είναι 0,4 m. Επιπλέον, η μετάδοση ενέργειας εξακολουθούσε να συμβαίνει ακόμα και όταν το όχημα απομακρυνόταν από το κέντρο της λωρίδας οδήγησης κατά 0,5 m. Η καλύτερη απόδοση του συστήματος οδηγεί και σε σημαντική εξοικονόμηση κόστους ηλεκτρικής ενέργειας (Wang Hao, Guo Lukai., 2022).

Συμπερασματικά, από την έως τώρα έρευνα φαίνεται πως για την αξιολόγηση της απόδοσης και της ανθεκτικότητας ενός οδοστρώματος που ενσωματώνει ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης πρέπει να γίνονται οι ακόλουθες μελέτες:

- Χαρακτηρισμός των μηχανικών ιδιοτήτων (σε διαφορετικές θερμοκρασίες αν είναι αναγκαίο) και των θερμικών ιδιοτήτων (θερμοχωρητικότητα, θερμική αγωγιμότητα, θερμική διαστολή) όλων των υλικών που συνθέτουν το σύστημα.

- Χαρακτηρισμός της αντίστασης των διεπαφών μεταξύ του συστήματος φόρτισης και των υλικών του οδοστρώματος, χρησιμοποιώντας για παράδειγμα δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων ή δοκιμές εφελκυσμού.
- Δοκιμές παρακολούθησης τροχών σε μοντέλα μειωμένης κλίμακας, με προσομοίωση της επίδρασης της επαναλαμβανόμενης φόρτισης από τον τροχό στο ενσωματωμένο σύστημα μετάδοσης ενέργειας, σε διαφορετικές θερμοκρασίες για τη μελέτη πιθανών μηχανισμών φθοράς, όπως ραγίσματα, ρωγμές, αποκόλληση διεπαφής.
- Δοκιμές απόδοσης φόρτισης στα πηνία που είναι ενσωματωμένα σε υλικά οδοστρώματος για την αξιολόγηση της απόδοσης φόρτισης καθώς και για τη μέτρηση των διακυμάνσεων θερμοκρασίας που προκαλούνται από το σύστημα φόρτισης.
- Προσομοιώσεις θερμικής συμπεριφοράς (θερμο-ιξωδοελαστική ανάλυση), προκειμένου να εκτιμηθούν οι αναμενόμενες διακυμάνσεις θερμοκρασίας στο δρόμο και οι επιπτώσεις τους.
- Προσομοιώσεις μηχανικής συμπεριφοράς κατά τη φόρτιση από οχήματα, για διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας, ώστε να αξιολογηθούν τα πεδία καταπόνησης της δομής και να συγκριθούν με τα κατάλληλα κριτήρια αστοχίας.
- Προαιρετικά, θα μπορούσαν να γίνουν προηγμένες θερμομηχανικές προσομοιώσεις ώστε να χρησιμοποιηθούν, για παράδειγμα, στην αξιολόγηση της συμπεριφοράς της σχέσης τάσης και παραμόρφωσης λόγω κύκλων θερμοκρασίας και να αξιολογηθεί κατ' επέκταση και ο κίνδυνος αστοχίας.

Εν κατακλείδι, θα πρέπει να αναφερθεί ότι σύμφωνα με τις πρώτες εκτιμήσεις που προέκυψαν από προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων, οδοστρώματα με ενσωματωμένο σύστημα επαγωγικής φόρτισης τείνουν να χρειάζονται πιο συχνή συντήρηση (Chen F., Balieu R., Córdoba E., Kringos N., 2017). Γίνεται, λοιπόν, κατανοητή η πρόκληση που δημιουργεί για τους μηχανικούς η ενσωμάτωση επαγωγικών συστημάτων φόρτισης στα οδοστρώματα αφού θα πρέπει:

- Να αναλύονται τα στοιχεία που θα ενσωματωθούν (αισθητήρες, πηνία) και κατά πόσο το οδόστρωμα τα προστατεύει από την κυκλοφορία και τους ατμοσφαιρικούς παράγοντες.
- Να μελετάται η επιρροή των ενσωματωμένων στοιχείων στην αντοχή του οδοστρώματος.

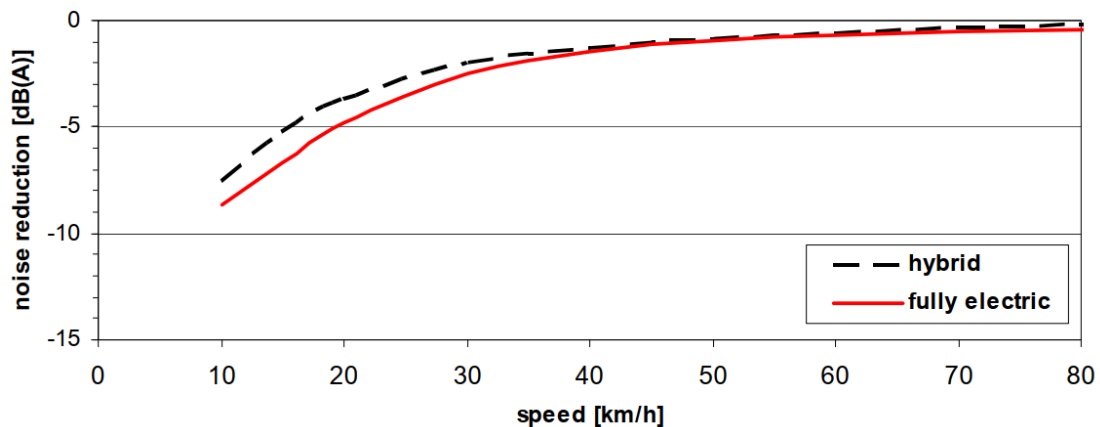
- Να λαμβάνονται υπόψη τρόποι για τη συντήρηση και την αντικατάστασή τους (λόγω φθοράς ή τεχνολογικής απαξίωσης), χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά η κυκλοφορία.

Για να γίνουν τα παραπάνω θα πρέπει να αναπτυχθούν εργαλεία μοντελοποίησης για το σχεδιασμό και την επικύρωση των λύσεων ERS τα οποία θα είναι πιστοποιημένα για την εγκυρότητά τους τόσο μέσω εργαστηριακών δοκιμών μικρής κλίμακας -που είναι πιο εύκολο να εκτελεστούν- όσο και από δοκιμές πλήρους κλίμακας, όπως αυτή του προγράμματος INCIT-EV.

3.4 Ακουστικός σχεδιασμός οδοστρωμάτων

Στην κυκλοφορία στον αστικό ιστό τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα δεν είναι μόνο πιο φιλικά προς το περιβάλλον λόγω μηδενικών εκπομπών ρύπων αλλά και πιο αθόρυβα (Βλ. Εικόνα 3.13) σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης λόγω της απουσίας του θορύβου καύσης και του μηχανολογικού θορύβου της κίνησης των εμβόλων. Ιδιαίτερα μέχρι τα 20 km/h, που απουσιάζει ο θόρυβος κύλισης, τα ηλεκτρικά οχήματα είναι εντελώς αθόρυβα. Από τα 50 km/h και πάνω κυρίαρχη πηγή θορύβου είναι ο θόρυβος ελαστικού-οδοστρώματος, οπότε οι εκπομπές θορύβου ηλεκτρικών και συμβατικών οχημάτων είναι στα ίδια επίπεδα. Ένας πλήρως εξηλεκτρισμένος στόλος θα είναι 3 έως 4 dB πιο αθόρυβος σε σύγκριση με τον σημερινό στόλο. Αυτό θα σημάνει περιορισμό της ηχορύπανσης κατά το ένα τρίτο. Ωστόσο, δεν αναμένεται να συμβεί πριν το 2030 όπου και θα κυκλοφορούν αρκετά ηλεκτρικά οχήματα (Verheijen E.N.G., Jabben J., 2010).

Είναι εμφανές ότι τα ηλεκτρικά οχήματα κατά την κίνηση τους εντός πόλεων μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένο κίνδυνο πεζούς, ποδηλάτες και ιδίως άτομα με προβλήματα όρασης, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις που η ταχύτητα κίνησης είναι χαμηλή όπως κατά τη διάρκεια της οπισθοπορείας ή των ελιγμών στάθμευσης. Στις Η.Π.Α. ανάλυση των στοιχείων των τροχαίων ατυχημάτων έδειξε ότι τα υβριδικά αυτοκίνητα (που μάλιστα είναι λιγότερο αθόρυβα σε σχέση με τα ηλεκτρικά αφού παράγουν 1 με 2 dB λιγότερο θόρυβο σε σχέση με τα συμβατικά) εμπλέκονται σχετικά πιο συχνά σε ατυχήματα με πεζούς και ποδηλάτες από ότι τα συμβατικά αυτοκίνητα (NHTSA, 2009).



Εικόνα 3.13: Γράφημα μείωσης θορύβου ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων σε σχέση με τα συμβατικά

Πηγή: (Verheijen E.N.G., Jabben J., 2010)

Παρόλο που αντίστοιχα στατιστικά σε Ιαπωνία και Ολλανδία δεν επαλήθευσαν την επικινδυνότητα των υβριδικών οχημάτων, τα στατιστικά των Η.Π.Α. δείχνοντας διπλάσια εμπλοκή των υβριδικών μοντέλων σε ατυχήματα όταν οι ταχύτητες ήταν χαμηλές, οδήγησαν τις αρχές στην εξέταση των ελάχιστων απαιτήσεων θορύβου. Έτσι, αποφασίστηκε τα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα όταν κινούνται με χαμηλές ταχύτητες (έως 30 km/h) να παράγουν έναν συνεχή τεχνητό ήχο. Όλα τα οχήματα, λοιπόν, ξεκίνησαν να εφοδιάζονται με το Σύστημα Ακουστικής Προειδοποίησης (AVAS – Acoustic Vehicle Alerting System).

Η απουσία ήχου στα ηλεκτρικά οχήματα όπως και η προσθήκη του Συστήματος Ακουστικής Ειδοποίησης δημιούργησε την ανάγκη διερεύνησης του αντίκτυπού τους στην ακουστική απόδοση των οδοστρωμάτων και στο αν οι μηχανικοί θα πρέπει να τα λάβουν υπόψη κατά το σχεδιασμό αντιθορυβικών οδοστρωμάτων. Κάθε φαινόμενο και οδικό χαρακτηριστικό παίζει σημαντικό ρόλο στη δημιουργία θορύβου και η άνοδος των ηλεκτρικών οχημάτων είναι αναμενόμενο πως θα μεταβάλει το ηχητικό φάσμα του κυκλοφοριακού θορύβου.

Σε σχετική μελέτη (Praticò F., Fedele R., 2021) που εκπονήθηκε πάνω στο συγκεκριμένο θέμα, οι μελετητές ανέλυσαν το θόρυβο που εκπέμπεται από τα EVs, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους (ταχύτητα και συχνότητα) και συγκρίσεις με τα συμβατικά οχήματα, προκειμένου να προσδιορίσουν τις αλλαγές. Όσον αφορά τα επίπεδα θορύβου κατέληξαν στις τιμές που δίνονται στον Πίνακα 3.10:

Πίνακας 3.10: Επίπεδα παραγόμενου θορύβου ηλεκτρικών και θερμικών οχημάτων ανά ταχύτητα κίνησης

Πηγή: (Praticò F., Fedele R., 2021)

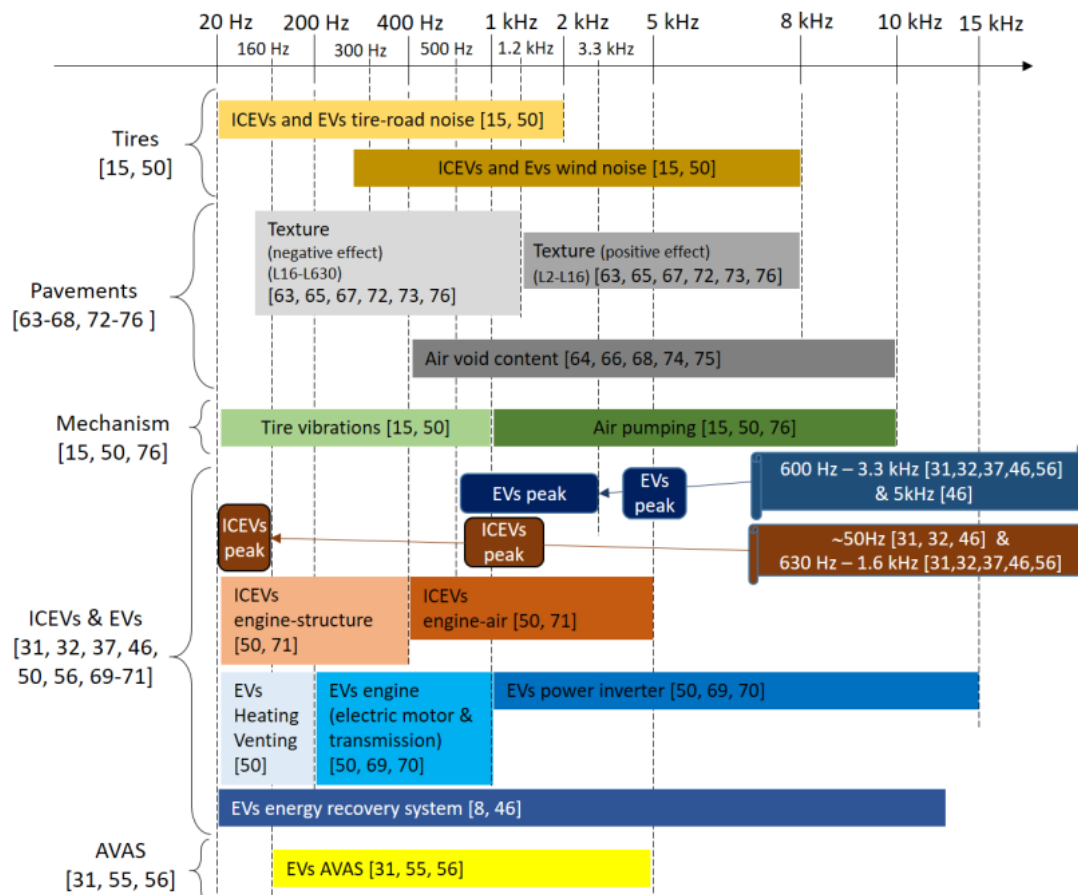
Vehicle type	SPLmax [dB(A)] – Light vehicles						
	Speed (km/h)						
	R	0	10–20	30–40	50–60	70–80	90–100
EV	48.6	30.0	63.0	74.3	77.0	76.5	79.5
ICEVs	53.1	50.0	70.5	77.5	78.0	78.0	79.5

SPLmax [dB(A)] - Heavy vehicles							
	R	0	10–20	30–40	50–60	70–80	90–100
EV	n.a.	61.0	71.0	79.0	78.0	81.3	83.0
ICEVs	n.a.	65.0	75.0	80.0	78.5	82.8	84.5

Legend. EVs=Electric vehicles (i.e., pure electric and HEV); ICEVs=Internal Combustion Engine Vehicles. R=Reverse; n.a.=not available. Note. Approximate data.

Είναι εμφανές ότι για χαμηλές ταχύτητες ακόμα και μετά την προσθήκη του Συστήματος Ηχητικής Ειδοποίησης (AVAS) τα ελαφρά ηλεκτρικά οχήματα έως τα 80 km/h είναι πιο αθόρυβα σε σχέση με τα θερμικά και ομοίως ισχύει και για τα βαρέα οχήματα με τη μεγάλη διαφορά, όμως, να παρατηρείται έως τα 30 km/h. Επιβεβαιώνεται, επίσης, ότι ο θόρυβος κύλισης των ελαστικών των ηλεκτρικών οχημάτων και των συμβατικών ελαστικών δεν παρουσιάζει μεγάλες διαφορές (Ejsmont J., Świeczko-Żurek B., Taryma S., Mioduszewski P., 2015), αφού όσο αυξάνεται η ταχύτητα, και ο θόρυβος κύλισης γίνεται η κυρίαρχη πηγή ήχου, οι διαφορές στα επίπεδα θορύβου είναι μικρές (όταν τα ηλεκτρικά οχήματα ήταν εφοδιασμένα με στενά ελαστικά με μεγάλη εξωτερική διάμετρο) έως ανύπαρκτες.

Σχετικά με την ακουστική συχνότητα των θορύβων τα αποτελέσματα της μελέτης συνοψίζονται στην Εικόνα 3.14:



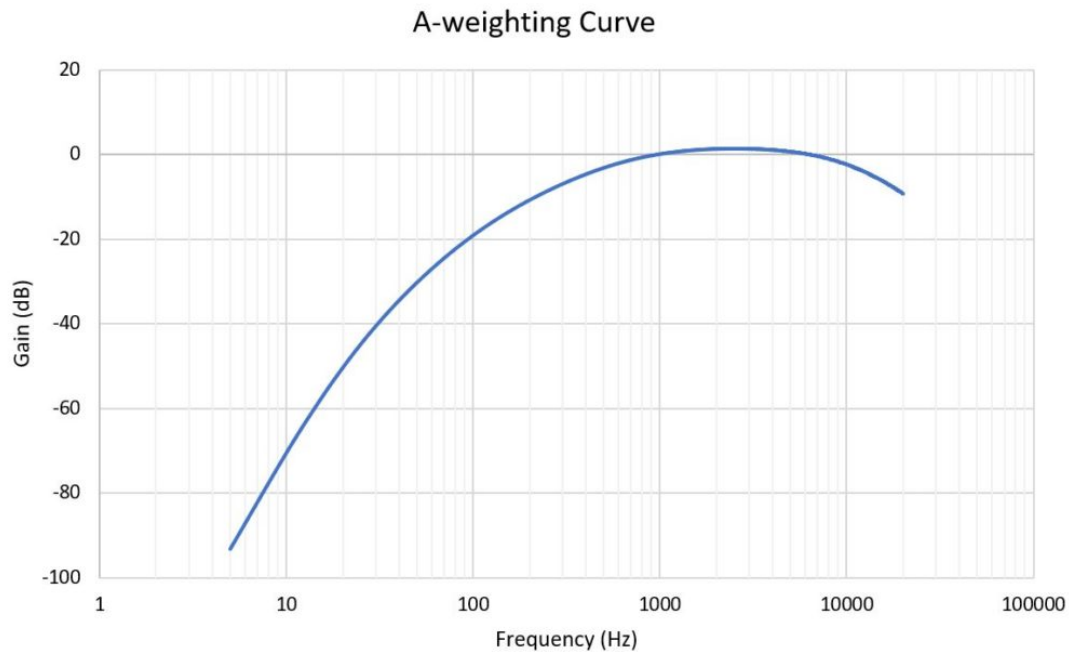
Εικόνα 3.14: Τοποθέτηση θορύβων στο ηχητικό φάσμα για οδόστρωμα χαμηλού θορύβου
 Πηγή: (Praticò F., Fedele R., 2021)

Με βάση τα στοιχεία της παραπάνω εικόνας προέκυψαν τα εξής:

Το ηχητικό φάσμα των θερμικών οχημάτων παρουσιάζει δύο μέγιστες τιμές. Η πρώτη κοντά στις συχνότητες 30-100 Hz με τιμή περίπου 40-65 dB(A) για ταχύτητες μεταξύ 9 και 67 km/h και η δεύτερη κοντά στο 1 kHz με τιμή 60 dB(A) για ταχύτητες στο εύρος 9 - 67 km/h. Δεν αποκλείεται να παρατηρηθούν μέγιστες τιμές και σε υψηλότερες συχνότητες.

Αντίθετα, το ηχητικό φάσμα των ηλεκτρικών οχημάτων παρουσιάζει πρώτη μέγιστη τιμή στα 0.5 - 2 kHz με τιμή περίπου 30 - 70 dB(A) για ταχύτητες στο εύρος 9 - 67 km/h (το μέγιστο αυτό εμφανίζεται πιο απότομα από εκείνο των θερμικών οχημάτων) και δεύτερη μέγιστη τιμή κοντά στα 5 kHz.

Άρα στις συχνότητες μεταξύ 1 - 2 kHz τα ηλεκτρικά οχήματα παρουσιάζουν μια μέγιστη τιμή που δεν υφίσταται στα θερμικά οχήματα, γεγονός σημαντικό, αφού ο άνθρωπος ενοχλείται περισσότερο από ήχους υψηλών συχνοτήτων σε αυτή την περιοχή βάσει των dB(A) (βλ. Εικόνα 3.15).



Εικόνα 3.15: Γράφημα στάθμησης-A ήχου για το εύρος συχνοτήτων 1-100000 Hz
 Πηγή: www.acousticalengineer.com

Επιπλέον, οι ερευνητές επεσήμαναν ότι ο θόρυβος του Συστήματος Ακουστικής Ειδοποίησης (AVAS) καλύπτει ένα μεγάλο εύρος των ηχητικών συχνοτήτων που γίνονται αντιληπτές από τον άνθρωπο και τα ζώα και μάλιστα των χαμηλών που γίνονται αντιληπτές από μεγαλύτερη απόσταση.

Με βάση τα παραπάνω, κατέληξαν στο ότι τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι οι ήχοι που παράγουν τα EVs θα μπορούσαν να απαιτήσουν τη βελτίωση του ακουστικού σχεδιασμού των οδοστρωμάτων χαμηλού θορύβου λόγω του Συστήματος Ακουστικής Ειδοποίησης (AVAS), των μεγίστων τιμών υψηλής συχνότητας και των ακουστικών δονήσεων που παράγονται. Φυσικά, τόνισαν πως όποιες αλλαγές γίνουν θα πρέπει να συνεκτιμήσουν την ανθεκτικότητα, τη βιωσιμότητα και την ασφάλεια του οδοστρώματος εκτός της ηχοαπορροφητικότητάς του.

Κλείνοντας, μελέτη έδειξε ότι ο θόρυβος που παράγεται από την αλληλεπίδραση οδοστρώματος-ελαστικού μπορεί να περιοριστεί έως και 6 dB με αλλαγές στην επιφάνεια του οδοστρώματος (υφή, μέγεθος αδρανών) (Cesbron J., Bianchetti S., Agnès Pallas M., A. Le Bellec, Gary V., Klein P., 2021) αλλά και με επεμβάσεις στη σύνθεση του υλικού των ελαστικών (Hankook -Tyre Company, 2020). Πλέον, κάτι τέτοιο αποκτά ιδιαίτερη σημασία, αφού στα ηλεκτρικά οχήματα σε ταχύτητες μεγαλύτερες των 30 km/h το μεγαλύτερο ποσοστό της εκπομπής θορύβου

προέρχεται από την αλληλεπίδραση των ελαστικών τους με το οδόστρωμα λόγω της απουσίας μηχανολογικού θορύβου και έτσι μια μείωση του παραγόμενου ήχου θα οδηγούσε σε περαιτέρω περιορισμό της ηχορύπανσης.

3.5 Τεχνολογία αυτόνομων ηλεκτρικών οχημάτων

Η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει οδηγήσει στην εμφάνιση των πρώτων αυτόνομων οχημάτων, δηλαδή οχημάτων που είναι ικανά να ανιχνεύουν το οδικό περιβάλλον και να πλοηγούνται χωρίς την επέμβαση του ανθρώπου.

Παρόλο που υπήρξαν και συμβατικά αυτόνομα οχήματα, έκθεση που υποβλήθηκε στην Κοινοβουλευτική Επιτροπή Ενέργειας και Εμπορίου των Ηνωμένων Πολιτειών από το μη κερδοσκοπικό οργανισμό S.A.F.E. (Securing America's Future Energy) έδειξε πως το 58% των αυτόνομων ελαφρών οχημάτων ήταν ηλεκτρικά και το 21% υβριδικά. Κατασκευαστές όπως η [General Motors](#) έχουν εκφράσει την πεποίθηση τους πως τα πλήρως αυτόνομα οχήματα πρέπει να είναι ηλεκτρικά για τρεις κυρίως λόγους:

α) Πρώτα απ' όλα τα ηλεκτρικά οχήματα είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον αφού έχουν μηδενικές εκπομπές ρύπων. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό όταν το όχημα είναι αυτόνομο, αφού σύμφωνα με τον καθηγητή πολεοδομικού σχεδιασμού του πανεπιστημίου της Καλιφόρνια, Donald Shoup, το 30% αυτών των οχημάτων στα πυκνοκατοικημένα αστικά κέντρα αναμένεται να βρίσκονται διαρκώς εν κινήσει λόγω αδυναμίας στάθμευσης (Shoup D., 2006). Άρα, αν ήταν οχήματα με μηχανές εσωτερικής καύσης, με τη διαρκή κίνηση τους θα επιβάρυναν το περιβάλλον.

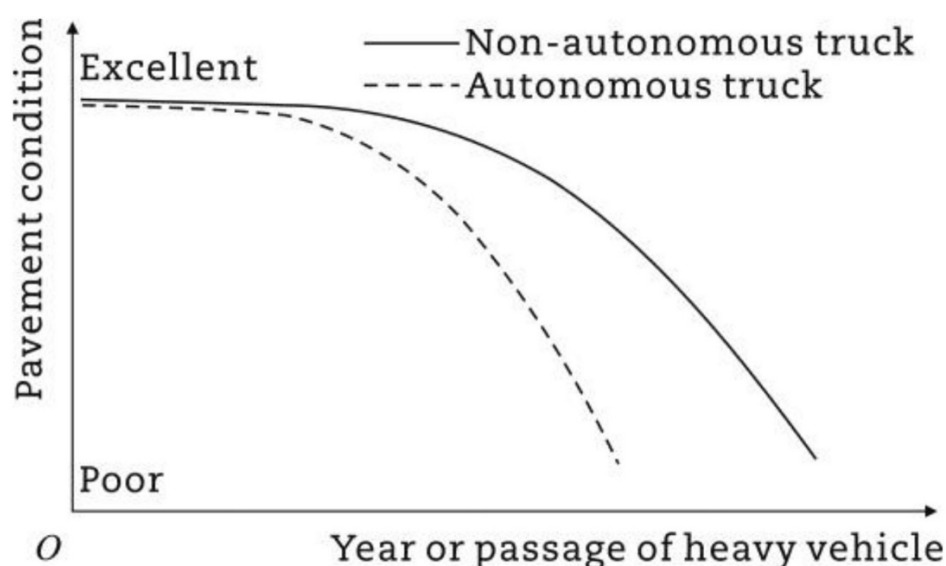
β) Επιπλέον, τα αυτόνομα οχήματα διαθέτουν ένα σύνολο αισθητήρων και επεξεργαστών για τη συλλογή, ανάλυση και ερμηνεία των δεδομένων που λαμβάνουν προκειμένου να αντιδράσουν σε πραγματικό χρόνο. Η διαδικασία αυτή αντλεί μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, η μπαταρία ενός πλήρως ηλεκτροκίνητου οχήματος μπορεί όχι μόνο να παρέχει αυτή την ισχύ, αλλά και να τη διατηρεί πολύ πιο σταθερή σε σύγκριση με έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης.

γ) Τέλος, ο χρόνος αντίδρασης κατά την οδήγηση σε δημόσιο δρόμο έχει ιδιαίτερη σημασία. Από τη φύση του σχεδιασμού τους, τα ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης έχουν χαμηλότερη καθυστέρηση και πιο σταθερή απόκριση κατά την επιτάχυνση (για αυτό το λόγο παρουσιάζουν την καμπύλη ροπής που είδαμε στην Εικόνα 3.3). Ως αποτέλεσμα, σε σύγκριση με ένα όχημα με μηχανή εσωτερικής καύσης, ένα πλήρως

ηλεκτρικό αυτόνομο όχημα θα έχει μικρότερη καθυστέρηση μεταξύ του χρόνου που αποφασίζει να κάνει και του χρόνου που ολοκληρώνει έναν ελιγμό.

Με βάση τα παραπάνω είναι εμφανές πως τα μελλοντικά αυτόνομα οχήματα θα είναι κατά βάση ηλεκτρικά. Χρειάζεται, λοιπόν, διερεύνηση της συμπεριφοράς που παρουσιάζουν τα αυτόνομα ηλεκτρικά οχήματα κατά την αλληλεπίδρασή τους με το οδικό περιβάλλον και ο προσδιορισμός του πώς αυτή μπορεί να επηρεάσει τα οδοστρώματα.

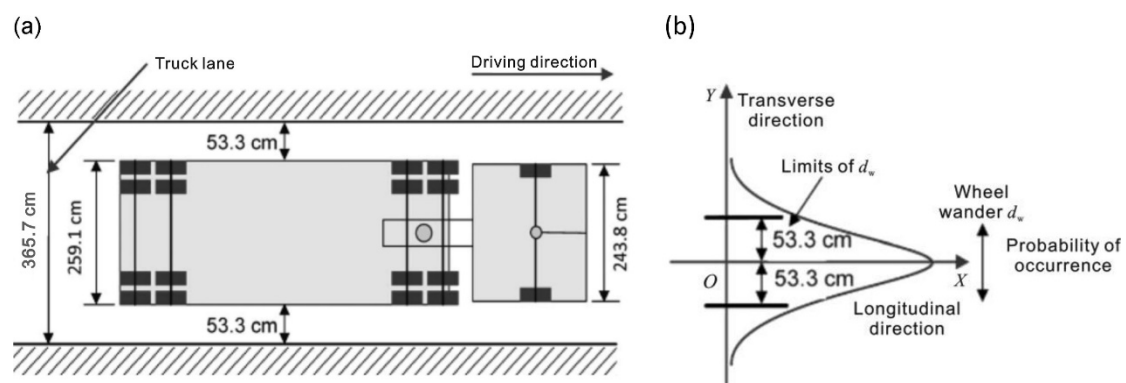
Η οδηγική συμπεριφορά των αυτόνομων οχημάτων διαφέρει από τα οχήματα με οδηγό τόσο στην επιλογή λωρίδας όσο και στην τοποθέτηση εντός της λωρίδας. Συγκεκριμένα, τα αυτοματοποιημένα συστήματα οδήγησης έχουν την τάση να κεντράρουν το όχημα (μηδενική πλευρική κίνηση τροχού) και να διατηρούν σταθερή λωρίδα κίνησης για λόγους ασφαλείας. Αυτή η συμπεριφορά έχει ως αποτέλεσμα τη διοχέτευση της κυκλοφορίας και την υπερβολική συγκέντρωση φορτίου σε μια συγκεκριμένη διαδρομή τροχού, επιταχύνοντας τη φθορά (Βλ. Εικόνα 3.16) και προκαλώντας μεγαλύτερες μόνιμες πλαστικές παραμορφώσεις που επηρεάζουν την ασφάλεια και τη λειτουργία των οχημάτων (Minguela J. D., Muñoz C. B., 2019).



Εικόνα 3.16: Επίδραση της μηδενικής πλευρικής μετατόπισης των τροχών των αυτόνομων βαρέων οχημάτων στη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος
Πηγή: (Georgouli K., Plati C., Loizos A., 2021)

Η πλευρική θέση του τροχού ενός οχήματος όπως επίσης και η πλευρική μετατόπισή του εξαρτώνται από το πλάτος της λωρίδας, το πλάτος του οχήματος και την ταχύτητα

του οχήματος. Οι περισσότερες μελέτες πεδίου κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η πλευρική μετατόπιση των τροχών των μη αυτόνομων οχημάτων ακολουθεί την κανονική κατανομή οπότε δεν μένουν σταθερά σε μια συγκεκριμένη διαδρομή τροχού όπως τα αυτόνομα (Βλ. Εικόνα 3.17). Η πλευρική κίνηση των τροχών, λοιπόν, μπορεί να μοντελοποιηθεί μέσω μιας συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας μιας κανονικής κατανομής με μηδενικό μέσο όρο και γνωστή τυπική απόκλιση (που συνιστά την πλευρική περιπλάνηση τροχού) που κυμαίνεται από 20 έως 61 cm με προτεινόμενη τιμή από τις οδηγίες σχεδιασμού οδοστρωμάτων τα 25,4 cm (NCHRP, 2004).



Εικόνα 3.17: Θέση εντός λωρίδας (a) και κατανομή περιπλάνησης τροχού (b) μη αυτόνομων οχημάτων

Πηγή: (Siddharthan R., Nasimifar M., Tan X., Hajj E., 2017)

Αυτό το μοτίβο κίνησης των μη αυτόνομων οχημάτων εντός της λωρίδας έχει ως αποτέλεσμα τα φορτία κυκλοφορίας να μην συγκεντρώνονται σε μία συγκεκριμένη διαδρομή τροχού, αλλά να κατανέμονται κατά μήκος του πλάτους της λωρίδας επιβραδύνοντας έτσι τη φθορά του οδοστρώματος σε αντίθεση, όπως αναφέραμε, με τα αυτόνομα οχήματα όπου η κατανομή πλευρικής περιπλάνησης του τροχού τους θα μπορούσε να θεωρηθεί μηδενική.

Τα συμπεράσματα των έως τώρα ερευνών μπορούν να συνοψιστούν στα εξής (Georgouli K., Plati C., Loizos A., 2021):

- Η μείωση της τροχοαυλάκωσης κυμαίνεται από 30% έως 56% με την παρουσία πλευρικής περιπλάνησης τροχού.
- Με μηδενική πλευρική περιπλάνηση τροχού, η ρηγμάτωση λόγω κόπωσης επιταχύνεται 2 έως 3 φορές. Ακόμη και στην περίπτωση μιας πιο περιορισμένης περιπλάνησης τροχού, σε σύγκριση με τα μη αυτόνομα οχήματα, πάλι η μείωση της διάρκειας ζωής λόγω κόπωσης είναι σημαντική και φτάνει το 22%.

- Η ποσοτικοποίηση του φαινομένου περιπλάνησης τροχού των αυτόνομων οχημάτων είναι μια πολυπαραμετρική διαδικασία ανάλογα με τη μεθοδολογία που ακολουθείται, τα εργαλεία ανάλυσης, τα υλικά, τη δομή του οδοστρώματος και άλλους παράγοντες.
- Μια ομοιόμορφη κατανομή της πλευρικής περιπλάνησης τροχού των αυτόνομων οχημάτων θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντικά οφέλη όσον αφορά την απόδοση του οδοστρώματος σε βάθος χρόνου.

Βάσει των ανωτέρω, κρίνεται σκόπιμο να ληφθεί σοβαρά υπόψη η μελλοντική κυκλοφορία αυτόνομων οχημάτων κατά το σχεδιασμό και τη συντήρηση οδοστρωμάτων, αφού ειδικά μέσα στην επόμενη δεκαετία το ποσοστό υιοθέτησής τους θα φτάσει το 50% (Liu Y., Tight M., Sun Q., Kang R., 2019). Μάλιστα, ενώ μέχρι στιγμής λόγω των μη αυτόνομων οχημάτων η πλευρική περιπλάνηση των τροχών ήταν δύσκολο να προβλεφθεί ξεκάθαρα, τώρα υπάρχει η ευκαιρία μέσω των αυτόνομων οχημάτων να γίνει μια πιο ξεκάθαρη εκτίμηση. Έτσι, θα μπορεί να προληφθεί η πρόωρη αστοχία των οδοστρωμάτων με νέους σχεδιασμούς μειγμάτων (ανθεκτικών στην τροχοαυλάκωση και στη ρηγμάτωση), νέες διαστασιολογήσεις και μεθόδους αποκατάστασης που πιθανόν, όμως, να αυξήσουν και το κόστος.

Παρ'όλα αυτά υπάρχει και η άποψη που αναφέρει πως με την πρόοδο της τεχνολογίας των αυτόνομων συστημάτων θα υπάρχει η δυνατότητα αποτελεσματικού ελέγχου και ανακατανομής της πλευρικής κίνησης των τροχών των αυτόνομων οχημάτων είτε μέσω οπτικών σημάτων στο οδόστρωμα είτε μέσω της επικοινωνίας των οχημάτων μεταξύ τους (Connected and Autonomous Vehicles – CAVs) οδηγώντας, έτσι, σε μια βελτιστοποιημένη πλευρική κίνηση οχημάτων που θα εξοικονομεί χρόνο και κόστος κατασκευής και συντήρησης όσον αφορά τα οδοστρώματα και θα παρατείνει το χρόνο ζωής τους.

3.6 Χαρακτηριστικά οδοστρωμάτων και ηλεκτρικά οχήματα

Έως τώρα, έγινε αναφορά στο πώς η έλευση των ηλεκτρικών οχημάτων αναμένεται να επηρεάσει θέματα σχεδιασμού και συντήρησης των οδοστρωμάτων. Ωστόσο, τα ηλεκτρικά οχήματα αν και πιο αποδοτικά από τα θερμικά επηρεάζονται πολύ περισσότερο από τα χαρακτηριστικά των οδοστρωμάτων κυρίως ως προς την ενέργεια που καταναλώνουν (Haider M., Conter M., 2012). Επίσης, μελέτες σχετικά με την αντοχή των ηλεκτρικών συσσωρευτών στους προερχόμενους από το

οδοστρώμα κραδασμούς όπως και γενικά το κόστος συντήρησης λόγω φθορών του οδοστρώματος θα πρέπει να συζητηθούν.

3.6.1 Κατανάλωση ενέργειας

Υπάρχουν πέντε βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας των οχημάτων (Haider M., Conter M., 2012):

- α) Τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος (υφή, ομαλότητα, αντίσταση κύλισης).
- β) Τα χαρακτηριστικά του γεωμετρικού σχεδιασμού του οδοστρώματος (κλίσεις).
- γ) Τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας (ταχύτητα, είδος κυκλοφοριακής ροής).
- δ) Ο τύπος του οχήματος και των ελαστικών.
- ε) Οι καιρικές συνθήκες.

Επειδή κάποιες από τις παραπάνω παραμέτρους είναι δύσκολο να ελεγχθούν λόγω της πολυπλοκότητάς τους, η βαρύτητα των μελετών έχει επικεντρωθεί στην ομαλότητα, στην αντίσταση κύλισης και στις κλίσεις του οδοστρώματος.

3.6.1.1 Αντίσταση κύλισης οδοστρώματος

Τρεις είναι οι παράγοντες του οδοστρώματος που επηρεάζουν την αντίσταση κύλισης: η ομαλότητα, η υφή και η δομική ανταπόκρισή του κατά τη φόρτιση. Έκτος των παραπάνω, η αντίσταση κύλισης επηρεάζεται και από την ταχύτητα του οχήματος, την πίεση και φθορά των ελαστικών και τη θερμοκρασία.

Έχει διαπιστωθεί ότι η αντίσταση κύλισης οδηγεί σε αξιοσημείωτη μείωση της αυτονομίας των ηλεκτρικών οχημάτων τόσο σε κίνηση στον αστικό ιστό όσο και στον αυτοκινητόδρομο (Arat M., Bolarinwa E.O., 2015). Μελέτες που έγιναν σε ηλεκτρικά λεωφορεία έδειξαν ότι η αντίσταση κύλισης είναι η τρίτη κατά σειρά παράμετρος που επηρεάζει την κατανάλωση ενέργειας και ιδιαίτερα στις χαμηλές ταχύτητες (Gallet, M., Massier, T., Hamacher, T., 2018). Η σχέση αντίστασης κύλισης και ενέργειας που καταναλώνεται είναι συνήθως γραμμική αλλά για οδοστρώματα με χαμηλό συντελεστή αντίστασης κύλισης είναι ελαφρώς εκθετική (Vepsäläinen, J., Otto, K., Lajunen, A., Tammi, K., 2019). Επιπλέον, στιγμιαίες μεταβολές στην επιτάχυνση πιθανόν να οδηγούν σε μεταβολές στις δυνάμεις αντίστασης κύλισης. Στις παραπάνω μελέτες η φθορά του οδοστρώματος δεν ελήφθη σε μεγάλο βαθμό υπόψη και δεν διευκρινίστηκε αν η ομαλότητα επηρεάζει την αντίσταση κύλισης. Επομένως, το συγκεκριμένο θέμα θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω όπως, επίσης, και η

επίδραση της αντίστασης κύλισης στην κατανάλωση ενέργειας μικρότερων και μεγαλύτερων οχημάτων σε σχέση με τα ηλεκτρικά λεωφορεία. Τέλος, σημαντικό είναι να λαμβάνονται υπόψη και ο συντελεστής αντίστασης κύλισης των ελαστικών και η κατανάλωση ενέργειας δευτερευόντων συστημάτων των οχημάτων. (Franca, 2018).

3.6.1.2 Ομαλότητα Οδοστρώματος

Οι Chatti K., Zaabar I. (2012) έχουν δείξει το ρόλο που διαδραματίζει η ομαλότητα του εδάφους στο κόστος χρήσης των θερμικών οχημάτων. Συγκεκριμένα, η αύξηση του IRI (International Roughness Index) κατά 1 m/km οδηγεί σε αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου των επιβατικών οχημάτων κατά 2%. Ίδια αύξηση παρατηρήθηκε και στα εμπορικά φορτηγά για χαμηλές ταχύτητες κίνησης (έως 56 km/h) ενώ για υψηλότερες ταχύτητες (96 km/h) η αύξηση ήταν 1%. Χρήζει, λοιπόν, διερεύνησης αν ισχύει η επίδραση της ομαλότητας του εδάφους και στην κατανάλωση ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων και σε ποιο βαθμό.

3.6.1.3 Γεωμετρική κλίση οδοστρώματος

Πειραματικές αναλύσεις έχουν αναδείξει το σημαντικό ρόλο που παίζει η κατά μήκος κλίση του οδοστρώματος στην κατανάλωση ενέργειας. Συγκριτικά σε μια κλίση -8% ένα όχημα καταναλώνει 90% λιγότερη μέση ενέργεια σε σχέση με την αντίστοιχη ανηφορική (8%). Στα ηλεκτρικά οχήματα, όπου στις κατηφορικές κλίσεις λειτουργεί η ανάκτηση ενέργειας, σε ένα οδόστρωμα κατηφορικής κλίσης -7% η μέση ενέργεια που ανακτήθηκε ήταν το 43,2% της ενέργειας που καταναλώθηκε για την άνοδο σε δρόμο κλίσης 8% (Sagaama, I., Kchiche, A., Trojet, W., Kamoun, F., 2020). Η αναγεννητική πέδηση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι και αυτή που τα καθιστά πιο αποδοτικά από τα θερμικά οχήματα, ιδιαίτερα σε ορεινές περιοχές (Liu K., Yamamoto T., Morikawa T., 2017). Εν κατακλείδι, η κλίση του δρόμου που ήταν κρίσιμος παράγοντας κατανάλωσης ενέργειας στα θερμικά οχήματα εξακολουθεί να παίζει ρόλο ακόμα σημαντικότερο στα ηλεκτρικά όπως έδειξαν αποτελέσματα στατιστικών μοντέλων και μηχανικής μάθησης (Abdelaty H., Al-Obaidi A., Mohamed M., Farag H., 2021).

3.6.2 Κόστος συντήρησης

Όπως είναι γνωστό η κατάσταση του οδοστρώματος επηρεάζει άμεσα την κατανάλωση καυσίμου, την φθορά των ελαστικών και τα έξοδα για την επισκευή και συντήρηση των οχημάτων (Chatti K., Zaabar I., 2012). Συγκεκριμένα, αύξηση του IRI κατά 1 m/km οδηγεί σε ταχύτερη τη φθορά των ελαστικών, ενώ αύξηση μεταξύ 3-4

m/km απεδείχθη ότι αυξάνει το κόστος συντήρησης ελαφρών επιβατικών αλλά και βαρέων εμπορικών θερμικών οχημάτων κατά 10%. Μάλιστα, θεωρείται, ότι το ίδιο θα συμβαίνει και με τα αντίστοιχα ηλεκτρικά οχήματα. Ωστόσο, ένα θέμα που διερευνάται επιπλέον, είναι η αντοχή των στοιχείων των ηλεκτρικών συσσωρευτών και της δομής του πακέτου τους στους κραδασμούς.

Σε μελέτη σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές υβριδικών οχημάτων παρατηρήθηκε υψηλή ευαισθησία των στοιχείων τους στους κραδασμούς κατά την οδήγηση (Zhang, L., Z. Ning, H. Peng, Z. Mu, and C. Sun, 2017) ενώ περαιτέρω έρευνα έδειξε βελτίωση της κατάστασης με αλλαγή στον τρόπο τοποθέτησης των στοιχείων εντός του πακέτου. Αντίθετα, υπήρξαν και μελέτες που συμπέραναν ότι δεν υπάρχει σημαντική επιρροή των δονήσεων στα στοιχεία των ηλεκτρικών συσσωρευτών και στη μηχανική αντοχή του πακέτου τους (Brand, M. J., S. F. Schuster, T. Bach, E. Fleder, M. Stelz, S. Gläser, J. Müller, G. Sextl, and A Jossen, 2015). Οπότε και εδώ το ζήτημα πρέπει να εξεταστεί περισσότερο.

Βάσει των όσων αναφέρθηκαν γίνεται εμφανές πόσο σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των οδοστρωμάτων στην απόδοση των ηλεκτρικών οχημάτων και των υποσυστημάτων τους και πόσο σημαντική είναι η περαιτέρω μελέτη για τη βελτίωση του σχεδιασμού και της κατασκευής τους.

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

4.1 Γενικά

Υπό το πρίσμα των όσων αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3 είναι προφανές ότι η σημαντικότερη αλλαγή που θα επηρεάσει άμεσα τα υφιστάμενα οδοστρώματα είναι η αύξηση του βάρους του στόλου των οχημάτων. Παρόλο που η διείσδυση των ηλεκτρικών βαρέων οχημάτων αναμένεται να είναι πιο αργή, τα επιβατικά ηλεκτρικά οχήματα είναι ήδη σε κυκλοφορία και αυξάνουν διαρκώς το μερίδιό τους στις πωλήσεις. Μάλιστα, πολλές χώρες αρχίζουν να συζητάνε την επιβολή τελών κυκλοφορίας, ανάλογα με το βάρος, για τα επιβατικά ηλεκτρικά οχήματα που μέχρι τώρα απαλλάσσονταν από την υποχρέωση καταβολής τους. Δημιουργείται, έτσι, το ερώτημα κατά πόσο οι υφιστάμενες υποδομές θα μπορέσουν να ανταπεξέλθουν στις νέες απαιτήσεις, ιδιαίτερα αν ο ρυθμός των πωλήσεων συνεχίσει την εκθετική τάση του κατά τα επόμενα έτη και πριν η τεχνολογία βρει τρόπους περιορισμού του βάρους των οχημάτων. Σε αυτό, πρέπει να συνυπολογίσουμε το γεγονός της χρονοβόρας και δύσκολης διαδικασίας αντικατάστασης ή ενίσχυσης των οδοστρωμάτων και λόγω του κυκλοφοριακού φόρτου τους αλλά και της έκτασής τους.

Στην παρούσα ανάλυση επιχειρείται για μια τυπική διατομή και συγκεκριμένα δεδομένα κυκλοφορίας να μελετηθεί η επιρροή που ασκεί η αλλαγή του στόλου των επιβατικών οχημάτων από θερμικά σε ηλεκτρικά. Δίνεται βάση στα επιβατικά οχήματα, αφού προς το παρόν, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3.2.1, για τα βαρέα ηλεκτρικά οχήματα δεν είναι ακόμα ξεκάθαρο ποιος τύπος τους θα επικρατήσει (FCEV ή BEV) και επιπλέον για όσα κυκλοφορούν δίνονται οδηγίες περιορισμού του ωφέλιμου βάρους τους ώστε να μην ξεπερνάνε το βάρος των αντίστοιχων θερμικών, όπου η νομοθεσία δεν το επιτρέπει. Για την ανάλυση θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό 3D-Move.

4.2 Λογισμικό 3D-Move Analysis

Το 2010, το πανεπιστήμιο της Νεβάδα κυκλοφόρησε το λογισμικό 3D-Move για την ανάλυση των ασφαλικών οδοστρωμάτων. Το λογισμικό είναι βασισμένο στις αρχές της αναλυτικής - εμπειρικής προσέγγισης σχεδιασμού Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) (American Association of State Highway and

Transportation Officials, 2008) και για τον υπολογισμό των αποκρίσεων του οδοστρώματος χρησιμοποιεί την προσέγγιση των πεπερασμένων στρώσεων αντιμετωπίζοντας την κάθε μια ως συνεχές μέσο και εφαρμόζει την τεχνική μετασχηματισμού Fourier. Έτσι, μπορεί να χειριστεί πολύπλοκες επιφανειακές φορτίσεις, όπως πολλαπλά φορτία και ανομοιόμορφη κατανομή τάσεων στο οδόστρωμα. Παρέχει δε, κάποιες τυπικές διατάξεις αξόνων και τροχών για την ανάλυση της φθοράς ενός δεδομένου οδοστρώματος, δίνοντας παράλληλα τη δυνατότητα δημιουργίας νέων ανάλογα με τις συνθήκες της μελέτης και τις προτιμήσεις του μηχανικού. Τέλος, επειδή χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στρώσεων είναι ιδιαίτερα αξιόπιστο, αφού συχνά τα οδοστρώματα είναι οριζόντια στρωματοποιημένα και ερευνώνται οι αποκρίσεις τους μόνο σε συγκεκριμένα σημεία (Asphalt Research Consortium, 2013).

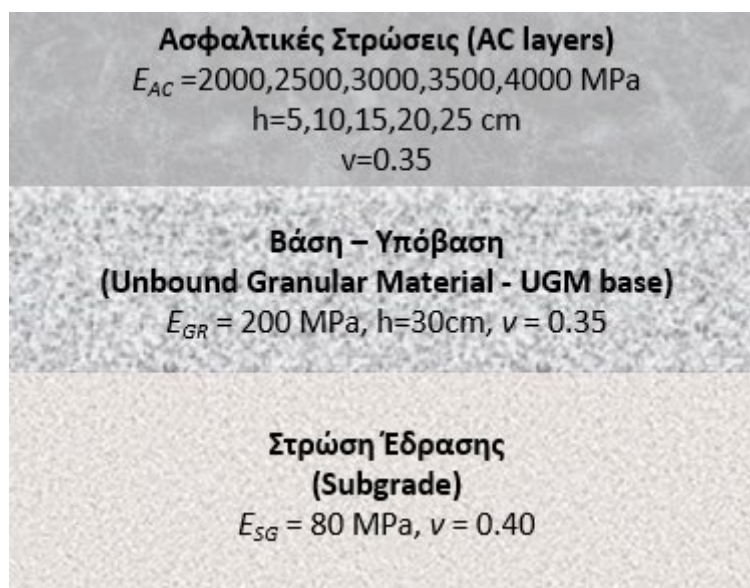
Τα δεδομένα εισόδου που χρειάζεται το λογισμικό για να ολοκληρώσει την ανάλυση είναι:

- α) Το είδος της ανάλυσης (στατική ή δυναμική).
- β) Η διαμόρφωση των αξόνων που μελετώνται (διαθέτει 9 τυπικές διαμορφώσεις και δίνει δυνατότητα για δημιουργία επιπλέον από το χρήστη).
- γ) Η κυκλοφορία, η οποία ζητείται ως Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία της μίας κατεύθυνσης της οδού που μελετάται και υπάρχει επιλογή ορισμού της διάρκειας που θέλει ο μελετητής, ώστε να μετατραπεί σε Εποχική ή Ετήσια. Επίσης, ζητείται το ποσοστό των αξόνων σχεδιασμού στη λωρίδα σχεδιασμού και υπάρχει η δυνατότητα να οριστεί περίοδος σχεδιασμού, όπως και η ενδεχόμενη αύξησή της κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού.
- δ) Η δομή του οδοστρώματος που περιλαμβάνει τον τύπο των στρώσεων (ασφαλτική, βάση, υπόβαση, έδραση) και τα πάχη της κάθε στρώσης.
- ε) Τα μηχανικά χαρακτηριστικά που έχει η κάθε στρώση (μέτρο ελαστικότητας, θερμοκρασία, βάθος υδροφόρου ορίζοντα και βραχώδους εδάφους).
- στ) Το μοντέλο ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθεί.
- ζ) Τα σημεία απόκρισης του οδοστρώματος που μελετώνται.

4.3 Διατομή οδοστρώματος

Για το σκοπό της ανάλυσης και αξιολόγησης της επίδρασης των αλλαγών βάρους στα οδοστρώματα χρησιμοποιήθηκε η τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος της

Εικόνας 4.1 με τα μηχανικά χαρακτηριστικά και πάχη που αναφέρονται σε κάθε στρώση.



Εικόνα 4.1: Διατομή μελέτης εύκαμπτου οδοστρώματος

Οι ασφαλτικές στρώσεις μελετώνται για συνδυασμούς πέντε διαφορετικών μέτρων ελαστικότητας (E) και πέντε διαφορετικών παχών (h). Συγκεκριμένα, όσον αφορά τα μέτρα ελαστικότητας για τις τιμές: $E_{AC}=2000 \text{ MPa}$, $E_{AC}=2500 \text{ MPa}$, $E_{AC}=3000 \text{ MPa}$, $E_{AC}=3500 \text{ MPa}$, $E_{AC}=4000 \text{ MPa}$ και όσον αφορά τα πάχη των ασφαλτικών στρώσεων για τις τιμές: $h=5 \text{ cm}$, $h=10 \text{ cm}$, $h=15 \text{ cm}$, $h=20 \text{ cm}$, $h=25 \text{ cm}$. Ο λόγος Poisson λαμβάνεται $\nu=0,35$. Σχετικά με τη σύσταση του ασφαλτομίγματος, το ποσοστό όγκου κενών αέρα θεωρείται $V_a=4\%$ και το ενεργό ποσοστό όγκου ασφάλτου (ή ποσοστό όγκου ασφάλτου το οποίο δεν έχει δεσμευτεί από τα αδρανή) $V_{be}=9.4\%$.

Η βάση και η υπόβαση θεωρούνται ενιαία στρώση λόγω των κοινών χαρακτηριστικών τους. Το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης είναι $E_{GR}=200 \text{ MPa}$, ο λόγος Poisson $\nu=0,35$ και το πάχος $h=30 \text{ cm}$. Το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα ορίζεται στα 5 m .

Τέλος, η στρώση έδρασης έχει μέτρο ελαστικότητας $E_{SG}=80 \text{ MPa}$ και λόγο Poisson $\nu=0,40$ ενώ το πάχος της θεωρείται απεριόριστο. Το βάθος του βραχώδους εδάφους ορίζεται στα 10 m .

4.4 Ανάλυση κυκλοφορίας

4.4.1 Πρωτογενή δεδομένα κυκλοφορίας

Τα δεδομένα κυκλοφορίας που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση προέρχονται από διελεύσεις σε σταθμό διοδίων. Τα οχήματα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων των

διελεύσεων τους χωρίστηκαν σε 4 κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο τους, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Κατηγορίες οχημάτων των στοιχείων μέτρησης διελεύσεων

Κατηγορία	1	2	3	4
Τύπος Οχήματος	Δίκυκλα Τρίκυκλα	Ελαφρά Οχήματα	Φορτηγά, Πεωφορεία και άλλα οχήματα με λιγότερους από 4 άξονες	Φορτηγά, και άλλα οχήματα με 4 ή περισσότερους άξονες
Περιγραφή				
		Ελαφρά οχήματα με ή χωρίς ρυμουλκούμενο και ύψος μέχρι 2,20 μ.	Οχήματα με ή χωρίς ρυμουλκούμενο με 2 ή 3 άξονες και ύψος μεγαλύτερο από 2,20 μ.	Οχήματα με ή χωρίς ρυμουλκούμενο με 4 ή περισσότερους άξονες και ύψος μεγαλύτερο από 2,20 μ.

Οι διελεύσεις οχημάτων κάθε κατηγορίας δίνονται στον Πίνακα 4.2 και αφορούν την Ετήσια Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία (ΕΜΗΚ) για τη μία κατεύθυνση κυκλοφορίας.

Πίνακας 4.2: Διελεύσεις οχημάτων ανά κατηγορία

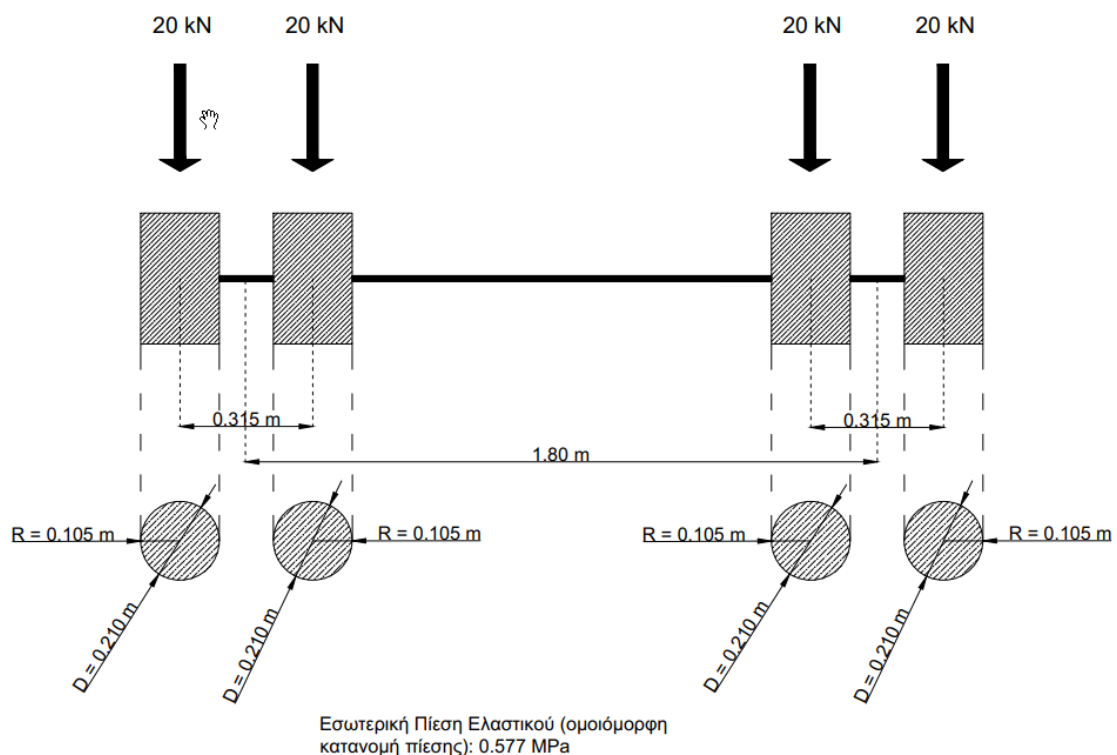
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΙΕΛΕΥΣΕΩΝ ΣΕ ΣΤΑΘΜΟ ΔΙΟΔΙΩΝ				
Κατηγορία Οχημάτων	1	2	3	4
ΕΜΗΚ	210	20000	1400	1100

4.4.2 Συντελεστές ισοδυναμίας

4.4.2.1 Φορτίο σχεδιασμού

Ο κυκλοφοριακός φόρτος αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους που λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό και την αξιολόγηση της λειτουργικότητας των οδοστρωμάτων. Σε μια οδό, όμως, κυκλοφορούν διαφορετικοί τύποι οχημάτων με διαφορετικά φορτία και γεωμετρικά χαρακτηριστικά γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα των αναλύσεων. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό και να υπάρχει μια ενιαία μονάδα φορτίου για τον υπολογισμό της φθοράς των οδοστρωμάτων, εισήχθη η έννοια των ισοδυνάμων τυπικών αξόνων. Σύμφωνα με αυτή, μέσω ενός Συντελεστή Ισοδυναμίας (Load Equivalency Factor - LEF), συσχετίζονται όλοι οι διαφορετικοί συνδυασμοί αξονικών φορτίων, που διέρχονται από τη διατομή μιας οδού, με ένα Ισοδύναμο Τυπικό Αξονικό Φορτίο (Equivalent Single Axle Load – ESAL). Ο Ισοδύναμος Τυπικός Άξονας που ορίζεται από την μέθοδο

AASHTO είναι ο μονός άξονας επί δίδυμων τροχών με φορτίο 8,16 τόνους (80 kN) με τα χαρακτηριστικά που δίνονται στην Εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2: Διαγραμματική παρουσίαση Ισοδύναμου Τυπικού Άξονα κατά AASHTO

Βασική, λοιπόν, προϋπόθεση στη μελέτη είναι ο προσδιορισμός, μέσω των διαθέσιμων μεθόδων, των Συντελεστών Ισοδυναμίας που θα χρησιμοποιηθούν για τη μετατροπή των διαφορετικών τύπων αξόνων σε Ισοδύναμους Τυπικούς Άξονες. Για το σκοπό αυτό, στην παρούσα εργασία, θα γίνει χρήση του «Κανόνα της 4ης Δύναμης» για τον υπολογισμό των συντελεστών ισοδυναμίας των ηλεκτρικών επιβατικών οχημάτων ενώ για τα βαρέα οχήματα, λόγω της απουσίας πρωτογενών δεδομένων σχετικά με το είδος του οχήματος και με τον τύπο του άξονα του καθενός, θα χρησιμοποιηθούν πίνακες συντελεστών από τη βιβλιογραφία. Τα δίκυκλα οχήματα δεν λαμβάνονται υπόψη λόγω της σχεδόν μηδενικής επίδρασης τους στα οδοστρώματα.

4.4.2.2 Κανόνας της 4ης Δύναμης

Κατά τη διάρκεια του οδικού πειράματος AASHO προέκυψε πως η πίεση που δέχεται το οδόστρωμα από ένα όχημα εξαρτάται από το αξονικό φορτίο του οχήματος, των αριθμό των διελεύσεων και το πάχος του οδοστρώματος. Ως τυπικός άξονας ορίστηκε ο μονός άξονας επί δίδυμων τροχών με φορτίο 8,16 τόνους (80 kN).

Η θεμελιώδης εξίσωση που αναπαριστά την ισοδύναμη καταστροφή μεταξύ δύο διαφορετικών φορτίων και παρέχει έτσι το Συντελεστή Ισοδυναμίας (Load Equivalency Factor - LEF), σύμφωνα με τον Κανόνα της 4^{ης} Δύναμης είναι:

$$LEF = \frac{N_T}{N_i} = \left(\frac{P_i}{P_T} \right)^\gamma \quad (4.1)$$

Όπου:

N_T = αριθμός διελεύσεων με τυπικό φορτίο P_T (= 8,16 tn = 80 kN)

N_i = αριθμός διελεύσεων με φορτίο P_i

P_i = αξονικό φορτίο

P_T = τυπικό αξονικό φορτίο (= 8,16 tn = 80 kN)

γ = αριθμητική μεταβλητή που για την περίπτωση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων παίρνει την τιμή 4.

Κατά το οδικό πείραμα AASHO λήφθηκαν υπόψη οι παραμορφώσεις του οδοστρώματος και η τραχύτητα. Ο Κανόνας της 4^{ης} Δύναμης, χρησιμοποιείται συχνά σήμερα, παρόλο που δεν λαμβάνει υπόψιν άλλες παραμέτρους, όπως για παράδειγμα τις καιρικές συνθήκες.

4.4.2.3 Συντελεστές ισοδυναμίας βαρέων οχημάτων

Τα βαρέα οχήματα που χρησιμοποιούν μια οδό χωρίζονται σε Οχήματα Δημόσιας Χρήσης (ΟΔΧ) και Οχήματα Εμπορευματικής Χρήσης (ΟΕΧ). Στον Πίνακα 4.3 δίνεται η ταξινόμηση των βαρέων οχημάτων κατά τύπο και κατά κατηγορία.

Πίνακας 4.3: Ταξινόμηση και κατηγορίες εμπορικών οχημάτων
Πηγή: (Λοΐζος, Α., Πλατή, Χ., 2021)

Εμπορικό όχημα (ΕΟ)	Ταξινόμηση ΕΟ	Κατηγορία ΕΟ
	Λεωφορείο ή ημι-φορτηγό	ΟΔΧ (Οχήματα Δημόσιας Χρήσης)
	Φορτηγό 2-αξόνων	ΟΕΧ1 (Οχήματα Εμπορευματικής Χρήσης)
	Φορτηγό 3-αξόνων	
	Ρυμουλκό με ημιρυμουλκούμενο (νταλικά) 3-αξόνων	ΟΕΧ2 (Οχήματα Εμπορευματικής Χρήσης)
	Φορτηγό 4-αξόνων	
	Ρυμουλκό με ημιρυμουλκούμενο (νταλικά) 4-αξόνων	
	Ρυμουλκό με ημιρυμουλκούμενο (νταλικά) 5-αξόνων	
	Ρυμουλκό με ημιρυμουλκούμενο (νταλικά) 6-αξόνων	

Βασικό πρόβλημα που προκύπτει κατά την μελέτη των βαρέων οχημάτων και της καταστρεπτικής τους ικανότητας στο οδόστρωμα είναι ο προσδιορισμός των διαφορετικών τύπων αξόνων και φορτίων που φέρει το καθένα, προκειμένου να γίνει η μετατροπή σε Ισοδύναμους Τυπικούς Άξονες. Στην παρούσα μελέτη, λόγω έλλειψης στα πρωτογενή δεδομένα διαχωρισμού των βαρέων οχημάτων, θα γίνει χρήση των συντελεστών ισοδυναμίας που πάρθηκαν από τη βιβλιογραφία και δίνονται στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4: Συντελεστές Ισοδυναμίας βαρέων οχημάτων
Πηγή: (Λοΐζος, Α., Πλατή, Χ., 2021)

ΕΟ	ΣΙ
Λεωφορεία και ημιφορτηγά	3,9
Φορτηγά 2-αξόνων	0,6
Φορτηγά 3-αξόνων	3,4
Νταλίκες 3 και 4-αξόνων	4,6
Φορτηγά 4-αξόνων	2,5
Νταλίκες 5-αξόνων	4,4
Νταλίκες 6-αξόνων	5,6
ΟΕΧ1+ΟΔΧ	1,0
ΟΧΕ2	4,0

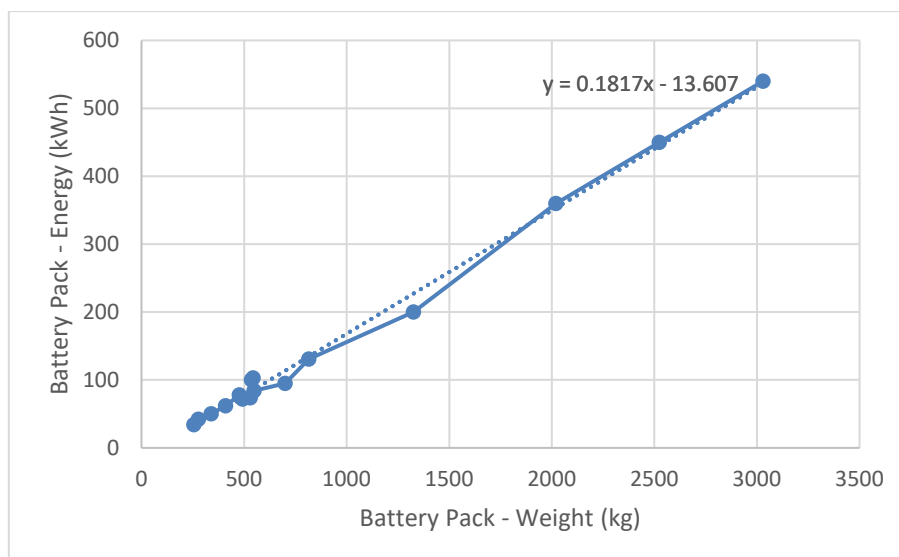
Συγκεκριμένα, για τα βαρέα οχήματα της κατηγορίας 3 του Πίνακα 4.1 θα χρησιμοποιηθεί ο σταθμισμένος συντελεστής ισοδυναμίας που αντιστοιχεί στα ΟΕΧ1+ΟΔΧ του Πίνακα 4.4 ($\Sigma I_3=1,0$) και για τα βαρέα οχήματα της κατηγορίας 4 θα χρησιμοποιηθεί ο σταθμισμένος συντελεστής ισοδυναμίας που αντιστοιχεί στα ΟΧΕ2 ($\Sigma I_4=4,0$).

4.4.2.4 Συντελεστές ισοδυναμίας επιβατικών οχημάτων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί (Κεφάλαιο 3.2.1), τα πιο βαριά εξαρτήματα ενός θερμικού επιβατικού οχήματος είναι ο κινητήρας (150-320 Kg) και το σύστημα μετάδοσης (45-180 Kg), ενώ ενός ηλεκτρικού είναι η συστοιχία ηλεκτρικών συσσωρευτών έλξης (μπαταρία). Ενδεικτικά, με βάση τις χωρητικότητες και τα βάρη των μπαταριών 30 ηλεκτρικών μοντέλων επιβατικών οχημάτων και 5 ηλεκτρικών βαρέων οχημάτων -σε κυκλοφορία αυτή τη στιγμή- δημιουργείται το γράφημα της Εικόνας 4.3, όπου χρησιμοποιώντας τη γραμμή τάσης προκύπτει η εξίσωση:

$$[kWh] = 0,1817 \cdot [kg] - 13,607 \quad (4.2)$$

η οποία δίνει μια ικανοποιητική εκτίμηση της σχέσης αποθηκευμένης ενέργειας και βάρους των ηλεκτρικών συσσωρευτών των ηλεκτρικών οχημάτων, όσον αφορά την υπάρχουσα τεχνολογία κατασκευής τους.



Εικόνα 4.3: Σχέση ενεργειακής χωρητικότητας και βάρους των μπαταριών

Λόγω, όμως, των διαφορετικών εξαρτημάτων και εκδόσεων των θερμικών και ηλεκτρικών οχημάτων, προκειμένου να εκτιμηθεί αμεσότερα το πρόσθετο βάρος των ηλεκτρικών, θα γίνει χρήση του ποσοστιαίου εύρους 20-35% (Denton, 2020) που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3.2.1. Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως -αναλογικά με το βάρος τους- τα επιβατικά οχήματα ιδιωτικής χρήσης παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη αύξηση βάρους κατά τον εξηλεκτρισμό τους. Αυτό συμβαίνει διότι το μέσο βάρος των μηχανικών μερών των θερμικών επιβατικών οχημάτων είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με το αντίστοιχο των βαρέων οχημάτων. Έτσι, ενώ η αφαίρεση των απαιτούμενων εξαρτημάτων για ένα θερμικό βαρύ όχημα (βλ. Πίνακα 3.2) εξοικονομεί αρκετό βάρος, δεν συμβαίνει το ίδιο και για τα επιβατικά Ι.Χ.. Το μέσο βάρος των βενζινοκίνητων και πετρελαιοκίνητων επιβατικών οχημάτων που κυκλοφορούν στην Ευρώπη είναι 1400 Kg (European Environment Agency, 2023), ενώ στην Αμερική είναι 1860 Kg (Environmental Protection Agency, 2023).

Για την παρούσα μελέτη λήφθηκε, για λόγους ασφαλείας, ως μέσο βάρος θερμικού οχήματος η τιμή των 1700 Kg (16,7 kN) και ως ποσοστιαία αύξηση κατά τον εξηλεκτρισμό του το 30%.

Ο υπολογισμός των Συντελεστών Ισοδυναμίας των επιβατικών οχημάτων, τόσο των θερμικών όσο και των ηλεκτρικών, πραγματοποιήθηκε με χρήση του «Κανόνα της 4ης Δύναμης» (βλ. Κεφάλαιο 4.4.2.2) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5: Συντελεστές Ισοδυναμίας επιβατικών οχημάτων

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑΣ ΕΠΙΒΑΤΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ		
Κανόνας 4ης Δύναμης		
$LEF=(P_i/P_T)^4$, P_i = αξονικό φορτίο, P_T = τυπικό αξονικό φορτίο = 80 kN		
Τύπος Οχήματος	P_i (kN)	LEF
Θερμικό	16,7	0,00190
Ηλεκτρικό	21,7	0,00542

Παρατηρείται, λοιπόν, μία αύξηση του Συντελεστή Ισοδυναμίας κατά 185,26% από τη μετάβαση στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα.

4.4.3 Ισοδύναμοι Τυπικοί Άξονες - Σενάρια κυκλοφορίας

Για τον υπολογισμό των Ισοδύναμων Τυπικών Αξόνων (ITA) που θα χρησιμοποιηθούν στις αναλύσεις με το πρόγραμμα 3D-Move, ώστε να πραγματοποιηθεί συγκριτική αξιολόγηση της καταπόνησης της επιλεχθείσας τυπικής διατομής οδοστρώματος (Βλ. Κεφάλαιο 4.3) από τον εξηλεκτρισμό των επιβατικών οχημάτων, λήφθηκαν υπόψιν τα επόμενα τρία σενάρια:

- Το Σενάριο 1, που δεν περιλαμβάνει στην κυκλοφοριακή θεώρηση τις διελεύσεις των επιβατικών οχημάτων ιδιωτικής χρήσης, με βάση τη συνήθη πρακτική, με την παραδοχή ότι δεν προκαλούν σημαντική επιβάρυνση στο οδόστρωμα.
- Το Σενάριο 2, που τροποποιεί το Σενάριο 1 και εξετάζει την κυκλοφορία λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις διελεύσεις των επιβατικών οχημάτων με τον υφιστάμενο τρόπο λειτουργίας τους, δηλαδή, ως θερμικά.
- Το Σενάριο 3, που εξετάζει την κυκλοφορία λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις διελεύσεις των επιβατικών οχημάτων θεωρώντας τα ως ηλεκτρικά.

Επισημαίνεται ότι και στα τρία σενάρια τα υπόλοιπα οχήματα (Κατηγορίας 3 και 4) λαμβάνονται υπόψη με βάση τις υπάρχουσες συνθήκες, δηλαδή, ως θερμικά.

Έχοντας τις διελεύσεις των οχημάτων σε Ετήσια Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία (ΕΜΗΚ) από τα πρωτογενή δεδομένα κυκλοφορίας (Κεφάλαιο 4.4.1) και τους Συντελεστές Ισοδυναμίας (Σ.Ι.) (Κεφάλαια 4.4.2.3 και 4.4.2.4) προσδιορίζονται οι Ισοδύναμοι Τυπικοί Άξονες (ITA) ανά έτος για κάθε κατηγορία οχήματος με τη Σχέση 4.3:

$$ITA_{365} = 365 \cdot EMHK \cdot \Sigma I \quad (4.3)$$

Οι Συνολικές Ισοδύναμες Διελεύσεις (ΣΙΔ) για το έτος-στόχο για κάθε κατηγορία οχήματος δίνονται από τη Σχέση 4.4:

$$ΣΙΔ = 365 \cdot ΕΜΗΚ \cdot ΣΙ \cdot \frac{(1 + ΡΑ)^Π - 1}{ΡΑ} \quad (4.4)$$

Όπου:

ΕΜΗΚ = Ετήσια Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία για κάθε κατηγορία οχήματος

ΣΙ = Συντελεστής Ισοδυναμίας για κάθε κατηγορία οχήματος

ΡΑ = ο ρυθμός αύξησης της κυκλοφορίας εκφρασμένος σε δεκαδική μορφή

Π = η περίοδος σχεδιασμού του οδοστρώματος

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.6, 4.7 και 4.8 (τα δίκυκλα οχήματα δεν λαμβάνονται υπόψιν λόγω της αμελητέας επίδρασής τους στο οδόστρωμα). Κατά την ανάλυση έγινε η θεώρηση ότι το 100% των αξόνων διέρχεται από τη λωρίδα σχεδιασμού.

Πίνακας 4.6: Σενάριο 1 – Διελεύσεις Ισοδύναμων Τυπικών Αξόνων

ΣΕΝΑΡΙΟ 1				
(Επιβατικά οχήματα δεν λαμβάνονται υπόψιν)				
Κατηγορία Οχημάτων	ΕΜΗΚ	Σ.Ι.	ΙΤΑ/ημέρα	ΙΤΑ 1ου έτους
2 (Επιβατικά Οχήματα)	0	0,0019	0	0
3 (Βαρέα Οχήματα με άξονες < 4)	1400	1	1400	511000
4 (Βαρέα Οχήματα με άξονες ≥ 4)	1100	4	4400	1606000
Συνολικοί ΙΤΑ/ημέρα	-	-	5800	-
Συνολικές Ισοδύναμες Διελεύσεις 1ου έτους	-	-	-	2117000
Συνολικές Ισοδύναμες Διελεύσεις έτους στόχου (ΡΑ=0,02 Π=20)	51,43 · 10⁶			

Πίνακας 4.7: Σενάριο 2 – Διελεύσεις Ισοδύναμων Τυπικών Αξόνων

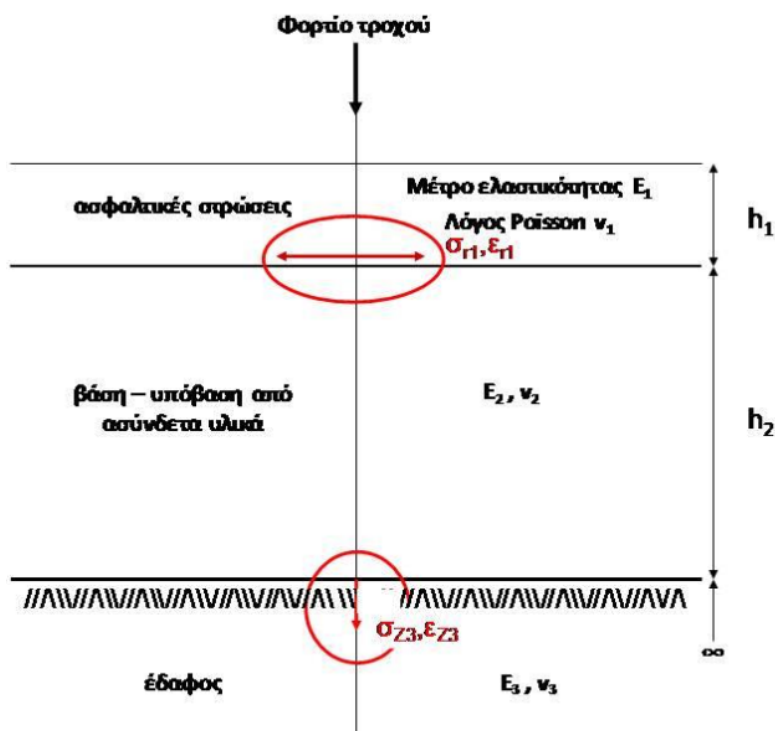
ΣΕΝΑΡΙΟ 2				
(Επιβατικά οχήματα λαμβάνονται όλα υπόψιν ως θερμικά)				
Κατηγορία Οχημάτων	ΕΜΗΚ	Σ.Ι.	ΙΤΑ/ημέρα	ΙΤΑ 1ου έτους
2 (Επιβατικά Οχήματα)	20000	0,0019	38	13870
3 (Βαρέα Οχήματα με άξονες < 4)	1400	1	1400	511000
4 (Βαρέα Οχήματα με άξονες ≥ 4)	1100	4	4400	1606000
Συνολικοί ΙΤΑ/ημέρα	-	-	5838	-
Συνολικές Ισοδύναμες Διελεύσεις 1ου έτους	-	-	-	2130870
Συνολικές Ισοδύναμες Διελεύσεις έτους στόχου (ΡΑ=0,02 Π=20)	51,77 · 10⁶			

Πίνακας 4.8: Σενάριο 3 – Διελεύσεις Ισοδύναμων Τυπικών Αξόνων

ΣΕΝΑΡΙΟ 3				
(Επιβατικά οχήματα λαμβάνονται όλα υπόψιν ως ηλεκτρικά)				
Κατηγορία Οχημάτων	ΕΜΗΚ	Σ.Ι.	ΙΤΑ/ημέρα	ΙΤΑ 1ου έτους
2 (Επιβατικά Οχήματα)	20000	0,00542	108,4	39566
3 (Βαρέα Οχήματα με άξονες < 4)	1400	1	1400	511000
4 (Βαρέα Οχήματα με άξονες ≥ 4)	1100	4	4400	1606000
Συνολικοί ΙΤΑ/ημέρα	-	-	5908	-
Συνολικές Ισοδύναμες Διελεύσεις 1ου έτους	-	-	-	2156566
Συνολικές Ισοδύναμες Διελεύσεις έτους στόχου (PA=0,02 Π=20)	52,40 · 10 ⁶			

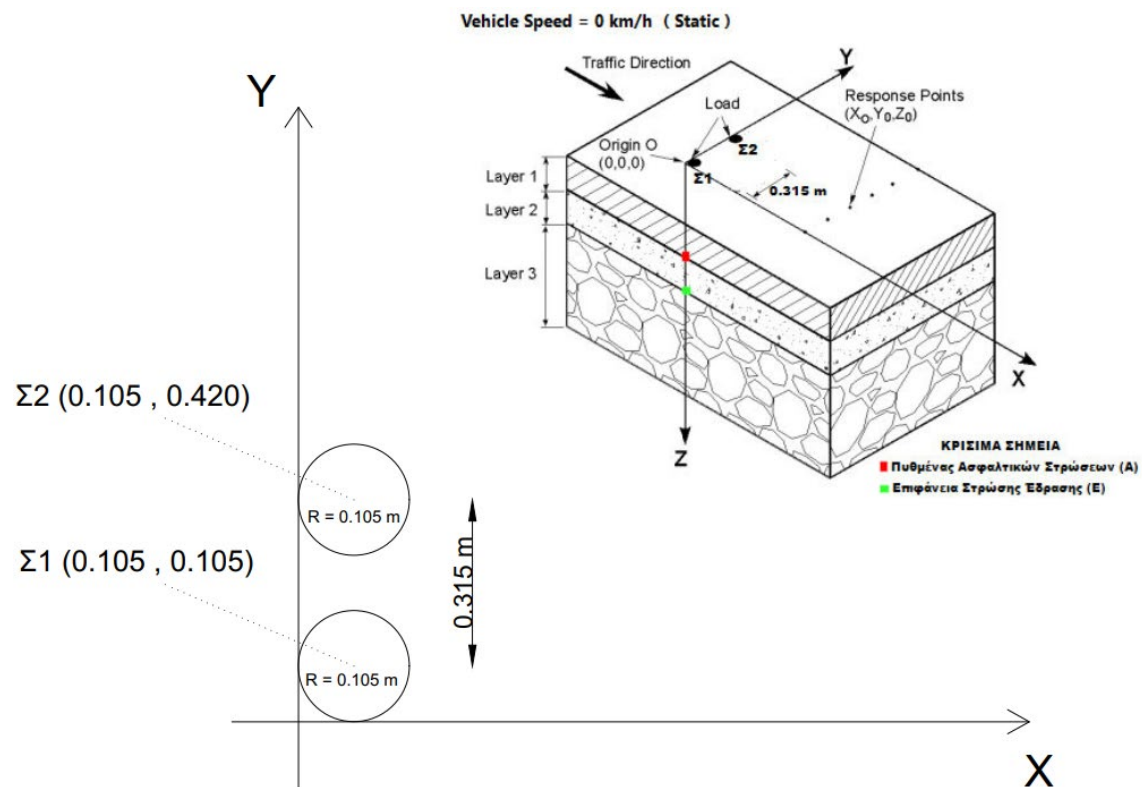
4.5 Κρίσιμες θέσεις αστοχίας εύκαμπτου οδοστρώματος

Για την εντατική κατάσταση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος, οι κρίσιμες θέσεις είναι ο πυθμένας των ασφαλτικών στρώσεων και η επιφάνεια της στρώσης έδρασης (Εικόνα 4.4). Τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη για τον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων είναι οι εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις, που αποτελούν κριτήρια της εφελκυστικής αντοχής σε ρηγμάτωση (κόπωση) του ασφαλτομίγματος. Τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη για την επιφάνεια της στρώσης έδρασης είναι οι κατακόρυφες τάσεις και παραμορφώσεις, που αποτελούν κριτήρια για την αστοχία-παραμορφωσιμότητα της στρώσης έδρασης.



Εικόνα 4.4: Κρίσιμες θέσεις εύκαμπτου οδοστρώματος
Πηγή: (Λοΐζος, Α., Πλατή, Χ., 2021)

Για την εξαγωγή συμπερασμάτων, από τα αποτελέσματα της ανάλυσης της εντατικής κατάστασης του οδοστρώματος στο πρόγραμμα 3D-Move, λήφθηκαν υπόψη οι τιμές των παραμορφώσεων στις παραπάνω κρίσιμες θέσεις αστοχίας στα σημεία κατακόρυφα κάτω από το κέντρο της επιφάνειας επαφής των τροχών του ισοδύναμου τυπικού άξονα με το οδόστρωμα (σημεία Σ1 και Σ2) όπου και δίνονταν οι μέγιστες τιμές (Εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.5: Κρίσιμα σημεία ανάλυσης

Επισημαίνεται πως το οδόστρωμα θεωρείται ως μια πολυστρωματική δομή και λαμβάνεται υπόψη η κατανομή των τάσεων σε κάθε στρώση του.

4.6 Εξεταζόμενες φθορές και αστοχίες

Το λογισμικό 3D-Move μέσω της ανάλυσης που εκτελεί παρέχει αποτελέσματα για πέντε τύπους φθορών με βάση τη μηχανιστική-εμπειρική μέθοδο MEPDG. Οι νόμοι αστοχιών που χρησιμοποιούνται, για την μελέτη της απόδοσης του οδοστρώματος, έχουν προκύψει από το ερευνητικό πρόγραμμα National Cooperative Highway Research Program 1-37A (NCHRP 1-37A).

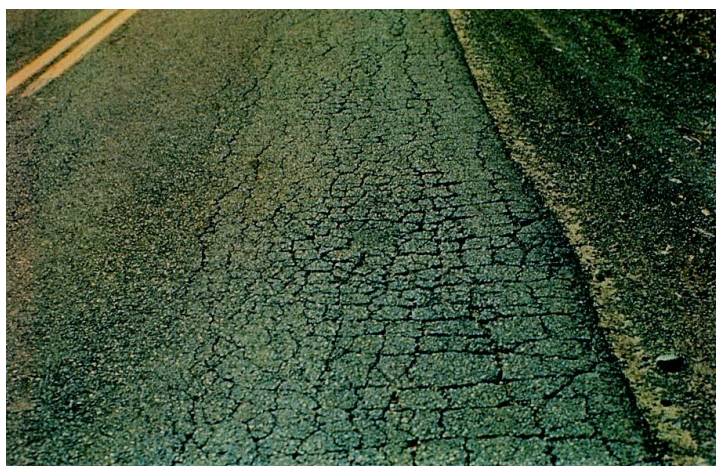
Σχετικά με τις ασφαλικές στρώσεις ελέγχονται οι εξής αστοχίες:

◊ Top-Down Cracking: Πρόκειται για τις ρωγμές που εμφανίζονται στην επιφάνεια του οδοστρώματος και συνεχίζονται προς τις κατώτερες ασφαλτικές στρώσεις (Εικόνα 4.6). Δεν αποτελούν σημαντική αστοχία, αφού γίνονται άμεσα αντιληπτές και δύναται έτσι να σφραγιστούν άμεσα χωρίς περαιτέρω επιπτώσεις.



Εικόνα 4.6: Top-Down Cracking
Πηγή: (Pavement Interactive, 2023)

◊ Bottom-Up Cracking: Πρόκειται για τις ρηγματώσεις που ξεκινούν από τον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων με κατεύθυνση προς την επιφανειακή στρώση. Αποτελούν πολύ σημαντικό τύπο αστοχίας καθώς δεν γίνονται άμεσα αντιληπτές οδηγώντας έπειτα στις λεγόμενες αλιγοτορικές ρωγμές (Εικόνα 4.7) στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Οφείλονται σε ανεπαρκή δομικό σχεδιασμό, κακή κατασκευή (ανεπαρκής συμπίκνωση) ή παρουσία φορτίων μεγαλύτερων από τα αναμενόμενα κατά το σχεδιασμό. Ανάλογα της έκτασης του φαινομένου, η επισκευή μπορεί να είναι δύσκολη έως αδύνατη.



Εικόνα 4.7: Αλιγοτορικές ρωγμές
Πηγή: (Pavement Interactive, 2023)

◊ Rutting: Πρόκειται για το φαινόμενο της τροχοαυλάκωσης που συνίσταται στην κατά μήκος παραμόρφωση που εμφανίζεται στα ίχνη των τροχών των οχημάτων (Εικόνα 4.8). Είναι πιθανό να επηρεάσει την ασφάλεια των χρηστών διότι το νερό που συσσωρεύεται στις αυλακώσεις αυξάνει τον κίνδυνο της υδρολίσθησης. Οφείλεται, συνήθως, σε αστοχία του μίγματος των ασφαλτικών στρώσεων και χαρακτηρίζεται από τοπική ανύψωση του στρώματος δεξιά και αριστερά κατά μήκος της αυλάκωσης. Επίσης, μπορεί να προκύψει από συμπύκνωση των ασφαλτικών στρώσεων, χωρίς πλευρικές μετακινήσεις, λόγω της επίδρασης της κυκλοφορίας. Αντιμετωπίζεται με φρεζάρισμα του προβληματικού τμήματος της οδού σε ικανοποιητικό βάθος και εν συνεχεία με διάστρωση θερμού ασφαλτομίγματος.



Εικόνα 4.8: Τροχοαυλάκωση ασφαλτικών στρώσεων
Πηγή: (Pavement Interactive, 2023)

Όσον αφορά τη στρώση βάσης και την εδαφική στρώση ελέγχονται σε παραμένονσα παραμόρφωση (rutting). Στην προκειμένη περίπτωση η παραμόρφωση οφείλεται είτε σε ανεπαρκή προετοιμασία του υποστρώματος (για παράδειγμα συμπύκνωση), είτε σε ανεπαρκή (λόγω ακατάλληλης σχεδίασης) δομική αντοχή του οδοστρώματος (ιδιαίτερα των ασφαλτικών στρώσεων) που οδηγεί σε μετάδοση των τάσεων στο υπόβαθρο χωρίς απομείωσή τους από τα ανώτερα στρώματα. Στην κορυφή της ασφαλτικής στρώσης υπάρχει μια χαρακτηριστική έλλειψη ανύψωσης στις άκρες του αυλακιού που έχει δημιουργηθεί και η επιφάνειά της είναι ραγισμένη (Εικόνα 4.9) για να της επιτρέψει να κάμπτεται μέσα στην αυλάκωση του υποστρώματος (Pavement Interactive, 2023).



Εικόνα 4.9: Επιφανειακή φθορά λόγω παραμένουσας παραμόρφωσης στρώσης έδρασης
Πηγή: (Pavement Interactive, 2023)

Σημαντικότερες αστοχίες εκ των ανωτέρω είναι οι ρηγματώσεις που ξεκινούν από τον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων (bottom-up cracking) και η παραμένουσα παραμόρφωση της στρώσης έδρασης (subgrade rutting). Γι' αυτό το λόγο και λαμβάνονται ιδιαίτερα υπόψη κατά το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων και ομοίως ιδιαίτερη βαρύτητα θα δοθεί σε αυτές και κατά την ανάλυση και τη συγκριτική αξιολόγηση στην παρούσα εργασία.

Για τον υπολογισμό της κόπωσης των ασφαλτικών στρώσεων χρησιμοποιείται η Σχέση (4.5):

$$N_f = 0.00432 \cdot C \cdot C_H \cdot k_{f1} \cdot \beta_{f1} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{k_{f2}\beta_{f2}} \cdot \left(\frac{1}{E}\right)^{k_{f3}k_{f3}} \quad (4.5)$$

Όπου:

$$C = 10^{4.84 \cdot \left[\frac{V_{be}}{V_a + V_{be}} - 0.69\right]}$$

$$C_H = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49 \cdot H_{AC})}}}$$

Και:

N_f = επιτρεπόμενες διελεύσεις του ισοδύναμου άξονα πριν την αστοχία του οδοστρώματος εξαιτίας της κόπωσης της ασφαλτικής στρώσης

E = μέτρο ελαστικότητας του υλικού της ασφάλτου σε kPa

ε_t = μέγιστη εφελκυστική ανηγμένη οριζόντια παραμόρφωση στον πυθμένα της ασφαλικής στρώσης σε mm

V_a = ποσοστό όγκου κενών αέρα του ασφαλτομίγματος (4%)

V_{be} = ποσοστό όγκου ασφάλτου το οποίο δεν έχει δεσμευτεί από τα αδρανή (ενεργό ποσοστό όγκου ασφάλτου = 9.4%)

H_{AC} = πάχος ασφαλικής στρώσης σε mm

$k_{f1}, k_{f2}, k_{f3}, \beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}$ = συντελεστές παλινδρόμησης εξαρτώμενοι από τις τοπικές συνθήκες και το φορτίο ($k_{f1}=1, k_{f2}= 3.9492, k_{f3}= 1.281, \beta_{f1}=1, \beta_{f2}=1, \beta_{f3}=1$).

Αντίστοιχα, η παραμένουσα παραμόρφωση του οδοστρώματος από αστοχία της στρώσης έδρασης εκφράζεται από τη Σχέση (4.6):

$$\delta_a(N) = \beta_{s1} \cdot k_{s1} \cdot \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) \cdot e^{-\left(\frac{\rho}{N} \right)^\beta} \cdot \varepsilon_v \cdot h \quad (4.6)$$

Όπου:

δ_a = παραμένουσα παραμόρφωση της στρώσης

N = αριθμός επαναλήψεων της φόρτισης

ε_v = μέση κατακόρυφη παραμόρφωση σε mm/mm

ε_r = κατακόρυφη ελαστική παραμόρφωση που επιβλήθηκε σε εργαστηριακή δοκιμή για να ληφθούν οι ιδιότητες του υλικού

$\varepsilon_0, \beta, \rho$ = αριθμοί που προκύπτουν από τις ιδιότητες του υλικού

β_{s1}, k_{s1} = οι συντελεστές παλινδρόμησης εξαρτώμενοι από τον τύπο του υλικού της στρώσης

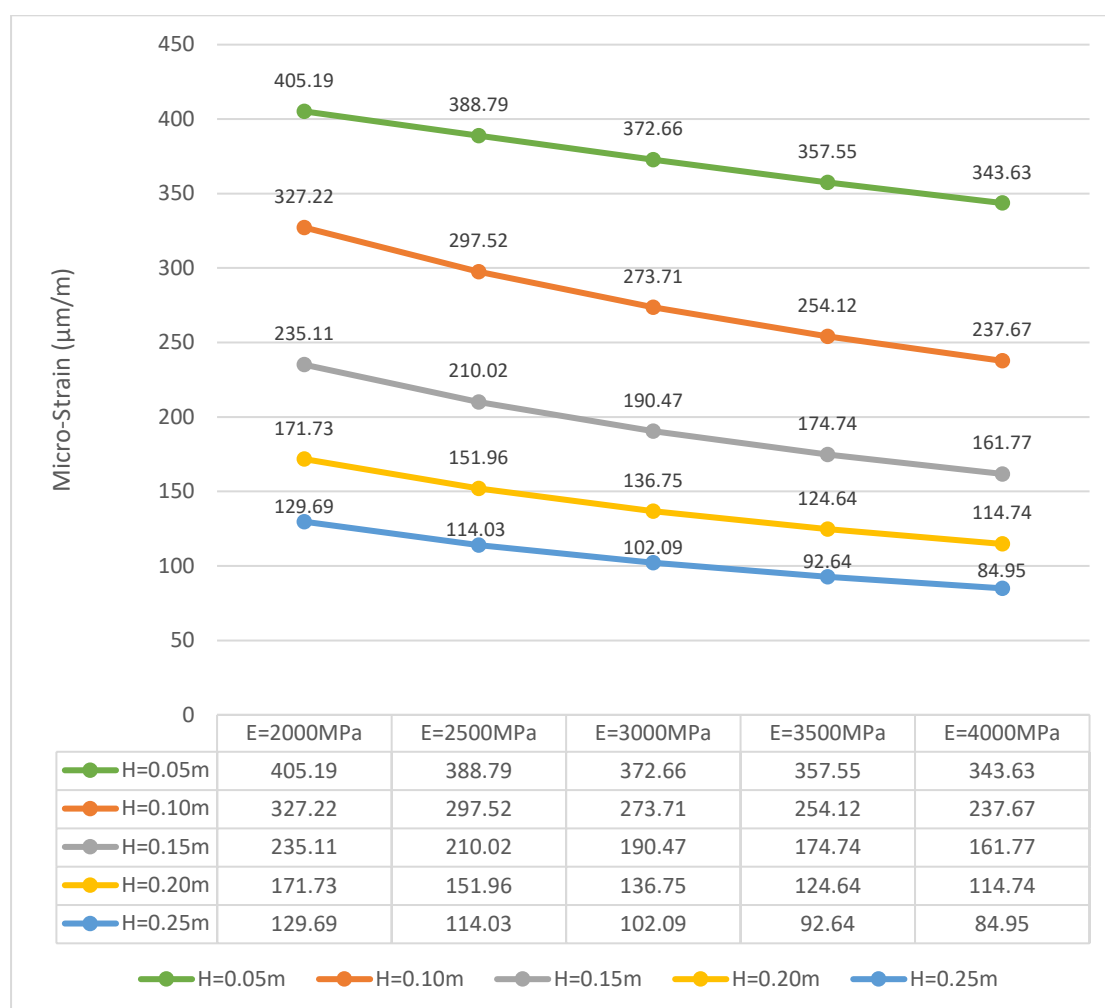
h = πάχος στρώσης σε mm

Η ανάλυση για τον υπολογισμό των φθορών πραγματοποιείται για στατική φόρτιση του οδοστρώματος και για σταθερή θερμοκρασία ασφαλικής στρώσης για όλα τα σενάρια.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις

Οι οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις αναπτύσσονται στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4.5, και αποτελούν ένα από τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη για την απόκριση και την αντοχή του οδοστρώματος. Το κέντρο της επιφάνειας επαφής του τροχού με το οδόστρωμα είναι το σημείο εμφάνισης των μέγιστων τιμών τους και επομένως αποτέλεσε τη δυσμενέστερη θέση. Μέσω της ανάλυσης του λογισμικού 3D-Move συγκεντρώθηκαν οι μέγιστες τιμές των εφελκυστικών παραμορφώσεων, για θεώρηση στατικής φόρτισης, ανάλογα με το πάχος και το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων. Στην Εικόνα 5.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης.



Εικόνα 5.1: Οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις σε σχέση με το πάχος και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης

Είναι φανερό πως, για σταθερό πάχος των ασφαλικών στρώσεων, όσο αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας μειώνονται και οι τιμές των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Αντίστοιχα, για σταθερό μέτρο δυσκαμψίας, όσο αυξάνεται το πάχος των ασφαλικών στρώσεων τόσο μειώνονται οι τιμές των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Παρατηρείται, εντούτοις, πως σημαντικότερο ρόλο στη μείωση των παραμορφώσεων διαδραματίζει το πάχος της ασφαλικής στρώσης, αφού μια αύξηση της τιμής του κατά 5 cm οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση των εφελκυστικών παραμορφώσεων σε σχέση με την αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας κατά 1500 MPa ή ακόμα και κατά 2000 MPa στις περιπτώσεις των χαμηλών παχών. Στον Πίνακα 5.1 απεικονίζεται η μεταβολή σε micro-strain της τιμής των εφελκυστικών παραμορφώσεων με την αύξηση του πάχους των ασφαλικών στρώσεων, ενώ στον Πίνακα 5.2 απεικονίζεται η αντίστοιχη μεταβολή για αύξηση της τιμής του μέτρου δυσκαμψίας.

Πίνακας 5.1: Μεταβολή σε micro-strain των οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων λόγω αύξησης του πάχους της ασφαλικής στρώσης

	E=2000 MPa	E=2500 MPa	E=3000 MPa	E=3500 MPa	E=4000 MPa
H=0.05 m					
H =0.10 m	-77.97	-91.27	-98.95	-103.43	-105.96
H=0.15 m	-92.11	-87.5	-83.24	-79.38	-75.9
H=0.20 m	-63.38	-58.06	-53.72	-50.1	-47.03
H=0.25 m	-42.04	-37.93	-34.66	-32	-29.79

Πίνακας 5.2: Μεταβολή σε micro-strain των οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων λόγω αύξησης του μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης

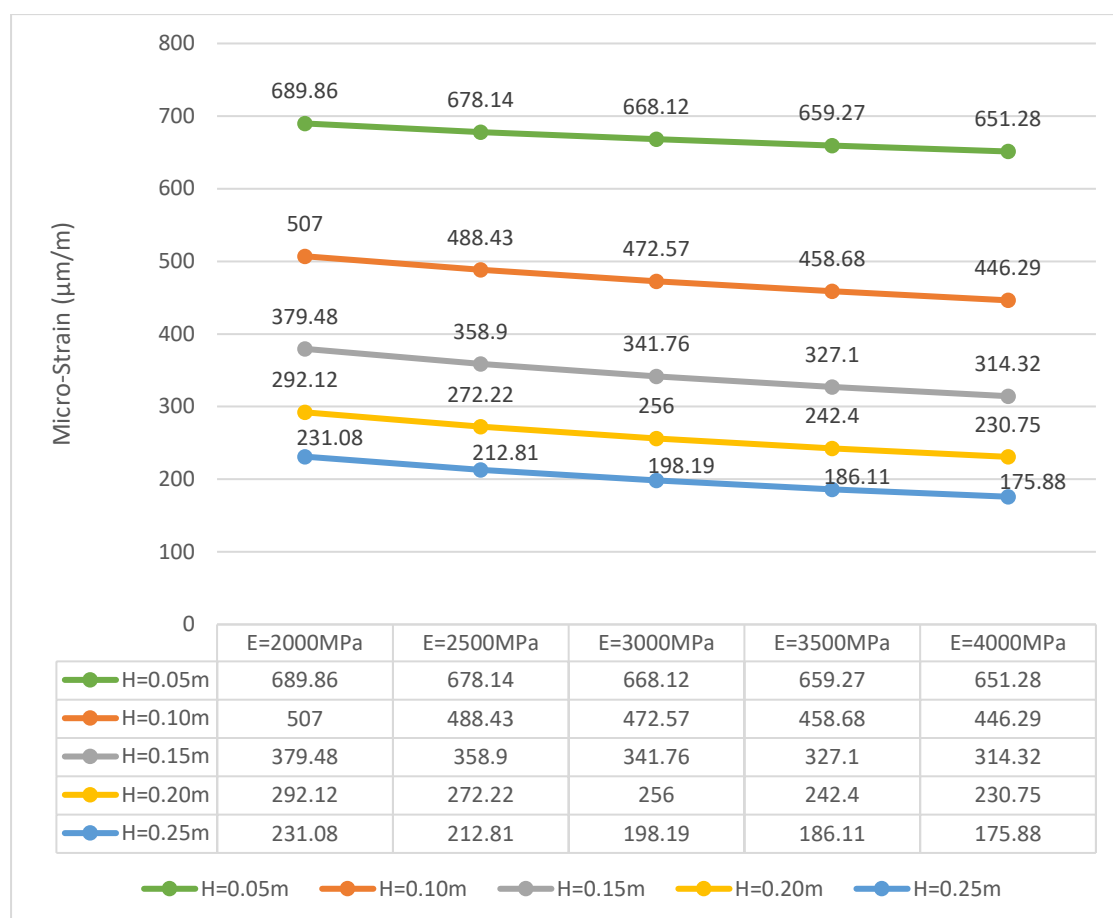
	H=0.05 m	H =0.10 m	H=0.15 m	H=0.20 m	H=0.25 m
E=2000 MPa					
E=2500 MPa	-16.4	-29.7	-25.09	-19.77	-15.66
E=3000 MPa	-16.13	-23.81	-19.55	-15.21	-11.94
E=3500 MPa	-15.11	-19.59	-15.73	-12.11	-9.45
E=4000 MPa	-13.92	-16.45	-12.97	-9.9	-7.69

Μεγαλύτερη μείωση των παραμορφώσεων διαπιστώνεται κατά την αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης από 5 σε 10 cm, με εξαίρεση την περίπτωση όπου το μέτρο δυσκαμψίας της στρώσης είναι 2000 MPa. Όσον αφορά το μέτρο δυσκαμψίας, μεγαλύτερη μείωση των παραμορφώσεων παρατηρείται κατά την αύξηση από 2000 σε 2500 MPa. Επισημαίνεται ότι όσο περισσότερο αυξάνεται το πάχος αλλά και το μέτρο δυσκαμψίας, τόσο μικρότερες είναι οι μεταβολές (φθίνουν). Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί πως τα ανωτέρω αφορούν όλα τα σενάρια της μελέτης, αφού και στα τρία η κυκλοφορία των διαφορετικών οχημάτων ανάγεται σε

διελεύσεις του ισοδύναμου τυπικού άξονα που είναι και αυτός που καθορίζει τις τιμές των παραμορφώσεων σε συνδυασμό με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος.

5.2 Κατακόρυφες παραμορφώσεις

Οι κατακόρυφες παραμορφώσεις αναπτύσσονται στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης και αποτελούν κριτήριο για την αστοχία-παραμορφωσιμότητα της, όπως και κρίσιμο εντατικό μέγεθος για την απόκριση και την αντοχή του οδοστρώματος συνολικά. Το σημείο εμφάνισης των μέγιστων τιμών τους είναι το κέντρο της επιφάνειας επαφής του τροχού με το οδόστρωμα και επομένως αποτέλεσε τη δυσμενέστερη θέση κατά τη μελέτη. Μέσω της ανάλυσης του λογισμικού 3D-Move συγκεντρώθηκαν οι μέγιστες τιμές των κατακόρυφων παραμορφώσεων, για θεώρηση στατικής φόρτισης, ανάλογα με το πάχος και το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων. Στην Εικόνα 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης.



Εικόνα 5.2: Κατακόρυφες παραμορφώσεις σε σχέση με το πάχος και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης

Είναι προφανές πως, για σταθερό πάχος των ασφαλικών στρώσεων, όσο αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας, τόσο μειώνονται και οι τιμές των κατακόρυφων παραμορφώσεων. Παράλληλα, για σταθερό μέτρο δυσκαμψίας, όσο αυξάνεται το πάχος των ασφαλικών στρώσεων τόσο μειώνονται οι τιμές των κατακόρυφων παραμορφώσεων. Όπως συμβαίνει με τις οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις έτσι και για τις κατακόρυφες παρατηρείται πως σημαντικότερο ρόλο στη μείωση τους διαδραματίζει το πάχος της ασφαλικής στρώσης, αφού μια αύξηση της τιμής του κατά 5 cm οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση των κατακόρυφων παραμορφώσεων σε σχέση με την αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας ακόμα και κατά 2000 MPa. Στον Πίνακα 5.3 απεικονίζεται η μεταβολή σε micro-strain της τιμής των κατακόρυφων παραμορφώσεων με την αύξηση του πάχους των ασφαλικών στρώσεων, ενώ στον Πίνακα 5.4 απεικονίζεται η αντίστοιχη μεταβολή για αύξηση της τιμής του μέτρου δυσκαμψίας.

Πίνακας 5.3: Μεταβολή σε micro-strain των κατακόρυφων παραμορφώσεων λόγω αύξησης του πάχους της ασφαλικής στρώσης

	E=2000 MPa	E=2500 MPa	E=3000 MPa	E=3500 MPa	E=4000 MPa
H=0.05 m					
H =0.10 m	-182.86	-189.71	-195.55	-200.59	-204.99
H=0.15 m	-127.52	-129.53	-130.81	-131.58	-131.97
H=0.20 m	-87.36	-86.68	-85.76	-84.7	-83.57
H=0.25 m	-61.04	-59.41	-57.81	-56.29	-54.87

Πίνακας 5.4: Μεταβολή σε micro-strain των κατακόρυφων παραμορφώσεων λόγω αύξησης του μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης

	H=0.05 m	H =0.10 m	H=0.15 m	H=0.20 m	H=0.25 m
E=2000 MPa					
E=2500 MPa	-11.72	-18.57	-20.58	-19.9	-18.27
E=3000 MPa	-10.02	-15.86	-17.14	-16.22	-14.62
E=3500 MPa	-8.85	-13.89	-14.66	-13.6	-12.08
E=4000 MPa	-7.99	-12.39	-12.78	-11.65	-10.23

Μεγαλύτερη μείωση των παραμορφώσεων διαπιστώνεται κατά την αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης από 5 σε 10 cm. Σχετικά με το μέτρο δυσκαμψίας, μεγαλύτερη μείωση των παραμορφώσεων παρατηρείται κατά την αύξηση από 2000 σε 2500 MPa. Επισημαίνεται ότι όσο περισσότερο αυξάνεται το πάχος αλλά και το μέτρο δυσκαμψίας, τόσο μικρότερες είναι οι μεταβολές (φθίνουν). Όπως και στην περίπτωση των οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων έτσι και εδώ πρέπει να

τονιστεί πως τα ανωτέρω αφορούν όλα τα σενάρια της μελέτης, αφού και στα τρία η κυκλοφορία των διαφορετικών οχημάτων ανάγεται σε διελεύσεις του ισοδύναμου τυπικού άξονα που είναι και αυτός που καθορίζει τις τιμές των παραμορφώσεων σε συνδυασμό με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος.

5.3 Φθορές και αστοχίες

5.3.1 Γενικά

Τα αποτελέσματα, για τις εξεταζόμενες φθορές και αστοχίες που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4.6, παρέχονται μέσω της ανάλυσης που πραγματοποιεί το λογισμικό 3D-Move για τους νόμους αστοχίας που διαθέτει (κόπωση ασφαλτικής στρώσης και παραμένουσα παραμόρφωση για ασφαλτική στρώση, βάση-υπόβαση και στρώση έδρασης) αναφερόμενους στο τυπικό αξονικό φορτίο 80 kN μονού άξονα με διπλά ελαστικά και βαθμονομημένους σύμφωνα με το ερευνητικό πρόγραμμα NCRRP 1-37A. Στη συνέχεια, δίνονται τα αποτελέσματα για κάθε τύπο φθοράς για όλα τα σενάρια που αναπτύχθηκαν (Βλ. Κεφάλαιο 4.4.3). Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί πως σημαντικότεροι τύποι φθοράς, που λαμβάνονται υπόψιν κατά τον παραδοσιακό σχεδιασμό οδοστρωμάτων, είναι η ρηγμάτωση που ξεκινάει από τον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων λόγω κόπωσης του ασφαλτομίγματος (AC Bottom-Up Cracking) και η παραμένουσα παραμόρφωση της επιφάνειας της στρώσης έδρασης (Subgrade Rutting).

5.3.2 Ρηγμάτωση ασφαλτικής στρώσης από πάνω προς τα κάτω (AC top-down cracking)

Πρόκειται, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4.6, για τον λιγότερο σημαντικό τύπο αστοχίας. Η μέγιστη τιμή που ορίζει το λογισμικό 3D-Move, μέσω της μεθόδου NCRRP 1-37A, για την επιτυχή ολοκλήρωση της δοκιμής, όσον αφορά την απόδοση του οδοστρώματος, είναι 379 m/km. Σε όλες τις δοκιμές που διεξήχθησαν για κάθε συνδυασμό μέτρου δυσκαμψίας και ύψους ασφαλτικής στρώσης και για κάθε σενάριο η τιμή για τον συγκεκριμένο τύπο αστοχίας ήταν 0 m/km, γεγονός που δείχνει τη δευτερεύουσα σημασία αυτής της φθοράς στη γενικότερη απόδοση του οδοστρώματος στο χρόνο.

5.3.3 Ρηγμάτωση ασφαλτικής στρώσης από κάτω προς τα πάνω (AC bottom-up cracking)

Κατατάσσεται στους σημαντικότερους τύπους αστοχίας και προέρχεται από την κόπωση του ασφαλτομίγματος λόγω των οριζόντιων εφελκυστικών δυνάμεων και

παραμορφώσεων στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων. Η μέγιστη τιμή που ορίζει το λογισμικό, σύμφωνα με το πρόγραμμα NCRRP 1-37A, για επιτυχή ολοκλήρωση της ανάλυσης είναι το 25% (ποσοστό ρηγματωμένης επιφάνειας οδοστρώματος κατά την ολοκλήρωση των διελεύσεων σχεδιασμού). Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζονται, ανά σενάριο, τα ποσοστά ρηγμάτωσης της ασφαλτικής στρώσης για κάθε συνδυασμό πάχους και μέτρου δυσκαμψίας μετά το πέρας των διελεύσεων σχεδιασμού. Με κόκκινο χρώμα επισημαίνονται οι τιμές που δεν ικανοποιούν την μέγιστη τιμή της χρησιμοποιούμενης μεθόδου ενώ με πράσινο όσες την ικανοποιούν.

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα ελέγχου ρηγμάτωσης ασφαλτικής στρώσης

ΣΕΝΑΡΙΟ 1					
AC Bottom-Up Cracking (%) [3D-MOVE Distress target: 25%]	E =2000 MPa	E =2500 MPa	E =3000 MPa	E =3500 MPa	E =4000 MPa
H=0.05 m	82.83	85.78	87.18	87.86	88.13
H =0.10 m	93.25	92.52	91.67	90.72	89.72
H=0.15 m	73.45	70.27	66.92	63.56	60.23
H=0.20 m	44.4	39.33	34.78	30.8	27.34
H=0.25 m	21.04	17.33	14.4	12.1	10.26

ΣΕΝΑΡΙΟ 2					
AC Bottom-Up Cracking (%) [3D-MOVE Distress target: 25%]	E =2000 MPa	E =2500 MPa	E =3000 MPa	E =3500 MPa	E =4000 MPa
H=0.05 m	83	85.92	87.32	87.99	88.26
H =0.10 m	93.3	92.58	91.73	90.79	89.79
H=0.15 m	73.59	70.42	67.09	63.73	60.41
H=0.20 m	44.58	39.5	34.94	30.95	27.49
H=0.25 m	21.15	17.43	14.49	12.17	10.33

ΣΕΝΑΡΙΟ 3					
AC Bottom-Up Cracking (%) [3D-MOVE Distress target: 25%]	E =2000 MPa	E =2500 MPa	E =3000 MPa	E =3500 MPa	E =4000 MPa
H=0.05 m	83.31	86.18	87.56	88.21	88.48
H =0.10 m	93.39	92.68	91.84	90.91	89.92
H=0.15 m	73.85	70.7	67.38	64.04	60.73
H=0.20 m	44.9	39.81	35.24	31.23	27.75
H=0.25 m	21.37	17.62	14.65	12.31	10.45

Είναι φανερό πως γενικά το πάχος της ασφαλτικής στρώσης συμβάλλει περισσότερο στη μείωση των ποσοστών ρηγμάτωσης σε σχέση με το μέτρο δυσκαμψίας. Παρατηρείται, ωστόσο, πως για αύξηση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης από 5 σε 10 cm υπάρχει αύξηση των ποσοστών ρηγμάτωσης για όλα τα μέτρα δυσκαμψίας ενώ οι μεγαλύτερες μεταβολές συμβαίνουν όταν το πάχος αυξάνεται από 15 σε 20 cm (βλ. Πίνακα 5.6).

Πίνακας 5.6: Μεταβολή ποσοστών ρηγμάτωσης ασφαλτικής στρώσης λόγω αύξησης του πάχους της

ΣΕΝΑΡΙΟ 1					
AC Bottom-Up Cracking (%) [Μεταβολή λόγω αύξησης πάχους ασφ. στρώσης]	E =2000 MPa	E =2500 MPa	E =3000 MPa	E =3500 MPa	E =4000 MPa
H=0.05 m					
H =0.10 m	10.42	6.74	4.49	2.86	1.59
H=0.15 m	-19.8	-22.25	-24.75	-27.16	-29.49
H=0.20 m	-29.05	-30.94	-32.14	-32.76	-32.89
H=0.25 m	-23.36	-22	-20.38	-18.7	-17.08

ΣΕΝΑΡΙΟ 2					
AC Bottom-Up Cracking (%) [Μεταβολή λόγω αύξησης πάχους ασφ. στρώσης]	E =2000 MPa	E =2500 MPa	E =3000 MPa	E =3500 MPa	E =4000 MPa
H=0.05 m					
H =0.10 m	10.3	6.66	4.41	2.8	1.53
H=0.15 m	-19.71	-22.16	-24.64	-27.06	-29.38
H=0.20 m	-29.01	-30.92	-32.15	-32.78	-32.92
H=0.25 m	-23.43	-22.07	-20.45	-18.78	-17.16

ΣΕΝΑΡΙΟ 3					
AC Bottom-Up Cracking (%) [Μεταβολή λόγω αύξησης πάχους ασφ. στρώσης]	E =2000 MPa	E =2500 MPa	E =3000 MPa	E =3500 MPa	E =4000 MPa
H=0.05 m					
H =0.10 m	10.08	6.5	4.28	2.7	1.44
H=0.15 m	-19.54	-21.98	-24.46	-26.87	-29.19
H=0.20 m	-28.95	-30.89	-32.14	-32.81	-32.98
H=0.25 m	-23.53	-22.19	-20.59	-18.92	-17.3

Όσον αφορά το μέτρο δυσκαμψίας, για πάχος ασφαλτικής στρώσης 5 cm υπάρχει αύξηση των ποσοστών ρηγμάτωσης όσο αυξάνεται αυτό, ενώ για όλα τα υπόλοιπα πάχη υπάρχει μείωση, με τη μεγαλύτερη αυτών να εντοπίζεται κατά την αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας από 3500 σε 4000 MPa για πάχος ασφαλτικής στρώσης 10 cm, από 3000 σε 3500 MPa για πάχος ασφαλτικής στρώσης 15 cm και από 2000 σε 2500 MPa για πάχος ασφαλτικής στρώσης 20 και 25 cm (βλ. Πίνακα 5.7).

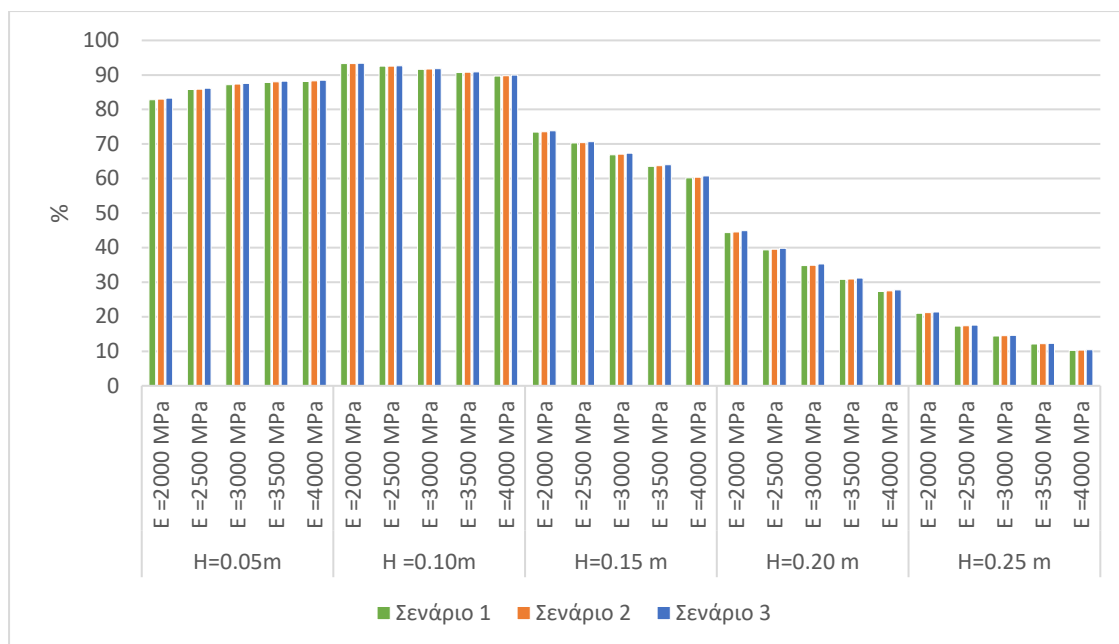
Πίνακας 5.7: Μεταβολή ποσοστών ρηγμάτων ασφαλτικής στρώσης λόγω αύξησης του μέτρου δυσκαμψίας της

ΣΕΝΑΡΙΟ 1					
AC Bottom-Up Cracking (%) [Μεταβολή λόγω αύξησης μέτρου δυσκαμψίας ασφ. στρώσης]	H=0.05 m	H =0.10 m	H=0.15 m	H=0.20 m	H=0.25 m
E =2000 MPa					
E =2500 MPa	2.95	-0.73	-3.18	-5.07	-3.71
E =3000 MPa	1.4	-0.85	-3.35	-4.55	-2.93
E =3500 MPa	0.68	-0.95	-3.36	-3.98	-2.3
E =4000 MPa	0.27	-1	-3.33	-3.46	-1.84

ΣΕΝΑΡΙΟ 2					
AC Bottom-Up Cracking (%) [Μεταβολή λόγω αύξησης μέτρου δυσκαμψίας ασφ. στρώσης]	H=0.05 m	H =0.10 m	H=0.15 m	H=0.20 m	H=0.25 m
E =2000 MPa					
E =2500 MPa	2.92	-0.72	-3.17	-5.08	-3.72
E =3000 MPa	1.4	-0.85	-3.33	-4.56	-2.94
E =3500 MPa	0.67	-0.94	-3.36	-3.99	-2.32
E =4000 MPa	0.27	-1	-3.32	-3.46	-1.84

ΣΕΝΑΡΙΟ 3					
AC Bottom-Up Cracking (%) [Μεταβολή λόγω αύξησης μέτρου δυσκαμψίας ασφ. στρώσης]	H=0.05 m	H =0.10 m	H=0.15 m	H=0.20 m	H=0.25 m
E =2000 MPa					
E =2500 MPa	2.87	-0.71	-3.15	-5.09	-3.75
E =3000 MPa	1.38	-0.84	-3.32	-4.57	-2.97
E =3500 MPa	0.65	-0.93	-3.34	-4.01	-2.34
E =4000 MPa	0.27	-0.99	-3.31	-3.48	-1.86

Κλείνοντας, τονίζεται, πως όσα αναφέρθηκαν ανωτέρω επαναλαμβάνονται ως παρατηρήσεις για όλα τα σενάρια της μελέτης, όπως φαίνεται συγκεντρωτικά και στο διάγραμμα της Εικόνας 5.3.



Εικόνα 5.3: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ποσοστών ρηγμάτωσης ασφαλτικής στρώσης

Ο έλεγχος της μεθόδου του λογισμικού ικανοποιείται για όλα τα μέτρα δυσκαμψίας όταν το πάχος της ασφαλτικής στρώσης είναι 25 cm.

5.3.4 Αυλάκωση ασφαλτικής στρώσης (AC rutting)

Σχετικά με την αυλάκωση της ασφαλτικής στρώσης που πρόκειται για μια παραμένουσα παραμόρφωση στην επιφάνεια του οδοστρώματος, που επηρεάζει την ποιότητα κύλισης του οχήματος αλλά και την ασφάλεια, η μέγιστη τιμή που ορίζει το λογισμικό, σύμφωνα με το πρόγραμμα NCRRP 1-37A, για επιτυχή ολοκλήρωση της ανάλυσης είναι τα 6.35 mm. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για όλα τα σενάρια απεικονίζονται στον Πίνακα 5.8, όπου με κόκκινο χρώμα επισημαίνονται οι τιμές που δεν ικανοποιούν την μέγιστη τιμή της χρησιμοποιούμενης μεθόδου ενώ με πράσινο όσες την ικανοποιούν.

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα ελέγχου αυλάκωσης ασφαλτικής στρώσης

ΣΕΝΑΡΙΟ 1					
AC Rutting (mm) [3D-MOVE Distress target: 6.35 mm]	E =2000 MPa	E =2500 MPa	E =3000 MPa	E =3500 MPa	E =4000 MPa
H=0.05 m	17	14.67	13.18	12.05	11.16
H =0.10 m	15.79	12.57	10.5	9.03	7.94
H=0.15 m	13.93	10.47	8.25	6.73	5.68
H=0.20 m	12.81	9.69	7.68	6.29	5.27
H=0.25 m	11.62	8.88	7.11	5.88	4.98

ΣΕΝΑΡΙΟ 2					
AC Rutting (mm) [3D-MOVE Distress target: 6.35 mm]	E =2000 MPa	E =2500 MPa	E =3000 MPa	E =3500 MPa	E =4000 MPa
H=0.05 m	17.05	14.72	13.22	12.09	11.2
H =0.10 m	15.84	12.61	10.53	9.06	7.96
H=0.15 m	13.97	10.5	8.28	6.75	5.69
H=0.20 m	12.85	9.72	7.7	6.31	5.29
H=0.25 m	11.66	8.91	7.13	5.9	5

ΣΕΝΑΡΙΟ 3					
AC Rutting (mm) [3D-MOVE Distress target: 6.35 mm]	E =2000 MPa	E =2500 MPa	E =3000 MPa	E =3500 MPa	E =4000 MPa
H=0.05 m	17.15	14.8	13.3	12.16	11.26
H =0.10 m	15.93	12.69	10.59	9.11	8.01
H=0.15 m	14.06	10.56	8.33	6.79	5.73
H=0.20 m	12.92	9.77	7.75	6.35	5.32
H=0.25 m	11.73	8.96	7.17	5.93	5.03

Στην αυλάκωση της ασφαλτικής στρώσης, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες φθορές που εξετάζονται, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει τόσο το πάχος της ασφαλτικής στρώσης όσο και το μέτρο δυσκαμψίας της. Στους Πίνακες 5.9 και 5.10 δίνονται οι μεταβολές στο βάθος της αυλάκωσης ανάλογα με το πάχος και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης αντίστοιχα.

Πίνακας 5.9: Μεταβολή βάθους αυλάκωσης ασφατικής στρώσης λόγω αύξησης του πάχους της ασφατικής στρώσης

ΣΕΝΑΡΙΟ 1					
AC Rutting (mm) [Μεταβολή λόγω αύξησης πάχους ασφ. στρώσης]	E =2000 MPa	E =2500 MPa	E =3000 MPa	E =3500 MPa	E =4000 MPa
H=0.05 m					
H =0.10 m	-1.21	-2.1	-2.68	-3.02	-3.22
H=0.15 m	-1.86	-2.1	-2.25	-2.3	-2.26
H=0.20 m	-1.12	-0.78	-0.57	-0.44	-0.41
H=0.25 m	-1.19	-0.81	-0.57	-0.41	-0.29

ΣΕΝΑΡΙΟ 2					
AC Rutting (mm) [Μεταβολή λόγω αύξησης πάχους ασφ. στρώσης]	E =2000 MPa	E =2500 MPa	E =3000 MPa	E =3500 MPa	E =4000 MPa
H=0.05 m					
H =0.10 m	-1.21	-2.11	-2.69	-3.03	-3.24
H=0.15 m	-1.87	-2.11	-2.25	-2.31	-2.27
H=0.20 m	-1.12	-0.78	-0.58	-0.44	-0.4
H=0.25 m	-1.19	-0.81	-0.57	-0.41	-0.29

ΣΕΝΑΡΙΟ 3					
AC Rutting (mm) [Μεταβολή λόγω αύξησης πάχους ασφ. στρώσης]	E =2000 MPa	E =2500 MPa	E =3000 MPa	E =3500 MPa	E =4000 MPa
H=0.05 m					
H =0.10 m	-1.22	-2.11	-2.71	-3.05	-3.25
H=0.15 m	-1.87	-2.13	-2.26	-2.32	-2.28
H=0.20 m	-1.14	-0.79	-0.58	-0.44	-0.41
H=0.25 m	-1.19	-0.81	-0.58	-0.42	-0.29

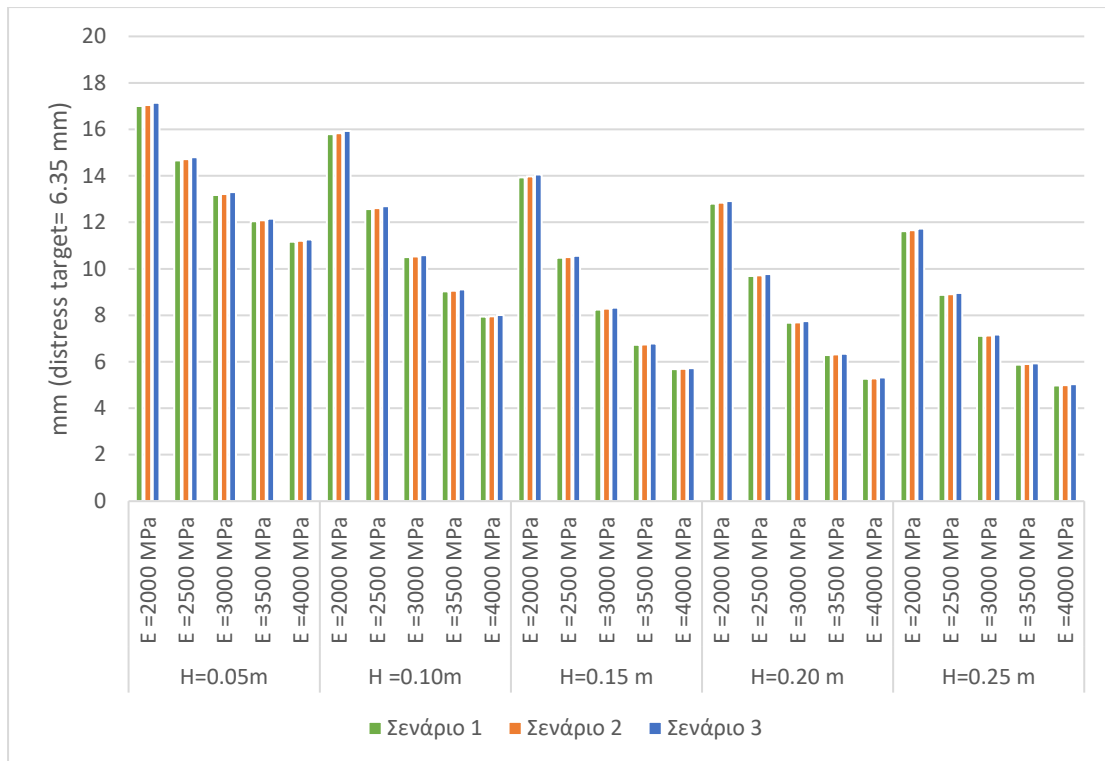
Πίνακας 5.10: Μεταβολή βάθους αυλάκωσης ασφαλτικής στρώσης λόγω αύξησης του μέτρου δυσκαμψίας της

ΣΕΝΑΡΙΟ 1					
AC Rutting (mm) [Μεταβολή λόγω αύξησης μέτρου δυσκαμψίας ασφ. στρώσης]	H=0.05 m	H =0.10 m	H=0.15 m	H=0.20 m	H=0.25 m
E =2000 MPa					
E =2500 MPa	-2.33	-3.22	-3.46	-3.12	-2.74
E =3000 MPa	-1.49	-2.07	-2.22	-2.01	-1.77
E =3500 MPa	-1.13	-1.47	-1.52	-1.39	-1.23
E =4000 MPa	-0.89	-1.09	-1.05	-1.02	-0.9

ΣΕΝΑΡΙΟ 2					
AC Rutting (mm) [Μεταβολή λόγω αύξησης μέτρου δυσκαμψίας ασφ. στρώσης]	H=0.05 m	H =0.10 m	H=0.15 m	H=0.20 m	H=0.25 m
E =2000 MPa					
E =2500 MPa	-2.33	-3.23	-3.47	-3.13	-2.75
E =3000 MPa	-1.5	-2.08	-2.22	-2.02	-1.78
E =3500 MPa	-1.13	-1.47	-1.53	-1.39	-1.23
E =4000 MPa	-0.89	-1.1	-1.06	-1.02	-0.9

ΣΕΝΑΡΙΟ 3					
AC Rutting (mm) [Μεταβολή λόγω αύξησης μέτρου δυσκαμψίας ασφ. στρώσης]	H=0.05 m	H =0.10 m	H=0.15 m	H=0.20 m	H=0.25 m
E =2000 MPa					
E =2500 MPa	-2.35	-3.24	-3.5	-3.15	-2.77
E =3000 MPa	-1.5	-2.1	-2.23	-2.02	-1.79
E =3500 MPa	-1.14	-1.48	-1.54	-1.4	-1.24
E =4000 MPa	-0.9	-1.1	-1.06	-1.03	-0.9

Επισημαίνεται πως η μεγαλύτερη διαφορά, που προκύπτει μεταξύ των διαφορετικών σεναρίων στο βάθος της αυλάκωσης, αφορά τα σενάρια 1 και 3 (βλ. Πίνακα 5.8 και Εικόνα 5.4), για τη διατομή με πάχος ασφαλτικής στρώσης 5 cm και μέτρο δυσκαμψίας 2000 MPa και είναι 0.15 mm, οπότε η σύγκριση μεταξύ τους καθίσταται ανούσια.



Εικόνα 5.4: Συγκεντρωτικό διάγραμμα χλυστών αυλάκωσης ασφαλτικής στρώσης

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι μόνο στον συγκεκριμένο τύπο φθοράς οι τιμές που έγιναν αποδεκτές (βλ. Πίνακα 5.8) όντας μικρότερες από την τιμή που όριζε η μέθοδος του λογισμικού ως μέγιστη αποδεκτή, αποτύγχαναν στον έλεγχο αξιοπιστίας, αφού τα ποσοστά της ανάλυσης ήταν μικρότερα από το ελάχιστο αποδεκτό της μεθόδου (90%), γεγονός που σε έναν πιθανοτικό σχεδιασμό θα είχε ιδιαίτερη σημασία ανάλογα με την κατηγορία της οδού για την οποία θα προοριζόταν το οδόστρωμα (όπως για παράδειγμα για αυτοκινητόδρομο σε αστική ή υπεραστική περιοχή), αφού δεν θα πληρούσε τα προτεινόμενα επίπεδα αξιοπιστίας.

5.3.5 Παραμένονσα παραμόρφωση στρώσης βάσης (Base rutting)

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.11 των αποτελεσμάτων, αποτελεί τον μοναδικό τύπο φθοράς, στον οποίο όλες οι υπό μελέτη διατομές ικανοποιούσαν τον έλεγχο επάρκειας της μεθόδου του λογισμικού με μέγιστη οριζόμενη τιμή τα 7.62 mm.

Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα ελέγχου παραμένουσας παραμόρφωσης στρώσης βάσης

ΣΕΝΑΡΙΟ 1 2 3					
Base Rutting (mm) [3D-MOVE Distress target: 7.62 mm]	E =2000 MPa	E =2500 MPa	E =3000 MPa	E =3500 MPa	E =4000 MPa
H=0.05 m	6.08	5.85	5.65	5.48	5.33
H =0.10 m	3.77	3.55	3.37	3.22	3.09
H=0.15 m	2.62	2.42	2.27	2.13	2.02
H=0.20 m	1.94	1.77	1.64	1.53	1.44
H=0.25 m	1.5	1.36	1.24	1.15	1.08

Τα αποτελέσματα ήταν κοινά μεταξύ των τριών σεναρίων με τις υπάρχουσες διαφορές να αφορούν το τρίτο δεκαδικό ψηφίο των υπολογισμών, οπότε θεωρήθηκαν άνευ σημασίας. Όπως και σε άλλους τύπους φθοράς, η αύξηση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης επιδρά περισσότερο στη μείωση της παραμένουσας παραμόρφωσης σε σχέση με το μέτρο δυσκαμψίας. Στους Πίνακες 5.12 και 5.13 δίνονται οι σχετικές μεταβολές της παραμένουσας παραμόρφωσης ανάλογα με το πάχος και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης αντίστοιχα.

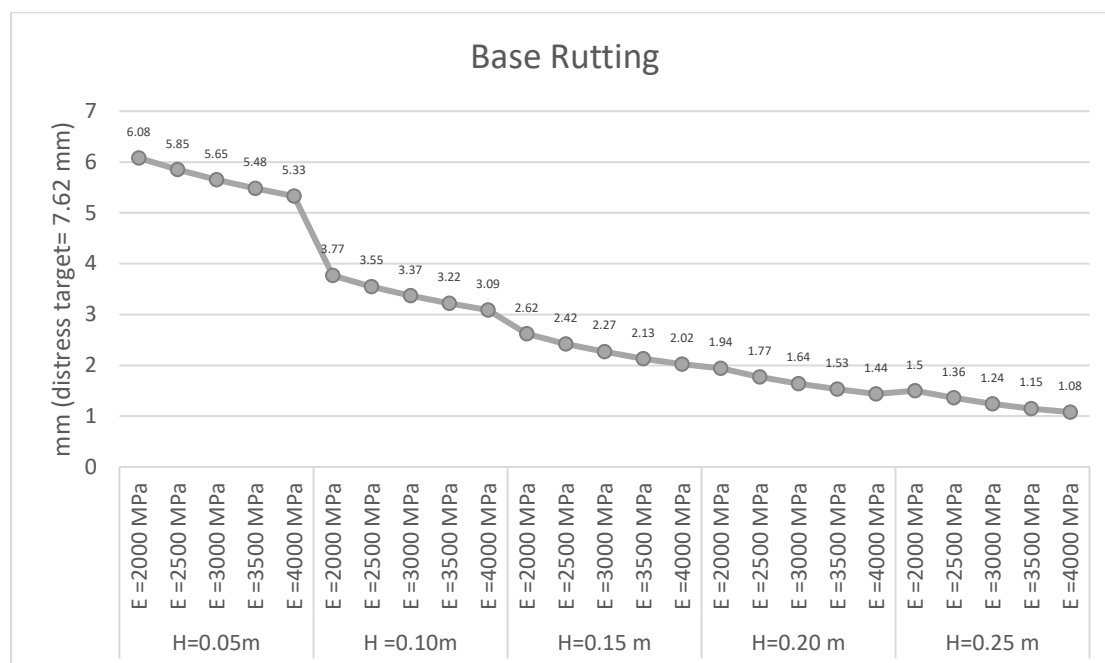
Πίνακας 5.12: Μεταβολή παραμένουσας παραμόρφωσης στρώσης βάσης λόγω αύξησης του πάχους της ασφαλτικής στρώσης

ΣΕΝΑΡΙΟ 1 2 3					
Base Rutting (mm) [Μεταβολή λόγω αύξησης πάχους ασφ. στρώσης]	E =2000 MPa	E =2500 MPa	E =3000 MPa	E =3500 MPa	E =4000 MPa
H=0.05 m					
H =0.10 m	-2.31	-2.3	-2.28	-2.26	-2.24
H=0.15 m	-1.15	-1.13	-1.1	-1.09	-1.07
H=0.20 m	-0.68	-0.65	-0.63	-0.6	-0.58
H=0.25 m	-0.44	-0.41	-0.4	-0.38	-0.36

Πίνακας 5.13: Μεταβολή παραμένουσας παραμόρφωσης στρώσης βάσης λόγω αύξησης του μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης

ΣΕΝΑΡΙΟ 1 2 3					
Base Rutting (mm) [Μεταβολή λόγω αύξησης μέτρου δυσκαμψίας ασφ. στρώσης]	H=0.05 m	H =0.10 m	H=0.15 m	H=0.20 m	H=0.25 m
E =2000 MPa					
E =2500 MPa	-0.23	-0.22	-0.2	-0.17	-0.14
E =3000 MPa	-0.2	-0.18	-0.15	-0.13	-0.12
E =3500 MPa	-0.17	-0.15	-0.14	-0.11	-0.09
E =4000 MPa	-0.15	-0.13	-0.11	-0.09	-0.07

Μεγαλύτερη μεταβολή της παραμόρφωσης της στρώσης βάσης εντοπίζεται σε σχέση με το πάχος της ασφαλικής στρώσης κατά την αύξησή του από 5 σε 10 cm, ενώ σε σχέση με το μέτρο δυσκαμψίας της κατά την αύξηση από 2000 σε 2500 MPa (βλ. Εικόνα 5.5).



Εικόνα 5.5: Συγκεντρωτικό διάγραμμα χιλιοστών παραμένουσας παραμόρφωσης στρώσης βάσης

Οι μεταβολές φθίνουν κατά την αύξηση των τιμών των μηχανικών χαρακτηριστικών της ασφαλικής στρώσης.

5.3.6 Παραμένουσα παραμόρφωση στρώσης έδρασης (Subgrade rutting)

Η παραμένουσα κατακόρυφη παραμόρφωση της στρώσης έδρασης μαζί με την κόπωση του ασφαλτομίγματος, που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4.6, συνιστούν τις κρισιμότερες μορφές αστοχιών, καθώς συμβαίνουν στις κρίσιμες θέσεις του οδοστρώματος. Στον Πίνακα 5.14 δίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης για το συγκεκριμένο τύπο φθοράς για όλα τα σενάρια. Με κόκκινο χρώμα αναπαριστώνται οι τιμές που δεν ικανοποιούν τον έλεγχο μέγιστης τιμής της μεθόδου, που ορίζεται από το λογισμικό στα 5.08 mm, ενώ με πράσινο οι αποδεκτές τιμές.

Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα ελέγχου παραμένουσας παραμόρφωσης στρώσης έδρασης

ΣΕΝΑΡΙΟ 1					
Subgrade Rutting (mm) [3D-MOVE Distress target: 5.08 mm]	E =2000 MPa	E =2500 MPa	E =3000 MPa	E =3500 MPa	E =4000 MPa
H=0.05 m	8.57	8.46	8.38	8.31	8.26
H =0.10 m	7.18	6.94	6.71	6.5	6.32
H=0.15 m	3.53	3.39	3.28	3.18	3.1
H=0.20 m	4.07	3.77	3.54	3.34	3.17
H=0.25 m	3.19	2.92	2.71	2.54	2.39

ΣΕΝΑΡΙΟ 2					
Subgrade Rutting (mm) [3D-MOVE Distress target: 5.08 mm]	E =2000 MPa	E =2500 MPa	E =3000 MPa	E =3500 MPa	E =4000 MPa
H=0.05 m	8.58	8.46	8.38	8.31	8.26
H =0.10 m	7.18	6.95	6.71	6.51	6.32
H=0.15 m	3.53	3.39	3.28	3.18	3.1
H=0.20 m	4.07	3.78	3.54	3.34	3.17
H=0.25 m	3.19	2.93	2.71	2.54	2.39

ΣΕΝΑΡΙΟ 3					
Subgrade Rutting (mm) [3D-MOVE Distress target: 5.08 mm]	E =2000 MPa	E =2500 MPa	E =3000 MPa	E =3500 MPa	E =4000 MPa
H=0.05 m	8.59	8.47	8.39	8.32	8.27
H=0.10 m	7.18	6.95	6.72	6.51	6.33
H=0.15 m	3.53	3.4	3.28	3.19	3.1
H=0.20 m	4.07	3.78	3.54	3.34	3.17
H=0.25 m	3.19	2.93	2.72	2.54	2.39

Ιδιαίτερη σημασία στην μείωση της παραμένουσας παραμόρφωσης της στρώσης έδρασης έχει το πάχος της ασφαλτικής στρώσης, ενώ δευτερεύοντα ρόλο παίζει η επιλογή του μέτρου δυσκαμψίας της. Στους Πίνακες 5.15 και 5.16 παρουσιάζονται οι σχετικές μεταβολές στην τιμή της παραμόρφωσης, ανάλογα με το πάχος και το μέτρο δυσκαμψίας.

Πίνακας 5.15: Μεταβολή παραμένουσας παραμόρφωσης στρώσης έδρασης λόγω αύξησης του πάχους της ασφαλτικής στρώσης

ΣΕΝΑΡΙΟ 1					
Subgrade Rutting (mm) [Μεταβολή λόγω αύξησης πάχους ασφ. στρώσης]	E =2000 MPa	E =2500 MPa	E =3000 MPa	E =3500 MPa	E =4000 MPa
H=0.05 m					
H =0.10 m	-1.39	-1.52	-1.67	-1.81	-1.94
H=0.15 m	-3.65	-3.55	-3.43	-3.32	-3.22
H=0.20 m	0.54	0.38	0.26	0.16	0.07
H=0.25 m	-0.88	-0.85	-0.83	-0.8	-0.78

ΣΕΝΑΡΙΟ 2					
Subgrade Rutting (mm) [Μεταβολή λόγω αύξησης πάχους ασφ. στρώσης]	E =2000 MPa	E =2500 MPa	E =3000 MPa	E =3500 MPa	E =4000 MPa
H=0.05 m					
H =0.10 m	-1.4	-1.51	-1.67	-1.8	-1.94
H=0.15 m	-3.65	-3.56	-3.43	-3.33	-3.22
H=0.20 m	0.54	0.39	0.26	0.16	0.07
H=0.25 m	-0.88	-0.85	-0.83	-0.8	-0.78

ΣΕΝΑΡΙΟ 3					
Subgrade Rutting (mm) [Μεταβολή λόγω αύξησης πάχους ασφ. στρώσης]	E =2000 MPa	E =2500 MPa	E =3000 MPa	E =3500 MPa	E =4000 MPa
H=0.05 m					
H =0.10 m	-1.41	-1.52	-1.67	-1.81	-1.94
H=0.15 m	-3.65	-3.55	-3.44	-3.32	-3.23
H=0.20 m	0.54	0.38	0.26	0.15	0.07
H=0.25 m	-0.88	-0.85	-0.82	-0.8	-0.78

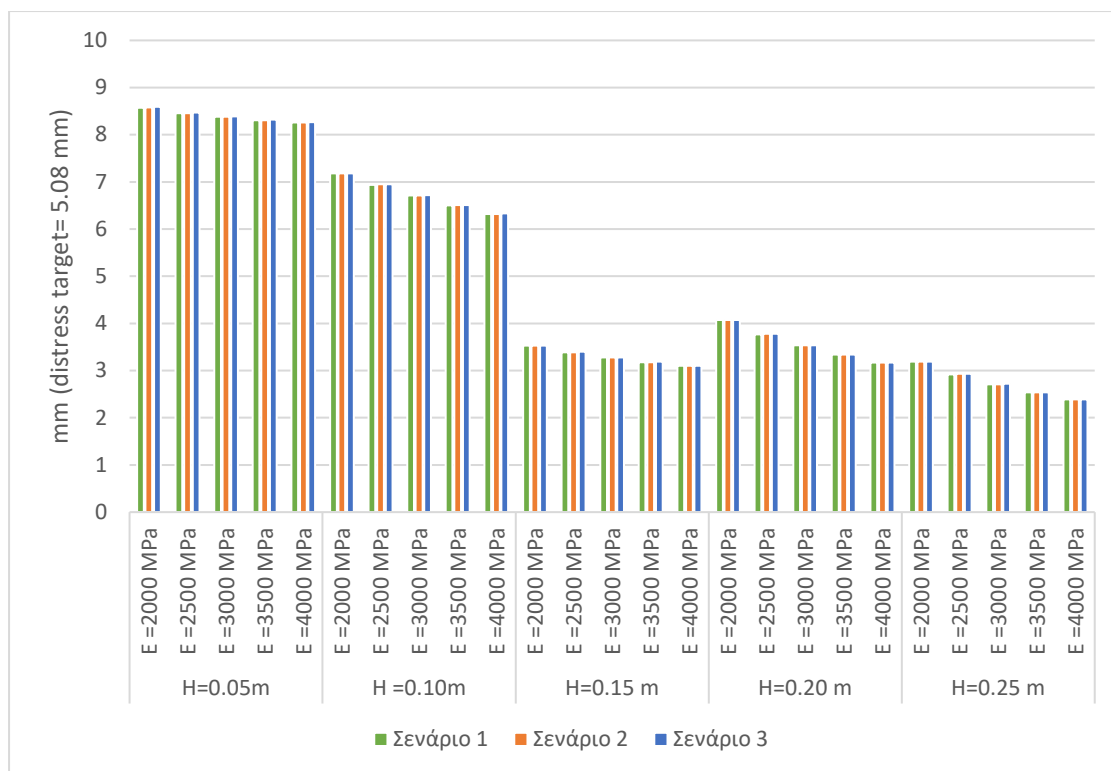
Πίνακας 5.16: Μεταβολή παραμένουσας παραμόρφωσης στρώσης έδρασης λόγω αύξησης του μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης

ΣΕΝΑΡΙΟ 1					
Subgrade Rutting (mm) [Μεταβολή λόγω αύξησης μέτρου δυσκαμψίας ασφ. στρώσης]	H=0.05 m	H =0.10 m	H=0.15 m	H=0.20 m	H=0.25 m
E =2000 MPa					
E =2500 MPa	-0.11	-0.24	-0.14	-0.3	-0.27
E =3000 MPa	-0.08	-0.23	-0.11	-0.23	-0.21
E =3500 MPa	-0.07	-0.21	-0.1	-0.2	-0.17
E =4000 MPa	-0.05	-0.18	-0.08	-0.17	-0.15

ΣΕΝΑΡΙΟ 2					
Subgrade Rutting (mm) [Μεταβολή λόγω αύξησης μέτρου δυσκαμψίας ασφ. στρώσης]	H=0.05 m	H =0.10 m	H=0.15 m	H=0.20 m	H=0.25 m
E =2000 MPa					
E =2500 MPa	-0.12	-0.23	-0.14	-0.29	-0.26
E =3000 MPa	-0.08	-0.24	-0.11	-0.24	-0.22
E =3500 MPa	-0.07	-0.2	-0.1	-0.2	-0.17
E =4000 MPa	-0.05	-0.19	-0.08	-0.17	-0.15

ΣΕΝΑΡΙΟ 3					
Subgrade Rutting (mm) [Μεταβολή λόγω αύξησης μέτρου δυσκαμψίας ασφ. στρώσης]	H=0.05 m	H =0.10 m	H=0.15 m	H=0.20 m	H=0.25 m
E =2000 MPa					
E =2500 MPa	-0.12	-0.23	-0.13	-0.29	-0.26
E =3000 MPa	-0.08	-0.23	-0.12	-0.24	-0.21
E =3500 MPa	-0.07	-0.21	-0.09	-0.2	-0.18
E =4000 MPa	-0.05	-0.18	-0.09	-0.17	-0.15

Η αύξηση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης από 15 σε 20 cm επιφέρει αύξηση των παραμορφώσεων για το συγκεκριμένο τύπο φθοράς. Για όλα τα σενάρια, μεγαλύτερη μεταβολή της παραμόρφωσης της στρώσης έδρασης εντοπίζεται σε σχέση με το πάχος της ασφαλτικής στρώσης κατά την αύξησή του από 10 σε 15 cm, ενώ σε σχέση με το μέτρο δυσκαμψίας της κατά την αύξηση από 2000 σε 2500 MPa. Στο ραβδόγραμμα της Εικόνας 5.6 απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι παραπάνω παρατηρήσεις.



Εικόνα 5.6: Συγκεντρωτικό διάγραμμα χιλιοστών παραμένουσας παραμόρφωσης στρώσης έδρασης

Παρά το χαμηλό μέτρο δυσκαμψίας της (80 MPa) η στρώση έδρασης πληροί τους ελέγχους της μεθόδου του λογισμικού για πάχη ασφαλτικής στρώσης από 15 cm και άνω και για κάθε μέτρο δυσκαμψίας. Αυτό οφείλεται στην απομείωση των τάσεων από τις υπόλοιπες στρώσεις του οδοστρώματος και ιδιαίτερα από την ασφαλτική.

6. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

6.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό θα πραγματοποιηθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν για τα διαφορετικά σενάρια που έλαβε υπόψη της η παρούσα μελέτη (Βλ. Κεφάλαιο 4.4.3). Ήδη από το Κεφάλαιο 5.3 και την παράθεση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης είναι εμφανές ότι οι διαφορές μεταξύ των τριών σεναρίων όσον αφορά τις εξεταζόμενες φθορές είναι πολύ μικρές και σε κάποιες περιπτώσεις (top-down cracking) μηδενικές. Στον παραδοσιακό σχεδιασμό οδοστρωμάτων οι φθορές και αστοχίες που μελετώνται κυρίως είναι αυτές που συμβαίνουν στα κρίσιμα σημεία απόκρισης του οδοστρώματος και συγκεκριμένα στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων και στην κορυφή της στρώσης έδρασης. Η ρηγμάτωση από κάτω προς τα πάνω για την ασφαλική στρώση και η παραμένουσα παραμόρφωση για την στρώση έδρασης αποτελούν τους σημαντικότερους τύπους φθορών και λαμβάνονται ιδιαίτερα υπόψιν κατά τη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων. Για το λόγο αυτό η συγκριτική αξιολόγηση των τριών σεναρίων θα γίνει με βάση τα αποτελέσματα αυτών των δύο τύπων αστοχίας.

6.2 Σύγκριση σεναρίων 1 και 2

Το Σενάριο 1, όπως έχει αναφερθεί, δεν περιλαμβάνει στην κυκλοφοριακή θεώρηση τα επιβατικά οχήματα, αφού, σύμφωνα με τις αρχές σχεδιασμού που ισχύουν σήμερα, οι διελεύσεις τους έχουν πολύ χαμηλή επίδραση στην κατάσταση του οδοστρώματος. Οπότε, το Σενάριο 1 εξετάζει μόνο την επιβάρυνση που προκαλούν τα βαρέα οχήματα. Αντίθετα, το Σενάριο 2 λαμβάνει υπόψη τόσο τα βαρέα οχήματα όσο και τα επιβατικά οχήματα θεωρώντας τα όλα ως θερμικά. Στους Πίνακες 6.1 και 6.2 παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ των σεναρίων για τις κρίσιμες κατηγορίες φθοράς.

Πίνακας 6.1: Σύγκριση σεναρίων 1 και 2 ως προς τη ρηγμάτωση της ασφαλτικής στρώσης

Χαρακτηριστικά Ασφαλτικής Στρώσης		AC Bottom Up Cracking			
Μέτρο Δυσκαμψίας Α.Σ.	Πάχος Α.Σ.	Σενάριο 1 (%)	Σενάριο 2 (%)	Μεταβολή	Ποσοστιαία Μεταβολή (%)
E=2000MPa	h=0.05m	82.83	83	0.17	0.21
	h=0.10m	93.25	93.3	0.05	0.05
	h=0.15m	73.45	73.59	0.14	0.19
	h=0.20m	44.4	44.58	0.18	0.41
	h=0.25m	21.04	21.15	0.11	0.52
E=2500MPa	h=0.05m	85.78	85.92	0.14	0.16
	h=0.10m	92.52	92.58	0.06	0.06
	h=0.15m	70.27	70.42	0.15	0.21
	h=0.20m	39.33	39.5	0.17	0.43
	h=0.25m	17.33	17.43	0.1	0.58
E=3000MPa	h=0.05m	87.18	87.32	0.14	0.16
	h=0.10m	91.67	91.73	0.06	0.07
	h=0.15m	66.92	67.09	0.17	0.25
	h=0.20m	34.78	34.94	0.16	0.46
	h=0.25m	14.4	14.49	0.09	0.62
E=3500MPa	h=0.05m	87.86	87.99	0.13	0.15
	h=0.10m	90.72	90.79	0.07	0.08
	h=0.15m	63.56	63.73	0.17	0.27
	h=0.20m	30.8	30.95	0.15	0.49
	h=0.25m	12.1	12.17	0.07	0.58
E=4000MPa	h=0.05m	88.13	88.26	0.13	0.15
	h=0.10m	89.72	89.79	0.07	0.08
	h=0.15m	60.23	60.41	0.18	0.30
	h=0.20m	27.34	27.49	0.15	0.55
	h=0.25m	10.26	10.33	0.07	0.68
Μέση Τιμή				0.12	0.31
Τυπική απόκλιση				0.04	0.20
Διακύμανση				0.00	0.04

Πίνακας 6.2: Σύγκριση σεναρίων 1 και 2 ως προς την παραμένουσα παραμόρφωση της στρώσης έδρασης

Χαρακτηριστικά Ασφαλτικής Στρώσης		Subgrade Rutting			
Μέτρο Δυσκαμψίας Α.Σ.	Πάχος Α.Σ.	Σενάριο 1 (mm)	Σενάριο 2 (mm)	Μεταβολή	Ποσοστιαία Μεταβολή (%)
E=2000MPa	h=0.05m	8.57	8.58	0.01	0.12
	h=0.10m	7.18	7.18	0	0.00
	h=0.15m	3.53	3.53	0	0.00
	h=0.20m	4.07	4.07	0	0.00
	h=0.25m	3.19	3.19	0	0.00
E=2500MPa	h=0.05m	8.46	8.46	0	0.00
	h=0.10m	6.94	6.95	0.01	0.14
	h=0.15m	3.39	3.39	0	0.00
	h=0.20m	3.77	3.78	0.01	0.27
	h=0.25m	2.92	2.93	0.01	0.34
E=3000MPa	h=0.05m	8.38	8.38	0	0.00
	h=0.10m	6.71	6.71	0	0.00
	h=0.15m	3.28	3.28	0	0.00
	h=0.20m	3.54	3.54	0	0.00
	h=0.25m	2.71	2.71	0	0.00
E=3500MPa	h=0.05m	8.31	8.31	0	0.00
	h=0.10m	6.5	6.51	0.01	0.15
	h=0.15m	3.18	3.18	0	0.00
	h=0.20m	3.34	3.34	0	0.00
	h=0.25m	2.54	2.54	0	0.00
E=4000MPa	h=0.05m	8.26	8.26	0	0.00
	h=0.10m	6.32	6.32	0	0.00
	h=0.15m	3.1	3.1	0	0.00
	h=0.20m	3.17	3.17	0	0.00
	h=0.25m	2.39	2.39	0	0.00
			Μέση Τιμή	0.00	0.04
			Τυπική απόκλιση	0.00	0.09
			Διακύμανση	0.00	0.01

Είναι φανερό πως και για τις δύο κατηγορίες φθορών οι ποσοτικές μεταβολές στην καταπόνηση του οδοστρώματος, από την προσθήκη των θερμικών επιβατικών οχημάτων στις διελεύσεις τυπικού άξονα, είναι σχεδόν μηδενικές. Γεγονός που ισχύει για όλα τα εξεταζόμενα πάχη και μέτρα δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης. Η μέση τιμή των μεταβολών, όσον αφορά τη ρηγμάτωση της ασφαλτικής στρώσης,

είναι +0.12% και η μέση ποσοστιαία μεταβολή είναι +0.31%, αμφότερες με πολύ χαμηλή έως μηδενική διακύμανση στο εξεταζόμενο δείγμα.

Σχετικά με τη στρώση έδρασης οι μεταβολές είναι ακόμα πιο δύσκολα παρατηρήσιμες, με μέγιστη τιμή μεταβολής στην παραμένουσα παραμόρφωση τα 0.01 mm, που οδήγησε σε μέση τιμή της μεταβολής στο δείγμα πρακτικά μηδενική. Επομένως, η προσμέτρηση των θερμικών επιβατικών οχημάτων στην κυκλοφοριακή θεώρηση με βάση τα δεδομένα των αποτελεσμάτων κρίνεται άνευ σημασίας και επιβεβαιώνει την πάγια πρακτική του σχεδιασμού των οδοστρωμάτων που δεν τα λαμβάνει υπόψιν.

6.3 Σύγκριση σεναρίων 1 και 3

Στην παρούσα σύγκριση επιδιώκεται να φανεί αν ο εξηλεκτρισμός των επιβατικών οχημάτων και η συνακόλουθη αύξηση του βάρους τους επηρεάζει τα αποτελέσματα των επιβαλλόμενων φθορών σε τέτοιο βαθμό που να χρειαστεί πλέον να λαμβάνονται υπόψιν οι διελεύσεις τους κατά το σχεδιασμό. Γι' αυτό το λόγο, συγκρίνεται το Σενάριο 1 που μελετά τις διελεύσεις μόνο των βαρέων οχημάτων με το Σενάριο 3 που μελετά τις διελεύσεις βαρέων και επιβατικών οχημάτων, θεωρώντας ότι τα επιβατικά είναι όλα ηλεκτρικά. Στους Πίνακες 6.3 και 6.4 απεικονίζονται οι διαφορές μεταξύ των σεναρίων για τις κρίσιμες κατηγορίες φθοράς.

Πίνακας 6.3: Σύγκριση σεναρίων 1 και 3 ως προς τη ρηγμάτωση της ασφαλτικής στρώσης

Χαρακτηριστικά Ασφαλτικής Στρώσης		AC Bottom Up Cracking			
Μέτρο Δυσκαμψίας Α.Σ.	Πάχος Α.Σ.	Σενάριο 1 (%)	Σενάριο 3 (%)	Μεταβολή	Ποσοστιαία Μεταβολή (%)
E=2000MPa	h=0.05m	82.83	83.31	0.48	0.58
	h=0.10m	93.25	93.39	0.14	0.15
	h=0.15m	73.45	73.85	0.4	0.54
	h=0.20m	44.4	44.9	0.5	1.13
	h=0.25m	21.04	21.37	0.33	1.57
E=2500MPa	h=0.05m	85.78	86.18	0.4	0.47
	h=0.10m	92.52	92.68	0.16	0.17
	h=0.15m	70.27	70.7	0.43	0.61
	h=0.20m	39.33	39.81	0.48	1.22
	h=0.25m	17.33	17.62	0.29	1.67
E=3000MPa	h=0.05m	87.18	87.56	0.38	0.44
	h=0.10m	91.67	91.84	0.17	0.19
	h=0.15m	66.92	67.38	0.46	0.69
	h=0.20m	34.78	35.24	0.46	1.32
	h=0.25m	14.4	14.65	0.25	1.74
E=3500MPa	h=0.05m	87.86	88.21	0.35	0.40
	h=0.10m	90.72	90.91	0.19	0.21
	h=0.15m	63.56	64.04	0.48	0.76
	h=0.20m	30.8	31.23	0.43	1.40
	h=0.25m	12.1	12.31	0.21	1.74
E=4000MPa	h=0.05m	88.13	88.48	0.35	0.40
	h=0.10m	89.72	89.92	0.2	0.22
	h=0.15m	60.23	60.73	0.5	0.83
	h=0.20m	27.34	27.75	0.41	1.50
	h=0.25m	10.26	10.45	0.19	1.85
Μέση Τιμή				0.35	0.87
Τυπική απόκλιση				0.12	0.58
Διακύμανση				0.02	0.34

Πίνακας 6.4: Σύγκριση σεναρίων 1 και 3 ως προς την παραμένουσα παραμόρφωση της στρώσης έδρασης

Χαρακτηριστικά Ασφαλτικής Στρώσης		Subgrade Rutting			
Μέτρο Δυσκαμψίας Α.Σ.	Πάχος Α.Σ.	Σενάριο 1 (mm)	Σενάριο 3 (mm)	Μεταβολή	Ποσοστιαία Μεταβολή (%)
E=2000MPa	h=0.05m	8.57	8.59	0.02	0.23
	h=0.10m	7.18	7.18	0	0.00
	h=0.15m	3.53	3.53	0	0.00
	h=0.20m	4.07	4.07	0	0.00
	h=0.25m	3.19	3.19	0	0.00
E=2500MPa	h=0.05m	8.46	8.47	0.01	0.12
	h=0.10m	6.94	6.95	0.01	0.14
	h=0.15m	3.39	3.4	0.01	0.29
	h=0.20m	3.77	3.78	0.01	0.27
	h=0.25m	2.92	2.93	0.01	0.34
E=3000MPa	h=0.05m	8.38	8.39	0.01	0.12
	h=0.10m	6.71	6.72	0.01	0.15
	h=0.15m	3.28	3.28	0	0.00
	h=0.20m	3.54	3.54	0	0.00
	h=0.25m	2.71	2.72	0.01	0.37
E=3500MPa	h=0.05m	8.31	8.32	0.01	0.12
	h=0.10m	6.5	6.51	0.01	0.15
	h=0.15m	3.18	3.19	0.01	0.31
	h=0.20m	3.34	3.34	0	0.00
	h=0.25m	2.54	2.54	0	0.00
E=4000MPa	h=0.05m	8.26	8.27	0.01	0.12
	h=0.10m	6.32	6.33	0.01	0.16
	h=0.15m	3.1	3.1	0	0.00
	h=0.20m	3.17	3.17	0	0.00
	h=0.25m	2.39	2.39	0	0.00
Μέση Τιμή				0.01	0.12
Τυπική απόκλιση				0.01	0.13
Διακύμανση				0.00	0.02

Στη ρηγμάτωση της ασφαλτικής στρώσης παρατηρούνται μεγαλύτερες μεταβολές σε σχέση με τα αποτελέσματα της σύγκρισης των Σεναρίων 1-2. Ωστόσο, με μέση τιμή μεταβολής +0.35% και μέση τιμή ποσοστιαίας μεταβολής μικρότερη από 1%, με παράλληλη πολύ χαμηλή διακύμανση των τιμών στο δείγμα, οι διαφορές κρίνονται πολύ μικρές και η οποιαδήποτε αύξηση υπάρχει ασήμαντη.

Οι μεταβολές όσον αφορά την παραμένουσα παραμόρφωση της στρώσης έδρασης, αν και γενικά δείχνουν μια τάση αύξησης, πάλι στα επίπεδα που βρίσκονται με μέση τιμή μεταβολής τα 0.01 mm και μέγιστη τα 0.02 mm σε μία μόλις περίπτωση διατομής, κρίνονται για το αντικείμενο της μελέτης, δηλαδή την επιβάρυνση των οδοστρωμάτων, ως ανύπαρκτες. Ιδιαίτερα μάλιστα και λόγω της χαμηλής διακύμανσης των τιμών τους.

Εν κατακλείδι, η προσμέτρηση των επιβατικών οχημάτων θεωρώντας τα όλα ως ηλεκτρικά, αν και παρουσιάζει μια ελαφρά αύξηση στις μεταβολές σε σχέση με την περίπτωση σύγκρισης των Σεναρίων 1-2, εξακολουθεί να είναι ελάχιστη και να μη θεωρείται σημαντική. Άρα, με βάση τα ποσοτικά δεδομένα των παραπάνω αποτελεσμάτων ο εξηλεκτρισμός του στόλου των επιβατικών δεν αναμένεται να προκαλέσει ιδιαίτερες αλλαγές στη φθορά των οδοστρωμάτων.

6.4 Στατιστική και πρακτική σημαντικότητα

Προκειμένου να αξιολογηθεί η στατιστική σημαντικότητα ανάμεσα στις μεταβολές που παρουσιάζονται, μέσω της σύγκρισης των σεναρίων, εφαρμόστηκε ο στατιστικός έλεγχος t-test. Πρόκειται για μία παραμετρική στατιστική διαδικασία που ελέγχει τη στατιστική σημαντικότητα των μέσων όρων είτε ανεξάρτητων δειγμάτων είτε συσχετισμένων (ανά ζεύγη) δειγμάτων. Ως μηδενική υπόθεση ορίστηκε ότι οι παρατηρούμενες διαφορές δεν είναι στατιστικά σημαντικές για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=5\%$). Η μηδενική υπόθεση γίνεται αποδεκτή όταν μετά το πέρας του ελέγχου η μέθοδος επιστρέφει απόλυτη τιμή για το t μικρότερη από την τιμή για το $t_{\text{κρίσιμο}}$ (ή όταν η τιμή για την p_{value} ή αλλιώς $P_{(T \leq t)}$ διπλευρη είναι μεγαλύτερη από 0.05). Τα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου t, ανά σύγκριση σεναρίων και εξεταζόμενη φθορά, δίνονται στους Πίνακες 6.5, 6.6, 6.7 και 6.8.

Πίνακας 6.5: t-test ρηγμάτωσης ασφαλικής στρώσης για σενάρια 1-2

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών		
AC Bottom Up Cracking		
	Σενάριο 1	Σενάριο 2
Μέσος	59.0348	59.158
Διακύμανση	925.8859927	925.6721417
Μέγεθος δείγματος	25	25
Συσχέτιση Pearson	0.999998968	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	24	
t	-14.04845982	
P(T<=t) μονόπλευρη	2.24159E-13	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.71088208	
P(T<=t) δίπλευρη	4.48317E-13	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.063898562	
ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ	ΑΠΟΡΡΙΠΤΕΤΑΙ	(t >t κρίσιμο, δίπλευρο)

Πίνακας 6.6: t-test παραμένουσας παραμόρφωσης στρώσης έδρασης για σενάρια 1-2

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών		
Subgrade Rutting		
	Σενάριο 1	Σενάριο 2
Μέσος	4.95	4.952
Διακύμανση	5.168858333	5.172166667
Μέγεθος δείγματος	25	25
Συσχέτιση Pearson	0.999998439	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	24	
t	-2.449489743	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.010991499	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.71088208	
P(T<=t) δίπλευρη	0.021982997	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.063898562	
ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ	ΑΠΟΡΡΙΠΤΕΤΑΙ	(t >t κρίσιμο, δίπλευρο)

Πίνακας 6.7: t-test ρηγμάτωσης ασφαλικής στρώσης για σενάρια 1-3

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών		
AC Bottom Up Cracking		
	Σενάριο 1	Σενάριο 3
Μέσος	59.0348	59.3804
Διακύμανση	925.8859927	925.063604
Μέγεθος δείγματος	25	25
Συσχέτιση Pearson	0.999991958	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	24	
t	-14.07750013	
P(T<=t) μονόπλευρη	2.14423E-13	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.71088208	
P(T<=t) δίπλευρη	4.28847E-13	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.063898562	
ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ	ΑΠΟΡΡΙΠΤΕΤΑΙ	(t > t κρίσιμο, δίπλευρο)

Πίνακας 6.8: t-test παραμένουσας παραμόρφωσης στρώσης έδρασης για σενάρια 1-3

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών		
Subgrade Rutting		
	Σενάριο 1	Σενάριο 3
Μέσος	4.95	4.956
Διακύμανση	5.168858333	5.184508333
Μέγεθος δείγματος	25	25
Συσχέτιση Pearson	0.999997923	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	24	
t	-5.196152423	
P(T<=t) μονόπλευρη	1.26546E-05	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.71088208	
P(T<=t) δίπλευρη	2.53093E-05	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.063898562	
ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ	ΑΠΟΡΡΙΠΤΕΤΑΙ	(t > t κρίσιμο, δίπλευρο)

Προκύπτει ότι οι διαφορές μεταξύ των εξεταζόμενων σεναρίων είναι στατιστικά σημαντικές, δηλαδή δεν είναι τυχαίες. Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα του δείγματος δεν προέρχονται από κάποιο δειγματοληπτικό σφάλμα αλλά πιθανότατα αντανakλούν μια επίδραση που υφίσταται και στον πληθυσμό. Ωστόσο, η στατιστική σημαντικότητα δεν παρέχει πληροφορία για το μέγεθος της επίδρασης και για το αν

αυτή έχει βαρύτητα στην πραγματικότητα στο εκάστοτε πεδίο μελέτης. Μάλιστα, υπάρχουν περιπτώσεις όπου αποτελέσματα, με ασήμαντη επίδραση στην πραγματικότητα, μπορούν να δώσουν εξαιρετικά υψηλή στατιστική σημαντικότητα. Αυτό συμβαίνει όταν:

α) Το μέγεθος του δείγματος είναι πολύ μεγάλο, αφού σε αυτή την περίπτωση ο έλεγχος αποκτά μεγαλύτερη στατιστική ισχύ στην ανίχνευση μικρών επιδράσεων που δεν έχουν όμως σημασία από πρακτική άποψη.

β) Η μεταβλητότητα του δείγματος είναι πολύ χαμηλή ή οι τιμές της μεταβλητότητας δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών είναι αρκετά κοντά (όπως στην περίπτωση της παρούσας μελέτης, όπου οι διακυμάνσεις και οι μέσες τιμές των δειγμάτων σε κάθε έλεγχο είναι σχεδόν ίσες) και η διαφορά των αποτελεσμάτων πολύ μικρή. Τότε οι έλεγχοι υποθέσεων μπορούν να παράγουν ακριβέστερες εκτιμήσεις της επίδρασης του πληθυσμού και έτσι να ανιχνεύσουν μικροσκοπικές επιδράσεις χωρίς πρακτική σημασία (Frost, 2020).

Η στατιστική σημαντικότητα, λοιπόν, υποδηλώνει την παρουσία επαρκών στοιχείων για την ύπαρξη μιας επίδρασης, αλλά πρόκειται για έναν μαθηματικό ορισμό που δεν γνωρίζει τίποτα για τη θεματική περιοχή και την πρακτική σημαντικότητα του αποτελέσματος.

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι πέραν της εμπειρίας και της κρίσης του μελετητή (Βλ. Κεφάλαια 6.2 και 6.3) για την αξιολόγηση του μεγέθους της επίδρασης και της πρακτικής σημαντικότητας του. Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί ο συντελεστής του Cohen που ενδείκνυται για ζευγαρωτές παρατηρήσεις.

Ο συντελεστής d του Cohen αντιπροσωπεύει το μέγεθος της επίδρασης υποδεικνύοντας πόσο μεγάλο είναι το αποτέλεσμα σε σχέση με τη μεταβλητότητα των δεδομένων και υπολογίζεται από την Σχέση 6.1 (κατάλληλα τροποποιημένη για δείγματα ίδιου μεγέθους):

$$d = \frac{|M_1 - M_2|}{\sqrt{\frac{SD_1^2 + SD_2^2}{2}}} \quad (6.1)$$

Όπου:

M_i = Η μέση τιμή του δείγματος i

SD_i = Η τυπική απόκλιση του δείγματος i

Η ερμηνεία του συντελεστή d γίνεται με βάση την προτεινόμενη κλίμακα του Πίνακα 6.9.

Πίνακας 6.9: Κλίμακα ερμηνείας συντελεστή Cohen (d)
Πηγή: (Penn State, Eberly College Of Science - Department of Statistics, 2023)

Cohen's d	Ερμηνεία
0 - 0.2	Μηδενική έως πολύ μικρή πρακτική σημασία
0.2 - 0.5	Μικρή πρακτική σημασία
0.5 - 0.8	Μέτρια πρακτική σημασία
>0.8	Μεγάλη πρακτική σημασία

Βάσει των δεδομένων της παρούσας μελέτης τα αποτελέσματα για τον συντελεστή Cohen δίνονται στους Πίνακες 6.10, 6.11, 6.12 και 6.13.

Πίνακας 6.10: Συντελεστής d για ρηγμάτωση ασφαλικής στρώσης – Σενάρια 1-2

AC Bottom Up Cracking			
Σενάριο	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Cohen's d
Σενάριο 1	59.0348	30.4284	0.00405
Σενάριο 2	59.1580	30.4249	

Πίνακας 6.11: Συντελεστής d για παραμένουσα παραμόρφωση στρώσης έδρασης – Σενάρια 1-2

Subgrade Rutting			
Σενάριο	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Cohen's d
Σενάριο 1	4.9500	2.2735	0.00088
Σενάριο 2	4.9520	2.2742	

Πίνακας 6.12: Συντελεστής d για ρηγμάτωση ασφαλικής στρώσης – Σενάρια 1-3

AC Bottom Up Cracking			
Σενάριο	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Cohen's d
Σενάριο 1	59.0348	30.4284	0.01136
Σενάριο 3	59.3804	30.4149	

Πίνακας 6.13: Συντελεστής d για παραμένουσα παραμόρφωση στρώσης έδρασης – Σενάρια 1-3

Subgrade Rutting			
Σενάριο	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Cohen's d
Σενάριο 1	4.9500	2.2735	0.00264
Σενάριο 3	4.9560	2.2770	

Εν κατακλείδι, σε κάθε περίπτωση, τα αποτελέσματα του συντελεστή d επαληθεύουν τις παρατηρήσεις που έγιναν στα Κεφάλαια 6.2 και 6.3, μέσω εκτιμήσεων των ποσοτικών αποτελεσμάτων, και οδηγούν στο συμπέρασμα πως η επίδραση του εξηλεκτρισμού του στόλου των επιβατικών οχημάτων είναι υπαρκτή (στατιστικά σημαντική) αλλά όχι πρακτικά σημαντική.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Δεδομένης της ραγδαίας εξάπλωσης των ηλεκτρικών οχημάτων, κατά τα τελευταία χρόνια, η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως αντικείμενο τη διερεύνηση της επίδρασής τους στα εύκαμπτα οδοστρώματα. Για τον σκοπό αυτό η εργασία χωρίστηκε σε τρία μέρη.

Στο πρώτο μέρος, έγινε μια ιστορική αναδρομή στην πορεία των ηλεκτρικών οχημάτων, που όπως φάνηκε δεν πρόκειται για μια καινούργια τεχνολογία, αφού η παρουσία τους ξεκινάει ήδη από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα. Μάλιστα, το 1914 τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα επικρατούσαν στους δρόμους, προτού διάφορες συγκυρίες οδηγήσουν στην προσωρινή εξαφάνισή τους. Εν συνεχεία, παρουσιάστηκαν οι τύποι των ηλεκτρικών οχημάτων και έγινε περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών τους, ώστε να φανεί σε ποιους τομείς διαφέρουν σε σχέση με τα θερμικά οχήματα, στοιχείο απαραίτητο για την πορεία της μελέτης. Το πρώτο μέρος, ολοκληρώθηκε με την καταγραφή των πολιτικών υποστήριξης της ηλεκτροκίνησης, που δίνουν ώθηση στη διάδοσή της, και την παράθεση των στατιστικών στοιχείων και των μελλοντικών προβλέψεων, που δείχνουν πως σταδιακά τα ηλεκτρικά οχήματα θα επικρατήσουν, οπότε είναι αναγκαία η έγκαιρη μελέτη των επιδράσεων τους.

Στο δεύτερο μέρος, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση, ώστε να συγκεντρωθούν και να καταγραφούν τα αποτελέσματα των πρώτων ερευνών και μελετών σχετικά με την επιρροή τόσο των ίδιων των ηλεκτρικών οχημάτων στα οδοστρώματα, όσο και των υποδομών που βρίσκονται υπό μελέτη για να τα εξυπηρετήσουν.

Αρχικά, η προσοχή στράφηκε στο αυξημένο βάρος των ηλεκτρικών βαρέων οχημάτων που έχουν αρχίσει να κάνουν την εμφάνισή τους. Τα πρώτα συμπεράσματα είναι πως τα οχήματα νέας τεχνολογίας θα προκαλέσουν πρόσθετη φθορά 20% στα οδοστρώματα, σε σχέση με το αν ήταν θερμικά, μόνο με χρήση σε μεγάλη κλίμακα και προτού η τεχνολογία των μπαταριών καταφέρει να μειώσει το βάρος τους στα ίδια επίπεδα. Ωστόσο, τα δεδομένα σχετικά με τα βαρέα οχήματα είναι ακόμα ελλιπή καθώς δεν είναι ξεκάθαρο ποιος τύπος τους θα επικρατήσει (υδρογονοκίνητα ή μπαταριοκίνητα), ενώ παράλληλα σε όσα κυκλοφορούν εφαρμόζεται σε αρκετές περιπτώσεις περιορισμός του ωφέλιμου φορτίου τους, ώστε να μη ξεπερνούν σε βάρος τα συμβατικά βαρέα οχήματα που κυκλοφορούν ήδη.

Μελέτες βρίσκονται, επίσης, σε εξέλιξη σχετικά με την αυξημένη ροπή των κινητήρων των ηλεκτρικών οχημάτων, αλλά προσωρινά αποτελέσματα δείχνουν την επιρροή της στην ταχύτερη λείανση των αδρανών της επιφανειακής ασφατικής στρώσης.

Εκτός των ανωτέρω, στο επίκεντρο της έρευνας έχει βρεθεί και η εγκατάσταση συστημάτων επαγωγικής φόρτισης στα οδοστρώματα. Οι υπάρχουσες μελέτες έδειξαν πως πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στα υλικά που περιβάλλουν και προστατεύουν το σύστημα, ώστε τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους να μην απέχουν πολύ από αυτά του οδοστρώματος, για να αποφευχθεί η συγκέντρωση των τάσεων σε συγκεκριμένα σημεία και να διαχέονται ομοιόμορφα στο σώμα του υλικού. Επιπλέον, προσοχή πρέπει να δοθεί και στο συντελεστή διηλεκτρικής απώλειας των υλικών ώστε να καταστεί αποδοτική η φόρτιση. Συγκεκριμένος τύπος άκαμπτης ρητίνης προτάθηκε (Plastiroc), ενώ τονίστηκε η πιθανή ανάγκη αλλαγής του πάχους των στρώσεων ή τροποποίηση των υλικών του οδοστρώματος. Απαραίτητες κρίθηκαν, πλέον, κατά τη μελέτη ενσωμάτωσης τέτοιων συστημάτων στα οδοστρώματα οι δοκιμές απόδοσης, θερμικής συμπεριφοράς, μηχανικής συμπεριφοράς και αντοχής στις καιρικές συνθήκες, οι μελέτες επιρροής στη μακροζωία του οδοστρώματος και η ύπαρξη ενός ολοκληρωμένου σχεδίου για τη συντήρηση ή αντικατάστασή τους.

Συμπληρωματικά, αναφορά υπήρξε και στην πιθανή ανάγκη νέου ακουστικού σχεδιασμού των οδοστρωμάτων χαμηλού θορύβου. Τα ηλεκτρικά οχήματα παράγουν έως και 9 dB λιγότερο θόρυβο από τα συμβατικά σε χαμηλές ταχύτητες, γεγονός που οδήγησε, για λόγους ασφαλείας των πεζών, στην προσθήκη του Συστήματος Ηχητικής Ειδοποίησης σε ταχύτητες κάτω των 30 km/h, που μετατόπισε τον ήχο στις υψηλές συχνότητες του ακουστικού φάσματος σε σχέση με τα θερμικά. Ακόμα, στις υψηλές ταχύτητες δεν υπάρχει πλέον ο θόρυβος της μηχανής και ο ήχος που παράγεται προέρχεται αποκλειστικά από την κύλιση των ελαστικών. Όσα αναφέρθηκαν, δημιουργούν νέα δεδομένα στον σχεδιασμό οδοστρωμάτων χαμηλού θορύβου, αφού με τη μεταβολή των ακουστικών συχνοτήτων και της έντασης του ήχου επηρεάζεται και ο τρόπος που αποσβένονται οι ακουστικές δονήσεις από το οδόστρωμα. Η αλληλεπίδραση ελαστικού-οδοστρώματος ως αποκλειστική πηγή, πλέον, θορύβου στις υψηλές ταχύτητες δημιουργεί νέες ευκαιρίες στους μελετητές, διότι με αλλαγές στη σύσταση της επιφάνειας του οδοστρώματος (υφή, μέγεθος αδρανών), υποβοηθούμενοι πάντα και από επεμβάσεις στη σύνθεση του υλικού των ελαστικών, μπορούν να πετύχουν μείωσή του έως και 6 dB.

Ακόμα, η τεχνολογία των αυτόνομων οχημάτων σύμφωνα με τους κατασκευαστές αναμένεται να φτάσει στο επίπεδο της πλήρους αυτοματοποίησης (Επίπεδο 5) μέσω των ηλεκτρικών οχημάτων, εξαιτίας των ταχύτερων αντιδράσεων τους και της σταθερής ισχύος που μπορεί να παρέχει η μπαταρία τους στα διάφορα υποσυστήματά τους. Τα αυτόνομα, όμως, οχήματα διατηρούν σταθερή τη λωρίδα κίνησης τους και κεντράρουν το όχημα προσδίδοντας στους τροχούς μηδενική πλευρική μετατόπιση, που οδηγεί σε υπερβολική συγκέντρωση φορτίου σε μια συγκεκριμένη διαδρομή επιταχύνοντας τη φθορά, ειδικά όταν δρα συνδυαστικά και το αυξημένο βάρος του ηλεκτρικού οχήματος. Η επιρροή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν πρόκειται για αυτόνομα βαρέα οχήματα, διότι μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερες μόνιμες πλαστικές παραμορφώσεις και επιτάχυνση της ρηγμάτωσης λόγω κόπωσης κατά 2 με 3 φορές.

Στον επίλογο του δεύτερου μέρους της εργασίας, επισημάνθηκε και η σημασία των ποιοτικών χαρακτηριστικών των οδοστρωμάτων στην κατανάλωση ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων. Αύξηση του δείκτη ομαλότητας IRI κατά 1 m/km οδηγεί σε αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας κατά 2%. Επίσης, κλίση οδοστρώματος -7% οδηγεί σε μέση ανάκτηση ενέργειας, από ένα ηλεκτρικό όχημα, ίση με 43.2% της ενέργειας που δαπανήθηκε για άνοδο σε οδόστρωμα με κλίση 8%. Μελλοντικά, λοιπόν, πιθανόν τέτοια στοιχεία να επηρεάσουν το σχεδιασμό οδοστρωμάτων προκειμένου να εξυπηρετούνται τα νέα οχήματα.

Στο τρίτο και τελευταίο μέρος της μελέτης, λαμβάνοντας υπόψιν τα πλήρη δεδομένα που υπάρχουν για τα επιβατικά ηλεκτρικά οχήματα (σε αντίθεση με τα βαρέα), την αυξανόμενη διείσδυσή τους στο οδικό δίκτυο αλλά και το αυξημένο βάρος τους ως ειδοποιό διαφορά σε σχέση με τα θερμικά οχήματα, πραγματοποιήθηκε ανάλυση εντατικής κατάστασης τριών σεναρίων, σε τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος, για διαφορετικά μέτρα δυσκαμψίας και πάχη ασφαλικών στρώσεων, ώστε να διερευνηθεί αν ο πλήρης εξηλεκτρισμός του υπάρχοντα στόλου των θερμικών οχημάτων θα οδηγήσει σε αυξημένες φθορές στο οδόστρωμα. Κάτι τέτοιο κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό επειδή ο σχεδιασμός οδοστρωμάτων μέχρι σήμερα θεωρεί αμελητέα την καταστρεπτική συνεισφορά των επιβατικών οχημάτων και δεν τα περιλαμβάνει στη μελέτη. Το αν θα πρέπει να εξακολουθεί να συμβαίνει αυτό ήταν, λοιπόν, ένα ερώτημα που έπρεπε να απαντηθεί.

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης εξήχθησαν τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα:

- ❖ Το πάχος των ασφαλικών στρώσεων διαδραματίζει σημαντικότερο ρόλο στη μείωση της καταπόνησης του οδοστρώματος σε σχέση με το μέτρο

δυσκαμψίας για τους περισσότερους τύπους φθοράς. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση της αυλάκωσης της ασφαλικής στρώσης, όπου η επιρροή του μέτρου δυσκαμψίας αποδείχθηκε ισάξια με το πάχος των ασφαλικών στρώσεων και σε αρκετές περιπτώσεις σημαντικότερη.

- ❖ Αύξηση του πάχους των ασφαλικών στρώσεων δεν σημαίνει πάντα μείωση της καταπόνησης για όλους τους τύπους φθοράς. Συγκεκριμένα, η αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης από 5 σε 10 cm για την περίπτωση της ρηγμάτωσης από κάτω προς τα πάνω (AC bottom-up cracking) αποδείχθηκε επιζήμια, ενώ για την παραμένουσα παραμόρφωση της στρώσης έδρασης (Subgrade Rutting) ευνοϊκή. Το ακριβώς αντίθετο συνέβη για την αύξηση από 15 σε 20 cm. Κατά συνέπεια, μια αλλαγή στα μηχανικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος που περιορίζει έναν τύπο φθοράς, μπορεί να επιδρά αρνητικά σε κάποιον άλλον εξίσου σημαντικό.

Τα ανωτέρω ίσχυαν για όλα τα σενάρια της διερεύνησης χωρίς διαφορές. Σχετικά με το βασικό ερώτημα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την επιρροή των ηλεκτρικών επιβατικών οχημάτων στα οδοστρώματα, εξήχθησαν τα παρακάτω ειδικά συμπεράσματα:

- ❖ Η ποσοτική συγκριτική αξιολόγηση έδειξε πως οι μέσες ποσοστιαίες μεταβολές μεταξύ των σεναρίων, στις φθορές των κρίσιμων θέσεων του οδοστρώματος, ήταν σε κάθε περίπτωση μικρότερες του 1%. Ποσοστό πολύ μικρό για το συγκεκριμένο αντικείμενο μελέτης.
- ❖ Η μικρή μεταβλητότητα μεταξύ των αποτελεσμάτων των σεναρίων οδήγησε σε στατιστική σημαντικότητα των διαφορών μεταξύ τους. Η στατιστική σημαντικότητα δείχνει την ύπαρξη επίδρασης χωρίς, όμως, να αναδεικνύει το μέγεθος αυτής, αφού πρόκειται για έναν μαθηματικό ορισμό που δεν γνωρίζει τίποτα για τη θεματική περιοχή και την πρακτική σημαντικότητα του αποτελέσματος.
- ❖ Η αξιολόγηση του μεγέθους της επίδρασης επαλήθευσε τις ποσοτικές παρατηρήσεις για αμελητέα επιρροή του εξηλεκτρισμού των επιβατικών οχημάτων στα οδοστρώματα και κατ' επέκταση τη μηδενική πρακτική σημαντικότητά της.
- ❖ Σε όλα τα παραπάνω, αν συνυπολογίσουμε το ότι η μελέτη εκπονήθηκε:
 - α) με στατική ανάλυση,

β) με υπολογισμό μέσου αρχικού βάρους των θερμικών επιβατικών οχημάτων προς έναν δυσμενή μέσο όρο,

γ) με δυσμενή παραδοχή της κατανομής βάρους μεταξύ των αξόνων των επιβατικών οχημάτων, κατά τη χρήση του Κανόνα της 4^{ης} Δύναμης, για τον υπολογισμό των συντελεστών ισοδυναμίας και

δ) με παραδοχή του 100% των διελεύσεων αξόνων από τη λωρίδα σχεδιασμού προκύπτει ότι κατά τον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων η επίδραση των ηλεκτρικών επιβατικών οχημάτων μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, όπως λαμβάνεται και για τα συμβατικά επιβατικά οχήματα.

Ωστόσο, αυτή η διαπίστωση δεν απαντά πλήρως στο ερώτημα για την επίδραση γενικά του εξηλεκτρισμού των οχημάτων στα οδοστρώματα. Γι' αυτό τον λόγο, προτείνεται:

- ❖ Όταν θα υπάρχουν επαρκή και σαφή δεδομένα, να διεξαχθεί η συγκριτική αξιολόγηση λαμβάνοντας υπόψη και τα βαρέα ηλεκτρικά οχήματα.
- ❖ Να πραγματοποιηθεί δυναμική ανάλυση για μια συγκεκριμένη μέση ταχύτητα ισοδύναμων τυπικών αξόνων και τα αποτελέσματά της να συγκριθούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν από στατική ανάλυση.
- ❖ Να γίνει διερεύνηση της επίδρασης των ηλεκτρικών οχημάτων στον σχεδιασμό και άλλων τύπων οδοστρωμάτων (ημιεύκαμπτα/ημιάκαμπτα, δύσκαμπτα), καθώς διαφοροποιούνται οι κρίσιμες θέσεις αστοχίας σε σχέση με τα εύκαμπτα.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abdelaty H., Al-Obaidi A., Mohamed M., Farag H., 2021. Machine learning prediction models for battery-electric bus energy consumption in transit. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 96.

American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008.

Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide. [Online]

Available at: <https://www.slideshare.net/SudheerKumar240/aashto08>

[Accessed 19 October 2023].

American Journal of Transportation, 2023. [Online]

Available at: <https://www.ajot.com/news/new-study-finds-legislation-to-increase-truck-weight-would-crush-local-bridges>

[Accessed 26 June 2023].

Arat M., Bolarinwa E.O., 2015. *Rolling Resistance Effect of Tire Road Contact in Electric Vehicle Systems*, U.S.A.: SAE Technical Papers.

Asphalt Research Consortium, 2013. *3D-Move Analysis Software*, U.S.A: www.arc.unr.edu/Software.html.

Bailey, R., Harvill, J., et al., 2023. *The Impacts of Heavier Trucks on Local Bridges*, U.S.A.: National Association of County Engineers.

Barreto, V., 2015. *Why Are Hybrids More Efficient?*, Oakville, Canada: Geotab.Inc.

Brand, M. J., S. F. Schuster, T. Bach, E. Fleder, M. Stelz, S. Gläser, J. Müller, G. SEXTL, and A Jossen, 2015. Effects of Vibrations and Shocks on Lithium-Ion Cells. *Journal of Power Sources*, Volume 288, pp. 62-69.

Cesbron J., Bianchetti S., Agnès Pallas M., A. Le Bellec, Gary V., Klein P., 2021. Road surface influence on electric vehicle noise emission at urban speed. *Noise Mapping*, 8(1), pp. 217-227.

Chatti K., Zaabar I., 2012. *Estimating the effects of pavement condition on vehicle operating costs*, National Cooperative Highway Research Program: NCHRP Report.

Chen F., Balieu R., Córdoba E., Kringos N., 2017. Towards an Understanding of the Structural Performance of Future Electrified Roads: A Finite Element Simulation Study. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(2), pp. 204-215.

Chen, F., Taylor, N., Balieu, R. and Kringos, N., 2017. Dynamic application of the Inductive Power Transfer (IPT) systems in an electrified road: Dielectric power loss due to pavement materials. *Construction and Building Materials*, Volume 147, pp. 9-16.

Chen, F., 2016. *Sustainable Implementation of Electrified Roads: Structural and Material Analyses*. PhD thesis: KTH Royal Institute of Technology.

Dainis Berjoza, Inara Jurgena, 2017. Influence of batteries weight on electric automobile performance. *Eng. Rural Dev*, Volume 16, pp. 1388-1394.

Denton, T., 2020. *Electric and Hybrid Vehicles*. 2nd ed. U.K.: Routledge.

Ejsmont J., Świczko-Żurek B., Taryma S., Mioduszeński P., 2015. *Noise generated by tyres designed for electric vehicles - Results of laboratory experiments*, Maastricht: Proceedings of the EuroNoise Conference.

e-nomothesia.gr, 2023. *Ψηφιακή Πλατφόρμα Ελληνικής Νομοθεσίας*. [Online]
Available at: www.e-nomothesia.gr
[Accessed 18 April 2023].

Environmental Protection Agency, 2023. *EPA Automotive Trends Report*, USA: United States Government.

European Alternative Fuel Observatory, 2021. [Online]
Available at: <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu>
[Accessed 15 April 2023].

European Automobile Manufacturers Association, 2017. *wltpfacts.eu*. [Online]
Available at: <https://www.wltpfacts.eu/>
[Accessed 20 April 2023].

European Automobile Manufacturers Association, 2023. *ACEA*. [Online]
Available at: www.acea.auto
[Accessed 01 May 2023].

European Commission, 2019. *Communications and roadmap on the European Green Deal*. [Online]
Available at: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

European Commission, 2019. *Large demonstration of user Centric urban and long-range charging solutions to boost an engaging deployment of Electric Vehicles in Europe*. [Online]
Available at: <https://cordis.europa.eu/project/id/875683>
[Accessed 28 June 2023].

European Commission, 2020. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions "Sustainable and Smart Mobility Strategy — putting European transport on track for the future"*. [Online]

Available at: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2021/06/03/sustainable-and-smart-mobility-strategy-council-adopts-conclusions>

European Commission, 2021. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions "Fit for 55: delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality"*. [Online]

Available at: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition>

European Court of Auditors, 2021. *Infrastructure for charging electric vehicles: more charging stations but uneven deployment makes travel across the EU complicated*. [Online]

Available at: <https://www.eca.europa.eu/en/publications?did=58260>

European Environment Agency, 2016. *Electric vehicles in Europe*. [Online]

Available at: <https://www.eea.europa.eu/publications/electric-vehicles-in-europe>

European Environment Agency, 2022. *Transport and environment report 2021. Decarbonising road transport — the role of vehicles, fuels and transport demand*. [Online]

Available at: <https://www.eea.europa.eu/publications/transport-and-environment-report-2021>

European Environment Agency, 2023. [Online]

Available at: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps>
[Accessed 10 April 2023].

ev-volumes.com, 2023. *EV-VOLUMES*. [Online]

Available at: www.ev-volumes.com
[Accessed 11 May 2023].

Federal Highway Administration, 2019. *U.S. Department of Transportation*. [Online]
Available at:

https://ops.fhwa.dot.gov/freight/pol_plng_finance/policy/fastact/tswprovisions2019/index.htm

[Accessed 24 June 2023].

Franca, A., 2018. *Electricity consumption and battery lifespan estimation for transit electric buses: drivetrain simulations and electrochemical modelling*. Canada: University of Victoria (Doctoral dissertation).

Frost, J., 2020. *Hypothesis Testing: An Intuitive Guide for Making Data Driven Decisions*. 1st ed. U.S.A.: Statistics By Jim Publishing.

Frost, J., 2020. *Introduction to Statistics: An Intuitive Guide for Analyzing Data and Unlocking Discoveries*. 1st ed. U.S.A.: Statistics By Jim Publishing.

Gabet T., Mazhoud B., Kadem K., Meira Z., Sanzel A., Coquelle E., Sedran T., Hornych P., 2023. Thermo-viscoelastic analysis of an inductive charging system included in an eRoads. Incit-ev project. *Transportation Engineering*, Volume 11.

Gallet, M., Massier, T., Hamacher, T., 2018. Estimation of the energy demand of electric buses based on real-world data for large-scale public transport networks. *Applied energy*, Volume 230, pp. 344-356.

Georgouli K., Plati C., Loizos A., 2021. Autonomous vehicles wheel wander: Structural impact on flexible pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(3), pp. 388-398.

Ghasri, M., Ardeshiri, A. and Rashidi, T., 2019. Perception towards electric vehicles and the impact on consumers preference. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 77, pp. 271-291.

Haider M., Conter M., 2012. *MIRAVEC: Report on the road infrastructure effects contributing to road vehicle energy consumption and their governing parameters*.

[Online]

Available at:

https://www.cedr.eu/download/other_public_files/research_programme/eranet_road/call_2011/energy/miravec/02_miravec_d1.1_effects.pdf

[Accessed 10 July 2023].

Hankook -Tyre Company, 2020. *EV Tires, Standing at the Inflection Point*. [Online]

Available at: <https://www.hankooktire.com/global/en/tech-in-motion/ev-tire.html>

[Accessed 25 June 2023].

Harvey, J., Saboori, A., Miller, M., Kim, C., Jaller, M., Lea, J., et al, 2020. *Effects of Increased Weights of Alternative Fuel Trucks on Pavement and Bridges*, UC Office of the President: University of California Institute of Transportation Studies:

<http://dx.doi.org/10.7922/G27M066V>.

Hooper, J. M., J. Marco, G. H. Chouchelamane, C. Lyness, and J. Taylor, 2016. Vibration Durability Testing of Nickel Cobalt Aluminum Oxide (NCA) Lithium-Ion 18650 Battery Cells. *Energies*, Volume 9, p. 281.

International Council on Clean Transportation, 2019. *Estimating electric vehicle charging infrastructure costs across major U.S. metropolitan areas*. [Online]
Available at:
https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EV_Charging_Cost_20190813.pdf
[Accessed 18 October 2023].

International Energy Agency (IEA), 2022. *IEA*. [Online]
Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022/trends-in-electric-light-duty-vehicles>
[Accessed 01 May 2023].

International Energy Agency (IEA), 2023. *IEA*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/trends-in-electric-heavy-duty-vehicles#abstract>
[Πρόσβαση 07 June 2023].

International Energy Agency (IEA), 2023. *IEA*. [Online]
Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/trends-in-electric-light-duty-vehicles#abstract>
[Accessed 01 May 2023].

International Energy Agency (IEA), 2023. *IEA-Global EV Data Explorer*. [Online]
Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer>
[Accessed 05 May 2023].

Jayme, A., Al-Qadi, I., Hernandez, J., Mohamed Ali, U., 2022. *Impact of Commercial Electric Vehicles on Flexible Pavement Performance*. Research in Progress - Expected Completion Date: 2025/02/15, Illinois Department of Transportation.

Junquera, B., Moreno, B. & Álvarez, R., 2016. Analyzing consumer attitudes towards electric vehicle purchasing intentions in Spain: Technological limitations and vehicle confidence. *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 109, pp. 6-15.

kodiko.gr, 2023. *Μηχανή αναζήτησης ελληνικής νομοθεσίας*. [Online]
Available at: www.kodiko.gr
[Accessed 17 April 2023].

Krupa, J., Rizzo, D., Eppstein, M., Lanute, B., Gaalema, D., Lakkaraju, K. & Warrender, C., 2014. Analysis of a consumer survey on plug-in hybrid electric vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 64, pp. 14-31.

Langbroek, J., Franklin, J. & Susilo, Y., 2016. The effect of policy incentives on electric vehicle adoption. *Energy Policy*, Volume 94, pp. 94-103.

Liu K., Yamamoto T., Morikawa T., 2017. Impact of road gradient on energy consumption of electric vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 54, pp. 74-81.

Liu Y., Tight M., Sun Q., Kang R., 2019. A systematic review: Road infrastructure requirement for Connected and Autonomous Vehicles (CAVs). *Journal of Physics: Conference Series*, 1187(4), p. 042073.

Lowe, M., Tokuoka, S., Trigg, T., Gereffi, G., 2010. *Lithium-ion batteries for hybrid and all-electric Vehicles: the U.S. Value Chain*, USA: Center on Globalization, Governance & Competitiveness, Duke University.

Marghani A., Wilson D.J., Larkin T., 2019. *Performance of Inductive Power Transfer-based Pavements of Electrified Roads*. Conference: IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies, Wireless Power Transfer.

Matulka, R., 2014. *U.S. Department of Energy*. [Online]
Available at: <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>
[Accessed 11 April 2023].

Mazhoud B., Gabet T., Kadem K., Meira Z., Sanzel A., Coquelle E., Hornych P., 2022. Pavement integration of an inductive charging system for electric vehicles. Results of the INCIT-EV project. *Transportation Engineering*, Volume 10.

Minguela J. D., Muñoz C. B., 2019. *Impact of Electric and Autonomous Conduction on Pavements*. Abu Dhabi, United Arab Emirates, Proceedings from 26th World Road Congress.

Muratori, M., Alexander, M., Arent, D. et al, 2021. The rise of electric vehicles - 2020 status and future expectations. *Progress in Energy*, 3(2).

NCHRP, 2004. *Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures*. Washington, D.C: Transportation Research Board.

NHTSA, 2009. *Incidence of Pedestrian and Bicyclist Crashes by Hybrid Electric Passenger Vehicles*, <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/Pubs/811204.PDF>: U.S. Department of Transportation.

Parker, B., 1999. *historywebsite.co.uk*. [Online]
Available at: <http://www.historywebsite.co.uk/>
[Accessed 11 April 2023].

Pavement Interactive, 2023. *Pavement Distresses: Rutting*. [Online]
Available at: www.pavementinteractive.org
[Accessed 28 September 2023].

Penn State, Eberly College Of Science - Department of Statistics, 2023. *Course notes for STAT 200: Elementary Statistics*. [Online]
Available at: <https://online.stat.psu.edu/stat200/lesson/6/6.4>
[Accessed 12 October 2023].

Per Enge, Nick Enge, Stephen Zoepf, 2020. *Electric Vehicle Engineering*. 1st ed.
s.l.:McGraw Hill.

Pernice, D., 2022. *Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο*. [Online]
Available at: www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/el/FTU_3.4.1.pdf
[Accessed 15 April 2023].

Peters, A. & Dütschke, E., 2014. How do Consumers Perceive Electric Vehicles? A Comparison of German Consumer Groups. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 16(3).

Praticò F., Fedele R., 2021. Electric vehicles diffusion: changing pavement acoustic design?. *Noise Mapping*, 8(1), pp. 281-294.

R. Tavakoli et al., 2017. *Magnetizable concrete composite materials for road-embedded wireless power transfer pads*, Cincinnati, OH, USA: IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).

Rezvani, Z., Jansson, J. & Bodin, J., 2015. Advances in consumer electric vehicle adoption research: a review and research agenda. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 34, pp. 122-136.

Richardson, D. B., 2013. Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, Impacts, and renewable energy integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 19, pp. 247-254.

Sagaama, I., Kchiche, A., Trojet, W., Kamoun, F., 2020. *Impact of Road Gradient on Electric Vehicle Energy Consumption in Real-World Driving*. vol 1151, pp. 393–404, Proceedings from Advances in Intelligent Systems and Computing.

Sanguesa, J., Torres, V., Garrido, P., Martinez, F. & Marquez-Barja, J., 2021. A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities*, 4(1), pp. 372-404.

- Shoup D., 2006. Cruising for parking. *Transport Policy*, 13(6), pp. 479-486.
- Siang Fui Tie, Chee Wei Tan, 2013. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 20, pp. 82-102.
- Siddharthan R., Nasimifar M., Tan X., Hajj E., 2017. Investigation of impact of wheel wander on pavement performance. *Road Materials and Pavement Design*, 18(2), pp. 390-407.
- Statista, 2022. *Electric Vehicles: Market Data Analysis and Forecast*. [Online] Available at: www.statista.com/outlook/mmo/electric-vehicles/europe [Accessed 15 April 2023].
- Sun, X., Chen, Y., Feng, J. and Li, F., 2020. *Research on the magnetization properties of pavement materials and energy loss impact on wireless power transmission*. Washington DC: Presented in 99th Transportation Research Board Annual Conference.
- Sun, X., Li, Z., Wang, X. & Li, C., 2020. Technology Development of Electric Vehicles: A Review. *Energies*, 13(1), p. 90.
- U.S. Department of energy, 2023. *energy.gov*. [Online] Available at: <https://www.energy.gov/femp/bidirectional-charging-and-electric-vehicles-mobile-storage> [Accessed 10 May 2023].
- U.S. Department of Energy, 2023. *energy.gov*. [Online] Available at: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/fotw-1272-january-9-2023-electric-vehicle-battery-pack-costs-2022-are-nearly> [Accessed 14 May 2023].
- U.S. Department of Energy, 2023. *energy.gov*. [Online] Available at: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-01/the-us-national-blueprint-for-transportation-decarbonization.pdf> [Accessed 02 May 2023].
- Venugopal, P., Shekhar, A., Visser, E., Scheele, N., Mouli, G.R.C., Bauer, P. and Silvester, S., 2018. Roadway to self-healing highways with integrated wireless electric vehicle charging and sustainable energy harvesting technologies. *Applied Energy*, Issue 212, pp. 1226-1239.
- Vepsäläinen, J., Otto, K., Lajunen, A., Tammi, K., 2019. Computationally efficient model for energy demand prediction of electric city bus in varying operating conditions. *Energy*, Volume 169, pp. 433-443.

Verheijen E.N.G., Jabben J., 2010. *Effect of electric cars on traffic noise and safety*, Bilthoven, Netherlands: National Institute for Public Health and Environment.

Volvo, 2023. *Volvotrucks*. [Online]

Available at: <https://www.volvotrucks.gr/el-gr/trucks/trucks/electromobility.html>
[Accessed 07 June 2023].

Wang Hao, Guo Lukai., 2022. *Durable and Electrified Pavement for Dynamic Wireless Charging of Electric Vehicles*, New Jersey: State University of New Jersey, Department of Civil and Environmental Engineering.

Zhang, L., Z. Ning, H. Peng, Z. Mu, and C. Sun, 2017. Effects of Vibration on the Electrical Performance of Lithium-Ion Cells Based on Mathematical Statistics. *Applied Sciences*, Volume 7, p. 802.

Ziegler Micah ,Trancik Jessika, 2021. *Our World in Data*. [Online]

Available at: <https://ourworldindata.org/battery-price-decline>
[Accessed 10 May 2023].

Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, 2020. *www.e-nomothesia.gr*. [Online]

Available at: www.e-nomothesia.gr
[Accessed 15 April 2023].

Λοΐζος, Α., Πλατή, Χ., 2021. "Σημειώσεις για το μάθημα: Αξιολόγηση και Συντήρηση Οδοστρωμάτων", Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Λοΐζος, Α., Πλατή, Χ., 2021. "Σημειώσεις για το μάθημα: Ειδικά Θέματα Οδοστρωμάτων", Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Λοΐζος, Α., Πλατή, Χ., 2021. "Σημειώσεις για το μάθημα: Κατασκευή Οδών", Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Λοΐζος, Α., Πλατή, Χ., 2021. "Σημειώσεις για το μάθημα: Σχεδιασμός Οδοστρωμάτων Οδών και Αεροδρομίων", Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.