

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Χρήση εναλλακτικών καυσίμων στις εμβολοφόρες ΜΕΚ. Συνθετικά καύσιμα/ Βιοκαύσιμα Μηδενικού Αποτυπώματος CO_2»

Φοιτητής: **Δερμιτζομανωλάκης Γεώργιος Α.Μ. 4826**

Επιβλέπων Καθηγητής: **Τζιράκης Ευάγγελος**

Μέλος Ε.ΔΙ.Π.

ΗΡΑΚΛΕΙΟ – 2025

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία σηματοδοτεί το τέλος μιας μακροχρόνιας προσπάθειας. Ένα θερμό ευχαριστώ στον Επιβλέποντα μου κ. Τζιράκη για την υποστήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές του.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Από την πρώτη βιομηχανική επανάσταση και εντεύθεν το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στα ορυκτά καύσιμα. Ωστόσο, η εκτεταμένη εκμετάλλευσή τους έχει οδηγήσει σε σημαντικές προκλήσεις συμπεριλαμβανομένης της αυξημένης εξάρτησης από την ενέργεια, της ταχείας εξάντλησης των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων και των σοβαρών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Σε απάντηση σε αυτές τις προκλήσεις, η ανάπτυξη και εφαρμογή των εναλλακτικών καυσίμων για τη βελτίωση της απόδοσης των κινητήρων και τη μείωση των εκπομπών εξελίσσεται συνεχώς για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών ανησυχιών και τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης τους. Σκοπός της παρούσας βιβλιογραφικής μελέτης είναι η διερεύνηση της χρήσης των εναλλακτικών καυσίμων στις εμβολοφόρες Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ), καθώς και της αναγκαιότητας της χρήσης τους, από κοινού με την αξιολόγηση της εκάστοτε τεχνολογίας. Μια σημαντική τάση επικεντρώνεται στην αυξημένη χρήση βιοκαυσίμων, όπως το βιοντίζελ και η βιοαιθανόλη, τα οποία προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές όπως καλλιέργειες και φύκια. Οι προσπάθειες εξέτασης και βελτίωσης σε αυτόν τον τομέα επικεντρώνονται σε επιτυχημένες διαδικασίες παραγωγής, στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης των βιοκαυσίμων και στη διασφάλιση της συμβατότητάς τους με τους υπάρχοντες κινητήρες. Μια άλλη αξιοσημείωτη τάση αφορά την εξερεύνηση συνθετικών καυσίμων, τα οποία παράγονται μέσω χημικών διεργασιών, συμπεριλαμβανομένων των τεχνολογιών μετατροπής ενέργειας σε υγρό (PtL) και αερίου σε υγρό (GtL). Θα πρέπει να σημειωθεί πως ενώ η ανάπτυξη νέων εναλλακτικών στα καύσιμα είναι πολλά υποσχόμενη, εξακολουθούν να υφίστανται σημαντικοί περιορισμοί ως προς το υψηλό κόστος και της χαμηλής απόδοσης τους. Η εξερεύνηση των περίπλοκων σχέσεων μεταξύ των τύπων κινητήρων και των καυσίμων, όχι μόνο επιδιώκει να ξεκλειδώσει υψηλότερα επίπεδα ενεργειακής απόδοσης, αλλά και να ελαχιστοποιήσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και το λειτουργικό κόστος. Αυτή η αναζήτηση συνέργειας μεταξύ κινητήρων και καυσίμων υπόσχεται να φέρει επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο τροφοδοτούνται τα οχήματα και οι μηχανές, ωθώντας προς ένα πιο βιώσιμο μέλλον.

Λέξεις Κλειδιά: εμβολοφόρες ΜΕΚ, συνθετικά καύσιμα, εναλλακτικά, βιοκαύσιμα μηδενικού αποτυπώματος CO_2

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

BEV – Battery Electric Vehicles

CO – Carbon Monoxide

CO_2 – Carbon Dioxide

DME – Dimethyl Ether

DPF – Diesel Particulate Filters

EGR – Exhaust Gas Recirculation

ER – Equivalence Ratio

FCEV- Fuel Cell Electric Vehicles

GHG – Greenhouse Gases

HC – Unburned Hydrocarbons

HEV – Hybrid Electric Vehicles

PHEVs – Plug-in Hybrid Electric Vehicles

PtL – Power-to-Liquid

SNG – Synthetic Natural Gas

SVO – Straight vegetable oil

WGSR – Water–gas Shift Reaction

ΑΠΕ – Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

ΜΕΚ – Μηχανή Εσωτερικής Καύσης

Σαλ – Στροφές ανά λεπτό

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ 2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ 3
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ 4
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ 5
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ 7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ 8
Κεφάλαιο 1. Εμβολοφόρες Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ) 13
1.1 Ορισμός & ιστορία ΜΕΚ 13
1.2 Βασικές αρχές λειτουργίας και ταξινόμηση 16
1.3 Σχέση ΜΕΚ με τις εκπομπές CO_2 και άλλων ρύπων 22
Κεφάλαιο 2. Εναλλακτικά Καύσιμα & ΜΕΚ 27
2.1 Ορισμός & κατηγοριοποίηση εναλλακτικών καυσίμων 27
2.2 Κριτήρια αξιολόγησης εναλλακτικών καυσίμων 29
2.3 Πλεονεκτήματα & προκλήσεις εναλλακτικών καυσίμων 31
Κεφάλαιο 3. Ηλεκτρική Ενέργεια & ΜΕΚ 38
3.1 Ιστορική αναδρομή εξέλιξης ηλεκτρικών οχημάτων 38
3.2 Ταξινόμηση ηλεκτρικών οχημάτων 41
3.3 Γενικά & τεχνολογικά χαρακτηριστικά ηλεκτρικών οχημάτων 43
3.4 Πλεονεκτήματα, τεχνικές προσκλήσεις & προτεινόμενες λύσεις 47
Κεφάλαιο 4. Αμμωνία & ΜΕΚ 53
4.1 Εισαγωγικά στοιχεία 53
4.2 Αξιοποίηση της αμμωνίας ως καυσίμου για τις ΜΕΚ 55
4.3 Πλεονεκτήματα & τεχνικές προκλήσεις 59
Κεφάλαιο 5. Υδρογόνο & ΜΕΚ 62
5.1 Εισαγωγικά στοιχεία & είδη υδρογόνου 62
5.2 Τεχνολογία οχημάτων με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου 66
5.3 Πλεονεκτήματα & τεχνικές προκλήσεις 69
Κεφάλαιο 6. Συνθετικά Καύσιμα 74
6.1 Ορισμός & εισαγωγικά στοιχεία 74
6.2 Είδη συνθετικών καυσίμων 75
6.2.1 Syngas 75
6.2.2 Power-to-Liquid (PtL) 76
6.2.3 Gas-to-Liquid (GtL) 79

6.3 Πλεονεκτήματα, τεχνικές προκλήσεις & μελλοντικές προεκτάσεις.....81
Κεφάλαιο 7. Βιοκαύσιμα Μηδενικού Αποτυπώματος CO_2.....85
7.1 Ιστορική αναδρομή & γενιές βιοκαυσίμων 85
7.2 Κύριοι τύποι & μέθοδοι παραγωγής βιοκαυσίμων.....88
7.3 Πλεονεκτήματα & προκλήσεις βιοκαυσίμων 99
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 103
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 105

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1. Σχηματική απεικόνιση δίχρονης μηχανής (Κλιάνης και συν., 2017).....18
Εικόνα 2. Διαφορετικοί τύποι εμβολοφόρων ΜΕΚ (πηγή: Τζιράκης, χ.χ.) 22
Εικόνα 3. Ταξινόμηση ηλεκτρικών οχημάτων (Reddy et al., 2024) 41
Εικόνα 4. Διαφορετικά γενικά & τεχνικά χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων ηλεκτρικών οχημάτων (Reddy et al., 2024) 42
Εικόνα 5. Λειτουργικά στάδια ηλεκτρικών οχημάτων.....44
Εικόνα 6. Ταξινόμηση των βιοκαυσίμων (Reddy et al., 2024) 88

Διάγραμμα 1. Διαδικασία παραγωγής καυσίμων Power-to-Liquid (PtL), από τη δέσμευση του CO_2 και την ηλεκτρόλυση του νερού 77
Διάγραμμα 2. Κλειστός κύκλος άνθρακα στο πλαίσιο της παραγωγής βιοκαυσίμων.82
Διάγραμμα 3. Κύκλος ζωής των εκπομπών CO_2 μεταξύ βιοκαυσίμων και ορυκτών καυσίμων.....82
Διάγραμμα 4. Γενιές βιοκαυσίμων 86
Διάγραμμα 5. Κύκλος του άνθρακα των βιοκαυσίμων, , ο οποίος δικαιολογεί τον χαρακτηρισμό τους ως ουδέτερων ως προς τις εκπομπές CO_2 (κατασκευή ιδίου) 89
Διάγραμμα 6. Διαδικασία παραγωγής βιο-LNG.....98

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από την πρώτη βιομηχανική επανάσταση και εντεύθεν το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στα ορυκτά καύσιμα. Από τον άνθρακα μέχρι το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο, αυτά τα συμβατικά καύσιμα ήταν απαραίτητα για την κάλυψη των αυξανόμενων παγκόσμιων ενεργειακών απαιτήσεων. Ωστόσο, η εκτεταμένη εκμετάλλευσή τους έχει οδηγήσει σε σημαντικές προκλήσεις συμπεριλαμβανομένης της αυξημένης εξάρτησης από την ενέργεια, της ταχείας εξάντλησης των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων και των σοβαρών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, τόσο σε τοπικό, όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο (Dell'Aversano et al., 2024).

Η καύση ορυκτών καυσίμων απελευθερώνει στην ατμόσφαιρα τον άνθρακα που είχε σταδιακά απομονωθεί πριν από περισσότερα από 50 εκατομμύρια χρόνια και είχε αποθηκευτεί ως άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο και άλλα είδη πηγών ορυκτών καυσίμων, όπως το σχιστολιθικό αέριο και το σχιστολιθικό πετρέλαιο. Η καύση αυτών των καυσίμων παράγει, εκτός από τους ρύπους, διοξείδιο του άνθρακα (Carbon Dioxide - CO_2), το οποίο επιφέρει την παγίδευση της ηλιακής θερμότητας στην ατμόσφαιρα (φαινόμενο του θερμοκηπίου) και κατά συνέπεια την υπερθέρμανση της Γης και την κλιματική επιβάρυνση (Martins & Brito, 2020). Με τον παγκόσμιο πληθυσμό να προβλέπεται να φτάσει τα 9 δισεκατομμύρια έως το 2050, από κοινού με την αύξηση των διαθέσιμων εισοδημάτων και των αναγκών για καύσιμα στις αναδυόμενες χώρες, υπάρχει σήμερα επείγουσα ανάγκη ανάπτυξης εναλλακτικών τεχνολογιών για τη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και την αντιμετώπιση της παγκόσμιας πρόκλησης των περιορισμένων πόρων (Dell'Aversano et al., 2024). Καθώς η κρίση της κλιματικής αλλαγής και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε συνδυασμό με το ζήτημα της ενεργειακής ασφάλειας προσλαμβάνουν αυξανόμενη σημασία, η σχετική έρευνα έχει στραφεί στην εξεύρεση εναλλακτικών λύσεων για τα συμβατικά καύσιμα που καταναλώνουν οι Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ) (Gosar & Priyam, 2025).

Ο τομέας των μεταφορών ευθύνεται για περίπου το 24% των άμεσων εκπομπών CO_2 παγκοσμίως, με τα χερσαία οχήματα να ευθύνονται για σχεδόν τα τρία τέταρτα αυτών των εκπομπών (Somashekarappa & Shreeshail, 2022). Παρά τη μείωση των εκπομπών

CO_2 λόγω της πανδημίας COVID-19, το έτος 2020 καταγράφηκε η υψηλότερη μέση ετήσια συγκέντρωση CO_2 στην ατμόσφαιρα που έχει καταγραφεί ποτέ, ανερχόμενη στα 412,5 ppm και όντας κατά 50% υψηλότερη από ό,τι στις απαρχές της βιομηχανικής επανάστασης. Βάσει εκτιμήσεων, ο τομέας των μεταφορών συνέβαλε στο 27% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου το έτος 2019 (Pedersen et al., 2023).

Καθώς οι ανησυχίες για την κλιματική αλλαγή, την ποιότητα του αέρα και την ενεργειακή ασφάλεια εντείνονται, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για εναλλακτικά καύσιμα που μπορούν να μειώσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ΜΕΚ, διατηρώντας παράλληλα τα πλεονεκτήματα απόδοσής τους. Ενώ η ηλεκτροκίνηση αντιπροσωπεύει μια σημαντική οδό για την απαλλαγή από τις εκπομπές άνθρακα, οι ΜΕΚ προβλέπεται να παραμείνουν κυρίαρχες σε ορισμένους τομείς των μεταφορών για τις επόμενες δεκαετίες, ιδίως στα βαρέα οχήματα, στις θαλάσσιες εφαρμογές και στις περιοχές με περιορισμένες υποδομές φόρτισης (Somashekarappa & Shreeshail, 2022). Επιπλέον, βάσει των εκτιμήσεων μιας έκθεσης του Παγκόσμιου Επιχειρηματικού Συμβουλίου για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη, ο αριθμός των ελαφρών οχημάτων θα αυξηθεί σε 1,3 δισεκατομμύρια έως το 2030 και σε 2 δισεκατομμύρια έως το 2050 (Verma et al., 2022). Η εν λόγω αύξηση του όγκου παραγωγής της αυτοκινητοβιομηχανίας έχει ως αποτέλεσμα την εξάντληση των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), την ατμοσφαιρική ρύπανση των πόλεων και την παγκόσμια κλιματική αλλαγή (Malik et al., 2025).

Η απαλλαγή του τομέα των μεταφορών από τον άνθρακα βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ανάπτυξη της σχετικής τεχνολογίας και στην αξιοποίηση καυσίμων χωρίς άνθρακα, όπως το υδρογόνο και η αμμωνία ή στην ηλεκτροκίνηση. Ωστόσο, οι εν λόγω εναλλακτικές τεχνολογίες καυσίμων αντιμετωπίζουν επί της παρούσης σημαντικές προκλήσεις. Επί παραδείγματι, στην ηλεκτροκίνηση οι ενεργειακές πυκνότητες των μπαταριών είναι χαμηλές, γεγονός που τις καθιστά λιγότερο κατάλληλες για μεταφορές μεγάλων αποστάσεων (Mertens et al., 2020). Για τέτοιες εφαρμογές, η εφαρμογή τεχνολογιών που βασίζονται στο υδρογόνο έχουν αποδειχθεί μια πολλά υποσχόμενη λύση (Al-Baghdadi, 2020). Το υδρογόνο είναι ένας ενεργειακός φορέας που μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί απευθείας ως καύσιμο, είτε να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω κυψελών καυσίμου. Παρά τις θετικές ιδιότητες του υδρογόνου, όπως τα ευρεία όρια ευφλεκτότητας, οι αυστηρές απαιτήσεις για την αποθήκευση υγρών

οδηγούν σε υψηλό κόστος και σχετικά χαμηλή συνολική ενεργειακή απόδοση (Pedersen et al., 2023).

Το ευρύ κοινό και οι περισσότεροι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής αντιλαμβάνονται τα ηλεκτρικά οχήματα ως μια καλή εναλλακτική λύση στις μεταφορές που βασίζονται στα ορυκτά καύσιμα (Kumar & Alok, 2020). Ωστόσο, όσον αφορά τις εκπομπές που συνδέονται με τη χρήση οχημάτων, θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι αυτή εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη μέθοδο παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνουν. Σε χώρες όπως η Πολωνία ή η Αυστραλία, όπου το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται από άνθρακα, η λειτουργία ηλεκτρικών οχημάτων θα συμβάλει περισσότερο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου σε σύγκριση με χώρες όπως η Νορβηγία ή Βραζιλία, όπου το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνουν τα οχήματα παράγεται από ΑΠΕ (Martins & Brito, 2020). Επιπλέον, η αξιολόγηση της βιωσιμότητας των ηλεκτρικών οχημάτων πρέπει να λαμβάνει υπόψη ολόκληρο τον κύκλο ζωής του οχήματος, συμπεριλαμβανομένων εύλογων ζητημάτων όπως η εξόρυξη των υλικών που χρησιμοποιούνται στις μπαταρίες και στους ηλεκτροκινητήρες, καθώς και το τέλος της ζωής των μπαταριών (Mossali et al., 2020).

Πλέον, ένας μεγάλος αριθμός χωρών, περιφερειών και πόλεων προτείνει την απαγόρευση των λεγόμενων «συμβατικών» οχημάτων μέσα στις επόμενες δεκαετίες (Martins & Brito, 2020). Παρ' όλα αυτά, οι αναφορές στον μελλοντικό αποκλεισμό των λεγόμενων «ρυπογόνων» οχημάτων περιλαμβάνουν είτε όρους πλήρους απαγόρευσης των ΜΕΚ, είτε όρους απαγόρευσης οχημάτων που καταναλώνουν συγκεκριμένα καύσιμα όπως ντίζελ ή βενζίνη. Αυτές οι ρυθμιστικές εξελίξεις συνοδεύονται από μια αυξανόμενη αποδοχή των ηλεκτρικών οχημάτων που είναι σε θέση να κινούνται για αρκετές δεκάδες χιλιόμετρα, χωρίς να καταναλώνουν ορυκτά καύσιμα και επομένως χωρίς να προκαλούν ρύπανση σε τουλάχιστον τοπικό επίπεδο (στα κέντρα των πόλεων, για παράδειγμα) (Shaheen et al., 2020). Ωστόσο, αυτά τα οχήματα βασίζονται σε ΜΕΚ για κάποιο μέρος της λειτουργίας τους, ιδίως για μεγάλα ταξίδια, αφού εξαντληθεί η μπαταρία. Υπό αυτές τις συνθήκες, η ΜΕΚ συνήθως λειτουργεί με ορυκτά καύσιμα, παράγοντας επομένως μια μη αμελητέα ποσότητα ρύπων και CO_2 κατά τη λειτουργία της (Gosar & Priyam, 2025).

Επομένως, αυτό που πιθανώς επιδιώκουν οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής με τους ισχυρούς περιορισμούς στα συμβατικά οχήματα είναι η μείωση των εκπομπών CO_2

από ορυκτά καύσιμα και η εξάλειψη των εκπομπών ρύπων εντός των ορίων της πόλης, κάτι που μπορεί να επιτευχθεί από κοινού με τη χρήση ηλεκτροκίνητων οχημάτων (Biresselioglu et al., 2018). Αυτή φαίνεται να είναι και η κατεύθυνση που ακολουθούν οι περισσότεροι κατασκευαστές αυτοκινήτων. Η Volvo, για παράδειγμα, είχε δεσμευτεί να τερματίσει την ανάπτυξη «συμβατικών» (μη ηλεκτροκίνητων) οχημάτων από το 2019 και να στραφεί αποκλειστικά στην αποκλειστική ανάπτυξη των υβριδικών και ηλεκτρικών οχημάτων που κινούνται με μπαταρία. Από το 2020, αυτό έχει ως επί το πλείστον εκπληρωθεί, αν και ορισμένα από αυτά τα οχήματα είναι μόνο «μερικώς υβριδικά», ενώ διαθέτουν μεγαλύτερη γεννήτρια εκκίνησης που εμφανίζει κάποια ανάκτηση ενέργειας πέδησης και περιορισμένη υποβοήθηση του κινητήρα. Παρ' όλα αυτά, οι ανακοινώσεις και τα προτεινόμενα χρονοδιαγράμματα για την ηλεκτροκίνηση ή ακόμη και την εγκατάλειψη της ανάπτυξης ΜΕΚ δεν τηρούνται πάντα κατά γράμμα (Martins & Brito, 2020).

Ωστόσο, η μείωση των αερίων του θερμοκηπίου (GHG - Greenhouse Gases) στον τομέα των μεταφορών μπορούν να επωφεληθούν σε μεγάλο βαθμό από τη χρήση κινητήρων εσωτερικής καύσης με τη χρήση καυσίμων ουδέτερων ως προς το CO_2 (Pedersen et al., 2023). Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε τομείς όπως τα βαρέα επαγγελματικά οχήματα και οι αεροπορικές μεταφορές, όπου η ενεργειακή πυκνότητα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο. Βάσει εκτιμήσεων, με την τρέχουσα τεχνολογία μπαταριών, τα ηλεκτρικά επιβατικά αεροπλάνα θα απαιτούσαν μπαταρίες μεταξύ 14 και 31 φορές το μέγιστο βάρος απογείωσης, προκειμένου να αποθηκεύσουν την ενέργεια που συνήθως μεταφέρουν υπό τη μορφή καυσίμου. Επίσης, ο χρόνος φόρτισης της μπαταρίας θα απαιτούσε πάνω από μία ημέρα για να επαναφορτιστεί πλήρως η μπαταρία που ισοδυναμεί με μια δεξαμενή καυσίμου Airbus 320. Όσον αφορά τα μεγάλα πλοία, οι 170 GWh ενέργειας που μεταφέρουν ορισμένοι από αυτούς τους τύπους πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων στις δεξαμενές τους, προκειμένου να τροφοδοτήσουν τους κινητήρες τους, θα απαιτούσαν μπαταρίες με πάνω από πέντε φορές το νεκρό βάρος τους, ενώ θα απαιτούνταν χρόνια για την επαναφόρτιση τους. Αυτές οι εκτιμήσεις φαίνονται υπερβολικά απαισιόδοξες, καθώς δεν λαμβάνουν υπόψη τη διαφορά στην απόδοση μεταξύ ηλεκτρικών κινητήρων και κινητήρων εσωτερικής καύσης, η οποία θα μείωνε κατά το ήμισυ την απαιτούμενη ενέργεια, αλλά είναι αρκετά υψηλές, ώστε να καταδείξουν την αδυναμία εξηλεκτρισμού των οχημάτων που χρησιμοποιούνται για τις αεροπορικές και

θαλάσσιες μεταφορές. Ωστόσο, τα εναλλακτικά καύσιμα ή/και τα βιοκαύσιμα μπορεί να αποτελούν πολλά υποσχόμενες λύσεις για αυτούς τους τύπους μεταφορών (Martins & Brito, 2020).

Στη βάση των ανωτέρω, σκοπός της παρούσας βιβλιογραφικής μελέτης είναι η διερεύνηση της χρήσης των εναλλακτικών καυσίμων στις εμβολοφόρες ΜΕΚ, καθώς και της αναγκαιότητας της χρήσης τους, από κοινού με την αξιολόγηση της εκάστοτε τεχνολογίας. Αναφορικά με τη διάρθρωση της παρούσας εργασίας, το Πρώτο Κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή στις εμβολοφόρες ΜΕΚ, παρέχοντας τον ορισμό, την ιστορική αναδρομή της εξέλιξης τους, τις βασικές αρχές λειτουργία τους και την ταξινόμηση τους, ενώ παράλληλα περιγράφεται η συμβολή τους στην εκπομπή ρύπων. Στο Δεύτερο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα εναλλακτικά καύσιμα, τα κριτήρια αξιολόγησης τους, καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που αυτά παρουσιάζουν. Στο Τρίτο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας στο πλαίσιο των ΜΕΚ, ενώ στο Τέταρτο Κεφάλαιο αναλύεται η περίπτωση της αμμωνίας ως εναλλακτικού καυσίμου. Ειδικότερα, παρουσιάζονται ορισμένα εισαγωγικά στοιχεία, ο τρόπος αξιοποίησης της στις ΜΕΚ απόν κοινού με τα οφέλη που αυτή προσφέρει και τις τεχνικές προκλήσεις. Περαιτέρω. Στο Πέμπτο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εφαρμογές του υδρογόνου στις ΜΕΚ, ενώ στο Έκτο πραγματοποιείται μια επισκόπηση των συνθετικών και στο Έβδομο μια ανάλυση των βιοκαυσίμων. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της μελέτης και προτείνονται ορισμένες κατευθύνσεις που θα μπορούσε να ακολουθήσει η μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 1. Εμβολοφόρες Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ)

1.1 Ορισμός & ιστορία ΜΕΚ

Μια μηχανή εσωτερικής καύσης είναι ένας τύπος κινητήρα, στον οποίο ένα καύσιμο και αέρας καίγονται σε περιορισμένο χώρο, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα μείγμα αερίου υψηλής πίεσης, το οποίο στη συνέχεια τροφοδοτεί την κίνηση των εξαρτημάτων του κινητήρα. Αποτελείται από τέσσερις διαδοχικές διαδικασίες: εισαγωγή, συμπίεση, καύση και εξάτμιση. Οι διαφορετικοί τύποι καυσίμων που χρησιμοποιούνται συνήθως για τις ΜΕΚ αυτοκινήτων είναι η βενζίνη, το ντίζελ και η κηροζίνη (Proctor, 2003).

Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης τροφοδοτούν πάνω από 1,4 δισεκατομμύρια οχήματα σε όλο τον κόσμο, υποδηλώνοντας τον κρίσιμο ρόλο τους στη σύγχρονη βιομηχανία μεταποίησης, εξόρυξης και μεταφορών. Αυτοί οι κινητήρες διαθέτουν την ικανότητα να χρησιμοποιούν μια ποικιλία καυσίμων, όπως βενζίνη, ντίζελ, φυσικό αέριο κ.ά., επιδεικνύοντας την ευελιξία που υποστηρίζει την ευρεία εφαρμογή τους σε διαφορετικούς κλάδους (Vishwakarma & Kumar, 2016). Η προσαρμοστικότητα των κινητήρων εσωτερικής καύσης, που αποδεικνύεται μεταξύ άλλων και από τη συμβατότητα τους με υβριδικά και plug-in ηλεκτρικά συστήματα, υπογραμμίζει τον κεντρικό τους ρόλο στην ενίσχυση της οικονομικής ανάπτυξης και στην ενίσχυση της κινητικότητας, καθώς και της παράλληλης διαχείρισης των σχετιζόμενων περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Rajiu, 2003). Η εκτεταμένη χρήση κινητήρων εσωτερικής καύσης, από βενζινοκινητήρες με ανάφλεξη με σπινθήρα έως κινητήρες ντίζελ με ανάφλεξη με συμπίεση, είναι καθοριστική για την κυριαρχία τους στον τομέα των επίγειων, αεροναυτικών και θαλάσσιων μεταφορών (Vlas & Cerepanova, 2024).

Η πρώτη εμφάνιση των ΜΕΚ μπορεί να εντοπιστεί στην αρχαία Κίνα, μεταξύ του 10^{ου} και του 13^{ου} αιώνα, με την εφεύρεση των πρώτων πυραυλοκινητήρων, σηματοδοτώντας μια πρωτόγονη μορφή τεχνολογίας καύσης. Η εξέλιξη τους άρχισε να επιταχύνεται κατά τον 18^{ο} αιώνα με αρκετούς εφευρέτες να επιχειρούν να αναπτύξουν πιο αποδοτικούς κινητήρες. Είναι αξιοσημείωτο π.χ. ότι ο John Barber έλαβε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1791 για έναν αεριοστρόβιλο και ο Thomas Mead κατοχύρωσε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για έναν αεριοκινητήρα το 1794 (Vishwakarma & Kumar, 2016). Το 1858, ο J. Lenior (1822-1900), ένας Βέλγος μηχανικός, ανέπτυξε έναν

δίχρονο κινητήρα που απέδιδε 6 ίππους με απόδοση περίπου 5%. Κατά τη διάρκεια της διαδρομής της εισαγωγής, ένα μείγμα αερίου-αέρα υπό ατμοσφαιρική πίεση εισερχόταν στον κινητήρα και αναφλεγόταν από έναν σπινθήρα, προκαλώντας αύξηση της πίεσης στον κύλινδρο κατά το δεύτερο μισό της διαδρομής, παράγοντας κίνηση. Κατά την επιστροφή, χρησιμοποιούνταν για την απομάκρυνση των προϊόντων καύσης μέσω μιας βαλβίδας εξαγωγής. Ο κινητήρας Lenior χρησιμοποιήθηκε κυρίως σε σταθερές εφαρμογές (Vlas & Cerepanova, 2024).

Το 1872, ο George Brayton (1830-1892), Αμερικανός μηχανολόγος μηχανικός, κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας και εμπορευματοποίησε μια μηχανή εσωτερικής καύσης σταθερής πίεσης. Η μηχανή χρησιμοποιούσε δύο παλινδρομικούς κυλίνδρους με έμβολα, έναν κύλινδρο συμπίεσης και έναν κύλινδρο εκτόνωσης. Αυτός ο κύκλος ονομαζόταν επίσης «κύκλος αναφλέξεως», καθώς η ανάφλεξη του μείγματος αερίου-αέρα πραγματοποιούνταν από μια φλόγα και το μείγμα αναφλεγόταν και καίγονταν σε σταθερή πίεση καθώς αντλούνταν από τον κύλινδρο συμπίεσης στον κύλινδρο εκτόνωσης. Ο κινητήρας εμβόλου Brayton χρησιμοποιήθηκε στο πρώτο αυτοκίνητο το 1878. Ο κύκλος Brayton είναι ο θερμοδυναμικός κύκλος που χρησιμοποιείται στους αεριοστροβίλους, οι οποίοι χρησιμοποιούν περιστρεφόμενα πτερύγια, προκειμένου να συμπιέσουν και να εκτονώσουν το αέριο που ρέει μέσω του στροβίλου (Ferguson & Kirkpatrick, 2016).

Ο Nikolaus Otto (1832-1891), Γερμανός μηχανικός, ανέπτυξε το 1876 την «σιωπηρή μηχανή του Otto – Otto Silent Engine», τον πρώτο πρακτικό τετράχρονο κινητήρα με συμπίεση εντός του κυλίνδρου. Με λόγο συμπίεσης 2,5, αυτός ο κινητήρας βενζίνης απέδιδε 2 ίππους στις 160 στροφές ανά λεπτό (σαλ) και είχε απόδοση πέδησης 14%. Ο Nikolaus Otto θεωρείται ο εφευρέτης του σύγχρονου κινητήρα εσωτερικής καύσης και ο ιδρυτής της εν λόγω βιομηχανίας. Η ιδέα ενός τετράχρονου κινητήρα επινοήθηκε και κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον A. de Rochas το 1861, ωστόσο ο Otto αναγνωρίζεται ως ο πρώτος που κατασκεύασε και εμπορευματοποίησε έναν λειτουργικό κινητήρα ανάφλεξης με φλόγα (Vlas & Cerepanova, 2024). Ο Otto δεν είχε επίσημη εκπαίδευση μηχανικού και ήταν αυτοδίδακτος, ενώ αφιέρωσε ολόκληρη την καριέρα του στην εξέλιξη του κινητήρα εσωτερικής καύσης. Το 1872, ίδρυσε την πρώτη εταιρεία κατασκευής κινητήρων εσωτερικής καύσης, την N. A. Otto & Cie, και προσέλαβε τους Gottlieb Daimler και Wilhelm Maybach, οι οποίοι αργότερα ίδρυσαν

την πρώτη αυτοκινητοβιομηχανία, την Daimler Motor Company το 1890. Ο γιος του Otto Gustav, ίδρυσε την αυτοκινητοβιομηχανία που είναι σήμερα γνωστή ως BMW (Rajiu, 2003).

Ο πρώτος λειτουργικός δίχρονος κινητήρας εφευρέθηκε και κατασκευάστηκε από τον Sir Dugald Clerk (1854-1932), έναν Σκωτσέζο μηχανολόγο μηχανικό, το 1878. Ο Clerk αποφοίτησε από το Yorkshire College το 1876 και κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας τον δίχρονο κινητήρα του το 1881. Είναι γνωστός για τις συνεισφορές του στη βελτίωση των διαδικασιών καύσης σε δίχρονους κινητήρες μεγάλης διαμέτρου (Ferguson & Kirkpatrick, 2016). Ο κινητήρας του Clerk ήταν κατασκευασμένος από δύο κυλίνδρους - ο ένας λειτουργικός κύλινδρος για την παραγωγή ισχύος και ο άλλος ένας κύλινδρος άντλησης για τη συμπίεση και τη μεταφορά του αέρα εισαγωγής και του μείγματος καυσίμου στον λειτουργικό κύλινδρο. Πολλές από αυτές τις πρώιμες μηχανές εσωτερικής καύσης, όπως οι μηχανές Lenior, Brayton και Otto, τροφοδοτούνταν από αέριο άνθρακα, ένα μείγμα μεθανίου, υδρογόνου, μονοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων που παράγονταν από τη μερική πυρόλυση του άνθρακα. Τη δεκαετία του 1880, τα διυλιστήρια αργού πετρελαίου άρχισαν να παράγουν βενζίνη και κηροζίνη σε ποσότητες επαρκείς, ώστε να δημιουργήσουν μια αγορά για τους κινητήρες εσωτερικής καύσης που τροφοδοτούνταν από υγρά καύσιμα (Vishwakarma & Kumar, 2016; Vlas & Cerepanova, 2024).

Ο Gottlieb Daimler (1834-1900), Γερμανός μηχανικός, αναγνωρίζεται ως ένας από τους ιδρυτές της αυτοκινητοβιομηχανίας. Ανέπτυξε έναν τετράχρονο κινητήρα βενζίνης υψηλής ταχύτητας το 1883. Το υγρό καύσιμο εξατμιζόταν και αναμειγνύονταν με τον αέρα εισαγωγής σε ένα καρμπυρατέρ πριν εισέλθει στον θάλαμο καύσης. Το μείγμα καυσίμου-αέρα αναφλεγόταν από έναν σωλήνα φλόγας. Το 1886, κατασκεύασε το πρώτο τετράτροχο αυτοκίνητο και ίδρυσε την Daimler Motor Company το 1890 (Vlas & Cerepanova, 2024).

Ο Karl Benz (1844-1929), Γερμανός μηχανικός, ανέπτυξε με επιτυχία έναν δίχρονο κινητήρα υγρού καυσίμου 3,5 ίππων με καρμπυρατέρ και ανάφλεξη με σπινθήρα το 1885. Το σύστημα ανάφλεξης αποτελούνταν από ένα ηλεκτρικό επαγωγικό πηνίο με έναν περιστροφικό διακόπτη που κινούνταν από τον κινητήρα και ένα αφαιρούμενο αναφλεκτήρα, τοποθετημένο στην κυλινδροκεφαλή, παρόμοιο με αυτό που βρίσκεται στους σημερινούς κινητήρες. Ο κινητήρας εγκαταστάθηκε σε ένα τρίτροχο όχημα το

1886, το οποίο αποτέλεσε και το πρώτο αυτοκίνητο. Το κιβώτιο ταχυτήτων αποτελούνταν από μια διάταξη δύο αλυσίδων που συνέδεε τον κινητήρα με τον πίσω άξονα (Pełczyński, 2022).

Το 1897, ο Rudolph Diesel (1858-1913), ένας Γερμανός μηχανικός, ανέπτυξε τον πρώτο πρακτικό τετράχρονο κινητήρα χρησιμοποιώντας άμεση έγχυση υγρού καυσίμου στον θάλαμο καύσης. Ο υψηλός λόγος συμπίεσης του κινητήρα είχε ως αποτέλεσμα την αυτανάφλεξη και την καύση του μείγματος καυσίμου-αέρα. Ο Diesel αποφοίτησε από το Πολυτεχνείο του Μονάχου το 1880 και συνεργάστηκε με τον πρώην καθηγητή του, Carl von Linde, αρχικά στην ψύξη με αμμωνία του κύκλου Rankine, και στη συνέχεια συνεργάστηκε με την εταιρεία MAN για την ανάπτυξη κινητήρων ανάφλεξης με συμπίεση (Rajiu, 2003). Σχεδίασε τους κινητήρες του με τέτοιο τρόπο, ώστε να ακολουθούν τις θερμοδυναμικές αρχές του Carnot. Συνεπώς, ο αρχικός του στόχος ήταν να επιτύχει καύση σταθερής θερμοκρασίας, ωστόσο, αυτό δεν υλοποιήθηκε στην πράξη και για το λόγο αυτό υιοθέτησε τη στρατηγική της καύσης σταθερής πίεσης. Ο μονοκύλινδρος κινητήρας του Rudolph Diesel είχε διάμετρο 250 mm, διαδρομή 400 mm, για κυβισμό 20 λίτρων. Το καύσιμο ντίζελ ψεκαζόταν με ψεκασμό αέρα, μια τεχνική όπου ο πεπιεσμένος αέρας παρέσυρε το καύσιμο ντίζελ στον εγχυτήρα και το μετέφερε στον κύλινδρο. Ο κινητήρας λειτουργούσε με ταχύτητα 170 σ.α.λ. και απέδιδε 18 ίππους, με απόδοση 27% σε πλήρες φορτίο. Αυτή είναι μια κατά πολύ μεγαλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τις ατμομηχανές και τις μηχανές ανάφλεξης με σπινθήρα που χρησιμοποιούνταν εκείνη την εποχή (Ferguson & Kirkpatrick, 2016; Vlas & Cerepanova, 2024).

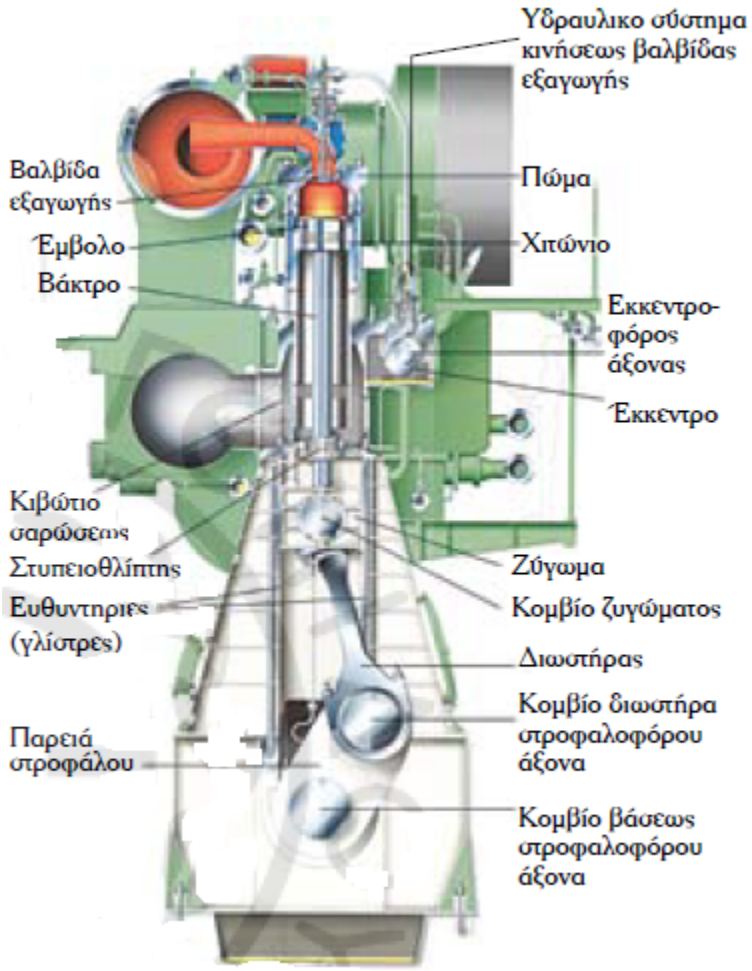
1.2 Βασικές αρχές λειτουργίας και ταξινόμηση

Οι κινητήρες καύσης διακρίνονται κυρίως σε κινητήρες εξωτερικής καύσης και κινητήρες εσωτερικής καύσης. Οι κινητήρες εξωτερικής καύσης, όπου η θερμότητα για την κίνηση του κύκλου του κινητήρα παρέχεται από το εξωτερικό του κινητήρα, μπορούν να παράγουν ενέργεια από διάφορες πηγές. Ο κύριος κινητήρας αυτού του τύπου για χρήση στην παραγωγή ενέργειας είναι ο κινητήρας Stirling. Οι κινητήρες Stirling έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στην παραγωγή ηλιακής ενέργειας, χρησιμοποιώντας θερμότητα που συλλέγεται με τη χρήση μεγάλων ηλιακών ανακλαστήρων. Έχουν επίσης αναπτυχθεί για οικιακά συστήματα συμπαραγωγής

θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, όπου το φυσικό αέριο παράγει θερμότητα που κινεί μια μηχανή θερμότητας Stirling με πρόσθετη θερμότητα από τη διαδικασία καύσης που χρησιμοποιείται για ζεστό νερό και θέρμανση χώρου. Κατ' αρχήν, οι κινητήρες μπορούν να εκμεταλλευτούν την θερμική ενέργεια από οποιαδήποτε πηγή, αλλά οι εφαρμογές όπου προσφέρουν μια οικονομικά αποδοτική λύση είναι περιορισμένες (Breeze, 2018).

Η βασική λειτουργία της ΜΕΚ περιλαμβάνει μια σειρά επαναλαμβανόμενων κύκλων και φάσεων που μετατρέπουν την ενέργεια από το καύσιμο σε μηχανική ισχύ (Vlas & Cerepanova, 2024). Η μηχανή εσωτερικής καύσης επί της ουσίας είναι μια θερμική μηχανή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια ενός καυσίμου σε μηχανική ενέργεια, η οποία συνήθως διατίθεται σε έναν περιστρεφόμενο άξονα εξόδου. Η χημική ενέργεια του καυσίμου μετατρέπεται πρώτα σε θερμική ενέργεια μέσω καύσης ή οξείδωσης με αέρα μέσα στον κινητήρα. Αυτή η θερμική ενέργεια αυξάνει τη θερμοκρασία και την πίεση των αερίων μέσα στον κινητήρα και το αέριο υψηλής πίεσης στη συνέχεια διαστέλλεται έναντι των μηχανικών μηχανισμών του κινητήρα. Αυτή η διαστολή μετατρέπεται από τους μηχανικούς συνδέσμους του κινητήρα σε έναν περιστρεφόμενο στροφαλοφόρο άξονα, ο οποίος αποτελεί την έξοδο του κινητήρα (Κλιάνης και συν., 2017). Η σχηματική απεικόνιση μιας ΜΕΚ παρέχεται στην Εικόνα 1.

Ο στροφαλοφόρος άξονας, με τη σειρά του, συνδέεται με ένα κιβώτιο ταχυτήτων ή/και σύστημα μετάδοσης κίνησης, προκειμένου να μεταδώσει την περιστρεφόμενη μηχανική ενέργεια στην επιθυμητή τελική χρήση. Για τους κινητήρες, αυτό συχνά θα είναι η πρόωση ενός οχήματος (δηλαδή, αυτοκινήτου, φορτηγού, ατμομηχανής, θαλάσσιου σκάφους ή αεροπλάνου). Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν σταθερούς κινητήρες για την κίνηση γεννητριών ή αντλιών, καθώς και φορητούς κινητήρες για εφαρμογές όπως αλυσοπρίονα και χλοοκοπτικά μηχανήματα (Ferguson & Kirkpatrick, 2016).



Εικόνα 1. Σχηματική απεικόνιση δίχρονης μηχανής (Κλιάνης και συν., 2017)

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι ΜΕΚ, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν με βάση διαφορετικά κριτήρια. Μια ταξινόμηση τις ταξινομεί σε κινητήρες συνεχούς καύσης και κινητήρες διαλείπουσας καύσης. Ο κινητήρας συνεχούς καύσης χαρακτηρίζεται από τη σταθερή ροή καυσίμου και αέρα στον κινητήρα και σταθερή ανάφλεξη που διατηρείται μέσα στον κινητήρα. Οι κινητήρες αεριοστροβίλων αποτελούν παράδειγμα κινητήρα συνεχούς καύσης (Sarkar, 2022). Ο κινητήρας διαλείπουσας καύσης χαρακτηρίζεται από την περιοδική ανάφλεξη καυσίμου και αέρα. Συνήθως αυτοί οι κινητήρες ονομάζονται εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης, οι οποίες επεξεργάζονται διακριτούς όγκους αέρα και καυσίμου με κυκλικό τρόπο. Οι πετρελαιοκινητήρες αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα εμβολοφόρων μηχανών (Proctor, 2003).

Μια εμβολοφόρα μηχανή είναι ένας θερμικός κινητήρας που χρησιμοποιεί ένα ή περισσότερα παλινδρομικά έμβολα, προκειμένου να μετατρέψει την πίεση σε περιστροφική κίνηση. Το μέγεθος των εμβολοφόρων ΜΕΚ μπορεί να κυμαίνεται από 10 kW έως πάνω από 5 MW (Liu et al., 2014). Με τα πλεονεκτήματα του χαμηλού κόστους κεφαλαίου, της γρήγορης εκκίνησης, της παρακολούθησης του φορτίου του φρέατος, της σχετικά υψηλής απόδοσης μερικού φορτίου και της γενικά υψηλής αξιοπιστίας, οι παλινδρομικοί κινητήρες έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε πολλές εφαρμογές κατανεμημένης παραγωγής, όπως σε βιομηχανικές, εμπορικές και θεσμικές εγκαταστάσεις για την παραγωγή ενέργειας (Sarkar, 2022).

Υπάρχουν δύο τύποι εμβολοφόρων ΜΕΚ, ήτοι ο κινητήρας ανάφλεξης με σπινθήρα (κύκλος Otto) ή αλλιώς βενζινοκινητήρας, όπου η ανάφλεξη πραγματοποιείται με συμπίεση (κύκλος Diesel), η οποία μπορεί να λειτουργήσει με καύσιμο ντίζελ ή βαρύ πετρέλαιο. Ένας κινητήρας ανάφλεξης με σπινθήρα ξεκινά τη διαδικασία καύσης σε κάθε κύκλο χρησιμοποιώντας ένα μπουζί ή αναφλεκτήρα. Ο αναφλεκτήρας δημιουργεί μια ηλεκτρική εκκένωση υψηλής τάσης μεταξύ δύο ηλεκτροδίων που αναφλέγει το μείγμα αέρα-καυσίμου στον θάλαμο καύσης που περιβάλλει τον αναφλεκτήρα. Στην πρώιμη φάση της ανάπτυξης κινητήρων, πριν από την εφεύρεση του ηλεκτρικού αναφλεκτήρα, χρησιμοποιούνταν οπές για την έναρξη της καύσης από μια εξωτερική φλόγα. Η διαδικασία καύσης σε έναν κινητήρα ανάφλεξης με συμπίεση ξεκινά όταν το μείγμα αέρα-καυσίμου αυτό-αναφλέγεται λόγω της υψηλής θερμοκρασίας στον θάλαμο καύσης που προκαλείται από υψηλή συμπίεση (Ferguson & Kirkpatrick, 2016).

Με βάση τον κύκλο του κινητήρα, οι ΜΕΚ μπορούν να ταξινομηθούν σε δίχρονους και τετράχρονους κινητήρες. Σε αντίθεση με τους τετράχρονους κινητήρες, οι δίχρονοι κινητήρες ολοκληρώνουν τις ίδιες διαδικασίες (εισαγωγή, συμπίεση, καύση και εκτόνωση) σε μόλις δύο διαδρομές του εμβόλου, με αποτέλεσμα μία περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα ανά κύκλο. Αυτό επιτρέπει έναν απλούστερο σχεδιασμό και δυνητικά μεγαλύτερη ισχύ εκτόνωσης σε σχέση με το μέγεθος του κινητήρα. Ωστόσο, στα μειονεκτήματα του συγκαταλέγεται ότι συχνά επιφέρει αυξημένες εκπομπές (Ferguson & Kirkpatrick, 2016). Στους τετράχρονους κινητήρες, ο κύκλος ξεκινά με τη διαδρομή εισαγωγής, όπου το έμβολο κινείται προς τα κάτω, δημιουργώντας χώρο για να εισέλθει το μείγμα αέρα-καυσίμου στον θάλαμο καύσης μέσω της ανοιχτής βαλβίδας εισαγωγής. Καθώς η βαλβίδα εισαγωγής κλείνει, το έμβολο κινείται προς τα

πάνω, συμπιέζοντας το μείγμα αέρα-καυσίμου, γεγονός που αυξάνει τη δυναμική ενέργεια του μείγματος. Το μείγμα πεπιεσμένου αέρα-καυσίμου αναφλέγεται από έναν σπινθήρα από τον αναφλεκτήρα (σε βενζινοκινητήρες) ή από τη θερμότητα που εκλύεται από τη συμπίεση (σε πετρελαιοκινητήρες), προκαλώντας ταχεία καύση. Η δύναμη αυτής της καύσης οδηγεί το έμβολο προς τα κάτω, το οποίο με τη σειρά του περιστρέφει τον στροφαλοφόρο άξονα, παράγοντας μηχανική ισχύ. Τέλος, η βαλβίδα εξαγωγής ανοίγει και το έμβολο κινείται ξανά προς τα πάνω, αποβάλλοντας τα αναλωμένα αέρια καύσης από τον κύλινδρο, ολοκληρώνοντας τον κύκλο (Vlas & Cerepova, 2024).

Με βάση τη θέση και τον αριθμό των κυλίνδρων των εμβολοφόρων ΜΕΚ, αυτές μπορούν περαιτέρω να ταξινομηθούν ως εξής (βλ. Εικόνα 2) (Ferguson & Kirkpatrick, 2016; Sarkar, 2022):

- **Μονοκύλινδρος κινητήρας:** Ο μονοκύλινδρος κινητήρας έχει έναν κύλινδρο και ένα έμβολο συνδεδεμένο στον στροφαλοφόρο άξονα.

- **Κινητήρας σε γραμμή (in-line):** Οι κύλινδροι είναι διατεταγμένοι σε ευθεία γραμμή, κατά μήκος του στροφαλοφόρου άξονα. Μπορούν να αποτελούνται από 2 έως 11 κυλίνδρους ή πιθανώς και περισσότερους. Οι τετρακύλινδροι, εξακύλινδροι και οκτακύλινδροι κινητήρες είναι παραδοσιακά οι πιο συνηθισμένοι κινητήρες αυτοκινήτων.

- **Κινητήρας σε διάταξη V:** Δύο σειρές κυλίνδρων διατεταγμένοι σε σχήμα V κατά μήκος ενός μόνο στροφαλοφόρου άξονα, με περιεχόμενη γωνία <180°. Η γωνία μεταξύ των σειρών των κυλίνδρων μπορεί να κυμαίνεται από 15° έως 120°, με πιο συνηθισμένες να είναι οι κλίσεις 60°-90°. Οι κινητήρες V έχουν ζυγό αριθμό κυλίνδρων που κυμαίνονται από 2 έως 20 ή και περισσότερους. Οι κινητήρες V6 και V8 είναι συνηθισμένοι κινητήρες αυτοκινήτων, με τους V12 και V16 να τοποθετούνται σε ορισμένα πολυτελή και υψηλής απόδοσης οχήματα.

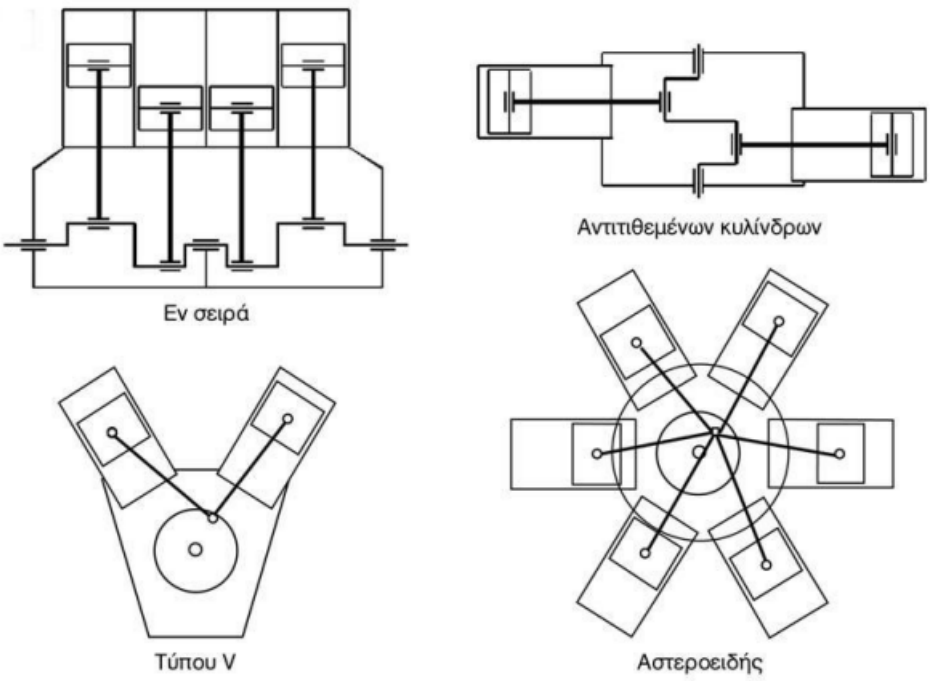
- **Κινητήρας με αντιτιθέμενους κυλίνδρους:** Δύο σειρές κυλίνδρων η μία διατεταγμένη απέναντι από την άλλη σε έναν μόνο στροφαλοφόρο άξονα (κινητήρας V με 180°V). Αυτοί οι κινητήρες είναι συνηθισμένοι σε μικρά

αεροσκάφη και σε ορισμένα αυτοκίνητα με ζυγό αριθμό κυλίνδρων, συνήθως μεταξύ 2-8 ή και περισσότερων.

- **Κινητήρας σε διάταξη W:** Παρόμοιος με έναν κινητήρα V, πέραν του του γεγονότος ότι διαθέτει τρεις σειρές κυλίνδρων στον ίδιο στροφαλοφόρο άξονα. Δεν είναι συνηθισμένος τύπος κινητήρα, αλλά μερικοί έχουν αναπτυχθεί για αγωνιστικά αυτοκίνητα. Συνήθως διαθέτει 12 κυλίνδρους με γωνία περίπου 60° μεταξύ κάθε σειράς.

- **Κινητήρας με αντιτιθέμενα έμβολα:** Δύο έμβολα σε κάθε κύλινδρο με τον θάλαμο καύσης στο κέντρο μεταξύ των εμβόλων. Μια διαδικασία μονής καύσης προκαλεί δύο διαδρομές ισχύος ταυτόχρονα, με κάθε έμβολο να ωθείται μακριά από το κέντρο και να παρέχει ισχύ σε έναν ξεχωριστό στροφαλοφόρο άξονα σε κάθε άκρο του κυλίνδρου. Η ισχύς του κινητήρα προέρχεται είτε από δύο περιστρεφόμενους στροφαλοφόρους άξονες είτε από έναν στροφαλοφόρο άξονα που ενσωματώνει πολύπλοκη μηχανική σύνδεση.

- **Αστεροειδής κινητήρας:** Κινητήρας με έμβολα τοποθετημένα σε ακτινωτή διάταξη γύρω από τον κεντρικό στροφαλοφόρο άξονα. Οι ράβδοι σύνδεσης των εμβόλων συνδέονται με μια κύρια ράβδο η οποία, με τη σειρά της, συνδέεται με τον στροφαλοφόρο άξονα. Η συστοιχία των κυλίνδρων σε έναν ακτινωτό κινητήρα έχει πάντα έναν περιττό αριθμό κυλίνδρων που κυμαίνεται από 3 έως 13 ή περισσότερους. Τέτοιου είδους κινητήρες τοποθετούνται σε πολλά μεσαίου και μεγάλου μεγέθους αεροσκάφη με έλικα.



Εικόνα 2. Διαφορετικοί τύποι εμβολοφόρων ΜΕΚ (πηγή: Τζιράκης, χ.χ.)

1.3 Σχέση ΜΕΚ με τις εκπομπές CO_2 και άλλων ρύπων

Οι ΜΕΚ έχουν αποτελέσει τα κύρια συστήματα πρόωσης για μια ποικιλία μέσων μεταφοράς, συμπεριλαμβανομένων των επιβατικών οχημάτων, των εμπορευματικών μεταφορών, των θαλάσσιων πλοίων και της αεροπορίας. Ενώ η τεχνολογία εσωτερικής καύσης έχει διευκολύνει την άνευ προηγουμένου οικονομική και κοινωνική κινητικότητα τον τελευταίο αιώνα, έχει ταυτόχρονα αναδειχθεί σε σημαντικό παράγοντα στις παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και στην αστική ατμοσφαιρική ρύπανση. Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των ΜΕΚ προέρχεται τόσο από τα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά, όσο και από τις εκπομπές κύκλου ζωής που σχετίζονται με την εξόρυξη, την επεξεργασία και τη διανομή καυσίμων (Idris & Koestoer, 2023).

Η ραγδαία εξάντληση των φυσικών πόρων εγείρει σήμερα σημαντικές ανησυχίες σε ολόκληρο τον κόσμο, με την ταχεία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και η εκβιομηχάνιση είναι οι δύο κύριες αιτίες της εξάντλησης των πόρων. Περαιτέρω, ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξάνεται με ανησυχητικό ρυθμό 83,1 εκατομμυρίων ετησίως (Malik et al., 2023). Η βιομηχανία μεταφορών αποτελείται κυρίως από οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης που καταναλώνουν περίπου το 30% της παγκόσμιας

ενέργειας. Επιπλέον, οι ΜΕΚ ευθύνονται για το 17% των αερίων του θερμοκηπίου, τα οποία επιφέρουν βλαπτικές επιδράσεις στη βιόσφαιρα (Usman et al., 2023). Σύμφωνα με πρόσφατα στατιστικά στοιχεία (Thakur et al., 2020), ο τομέας των μεταφορών αντιπροσώπευε περίπου τα δύο τρίτα της παγκόσμιας κατανάλωσης πετρελαίου, η οποία ανήλθε στα 1,9 εκατομμύρια βαρέλια την ημέρα (Malik et al., 2025). Σήμερα, περίπου το 95% των παγκόσμιων μεταφορών τροφοδοτείται από υγρά καύσιμα που προέρχονται από ορυκτά καύσιμα (Leach et al., 2020).

Το κλειδί για την επίτευξη ενός μέλλοντος με μηδενικές καθαρές εκπομπές είναι η στροφή του ενεργειακού τομέα προς τη βιωσιμότητα, αξιοποιώντας περισσότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Λόγω της ισχυρής εξάρτησης από τα καύσιμα με βάση το πετρέλαιο, οι οδικές μεταφορές αντιπροσώπευαν το 37% όλων των εκπομπών CO_2 που σχετίζονται με την ενέργεια παγκοσμίως το 2021, καθιστώντας τες την πιο σημαντική αιτία της κλιματικής αλλαγής και της υπερθέρμανσης του πλανήτη (Creutzig et al., 2015). Η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας για πετρέλαιο θα συνεχίσει να αυξάνεται και να κορυφώνεται μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 2030, καθώς η κατανάλωση ενέργειας στον τομέα των οδικών μεταφορών αναμένεται να αυξηθεί κατά 1,26%, με αύξηση 1% στην αστικοποίηση που είναι πιθανότερο να σημειωθεί στην Ασία και την Αφρική. Μία από τις πιο σημαντικές προκλήσεις που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα είναι η μείωση των εκπομπών από τον κλάδο των μεταφορών (Timilsina et al., 2025).

Η κύρια πηγή εκπομπών από τις ΜΕΚ είναι η καύση βενζίνης και ντίζελ, η οποία απελευθερώνει σημαντικές ποσότητες CO_2, ενός βασικού ανθρωπογενούς αερίου του θερμοκηπίου που συμβάλλει στην κλιματική αλλαγή. Εκτός από το CO_2, οι ΜΕΚ εκπέμπουν μια σειρά από άλλους ρύπους με επιβλαβείς επιπτώσεις στο περιβάλλον και τη δημόσια υγεία. Σε αυτούς περιλαμβάνονται τα οξείδια του αζώτου (NO_x), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO - Carbon Monoxide), οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες (HC - Unburned Hydrocarbons) και τα αιωρούμενα σωματίδια (PM - Particulate Matter), τα οποία όλα σχετίζονται με την υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα και τις δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία. Τα οξείδια του αζώτου, ειδικότερα, συμβάλλουν στον σχηματισμό όζοντος στο επίπεδο του εδάφους και δευτερογενούς σωματιδιακής ρύπανσης, ενώ τα σωματίδια έχουν συνδεθεί με αναπνευστικές και καρδιαγγειακές παθήσεις. Τα αστικά περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα οχημάτων αντιμετωπίζουν

αυξημένα επίπεδα αυτών των ρύπων, επιδεινώνοντας τους κινδύνους για τη δημόσια υγεία, ιδιαίτερα για τους ευάλωτους πληθυσμούς (Liu et al., 2024).

Ωστόσο, οι λειτουργικές εκπομπές αντιπροσωπεύουν μόνο μία διάσταση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τις ΜΕΚ. Η εξόρυξη, η διύλιση και η μεταφορά ορυκτών καυσίμων εισάγουν πρόσθετες εκπομπές σε διάφορα στάδια της αλυσίδας εφοδιασμού καυσίμων. Οι αξιολογήσεις του κύκλου ζωής υποδηλώνουν ότι οι δραστηριότητες που σχετίζονται με την εξόρυξη αργού πετρελαίου, η καύση και η διύλιση συμβάλλουν σημαντικά στο συνολικό αποτύπωμα άνθρακα των ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούνται στις ΜΕΚ (US EPA, 2022). Για παράδειγμα, οι εκπομπές μεθανίου στο πλαίσιο των δραστηριοτήτων για την εξόρυξη και μεταφορά του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, ένα ισχυρό αέριο θερμοκηπίου με δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη πάνω από 25 φορές μεγαλύτερο από το CO_2 σε μια περίοδο 100 ετών, επιδεινώνουν τις κλιματικές επιπτώσεις της χρήσης των ΜΕΚ (Smit et al., 2024).

Για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της χρήσης των ΜΕΚ, έχουν καταβληθεί σημαντικές ερευνητικές και πολιτικές προσπάθειες προς εναλλακτικά συστήματα μετάδοσης κίνησης και καύσιμα χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (HEV – Hybridic Electric Vehicles) και τα plug-in υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (PHEVs – Plug-in Hybrid Electric Vehicles) συνδυάζουν κινητήρες εσωτερικής καύσης με ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης για τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών, ιδιαίτερα σε αστικές συνθήκες οδήγησης. Επιπλέον, οι εξελίξεις στα συνθετικά καύσιμα και τα βιοκαύσιμα προσφέρουν πιθανές οδούς για τη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα των υφιστάμενων στόλων ΜΕΚ. Τα συνθετικά καύσιμα που παράγονται μέσω διαδικασιών μετατροπής ενέργειας σε υγρό (PtL - Power-to-Liquid) χρησιμοποιώντας ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια και δεσμευμένο CO_2 μπορούν να είναι ουδέτερα ως προς τον άνθρακα καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους (Horváth & Szemesová, 2023). Ομοίως, τα βιοκαύσιμα που προέρχονται από βιομάζα αποβλήτων ή φύκια μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις καθαρές εκπομπές CO_2, αν και η βιωσιμότητά τους εξαρτάται από τις πηγές πρώτης ύλης και τις πρακτικές χρήσης της γης (Demirbas, 2009).

Οι εξελίξεις στην τεχνολογία των κινητήρων, όπως η υπερσυμπίεση, ο άμεσος ψεκασμός και ο μεταβλητός χρονισμός των βαλβίδων, έχουν συμβάλει στην αυξημένη

απόδοση των ΜΕΚ, μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων. Οι στρατηγικές υβριδισμού και ηλεκτροκίνησης συνδυάζουν τα οφέλη των κινητήρων εσωτερικής καύσης με εκείνα των ηλεκτρικών κινητήρων και των μπαταριών, οδηγώντας στη δημιουργία οχημάτων που εξαρτώνται λιγότερο από τα ορυκτά καύσιμα και παράγουν λιγότερες εκπομπές. Αυτοί οι παράγοντες υπογραμμίζουν τις περιβαλλοντικές προκλήσεις που θέτουν οι κινητήρες εσωτερικής καύσης και υπογραμμίζουν τη σημασία της συνεχούς καινοτομίας και της υιοθέτησης καθαρότερων τεχνολογιών για τον μετριασμό αυτών των επιπτώσεων (Vlas & Cerepanova, 2024).

Παρά τις σημαντικές εξελίξεις στην τεχνολογία των ΜΕΚ που στοχεύουν στη μείωση των εκπομπών, όπως οι καταλυτικοί μετατροπείς, τα συστήματα ανακυκλοφορίας καυσαερίων (EGR - Exhaust Gas Recirculation) και τα φίλτρα σωματιδίων ντίζελ (DPF - Diesel Particulate Filters), οι ΜΕΚ εξακολουθούν να αποτελούν μια σημαντική πηγή εκπομπών. Ακόμη και η τελευταία γενιά κινητήρων που συμμορφώνονται με τις προδιαγραφές Euro 6/VI, αν και περισσότερο φιλικές προς το περιβάλλον σε σύγκριση με τα προηγούμενα μοντέλα, συνεχίζουν να εκπέμπουν ρύπους υπό πραγματικές συνθήκες οδήγησης που υπερβαίνουν τα όρια πιστοποίησης του εργαστηρίου. Αυτή η ασυμφωνία υπογραμμίζει τους περιορισμούς των τρεχόντων κανονιστικών πλαισίων και το επίμονο περιβαλλοντικό βάρος των μεταφορών με κινητήρες εσωτερικής καύσης (Babamohammadi et al., 2025).

Περαιτέρω, οι θερμοδυναμικοί περιορισμοί των ΜΕΚ επιβάλλουν εγγενείς περιορισμούς στην απόδοση. Ακόμη και με τις τεχνολογίες αιχμής, η θερμική απόδοση τους σπάνια υπερβαίνει το 40% σε πραγματικές συνθήκες, με σημαντικές απώλειες ενέργειας μέσω θερμότητας και τριβής (Heywood, 2018). Αυτή η αναποτελεσματικότητα, σε συνδυασμό με την εξάρτηση από καύσιμα έντασης άνθρακα, υπογραμμίζει την επείγουσα ανάγκη μετάβασης σε τεχνολογίες οχημάτων μηδενικών εκπομπών, όπως τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (BEV – Battery Electric Vehicles) και τα οχήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου (FCEV- Fuel Cell Electric Vehicles), ιδιαίτερα για τομείς, όπου η ταχεία απαλλαγή από τον άνθρακα είναι εφικτή (Zhang et al., 2025).

Παρά την αυξανόμενη δημοτικότητα των ηλεκτρικών οχημάτων, οι ΜΕΚ προβλέπεται να παραμείνουν ένα σημαντικό μέρος των κυκλοφορούντων οχημάτων. Αυτή η διαρκής παρουσία αποδίδεται σε διάφορους παράγοντες, όπως η ευελιξία των κινητήρων εσωτερικής καύσης στην προσαρμογή τους σε διάφορα καύσιμα όπως υδρογόνο, βενζίνη, ντίζελ, αιθανόλη και βιοντίζελ, και η καταλληλότητά τους για ένα ευρύ φάσμα συνθηκών οδήγησης. Η ίδια η αγορά κινητήρων εσωτερικής καύσης προβλέπεται να αγγίξει το εντυπωσιακό μέγεθος των 90.000 δισεκατομμυρίων δολαρίων έως το 2029, λόγω της εκθετικής ανάπτυξης σε τομείς όπως η γεωργία, οι κατασκευές, η εξόρυξη και η παραγωγή ενέργειας. Η παγκόσμια έλλειψη υποδομών για τα ηλεκτρικά οχήματα ευθύνεται εν μέρει για τη συνεχή ανάπτυξη της αγοράς των ΜΕΚ. Αυτό το σενάριο υπογραμμίζει την ανάγκη προσαρμογής της αγοράς ανταλλακτικών και εξαρτημάτων (aftermarket) αναπτύσσοντας νέα προϊόντα και υπηρεσίες που απευθύνονται τόσο σε ηλεκτρικά οχήματα όσο και σε οχήματα με ΜΕΚ (Malik et al., 2025).

Κεφάλαιο 2. Εναλλακτικά Καύσιμα & ΜΕΚ

2.1 Ορισμός & κατηγοριοποίηση εναλλακτικών καυσίμων

Η χρήση εναλλακτικών καυσίμων για τις ΜΕΚ έχει προσελκύσει την προσοχή της επιστημονικής κοινότητας και της αυτοκινητοβιομηχανίας, δεδομένου ότι έχει αναγνωριστεί ως μια κρίσιμη οδός για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, την ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας και τον μετριασμό των συνεπειών της κατανάλωσης των ορυκτών καυσίμων. Ιστορικά, τα καύσιμα με βάση το πετρέλαιο, όπως η βενζίνη και το ντίζελ, τροφοδοτούν τους περισσότερους κινητήρες εσωτερικής καύσης, αλλά οι αυξανόμενες ανησυχίες σχετικά με τη συμβολή τους στην ατμοσφαιρική ρύπανση, τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και την εξάντληση των πεπερασμένων πόρων έχουν οδηγήσει σε μια στροφή προς πιο βιώσιμες και φιλικές προς το περιβάλλον εναλλακτικές λύσεις καυσίμων (Enoma et al., 2022). Καθώς ο κόσμος αντιμετωπίζει την κλιματική αλλαγή, την υποβάθμιση του περιβάλλοντος και την εξάντληση των συμβατικών ενεργειακών πόρων, υπάρχει μια συντονισμένη ώθηση για την ανάπτυξη και εφαρμογή εναλλακτικών καυσίμων που μειώνουν τις εκπομπές άνθρακα, βελτιώνουν την ποιότητα του αέρα και διασφαλίζουν ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό μέλλον (Hafis et al., 2025).

Η κατηγορία των εναλλακτικών καυσίμων περιλαμβάνει διάφορους τύπους ενέργειας, πέραν των παραδοσιακά χρησιμοποιούμενων ορυκτών καυσίμων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους κινητήρες εσωτερικής καύσης για την τροφοδότησή τους. Έχουν σχεδιαστεί ως πολλά υποσχόμενα υποκατάστατα των παραδοσιακών καυσίμων που παράγονται από πετρέλαιο, όπως η βενζίνη ή το ντίζελ, και μπορούν να παραχθούν από ανανεώσιμες ή μη συμβατικές πηγές. Η καύση εναλλακτικού καυσίμου σε κινητήρες εσωτερικής καύσης βρίσκεται στο επίκεντρο της αυξανόμενης φιλοδοξίας για την αντιμετώπιση των οικολογικών προβλημάτων, την αποτελεσματική διαχείριση της κλιματικής αλλαγής και την απελευθέρωση των πηγών ενέργειας τόσο για την παραγωγή ενέργειας, όσο και για τις μεταφορές (Gosar & Priyam, 2025).

Τα εναλλακτικά καύσιμα μπορούν να προέρχονται από ανανεώσιμους βιολογικούς πόρους, να συντίθενται από δεσμευμένο διοξείδιο του άνθρακα και ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια ή να προέρχονται από φυσικά στοιχεία που βρίσκονται σε αφθονία

όπως το υδρογόνο. Οποιοδήποτε καύσιμο προέρχεται από βιομάζα, όπως το βιοντίζελ και η βιοαιθανόλη, ταξινομείται ως βιοκαύσιμο. Στην περίπτωση των οδικών μεταφορών, τα εναλλακτικά καύσιμα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω με βάση τη συμβατότητά τους με τους υπάρχοντες κινητήρες καύσης και τις υποδομές ή την απαίτησή τους για ηλεκτρικές κινήσεις μέσω κυψελών καυσίμου ή μπαταριών (Gray et al., 2021). Για οποιοδήποτε καύσιμο, η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα -τόσο με βάση τη μάζα, όσο και τον όγκο- είναι γενικά επιθυμητή για την ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων μάζας και χώρου αποθήκευσης. Παρόλο που τα εναλλακτικά καύσιμα χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές στον τομέα των μεταφορών, η εφαρμογή τους στις χερσαίες, θαλάσσιες και αεροπορικές μεταφορές παρουσιάζει σημαντική πολυπλοκότητα και μοναδικές προκλήσεις (Al-Mohannadi et al., 2024).

Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα εναλλακτικών καυσίμων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις ΜΕΚ, συμπεριλαμβανομένων (Enoma et al., 2022; Gosar & Priyam, 2025):

1. **Βιοκαύσιμα:** Τα βιοκαύσιμα προέρχονται από οργανικούς πόρους, για παράδειγμα καλλιέργειες, υπολείμματα καλλιεργειών και βιομάζα αποβλήτων. Μεταξύ των διαφόρων επιλογών βιοκαυσίμων, το βιοντίζελ, η βιοαιθανόλη και το βιοαέριο είναι τα πιο διαδεδομένα. Το βιοκαύσιμο είναι ένας τύπος ανανεώσιμης ενέργειας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη της διαφοροποίησης του ενεργειακού μείγματος, καθώς και για τη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα.
2. **Υδρογόνο:** Αυτό το καύσιμο μπορεί να ληφθεί από μέσα όπως η διάσπαση του νερού ή από την αναμόρφωση φυσικών αερίων. Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε οχήματα κυψελών καυσίμου (FCV- Fuel Cell Vehicles), όσο και σε κινητήρες εσωτερικής καύσης. Δεν παράγει κανένα είδος εκπομπής όταν χρησιμοποιείται σε κυψέλες καυσίμου, ενώ συμβάλλει σημαντικά στη μείωση των εκπομπών, όταν χρησιμοποιείται σε κινητήρες εσωτερικής καύσης με τον κατάλληλο καταλύτη.
3. **Συνθετικά Καύσιμα**: Τα συνθετικά καύσιμα παρασκευάζονται με μια διαδικασία που χρησιμοποιεί ως βάση πρώτες ύλες είτε ανανεώσιμες, είτε μη ανανεώσιμες. Οι οδοί για την παραγωγή συνθετικών καυσίμων μπορούν να περιλαμβάνουν, για παράδειγμα, τη μετατροπή μεθανόλης σε βενζίνη, τη σύνθεση Fischer-Tropsch και τη σύνθεση διμεθυλαιθέρα (DME - Dimethyl

Ether). Τα τεχνητά καύσιμα ως υποκατάστατο των συμβατικών καυσίμων μπορούν να έχουν παρόμοιες ιδιότητες και ενδεχομένως να αποτελέσουν λύση στο ζήτημα των μεταφορών με ουδέτερο ισοζύγιο άνθρακα.

4. **Αέριο σύνθεσης πλούσιο σε υδρογόνο (Syngas):** Το αέριο σύνθεσης μπορεί να μετατραπεί σε καύσιμο ή χημικά, ενώ λαμβάνεται με αεριοποίηση βιομάζας, άνθρακα ή αποβλήτων και αποτελείται από ένα μείγμα υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα. Το αέριο σύνθεσης είναι καύσιμο για κινητήρες εσωτερικής καύσης, με το πρόσθετο πλεονέκτημα ότι χρησιμοποιείται από ανανεώσιμους πόρους ή απόβλητα, οδηγώντας στην παραγωγή καθαρής ενέργειας.
5. **Αμμωνία:** Η αμμωνία είναι ένα καύσιμο που δεν περιέχει άνθρακα και μπορεί να παραχθεί από ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια και ατμοσφαιρικό άζωτο, αντίστοιχα. Μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί είτε σε κινητήρες εσωτερικής καύσης, είτε ως εναλλακτική πηγή φορέων υδρογόνου σε κυψέλες καυσίμου με μικρή πιθανότητα μεταφοράς μηδενικών εκπομπών.

2.2 Κριτήρια αξιολόγησης εναλλακτικών καυσίμων

Η αξιολόγηση των εναλλακτικών καυσίμων απαιτεί μια πολυδιάστατη προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη την περιβαλλοντική απόδοση, την τεχνική σκοπιμότητα, την οικονομική βιωσιμότητα και την επιχειρησιακή αποδοτικότητα τους. Μεταξύ των πιο κρίσιμων παραγόντων αξιολόγησης είναι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά τον κύκλο ζωής τους, η συμβατότητα με τις υπάρχουσες ΜΕΚ, η διαθεσιμότητα και το κόστος παραγωγής, καθώς και τα χαρακτηριστικά απόδοσης και καύσης κάθε τύπου καυσίμου (Sadeq, 2024).

Οι εκπομπές CO_2 κατά τον κύκλο ζωής αποτελούν θεμελιώδη δείκτη της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας των εναλλακτικών καυσίμων. Τα βιοκαύσιμα πρώτης γενιάς, όπως το βιοντίζελ και η βιοαιθανόλη, που προέρχονται από καλλιέργειες όπως η ελαιοκράμβη ή το καλαμπόκι, μπορούν να επιτύχουν μειώσεις CO_2 της τάξεως των 45-65% σε σύγκριση με το συμβατικό ντίζελ και τη βενζίνη, υπό την προϋπόθεση ότι η έμμεση αλλαγή χρήσης γης είναι ελάχιστη. Ωστόσο, αυτές οι μειώσεις μπορούν να υπονομευτούν σημαντικά εάν η παραγωγή βιοκαυσίμων ανταγωνίζεται τις καλλιέργειες τροφίμων ή συμβάλλει στην αποψίλωση των δασών (Enoma et al., 2022).

Τα προηγμένα βιοκαύσιμα, συμπεριλαμβανομένης της κυτταρινικής αιθανόλης από γεωργικά υπολείμματα και των καυσίμων που προέρχονται από φύκια, προσφέρουν ακόμη μεγαλύτερες δυνατότητες, με την εξοικονόμηση CO_2 κατά τον κύκλο ζωής τους να φτάνει έως και το 115%, όταν ληφθούν υπόψη τα παραπροϊόντα και η δέσμευση άνθρακα. Τα συνθετικά καύσιμα που παράγονται μέσω των διαδικασιών μετατροπής της ενέργειας σε υγρό (PtL) χρησιμοποιώντας ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια και δεσμευμένο ατμοσφαιρικό CO_2 μπορούν να είναι αποτελεσματικά ουδέτερα ως προς τον άνθρακα, αν και αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη χρήση 100% ανανεώσιμης ενέργειας σε όλη τη διαδικασία παραγωγής (Reddy et al., 2024).

Η συμβατότητα των εναλλακτικών καυσίμων με τις υπάρχουσες υποδομές ΜΕΚ είναι μια άλλη κρίσιμη παράμετρος, ειδικά όσον αφορά την ελαχιστοποίηση του κόστους αναβάθμισης και τη διασφάλιση της ευρείας υιοθέτησής τους. Μείγματα αιθανόλης έως και 20-30% μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα με μικρές ή καθόλου τροποποιήσεις, και τα μείγματα βιοντίζελ (π.χ., B20) είναι ευρέως αποδεκτά σε κινητήρες ντίζελ ανάφλεξης με συμπίεση. Τα μείγματα ή το καθαρό βιοντίζελ ενδέχεται να απαιτούν προσαρμογές, ιδιαίτερα για παλαιότερα οχήματα. Αντίθετα, τα συνθετικά καύσιμα PtL θεωρούνται "drop-in" αντικαταστάσεις λόγω της χημικής τους ομοιότητας με τα συμβατικά καύσιμα, προσφέροντας την απρόσκοπτη ενσωμάτωση σε τρέχοντες κινητήρες, αγωγούς και σταθμούς καυσίμων χωρίς την απαίτηση τεχνικών τροποποιήσεων (Al-Mohannadi et al., 2024).

Η σκοπιμότητα των εναλλακτικών καυσίμων διαμορφώνεται επίσης από τη διαθεσιμότητά τους και το κόστος παραγωγής τους. Τα βιοκαύσιμα πρώτης γενιάς επωφελούνται από τις υπάρχουσες γεωργικές αλυσίδες εφοδιασμού, αλλά θέτουν προκλήσεις όσον αφορά τη χρήση γης και την επισιτιστική ασφάλεια. Αντίθετα, τα βιοκαύσιμα δεύτερης γενιάς - που παράγονται από βιομάζα ή απόβλητα - είναι πιο βιώσιμα, αλλά δεν είναι ακόμη εμπορικά διαδεδομένα λόγω του υψηλού κόστους επεξεργασίας και της περιορισμένης τεχνολογικής ωριμότητας (IEA, 2023). Περαιτέρω, τα συνθετικά καύσιμα παραμένουν σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης, με το κόστος παραγωγής τους να κυμαίνεται από 1,8 έως 4,3 ευρώ ανά κιλό, το οποίο είναι σημαντικά υψηλότερο σε σύγκριση με εκείνο των συμβατικών καυσίμων και αποδίδεται στις κοστοβόρες διαδικασίες που απαιτούνται για τη σύνθεση τους. Η

επίτευξη ανταγωνιστικότητας κόστους για τέτοια καύσιμα απαιτεί επενδύσεις μεγάλης κλίμακας, κανονιστική υποστήριξη και συνεχή καινοτομία (Sadeq, 2024).

Τέλος, η απόδοση και τα χαρακτηριστικά καύσης των εναλλακτικών καυσίμων επηρεάζουν άμεσα την απόδοση του κινητήρα, τις εκπομπές και τις ανάγκες συντήρησης τους. Η αιθανόλη διαθέτει υψηλό αριθμό οκτανίων, επιτρέποντας υψηλότερους λόγους συμπίεσης και βελτιωμένη απόδοση καύσης σε κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα, αν και η χαμηλότερη ενεργειακή της πυκνότητα οδηγεί σε υψηλότερη ογκομετρική κατανάλωση καυσίμου. Το βιοντίζελ έχει ευνοϊκές ιδιότητες καύσης, όπως υψηλότερη λιπαντικότητα και αριθμό κετανίων σε σύγκριση με το συμβατικό ντίζελ, γεγονός που μπορεί να βελτιώσει τη σταθερότητα της καύσης (Dell'Aversano et al., 2024). Ωστόσο, μπορεί να οδηγεί στην παραγωγή υψηλών εκπομπών οξειδίων του αζώτου και μπορεί να αντιμετωπίσει προβλήματα λειτουργικότητας σε χαμηλές θερμοκρασίες. Τα συνθετικά καύσιμα που είναι σχεδιασμένα, ώστε να μιμούνται τα συμβατικά καύσιμα, τείνουν να εμφανίζουν συνεπή συμπεριφορά καύσης, χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο και μειωμένες εκπομπές σωματιδίων λόγω της ομοιόμορφης μοριακής δομής και καθαρότητάς τους (Heywood, 2018).

2.3 Πλεονεκτήματα & προκλήσεις εναλλακτικών καυσίμων

Όπως προαναφέρθηκε, η συμβατική εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, κυρίως τη βενζίνη και το ντίζελ, έχει συνδεθεί εδώ και καιρό με αρνητικές περιβαλλοντικές συνέπειες, συμπεριλαμβανομένης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Fayad et al., 2022). Σε απάντηση σε αυτές τις προκλήσεις, ο τομέας των μεταφορών έχει βιώσει έναν σημαντικό μετασχηματισμό μέσω της ανάπτυξης και υιοθέτησης οχημάτων εναλλακτικών καυσίμων, τα οποία υπόσχονται τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ενώ παράλληλα καλύπτουν την αυξανόμενη παγκόσμια ανάγκη για μετακινήσεις (Alonso-Villar et al., 2022). Ο τομέας των οχημάτων και των δημόσιων συγκοινωνιών βρίσκεται στο σταυροδρόμι μιας μετάβασης προς πιο βιώσιμες και φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις (Havrysh et al., 2022). Τα δίκτυα δημόσιων συγκοινωνιών είναι απαραίτητα για τη διατήρηση της αποτελεσματικής κινητικότητας, μειώνοντας παράλληλα την κυκλοφορία και τις

εκπομπές ρύπων, καθώς η αστικοποίηση και η αύξηση του πληθυσμού επιτείνονται (Milja et al., 2020; Hafis et al., 2025).

Χρησιμοποιώντας οργανικά υλικά, τα βιοκαύσιμα μπορούν να συμβάλουν στην μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, καθώς απελευθερώνουν την ίδια ποσότητα CO^2 που απορροφήθηκε από τις καλλιέργειες κατά την ανάπτυξή τους, συμβάλλοντας έτσι σε έναν κλειστό κύκλο άνθρακα (Ghadikolaei et al., 2021). Η επείγουσα ανάγκη μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου υπογραμμίζεται από δεδομένα που δείχνουν ότι τα ετήσια επίπεδα αερίων του θερμοκηπίου έφτασαν τα 54,59 δισεκατομμύρια τόνους το 2021, συμβάλλοντας στην αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας, η οποία κορυφώθηκε στους +1,48 °C πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα τον Σεπτέμβριο του 2023 (Dell'Aversano et al., 2024).

Αυτή η τάση υπερθέρμανσης του πλανήτη έχει συνδεθεί άμεσα με την υποβάθμιση του περιβάλλοντος, την αυξημένη συχνότητα φυσικών καταστροφών και τις σημαντικές οικονομικές απώλειες. Για τον μετριασμό αυτών των επιπτώσεων, είναι επιτακτική η ταχεία μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, κυρίως με την υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούνται σήμερα με καθαρότερες, πιο βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις. Σε αυτό το πλαίσιο, τα μη ορυκτά συνθετικά καύσιμα, όπως τα βιοκαύσιμα, θα μπορούσαν να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο (Newman & Noy, 2023).

Επιπλέον, τα βιοκαύσιμα μπορούν να ενσωματωθούν με τις υπάρχουσες τεχνολογίες κινητήρων, επιτρέποντας μια σχετικά απλή μετάβαση από τα συμβατικά καύσιμα σε καθαρότερες εναλλακτικές λύσεις. Το φυσικό αέριο, που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο, είναι μια άλλη πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση λόγω των καθαρότερων ιδιοτήτων καύσης του σε σύγκριση με τα καύσιμα με βάση το πετρέλαιο. Το φυσικό αέριο καίγεται πιο αποτελεσματικά, παράγοντας λιγότερες εκπομπές σωματιδίων, οξείδια του αζώτου και διοξείδιο του άνθρακα, καθιστώντας το βασικό παράγοντα στην αναζήτηση καθαρότερων μεταφορών και βιομηχανικών διεργασιών (Dell'Aversano et al., 2024). Ομοίως, το υδρογόνο, όταν χρησιμοποιείται σε κυψέλες καυσίμου ή κινητήρες εσωτερικής καύσης, παράγει μόνο υδρατμούς ως υποπροϊόν, αντιπροσωπεύοντας μία από τις καθαρότερες διαθέσιμες επιλογές καυσίμου. Οι κινητήρες που λειτουργούν με υδρογόνο, αν και βρίσκονται ακόμη σε στάδια ανάπτυξης για ευρεία υιοθέτηση, παρουσιάζουν τεράστιες δυνατότητες στην επίτευξη

μεταφορών μηδενικών εκπομπών και στη σημαντική μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα (Hassan et al., 2023).

Τα ηλεκτρικά λεωφορεία και τραμ μετασχηματίζουν επίσης την αστική κινητικότητα, εξαλείφοντας τις εκπομπές καυσαερίων και ενισχύοντας τη βιωσιμότητα, την μειωμένη εκπομπή θορύβου και την καθαριότητα των συστημάτων δημοτικών μεταφορών (Hafis et al., 2025). Τα ηλεκτρικά οχήματα που κινούνται με ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές όπως η αιολική, η ηλιακή και η υδροηλεκτρική ενέργεια, κερδίζουν επίσης έδαφος. Αν και δεν χρησιμοποιούν τα παραδοσιακά καύσιμα με τον ίδιο τρόπο όπως τα οχήματα με ΜΕΚ, αντιπροσωπεύουν μια επαναστατική μετατόπιση του τομέα των μεταφορών, παρέχοντας άμεση μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου όταν συνδυάζονται με καθαρές πηγές ενέργειας. Ωστόσο, η υιοθέτηση ηλεκτρικών οχημάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ανάπτυξη αποδοτικών μπαταριών και υποδομών φόρτισης (Lindstad et al., 2021).

Επιπλέον, τα εναλλακτικά καύσιμα χρησιμοποιούν συχνά οργανικά απόβλητα ή γεωργικά υπολείμματα ως πρώτες ύλες, ενισχύοντας την κυκλική οικονομία και μειώνοντας τα απόβλητα. Αυτό συμβάλλει στη διαχείριση των αποβλήτων και μειώνει την εξάρτηση από τους χώρους υγειονομικής ταφής και τις περιβαλλοντικές προκλήσεις που σχετίζονται με τη χρήση τους (Niekurzak et al., 2024). Η μετάβαση σε βιώσιμα καύσιμα απαιτεί την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και υποδομών και τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας. Αυτή η μετάβαση ενθαρρύνει την καινοτομία, την έρευνα και την ανάπτυξη, δημιουργώντας θέσεις εργασίας και επεκτείνοντας οικονομικά (Hafis et al., 2025).

Επιπλέον, η έλευση των οχημάτων HFC αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη λύση στην κινητικότητα, εφόσον υπόσχεται την πραγματοποίηση μετακινήσεων με την εκπομπή μηδενικών εκπομπών (Hassan et al., 2023). Αυτά τα οχήματα, που κινούνται με υδρογόνο, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλεκτροχημικής αντίδρασης και εκπέμπουν μόνο υδρατμούς ως καυσαέρια. Καθώς η τεχνολογία HFC συνεχίζει να εξελίσσεται, η ενσωμάτωση του υδρογόνου στα συστήματα μεταφορών θα μπορούσε να αποτελέσει ένα αποφασιστικό βήμα στην επίτευξη πραγματικά βιώσιμης κινητικότητας, μηδενικών εκπομπών, ιδιαίτερα για εφαρμογές βαρέων οχημάτων όπως φορτηγά και λεωφορεία. Επιπλέον, η ανάπτυξη έξυπνων πόλεων, με υποδομές βελτιστοποιημένες για οχήματα εναλλακτικών καυσίμων και ανανεώσιμες πηγές

ενέργειας, θα επιτρέψει την απρόσκοπτη ενσωμάτωση αυτών των καυσίμων στην ανθρώπινη καθημερινότητα και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής σε αστικά περιβάλλοντα (Kurc et al., 2024).

Η υιοθέτησή τους αποτελεί το κλειδί για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων των εκπομπών των οχημάτων στην υγεία και την κάλυψη των αυξανόμενων απαιτήσεων μεταφοράς του παγκόσμιου πληθυσμού. Τα επόμενα χρόνια, η συνεχιζόμενη καινοτομία και οι επενδύσεις σε τεχνολογίες εναλλακτικών καυσίμων, παράλληλα με τα απαραίτητα πλαίσια πολιτικής και την ανάπτυξη υποδομών, θα καθορίσουν πόσο αποτελεσματικά μπορούν να εφαρμοστούν αυτές οι λύσεις σε μεγάλη κλίμακα. Τελικά, η μετάβαση σε εναλλακτικά καύσιμα δεν είναι απλώς μια τεχνολογική μετατόπιση, αλλά μια αλλαγή παραδείγματος που έχει τη δυνατότητα να αναδιαμορφώσει τον τρόπο με τον οποίο κινούμαστε, αναπνέουμε και αλληλοεπιδρούμε με τους αστικούς χώρους, ανοίγοντας το δρόμο για καθαρότερες, υγιέστερες και πιο βιώσιμες πόλεις παγκοσμίως (Hafis et al., 2025). Οι βιώσιμες μεταφορές όχι μόνο μετριάζουν την περιβαλλοντική υποβάθμιση, αλλά προάγουν και την εξοικονόμηση ενέργειας, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα και την βιωσιμότητα των πόλεων και των κοινοτήτων (Jaiswal et al., 2022). Επιπλέον, η ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών, λύσεων αποθήκευσης ενέργειας και έξυπνων δικτύων αποτελούν αναπόσπαστα στοιχεία του μελλοντικού ενεργειακού τοπίου, αποτελώντας τις κινητήριες δυνάμεις πίσω από την πρόοδο προς ένα πιο πράσινο και πιο βιώσιμο μέλλον (Kougias et al., 2020).

Παρά τα σημαντικά οφέλη που παρέχει η αξιοποίηση των εναλλακτικών καυσίμων, η ευρύτερη υιοθέτηση τους αντιμετωπίζει μια σειρά σημαντικών προκλήσεων (Foretich et al., 2021). Τα εναλλακτικά καύσιμα αντιμετωπίζουν εμπόδια όπως το υψηλό κόστος παραγωγής, η περιορισμένη δυνατότητα κλιμάκωσης της παραγωγής τους και η ανάγκη για ισχυρά κανονιστικά πλαίσια. Ωστόσο, οι συνεχείς τεχνολογικές εξελίξεις, σε συνδυασμό με τις υποστηρικτικές πολιτικές και τις αυξημένες επενδύσεις, συμβάλλουν στην υπέρβαση αυτών των εμποδίων (Niekurzak et al., 2024).

Επιπλέον, τα εναλλακτικά καύσιμα δεν είναι εγγενώς πιο περιβαλλοντικά βιώσιμα σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα. Στις οδικές μεταφορές, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη το σύνολο των εκπομπών του κύκλου ζωής τους, οι οποίες περιλαμβάνουν τις εκπομπές από την εξόρυξη των πρώτων υλών, τη μετατροπή, τη

μεταφορά, την αποθήκευση και την καύση τους (Al-Mohannadi et al., 2024). Η βιωσιμότητα των εναλλακτικών καυσίμων που παράγονται μέσω ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πηγή αυτής της ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, η παραγωγή υδρογόνου με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από έναν συμβατικό σταθμό παραγωγής ενέργειας από φυσικό αέριο είναι λιγότερο βιώσιμη από τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά ή ηλιακά πάρκα. Ομοίως, η πηγή πρώτης ύλης για την παραγωγή βιοκαυσίμων επηρεάζει σημαντικά τις εκπομπές του κύκλου ζωής της (Gray et al., 2021).

Μερικές φορές είναι δύσκολο να εκτιμηθεί το κατά πόσον ένα καύσιμο είναι «βιοκαύσιμο» ή όχι. Για παράδειγμα, το βιοντίζελ θεωρείται βιοκαύσιμο, αλλά το 10% της μεθανόλης που απαιτείται για τη διαδικασία μετεστεροποίησης παράγεται συνήθως από φυσικό αέριο, ένα ορυκτό καύσιμο. Ορισμένα καύσιμα (όπως το υδρογόνο ή η αμμωνία) μπορούν να παραχθούν από ορυκτές πηγές (υδρογόνο από φυσικό αέριο ή πετρέλαιο), αλλά μπορούν επίσης να παραχθούν εξ ολοκλήρου από ανανεώσιμες πηγές. Αυτή είναι η περίπτωση του υδρογόνου που παράγεται από την υδρόλυση του νερού χρησιμοποιώντας ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια, όπως η ηλιακή ή η αιολική ενέργεια. Επίσης, η βιομάζα μπορεί να μετατραπεί σε άλλες μορφές καυσίμου μέσω της ενσωμάτωσης της ηλιακής ενέργειας, η οποία συμβάλλει στη διαδικασία πυρόλυσης (Mustafa et al., 2020).

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί ότι είναι σημαντικό κατά πόσον τα καύσιμα μπορούν να θεωρηθούν «φορείς ενέργειας» και όχι «πηγές ενέργειας». Η ηλεκτρική ενέργεια είναι ένας φορέας ενέργειας, καθώς μπορεί να παραχθεί από διαφορετικές πηγές ενέργειας (ανανεώσιμες πηγές όπως η ηλιακή και η αιολική ή ορυκτές πηγές όπως ο άνθρακας ή η πυρηνική ενέργεια) σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία, αλλά στη συνέχεια μεταφέρεται στον τόπο, όπου καταναλώνεται η ενέργεια, π.χ. στις οικίες. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις από το ηλεκτρικό δίκτυο ή μπορεί να μεταφερθεί από τα οχήματα μέσα σε χημικές-ηλεκτρικές μπαταρίες. Από αυτή την άποψη, το υδρογόνο, η αμμωνία και άλλα συνθετικά καύσιμα (όπως η βενζίνη ή το ντίζελ Fischer-Tropsch) μπορούν επίσης να θεωρηθούν «φορείς ενέργειας». Εάν αυτά τα καύσιμα παράγονται εξ ολοκλήρου από ανανεώσιμες πηγές, τότε θεωρούνται βιοκαύσιμα. Έτσι, αυτά τα αναφερόμενα καύσιμα (υδρογόνο, αμμωνία, συνθετικοί υδρογονάνθρακες) μπορούν να θεωρηθούν ορυκτά καύσιμα, εάν

παράγονται από ορυκτούς πόρους ή μπορούν να θεωρηθούν εν μέρει ή εξ ολοκλήρου βιοκαύσιμα. Επομένως, το ίδιο καύσιμο μπορεί να θεωρηθεί ορυκτό καύσιμο ή βιοκαύσιμο. Για παράδειγμα, το μεθάνιο που υπάρχει στο φυσικό αέριο είναι ορυκτό, ενώ το ίδιο μεθάνιο που περιέχεται στο βιοαέριο θεωρείται βιοκαύσιμο (Martins & Brito, 2020). Λαμβάνοντας υπόψη αυτούς τους παράγοντες, εταιρείες και κυβερνήσεις έχουν εξερευνήσει εναλλακτικά καύσιμα για να επιτύχουν αυτάρκεια και να διαφοροποιήσουν τα ενεργειακά τους χαρτοφυλάκια. Για παράδειγμα, η Βραζιλία έχει αναδειχθεί ως ένας από τους μεγαλύτερους παραγωγούς βιοαιθανόλης στον κόσμο. Επιπλέον, οι παραγωγοί ενέργειας έχουν αρχίσει να αναπτύσσουν συνθετικές εκδοχές συμβατικών καυσίμων, όπως το βιοντίζελ που παράγεται από φυτικά έλαια (Enoma et al., 2022; Hafis et al., 2025).

Σε κάθε περίπτωση, η ευρεία υιοθέτηση των εναλλακτικών καυσίμων εξαρτάται από την υπέρβαση διαφόρων τεχνολογικών και οικονομικών προκλήσεων, καθώς και προκλήσεων σε όρους υποδομείς. Για παράδειγμα, το υδρογόνο αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις που σχετίζονται με την αποθήκευση, τη μεταφορά και τη δημιουργία σταθμών ανεφοδιασμού (Mohammed et al., 2020). Οι υποδομές φυσικού αερίου πρέπει να επεκταθούν για να καλύψουν την αυξημένη ζήτηση, ιδίως με τη μορφή συμπιεσμένου φυσικού αερίου (CNG - Compressed Natural Gas) για οχήματα και υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG - Liquefied Natural Gas) για κινητήρες βαρέων οχημάτων. Ομοίως, η επεκτασιμότητα της παραγωγής των βιοκαυσίμων θα πρέπει να ανταποκρίνεται στις παγκόσμιες απαιτήσεις χωρίς να ανταγωνίζεται την παραγωγή τροφίμων ή να οδηγεί σε ακούσιες συνέπειες, όπως η αλλαγή χρήσης γης. Οι τεχνολογικές καινοτομίες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην ενσωμάτωση αυτών των εναλλακτικών καυσίμων σε εφαρμογές κινητήρων εσωτερικής καύσης. Τα βελτιωμένα σχέδια κινητήρων, όπως οι κινητήρες flex-fuel, μπορούν να λειτουργούν με πολλαπλούς τύπους καυσίμων, παρέχοντας αυξημένη ευελιξία και βελτιστοποίηση της απόδοσης τους. Οι πρόοδοι που έχουν συντελεστεί στα συστήματα αποθήκευσης και διανομής των καυσίμων είναι κρίσιμες, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι τα εναλλακτικά καύσιμα μπορούν να παραδοθούν με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα στους καταναλωτές (Singh et al., 2020). Επιπλέον, οι βελτιώσεις στις διαδικασίες μετατροπής ενέργειας, όπως η ανάπτυξη καταλυτικών μετατροπέων και πιο αποδοτικών θαλάμων καύσης, μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση και τα

χαρακτηριστικά εκπομπών των κινητήρων που λειτουργούν με εναλλακτικά καύσιμα (Hafis et al., 2025).

Η ανάπτυξη και η υιοθέτηση εναλλακτικών καυσίμων επηρεάζονται επίσης από κυβερνητικές πολιτικές, κανονισμούς και κίνητρα. Πολιτικές όπως οι επιδοτήσεις για τα βιοκαύσιμα, τα φορολογικά κίνητρα για την αγορά ηλεκτρικών οχημάτων και τα πρότυπα εκπομπών για οχήματα ενθαρρύνουν τη μετάβαση από τα ορυκτά καύσιμα σε πιο βιώσιμες επιλογές. Επιπλέον, η ανάπτυξη του τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και οι εξελίξεις στις τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα μπορούν να ενισχύσουν περαιτέρω τη βιωσιμότητα των εναλλακτικών καυσίμων ως μέρος μιας ευρύτερης στρατηγικής για τη μείωση των παγκόσμιων εκπομπών (Jaiswal et al., 2022). Καθώς οι κοινωνίες και οι βιομηχανίες συνεχίζουν να μεταβαίνουν προς ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό μέλλον, τα εναλλακτικά καύσιμα στις εφαρμογές κινητήρων αποτελούν ένα κρίσιμο βήμα για την υλοποίηση αυτού του μετασχηματιστικού δυναμικού (Dell'Aversano et al., 2024).

Στο συνεχώς εξελισσόμενο τοπίο της αυτοκινητοβιομηχανίας και της βιομηχανικής τεχνολογίας, η διασφάλιση της βέλτιστης απόδοσης του κινητήρα και της οικολογικής βιωσιμότητας παραμένει πρωταρχικής σημασίας. Η εισαγωγή νέων τύπων κινητήρων, όπως ηλεκτρικών και υβριδικών συστημάτων κίνησης, παράλληλα με τις παραδοσιακές ΜΕΚ, έχει καταστήσει αναγκαία μια κριτική αξιολόγηση της συμβατότητας των κινητήρων με διάφορα καύσιμα. Αυτή η δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ κινητήρων και καυσίμων έγκειται στη φύση των σύγχρονων μεταφορών και μηχανημάτων, ενώ υπογραμμίζει τη σημασία των αυστηρών δοκιμών και της βελτιστοποίησης της επιλογής καυσίμων (Ghadikolaei et al., 2021).

Η αυτοκινητοβιομηχανία και η μεταποιητική βιομηχανία, επικεντρώνονται ολοένα και περισσότερο στην προώθηση των δοκιμών συμβατότητας των κινητήρων και στη βελτιστοποίηση της επιλογής καυσίμων. Η διερεύνηση των πολύπλοκων σχέσεων μεταξύ των τύπων κινητήρων και των καυσίμων, όχι μόνο επιδιώκει να επιτύχει υψηλότερα επίπεδα ενεργειακής απόδοσης, αλλά και να ελαχιστοποιήσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και το λειτουργικό κόστος (Hafis et al., 2025).

Κεφάλαιο 3. Ηλεκτρική Ενέργεια & ΜΕΚ

3.1 Ιστορική αναδρομή εξέλιξης ηλεκτρικών οχημάτων

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα ταχέως αναπτυσσόμενο εναλλακτικό καύσιμο για τα οχήματα, η δημοτικότητας της οποίας αυξάνεται ραγδαία λόγω των διαφόρων πλεονεκτημάτων και οφελών που προσφέρει για το περιβάλλον. Τα ηλεκτρικά οχήματα λειτουργούν αποθηκεύοντας ηλεκτρική ενέργεια σε μπαταρίες, οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία ενός ηλεκτροκινητήρα. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από ανανεώσιμες πηγές, όπως η αιολική ή η ηλιακή ενέργεια, ή από συμβατικές πηγές, όπως ο άνθρακας ή το φυσικό αέριο. Το ηλεκτρικό όχημα μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε μπαταρίες σε μηχανική ενέργεια χρησιμοποιώντας ηλεκτροκινητήρες (Enoma et al., 2022).

Η ιστορία των ηλεκτρικών οχημάτων χρονολογείται από τις αρχές του 1900, όταν αναπτύχθηκε το μοντέλο Detroit Electric Model 47 από την Clara Ford. Αυτό το ηλεκτρικό όχημα, με μέγιστη ταχύτητα 30-40 χλμ./ώρα, ανήκε στο 38% των αμερικανικών οικογενειών. Στις αρχές του 1900, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα χρησιμοποιούσαν κυρίως οι γυναίκες για τις μετακινήσεις τους. Νωρίτερα, στις αρχές του 1800, εφευρέτες όπως ο Robert Anderson και ο Ányos Jedlik δημιούργησαν μερικά από τα πρώτα ηλεκτρικά οχήματα και σταδιακά με τις εξελίξεις στην τεχνολογία, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα κέρδισαν έδαφος (Reddy et al., 2024). Το 1881, ο Gustave Trouvé, ένας Γάλλος εφευρέτης, κατασκεύασε ένα τρίτροχο ηλεκτρικό όχημα. Μέχρι τα τέλη του 1800, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα ήταν αρκετά δημοφιλή, ειδικά μεταξύ των ανώτερων τάξεων, λόγω της ευκολίας χρήσης τους και της έλλειψης θορύβου σε σύγκριση με τα ατμοκίνητα οχήματα. Εκείνη την εποχή, τα ηλεκτρικά ταξί ήταν συνηθισμένα σε πόλεις όπως η Νέα Υόρκη και το Λονδίνο (Allaoua et al., 2017).

Παρά την αρχική επέκταση τους, η μαζική παραγωγή αυτοκινήτων με κινητήρα εσωτερικής καύσης, με πρωτοπόρο τον Henry Ford και άλλους, κυριάρχησε λόγω της ευκολίας ανεφοδιασμού και των φθηνότερων τιμών βενζίνης, οδηγώντας σε μείωση της δημοτικότητας των ηλεκτρικών οχημάτων. Οι ανησυχίες για τη ρύπανση και το περιβάλλον επανέφεραν το ενδιαφέρον για τα ηλεκτρικά οχήματα στο προσκήνιο. Τη δεκαετία του 1990, οι κατασκευαστές αυτοκινήτων άρχισαν να πειραματίζονται με

σύγχρονα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, όπως το ηλεκτρικό όχημα GM EV1 και το Toyota RAV4 (Reddy et al., 2024). Οι τεχνολογικές εξελίξεις, οι βελτιώσεις στην τεχνολογία των μπαταριών και οι ανησυχίες για την κλιματική αλλαγή οδήγησαν σε μια σημαντική αναζωπύρωση των ηλεκτρικών οχημάτων. Εταιρείες όπως η Tesla έκαναν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα δημοφιλή, με μοντέλα όπως το Roadster και το Model S να παρουσιάζουν χαρακτηριστικά ηλεκτρικών οχημάτων μεγάλης εμβέλειας (Mahmoudzadeh Andwari et al., 2017).

Η προώθηση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ζωτικής σημασίας όσον αφορά τις πολιτικές των περισσότερων κυβερνήσεων για το κλίμα και την ενέργεια, με στόχο τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Έχει υπάρξει συνεχής πολιτική υποστήριξη από διάφορες κυβερνήσεις και το μερίδιο των ηλεκτρικών οχημάτων είναι περίπου 10% τόσο παγκοσμίως, σε σύγκριση με πάνω από 70% των συμβατικών οχημάτων με κινητήρα εσωτερικής καύσης (Timilsina et al., 2025). Ωστόσο, είναι επίσης σημαντικό να αναγνωριστεί ότι η προώθηση των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελεί εξίσου μέρος της βιομηχανικής πολιτικής, με τις κυβερνήσεις να αξιοποιούν αυτή τη μετάβαση για να επιτύχουν οικονομική ανταγωνιστικότητα, τεχνολογική ηγεσία και ανάπτυξη της αγοράς στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας. Ταυτόχρονα, η αύξηση των τιμών των μετάλλων, η οποία μπορεί ενδεχομένως να διαταράξει τις αλυσίδες εφοδιασμού μπαταριών και η εξελισσόμενη δυναμική της αγοράς, όπως η μείωση του κόστους των μπαταριών, ο πόλεμος τιμών των ηλεκτρικών οχημάτων μεταξύ των αυτοκινητοβιομηχανιών και η ανάγκη για συνεχείς κρατικές επιδοτήσεις, αντικατοπτρίζουν περαιτέρω την πολύπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ των βιομηχανικών και των κλιματικών πολιτικών (Dua et al., 2024).

Οι ανακοινώσεις διαφόρων κυβερνήσεων για τη σταδιακή κατάργηση των οχημάτων με κινητήρες εσωτερικής καύσης αποτελούν στρατηγικές κινήσεις που επηρεάζουν τον συνεχιζόμενο ανταγωνισμό για εναλλακτικές τεχνολογίες μεταφορών (Timilsina et al., 2025). Καθώς η ζήτηση για ηλεκτρικά οχήματα στην αγορά εντείνεται, οι χώρες συμμετέχουν σε ένα ανταγωνισμό ως προς την πράσινη βιομηχανική πολιτική τους με απώτερο στόχο είτε την αναβάθμιση, είτε την ανανέωση των βιομηχανικών τους δυνατοτήτων, με τις πολιτικές ενεργειακής τεχνολογίας να διαμορφώνονται ανάλογα (Meckling & Nahm, 2019).

Πάνω από 100 έθνη έχουν μέχρι στιγμής δεσμευτεί να επιτύχουν μηδενικές καθαρές εκπομπές έως το 2050 ή το 2060. Ως εκ τούτου, έχει σημειωθεί μια αισθητή αύξηση στην αποδοχή και τη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων παγκοσμίως ως αποτέλεσμα των εντεταλμένων προσπαθειών που καταβάλλουν πολλές κυβερνήσεις για την ενθάρρυνση φιλικών προς το περιβάλλον οχημάτων. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις των Lieven & Rietmann (2020), το 30% όλων των επιβατικών οχημάτων παγκοσμίως το 2032 θα είναι ηλεκτρικά, με βάση στατιστικά στοιχεία πωλήσεων από 26 χώρες μεταξύ των ετών 2010 και 2018. Αυτό μπορεί να υποδηλώνει μια πιθανή αύξηση των πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων στον αναπτυσσόμενο κόσμο, όπου η αστικοποίηση και η οικονομική ανάπτυξη επιταχύνονται, με αποτέλεσμα τη μεγάλη συγκέντρωση αερίων του θερμοκηπίου (Aminzadegan et al., 2022).

Όσον αφορά την ΕΕ, οι οδικές μεταφορές ευθύνονται για περίπου το ένα πέμπτο των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, με τις εκπομπές να παρουσιάζουν αυξητική τάση. Η επιχειρηματολογία υπέρ της μετάβασης σε οχήματα μηδενικών εκπομπών (Gis & Merkisz, 2019) γίνεται ακόμη πιο ουσιαστική και πιο εμφανής στο πλαίσιο της προσπάθειας για μείωση της ενεργειακής εξάρτησης το συντομότερο δυνατό στην ΕΕ, δεδομένου ότι οι οδικές μεταφορές αντιπροσωπεύουν επίσης το ένα τρίτο της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας στην ευρύτερη περιοχή. Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία θέτει ως στόχο της επίτευξης κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050 και έναν φιλόδοξο ενδιάμεσο στόχο μείωσης των καθαρών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030, σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Οι πολιτικοί αυτοί στόχοι έχουν ως αποτέλεσμα την ευρύτερη διάδοση των ηλεκτρικών οχημάτων στην ΕΕ (Zimakowska-Laskowska & Laskowski, 2024).

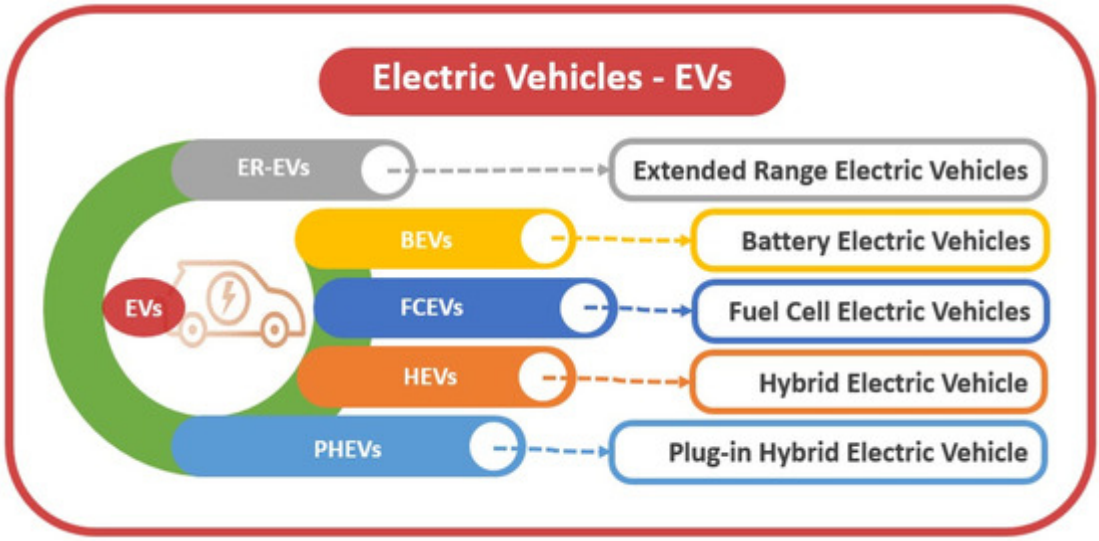
Στο πλαίσιο του Εθνικού Σχεδίου Αποστολής Ηλεκτρικής Κινητικότητας, η Ινδία εφάρμοσε μια σειρά από προγράμματα επιδοτήσεων, συμπεριλαμβανομένων οικονομικών κινήτρων, απαλλαγών από τα τέλη κυκλοφορίας και τα τέλη ταξινόμησης, με περιφερειακές διακυμάνσεις στα επίπεδα επιδοτήσεων (Timilsina et al., 2025). Ο στόχος της ινδικής κυβέρνησης ήταν να προωθήσει 6-7 εκατομμύρια οικολογικά οχήματα. Στην ίδια κατεύθυνση, οι Ηνωμένες Πολιτείες και η Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας (ΛΔΚ) έχει θεσπίσει ένα ευρύ φάσμα νόμων και κανονισμών για την προώθηση της χρήσης των ηλεκτρικών οχημάτων, συμπεριλαμβανομένων οικονομικών και μη

οικονομικών κινήτρων (όπως περιορισμούς στις πινακίδες κυκλοφορίας). Το 2017, οι χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων στη ΛΔΚ αποτελούσαν το 40% όλων των χρηστών ηλεκτρικών οχημάτων παγκοσμίως (Liu et al., 2021). Η ΛΔΚ μειώνει προοδευτικά τις επιδοτήσεις ετησίως κατά 10% έως τον τερματισμό τους, οδηγώντας στη μείωση των πωλήσεων κατά 25% το 2019, αλλά εξακολουθούν να ξεπερνούν τις παγκόσμιες πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων το 2021 (Paoli & Gül, 2022).

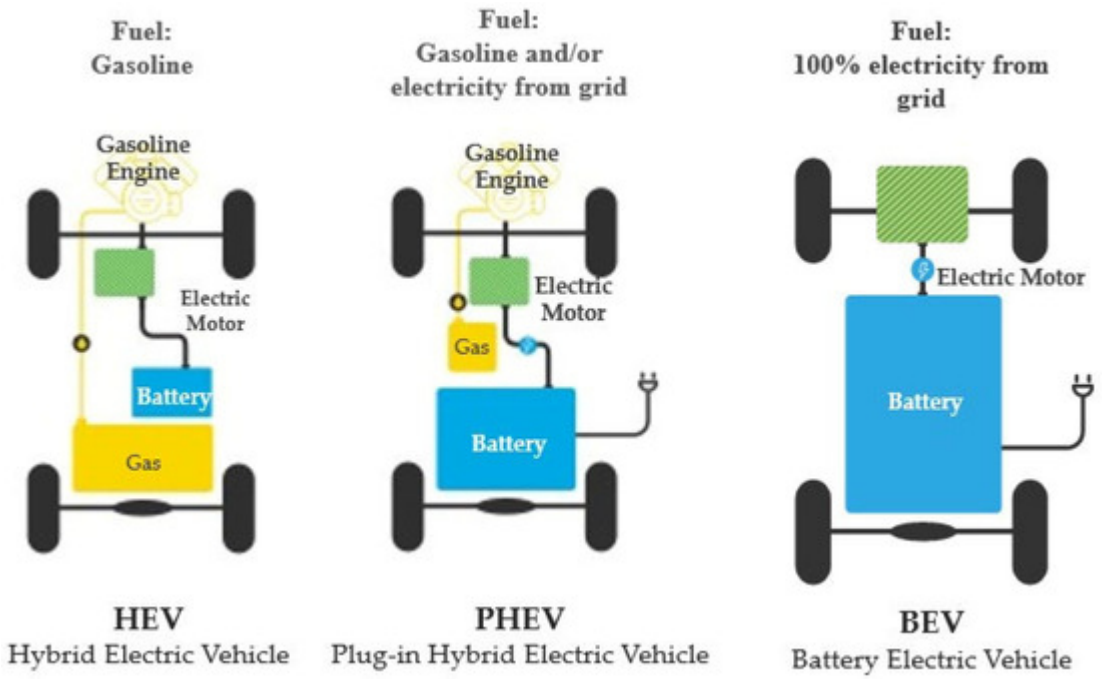
Βάσει στατιστικών δεδομένων, το έτος 2022 οι πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων υπερέβησαν τα 10 εκατομμύρια. Περίπου το 14% όλων των νεοαγορασθέντων αυτοκινήτων ήταν ηλεκτρικά, από 9% το 2021 και από 5% το 2020. Αυτή η αξιοσημείωτη αύξηση ήταν ιδιαίτερα εμφανής σε τρεις βασικές αγορές. Η Κίνα παραμένει ο ηγέτης στις πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων (Khaleel et al., 2024). Περισσότερα από ένα στα πέντε ηλεκτρικά αυτοκίνητα πωλήθηκαν στην Ευρώπη το 2022, τη δεύτερη μεγαλύτερη αγορά ηλεκτρικών αυτοκινήτων, όπου οι πωλήσεις αυξήθηκαν κατά περισσότερο από 15%. Τέλος, οι πωλήσεις αυξήθηκαν κατά 55% το 2022 στις Ηνωμένες Πολιτείες, την τρίτη μεγαλύτερη αγορά ηλεκτρικών αυτοκινήτων, αντιπροσωπεύοντας το 8% των συνολικών πωλήσεων παγκοσμίως (Malik et al., 2025).

3.2 Ταξινόμηση ηλεκτρικών οχημάτων

Η κύρια ταξινόμηση των ηλεκτρικών οχημάτων παρουσιάζεται στην Εικόνα 3, ενώ τα γενικά τους χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 3. Ταξινόμηση ηλεκτρικών οχημάτων (Reddy et al., 2024)



Εικόνα 4. Διαφορετικά γενικά & τεχνικά χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων ηλεκτρικών οχημάτων (Reddy et al., 2024)

Τα plug-in υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (PHEVs) είναι οχήματα που τροφοδοτούνται από έναν τυπικό κινητήρα εσωτερικής καύσης και έναν ηλεκτρικό κινητήρα που φορτίζεται από μια εξωτερική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Υπό κανονικές συνθήκες οδήγησης, τα PHEV μπορούν να αποθηκεύσουν αρκετή ενέργεια από το δίκτυο, ώστε να μειώσουν δραστικά την κατανάλωση βενζίνης. Το Mitsubishi Outlander PHEV διαθέτει μια μπαταρία 12 kWh που του επιτρέπει να διανύσει περίπου 50 χλμ. χρησιμοποιώντας μόνο τον ηλεκτρικό κινητήρα. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι η κατανάλωση καυσίμου στα PHEV είναι μεγαλύτερη από αυτήν που ισχυρίζονται οι κατασκευαστές οχημάτων (Reddy et al., 2024).

Τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα κινούνται από έναν συνδυασμό ενός συμβατικού κινητήρα εσωτερικής καύσης και ενός ηλεκτρικού κινητήρα. Η διαφορά τους με τα PHEV είναι ότι τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα δεν μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο. Στην πραγματικότητα, η μπαταρία που παρέχει ενέργεια στον ηλεκτρικό κινητήρα φορτίζεται χάρη στην ισχύ που παράγεται από τον κινητήρα εσωτερικής καύσης του οχήματος. Στα σύγχρονα μοντέλα, οι μπαταρίες μπορούν επίσης να φορτιστούν χάρη στην ενέργεια που παράγεται κατά το φρενάρισμα, μετατρέποντας την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια (Mahmoudzadeh Andwari et al., 2017). Με βάση τις διαθέσιμες πληροφορίες για το μοντέλο Toyota Prius, η μπαταρία απαιτεί περίπου 3,2

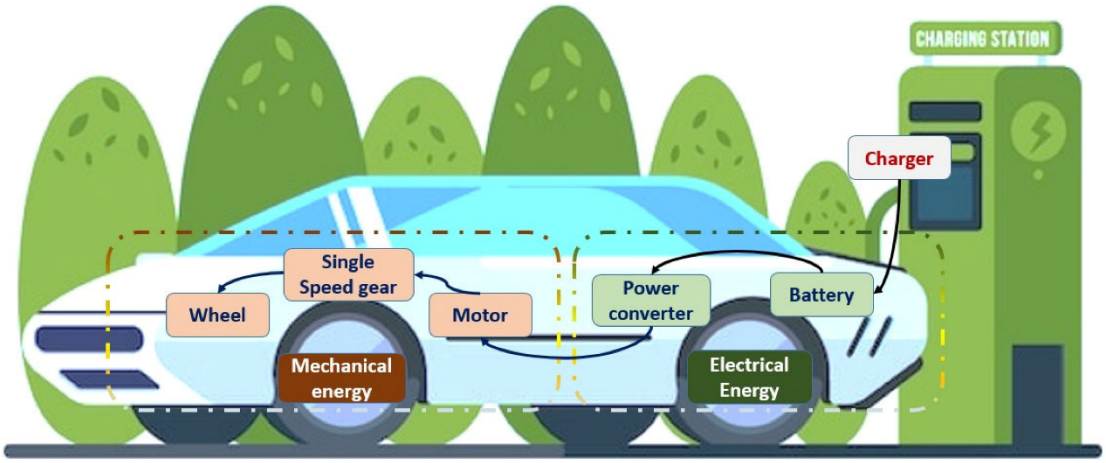
kWh ηλεκτρικής ενέργειας μαζί με 1,1 λίτρο βενζίνης, προκειμένου να επιτευχθεί αυτονομία 40 km (25 miles) (Malik et al., 2025).

Τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου (FCEV) διαθέτουν ηλεκτρικό κινητήρα που χρησιμοποιεί ένα μείγμα συμπιεσμένου υδρογόνου και οξυγόνου που λαμβάνεται από τον αέρα, με το νερό ως το μόνο απόβλητο που προκύπτει από αυτή τη διαδικασία. Παρόλο που αυτά τα είδη οχημάτων θεωρούνται ότι παρουσιάζουν «μηδενικές εκπομπές», αξίζει να τονιστεί ότι, αν και υπάρχει πράσινο υδρογόνο, το μεγαλύτερο μέρος του χρησιμοποιούμενου υδρογόνου εξάγεται από φυσικό αέριο. Το Hyundai Nexo FCEV είναι ένα παράδειγμα αυτού του τύπου οχήματος, που μπορεί να διανύσει 650 km χωρίς ανεφοδιασμό (Reddy et al., 2024).

Τα ηλεκτρικά οχήματα εκτεταμένης αυτονομίας (ER-EV - Extended-Range EVs) είναι παρόμοια με τα οχήματα που ταξινομούνται ως ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας. Ωστόσο, τα ER-EV είναι επίσης εξοπλισμένα με κινητήρα δευτερογενούς καύσης που μπορεί να φορτίσει τις μπαταρίες του οχήματος εάν είναι απαραίτητο. Αυτός ο κινητήρας, σε αντίθεση με εκείνους που υπάρχουν στα PHEV και υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα, χρησιμοποιείται μόνο για φόρτιση και δεν συνδέεται με τους τροχούς του οχήματος. Το BMW i3 είναι ένα παράδειγμα αυτού του είδους αυτοκινήτου, με μπαταρία 42,2 kWh που παρέχει 260 χλμ. αυτονομίας σε ηλεκτρική λειτουργία και επιπλέον 130 χλμ. σε λειτουργία εκτεταμένης αυτονομίας (Reddy et al., 2024).

3.3 Γενικά & τεχνολογικά χαρακτηριστικά ηλεκτρικών οχημάτων

Τα ηλεκτρικά οχήματα ενσωματώνουν διάφορα βασικά εξαρτήματα και τεχνολογικά χαρακτηριστικά που τα διακρίνουν από τα παραδοσιακά οχήματα με ΜΕΚ. Τα κύρια εξαρτήματα και λειτουργικά στάδια των ηλεκτρικών οχημάτων από το σημείο φόρτισης έως την κίνηση των τροχών παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5. Λειτουργικά στάδια ηλεκτρικών οχημάτων

Το κύριο σύστημα πρόωσης ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι ο ηλεκτρικός κινητήρας, ο οποίος μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια από την μπαταρία σε μηχανική ενέργεια για την κίνηση των τροχών. Αυτοί οι κινητήρες μπορούν να είναι εναλλασσόμενου ρεύματος (AC - Alternating Current) ή συνεχούς ρεύματος (DC - Direct Current) και ποικίλλουν σε σχεδιασμό για διαφορετικούς τύπους οχημάτων (Mahmoudzadeh Andwari et al., 2017). Τα ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιούν συνήθως κινητήρες AC, ιδιαίτερα επαγωγικούς κινητήρες λόγω της απλότητάς τους, της ανθεκτικότητας και της οικονομικής τους αποδοτικότητας. Αυτοί οι κινητήρες λειτουργούν μέσω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, δημιουργώντας ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο σταθερό μέρος (στάτορα), ενώ προκαλούν ρεύμα στο κινούμενο μέρος (ρότορα), παράγοντας ροπή για την κίνηση του οχήματος. Ο σχεδιασμός τους χωρίς ψήκτρες και συλλέκτη καθιστά τους κινητήρες AC αποδοτικούς, ενώ παράλληλα μειώνει το κόστος συντήρησης τους. Το αξιοσημείωτο πλεονέκτημά τους έγκειται στην αξιοσημείωτη αναλογία ροπής προς βάρος, η οποία βελτιώνει την επιτάχυνση και τη συνολική απόδοση τους (Reddy et al., 2024).

Επιπλέον, οι κινητήρες AC μπορούν να λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων χωρίς να χρειάζονται κιβώτιο ταχυτήτων, βελτιστοποιώντας το σύστημα μετάδοσης κίνησης και μειώνοντας τις μηχανικές απώλειες. Ωστόσο, σε σύγκριση με τους κινητήρες DC, οι κινητήρες AC συνήθως απαιτούν πιο περίπλοκα συστήματα ελέγχου. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, γνωστοί και ως κινητήρες με ψήκτρες, αποτελούν μια άλλη επιλογή για την τροφοδοσία των ηλεκτρικών οχημάτων. Αυτοί οι κινητήρες χρησιμοποιούν ψήκτρες και έναν συλλέκτη, προκειμένου να αλλάζουν την κατεύθυνση

του ηλεκτρικού ρεύματος στις περιελίξεις του κινητήρα (Cao et al., 2019). Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος έχουν απλούστερο σχεδιασμό σε σύγκριση με τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος και είναι γνωστοί για την υψηλή ροπή εκκίνησης, καθιστώντας τους κατάλληλους για εφαρμογές που απαιτούν συχνή επιτάχυνση και επιβράδυνση. Στο πλαίσιο των ηλεκτρικών οχημάτων, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται συχνά σε μικρότερα οχήματα ή σε συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως ηλεκτρικά ποδήλατα και σκούτερ. Είναι λιγότερο πολύπλοκοι και πιο οικονομικοί από τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος. Ωστόσο, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος παρουσιάζουν υψηλότερες απαιτήσεις συντήρησης λόγω των ψυκτικών εξαρτημάτων και του συλλέκτη, που μπορεί να φθαρούν με την πάροδο του χρόνου και να απαιτούν αντικατάσταση. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι γενικά λιγότερο ακριβοί, γεγονός που τους καθιστά μια ελκυστική επιλογή για μικρότερα ηλεκτρικά οχήματα. Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος συχνά έχουν υψηλότερο κόστος, αλλά παρουσιάζουν καλύτερη μακροπρόθεσμη απόδοση (De Lorenzo et al., 2022).

Τα ηλεκτρικά οχήματα τροφοδοτούνται από επαναφορτιζόμενες μπαταρίες που αποτελούνται από στοιχεία ιόντων λιθίου. Αυτές οι μπαταρίες αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια και την τροφοδοτούν στον ηλεκτροκινητήρα. Οι εξελίξεις στην τεχνολογία των μπαταριών επικεντρώνονται στη βελτίωση της ενεργειακής πυκνότητας, της ταχύτητας φόρτισης και της συνολικής μακροζωίας. Μια μπαταρία είναι μια συσκευή που αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια με σκοπό την παροχή ισχύος σε ένα ηλεκτρικό σύστημα, όπως ένα ηλεκτρικό όχημα ή ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Στη μπαταρία, η ενέργεια αποθηκεύεται σε στοιχεία που είναι όλα συνδεδεμένα μεταξύ τους (Alanazi, 2023). Οι μπαταρίες απαιτούν ένα ελάχιστο επίπεδο τάσης για να παρέχουν επαρκή ισχύ, την οποία δεν μπορεί να φτάσει ένα μόνο στοιχείο. Για την αύξηση της τάσης, πολλά στοιχεία συνδέονται παράλληλα, προκειμένου να βελτιώσουν την χωρητικότητα και να διασφαλίσουν την απαραίτητη ενέργεια μπαταρίας (Brenna et al., 2020).

Οι μπαταρίες αποτελούνται από πολλά μικρότερα τμήματα, γνωστά ως μονάδες μπαταριών (ή υποσυστοιχίες). Το στοιχείο ιόντων λιθίου (Li-ion cell) είναι η πιο διαδεδομένη χημική ουσία στον τομέα των ηλεκτρικών οχημάτων. Εναλλακτικές χημικές ουσίες, όπως το υδρίδιο νικελίου-μετάλλου (NiMH), χρησιμοποιούνται περιστασιακά, καθώς έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Το κύριο συστατικό ενός

ηλεκτρικού οχήματος είναι πράγματι η τεχνολογία της μπαταρίας και έχει υποστεί σημαντικές εξελίξεις στην επαναφόρτιση, τους κύκλους, την χωρητικότητα και την πυκνότητα φόρτισης τα τελευταία χρόνια (Reddy et al., 2024).

Τα ηλεκτρονικά ισχύος περιλαμβάνουν τον μετατροπέα, ο οποίος μετατρέπει την ισχύ συνεχούς ρεύματος από την μπαταρία σε ισχύ εναλλασσόμενου ρεύματος για τον ηλεκτροκινητήρα. Επιπλέον, διαχειρίζεται τη ροή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ της μπαταρίας και του κινητήρα, ελέγχοντας την ταχύτητα και τη ροπή. Τα ηλεκτρονικά ισχύος διευκολύνουν λειτουργίες όπως η διαχείριση της φόρτισης και της εκφόρτισης της μπαταρίας, ο έλεγχος της ταχύτητας και της ροπής του ηλεκτροκινητήρα και η ενεργοποίηση της αναγεννητικής πέδησης για τη συλλογή και αποθήκευση ενέργειας πίσω στην μπαταρία. Η προηγμένη τεχνολογία τους βελτιώνει τη συνολική αξιοπιστία, την αποδοτικότητα και την απόδοση των ηλεκτρικών οχημάτων, συμβάλλοντας σημαντικά στην ευρεία υιοθέτησή τους (Cao et al., 2019).

Επιπροσθέτως, τα ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιούν συχνά συστήματα αναγεννητικής πέδησης που συλλαμβάνουν κινητική ενέργεια κατά την πέδηση και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια τροφοδοτεί την μπαταρία. Αυτή η διαδικασία βοηθά στην αύξηση της απόδοσης και στην επέκταση της αυτονομίας του οχήματος. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια επιστρέφει στη συνέχεια πίσω στην μπαταρία του οχήματος, όπου μπορεί να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί αργότερα για την τροφοδοσία του οχήματος ή για την υποβοήθηση της επιτάχυνσής του. Αυτή η διαδικασία βοηθά στην αύξηση της συνολικής απόδοσης του οχήματος ανακτώντας μέρος της ενέργειας που διαφορετικά θα χανόταν κατά την πέδηση, επεκτείνοντας έτσι την αυτονομία οδήγησης και μειώνοντας την ποσότητα ενέργειας που απαιτείται από την μπαταρία ή τις εξωτερικές πηγές φόρτισης. Η αναγεννητική πέδηση συμβάλλει στη βελτιωμένη διαχείριση της ενέργειας και τη βιωσιμότητα των ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων (Malik et al., 2025).

Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να φορτιστούν μέσω διαφόρων μεθόδων όπως οι τυπικές ηλεκτρικές πρίζες, οι ειδικοί σταθμοί φόρτισης (φορτιστές επιπέδου 2) ή οι σταθμοί ταχείας φόρτισης (ταχυφορτιστές DC). Οι χρόνοι και οι δυνατότητες φόρτισης ποικίλλουν ανάλογα με την υποδομή φόρτισης και τη συμβατότητα του οχήματος. Το σύστημα φόρτισης αναφέρεται γενικά στα εξαρτήματα και τις διαδικασίες που εμπλέκονται στην αναπλήρωση της μπαταρίας ή του συστήματος ηλεκτρικής

αποθήκευσης ενός οχήματος με ενέργεια. Στην περίπτωση των ηλεκτρικών οχημάτων, αναφέρεται συγκεκριμένα στην υποδομή, την τεχνολογία και τους μηχανισμούς που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στην μπαταρία του οχήματος για την τροφοδοσία των ηλεκτρικών κινητήρων και άλλων ηλεκτρικών συστημάτων (Saraswathi & Ramachandran, 2024).

3.4 Πλεονεκτήματα, τεχνικές προσκλήσεις & προτεινόμενες λύσεις

Η στροφή προς τα ηλεκτρικά οχήματα σηματοδοτεί μια μετασχηματιστική εξέλιξη στις μεταφορές, προσφέροντας μια σειρά από οφέλη που εκτείνονται από την προστασία του περιβάλλοντος έως την οικονομική αποδοτικότητα (Reed et al., 2024). Ένα από τα ευρύτερα αναγνωρισμένα πλεονεκτήματα των ηλεκτρικών οχημάτων είναι η συμβολή τους στη μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης. Σε αντίθεση με τα οχήματα με ΜΕΚ, τα ηλεκτρικά οχήματα παράγουν μηδενικές εκπομπές καυσαερίων, μειώνοντας έτσι σημαντικά την απελευθέρωση επιβλαβών ρύπων όπως το μονοξείδιο του άνθρακα, τα οξείδια του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια. Αυτό το χαρακτηριστικό τους αναδεικνύει τα ηλεκτρικά οχήματα ως μια περιβαλλοντικά υπεύθυνη εναλλακτική λύση σε σχέση με τα παραδοσιακά βενζινοκίνητα και πετρελαιοκίνητα οχήματα, ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές, όπου οι ανησυχίες για την ποιότητα του αέρα είναι αυξημένες (Enoma et al., 2022).

Πέρα από τα περιβαλλοντικά τους οφέλη, τα ηλεκτρικά οχήματα προσφέρουν μια σημαντική εξοικονόμηση κόστους μέσω της μείωσης των λειτουργικών εξόδων. Η φόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι γενικά λιγότερο δαπανηρή σε σύγκριση με τον ανεφοδιασμό ενός συμβατικού οχήματος με καύσιμα, ειδικά όταν αξιοποιούνται οι οικιακές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας ή οι χαμηλότερες χρεώσεις για φόρτιση εκτός των ωρών αιχμής. Σύμφωνα με το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ (2023), οι ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων μπορούν να εξοικονομήσουν εκατοντάδες δολάρια ετησίως μόνο από το κόστος καυσίμων. Αυτό το οικονομικό πλεονέκτημα ενισχύεται περαιτέρω από το σχετικά χαμηλότερο κόστος συντήρησης των ηλεκτρικών οχημάτων, τα οποία διαθέτουν λιγότερα κινούμενα μέρη και δεν απαιτούν αλλαγές λαδιών, επισκευές συστήματος εξάτμισης ή αντικατάσταση των μπεκ ψεκασμού του καυσίμου (Malik et al., 2025).

Τα ηλεκτρικά οχήματα παρουσιάζουν επίσης ανώτερη ενεργειακή απόδοση. Ενώ οι κινητήρες εσωτερικής καύσης συνήθως μετατρέπουν μόνο το 20-30% της ενέργειας από τη βενζίνη σε αξιοποιήσιμη ισχύ, τα ηλεκτρικά συστήματα κίνησης επιτυγχάνουν ρυθμούς μετατροπής ενέργειας έως και 80-90% (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2022). Αυτή η υψηλότερη απόδοση όχι μόνο επεκτείνει την αποτελεσματική αυτονομία οδήγησης των ηλεκτρικών οχημάτων, αλλά μειώνει και τη συνολική κατανάλωση ενέργειας, ευθυγραμμιζόμενη με τους ευρύτερους στόχους της εξοικονόμησης ενέργειας και της βιωσιμότητας. Ένα άλλο αξιοσημείωτο πλεονέκτημα των ηλεκτρικών οχημάτων είναι η αθόρυβη λειτουργία τους. Η σχεδόν αθόρυβη απόδοση των ηλεκτρικών κινητήρων συμβάλλει στη μείωση της ηχορύπανσης, καθιστώντας τα ηλεκτρικά οχήματα ιδιαίτερα κατάλληλα για πυκνοκατοικημένα αστικά περιβάλλοντα (Breetz et al., 2018). Αυτό το ακουστικό πλεονέκτημα βελτιώνει την ποιότητα ζωής στις πόλεις και ευθυγραμμίζεται με τους στόχους πολεοδομικού σχεδιασμού που επικεντρώνονται στην ποιότητα ζωής και τη δημόσια υγεία (Reddy et al., 2024).

Τέλος, η υιοθέτηση ηλεκτρικών οχημάτων παίζει κρίσιμο ρόλο στη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα. Σε αντίθεση με τη βενζίνη και το ντίζελ, τα οποία προέρχονται από πεπερασμένους φυσικούς πόρους, η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παραχθεί από μια ποικιλία πηγών, συμπεριλαμβανομένων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η ηλιακή, η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η διαφοροποίηση όχι μόνο ενισχύει την ενεργειακή ασφάλεια, αλλά και επιταχύνει τη μετάβαση σε ένα ενεργειακό σύστημα χαμηλών εκπομπών άνθρακα (IEA, 2023; Malik et al., 2025).

Παρά το γεγονός ότι τα ηλεκτρικά οχήματα αντιπροσωπεύουν μια σημαντική πρόοδο στις βιώσιμες μεταφορές, αντιμετωπίζουν πολλές τεχνικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν, προκειμένου να επιτευχθεί η ευρεία υιοθέτηση τους και η βέλτιστη απόδοση τους. Αυτές οι προκλήσεις περιλαμβάνουν περιορισμούς στην τεχνολογία των μπαταριών, συμπεριλαμβανομένης της ενεργειακής πυκνότητας, των χρόνων φόρτισης και της διάρκειας ζωής, καθώς και ζητήματα θερμικής διαχείρισης για την αποφυγή υπερθέρμανσης (Hwang et al., 2024). Επιπλέον, η ανάπτυξη αποτελεσματικής και αξιόπιστης υποδομής φόρτισης, από κοινού με την ενσωμάτωση ενός αυτόνομου συστήματος υποβοήθησης οδήγησης, παρουσιάζουν ορισμένα περαιτέρω τεχνικά

εμπόδια. Η υπέρβαση αυτών των εμποδίων απαιτεί συνεχή καινοτομία και συνεργασία σε όλους τους τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας και της τεχνολογίας, διασφαλίζοντας ότι τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των καταναλωτών και στα περιβαλλοντικά πρότυπα (Li et al., 2023).

Ειδικότερα, η ανάπτυξη ενός κατάλληλου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με μεγαλύτερη αυτονομία και ταχύτερη φόρτιση αποτελεί μια κρίσιμη πρόκληση για τα ηλεκτρικά οχήματα. Οι μπαταρίες στερεάς κατάστασης μπορούν να βελτιώσουν την αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων αποθηκεύοντας περισσότερη ενέργεια, καθώς οι υγροί ηλεκτρολύτες αντικαθίστανται με στερεούς (Malik et al., 2025). Επιπλέον, ο συνδυασμός τεχνολογιών Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT – Internet of Things) και μηχανικής μάθησης σε συστήματα διαχείρισης ενέργειας μπορεί να βελτιστοποιήσει την κατανάλωση ενέργειας, με αποτέλεσμα την αποτελεσματική κατανομή της ισχύος κατά τη φόρτιση και την οδήγηση. Οι εφαρμογές μπαταριών δεύτερης ζωής στην ανάπτυξη αποτελεσματικών μεθόδων ανακύκλωσης και εφαρμογών σταθερής αποθήκευσης μπορούν επίσης να βελτιώσουν τη διαθεσιμότητα πόρων για νέα συστήματα αποθήκευσης. Αναμένεται πως η απαίτηση για κοβάλτιο, λίθιο, νικέλιο και άλλα μέταλλα θα αυξηθεί σημαντικά λόγω της ευρείας ανάπτυξης των ηλεκτρικών οχημάτων (Dimsdale, 2022).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ευρύτερη διάδοση των ηλεκτρικών οχημάτων αναμένεται να οδηγήσει σε αυξημένη ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο (Boulakhbar et al., 2020). Η υιοθέτηση τεχνολογίας έξυπνων δικτύων που επιτρέπει την παρακολούθηση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο για τη διαχείριση του φορτίου είναι σημαντική για την αποφυγή μιας πιθανής υπερφόρτωσης στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της μαζικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Επίσης, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα πρέπει να ενσωματωθούν, προκειμένου να υποστηρίξουν τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων χωρίς υπερφόρτωση των δικτύων. Ο μηχανισμός οχήματος-δικτύου (V2G – Vehicle to Grid) θα πρέπει να εφαρμοστεί για τη διαχείριση φορτίου, ώστε οι χρήστες να μπορούν να επιστρέφουν την πλεονάζουσα ισχύ στο δίκτυο (Malik et al., 2025).

Η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων συνδέεται εν γένει με διακυμάνσεις στην τάση, ειδικά όταν υπάρχει υπερβολικό φορτίο και το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας δεν μπορεί να καλύψει τη ζήτηση. Λόγω της μη γραμμικότητας των φορτίων των ηλεκτρικών οχημάτων, έχει αποδειχθεί ότι αυτά ευθύνονται σε μεγάλο βαθμό για τη δημιουργία αστάθειας τάσης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα όταν η διείσδυση και τα επίπεδα φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι υψηλά. Τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του ηλεκτρικού δικτύου θα μπορούσαν να βελτιώσουν ένας συσσωρευτής και ένα έξυπνο σύστημα φόρτισης (Lebrouhi et al., 2021).

Η ηλεκτρική ενέργεια που απορροφάται από τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να υπερβαίνει την ισχύ που είναι διαθέσιμη στο ηλεκτρικό δίκτυο, πολλώ δε μάλλον όταν φορτίζεται ταυτόχρονα ένας μεγάλος αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων (Malik et al., 2025). Επιπλέον, διαφορετικοί παράγοντες όπως η γρήγορη φόρτιση, η μονοφασική φόρτιση σε AC, η εμβέλεια των ηλεκτρικών οχημάτων και ο αριθμός των οχημάτων που φορτίζονται ταυτόχρονα μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα της ισχύος. Αυτή η ανεξέλεγκτη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση έξυπνων συστημάτων φόρτισης με αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ των σταθμών φόρτισης και του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας (Zahedmanesh et al., 2020).

Ακόμη, τα ηλεκτρικά οχήματα προκαλούν το μεγαλύτερο μέρος των απωλειών ενέργειας του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Ο προσδιορισμός της βέλτιστης τοποθέτησης και χωρητικότητας για τους σταθμούς φόρτισης, η χρήση έξυπνων μετρήσεων, η ομοιόμορφα κατανεμημένη φόρτιση και άλλες στρατηγικές μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις απώλειες τροφοδοσίας. Οι μετασχηματιστές ενδέχεται να υπερθερμανθούν λόγω της υψηλής ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο. Μεταξύ των τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την αποτροπή της υπερθέρμανσης των μετασχηματιστών είναι η χρήση μιας έξυπνης τεχνικής διαχείρισης φορτίου και η χρήση της προσέγγισης υποβάθμισης του συντελεστή K (Tasnim et al., 2023).

Καθώς τα ηλεκτρικά οχήματα καθίστανται πιο συνδεδεμένα, η ενσωμάτωση προηγμένων συστημάτων λογισμικού με την παράλληλη προστασία της κυβερνοασφάλειας εγείρουν πρόσθετες ανησυχίες. Περαιτέρω, σε σύγκριση με τις ΜΕΚ, το κόστος παραγωγής των ηλεκτρικών οχημάτων, ιδίως των μπαταριών, εξακολουθεί να είναι υψηλό, γεγονός που αυξάνει την τιμή των ηλεκτρικών οχημάτων για τους καταναλωτές. Ακόμη, η ενδεδειγμένη απόρριψη και ανακύκλωση των μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων είναι ζωτικής σημασίας για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ωστόσο, οι υφιστάμενες διαδικασίες είναι δαπανηρές και αναποτελεσματικές (Malik et al., 2025).

Όσον αφορά τις προκλήσεις αναφορικά με τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων, η ομοιόμορφη ανάπτυξη των φορτιστών ηλεκτρικών οχημάτων σε αγροτικές και αστικές περιοχές είναι απαραίτητη, προκειμένου να αποφευχθεί η άνιση υιοθέτηση εγκαταστάσεων ηλεκτρικών οχημάτων στις αστικές περιοχές. Επιπλέον, οι εκάστοτε κυβερνήσεις θα πρέπει να παρέχουν κίνητρα για την εγκατάσταση οικιακών φορτιστών, ειδικά σε υπανάπτυκτες περιοχές (Martínez-Gómez & Espinoza, 2024). Το υψηλότερο αρχικό κόστος που συνδέεται με τα ηλεκτρικά οχήματα και η ακριβή υποδομή φόρτισης αποτελούν το κύριο εμπόδιο για την ανάπτυξη της αγοράς ηλεκτρικών οχημάτων και ως εκ τούτου θα πρέπει να παρέχονται οικονομικά κίνητρα τόσο στους κατασκευαστές, όσο και στους τελικούς χρήστες. Επιπλέον, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου των ηλεκτρικών οχημάτων θα πρέπει να ανακυκλώνονται, προκειμένου να μειωθεί η εξάρτηση από τις πρώτες ύλες και το σχετικό κόστος. Η συνεργασία μεταξύ κυβέρνησης, κατασκευαστών και παρόχων ενέργειας θα πρέπει να γίνει για την ανάπτυξη συνεκτικών πολιτικών υιοθέτησης ηλεκτρικών οχημάτων. Από αυτή την άποψη, η τεχνητή νοημοσύνη και η ανάλυση δεδομένων μπορούν επίσης να προβλέψουν τη ζήτηση ηλεκτρικών οχημάτων και να κατανείμουν αποτελεσματικά τους πόρους (Alanazi, 2023).

Οι αβεβαιότητες από την πλευρά των χρηστών μπορούν να μειωθούν παρέχοντας ευέλικτες λύσεις φόρτισης, διαφοροποιημένα μοντέλα τιμολόγησης, βελτιωμένη αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων και παρατεταμένο κύκλο ζωής των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων. Η υιοθέτηση ηλεκτρικών οχημάτων θα πρέπει να ευθυγραμμίζεται με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, όπως ακριβώς τα δίκτυα φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων θα πρέπει να χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές

ενέργειας, βιώσιμες διαδικασίες παραγωγής με ελάχιστο αποτύπωμα άνθρακα, την ανακύκλωση των μπαταριών ιόντων λιθίου για την ελαχιστοποίηση της απόρριψης αποβλήτων στο περιβάλλον, καθώς και την εκπαίδευση των πολιτών σχετικά με τα περιβαλλοντικά οφέλη των ηλεκτρικών οχημάτων (Lebrouhi et al., 2021).

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων πρέπει να προγραμματίζεται αποτελεσματικά και να συνοδεύεται από μια ιδανική προσέγγιση διαχείρισης για την αποφυγή υπερφόρτωσης που προκαλείται από το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων, αλλά και για την προστασία του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας από πιθανές απειλές. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι, ακόμη και για έθνη με συγκρίσιμα μερίδια στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μπορεί να υπάρχουν διαφορές στις στρατηγικές διαχείρισης που χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη της φόρτισης ενός μεγαλύτερου αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων. Σε ορισμένες περιοχές με ανεπαρκές δίκτυο υποδομών ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτείται περισσότερη ενίσχυση του δικτύου και σημαντικές τεχνικές φόρτισης. (Zhang et al., 2023).

Κεφάλαιο 4. Αμμωνία & ΜΕΚ

4.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Η απαλλαγή του τομέα των μεταφορών από τον άνθρακα βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ανάπτυξη τεχνολογίας και στην εφαρμογή καυσίμων χωρίς άνθρακα, όπως το υδρογόνο και η αμμωνία, ή στην ηλεκτροκίνηση. Η πρόκληση με την ηλεκτροκίνηση είναι οι χαμηλές ενεργειακές πυκνότητες στις μπαταρίες, γεγονός που τις καθιστά λιγότερο κατάλληλες για μεταφορές μεγάλων αποστάσεων (Mertens et al., 2020). Για τέτοιες εφαρμογές, η ενέργεια που αποθηκεύεται σε χημικές ενώσεις έχει αποδειχθεί μια πολλά υποσχόμενη λύση. Το υδρογόνο είναι ένας ενεργειακός φορέας που μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί απευθείας ως καύσιμο, είτε να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω κυψελών καυσίμου. Παρά τις ευνοϊκές ιδιότητες του υδρογόνου, όπως το γεγονός ότι το H_2O αποτελεί το προϊόν της καύσης και τα ευρεία όρια ευφλεκτότητας, οι αυστηρές απαιτήσεις για την αποθήκευση υγρών οδηγούν σε υψηλό κόστος και σχετικά χαμηλή συνολική ενεργειακή απόδοση. Για να διευκολυνθούν οι απαιτήσεις αποθήκευσης, το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί μέσω ενός φορέα του υδρογόνου, όπως η αμμωνία. Η αμμωνία υγροποιείται πιο εύκολα, καθιστώντας εφικτή τη μακροχρόνια αποθήκευση και μεταφορά ενέργειας με χαμηλότερο κόστος. Έχει επίσης το πλεονέκτημα της υψηλότερης ογκομετρικής ενεργειακής πυκνότητας (Pedersen et al., 2023).

Η αμμωνία (NH_3) είναι μια σημαντική ουσία που χρησιμοποιείται ως λίπασμα σε όλο τον κόσμο με ετήσια παραγωγή άνω των 150 εκατομμυρίων τόνων. Στη συντριπτική τους πλειοψηφία οι καλλιέργειες σε παγκόσμιο επίπεδο λιπαίνονται με άζωτο σε συνδυασμό με αμμωνία, αλλά η παραγωγή της είναι πολύ υψηλής ενεργειακής έντασης (χρησιμοποιεί περίπου το 2% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται στον κόσμο) και ευθύνεται περίπου για το 1% των εκπομπών CO_2 παγκοσμίως. Γενικά, η παραγωγή ενός μορίου NH_3 έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή ενός μορίου CO_2. Στη φύση, υπάρχει η παραγωγή αμμωνίας με την αποσύνθεση (σήψη) φυτικών και ζωικών αποβλήτων από βακτήρια. Μπορεί επίσης να παραχθεί κατά την πυρόλυση του άνθρακα, ως υποπροϊόν της παραγωγής οπτάνθρακα και αερίου άνθρακα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η αμμωνία εμφανίζεται ως υδροξείδιο του αμμωνίου, ένα υγρό που

χρησιμοποιείται συνήθως ως καθαριστικό μέσο που είναι συνήθως γνωστό ως «αμμωνία» (Sadeq, 2024).

Η αμμωνία χρησιμοποιείται επίσης σε συστήματα ψύξης με κύκλους απορρόφησης. Η άνυδρη αμμωνία (χωρίς προσθήκη νερού) μπορεί να αποτελέσει υποκατάστατο της βενζίνης σε κινητήρες ΜΕΚ ή ακόμα και ντίζελ και το κύριο ενδιαφέρον είναι να χρησιμοποιηθεί ως «φορέας ενέργειας», προκειμένου να υποκαταστήσει την ηλεκτρική ενέργεια (ή το υδρογόνο) ως μέσο μεταφοράς της ενέργειας από τον τόπο παραγωγής της (αιολικό πάρκο ή πυρηνικός σταθμός) στον τόπο όπου θα χρησιμοποιηθεί, όπως για την τροφοδοσία οχημάτων. Σε σύγκριση με το υδρογόνο (άλλος φορέας ενέργειας), ένα λίτρο υγρής αμμωνίας (10 bar και 25 °C) φέρει 30% περισσότερο υδρογόνο από 1 λίτρο υγρού υδρογόνου (-253 °C) (Mertens et al., 2020).

Η μελέτη της αμμωνίας ως πιθανό καύσιμο για τις ΜΕΚ χρονολογείται από τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Εν συντομία, μετά από ορισμένες σχετικές απόπειρες που σημειώθηκαν κατά τις δεκαετίες του '30/'40, η μετατροπή ενός φορτηγού από την Norsk Hydro και ενός στόλου λεωφορείων από μια βελγική δημόσια εταιρεία κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου κατέδειξε τις δυνατότητες χρήσης της αμμωνίας ως πηγής καυσίμου. Είκοσι χρόνια αργότερα, αρκετές αμερικανικές μελέτες εξέτασαν τη δυνατότητα χρήσης της αμμωνίας ως καυσίμου, αλλά μόνο πειραματικές εφαρμογές ή μεμονωμένες δοκιμές οχημάτων πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου (Nie et al., 2024). Το 1972, το πρώτο αστικό όχημα που τροφοδοτούνταν με αμμωνία και κατασκευάστηκε στο Πανεπιστήμιο του Τενεσί διαγωνίστηκε στον Διαγωνισμό Σχεδιασμού Αστικών Οχημάτων. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 2010 θα αναληφθούν αρκετές ερευνητικές πρωτοβουλίες, προκειμένου να καταδειχθεί πώς η αμμωνία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε συνδυασμό με βενζίνη ή ντίζελ. Αυτές οι πειραματικές εφαρμογές οδήγησαν μεταξύ άλλων στην διασφάλιση ενός διπλώματος ευρεσιτεχνίας από την Toyota και την κατασκευή ορισμένων νέων αυτοκινήτων που κινούνται με καύσιμο NH_3 που δοκιμάστηκαν κατά τη διάρκεια των ετών 2010-2015 (π.χ. AmVeh, Eco Explorer Marangoni Toyota κ.ά.) (Mounaïm-Rousselle et al., 2021).

Λόγω των χαρακτηριστικών καύσης της αμμωνίας και ειδικότερα των χαμηλών ταχυτήτων διάδοσης της φλόγας και της υψηλής θερμοκρασίας αυτανάφλεξης, οι λόγοι συμπίεσης έως και 35 είναι απαραίτητοι για τη χρήση της αμμωνίας ως αποκλειστικού

καυσίμου σε κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση (Han et al., 2022). Για να διευκολυνθεί η χρήση χαμηλότερων λόγων συμπίεσης, η εισαγωγή ενός δευτερογενούς καυσίμου ως πιλοτικού καυσίμου ή μιας τεχνολογίας λειτουργίας διπλού καυσίμου είναι μια βιώσιμη λύση. Αντικαθιστώντας τμήματα του καυσίμου υδρογονανθράκων με αμμωνία, οι εκπομπές CO_2 μειώνονται. Ωστόσο, η αμμωνία θα μπορούσε να παράγει υψηλότερες εκπομπές NOx λόγω του αζώτου που συνδέεται με το καύσιμο, και οι αυξημένες εκπομπές του αερίου υποξειδίου του αζώτου που υποβαθμίζει το κλίμα θα μπορούσαν να αντισταθμίσουν τα οφέλη της αξιοποίησης της στο πλαίσιο των ΜΕΚ (Wolfram et al., 2022).

4.2 Αξιοποίηση της αμμωνίας ως καυσίμου για τις ΜΕΚ

Η αμμωνία είναι ένα εύφλεκτο, άχρωμο αέριο. Μπορεί εύκολα να υγροποιηθεί, χάρη στους ισχυρούς δεσμούς υδρογόνου και επομένως μεταφέρεται εύκολα σε θερμομονωμένα δοχεία. Η πίεση αποθήκευσης (0,8 MPa) τη; μπορεί επίσης να είναι πολύ χαμηλότερη από αυτήν που απαιτείται για το υδρογόνο (έως 70 Mpa). Οι ατμοί αμμωνίας μπορεί να είναι διαβρωτικοί και τοξικοί, αλλά η έντονη οσμή που τους χαρακτηρίζει διευκολύνει τον εντοπισμό διαρροών. Η χαμηλή χημική αντιδραστικότητα της αποτελεί πλεονέκτημα σε καταστάσεις, όπου υπάρχει κίνδυνος εκρήξεων, αλλά, ταυτόχρονα, αποτελεί και μια δυσκολία που πρέπει να ξεπεραστεί στη διαδικασία της καύσης (Langella et al., 2022). Επί του παρόντος, το 85% της παγκόσμιας παραγωγής αμμωνίας λαμβάνεται μέσω της διαδικασίας Haber-Bosch. Αυτή η διαδικασία, η οποία είναι γνωστή εδώ και περισσότερο από έναν αιώνα, τροφοδοτείται κυρίως από ορυκτά καύσιμα και ως εκ τούτου απελευθερώνει σημαντική ποσότητα CO_2 στην ατμόσφαιρα. Αυτή η διαδικασία απαιτεί πολλή ενέργεια, περίπου 8 MWh για κάθε τόνο παραγόμενης αμμωνίας (Valera-Medina et al., 2018).

Είναι επομένως σαφές ότι μια πραγματική ενεργειακή μετάβαση δεν θα πρέπει να επικεντρώνεται τόσο πολύ στους απαλλαγμένους από άνθρακα φορείς ενέργειας, όσο μάλλον στην απαλλαγή των διαδικασιών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τους, από τον άνθρακα. Υπό αυτή την έννοια, με βάση τη διαδικασία παραγωγής, μπορεί να πραγματοποιηθεί διάκριση μεταξύ καφέ, μπλε και πράσινης αμμωνίας (Sonker et al., 2022). Η καφέ αμμωνία είναι αυτή που παράγεται με χρήση ορυκτών

καυσίμων, όπως συμβαίνει σήμερα ως επί το πλείστον. Η μπλε αμμωνία παράγεται ξεκινώντας από ορυκτά καύσιμα αλλά με την προσθήκη μιας διαδικασίας δέσμευσης και αποθήκευσης του άνθρακα που περιορίζει την εκπομπή CO_2 στην ατμόσφαιρα. Η πράσινη αμμωνία παράγεται αποκλειστικά από το νερό και τον αέρα και μέσω της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές (Langella et al., 2022).

Το N_2O θεωρείται το τρίτο πιο σημαντικό και ισχυρό αέριο θερμοκηπίου μακράς διαρκείας, μετά από το CO_2 και το μεθάνιο (CH_4). Η διάρκεια ζωής του στην ατμόσφαιρα και την τροπόσφαιρα είναι περίπου 100 χρόνια και είναι ένας ισχυρός απορροφητής της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ικανότητα παγίδευσης θερμότητας στην ατμόσφαιρα, η οποία είναι περίπου 300 φορές ισχυρότερη σε σύγκριση με το διοξείδιο του άνθρακα. Μια πρόσθετη συνέπεια της ρύπανσης από N_2O είναι ότι αυτό καταναλώνει όζον (O_3) για να σχηματίσει NO, ενισχύοντας την καταστροφή του όζοντος στη στρατόσφαιρα. Ο συνυπολογισμός λοιπόν της έκλυσης N_2O είναι επομένως μια κρίσιμη παράμετρος για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του κινητήρα (Glarborg, 2022). Μελέτες έχουν δείξει ότι ο σχηματισμός N_2O κατά την καύση αμμωνίας οφείλεται στις δύο κύριες οδούς αντίδρασης, $NH_2 + NO_2 \rightleftharpoons N2O + H_2O$ και $NH + NO \rightleftharpoons N_2O + H$, όπου η πρώτη οδός είναι η κύρια αιτία σε χαμηλές θερμοκρασίες και η δεύτερη σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Το N_2O που σχηματίζεται από τη δεύτερη οδό συνήθως καταναλώνεται συγκριτικά γρήγορα αντιδρώντας με ατομικό Η ή θερμική διάσπαση, επομένως θεωρείται λιγότερο ανησυχητικό για το περιβάλλον (Pedersen et al., 2023).

Η αμμωνία χρησιμοποιείται κυρίως για την τροφοδοσία κινητήρων ανάφλεξης με σπινθήρα. Αυτό οφείλεται στην υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης και στον υψηλό αριθμό οκτανίων. Ο υψηλός αριθμός οκτανίων επιτρέπει την αύξηση του λόγου συμπίεσης χωρίς τον κίνδυνο κρουστικής καύσης σε σύγκριση με έναν κινητήρα βενζίνης, επιτρέποντας την αύξηση της θερμικής απόδοσης του κινητήρα σε περίπου 37% (Stępień, 2025). Η θερμαντική αξία του στοιχειομετρικού μείγματος αμμωνίας με αέρα είναι υψηλότερη από αυτή του μείγματος βενζίνης με αέρα, αλλά η κατανάλωση αμμωνίας είναι διπλάσια από αυτή της βενζίνης λόγω της χαμηλής αναλογίας περίσσειας αέρα προς αμμωνία (6:1). Η αμμωνία χρησιμοποιείται σπάνια ως αποκλειστικό καύσιμο. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ένα άλλο καύσιμο που

λειτουργεί ως ενισχυτής καύσης προστίθεται στην αμμωνία. Ο πιο συνηθισμένος ενισχυτής καύσης είναι το υδρογόνο, αλλά χρησιμοποιούνται επίσης βενζίνη, αιθανόλη, υγραέριο και φυσικό αέριο. Τα αποτελέσματα των δοκιμών σχετικά με τη χρήση καθαρής αμμωνίας για την τροφοδοσία κινητήρων ανάφλεξης με σπινθήρα έδειξαν δυσκολίες στη λειτουργία του κινητήρα πάνω από την ταχύτητα των περίπου 2000 σ.α.λ. λόγω προβλημάτων στη διαδικασία καύσης που προκαλούνται από τη δύσκολη ανάφλεξη, τη χαμηλή αντιδραστικότητα της αμμωνίας, την ασταθή διαδικασία καύσης του μείγματος, το στενό εύρος ευφλεκτότητας της αμμωνίας και τη χαμηλή ταχύτητα εξάπλωσης της στρωματικής φλόγας (Zhang et al., 2024).

Η αργή διάδοση της φλόγας έχει ως αποτέλεσμα την παράταση του χρόνου καύσης και επομένως απαιτεί αλλαγή (βελτιστοποίηση) της γωνίας προώθησης της ανάφλεξης, δηλαδή του χρονισμού ανάφλεξης σε σχέση με την περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα. Σημαντικές δυσκολίες εμφανίζονται επίσης σε συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα στο εύρος χαμηλών φορτίων και σε μεταβλητές στροφές και σε μεταβλητο φορτίο του κινητήρα. Όπως αναφέρθηκε, τα παραπάνω προβλήματα μπορούν να μειωθούν αξιόπιστα χρησιμοποιώντας υψηλό λόγο συμπίεσης, υπερτροφοδότηση του κινητήρα και σύστημα ανάφλεξης με υψηλή ενέργεια ανάφλεξης (π.χ. πλάσμα) (Sonker et al., 2022). Ταυτόχρονα, σημειώνεται επίσης ότι ο κινητήρας θα μπορούσε να λειτουργεί ομαλά σε όλες τις συνθήκες μετά την προσθήκη μικρής ποσότητας υδρογόνου στην αμμωνία, ως μείγμα καυσίμου και ως ενισχυτή καύσης. Ένα άλλο πλεονέκτημα του υδρογόνου ως μείγματος με την αμμωνία είναι ότι ένα τέτοιο μείγμα καυσίμου θα συνεχίσει να είναι απαλλαγμένο από εκπομπές CO_2. Η βέλτιστη ποσότητα μείγματος υδρογόνου προσδιορίστηκε ότι είναι μεταξύ 5 και 10% κατ' όγκο, η οποία, εκτός από τη βελτίωση της διαδικασίας καύσης, αυξάνει τη θερμική απόδοση του κινητήρα έως και > 42% και αυξάνει την ισχύ του. Ένα υψηλότερο μερίδιο υδρογόνου στο μείγμα με την αμμωνία οδηγεί σε μείωση της θερμικής απόδοσης του κινητήρα λόγω της αύξησης της ποσότητας θερμότητας που διαχέεται μέσω των τοιχωμάτων του θαλάμου καύσης του κινητήρα. Επιπλέον, η προσθήκη H_2 στην NH_3 μειώνει την εκπομπή άφλεκτης NH_3 (Stępień, 2025).

Για τους υπάρχοντες κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα που τροφοδοτούνται με αμμωνία, η βενζίνη χρησιμοποιείται συχνά ως δεύτερο καύσιμο (υποστηρίζοντας τη διαδικασία καύσης ως ενισχυτής). Ένας τέτοιος κινητήρας «διπλού καυσίμου» που

τροφοδοτείται τόσο με αμμωνία, όσο και με βενζίνη, επιτρέπει επίσης στον κινητήρα να λειτουργεί μόνο με βενζίνη, κάτι που είναι ευεργετικό επειδή μελέτες έχουν δείξει ότι η λειτουργία ενός κινητήρα που τροφοδοτείται με αμμωνία στο ρελαντί τείνει να είναι πολύ ασταθής (Ghosh et al., 2021). Επιπλέον, η παρουσία αμμωνίας αυξάνει σημαντικά τον αριθμό οκτανίων του μείγματος καυσίμου, με αποτέλεσμα μια σημαντικά μεγαλύτερη αντίσταση στην καύση με κρουστικό κτύπημα, η οποία, αυξάνοντας τον λόγο συμπίεσης, επιτρέπει τη βελτιωμένη θερμική απόδοση του κινητήρα. Πρόσθετα οφέλη σε μια τέτοια περίπτωση μπορούν να προκύψουν από τη χρήση ψεκασμού υγρής αμμωνίας. Η αμμωνία στην υγρή φάση δεν εκτοπίζει τόσο αέρα, όσο στην περίπτωση της αέριας φάσης και, μέσω της εξάτμισής της, ψύχει το παρασκευασμένο εύφλεκτο μείγμα, επιτρέποντας την παροχή δόσης υψηλότερης πυκνότητας στον κύλινδρο. Ωστόσο, αυτό προκαλεί σημαντική μείωση της θερμοκρασίας του μείγματος κατά τη συμπίεση, μαζί με τη μεγαλύτερη ανομοιογένειά του και δυσχεραίνει την επακόλουθη διαδικασία ανάφλεξης και καύσης (Stępień, 2025).

Λόγω της χαμηλής αντιδραστικότητας της αμμωνίας, της πολύ υψηλής θερμοκρασίας αυτοανάφλεξης και του πολύ χαμηλού αριθμού κετανίου (21), η αυθόρμητη ανάφλεξη ενός στοιχειομετρικού μείγματος αμμωνίας είναι εξαιρετικά δύσκολη. Πειραματικά αποτελέσματα έχουν αποδείξει ότι απαιτείται λόγος συμπίεσης τουλάχιστον 40:1 ή περισσότερο για την επίτευξη αυτοανάφλεξης αμμωνίας με συμπίεση χωρίς προθέρμανση του αέρα εισαγωγής. Ακόμα και όταν ο αέρας εισαγωγής θερμαίνεται στους 148°C, απαιτείται λόγος συμπίεσης 35:1 για την αυθόρμητη καύση της αμμωνίας (Tornatore et al., 2022). Τέτοιες υψηλές αναλογίες συμπίεσης οδηγούν σε αυξημένη απώλεια θερμότητας λόγω της υψηλής αναλογίας επιφάνειας προς όγκο του θαλάμου καύσης και απωλειών τριβής που μπορούν να αντισταθμίσουν την αύξηση της θερμικής απόδοσης που επιτυγχάνεται με την αυξημένη αναλογία συμπίεσης. Έχουν επίσης γίνει προσπάθειες για την υποβοήθηση της ανάφλεξης της αμμωνίας χρησιμοποιώντας αναφλεκτήρες υψηλής ενέργειας, προθερμαντήρες και ειδικά πηνία πυράκτωσης υψηλής θερμοκρασίας. Ωστόσο, αυτά τα πειράματα ήταν ανεπιτυχή (Stępień, 2025).

Σε άλλες μελέτες, έγιναν προσπάθειες για την υποστήριξη της διαδικασίας ανάφλεξης με υγρή αμμωνία σε κινητήρα συμπίεσης χρησιμοποιώντας αναφλεκτήρα. Ένα

ικανοποιητικό αποτέλεσμα τόσο της ανάφλεξης, όσο και της καύσης επιτεύχθηκε σε λόγους συμπίεσης στην περιοχή 16:1–24:1. Η υψηλότερη τιμή απόδοσης του κινητήρα που επιτεύχθηκε ήταν στη γωνία προώθησης ψεκασμού 150–180 BTDC για την υγρή αμμωνία. Η μέγιστη ισχύς του κινητήρα που επιτεύχθηκε ήταν 10% χαμηλότερη από την ισχύ του κινητήρα που τροφοδοτήθηκε με πετρέλαιο ντίζελ. Ο στοιχειομετρικός λόγος αέρα προς καύσιμο-αμμωνία ήταν 6,0466 σε σύγκριση με 14,322 στην περίπτωση του πετρελαίου ντίζελ. Αυτό υποδεικνύει χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα αμμωνίας, η οποία μπορεί να αντισταθμιστεί με την έγχυση μεγαλύτερης δόσης καυσίμου στον κύλινδρο με το παρασκευασμένο μείγμα, επιτυγχάνοντας έτσι ενεργειακή πυκνότητα συγκρίσιμη με το στοιχειομετρικό μείγμα αέρα-ντίζελ (Stępień, 2025).

4.3 Πλεονεκτήματα & τεχνικές προκλήσεις

Σε απάντηση στην υπερβολική εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, αναδεικνύεται ο καθοριστικός ρόλος των καθαρών, χωρίς άνθρακα καυσίμων και των συστημάτων ισχύος ηλεκτροκίνητων οχημάτων. Το υδρογόνο αναδεικνύεται ως ένα εξαιρετικό παράδειγμα καυσίμου χωρίς άνθρακα, με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και απόδοση καύσης. Οι εφαρμογές του κυμαίνονται τις ΜΕΚ έως τις κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, οι οποίες είναι ιδιαίτερα διαδεδομένες στις βαριές μεταφορές μεγάλων αποστάσεων (Zhang et al., 2024). Παρά την πολλά υποσχόμενη δράση της, η παγκόσμια βιομηχανία υδρογόνου αντιμετωπίζει σημαντικά σημεία συμφόρησης, συμπεριλαμβανομένων διαπεριφερειακών προκλήσεων, ανησυχιών για την ασφάλεια, του υψηλού κόστους και των δυσκολιών που σχετίζονται με την αποθήκευση και τη μεταφορά του σε μεγάλη κλίμακα. Εν μέσω αυτών των προκλήσεων, η αμμωνία έχει αναδειχθεί ως ένα πολλά υποσχόμενο καύσιμο χωρίς άνθρακα, παρουσιάζοντας πλεονεκτήματα που έχουν γίνει ολοένα και πιο εμφανή τα τελευταία χρόνια (Hasankhani et al., 2024).

Με περιεκτικότητα σε υδρογόνο κατά μάζα 17,8%, η αμμωνία χρησιμεύει ως ένας εξαιρετικός φορέας για το υδρογόνο. Ξεπερνώντας τις προκλήσεις που σχετίζονται με την υγροποίηση του υδρογόνου, η αμμωνία επιτυγχάνει υγροποίηση σε θερμοκρασία δωματίου υπό πίεση 9 bar ή σε κανονική ατμοσφαιρική πίεση < -34°C, διευκολύνοντας την αποθήκευση και τη μεταφορά του (Asif et al., 2023). Ως μια βασική πρώτη ύλη στη χημική βιομηχανία με χαμηλό κόστος παραγωγής, η αμμωνία παρουσιάζεται ως

μια βιώσιμη εναλλακτική λύση. Τα πλεονεκτήματά της επεκτείνονται στον ρόλο της ως καύσιμο, συμπεριλαμβανομένης της υψηλής πυκνότητας του υδρογόνου, της χαμηλής θερμαντικής αξίας, του υψηλού αριθμού οκτανίων και της καλής αντοχής της στην ανάφλεξη, συμβάλλοντας στην βελτιωμένη θερμική απόδοση του κινητήρα (Zhang et al., 2024).

Αυτά τα πολύπλευρα πλεονεκτήματα καθιστούν την αμμωνία ένα κρίσιμο παράγοντα στην προσπάθεια για μεγάλης κλίμακας υιοθέτηση καυσίμων με ουδέτερο ισοζύγιο άνθρακα. Οι ώριμες τεχνολογίες για την αποθήκευση και μεταφορά της αμμωνίας, σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος, επιτρέπουν την κυκλοφορία της μέσω διαφόρων καναλιών, συμπεριλαμβανομένων των αυτοκινητοδρόμων, των υδάτινων οδών και των αγωγών μεγάλων αποστάσεων (Tornatore et al., 2022). Εκτιμάται ότι η αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με αμμωνία θα μείωνε σημαντικά τον όγκο των εκπομπών CO_2 (κατά 8–48%, ανάλογα με τη χρήση διαφορετικών στρατηγικών εφαρμογής αμμωνίας) (Stępień, 2025). Η παγκόσμια σημασία της αμμωνίας υπογραμμίζεται από την ένταξή της σε στρατηγικά σχέδια κυβερνήσεων παγκοσμίως, όπως η πρωτοβουλία «Αμμωνία=Υδρογόνο 2.0» της Παγκόσμιας Ένωσης Ενέργειας Αμμωνίας και το «14ο Πενταετές Νέο Σχέδιο Ενεργειακής Ανάπτυξης» της εθνικής ενεργειακής διοίκησης της Κίνας το 2022. Ωστόσο, υπάρχουν προκλήσεις που σχετίζονται με τις δυσκολίες ανάφλεξης και τις ιδιότητες αργής καύσης της αμμωνίας (Zhang et al., 2024). Για την υπέρβαση των ζητημάτων αυτών προτείνεται η προσέγγιση του διπλού καυσίμου, η οποία ενσωματώνει καύσιμα υψηλής δραστικότητας όπως το υδρογόνο. Όντας καύσιμο χωρίς άνθρακα με χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης, ευρύ φάσμα ανάφλεξης, υψηλή θερμοκρασία καύσης και ταχεία διάδοση φλόγας, το υδρογόνο παρουσιάζει υψηλή δραστηριότητα καύσης, αντισταθμίζοντας τη χαμηλή αντιδραστικότητα της αμμωνίας και την αργή ταχύτητα καύσης (Novella et al., 2023).

Η καύση αμμωνίας παράγει κυρίως NO, ένα επιβλαβές προϊόν της καύσης, με μικρά ίχνη NO_2 και υποξειδίου του αζώτου N_2O. Αυτά τα μόρια είναι πρόδρομοι της όξινης βροχής, της φωτοχημικής αιθαλομίχλης και του φαινομένου του θερμοκηπίου. Αν και το NO δεν είναι επικίνδυνο στο περιβάλλον, οξειδώνεται σχετικά γρήγορα σε NO_2 στην ατμόσφαιρα και αποτελεί σημαντικό ρύπο που προκαλεί ανησυχία σε πολλές πόλεις. Το NO_2 μπορεί να προκαλέσει αλλεργικές αντιδράσεις και πνευμονική δυσλειτουργία, ενώ ταυτόχρονα αποτελεί μια ανεπιθύμητη εκπομπή λόγω του ισχυρού φαινομένου του

θερμοκηπίου (Langella et al., 2022; Zhang et al., 2024). Η αμμωνία, λόγω της χαμηλής αντιδραστικότητάς της, έχει μεγαλύτερο χρόνο αντίδρασης από τα περισσότερα αέρια που χρησιμοποιούνται ως καύσιμο. Ως αποτέλεσμα, κατά τη διαδικασία δημιουργίας του μείγματος και στη συνέχεια της καύσης της, οι στροβιλισμοί και οι αναταράξεις που δημιουργούνται έχουν μεγαλύτερη τάση να επηρεάζουν τη διαδικασία καύσης, προκαλώντας την τοπική κατάσβεση και την επανέναρξη της φλόγας, με αποτέλεσμα τη διακοπή της φλόγας. Έχει αποδειχθεί ότι το μεθάνιο μπορεί να καίγεται συνεχώς με ρυθμό ροής αέρα περίπου διπλάσιο από ό,τι στην περίπτωση της αμμωνίας σε ένα πολύ ευρύτερο εύρος συντελεστών περίσσειας αέρα από ό,τι η αμμωνία (Stępień, 2025).

Κεφάλαιο 5. Υδρογόνο & ΜΕΚ

5.1 Εισαγωγικά στοιχεία & είδη υδρογόνου

Το υδρογόνο είναι το ελαφρύτερο από τα εναλλακτικά καύσιμα και μπορεί να παραχθεί μέσω μιας σειράς τεχνολογιών μετατροπής, συμπεριλαμβανομένων των ορυκτών καυσίμων με ή χωρίς δέσμευση άνθρακα, της ηλεκτρόλυσης (ιδανικά χρησιμοποιώντας ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια) ή της βιομάζας. Το υδρογόνο έχει βασικές χρήσεις σε βιομηχανικό πλαίσιο (υδρογόνωση, υδροαποθείωση, αναμόρφωση με ατμό και μεθάνιο, σύνθεση αλκοόλης), εκτός από εφαρμογές του στην επεξεργασία τροφίμων και την παραγωγή λιπασμάτων (Al-Mohannadi et al., 2024). Ως καύσιμο, το υδρογόνο έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην πρόωση πυραύλων για την εξερεύνηση του διαστήματος. Στις οδικές μεταφορές, το υδρογόνο χρησιμοποιείται συνήθως σε κυψέλες καυσίμου, όπου ανάγεται ηλεκτροχημικά σε ιόντα, παράγοντας υδρατμούς ως τη μόνη εκπομπή καυσαερίων, ενώ παράλληλα παράγει ηλεκτρική ενέργεια για τον κινητήρα. Μπορεί να αποθηκευτεί ως κρυογονικό υγρό κάτω από το σημείο βρασμού του στους -253 °C (υποθέτοντας ατμοσφαιρική πίεση) ή ως αέριο υπό υψηλή πίεση (700 bar) για χρήση σε κυψέλες καυσίμου. Το υδρογόνο είναι επίσης βασικό συστατικό στην παραγωγή άλλων εναλλακτικών καυσίμων, όπως το μεθάνιο, η αμμωνία και τα καύσιμα Fischer-Tropsch. Κατηγοριοποιείται με βάση ανάλογα με την οδό παραγωγής του σε: γκρι (παράγεται από υδρογονάνθρακες), μπλε (γκρι με δέσμευση άνθρακα) και πράσινο (μηδενικές εκπομπές με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας) (Gray et al., 2021).

Το γκρι υδρογόνο αναφέρεται στο υδρογόνο που παράγεται από ορυκτά καύσιμα, όπως φυσικό αέριο ή άνθρακα, μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται αναμόρφωση μεθανίου με ατμό. Είναι η πιο κοινή μέθοδος παραγωγής υδρογόνου σήμερα (Hassan et al., 2023). Ωστόσο, η παραγωγή γκρι υδρογόνου παράγει εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, συμβάλλοντας στην κλιματική αλλαγή. Το μπλε υδρογόνο παράγεται από ορυκτά καύσιμα, όντας παρόμοιο με το γκρι υδρογόνο, αλλά με ένα επιπλέον βήμα που ονομάζεται δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα. Η δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα περιλαμβάνει τη δέσμευση του CO_2 που εκπέμπεται κατά την παραγωγή υδρογόνου και την αποθήκευσή του στο υπέδαφος, εμποδίζοντάς το να εισέλθει στην ατμόσφαιρα (El-Emam & Özcan, 2019). Το μπλε υδρογόνο στοχεύει στη μείωση του

αποτυπώματος άνθρακα στο πλαίσιο της παραγωγής υδρογόνου. Το πράσινο υδρογόνο παράγεται χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή ή η αιολική ενέργεια, μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται ηλεκτρόλυση. Η ηλεκτρόλυση περιλαμβάνει τη διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο χρησιμοποιώντας ηλεκτρικό ρεύμα (Concha et al., 2021). Δεδομένου ότι βασίζεται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η παραγωγή πράσινου υδρογόνου δεν έχει άμεσες εκπομπές άνθρακα και θεωρείται μια καθαρή και βιώσιμη επιλογή. Το τιρκουάζ υδρογόνο, επίσης γνωστό ως υδρογόνο χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα ή απαλλαγμένο από άνθρακα, παράγεται με χρήση φυσικού αερίου, αλλά με τις εκπομπές άνθρακα να αντισταθμίζονται από τη δέσμευση και αποθήκευση του CO_2, παρόμοια με το μπλε υδρογόνο. Η διαφορά είναι ότι η παραγωγή τιρκουάζ υδρογόνου συνήθως χρησιμοποιεί έναν διαφορετικό τύπο διαδικασίας αναμόρφωσης μεθανίου που ονομάζεται πυρόλυση μεθανίου, η οποία μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της έντασης άνθρακα της παραγωγής υδρογόνου (Hassan et al., 2022).

Το καφέ υδρογόνο παράγεται από άνθρακα χρησιμοποιώντας αεριοποίηση ή άλλες διαδικασίες. Θεωρείται η μέθοδος παραγωγής υδρογόνου με την υψηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα, καθώς περιλαμβάνει την εξαγωγή υδρογόνου από άνθρακα, ο οποίος είναι ένα ορυκτό καύσιμο υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Η παραγωγή καφέ υδρογόνου παράγει σημαντικές εκπομπές CO^2 και δεν θεωρείται καθαρή ή βιώσιμη επιλογή. Το μωβ υδρογόνο είναι το υδρογόνο που παράγεται από πυρηνικές πηγές ενέργειας, συγκεκριμένα μέσω ηλεκτρόλυσης υψηλής θερμοκρασίας. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί θερμότητα που παράγεται από πυρηνικούς αντιδραστήρες για να εκκινήσει τη διαδικασία ηλεκτρόλυσης, επιτρέποντας την παραγωγή υδρογόνου χωρίς άμεσες εκπομπές άνθρακα (Pinsky et al., 2020).

Η ενέργεια από υδρογόνο είναι μια ευέλικτη και καθαρή πηγή ενέργειας που έχει κερδίσει σημαντική προσοχή ως πιθανή λύση για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και τη μετάβαση σε ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον. Έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων των μεταφορών, της παραγωγής ενέργειας και των βιομηχανικών διεργασιών. Το υδρογόνο είναι το πιο άφθονο στοιχείο στο σύμπαν, αλλά βρίσκεται κυρίως σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία, όπως το οξυγόνο στο νερό ή τον άνθρακα στους υδρογονάνθρακες (Kurc et al., 2024). Για να αξιοποιηθεί το υδρογόνο ως πηγή ενέργειας, πρέπει να εξαχθεί και να

μετατραπεί σε χρησιμοποιήσιμη μορφή. Υπάρχουν διαφορετικές μέθοδοι για την παραγωγή υδρογόνου, όπως η αναμόρφωση μεθανίου με ατμό, η ηλεκτρόλυση, η αεριοποίηση βιομάζας και άλλα. Κάθε μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της όσον αφορά την αποδοτικότητα, το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της (Hassan et al., 2023).

Η επείγουσα ανάγκη για βιώσιμες ενεργειακές λύσεις έχει οδηγήσει σε μια βαθιά επανεκτίμηση των παραδοσιακών τρόπων μεταφοράς παγκοσμίως. Καθώς οι ανησυχίες για την κλιματική αλλαγή, την ατμοσφαιρική ρύπανση και τους πεπερασμένους πόρους ορυκτών καυσίμων κλιμακώνονται, η επιτακτική ανάγκη για μετάβαση σε καθαρότερες εναλλακτικές γίνεται ολοένα και πιο εμφανής. Σε αυτό το μετασχηματιστικό τοπίο, η πιθανή αντικατάσταση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με οχήματα που κινούνται με υδρογόνο ξεχωρίζει ως μια πολλά υποσχόμενη και επαναστατική εναλλακτική λύση (Ishimoto et al., 2020).

Ωστόσο, παρά την αυξανόμενη δημοτικότητά του, οι πιθανές ελλείψεις σε βασικά συστατικά των μπαταριών, όπως το λίθιο, το νικέλιο και το κοβάλτιο, μπορεί να αποτελέσουν απειλή για τον εφοδιασμό. Αυτό εγείρει το ερώτημα εάν είναι πλέον σκόπιμο να μετατοπιστεί η εστίαση στην ενέργεια που βασίζεται στο υδρογόνο. Η ανάπτυξη τεχνολογιών υδρογόνου είναι εξαιρετικά σημαντική για την προστασία του περιβάλλοντος (Szymlet et al., 2024). Οι πιο σημαντικές είναι οι δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας για διάφορες ομάδες οχημάτων. Παρόλο που τα συστήματα κίνησης αναπτύσσονται συνεχώς, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και τα οχήματα που κινούνται με υδρογόνου αποτελούν τις καλύτερες προοπτικές (Kurc et al., 2024).

Σε αντίθεση με την Ευρώπη, όπου μόνο λίγα υδρογόνου αυτοκίνητα είναι διαθέσιμα προς αγορά, συνοδευόμενα από περίπου 228 σταθμούς ανεφοδιασμού, η Ασία δίνει ενεργά προτεραιότητα στο υδρογόνο. Η ιαπωνική κυβέρνηση, για παράδειγμα, προβλέπει ότι θα κυκλοφορούν 800.000 οχήματα υδρογόνου στους δρόμους έως το 2030, ενώ η Κίνα έχει θέσει έναν φιλόδοξο στόχο περί κυκλοφορίας 1 εκατομμυρίου οχημάτων υδρογόνου, έως το 2035 (Olabi et al., 2021). Η δέσμευση της Ιαπωνίας αναμένεται να οδηγήσει σε μείωση του κόστους, αυξημένη παραγωγή και δημιουργία μιας ισχυρής αλυσίδας εφοδιασμού. Ωστόσο, η αυτοκινητοβιομηχανία παραμένει διχασμένη, με λίγους κατασκευαστές να επενδύουν στο υδρογόνο, εκτός από αξιοσημείωτες εξαιρέσεις όπως η Toyota και η Hyundai. Πρόσφατα, η BMW

αναζωπύρωσε το ενδιαφέρον της για το υδρογόνο και προβλέπει έναν συμπληρωματικό ρόλο για τα αυτοκίνητα υδρογόνου, παράλληλα με τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία (Kurc et al., 2024).

Η γερμανική αυτοκινητοβιομηχανία BMW σχεδιάζει να λανσάρει παγκοσμίως έναν μικρό στόλο αυτοκινήτων iX5 Hydrogen μέχρι το τέλος του έτους, κυρίως για σκοπούς δοκιμών. Ομοίως, ο Όμιλος Stellantis έχει ξεκινήσει την περιορισμένη παραγωγή εμπορικών οχημάτων υδρογόνου. Ωστόσο, δεν συμμερίζονται όλες οι μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες την ίδια οπτική. Τόσο η Mercedes, όσο και η Audi έχουν εγκαταλείψει τα σχέδιά τους για την εισαγωγή αυτοκινήτων κυψελών καυσίμου υδρογόνου. Οι αποκλίνουσες στρατηγικές εντός της αυτοκινητοβιομηχανίας αντικατοπτρίζουν τις συνεχιζόμενες συζητήσεις σχετικά με το μέλλον των βιώσιμων μεταφορών και τον ρόλο που θα διαδραματίσει το υδρογόνο στην επίτευξη των κλιματικών στόχων (Kurc et al., 2024).

Ένα ηλεκτρικό όχημα βασίζεται σε ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται σε μια μπαταρία, η οποία φορτίζεται μέσω σύνδεσης στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αντίθετα, ένα ηλεκτρικό όχημα κυψελών καυσίμου υδρογόνου παράγει τη δική του ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας χημικής αντίδρασης στις κυψέλες καυσίμου. Αυτή η ηλεκτρική ενέργεια κινεί τους κινητήρες των τροχών και το μόνο υποπροϊόν είναι οι υδρατμοί. Τα αυτοκίνητα κυψελών καυσίμου υδρογόνου ανεφοδιάζονται σε καθορισμένα πρατήρια. Η ελκυστικότητα ενός αυτοκινήτου υδρογόνου έγκειται στην ικανότητά του να ανεφοδιάζεται με καύσιμο στον ίδιο χρόνο με ένα βενζινοκίνητο ή πετρελαιοκίνητο αυτοκίνητο και να επιτυγχάνει συγκρίσιμη αυτονομία, ενώ παράλληλα παράγει μηδενικές εκπομπές ρύπων (Bairabathina & Balamurugan, 2020).

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της ενέργειας υδρογόνου είναι τα περιβαλλοντικά οφέλη της. Όταν χρησιμοποιείται ως καύσιμο, το υδρογόνο παράγει μόνο υδρατμούς ως υποπροϊόν, καθιστώντας το πηγή ενέργειας μηδενικών εκπομπών. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε τομείς όπως οι μεταφορές, όπου οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδοσία ηλεκτρικών οχημάτων, προσφέροντας μεγάλη αυτονομία και γρήγορους χρόνους ανεφοδιασμού. Επιπλέον, η ενέργεια υδρογόνου έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την αποθήκευση ενέργειας (Yue et al., 2021). Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική, είναι διαλείπουσες και η

παραγωγή τους δεν ευθυγραμμίζεται πάντα με τη ζήτηση ενέργειας. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί σε περιόδους υπερβολικής παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας μέσω ηλεκτρόλυσης και να αποθηκευτεί για μελλοντική χρήση. Ακόμη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας, όταν η προσφορά ανανεώσιμης ενέργειας είναι χαμηλή, παρέχοντας έτσι μια αξιόπιστη και αποσπώμενη ενεργειακή επιλογή (Hassan et al., 2023).

5.2 Τεχνολογία οχημάτων με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου

Η τεχνολογία των HFCVs είναι μια καινοτόμος προσέγγιση στην τροφοδοσία αυτοκινήτων που χρησιμοποιεί υδρογόνο ως κύριο καύσιμο. Στην καρδιά αυτής της τεχνολογίας βρίσκεται μια συσκευή που ονομάζεται κυψέλη καυσίμου, η οποία χρησιμοποιεί υδρογόνο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εντός του οχήματος, τροφοδοτώντας τον ηλεκτροκινητήρα και προσφέροντας μια καθαρή εναλλακτική λύση στους παραδοσιακούς κινητήρες εσωτερικής καύσης. Η τεχνολογία κυψελών καυσίμου είναι η ραχοκοκαλιά των HFCVs, η οποία περιλαμβάνει την ηλεκτροχημική μετατροπή του καυσίμου υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία του ηλεκτροκινητήρα του οχήματος. Τα κύρια συστατικά μιας κυψέλης καυσίμου περιλαμβάνουν μια άνοδο, μια κάθοδο και έναν ηλεκτρολύτη (Kurc et al., 2024).

Όταν το υδρογόνο (H_2) παρέχεται στην άνοδο της κυψέλης καυσίμου, αυτή υφίσταται μια διαδικασία που ονομάζεται οξείδωση του υδρογόνου. Σε αυτή τη διαδικασία, τα μόρια υδρογόνου διασπώνται σε πρωτόνια (H^+) και ηλεκτρόνια ($e-$) μέσω μιας αντίδρασης που διευκολύνεται από έναν καταλύτη (συνήθως πλατίνας) (Olabi & Sayed, 2023):

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$$

Τα πρωτόνια μετακινούνται μέσω του ηλεκτρολύτη, ενώ τα ηλεκτρόνια ταξιδεύουν μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος, δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία του κινητήρα του οχήματος. Στην κάθοδο, το οξυγόνο από τον αέρα συνδυάζεται με τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια για να σχηματίσει νερό ως το μόνο υποπροϊόν (Olabi & Sayed, 2023):

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$$

Αυτή η ηλεκτροχημική αντίδραση παράγει μια συνεχή ροή ηλεκτρικής ενέργειας, επιτρέποντας τη συνεχή λειτουργία του οχήματος. Το σύστημα κυψελών καυσίμου μπορεί να σχεδιαστεί σε διάφορες διαμορφώσεις, όπως κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων, αλκαλικές κυψέλες καυσίμου, κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος και κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου, με τις κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων να είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες στα HFCV (Hassan et al., 2023).

Τα HFCV έχουν σχεδιαστεί για να ενσωματώνουν το σύστημα κυψελών καυσίμου, την αποθήκευση υδρογόνου και τα ηλεκτρικά εξαρτήματα του συστήματος μετάδοσης κίνησης. Τα βασικά στοιχεία του σχεδιασμού και της δομής ενός HFCV περιλαμβάνουν τα ακόλουθα (Shusheng et al., 2020; Enoma et al., 2022; Hassan et al., 2023):

- **Συστοιχία κυψελών καυσίμου:** Η καρδιά του HFCV είναι η συστοιχία κυψελών καυσίμου, η οποία περιέχει πολλαπλές μεμονωμένες κυψέλες καυσίμου. Κάθε κυψέλη καυσίμου αποτελείται από μια άνοδο, μια κάθοδο και έναν ηλεκτρολύτη. Η συστοιχία κυψελών καυσίμου παράγει ηλεκτρική ενέργεια από τη χημική αντίδραση μεταξύ υδρογόνου και οξυγόνου.
- **Αποθήκευση υδρογόνου:** Τα HFCV απαιτούν έναν μηχανισμό για την αποθήκευση καυσίμου υδρογόνου στο όχημα. Οι συνήθεις μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου περιλαμβάνουν κυλίνδρους συμπιεσμένου αερίου υψηλής πίεσης ή κρυογονικές δεξαμενές υγρού υδρογόνου. Αυτά τα συστήματα αποθήκευσης διασφαλίζουν την ασφαλή και αποτελεσματική συγκράτηση του καυσίμου υδρογόνου.
- **Ηλεκτροκινητήρας:** Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τη συστοιχία κυψελών καυσίμου τροφοδοτεί έναν ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος κινεί τους τροχούς του οχήματος. Ο ηλεκτροκινητήρας προσφέρει ομαλή επιτάχυνση και αθόρυβη λειτουργία, συμβάλλοντας στη συνολική απόδοση και αποδοτικότητα των HFCV.
- **Μονάδα ελέγχου ισχύος:** Η μονάδα ελέγχου ισχύος διαχειρίζεται τη ροή ηλεκτρικής ενέργειας από τη συστοιχία κυψελών καυσίμου στον

ηλεκτροκινητήρα. Ρυθμίζει την τάση και το ρεύμα για να εξασφαλίσει βέλτιστη απόδοση και αποδοτικότητα.

- **Βοηθητικά συστήματα:** Τα HFCV ενσωματώνουν επίσης βοηθητικά συστήματα, όπως συστήματα ψύξης για τη διατήρηση της βέλτιστης θερμοκρασίας λειτουργίας της συστοιχίας κυψελών καυσίμου, καθώς και συστήματα παροχής αέρα για την παροχή οξυγόνου για την αντίδραση των κυψελών καυσίμου.
- **Αποθήκευση ενέργειας:** Ορισμένα HFCV περιλαμβάνουν επίσης συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, όπως μπαταρίες ιόντων λιθίου, για τη συλλογή και αποθήκευση της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τη συστοιχία κυψελών καυσίμου. Αυτά τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή πρόσθετης ισχύος σε καταστάσεις υψηλής ζήτησης ή για αναγεννητική πέδηση.

Αρκετές αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν εισαγάγει στην αγορά HFCV. Ωστόσο, η διαθεσιμότητα συγκεκριμένων μοντέλων ποικίλλει ανάλογα με την περιοχή και την αγορά.

1. Το Toyota Mirai είναι ένα από τα πιο γνωστά HFCV υδρογόνου. Διατίθεται σε επιλεγμένες αγορές από το 2014 και έχει υποστεί αρκετές γενιές αναβαθμίσεων. Η τελευταία γενιά του Mirai προσφέρει βελτιωμένη αυτονομία, απόδοση και σχεδιασμό (Hassan et al., 2023).

2. Το Hyundai NEXO είναι ένα άλλο εμπορικά διαθέσιμο HFCV υδρογόνου. Προσφέρει εκτιμώμενη αυτονομία άνω των 600 χλμ. και διαθέτει προηγμένα συστήματα υποβοήθησης και ευρύχωρο εσωτερικό (Sery & Leduc, 2021).

3. Το Honda Clarity Fuel Cell είναι ένα HFCV υδρογόνου που είναι διαθέσιμο προς ενοικίαση σε ορισμένες περιοχές. Προσφέρει θέσεις για έως και πέντε επιβάτες.

4. Το Honda Clarity Fuel Cell είναι ένα HFCV υδρογόνου που είναι διαθέσιμο προς ενοικίαση σε ορισμένες περιοχές. Προσφέρει θέσεις για έως και πέντε επιβάτες (Tanaka et al., 2020).

5. Το Mercedes-Benz GLC F-CELL είναι ένα plug-in υβριδικό HFCV. Συνδύαζε ένα σύστημα κυψελών καυσίμου με μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία, προσφέροντας λειτουργίες οδήγησης τόσο με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου όσο και με ηλεκτρική μπαταρία (Hassan et al., 2023).

6. Το Audi A7 h-tron Quattro είναι ένα πρωτότυπο όχημα HFCV υδρογόνου. Διαθέτει ένα σύστημα κυψελών καυσίμου σε συνδυασμό με μια διαμόρφωση plug-in υβριδικού, παρέχοντας εκτεταμένη αυτονομία και ευελιξία. (Han et al., 2022).

Η διαθεσιμότητα και η γκάμα μοντέλων των HFCV εξελίσσονται συνεχώς, καθώς οι αυτοκινητοβιομηχανίες και οι κυβερνήσεις εργάζονται για την προώθηση υποδομών υδρογόνου και την επέκταση της αγοράς για αυτά τα οχήματα (Kurc et al., 2024).

5.3 Πλεονεκτήματα & τεχνικές προκλήσεις

Τα HFCV προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα και ευκαιρίες σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης. Αυτά τα πλεονεκτήματα και οι ευκαιρίες πηγάζουν από τα μοναδικά χαρακτηριστικά του υδρογόνου ως καυσίμου και την αποτελεσματική και καθαρή λειτουργία της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου.

- **Μηδενικές εκπομπές:** Τα HFCV παράγουν μηδενικές εκπομπές καυσαερίων, καθώς το μόνο υποπροϊόν της ηλεκτροχημικής αντίδρασης είναι οι υδρατμοί. Αυτό καθιστά τα HFCV μια φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα, συμβάλλοντας στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα και στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Hassan et al., 2023; Kurch et al., 2024).

- **Ενεργειακή απόδοση:** Τα στοιχεία καυσίμου μπορούν να επιτύχουν υψηλότερη απόδοση μετατροπής ενέργειας σε σύγκριση με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης. Η άμεση μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια στα στοιχεία καυσίμου έχει ως αποτέλεσμα λιγότερη σπατάλη ενέργειας, οδηγώντας σε μεγαλύτερη συνολική απόδοση και μειωμένη κατανάλωση ενέργειας (Enoma et al., 2022).

- **Εκτεταμένη αυτονομία και γρήγορος ανεφοδιασμός:** Τα HFCV συνήθως προσφέρουν μεγαλύτερη αυτονομία οδήγησης σε σύγκριση με τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία. Οι σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου μπορούν να τροφοδοτήσουν ένα όχημα με κυψέλες καυσίμου σε λίγα λεπτά, παρόμοιο με τον χρόνο ανεφοδιασμού για τα συμβατικά οχήματα. Αυτό αντιμετωπίζει ανησυχίες σχετικά με το άγχος αυτονομίας και τους μεγάλους χρόνους επαναφόρτισης που σχετίζονται με τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία (Hassan et al., 2023).

- **Επεκτασιμότητα και ευελιξία:** Η τεχνολογία κυψελών καυσίμου υδρογόνου μπορεί να κλιμακωθεί για διάφορες εφαρμογές, από μικρές φορητές συσκευές έως μεγάλης κλίμακας παραγωγή ενέργειας. Προσφέρει ευελιξία στις πηγές ενέργειας, καθώς το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από ποικίλους πόρους όπως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (π.χ. ηλιακή και αιολική) ή με αναμόρφωση ορυκτών καυσίμων. Αυτή η επεκτασιμότητα και ευελιξία επιτρέπουν την απαλλαγή από τον άνθρακα σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων των μεταφορών, της παραγωγής ενέργειας και των βιομηχανικών διεργασιών (Sapkota et al., 2020).

- **Αποθήκευση ενέργειας και ενσωμάτωση στο δίκτυο:** Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμεύσει ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας. Η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης, το οποίο μπορεί να αποθηκευτεί και αργότερα να χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η ενσωμάτωση κυψελών καυσίμου υδρογόνου με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας υποστηρίζει την ανάπτυξη ενός βιώσιμου και ανθεκτικού ενεργειακού συστήματος, επιτρέποντας την αξιοποίηση διαλείπουσας ανανεώσιμης ενέργειας και συμβάλλοντας στην εξισορρόπηση του δικτύου (Kurc et al., 2024).

- **Γρήγορη ανάπτυξη υποδομών ανεφοδιασμού:** Σε σύγκριση με την ευρεία ανάπτυξη υποδομών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, η δημιουργία υποδομών ανεφοδιασμού υδρογόνου είναι σχετικά γρήγορη. Οι υπάρχοντες αγωγοί φυσικού αερίου μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά υδρογόνου. Αυτό παρέχει μια ευκαιρία για επιταχυνόμενη ανάπτυξη υποδομών,

ειδικά για μεταφορές μεγάλων αποστάσεων και εφαρμογές βαρέων φορτίων (Hassan et al., 2023).

- **Αθόρυβη λειτουργία και άνεση:** Τα οχήματα κυψελών καυσίμου παράγουν σημαντικά λιγότερο θόρυβο σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης. Αυτό οδηγεί σε πιο ήσυχες και πιο άνετες εμπειρίες οδήγησης, μειώνοντας την ηχορύπανση στις αστικές περιοχές (Enoma et al., 2022).

- **Οικονομική ανάπτυξη και δημιουργία θέσεων εργασίας:** Η ανάπτυξη και η εφαρμογή τεχνολογιών και υποδομών κυψελών καυσίμου υδρογόνου προσφέρουν ευκαιρίες για οικονομική ανάπτυξη και δημιουργία θέσεων εργασίας. Ο τομέας του υδρογόνου περιλαμβάνει την έρευνα και ανάπτυξη, την κατασκευή, την εγκατάσταση και συντήρηση συστημάτων κυψελών καυσίμου, την παραγωγή και διανομή υδρογόνου και τη λειτουργία σταθμών ανεφοδιασμού (Dou et al., 2023).

Ωστόσο, ενώ η προοπτική ενός οχήματος που δεν εκπέμπει τίποτα άλλο παρά υδρατμούς είναι δελεαστική, η πορεία προς τη μαζική υιοθέτηση των υδρογονοκίνητων FCV αντιμετωπίζει μια ποικιλία προκλήσεων.

- **Υποδομές:** Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις για τα HFCV είναι η έλλειψη εκτεταμένης υποδομής ανεφοδιασμού με υδρογόνο. Σε αντίθεση με τα πρατήρια βενζίνης, τα οποία είναι άφθονα σε πολλές περιοχές, τα πρατήρια ανεφοδιασμού με υδρογόνο είναι σχετικά σπάνια και περιορίζονται σε ορισμένες περιοχές. Η δημιουργία μιας ολοκληρωμένης υποδομής υδρογόνου απαιτεί σημαντικές επενδύσεις στην κατασκευή νέων σταθμών ανεφοδιασμού, εγκαταστάσεων μεταφοράς και αποθήκευσης (Somashekarappa & Shreeshail, 2022).

- **Οικονομικές προκλήσεις:** Επί του παρόντος, το κόστος που σχετίζεται με την κατοχή και λειτουργία ενός HFCV είναι σημαντικά υψηλότερο από εκείνο ενός συμβατικού οχήματος με κινητήρα εσωτερικής καύσης ή ακόμα και ενός ηλεκτρικού οχήματος με μπαταρία. Οι υψηλές τιμές των οχημάτων, κυρίως λόγω του κόστους των συστημάτων κυψελών καυσίμου, και το ακριβό καύσιμο

υδρογόνο (που προκύπτει από το υψηλό κόστος παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς) συμβάλλουν σε αυτά τα οικονομικά εμπόδια (Kurc et al., 2024).

- **Παραγωγή υδρογόνου:** Η παραγωγή υδρογόνου για οχήματα κυψελών καυσίμου θέτει προκλήσεις όσον αφορά το κόστος, την ενεργειακή απόδοση και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος παραγωγής υδρογόνου είναι μέσω της αναμόρφωσης μεθανίου με ατμό, η οποία βασίζεται στο φυσικό αέριο ως πρώτη ύλη. Αυτή η διαδικασία παράγει εκπομπές CO_2, οι οποίες αναιρούν ορισμένα από τα περιβαλλοντικά οφέλη των οχημάτων κυψελών καυσίμου. Η ανάπτυξη και η κλιμάκωση βιώσιμων μεθόδων παραγωγής υδρογόνου χαμηλών εκπομπών άνθρακα, όπως η ηλεκτρόλυση με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι κρίσιμη, αλλά αντιμετωπίζει σήμερα προκλήσεις όσον αφορά το κόστος και την επεκτασιμότητα (Younas et al., 2022).

- **Ενεργειακή απόδοση:** Ενώ τα οχήματα κυψελών καυσίμου είναι πιο ενεργειακά αποδοτικά από τα παραδοσιακά οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης, είναι λιγότερο αποδοτικά από τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία. Η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή, τη μεταφορά και την αποθήκευση υδρογόνου, καθώς και οι απώλειες ενέργειας στο ίδιο το σύστημα κυψελών καυσίμου, έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερη συνολική ενεργειακή απόδοση σε σύγκριση με τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία. Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των συστημάτων κυψελών καυσίμου και η βελτιστοποίηση ολόκληρης της διαδικασίας παραγωγής και διανομής υδρογόνου είναι απαραίτητη (Enoma et al., 2022).

- **Ανησυχίες για την ασφάλεια:** Το υδρογόνο, ως ένα εξαιρετικά εύφλεκτο αέριο, εγείρει ανησυχίες για την ασφάλεια σχετικά με την αποθήκευση, τον χειρισμό και τον ανεφοδιασμό. Ενώ τα HFCV υποβάλλονται σε αυστηρές δοκιμές ασφαλείας και είναι εξοπλισμένα με πολλαπλά χαρακτηριστικά ασφαλείας, εξακολουθούν να υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με την πιθανότητα διαρροών, τη συμπεριφορά του υδρογόνου σε διάφορα σενάρια ατυχημάτων και την ικανότητα της υποδομής να χειρίζεται καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Η διασφάλιση αυστηρών προτύπων και κανονισμών ασφαλείας, καθώς και η

ευαισθητοποίηση του κοινού, είναι ζωτικής σημασίας για την αντιμετώπιση αυτών των ανησυχιών (Hassan et al., 2023).

- **Περιορισμένα μοντέλα οχημάτων και διαθεσιμότητα:** Επί του παρόντος, η διαθεσιμότητα των HFCV είναι περιορισμένη. Οι περιορισμένες επιλογές οχημάτων καθιστούν δύσκολη την εύρεση κατάλληλων επιλογών που να ανταποκρίνονται στις προτιμήσεις και τις απαιτήσεις των καταναλωτών. Η επέκταση της γκάμας των διαθέσιμων μοντέλων οχημάτων και η αύξηση της διαθεσιμότητάς τους σε διαφορετικές περιοχές είναι απαραίτητες για την προώθηση της ευρύτερης υιοθέτησής τους (Somashekarappa & Shreeshail, 2022).

- **Ανταγωνισμός από ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία:** Μια άλλη σημαντική πρόκληση για τα HFCV προέρχεται από τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία (BEV). Τα BEV επωφελούνται από την υψηλότερη ευαισθητοποίηση των καταναλωτών, την πιο ανεπτυγμένη υποδομή φόρτισης και την ταχεία βελτίωση της τεχνολογίας των μπαταριών, η οποία έχει οδηγήσει σε σημαντικές μειώσεις στο κόστος των οχημάτων και βελτιώσεις στην αυτονομία οδήγησης. (Kurc et al., 2024).

Ενώ τα HFCV υδρογόνου αποτελούν μια δυνητικά βιώσιμη λύση μεταφορών, οι προκλήσεις που αντιμετωπίζουν είναι σημαντικές. Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων απαιτεί συλλογική προσπάθεια από τους ενδιαφερόμενους φορείς του κλάδου, τις κυβερνήσεις, τα ερευνητικά ιδρύματα και τους κατασκευαστές υποδομών. Η συνεχής επένδυση στην έρευνα και ανάπτυξη, η βελτίωση των διαδικασιών παραγωγής, η επέκταση των υποδομών ανεφοδιασμού και οι υποστηρικτικές πολιτικές μπορούν να βοηθήσουν στην υπερνίκηση αυτών των εμποδίων και στην προώθηση της ευρείας υιοθέτησης των HFCV ως καθαρής και βιώσιμης επιλογής μεταφορών (Kurc et al., 2024).

Κεφάλαιο 6. Συνθετικά Καύσιμα

6.1 Ορισμός & εισαγωγικά στοιχεία

Τα συνθετικά καύσιμα, επίσης γνωστά ως ηλεκτρονικά καύσιμα ή τεχνητά καύσιμα, παράγονται από ανανεώσιμες ή μη ανανεώσιμες πηγές και προσομοιάζουν τα χαρακτηριστικά των ορυκτών καυσίμων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη θέση των παραδοσιακών ορυκτών καυσίμων σε μια ποικιλία εφαρμογών, όπως οι μεταφορές, η θέρμανση και η παραγωγή ενέργειας (Ram & Salkuti, 2023). Αυτά τα καύσιμα δημιουργούνται συνδυάζοντας υδρογόνο (H_2) και μονοξείδιο του άνθρακα (CO) ή διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) σε μια σειρά χημικών αντιδράσεων, που συχνά καταλύονται από μέταλλα όπως ο σίδηρος, το κοβάλτιο ή το ρουθήνιο. Η πιο γνωστή διαδικασία για την παραγωγή συνθετικών υδρογονανθράκων είναι η σύνθεση Fischer-Tropsch (FT), η οποία χρησιμοποιείται από τις αρχές του 20ού αιώνα. Οι συνθετικοί υδρογονάνθρακες είναι ιδιαίτερα πολύτιμοι, επειδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υπάρχοντες κινητήρες εσωτερικής καύσης, αεροσκάφη και υποδομές χωρίς να απαιτούνται σημαντικές τροποποιήσεις, καθιστώντας τους μια πρακτική λύση για την απανθρακοποίηση τομέων, όπως η αεροπορία, η ναυτιλία και οι βαριές μεταφορές. Η παραγωγή συνθετικών υδρογονανθράκων περιλαμβάνει συνήθως τρία κύρια βήματα: την παραγωγή αερίου σύνθεσης, τη σύνθεση FischerTropsch και τη διύλιση (Doğan et al., 2025).

Ένα κοινό χαρακτηριστικό πολλών τύπων συνθετικών καυσίμων είναι ότι είναι το προϊόν ενός μορίου φορέα ενέργειας που αντιδρά με υδρογόνο. Ως εκ τούτου, αρκετά πρόσφατα άρθρα έχουν αναφέρει καύσιμα που προέρχονται από διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο ως συνθετικά καύσιμα. Παραδείγματα περιλαμβάνουν καύσιμα που παράγονται από αέριο σύνθεσης που προέρχεται από άνθρακα ή καθαρό βιοαέριο (για την απομάκρυνση του CO_2) για να σχηματίσουν συνθετικό φυσικό αέριο (μεθάνιο) ή υγρό καύσιμο (προϊόντα αντίδρασης μετατόπισης νερού-αερίου) (Richter et al., 2024). Εάν το άζωτο χρησιμοποιείται ως φορέας ενέργειας, η αντίδρασή του με υδρογόνο αποδίδει αμμωνία, έναν άλλο τύπο συνθετικού καυσίμου. Ο όρος χρησιμοποιείται επίσης για να περιγράψει υγρά υδρογονανθρακικά καύσιμα που παράγονται από οποιαδήποτε πηγή εκτός από το παραδοσιακό πετρέλαιο (Ruth & Stephanopoulos, 2023).

6.2 Είδη συνθετικών καυσίμων

6.2.1 Syngas

Το syngas, που ονομάζεται επίσης αέριο σύνθεσης, είναι ένα μείγμα αερίων μονοξειδίου του άνθρακα (CO), H_2 και CO_2 που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο ή ως πρώτη ύλη για την παραγωγή χημικών ουσιών και άλλων συνθετικών καυσίμων. Το αέριο σύνθεσης παράγεται συνήθως μέσω μιας διαδικασίας πολλαπλών σταδίων, με την πρώτη ύλη να είναι υλικά που περιέχουν άνθρακα, όπως ο άνθρακας ή η βιομάζα. Παράγεται μέσω αεριοποίησης βαρέων υδρογονανθράκων και αναμόρφωσης με ατμό ή μερικής οξείδωσης ελαφρών υδρογονανθράκων. Αρχικά, μια πρώτη ύλη που περιέχει άνθρακα αεριοποιείται θερμαίνοντας την πρώτη ύλη απουσία αέρα, αλλά παρουσία μερικού οξυγόνου, γεγονός που προκαλεί τη διάσπασή της στα συστατικά της αέρια. Το μείγμα συνήθως περιέχει H_2, CO_2, CO, CH_4 και άζωτο (N_2), όπου το N_2 είναι ανενεργό και δεν συμμετέχει σε καμία αντίδραση (Gopan et al., 2022).

Η προτιμώμενη σύνθεση ποικίλλει ανάλογα με την εφαρμογή, με αναλογίες H_2/CO δύο ή υψηλότερες για τη μεθανόλη και τη σύνθεση Fischer-Tropsch, ενώ προτιμάται υψηλότερη αναλογία για την παραγωγή υδρογόνου. Οι διμεθυλαιθέρες (DME), οι ανώτερες αλκοόλες, οι οξοαλκοόλες και η αιθανόλη συντίθενται από χαμηλότερες αναλογίες H_2/CO. Όταν υπάρχει απαίτηση για μείωση της αναλογίας, χρησιμοποιείται η αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου (WGSR - Water-gas Shift Reaction) για την αύξηση της συγκέντρωσης H_2 και τη μείωση της ποσότητας CO, αναμορφώνοντας το μείγμα με ατμό και καθιστώντας το πιο κατάλληλο για χρήση ως καύσιμο ή για την παραγωγή άλλων καυσίμων (Ruth & Stephanopoulos, 2023).

Αντίθετα, η αναλογία αυξάνεται με τη μετατροπή της περιεκτικότητας σε CO_2 στο μείγμα σε CO μέσω της Αντίστροφης-WGSR, γνωστής και ως καταλυτικής υδρογόνωσης του CO_2, όπου το μείγμα υποβάλλεται σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση παρουσία ενός καταλύτη, συνήθως ενός μετάλλου όπως το νικέλιο ή το κοβάλτιο (Liu et al., 2021). Κατά τη διάρκεια των σταδίων παραγωγής, η σύνθεση εξαρτάται από τις συνθήκες αντίδρασης και την τεχνολογία που χρησιμοποιείται. Η θερμοκρασία και η πίεση, στην οποία λαμβάνει χώρα η αεριοποίηση, καθώς και ο τύπος της χρησιμοποιούμενης πρώτης ύλης, μπορούν να ποικίλλουν για την παραγωγή αερίου σύνθεσης με διαφορετικές συνθέσεις και ιδιότητες. Οι πιο σημαντικές παράμετροι που

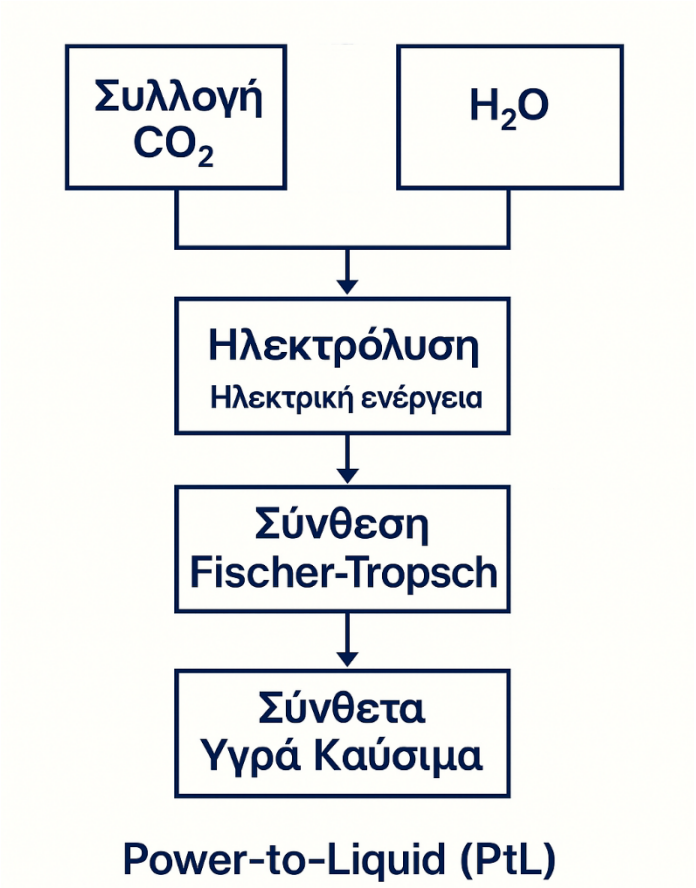
καθορίζουν την ποιότητα του αερίου σύνθεσης είναι ο λόγος ισοδυναμίας (ER - Equivalence Ratio) και η περιεκτικότητα της πρώτης ύλης σε τέφρα. Ο λόγος ισοδυναμίας αερίου σύνθεσης είναι ένα μέτρο του λόγου της πραγματικής αναλογίας καυσίμου-αέρα προς τη στοιχειομετρική αναλογία καυσίμου-αέρα που είναι απαραίτητη για την πλήρη καύση του αερίου σύνθεσης, όπου η τιμή του λόγου υποδεικνύει την ποσότητα αέρα που υπάρχει για την καύση του καυσίμου. Ρυθμίζοντας τη βέλτιστη αναλογία ER, μπορεί να παραχθεί αέριο σύνθεσης υψηλής ποιότητας σε οποιονδήποτε συνδυασμό θερμοκρασίας και πίεσης (Ram & Salkuti, 2023).

Η βιωσιμότητα της παραγωγής αερίου σύνθεσης εξαρτάται από τη μέθοδο και την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για την παραγωγή της. Το αέριο σύνθεσης που παράγεται από πηγές ορυκτών καυσίμων μπορεί να είναι επιζήμιο για το περιβάλλον. Επιπλέον, ακόμη και όταν χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πρώτες ύλες, η διαδικασία παραγωγής απαιτεί σημαντικές ποσότητες ενέργειας, η οποία συχνά προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, θέτοντας έτσι προκλήσεις βιωσιμότητας. Το αέριο σύνθεσης χρησιμοποιείται συνήθως για την παραγωγή χημικών ουσιών, όπως η μεθανόλη και το συνθετικό φυσικό αέριο (SNG - Synthetic Natural Gas), καθώς και για την παραγωγή καυσίμων μεταφορών, όπως το ντίζελ και το καύσιμο αεριωθούμενων. Η τεχνολογία που απαιτείται για τη σταθερή παραγωγή αερίου σύνθεσης από την αεριοποίηση βιομάζας εξακολουθεί να βρίσκεται σε αρχικό στάδιο, καθιστώντας την παραγωγή σε εμπορική κλίμακα σημείο συμφόρησης (Parkhey, 2021).

6.2.2 Power-to-Liquid (PtL)

Τα καύσιμα PtL είναι ένας τύπος συνθετικού καυσίμου που παράγεται μέσω της μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε υγρή μορφή. Μία από τις βασικές διαφορές μεταξύ των καυσίμων PtL και άλλων συνθετικών καυσίμων είναι η πηγή της αρχικής ύλης. Ενώ άλλα συνθετικά καύσιμα προέρχονται συνήθως από βιομάζα ή άλλα υποπροϊόντα ορυκτών καυσίμων, τα καύσιμα PtL παράγονται από ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Αυτό σημαίνει ότι τα καύσιμα PtL δεν απελευθερώνουν επιπλέον διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα κατά την παραγωγή τους, καθιστώντας τα μια πιο φιλική προς το περιβάλλον επιλογή σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα. Υπάρχουν δύο κύριες οδοί παραγωγής στα καύσιμα PtL που συζητούνται λεπτομερώς στις επόμενες ενότητες, δηλαδή η οδός Fischer-Tropsch και η οδός μεθανόλης. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται με συνοπτικό τρόπο η διαδικασία

παραγωγής καυσίμων Power-to-Liquid (PtL), από τη δέσμευση του CO_2 και την ηλεκτρόλυση του νερού, έως τη σύνθεση υγρών καυσίμων μέσω της διεργασίας Fischer-Tropsch (Isaacs et al., 2021).



Διάγραμμα 1. Διαδικασία παραγωγής καυσίμων Power-to-Liquid (PtL), από τη δέσμευση του CO_2 και την ηλεκτρόλυση του νερού (κατασκευή ιδίου)

Το υδρογόνο που απαιτείται ως σημείο εκκίνησης για αυτά τα καύσιμα παράγεται συνήθως μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού. Το υδρογόνο μπορεί στη συνέχεια να συνδυαστεί με διοξείδιο του άνθρακα για την παραγωγή μιας ποικιλίας υγρών καυσίμων, όπως μεθανόλη, αιθανόλη και συνθετικό ντίζελ. Υπάρχουν διάφοροι τύποι καυσίμων PtL που βρίσκονται επί του παρόντος υπό ανάπτυξη και δοκιμή (Ram & Salkuti, 2023):

- **Υδρογόνο:** Θεωρείται καύσιμο PtL, καθώς μπορεί να παραχθεί αποκλειστικά από ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια και νερό ως πρώτη ύλη. Μπορεί να

χρησιμοποιηθεί ως αυτόνομο καύσιμο σε οχήματα κυψελών καυσίμου ή να αναμειχθεί με φυσικό αέριο για την παραγωγή καυσίμου χαμηλότερης περιεκτικότητας σε άνθρακα για χρήση σε κινητήρες εσωτερικής καύσης.

- **Μεθανόλη, Αιθανόλη και DME:** Με τις άλλες πρώτες ύλες να παραμένουν οι ίδιες, εάν το υδρογόνο που απαιτείται για την παραγωγή τους προέρχεται από καθαρή ενέργεια, θεωρούνται καύσιμα PtL. Οι μέθοδοι παραγωγής, ωστόσο, παραμένουν οι ίδιες. Η μεθανόλη και η αιθανόλη που παράγονται ως καύσιμα PtL ονομάζονται επίσης ηλεκτρονική μεθανόλη και ηλεκτρονική αιθανόλη.

- **Συνθετικό ντίζελ:** Το συνθετικό ντίζελ είναι ένα καύσιμο PtL που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιονδήποτε κινητήρα ντίζελ με ελάχιστη ή καθόλου τροποποίηση.

- **Κηροζίνη PtL:** Πρόκειται για ένα ηλεκτρονικό καύσιμο που παράγεται μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και βρίσκεται σε στάδια ανάπτυξης στην αεροπορική βιομηχανία.

- **Αμμωνία:** Η αμμωνία είναι μια χημική ένωση που μπορεί να παραχθεί από ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια και να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε εξειδικευμένους κινητήρες ή κυψέλες καυσίμου..

Ένα από τα κύρια οφέλη των καυσίμων PtL είναι η ικανότητά τους να αποθηκεύουν περίσσεια ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας για χρήση όταν χρειάζεται. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στην εξομάλυνση των διακυμάνσεων στο ηλεκτρικό δίκτυο και να διευκολύνει την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα (Lonis et al., 2019). Τα καύσιμα PtL έχουν επίσης τη δυνατότητα να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, καθώς δεν απελευθερώνουν επιπλέον διοξείδιο του άνθρακα κατά την παραγωγή ή τη χρήση τους. Τα καύσιμα PtL είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που θα μπορούσε να βοηθήσει στη μείωση της εξάρτησής από τα ορυκτά καύσιμα και στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ιδίως στον τομέα των μεταφορών. Ενώ απαιτείται περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη για την κυκλοφορία αυτών των καυσίμων στην αγορά, έχουν τη δυνατότητα να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη μετάβαση σε ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό μέλλον (Ram & Salkuti, 2023).

6.2.3 Gas-to-Liquid (GtL)

Τα καύσιμα GtL είναι ένας τύπος συνθετικού καυσίμου που παράγεται μέσω της μετατροπής φυσικού αερίου ή άλλων υδρογονανθρακικών αερίων σε υγρή μορφή. Αυτά τα καύσιμα έχουν τραβήξει σημαντική προσοχή τα τελευταία χρόνια ως ένας τρόπος επέκτασης της χρήσης του φυσικού αερίου, πέρα από τις εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης. Μία από τις βασικές διαφορές μεταξύ των καυσίμων GtL και άλλων συνθετικών καυσίμων είναι η πηγή της αρχικής ύλης. Ενώ άλλα συνθετικά καύσιμα προέρχονται συνήθως από ορυκτά καύσιμα, τα καύσιμα GtL παράγονται από φυσικό αέριο ή άλλα υδρογονανθρακικά αέρια, όπως αιθάνιο, προπάνιο, βουτάνιο ή συνθετικό αέριο, τα οποία βρίσκονται συνήθως σε κοιτάσματα φυσικού αερίου (Ruth & Stephanopoulos, 2023). Αυτό σημαίνει ότι τα καύσιμα GtL μπορούν ενδεχομένως να συμβάλουν στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανάλογα με την πηγή του φυσικού αερίου και την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας GtL. Η συμβατική μέθοδος εξόρυξης φυσικού αερίου περιλαμβάνει τη γεώτρηση σε υπόγεια κοιτάσματα φυσικού αερίου και την εξαγωγή του αερίου μέσω ενός φρέατος. Η μη συμβατική μέθοδος παραγωγής φυσικού αερίου περιλαμβάνει την εξαγωγή φυσικού αερίου από σχιστολιθικούς σχηματισμούς ή κοιτάσματα άνθρακα χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως η υδραυλική ρωγμάτωση (fracking) ή η ανάκτηση μεθανίου από κοιτάσματα άνθρακα. Μετά την εξόρυξη της πηγής, η παραγωγή καυσίμων GtL πραγματοποιείται ουσιαστικά μέσω των ίδιων τεχνικών διαδικασιών που περιγράφονται λεπτομερώς στις προηγούμενες ενότητες (Tan et al., 2019).

Η διαχείριση των αποβλήτων είναι μια άλλη παγκόσμια πρόκληση που αντιμετωπίζουν οι αναπτυσσόμενες και ανεπτυγμένες χώρες. Η παραγωγή βιοαερίου είναι μια άλλη μέθοδος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή αυτών των αερίων μέσω της αναερόβιας χώνευσης οργανικής ύλης από απόβλητα τροφίμων ή γεωργικά απόβλητα, προσφέροντας έτσι ένα πλεονέκτημα. που καμία άλλη πρώτη ύλη σε ολόκληρη τη λίστα των συνθετικών πρώτων υλών καυσίμων, δεν παρέχει. Η αναερόβια χώνευση είναι μια βιολογική διαδικασία που συμβαίνει απουσία οξυγόνου και περιλαμβάνει τη διάσπαση της οργανικής ύλης από μικροοργανισμούς. Η διαδικασία παραγωγής βιοαερίου μέσω αναερόβιας χώνευσης συνήθως λαμβάνει χώρα σε ένα σφραγισμένο δοχείο που ονομάζεται χωνευτής. Η οργανική ύλη, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει γεωργικά απόβλητα, απόβλητα τροφίμων ή άλλη βιομάζα, αναμειγνύεται με νερό και

αφήνεται να αποσυντεθεί απουσία οξυγόνου. Καθώς η οργανική ύλη διασπάται, οι μικροοργανισμοί παράγουν μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, τα οποία δεσμεύονται και αποθηκεύονται στον χωνευτή (Doğan et al., 2025). Αρκετοί διαφορετικοί τύποι συστημάτων αναερόβιας χώνευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή βιοαερίου, συμπεριλαμβανομένων συστημάτων παρτίδων, συστημάτων συνεχούς ροής και συστημάτων εμβολικής ροής. Ο συγκεκριμένος τύπος συστήματος που χρησιμοποιείται θα εξαρτηθεί από την συγκεκριμένη πρώτη ύλη και τον επιθυμητό ρυθμό παραγωγής βιοαερίου. Αυτή θεωρείται η καταλληλότερη τεχνική διαχείρισης αποβλήτων για τον αναπτυσσόμενο κόσμο (Kumar & Samadder, 2020).

Μετά την απόκτηση της πρώτης ύλης, οι διαδικασίες παραγωγής αυτού του τύπου καυσίμου είναι οι ίδιες με αυτές που εξηγήθηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Τα συνθετικά καύσιμα από την πρώτη ύλη GtL παράγονται συνήθως μέσω της διαδικασίας Fischer-Tropsch, η οποία απαιτεί την πρώτη μετατροπή του αερίου πρώτης ύλης σε αέριο σύνθεσης. Το αέριο σύνθεσης στη συνέχεια μετατρέπεται σε μια ποικιλία υγρών καυσίμων GtL. Αυτή τη στιγμή παράγονται και χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι καυσίμων GtL (Ram & Salkuti, 2023):

- **Ντίζελ GtL:** Το ντίζελ αερίου-σε-υγρό (GtL) και το ντίζελ ηλεκτρικής ενέργειας-σε-υγρό (PtL) είναι ουσιαστικά το ίδιο συνθετικό καύσιμο ντίζελ που παράγεται μέσω διαφορετικών διεργασιών. Μια βασική διαφορά μεταξύ του ντίζελ GtL και του ντίζελ PtL είναι η πηγή της αρχικής ύλης. Το ντίζελ GtL παράγεται μέσω της μετατροπής φυσικού αερίου ή άλλων υδρογονανθρακικών αερίων σε υγρή μορφή, ενώ θεωρείται PtL όταν η απαιτούμενη ενέργεια προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Ως αποτέλεσμα, το ντίζελ PtL θεωρείται μια πιο φιλική προς το περιβάλλον επιλογή σε σύγκριση με το ντίζελ GtL, καθώς δεν απελευθερώνει επιπλέον διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα κατά την παραγωγή του. Το ντίζελ GtL χρησιμοποιείται συνήθως στις μεταφορές και σε άλλες εφαρμογές και συχνά θεωρείται καθαρότερο καύσιμο σε σύγκριση με το παραδοσιακό ντίζελ, καθώς περιέχει λιγότερες ακαθαρσίες και παράγει λιγότερες εκπομπές.

- **Καύσιμο αεριωθούμενων:** Το καύσιμο αεριωθούμενων είναι ένας άλλος τύπος καυσίμου GtL που χρησιμοποιείται συνήθως στην αεροπορική βιομηχανία. Το καύσιμο αεριωθούμενων GtL θεωρείται συχνά μια πιο βιώσιμη εναλλακτική

λύση σε σχέση με το παραδοσιακό καύσιμο αεριωθούμενων, καθώς έχει χαμηλότερη ένταση άνθρακα και παράγει λιγότερες εκπομπές.

- **Νάφθα:** Η νάφθα είναι ένας τύπος καυσίμου GtL που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την παραγωγή χημικών ουσιών και πλαστικών. Μπορεί να παραχθεί από άλλα αέρια υδρογονανθράκων και μερικές φορές χρησιμοποιείται ως μείγμα για βενζίνη.

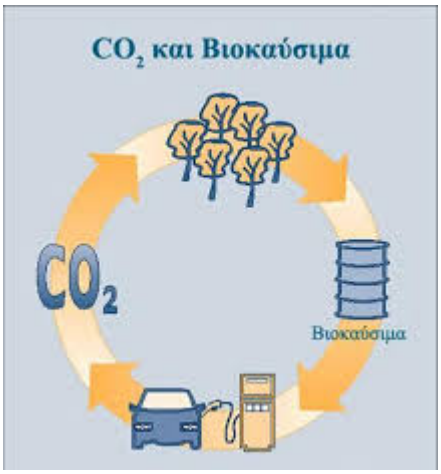
- **LPG:** Το LPG, ή υγραέριο, είναι ένας τύπος καυσίμου GtL που χρησιμοποιείται συνήθως για σκοπούς θέρμανσης. Είναι ένα μείγμα προπανίου και βουτανίου και συχνά θεωρείται ως μια καθαρότερη εναλλακτική λύση καύσης σε σχέση με τα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα.

Τα καύσιμα GtL αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που μπορεί να βοηθήσει στην επέκταση της χρήσης του φυσικού αερίου πέρα από τις εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης. Ενώ τα καύσιμα GtL μπορούν ενδεχομένως να συμβάλουν στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανάλογα με την πηγή του φυσικού αερίου και την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας GtL, θεωρούνται γενικά καύσιμα καθαρότερης καύσης σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα. Καθώς η έρευνα και η ανάπτυξη σε αυτόν τον τομέα συνεχίζονται, τα καύσιμα GtL είναι επίσης πιθανό να διαδραματίσουν ολοένα και πιο σημαντικό ρόλο στο ενεργειακό μείγμα (Richter et al., 2024).

6.3 Πλεονεκτήματα, τεχνικές προκλήσεις & μελλοντικές προεκτάσεις

Οι συνθετικοί υδρογονάνθρακες είναι χημικά πανομοιότυποι με τους αντίστοιχους ορυκτούς υδρογονάνθρακες, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υπάρχοντες κινητήρες, αγωγούς και συστήματα αποθήκευσης χωρίς να απαιτούνται δαπανηρές τροποποιήσεις. Όταν παράγονται με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και CO_2 που δεσμεύεται από την ατμόσφαιρα, οι συνθετικοί υδρογονάνθρακες μπορούν να επιτύχουν ουδετερότητα άνθρακα (Yukesh Kannah et al., 2021). Το CO_2 που εκπέμπεται κατά την καύση αντισταθμίζεται από το CO_2 που δεσμεύεται κατά την καλλιέργεια της βιομάζας, δημιουργώντας έναν κλειστό κύκλο άνθρακα (βλ. Διάγραμμα 2) (Doğan et al., 2025). Εν αντιθέσει, στα ορυκτά καύσιμα οι εκπομπές προστίθενται καθαρά στην ατμόσφαιρα χωρίς καμία αντιστάθμιση. Η σύγκριση του

κύκλου ζωής των εκπομπών CO_2 μεταξύ βιοκαυσίμων και ορυκτών καυσίμων αποτελεί βασικό εργαλείο για την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας των εναλλακτικών καυσίμων (βλ. Διάγραμμα 3) (Schemme et al., 2020).



Διάγραμμα 2. Κλειστός κύκλος άνθρακα στο πλαίσιο της παραγωγής βιοκαυσίμων (κατασκευή ιδίου)



Διάγραμμα 3. Κύκλος ζωής των εκπομπών CO_2 μεταξύ βιοκαυσίμων και ορυκτών καυσίμων (κατασκευή ιδίου)

Περαιτέρω, οι συνθετικοί υδρογονάνθρακες έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, καθιστώντας τους κατάλληλους για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλης εμβέλειας και υψηλής ενέργειας παραγωγή, όπως η αεροπορία και η ναυτιλία. Η διαδικασία Fischer-Tropsch μπορεί να παράγει ένα ευρύ φάσμα προϊόντων υδρογονανθράκων, επιτρέποντας ευελιξία στην κάλυψη ποικίλων αναγκών σε καύσιμα και χημικά. Εκτός από αυτά τα πλεονεκτήματα, η μέθοδος Fischer-Tropsch παρουσιάζει επίσης ορισμένα μειονεκτήματα (Doğan et al., 2025). Για παράδειγμα, η παραγωγή συνθετικών υδρογονανθράκων είναι επί του παρόντος πιο ακριβή από την εξόρυξη και τη διύλιση

αργού πετρελαίου. Το κόστος καθορίζεται από την ανάγκη για μεγάλες ποσότητες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αποτελεσματικές τεχνολογίες δέσμευσης άνθρακα και ακριβούς καταλύτες (Elhenawy et al., 2020). Επιπλέον, η διαδικασία παραγωγής συνθετικού αερίου και η μετατροπή του σε υδρογονάνθρακες είναι ενεργοβόρα, απαιτώντας σημαντικές εισροές ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Αυτό καθιστά την επεκτασιμότητα των συνθετικών υδρογονανθράκων εξαρτώμενη από τη διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας χαμηλού κόστους (Doğan et al., 2025). Ενώ η δέσμευση CO_2 από την ατμόσφαιρα ή τις βιομηχανικές πηγές είναι τεχνικά εφικτή, παραμένει δαπανηρή και ενεργοβόρα. Η βελτίωση της αποδοτικότητας και της προσιτής τιμής των τεχνολογιών δέσμευσης άνθρακα είναι κρίσιμη για την ευρεία υιοθέτηση των συνθετικών υδρογονανθράκων. Από την άλλη πλευρά, η κλιμάκωση της παραγωγής συνθετικών υδρογονανθράκων θα απαιτούσε σημαντικές επενδύσεις σε νέες υποδομές, συμπεριλαμβανομένων ηλεκτρολυτών, αντιδραστήρων Fischer-Tropsch και εγκαταστάσεων δέσμευσης άνθρακα (Schemme et al., 2020).

Παρά αυτές τις προκλήσεις, οι συνθετικοί υδρογονάνθρακες είναι έτοιμοι να διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο στην παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση. Οι πρόοδοι στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τη δέσμευση άνθρακα και την κατάλυση μειώνουν το κόστος και βελτιώνουν την αποδοτικότητα. Οι κυβερνήσεις και οι φορείς του ιδιωτικού τομέα επενδύουν ολοένα και περισσότερο στην παραγωγή συνθετικών καυσίμων. Για παράδειγμα, η ΕΕ έχει αναγνωρίσει τα συνθετικά καύσιμα ως βασικό στοιχείο της Πράσινης Συμφωνίας της, ενώ εταιρείες όπως η Porsche και η Siemens Energy αναπτύσσουν ενεργά πιλοτικές μονάδες για την παραγωγή συνθετικών καυσίμων (Dominković et al., 2018; Ram & Salkuti, 2023).

Η αύξηση της ζήτησης για βιώσιμες και απαλλαγμένες από ανθρακούχες εκπομπές πηγές ενέργειας είναι ένας από τους βασικούς μοχλούς αυτής της ανάπτυξης και είναι απαραίτητο να εξεταστεί κάθε πιθανή λύση που οδηγεί προς τη βιωσιμότητα. Η ζήτηση για συνθετικά καύσιμα οφείλεται ουσιαστικά στην ικανότητά τους να δημιουργούνται από απόβλητα, παρέχοντας τους την δυνατότητα να αναδειχθούν σε μια πιο ανταγωνιστική εναλλακτική λύση σε σχέση με τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα στο μέλλον (Doğan et al., 2025). Θα μπορούσαν να προσφέρουν μια πηγή ενέργειας χαμηλών εκπομπών άνθρακα, εκτός από το να συμβάλλουν στη διαχείριση και την αξιοποίηση των αποβλήτων. Ωστόσο, η σημαντικά χαμηλότερη απόδοση των

συνθετικών καυσίμων (π.χ. σε σύγκριση με τα ηλεκτρικά οχήματα), μαζί με την χαμηλή κάλυψη της αγοράς σε αντίθεση με την κυριαρχία των ηλεκτρικών συστημάτων, αμφισβητούν το μέλλον της υιοθέτησής τους σε μεγάλη κλίμακα. Τα συνθετικά καύσιμα θα μπορούσαν ίσως να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών συστημάτων. Μπορούν επίσης να καλύψουν τα κενά στην αγορά, όπου η αξιοποίηση ηλεκτρικών εφαρμογών δεν είναι εφικτή, όπως οι θαλάσσιες μεταφορές (Ram & Salkuti, 2023).

Κεφάλαιο 7. Βιοκαύσιμα Μηδενικού Αποτυπώματος CO_2

7.1 Ιστορική αναδρομή & γενιές βιοκαυσίμων

Τα φυτικά έλαια και τα έλαια σπόρων χρησιμοποιούνται από το 1.500 π.Χ. και στα μέσα το 1800 χρησιμοποιήθηκαν ως καύσιμο για κινητήρες εσωτερικής καύσης. Κινητήρες που λειτουργούσαν με καθαρό πετρέλαιο, μείγματα φυτικών ελαίων και πετρελαίου ή άλλα μείγματα καυσίμων δημιουργήθηκαν από εφευρέτες όπως ο Ντίζελ και ο Όττο. Ο κύλινδρος 10 σιδήρου του Ντίζελ που τροφοδοτούνταν με πετρέλαιο και είχε σφόνδυλο στη βάση ήταν το πρώτο αυτοκίνητο που λειτουργούσε με βιοκαύσιμο. Ο Νίκολας Όττο έκανε μια επίδειξη του κινητήρα που τροφοδοτούνταν με φυστικέλαιο και εκτέθηκε στην Παγκόσμια Έκθεση. Η 10η Αυγούστου αναγνωρίζεται ως Διεθνής Ημέρα Βιοντίζελ, την ημέρα που ο Ρούντολφ Ντίζελ χρησιμοποίησε το SVO για να επιδείξει τον κινητήρα εσωτερικής καύσης του (Balasubramanian & Steward, 2019). Η μετεστεροποίηση φυτικού ελαίου επιτεύχθηκε για πρώτη φορά στα μέσα του 19ου αιώνα, αλλά χρειάστηκαν άλλα 50 χρόνια, προκειμένου να αναγνωριστούν οι δυνατότητες του καυσίμου. Πριν από τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, το βιοντίζελ και το καθαρό φυτικό έλαιο χρησιμοποιούνταν εκτεταμένα, ενώ οι ενεργειακές κρίσεις του 20ού αιώνα ώθησαν περαιτέρω για την παραγωγή αυτών των καυσίμων. Η πετρελαϊκή βιομηχανία κυριαρχεί στον αυτοκινητοβιομηχανικό τομέα εδώ και πολλά χρόνια, επειδή μπορεί να παράγει καύσιμα με σημαντικά χαμηλότερο κόστος από τα καύσιμα που προέρχονται από βιομάζα (Reddy et al., 2024). Η ανάπτυξη υποδομών, έρευνας και τεχνολογίας για καύσιμα με βάση τη βιομάζα, όπως το βιοντίζελ, παρεμποδίστηκε σε σημαντικό βαθμό από αυτό το μονοπώλιο. Ο Henry Ford, ένας Αμερικανός επιχειρηματίας με δραστηριότητα στην αυτοκινητοβιομηχανία, δημιούργησε το «αυτοκίνητο σόγιας» το 1941, ενώ έδειξε μεγάλο ενδιαφέρον για τα εναλλακτικά καύσιμα. Η Ford παρήγαγε ένα πειραματικό αυτοκίνητο σόγιας κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, αλλά αυτό δεν τέθηκε ποτέ σε γραμμή συναρμολόγησης λόγω της έναρξης του πολέμου (Balasubramanian & Steward, 2019).

Τα βιοκαύσιμα χωρίζονται σε πέντε γενιές, συμπεριλαμβανομένων των βιοκαυσίμων μηδενικής, πρώτης, δεύτερης, τρίτης και τέταρτης γενιάς, ανάλογα με την πρώτη ύλη, στην οποία βασίζονται. Οι ταξινομήσεις των βιοκαυσίμων παρουσιάζονται στην Εικόνα 6 και το Διάγραμμα 4. Τα φυσικά έλαια που λαμβάνονται απευθείας από τη

φύση και χρησιμοποιούνται ως βιοκαύσιμα είναι γνωστά ως βιοκαύσιμα μηδενικής γενιάς. Τα βιοκαύσιμα πρώτης γενιάς παρασκευάζονται από φυτά με βάση τις αποδόσεις ελαίου, ζάχαρης και αμύλου (Awogbemi et al., 2021). Γενικά, τα υγρά βιοκαύσιμα πρώτης γενιάς παράγονται σε μεγάλη κλίμακα χρησιμοποιώντας συμβατική και καθιερωμένη τεχνολογία. Η αιθανόλη που προέρχεται από ζάχαρη και άμυλο, το βιοντίζελ που προέρχεται από ελαιούχες καλλιέργειες και το υδρογόνο που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές θεωρούνται εναλλακτικά καύσιμα (Mahapatra et al., 2021).



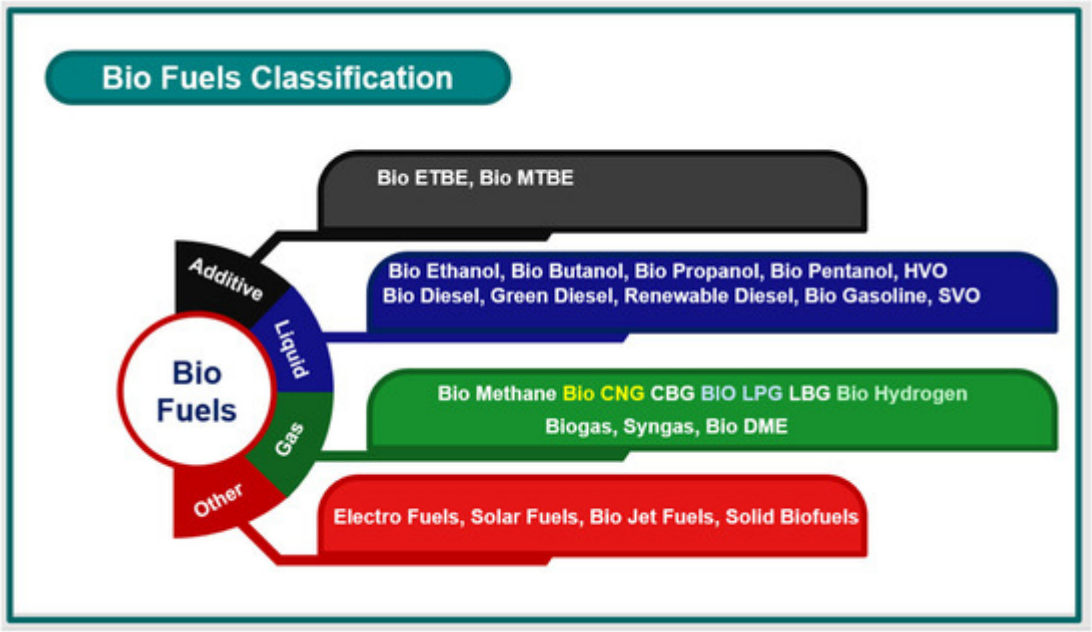
Διάγραμμα 4. Γενιές βιοκαυσίμων (κατασκευή ιδίου)

Η πρώτη γενιά βιοκαυσίμων πυροδότησε μια διαμάχη σχετικά με την επίδραση τους στην επισιτιστική ασφάλεια. Ωστόσο, τα βιοκαύσιμα δεύτερης γενιάς που παράγονται από βιώσιμη λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα ελαχιστοποιούν αυτές τις ανησυχίες. Τα βιοκαύσιμα δεύτερης γενιάς παρασκευάζονται κυρίως από γεωργικά και δασικά υπολείμματα και προέρχονται από μη εδώδιμες πηγές (Liu et al., 2021). Οι προηγμένες μορφές βιοκαυσίμων προέρχονται γενικά από βιομάζα που δεν συνδέεται με εδώδιμες καλλιέργειες, καθώς και από τον μίσχο, τα φύλλα και τους φλοιούς, μετά τη συγκομιδή της γεωργικής παραγωγής. Παρ 'όλα αυτά, είναι ευρέως γνωστό ότι απαιτείται ακριβή και προηγμένη τεχνολογία για την εξαγωγή βιοκαυσίμων δεύτερης γενιάς. Επιπλέον, ορισμένα εμπόδια, όπως η ανάγκη για ακριβά ένζυμα, εμποδίζουν την

εμπορευματοποίηση των βιοκαυσίμων δεύτερης γενιάς (Singhania et al., 2021). Η δημιουργία λιγνοκυτταρινούχων βιοκαυσίμων συμβάλλει στην ανακούφιση των επισιτιστικών και περιβαλλοντικών κρίσεων (Reddy et al., 2024).

Τα βιοκαύσιμα τρίτης γενιάς που προέρχονται από φύκια είναι ιδιαίτερα αναγνωρισμένα, εύκολα επεξεργασμένα και μπορούν να παραχθούν σε μαζική κλίμακα, απορροφώντας CO_2. Χρησιμοποιώντας μικροφύκη και μικρόβια, η τρίτη γενιά βιοκαυσίμων δημιουργεί υγρά βιοκαύσιμα όπως το βιοντίζελ. Τα φύκια μπορούν να καλλιεργηθούν σε πολλούς διαφορετικούς τύπους οικοτόπων, συμπεριλαμβανομένων των οριακών γεωργικών εκτάσεων, του ωκεανού, των άγονων άνυδρων περιοχών και των λυμάτων. Επιπλέον, δεν ανταγωνίζονται τις καλλιέργειες τροφίμων σε υδάτινα περιβάλλοντα ή σε γεωργικές εκτάσεις (Mahmood et al., 2022). Επιπλέον, παράγεται μια ποικιλία γενετικά τροποποιημένων μικροφυκών, τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη προοπτική για την παραγωγή βιοκαυσίμων. Σύμφωνα με τους Abdullah et al. (2019) και Patel et al. (2019), τα βιοκαύσιμα που παράγονται μέσω της γενετικής μηχανικής των μικροφυκών αναφέρονται ως «βιοκαύσιμα τέταρτης γενιάς».

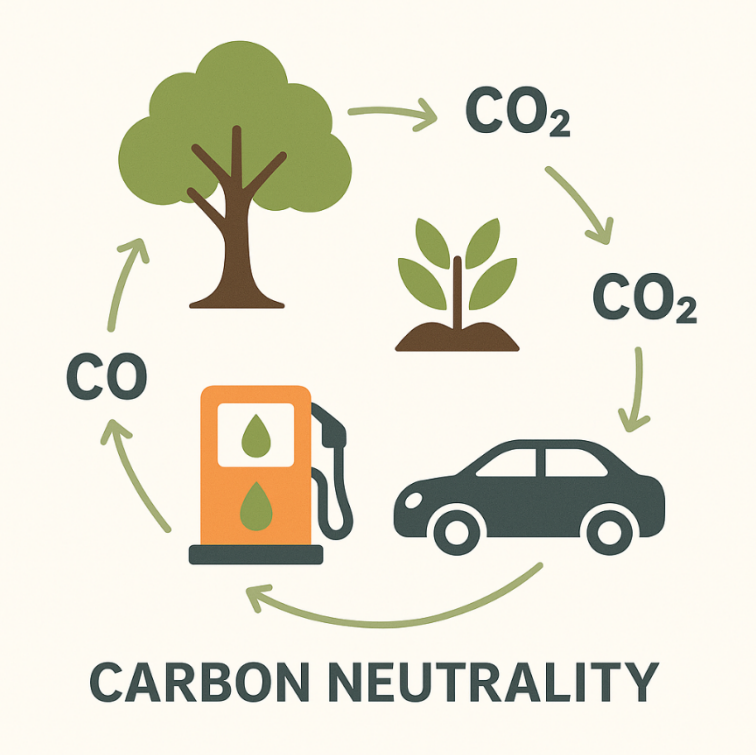
Στην εξέλιξη των τεχνολογιών βιοκαυσίμων, τα βιοκαύσιμα τέταρτης γενιάς αντιπροσωπεύουν ένα εξελιγμένο στάδιο που επιδιώκει να αντιμετωπίσει ορισμένα από τα μειονεκτήματα των προηγούμενων γενεών. Τα βιοκαύσιμα τέταρτης γενιάς επικεντρώνονται στη χρήση προηγμένων πρώτων υλών και τεχνικών παραγωγής αιχμής, σε αντίθεση με τα βιοκαύσιμα πρώτης γενιάς, τα οποία παράγονται από εδώδιμες καλλιέργειες, και τα βιοκαύσιμα δεύτερης γενιάς, τα οποία παράγονται από μη εδώδιμες καλλιέργειες και απορρίμματα. Η ανάπτυξη κυανοβακτηρίων με τεχνητή μηχανική είναι ένας νέος και ταχέως αναπτυσσόμενος τομέας που χρησιμοποιείται στην τέταρτη γενιά βιοκαυσίμων (Moravvej et al., 2019). Αυτή η ταξινόμηση υπογραμμίζει τις συνεχείς προσπάθειες της βιομηχανίας να αναπτύξει καθαρότερες, πιο αποδοτικές και οικονομικά βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις στα συμβατικά ορυκτά καύσιμα, υπογραμμίζοντας τη δυναμική ανάπτυξη των τεχνολογιών βιοκαυσίμων. Ο όρος «βιοενέργεια» περιγράφει τη δευτερογενή ενέργεια που παράγεται από βιομάζα, όπως η παραγωγή ενέργειας, το καύσιμο μπρικετών βιομάζας, η βιοαιθανόλη, το βιοαέριο, το βιοντίζελ και το βιοϋδρογόνο. (Reddy et al., 2024).



Εικόνα 6. Ταξινόμηση των βιοκαυσίμων (Reddy et al., 2024)

7.2 Κύριοι τύποι & μέθοδοι παραγωγής βιοκαυσίμων

Σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, τα οποία σχηματίζονται με εξαιρετικά αργές φυσικές διεργασίες, το βιοκαύσιμο είναι ένα καύσιμο που δημιουργείται γρήγορα από βιομάζα. Ένα παράδειγμα αυτού είναι το πετρέλαιο. Τα βιοκαύσιμα, μια ευρεία κατηγορία καυσίμων που προέρχονται από βιολογικές πηγές, αποτελούν ουσιαστικό μέρος του τοπίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Με βάση τις μεθόδους παραγωγής τους και τις πρώτες ύλες τους, αυτά τα φιλικά προς το περιβάλλον υποκατάστατα των συμβατικών ορυκτών καυσίμων χωρίζονται σε πολλές γενιές. Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει τον «κύκλο του άνθρακα» των βιοκαυσίμων, ο οποίος δικαιολογεί τον χαρακτηρισμό τους ως ουδέτερων ως προς τις εκπομπές CO_2. Τα φυτά απορροφούν CO_2 κατά τη φωτοσύνθεση, το οποίο επιστρέφει στην ατμόσφαιρα κατά την καύση του βιοκαυσίμου, χωρίς προσθήκη “νέου” άνθρακα από ορυκτές πηγές (Mushtaq et al., 2023).



Διάγραμμα 5. Κύκλος του άνθρακα των βιοκαυσίμων, , ο οποίος δικαιολογεί τον χαρακτηρισμό τους ως ουδέτερων ως προς τις εκπομπές CO_2 (κατασκευή ιδίου)

Η εξέλιξη της τεχνολογίας των βιοκαυσίμων έχει οδηγήσει στη διαμόρφωση πέντε διακριτών "γενεών", κάθε μία από τις οποίες βασίζεται σε διαφορετικού τύπου πρώτες ύλες και τεχνολογικές μεθόδους παραγωγής. Η παρακάτω συγκριτική παρουσίαση καταγράφει τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε γενιάς, όπως τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται, τα παραγόμενα καύσιμα, τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς που τη συνοδεύουν. Αυτή η ταξινόμηση βοηθά στην αξιολόγηση της βιωσιμότητας, της απόδοσης και των επιπτώσεων κάθε τύπου βιοκαυσίμου στην ενεργειακή μετάβαση (Reddy et al., 2024).

Πίνακας 1. Γενιές βιοκαυσίμων, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Γενιά	Πρώτες Ύλες	Παραδείγματα Καυσίμων	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
1η	Εδώδιμες καλλιέργειες (π.χ. καλαμπόκι, ζαχαροκάλαμο)	Βιοαιθανόλη, βιοντίζελ	Αναπτυγμένη τεχνολογία, υπάρχουσα υποδομή	Ανταγωνισμός με τρόφιμα, χρήση γης και νερού
2η	Μη εδώδιμες ύλες, γεωργικά και δασικά υπολείμματα	Κυτταρινική αιθανόλη, βιοντίζελ από λιγνίνη	Δεν ανταγωνίζεται τρόφιμα, χρήση αποβλήτων	Πολύπλοκη επεξεργασία, χαμηλές αποδόσεις
3η	Μικροφύκη, άλγες	Βιοντίζελ από φύκη, βιοαιθανόλη από άλγες	Υψηλή απόδοση ανά έκταση, ταχεία ανάπτυξη	Υψηλό κόστος καλλιέργειας και εξαγωγής
4η	Γενετικά τροποποιημένοι μικροοργανισμοί	Βιοϋδρογόνο, συνθετικά καύσιμα από μικροοργανισμούς	Προσαρμοσμένη παραγωγή, καινοτόμες εφαρμογές	Ηθικά/δεοντολογικά ζητήματα, ερευνητικό στάδιο
5η	Συνδυασμός δέσμευσης CO_2 και παραγωγής καυσίμων	PtL, BtL με δέσμευση CO_2 (αρνητικό αποτύπωμα)	Αρνητικό ισοζύγιο CO_2, συμβολή στη βιωσιμότητα	Υψηλό κόστος, περιορισμένη τεχνολογική ωριμότητα

Τα βιοκαύσιμα μπορούν επίσης να χωριστούν σε υγρές, αέριες και στερεές κατηγορίες ανάλογα με τη φυσική τους κατάσταση. Λόγω της δομικής τους σύνθεσης που βασίζεται στον άνθρακα και της ικανότητάς τους να μετατρέπονται απευθείας σε υγρό καύσιμο, η βιομάζα θεωρείται πλέον ως η πιο πιθανή ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που μπορεί να συμβάλει στον μακροπρόθεσμο ενεργειακό εφοδιασμό του κόσμου (Debnath et al., 2019). Τα υγρά και αέρια βιοκαύσιμα που προέρχονται από ορυκτά καύσιμα διατίθενται σε μια σειρά μορφών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικά είδη οχημάτων. Ως υποκατάστατα αγαθών που προέρχονται από πετρέλαιο, το βιοντίζελ και τα υδρογονωμένα φυτικά έλαια έχουν πρόσφατα κερδίσει δημοτικότητα (Singh et al., 2022).

Η παγκόσμια στροφή προς βιώσιμες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας από μια ποικιλία πηγών υποβοηθείται σε μεγάλο βαθμό από τα υγρά βιοκαύσιμα. Αυτά περιλαμβάνουν μια σειρά από δασικά υπολείμματα, γεωργικά υλικά που σχετίζονται με εδώδιμες καλλιέργειες, συμπεριλαμβανομένων μη εδώδιμων ενεργειακών καλλιεργειών όπως ο ευκάλυπτος και το switch grass, στερεά βιογενή απόβλητα κ.λπ. Με μεγάλη ποσότητα προσβάσιμης πρώτης ύλης, αυτές οι αναδυόμενες επιλογές μπορούν να δημιουργήσουν βιοκαύσιμα για μεταφορές με ελάχιστο ή μέγιστο κίνδυνο που εξαρτάται από τη

βιωσιμότητα, η οποία σχετίζεται με τυχόν αλλαγές στη χρήση γης, καθώς και με τον ανταγωνισμό στην παραγωγή τροφίμων (Reddy et al., 2024).

Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (IRENA), έως το 2030, το 10% της ενέργειας που χρησιμοποιείται στον τομέα των μεταφορών θα προέρχεται από υγρά βιοκαύσιμα, τα οποία περιλαμβάνουν το βιοντίζελ και συμβατικές και προηγμένες μορφές αιθανόλης (IRENA, 2020). Λόγω των αξιοσημείωτων ιδιοτήτων της, συμπεριλαμβανομένου του υψηλότερου αριθμού κετανίου, της αξιοσημείωτης θερμότητας για εξάτμιση και της βιωσιμότητας, η βιοαιθανόλη αναγνωρίζεται ως ανώτερο υποκατάστατο των ορυκτών καυσίμων όπως η βενζίνη και το ντίζελ (Singhania et al., 2022). Επειδή η βιοαιθανόλη και η βενζίνη είναι παρόμοιες, η χρήση τους δεν απαιτεί σημαντικές τροποποιήσεις στον κινητήρα. Η καθαρή της μορφή είναι διαλυτή στο νερό, τον αιθέρα, την ακετόνη, το βενζόλιο και ορισμένους άλλους οργανικούς διαλύτες, καθιστώντας την παραγωγή της πιο εφικτή. Στα επόμενα 20 χρόνια, αναμένεται να αποτελέσει το δημοφιλέστερο βιοκαύσιμο για τους τομείς των μεταφορών παγκοσμίως. Η βιοαιθανόλη έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί στην καθαρή της μορφή ή σε συνδυασμό με βενζίνη σε ορισμένα πρόσφατα ανεπτυγμένα προηγμένα υβριδικά οχήματα ευέλικτου καυσίμου (Moravvej et al., 2019).

Επειδή η βιομεθανόλη έχει υψηλότερη ειδική ενεργειακή απόδοση από τη βιοαιθανόλη, είναι ανώτερη. Λόγω της υψηλής ογκομετρικής ενεργειακής πυκνότητας και της ευκολίας αποθήκευσης και μεταφοράς της, η μεθανόλη είναι ένα πολλά υποσχόμενο βιοκαύσιμο. Είναι επίσης υγρή σε θερμοκρασία δωματίου. Επιπλέον, είναι ένα απλό, βασικό υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία ενός ευρέος φάσματος ωφέλιμων οργανικών ενώσεων με σημαντικές εμπορικές εφαρμογές. Μπορεί να αντικαταστήσει σχετικές ενώσεις, συμπεριλαμβανομένων των υδρογονανθράκων που παράγονται από το πετρέλαιο (Reddy et al., 2024). Για τη δημιουργία μεθανόλης μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο βιολογικές, όσο και θερμοχημικές τεχνικές. Αντίθετα, δεν υπάρχουν επαρκείς γνώσεις για τις βιολογικές διαδικασίες μετατροπής, οι οποίες εξακολουθούν να μελετώνται στα εργαστήρια. Η κατανόηση των μικροοργανισμών, των μεταβολικών τους οδών και των ενζύμων που εμπλέκονται στη διαδικασία βιομετατροπής είναι κρίσιμη για τη βιοχημική σύνθεση της μεθανόλης. Απαραίτητη είναι επίσης η γνώση πολλών παραμέτρων που είναι

απαραίτητες για την κλιμάκωση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων σε εγκαταστάσεις παραγωγής πλήρους κλίμακας (Gautam et al., 2020).

Η βιοβουτανόλη διερευνάται ως βιοκαύσιμο δεύτερης γενιάς, μαζί με άλλα αλκοολούχα καύσιμα. Η βιοβουτανόλη, ένα βιοκαύσιμο, αποτελεί μια πρόσφατη προσθήκη στην αγορά καυσίμων. Πολλαπλές μελέτες έχουν καταδείξει τα ευεργετικά αποτελέσματα της ενσωμάτωσης της βιοβουτανόλης στο ντίζελ και σε άλλα μείγματα καυσίμων. Η βιοβουτανόλη υπερτερεί της βιοαιθανόλης και της βιομεθανόλης λόγω των μειωμένων προβλημάτων απομίμησης σε μείγματα βιοβουτανόλης-πετρελαίου, της χαμηλότερης διαβρωτικότητας, του υψηλότερου ενεργειακού περιεχομένου και του υψηλότερου σημείου ανάφλεξης της. Το κύριο αρνητικό της βιοβουτανόλης, παρά τα αξιοσημείωτα πλεονεκτήματά της έναντι άλλων βιοαλκοολών, είναι η χαμηλή της παραγωγικότητα (Liu et al., 2022). Οι αλκοόλες μακράς αλυσίδας, όπως η βιοβουτανόλη και η βιοπεντανόλη, έχουν ανώτερες ιδιότητες σε σύγκριση με τις λιγότερο σημαντικές αλκοόλες, όπως η αιθανόλη και η μεθανόλη. Μπορούν να χρησιμεύσουν ως συστατικά ανάμειξης με ντίζελ σε κινητήρα ανάφλεξης με συμπίεση. Η βουτανόλη και η πεντανόλη μπορούν να παραχθούν μέσω των διεργασιών ζύμωσης βιομάζας, της μετατροπής βιο-συνθετικού αερίου ή της, βιοσύνθεσης από γλυκόζη, χρησιμοποιώντας γενετικά τροποποιημένους μικροοργανισμούς και κυανοβακτήρια. Η τρέχουσα επιστημονική έρευνα στοχεύει στον εντοπισμό μεθόδων για τη μείωση του κόστους παραγωγής τους. Η μετατροπή βιο-συνθετικού αερίου μέσω χημικής κατάλυσης επιτρέπει την παραγωγή ενός μείγματος μεθανόλης, αιθανόλης και βουτανόλης (Krishnan et al., 2023).

Το απλό φυτικό έλαιο (SVO - Straight Vegetable Oil) είναι ένας εναλλακτικός όρος για το φυτικό έλαιο που χρησιμοποιείται ως καύσιμο. Το φυτικό έλαιο είναι ένα λιπίδιο που αποτελείται από ελεύθερα λιπαρά οξέα συνδεδεμένα μεταξύ τους με μια ραχοκοκαλιά γλυκερίνης. Η χρήση βιοκαυσίμων ή απλών φυτικών ελαίων (SVOs) απευθείας σε κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση, οι οποίοι χρησιμοποιούνται συνήθως στις μεταφορές, δεν συνιστάται λόγω των απαιτητικών ιδιοτήτων τους. Τα SVOs έχουν υψηλή πυκνότητα, υψηλό ιξώδες, μεγάλες μοριακές μάζες και χαμηλή πτητικότητα λόγω της παρουσίας ακόρεστων λιπαρών, τα οποία συμβάλλουν σε ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά καταιγισμού. Αυτά τα χαρακτηριστικά οδηγούν σε μια πιο κατακερματισμένη διαδικασία ψεκασμού και επιδεινώνουν τις ανησυχίες σχετικά με

την ανάμειξη αέρα και καυσίμου. Η εναπόθεση άνθρακα στα Jatropha είναι πράγματι υψηλότερη από ό,τι στο καύσιμο ντίζελ, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των εκπομπών καπνού (Tiwari & Singh, 2023).

Από αυτά τα διάφορα εναλλακτικά καύσιμα, αυτό με τη μεγαλύτερη δυναμική είναι αναμφίβολα το υδρογονοκατεργασμένο φυτικό έλαιο (HVO), το οποίο προσφέρει πολλά οφέλη. Το HVO συντίθεται μέσω υδροεπεξεργασίας φυτικών ελαίων ή ζωικών λιπών, χρησιμοποιώντας τις ίδιες πρώτες ύλες με το βιοντίζελ. Συνήθως, χρησιμοποιούνται πρόσθετες διαδικασίες, όπως η ισομερείωση, για την ενίσχυση των χαρακτηριστικών της ψυχρής ροής. Το HVO μπορεί να παραχθεί από κοινού με βιο-πετρέλαιο τζετ και πράσινη νάφθα, ανάλογα με τον τύπο του καταλύτη και τις συνθήκες λειτουργίας. Αυτό προσθέτει ευελιξία στη διαδικασία παραγωγής του HVO. Το HVO 100 είναι μια φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση στα συμβατικά καύσιμα, που προέρχεται από ανανεώσιμους και βιώσιμους πόρους (Roque et al., 2023). Οι ιδιοκτήτες οχημάτων ντίζελ μπορούν να μεταβούν στη χρήση καυσίμου HVO 100 χωρίς να απαιτούνται τροποποιήσεις στους κινητήρες τους. Το υδρογονοκατεργασμένο φυτικό έλαιο (HVO), μερικές φορές γνωστό ως «πράσινο ντίζελ» στη βιομηχανία, είναι ένας τύπος καυσίμου ντίζελ που παράγεται από βιομάζα και έχει παραφινική σύνθεση. Το HVO ανήκει στην κατηγορία των «ανανεώσιμων ντίζελ», στην οποία περιλαμβάνεται και το ντίζελ Fischer-Tropsch (FT diesel) (Reddy et al., 2024).

Το βιοντίζελ έχει κερδίσει δημοτικότητα στην παγκόσμια αγορά καυσίμων λόγω της αυξημένης ευαισθητοποίησης σχετικά με την ενεργειακή ασφάλεια. Το βιοντίζελ είναι μια εναλλακτική λύση στο ντίζελ πετρελαίου που αποτελείται από ένα μείγμα αλκυλεστέρων που προέρχονται από ελεύθερα λιπαρά οξέα. Έχει προσελκύσει σημαντικό ενδιαφέρον λόγω της χαμηλής τοξικότητάς του και της μεγάλης ικανότητάς του να διασπάται μέσω φυσικών διεργασιών. Τα έλαια βιομάζας χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή τους. Το βιοντίζελ ονομάζεται έτσι, επειδή προέρχεται από βιολογικές πηγές και παρουσιάζει συγκρίσιμη απόδοση με το πετροδίζελ. Το βιοντίζελ θεωρείται καθαρή πηγή ενέργειας λόγω της ικανότητάς του να μειώνει τις εκπομπές άμεσων και έμμεσων αερίων του θερμοκηπίου, προσφέροντας επομένως περιβαλλοντική προστασία (Etim et al., 2022).

Επομένως, η χρήση του βιοντίζελ μπορεί να συμβάλει στη διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας, σε αντίθεση με τη χρήση ορυκτών καυσίμων. Το βιοντίζελ μπορεί να

αναμειχθεί άψογα και να χρησιμοποιηθεί σε κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση, χωρίς να απαιτούνται τροποποιήσεις. Για την αντιμετώπιση πιθανών προβλημάτων σταθερότητας και διάσπασης, το βιοντίζελ αναμειγνύεται συνήθως με τυπικό ντίζελ σε αναλογία 7-10% κατ' όγκο (αναφέρεται ως μείγματα B7-B10). Προκειμένου να βελτιωθούν τα ποσοστά ανάμειξης, οι κινητήρες πρέπει να υποβληθούν σε τροποποιήσεις για να βελτιωθούν τα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά, όπως ο χρόνος ψεκασμού, ο λόγος συμπίεσης και η πίεση ψεκασμού. Στην Ευρώπη υπάρχουν στόλοι οχημάτων που χρησιμοποιούν ποιότητες ανάμειξης B20, B30 και B100 (Jeswani et al., 2020).

Το ανανεώσιμο ντίζελ αποτελείται από υδρογονάνθρακες που δεν περιέχουν αρωματικά συστατικά. Το ανανεώσιμο ντίζελ αποτελεί μια ανώτερη εναλλακτική λύση για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ταχείας εξάντλησης των ορυκτών καυσίμων και των περιορισμών του βιοντίζελ. Η πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του, όπως και του βιοντίζελ, περιλαμβάνει φυτικά έλαια, ζωικά λίπη, χρησιμοποιημένο μαγειρικό λάδι και βιομάζα. Το ανανεώσιμο ντίζελ παράγεται με τον ίδιο στόχο με την παραγωγή βιοντίζελ, ο οποίος είναι η ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων των εκπομπών CO_2 και η προσφορά μιας πιο φιλικής προς το περιβάλλον λύσης (Reddy et al., 2024). Το ανανεώσιμο ντίζελ, σε αντίθεση με το βιοντίζελ FAME, μπορεί να αποθηκευτεί για μεγάλο χρονικό διάστημα, καθώς έχει παρόμοιες ιδιότητες με το πετρελαϊκό ντίζελ. Αποτελείται από έναν συνδυασμό κορεσμένων υδρογονανθράκων ευθείας και διακλαδισμένης αλυσίδας (C15 έως C18) και δεν περιλαμβάνει οξυγόνο (Xu et al., 2020).

Επιπλέον, το ανανεώσιμο ντίζελ έχει εξαιρετική απόδοση σε συνθήκες κρύου λόγω του υψηλού αριθμού κετανίου του, γεγονός που καθιστά ευκολότερη την ανάφλεξή του σε σύγκριση με το βιοντίζελ. Το ανανεώσιμο ντίζελ έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με το παραδοσιακό ντίζελ, όπως η υψηλή θερμαντική αξία, οι συγκρίσιμες ενεργειακές πυκνότητες, η εξαιρετική σταθερότητα αποθήκευσης και η μη διαβρωσιμότητα. Αυτά τα θετικά χαρακτηριστικά καθιστούν το ανανεώσιμο ντίζελ μια ανώτερη λύση για την ενίσχυση των διαθέσιμων ενεργειακών πηγών. Το ανανεώσιμο ντίζελ είναι ένας ευρύς όρος που περιγράφει την τελευταία γενιά καυσίμων ντίζελ που κατασκευάζονται από βιομάζα. Υπάρχουν δύο κατηγορίες τεχνολογίας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ανανεώσιμου ντίζελ: η υδροεπεξεργασία και οι θερμοχημικές διεργασίες

όπως η πυρόλυση και η αεριοποίηση. Αυτά τα καύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συμβατικά αυτοκίνητα χωρίς την ανάγκη ανάμειξης (Osman et al., 2024).

Το HVO στερείται οξυγόνου, αρωματικών και θείου, καθιστώντας το ανώτερο τόσο από το FAME, όσο και από το ντίζελ, όσον αφορά ιδιότητες όπως ο υψηλότερος αριθμός κετανίου, η υψηλότερη θερμαντική αξία, αλλά και τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά οξειδωτικής σταθερότητας. Το HVO δεν διαθέτει τις λιπαντικές ιδιότητες που καθιστούν το FAME μια πιο ελκυστική επιλογή. Η χρήση προσαρμοσμένων μειγμάτων πράσινου ντίζελ, τα οποία αποτελούνται από έναν συνδυασμό πετρελαϊκού ντίζελ και οξυγονωμένων βιοχημικών, έχει μεγάλες δυνατότητες για την αντιμετώπιση του περιβαλλοντικού προβλήματος (Tirumareddy et al., 2022).

Η βιοβενζίνη είναι μια μορφή βενζίνης που προέρχεται από βιομάζα, όπως τα φύκια. Παρόμοια με τη συμβατικά παραγόμενη βενζίνη, αποτελείται από υδρογονάνθρακες που περιέχουν 6 (εξάνιο) έως 12 (δωδεκάνιο) άτομα άνθρακα ανά μόριο και είναι κατάλληλη για χρήση σε κινητήρες εσωτερικής καύσης. Σε αντίθεση με τη συμβατική βενζίνη που προέρχεται από το πετρέλαιο, οι βιοβενζίνες προέρχονται κυρίως από φυτά, όπως τα παντζάρια και το ζαχαροκάλαμο, ή από κυτταρινική βιομάζα, η οποία συνήθως θεωρείται φυτικό απόβλητο. Αρκετές κυβερνήσεις και εξέχοντες πολυεθνικοί οργανισμοί έχουν υποστηρίξει την ανάπτυξη διαφόρων τύπων φυκιών ως πηγή υγρού καυσίμου (Baida et al., 2021). Παρόλο που το βιοντίζελ από φύκια είναι ένα πολύ βιώσιμο υποκατάστατο της παραδοσιακής βενζίνης και έχει προσελκύσει σημαντικές επενδύσεις, η βιοβενζίνη διαφέρει από άλλα βιοκαύσιμα, όπως η βιοβουτανόλη και η βιοαιθανόλη, καθώς δεν είναι αλκοόλη. Ωστόσο, μοιράζεται χημικές ομοιότητες με το βιοντίζελ, το οποίο επίσης προέρχεται από πηγές με βάση τον άνθρακα. Η βιοβενζίνη, λόγω των ελαφρύτερων συστατικών της, παρουσιάζει μειωμένες εκπομπές ρύπων κατά την καύση, λόγω των ιδιαίτερων φυσικών χαρακτηριστικών της. Επιπλέον, η ενέργεια που λαμβάνεται από τη βιοβενζίνη είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν της αιθανόλης που ως βάση έχει το καλαμπόκι, όταν αναμειγνύεται με κανονική βενζίνη λόγω του μεγαλύτερου μοριακού βάρους των συστατικών που προέρχονται από φύκια (Zurorro et al., 2021).

Τα αέρια βιοκαύσιμα, όπως το βιοαέριο, το βιομεθάνιο, το βιοϋδρογόνο και το σύνθετο αέριο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής

ενέργειας (Tsita et al., 2020). Το σύστημα παραγωγής ενέργειας περιγράφεται συνήθως ως ένα βιώσιμο ενεργειακό σύστημα λόγω της ικανότητάς του να μειώνει τις επιβλαβείς εκπομπές και να συμβάλλει στην οικονομική ανάπτυξη. Στη συνέχεια, το βιοϋδρογόνο αναγνωρίζεται ως η πιο εφικτή εναλλακτική λύση στις συμβατικές πηγές ενέργειας. Προέρχεται κυρίως από ανανεώσιμους και μη ανανεώσιμους υδρογονάνθρακες, χρησιμεύοντας ως δευτερογενής πηγή ενέργειας. Το βιοϋδρογόνο αναμένεται να έχει ζωτική λειτουργία στον τομέα της ενέργειας στο μέλλον (Mignogna et al., 2024).

Το βιοαέριο είναι μια μορφή αερίου βιοκαυσίμου που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία ενέργειας. Τα μικρόβια διευκολύνουν την παραγωγή βιοαερίου μέσω της αναερόβιας αποικοδόμησης της οργανικής ύλης. Το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσω διαφόρων διεργασιών για την παραγωγή μιας σειράς καυσίμων μεταφορών, συμπεριλαμβανομένων των καυσίμων CBG, LBG, υδρογόνου, μεθανόλης, διμεθυλαιθέρα και Fischer-Tropsch (FT) (Reddy et al., 2024). Το βιομεθάνιο που προέρχεται από βιομάζα αποτελεί ένα φιλικό προς το περιβάλλον υποκατάστατο για την τροφοδοσία οχημάτων που κινούνται με συμπιεσμένο φυσικό αέριο. Το βιομεθάνιο μπορεί να παραχθεί με τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης ή της μεθανοποίησης βιοαερίου. Η αρχική διαδικασία, η οποία είναι μια καλά ανεπτυγμένη τεχνική, παράγει βιοαέριο από οργανικές ουσίες. Στη συνέχεια, το βιοαέριο μπορεί να υποβληθεί σε μια διαδικασία καθαρισμού για την παραγωγή βιομεθανίου, γνωστού και ως αναβαθμισμένου βιοαερίου. Το βιοσυνθετικό φυσικό αέριο (βιο-SNG) αναφέρεται στο βιομεθάνιο που παράγεται από βιοαέριο. Επί του παρόντος, η κερδοφορία της τεχνολογίας αεριοποίησης βιομάζας για την παραγωγή SNG παραμένει ανέφικτη (Marconi & Rosa, 2023).

Ο βιο-DME, ή διμεθυλαιθέρας, είναι ένας αιθέρας που μπορεί να χρησιμεύσει τόσο ως πρόσθετο καυσίμου, όσο και ως αυτόνομο καύσιμο σε κινητήρες ΜΕΚ. Ο βιο-DME παράγεται μέσω της διαδικασίας αφυδάτωσης της βιομεθανόλης ή από βιοαέριο σύνθεσης σε συνδυασμό με βιομεθανόλη. Υπό κανονικές συνθήκες, ο διμεθυλαιθέρας υπάρχει σε αέρια κατάσταση, γεγονός που περιορίζει τη χρήση του σε εξειδικευμένα οχήματα εξοπλισμένα με θάλαμο καυσίμου υπό πίεση, παρόμοιο με εκείνο που χρησιμοποιείται για το υγραέριο (LPG) (de Jong et al., 2023). Το βιο-ETBE και το βιο-MTBE είναι τύποι βιοαιθέρων, τα οποία είναι καύσιμα που χρησιμοποιούνται συνήθως

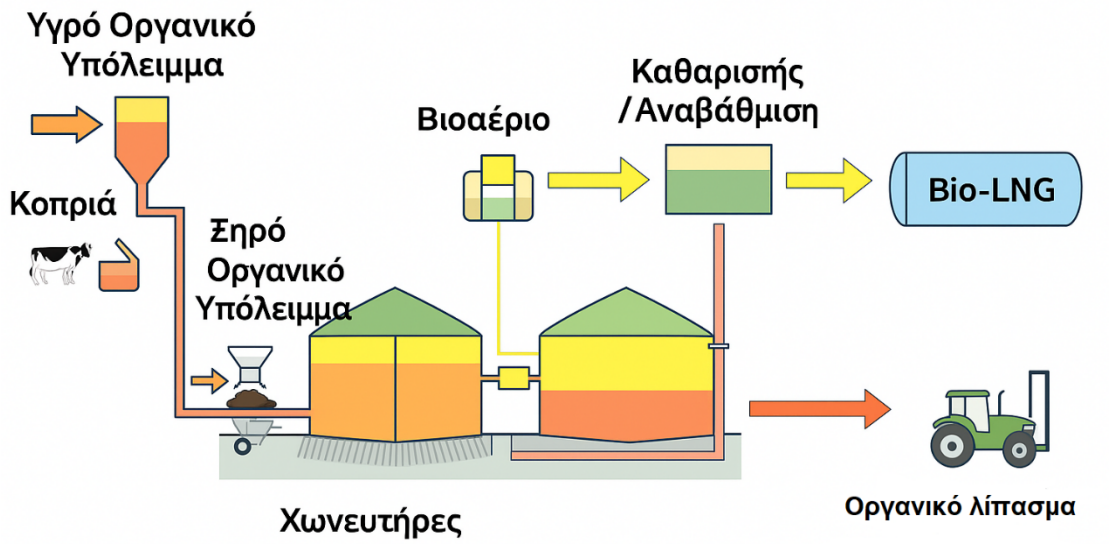
ως πρόσθετα για τη βελτίωση της απόδοσης του καυσίμου στον θάλαμο καύσης. Η σύνθεση του βιο-ETBE/βιο-MTBE περιλαμβάνει τη χημική αντίδραση μεταξύ ισοβουτυλενίου και βιοαιθανόλης/βιομεθανόλης (Gosar & Priyam, 2025).

Το βιοϋδρογόνο μπορεί να παραχθεί από βιομάζα και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας μέσω κυψελών καυσίμου. Για την παραγωγή βιοϋδρογόνου, μπορεί να δημιουργηθεί βιοαέριο σύνθεσης με υψηλή περιεκτικότητα σε H_2 με αεριοποίηση βιομάζας παρουσία νερού. Η αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου χρησιμοποιείται για την ενίσχυση της συγκέντρωσης H_2, όπως υποδεικνύεται από τις σχετικές αναφορές. Πρόσθετες μέθοδοι για την παραγωγή βιοϋδρογόνου περιλαμβάνουν την αναμόρφωση βιομεθανίου, τη σκοτεινή ζύμωση με αναμόρφωση βιοαιθανόλης και τη φωτοζύμωση (Li et al., 2022). Το βιοπροπάνιο, συχνά γνωστό ως βιο-LPG, έχει τη δυνατότητα να χρησιμεύσει ως υποκατάστατο του ορυκτού υγραερίου. Μπορεί να παραχθεί χρησιμοποιώντας μια μονοβάθμια καταλυτική σύνθεση του αερίου σύνθεσης που παράγεται από την αεριοποίηση βιομάζας και επίσης ως υποπροϊόν του HVO. Το βιο-LPG παράγεται ήδη σε μικρές ποσότητες ως υποπροϊόν διαφόρων τεχνικών σύνθεσης βιοκαυσίμων (Ajuka et al., 2024).

Το βιοαέριο μετατρέπεται σε συμπιεσμένο βιομεθάνιο (CBG) σε αρκετές χώρες. Το CBG είναι μια ανανεώσιμη εναλλακτική λύση στο συμπιεσμένο φυσικό αέριο (CNG) και χρησιμοποιείται κυρίως σε οχήματα, ιδιαίτερα αυτοκίνητα και λεωφορεία. Τα τελευταία χρόνια, υπάρχει μια αυξανόμενη γοητεία με το υγροποιημένο βιομεθάνιο (LBG) ως υποκατάστατο του υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) στον τομέα των βαρέων μεταφορών. Επιπλέον, υπάρχουν διαθέσιμες εναλλακτικές επιλογές (Reddy et al., 2024). Εκτός από το CBG και το LBG, το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή συνθετικού αερίου, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή βιώσιμων παραλλαγών καυσίμων όπως υδρογόνο, μεθανόλη ή DME. Αυτά τα καύσιμα διαθέτουν ξεχωριστά χαρακτηριστικά και δυνατότητες σε σύγκριση με το CBG και το LBG, καθιστώντας τα δυνητικά βιώσιμα για άλλα στοιχεία της υποδομής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που απαιτούν ανάπτυξη (Kalita et al., 2023).

Το υγρό βιοαέριο (LBG) έχει αναπτυχθεί ως ένα βιώσιμο εναλλακτικό καύσιμο τόσο για τις βαριές οδικές, όσο και για τις θαλάσσιες μεταφορές. Πολλοί κατασκευαστές φορτηγών έχουν ξεκινήσει την παραγωγή κινητήρων ικανών να λειτουργούν με

καύσιμο μεθάνιο. Όταν εξετάζονται το CBG, το LBG ή η μεθανόλη ως ναυτιλιακά καύσιμα, είναι προφανές ότι όλα αυτά τα εναλλακτικά καύσιμα παρέχουν ξεχωριστά πλεονεκτήματα σε σχέση με το παραδοσιακό μαζούτ, όσον αφορά τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις. Για να χρησιμοποιηθεί το βιοαέριο ως καύσιμο για οχήματα, είναι απαραίτητο να καθαριστεί με την απομάκρυνση του CO_2 και άλλων ρύπων (De Jong et al., 2023). Αυτή η διαδικασία ενισχύει τη συγκέντρωση μεθανίου και έτσι αυξάνει τη θερμαντική ικανότητα του βιοαερίου. Το βιο-CNG είναι ένα καύσιμο που προέρχεται από βιοδιασπώμενα απόβλητα και είναι φιλικό προς το περιβάλλον και βιώσιμο. Το βιο-LNG, που προέρχεται από οργανικές πηγές όπως οικιακά απορρίμματα, λάσπη, κοπριά ή γεωργικά απόβλητα, είναι ένα βέλτιστο, φιλικό προς το περιβάλλον καύσιμο για βαριές μεταφορές. Μετατρέποντας τα σκουπίδια σε καύσιμο, αυτό συμβάλλει στην έννοια της κυκλικής οικονομίας (Dahlgren, 2020). Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει συνοπτικά τη διαδικασία παραγωγής βιο-LNG. Αρχικά, οργανικά υπολείμματα και κοπριά οδηγούνται σε χωνευτήρες για την παραγωγή βιοαερίου. Στη συνέχεια, το βιοαέριο καθαρίζεται και αναβαθμίζεται σε βιομεθάνιο, το οποίο στη συνέχεια υγροποιείται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, ώστε να παραχθεί το τελικό καύσιμο βιο-LNG, κατάλληλο για χρήση σε μεταφορές μεγάλης κλίμακας (De Jong et al., 2023).



Διάγραμμα 6. Διαδικασία παραγωγής βιο-LNG

7.3 Πλεονεκτήματα & προκλήσεις βιοκαυσίμων

Τα βιοκαύσιμα αποτελούν ουσιαστικό συστατικό του μείγματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Οι ανησυχίες σχετικά με την αστάθεια των παγκόσμιων τιμών πετρελαίου, την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού, την υπερθέρμανση του πλανήτη και τη δημιουργία νέων γεωργικών προοπτικών συγκαταλέγονται στις κύριες αιτίες που ενθαρρύνουν την έρευνα για τα βιοκαύσιμα. Επιπλέον, οι φιλόδοξοι κυβερνητικοί κανονισμοί, η ενεργειακή ασφάλεια, οι ανησυχίες για τη βιώσιμη γεωργία και η μείωση των εκπομπών CO_2 στον τομέα των μεταφορών έχουν γίνει βασικοί μοχλοί ανάπτυξης της παραγωγής βιοκαυσίμων. Η πολύπλευρη ανάπτυξη της παραγωγής βιοκαυσίμων συμβάλλει στην αυξανόμενη χρήση τους ως εναλλακτικές λύσεις στα ορυκτά καύσιμα (Assaf et al., 2024).

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτή η ανάπτυξη ποικίλλει ανάλογα με τους διαφορετικούς τύπους βιοκαυσίμων και τις γεωγραφικές περιοχές και υπόκειται σε συνεχείς συζητήσεις σχετικά με τη βιωσιμότητα και τον ανταγωνισμό με την παραγωγή τροφίμων (El-Araby, 2024). Αυτό υπογραμμίζει τη σημασία της συνεχιζόμενης έρευνας και ανάπτυξης στον τομέα των βιοκαυσίμων για την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης για βιώσιμη ενέργεια (IRENA, 2024). Οι πρόσφατες βελτιώσεις στην τεχνολογία βιοκαυσίμων έχουν επικεντρωθεί στη βελτίωση της αποδοτικότητας των διαδικασιών παραγωγής, στη μείωση του κόστους παραγωγής και στην επέκταση του φάσματος των πρώτων υλών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή βιοκαυσίμων (Datta et al., 2019). Έχουν δημιουργηθεί συστήματα συγκαλλιέργειας για την αύξηση της αποδοτικότητας της παραγωγής βιοκαυσίμων, χρησιμοποιώντας διαφορετικούς μικροοργανισμούς για την παραγωγή βιοκαυσίμων, χημικών ουσιών και άλλων προϊόντων (El-Araby, 2024).

Τα βιοκαύσιμα έχουν τη δυνατότητα να βελτιώσουν την ποιότητα του αέρα μειώνοντας τις εκπομπές ρύπανσης. Τα βιοκαύσιμα παράγουν χαμηλότερες ποσότητες διοξειδίου του θείου, σωματιδίων και οξειδίων του αζώτου από τα ορυκτά καύσιμα, τα οποία έχουν συνδεθεί με αναπνευστικά και καρδιαγγειακά προβλήματα. Η χρήση βιοκαυσίμων στις μεταφορές μπορεί να βοηθήσει στην άμβλυνση αυτών των επιπτώσεων στην υγεία και στη βελτίωση της ποιότητας του τοπικού αέρα, ιδίως σε

πυκνοκατοικημένες περιοχές (Ekici et al., 2022). Η καλλιέργεια πρώτων υλών για την παραγωγή στη συνέχεια βιοκαυσίμων ενδέχεται να έχει σημαντικό αντίκτυπο στους χερσαίους και υδάτινους πόρους. Οι μη βιώσιμες πρακτικές χρήσης γης, όπως η αποψίλωση των δασών ή η τροποποίηση των φυσικών οικοσυστημάτων, μπορούν να προκαλέσουν απώλεια βιοποικιλότητας και εκπομπές άνθρακα (Mat Aron et al., 2020). Η βιώσιμη παραγωγή βιοκαυσίμων απαιτεί υπεύθυνο σχεδιασμό χρήσης της γης, την ιεράρχηση υποβαθμισμένων εκτάσεων, την προστασία και αποφυγή οικολογικά ευαίσθητων περιοχών και την εφαρμογή πρακτικών αποδοτικής χρήσης νερού για την αντιμετώπιση ζητημάτων λειψυδρίας (El-Araby, 2024).

Η παραγωγή βιοκαυσίμων μπορεί να έχει σοβαρή επίδραση στο περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένης της αποψίλωσης των δασών και της αυξημένης χρήσης λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων. Η καλλιέργεια πρώτων υλών των βιοκαυσίμων σε εδάφη υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, όπως οι τυρφώνες, αυξάνει σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Οι αλλαγές στη χρήση γης μπορούν να έχουν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως διάβρωση του εδάφους, εξάντληση των θρεπτικών συστατικών, αυξημένη κατανάλωση νερού και απώλεια της βιοποικιλότητας, καθώς και αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Mat Aron et al., 2020).

Η ανάπτυξη πρώτων υλών βιοκαυσίμων μπορεί να έχει επιπτώσεις στην προστασία της βιοποικιλότητας. Η εκκαθάριση γης για καλλιέργειες βιοκαυσίμων μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια οικοτόπων άγριας ζωής, οικολογική διαταραχή και αρνητικές επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα (Daniela et al., 2024). Η βιώσιμη παραγωγή βιοκαυσίμων θα πρέπει να δίνει προτεραιότητα στη χρήση μη εδώδιμων καλλιεργειών, γεωργικών υπολειμμάτων και αποβλήτων, ώστε να αποφευχθεί ο ανταγωνισμός με την παραγωγή τροφίμων και να μειωθεί η πίεση στα φυσικά οικοσυστήματα. Η διατήρηση της βιοποικιλότητας, παράλληλα με την ενίσχυση της παραγωγής βιοκαυσίμων, απαιτεί κατάλληλες διαδικασίες προμήθειας, πιστοποιήσεις χρήσης γης και τη διατήρηση τόπων υψηλής αξίας διατήρησης (El-Araby, 2024).

Η βιομηχανία βιοκαυσίμων συνεχίζει να εξελίσσεται και να επεκτείνεται παγκοσμίως, παρέχοντας βιώσιμες λύσεις στις τρέχουσες περιβαλλοντικές και ενεργειακές προκλήσεις. Παρά τις σημαντικές προόδους που έχουν σημειωθεί, εξακολουθούν να υπάρχουν πολλές προκλήσεις. Κάθε γενιά βιοκαυσίμων παρουσιάζει το δικό της

σύνολο πλεονεκτημάτων και εμποδίων που πρέπει να αξιολογηθούν στο πλαίσιο της παγκόσμιας ενεργειακής μετάβασης. Μια βασική πρόκληση στην παραγωγή βιοκαυσίμων και τη βιωσιμότητά της έγκειται στον ανταγωνισμό μεταξύ της χρήσης γης για την καλλιέργεια βιομάζας και της διασφάλισης της επισιτιστικής ασφάλειας (Mignona et al., 2024). Για την κάλυψη της αυξανόμενης ανάγκης για γεωργικές πρώτες ύλες, υπάρχει ο πιθανός κίνδυνος περαιτέρω αποψίλωσης των δασών και χρήσης γης, ειδικά σε περιοχές με υψηλή βιοποικιλότητα. Πράγματι, πρέπει να ληφθεί υπόψη η έμμεση αλλαγή στη χρήση γης. Η καλλιέργεια πρώτων υλών για την παραγωγή βιοκαυσίμων, όπως το ζαχαροκάλαμο, το καλαμπόκι, το σιτάρι και η σόγια, ανταγωνίζεται την παραγωγή τροφίμων, και αυτό γίνεται πρόβλημα όταν οι πόροι τροφίμων δεν επαρκούν για όλους (Mignogna et al., 2024).

Πράγματι, η χρήση καλλιεργειών τροφίμων έχει προκαλέσει συζητήσεις για την επισιτιστική ασφάλεια της ανθρωπότητας, τροφοδοτώντας τη διαμάχη «τρόφιμα έναντι καυσίμων». Αυτό αναπόφευκτα οδηγεί σε αύξηση της ζήτησης για βρώσιμα προϊόντα, με άμεση συνέπεια την αύξηση των τιμών τους. Αυτή η κατάσταση έχει ωθήσει τους ερευνητές να αναζητήσουν μη βρώσιμες εναλλακτικές λύσεις ως πρώτες ύλες, προκειμένου να αποκτήσουν οικονομικά αποδοτικά βιοκαύσιμα με συγκριτικά χαρακτηριστικά με τα συμβατικά καύσιμα (Khawaja et al., 2023). Η λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα θεωρείται ένας πιθανός πόρος από αυτή την άποψη. Ωστόσο, η λιγνίνη θέτει εμπόδια στη διαδικασία παραγωγής, καθώς αντιστέκεται στην αλληλεπίδραση των ενζύμων με την κυτταρινική δομή κατά το στάδιο της υδρόλυσης (Beig et al., 2020).

Μία πρόκληση στην παραγωγή βιοκαυσίμων δεύτερης γενιάς είναι η βελτιστοποίηση της διαδικασίας παραγωγής, τόσο ενεργειακά, όσο και περιβαλλοντικά. Εκτός από την αξιοποίηση νέων πρώτων υλών μη εδώδιμης προέλευσης, οι περιοχές που αφιερώνονται σε τέτοιες καλλιέργειες μετατοπίζονται επίσης σε ακαλλιέργητες εκτάσεις (ξηρά δάση, λίμνες, βάλτους), προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η αξία της χρήσης γης. Για παράδειγμα, η ανάγκη για γεωργική γη είναι μικρότερη για την καλλιέργεια βιομάζας φυκών και δεν απαιτεί πολύπλοκες διαδικασίες για την καλλιέργειά της (Mignona et al., 2024).

Τα μικροφύκη παρέχουν μια εναλλακτική και βιώσιμη λύση για τη μείωση των εκπομπών CO_2. Στην πραγματικότητα, τα μικροφύκη δεσμεύουν το CO_2 στην

ατμόσφαιρα και η βιομάζα μπορεί να είναι αποτελεσματική στη βιοδέσμευση των αποβλήτων CO_2, παίζοντας κρίσιμο ρόλο στη μείωση της υπερθέρμανσης του πλανήτη και του φαινομένου του θερμοκηπίου (Ahmad et al., 2021). Περαιτέρω πρόοδος έχει επιτευχθεί μέσω της πρόσφατης ανάπτυξης της συνθετικής βιολογίας. Ωστόσο, ο τομέας αυτός χαρακτηρίζεται από χαμηλή παραγωγικότητα, υψηλό κόστος παραγωγής και περιορισμένη δυνατότητα κλιμάκωσης (Semalty et al., 2024). Ωστόσο, τα βιοκαύσιμα τρίτης και τέταρτης γενιάς φαίνονται πολλά υποσχόμενα και θεωρούνται η βέλτιστη λύση για την επίτευξη στόχων βιώσιμης ανάπτυξης, αλλά οι προκλήσεις που εξετάζονται πρέπει πρώτα να ξεπεραστούν. Θεωρούνται υπερβολικά ακριβά και ως εκ τούτου δεν είναι ανταγωνιστικά στην αγορά καυσίμων. Σε κάθε περίπτωση, είναι δυνατό να ξεπεραστούν αυτά τα εμπόδια μέσω της χρήσης καινοτόμων, σύγχρονων στρατηγικών (Rajesh Banu et al., 2020).

Επιπλέον, είναι σημαντικό να δοθεί έμφαση στη βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων τους, στη βελτίωση των τρεχουσών διαδικασιών και στην εφαρμογή νέων μεθόδων σύνθεσης. Η μεταφορά και η αποθήκευση βιοκαυσίμων είναι επίσης κρίσιμες πτυχές για τη διασφάλιση της αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας αυτών των ανανεώσιμων πόρων. Η έλλειψη επαρκούς υποδομής μεταφοράς και αποθήκευσης μπορεί να περιορίσει την προσβασιμότητα των βιοκαυσίμων. Τα βιοκαύσιμα έχουν πολλά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τις επιλογές μεταφοράς και τον σχεδιασμό του εξοπλισμού, όπως η ευφλεκτότητα, η πυκνότητα, το ιξώδες, η πτητικότητα και η διαβρωτικότητα. Συνεπώς, το κόστος μεταφοράς (οδικό, σιδηροδρομικό, θαλάσσιο, δίκτυο αγωγών) και αποθήκευσης μπορεί να είναι υψηλότερο από εκείνο των ορυκτών καυσίμων, απαιτώντας σημαντικές επενδύσεις. Σε αυτήν την κατεύθυνση έχουν ληφθεί μέτρα για την τροποποίηση των υφιστάμενων υποδομών για τη διευκόλυνση της μεταφοράς βιοκαυσίμων. Αυτό περιλαμβάνει τη βελτίωση των δικτύων διανομής και αποθήκευσης, καθώς και την ενσωμάτωση βιοκαυσίμων στους υπάρχοντες αγωγούς (Mignogna et al., 2024).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Λαμβάνοντας υπόψη τις προκλήσεις που συνδέονται με τη χρήση των ορυκτών καυσίμων, η ανάπτυξη και εφαρμογή των εναλλακτικών καυσίμων για τη βελτίωση της απόδοσης των κινητήρων και τη μείωση των εκπομπών εξελίσσεται συνεχώς για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών ανησυχιών και τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης τους. Μια σημαντική τάση επικεντρώνεται στην αυξημένη χρήση βιοκαυσίμων, όπως το βιοντίζελ και η βιοαιθανόλη, τα οποία προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές όπως καλλιέργειες και φύκια. Οι προσπάθειες εξέτασης και βελτίωσης σε αυτόν τον τομέα επικεντρώνονται σε επιτυχημένες διαδικασίες παραγωγής, στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης των βιοκαυσίμων και στη διασφάλιση της συμβατότητάς τους με τους υπάρχοντες κινητήρες. Μια άλλη αξιοσημείωτη τάση αφορά την εξερεύνηση συνθετικών καυσίμων, τα οποία παράγονται μέσω χημικών διεργασιών, συμπεριλαμβανομένων των τεχνολογιών μετατροπής ενέργειας σε υγρό (PtL) και αερίου σε υγρό (GtL). Τα συνθετικά καύσιμα είναι ευέλικτα και μπορούν να προσαρμοστούν, ώστε να έχουν επιθυμητές ιδιότητες, όπως υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο και χαμηλές εκπομπές. Ως εκ τούτου, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη βελτιστοποίηση των μεθόδων παραγωγής συνθετικών καυσίμων και την ενσωμάτωσή τους στις υπάρχουσες υποδομές.

Επιπλέον, τα ηλεκτρικά και υβριδικά συστήματα πρόωσης κερδίζουν έδαφος ως μέρος του ευρύτερου τοπίου εναλλακτικών καυσίμων. Τα ηλεκτρικά οχήματα και τα υβριδικά οχήματα προσφέρουν μειωμένες ή μηδενικές εκπομπές καυσαερίων, συμβάλλοντας σε καθαρότερη ποιότητα αέρα. Οι εξελίξεις στην τεχνολογία και τις υποδομές των μπαταριών, σε συνδυασμό με τα κίνητρα για την υιοθέτηση ηλεκτρικών οχημάτων, οδηγούν τη στροφή προς τις ηλεκτροκίνητες μεταφορές. Η παρούσα έρευνα σε αυτό το μέρος επικεντρώνεται στην επέκταση της γκάμας των ηλεκτρικών οχημάτων, στη βελτίωση της απόδοσης των μπαταριών και στην αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής και της απόρριψης μπαταριών. Συλλογικά, αυτές οι τάσεις και εξελίξεις αντικατοπτρίζουν μια αυξανόμενη δέσμευση για βιώσιμες και περιβαλλοντικά υπεύθυνες λύσεις μεταφορών, καθώς και τις συνεχείς προσπάθειες βελτιστοποίησης της απόδοσης του κινητήρα και μείωσης των εκπομπών σε μια σειρά εναλλακτικών επιλογών καυσίμων.

Στο συνεχώς εξελισσόμενο τοπίο της αυτοκινητοβιομηχανίας και της βιομηχανικής τεχνολογίας, η αναζήτηση βέλτιστης απόδοσης των κινητήρων και οικολογικής βιωσιμότητας παραμένει πρωταρχικής σημασίας. Η εισαγωγή νέων τύπων κινητήρων, όπως ηλεκτρικών και υβριδικών συστημάτων κίνησης, παράλληλα με τις παραδοσιακές εμβολοφόρες ΜΕΚ, έχει καταστήσει αναγκαία μια κριτική αξιολόγηση της συμβατότητας του κινητήρα με διάφορα καύσιμα. Αυτή η δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ κινητήρων και καυσίμων έγκειται στη φύση της προώθησης των σύγχρονων μεταφορών και μηχανημάτων και υπογραμμίζει τη σημασία των αυστηρών δοκιμών και της βελτιστοποίησης της επιλογής καυσίμων.

Λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα ενός ταχέως μεταβαλλόμενου κόσμου, αυτή η επιδίωξη δεν αποτελεί μόνο μια τεχνολογική πρόκληση, αλλά και ένα θεμελιώδες βήμα προς τη μείωση των εκπομπών, τη διατήρηση των πόρων και τη διασφάλιση της μακροζωίας των οχημάτων και του εξοπλισμού. Η επιστημονική κοινότητα, παράλληλα με την αυτοκινητοβιομηχανία και τις βιομηχανίες μεταποίησης, επικεντρώνονται όλο και περισσότερο στην προώθηση των δοκιμών συμβατότητας κινητήρων και της βελτιστοποίησης της επιλογής καυσίμων. Η εξερεύνηση των περίπλοκων σχέσεων μεταξύ των τύπων κινητήρων και των καυσίμων, όχι μόνο επιδιώκει να ξεκλειδώσει υψηλότερα επίπεδα ενεργειακής απόδοσης, αλλά και να ελαχιστοποιήσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και το λειτουργικό κόστος. Αυτή η αναζήτηση συνέργειας μεταξύ κινητήρων και καυσίμων υπόσχεται να φέρει επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο τροφοδοτούνται τα οχήματα και οι μηχανές, ωθώντας προς ένα πιο βιώσιμο μέλλον.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abdullah, B., Syed Muhammad, S. A. F., Shokravi, Z., Ismail, S., Kassim, K. A., Mahmood, A. N., & Aziz, M. M. A. (2019). Fourth generation biofuel: A review on risks and mitigation strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *107*, 37–50. doi: 10.1016/j.rser.2019.02.018

Ahmad, I., Yuzir, A., Mohamad, S. E., Iwamoto, K., & Abdullah, N. (2021). Role of Microalgae in Sustainable Energy and Environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1051*(1), 012059. https://doi.org/10.1088/1757-899x/1051/1/012059

Ajuka, L. O., Kazeem, R. A., Kuti, O. A., Jen, T. C., Afolalu, A. S., & Akinlabi, E. T. (2024). Decarbonized automotive fuel: Liquefied petroleum gas biosynthesis, benefits and drawbacks. *Results in Engineering*, *21*, 101889–101889. doi: 10.1016/j.rineng.2024.101889

Alanazi, F. (2023). Electric Vehicles: Benefits, Challenges, and Potential Solutions for Widespread Adaptation. *Applied Sciences*, *13*(10), 6016. MDPI. doi: 10.3390/app13106016

Al-Baghdadi, M. (2020). An Overview of Hydrogen as an Alternative Fuel. *Encyclopedia*. Διαθέσιμο από: doi: 10.32545/encyclopedia202006.0003.v1 [τελευταία πρόσβαση 02.05.2025].

Allaoua, B., Asnoune, K., & Mebarki, B. (2017). Energy management of PEM fuel cell/ supercapacitor hybrid power sources for an electric vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, *42*(33), 21158–21166. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.209

Al-Mohannadi, A. A., Ertogral, K., & Erkoc, M. (2024). Alternative Fuels in Sustainable Logistics—Applications, Challenges, and Solutions. *Sustainability*, *16*(19), 8484–8484. doi: 10.3390/su16198484

Alonso-Villar, A., Davíðsdóttir, B., Stefánsson, H., Ásgeirsson, E. I., & Kristjánsson, R. (2022). Technical, economic, and environmental feasibility of alternative

fuel heavy-duty vehicles in Iceland. *Journal of Cleaner Production*, *369*, 133249. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133249

Aminzadegan, S., Shahriari, M., Mehranfar, F., & Abramović, B. (2022). Factors affecting the emission of pollutants in different types of transportation: A literature review. *Energy Reports*, *8*, 2508-2529.

Asif, M., Sidra Bibi, S., Ahmed, S., Irshad, M., Shakir Hussain, M., Zeb, H., Kashif Khan, M., & Kim, J. (2023). Recent advances in green hydrogen production, storage and commercial-scale use via catalytic ammonia cracking. *Chemical Engineering Journal*, *473*, 145381. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145381

Assaf, J. C., Mortada, Z., Rezzoug, S.-A., Maache-Rezzoug, Z., Debs, E., & Louka, N. (2024). Comparative Review on the Production and Purification of Bioethanol from Biomass: A Focus on Corn. *Processes*, *12*(5), 1001. https://doi.org/10.3390/pr12051001

Awogbemi, O., Kallon, D. V. V., Onuh, E. I., & Aigbodion, V. S. (2021). An Overview of the Classification, Production and Utilization of Biofuels for Internal Combustion Engine Applications. *Energies*, *14*(18), 5687. doi: 10.3390/en14185687

Babamohammadi, S., Birss, A. R., Pouran, H., Pandhal, J., & Borhani, T. N. (2025). Emission control and carbon capture from diesel generators and engines: A decade-long perspective. *Carbon Capture Science & Technology*, *14*, 100379. doi: 10.1016/j.ccst.2025.100379

Badia, J. H., Ramírez, E., Bringué, R., Cunill, F., & Delgado, J. (2021). New Octane Booster Molecules for Modern Gasoline Composition. *Energy & Fuels*, *35*(14), 10949–10997. doi: 10.1021/acs.energyfuels.1c00912

Bairabathina, S., & Balamurugan, S. (2020). Review on non-isolated multi-input step-up converters for grid-independent hybrid electric vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(41), 21687–21713. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.277

Balasubramanian, N., & Steward, K. F. (2019). Biodiesel: History of an innovation to keep the world moving. *Substantia*, *3*(2), 57–71. doi: 10.13128/Substantia-281

Beig, B., Riaz, M., Raza Naqvi, S., Hassan, M., Zheng, Z., Karimi, K., Pugazhendhi, A., Atabani, A. E., & Thuy Lan Chi, N. (2020). Current challenges and innovative developments in pretreatment of lignocellulosic residues for biofuel production: A review. *Fuel*, *287*, 119670. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119670

Biresselioglu, M. E., Demirbag Kaplan, M., & Yilmaz, B. K. (2018). Electric mobility in Europe: A comprehensive review of motivators and barriers in decision making processes. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *109*, 1–13. doi: 10.1016/j.tra.2018.01.017

Boulakhbar, M., Lebrouhi, B., Kousksou, T., Smouh, S., Jamil, A., Maaroufi, M., & Zazi, M. (2020). Towards a large-scale integration of renewable energies in Morocco. *Journal of Energy Storage*, *32*, 101806.

Breetz, H., Mildenberger, M., & Stokes, L. (2018). The political logics of clean energy transitions. *Business and Politics*, *20*(4), 492–522. doi: 10.1017/bap.2018.14

Breeze, P. (2018). An Introduction to Piston Engine Power Plants. *Elsevier EBooks*, 1–11. doi: 10.1016/b978-0-12-812904-3.00001-x

Brenna, M., Foiadelli, F., Leone, C., & Longo, M. (2020). Electric Vehicles Charging Technology Review and Optimal Size Estimation. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, *15*(6), 2539–2552. doi: 10.1007/s42835-020-00547-x

Cao, W., Bukhari, A. A. S., & Aarniovuori, L. (2019). Review of Electrical Motor Drives for Electric Vehicle Applications. *July 2019*, *38*(3), 525–540. doi: 10.22581/muet1982.1903.01

Concha, D., Renaudineau, H., Hernández, M. S., Llor, A. M., & Kouro, S. (2021). Evaluation of DCX converters for off-grid photovoltaic-based green hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, *46*(38), 19861–19870. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.03.129

Creutzig, F., Jochem, P., Edelenbosch, O. Y., Mattauch, L., Vuuren, D. P. v., McCollum, D., & Minx, J. (2015). Transport: A roadblock to climate change mitigation? *Science*, *350*(6263), 911–912. doi: 10.1126/science.aac8033

Dahlgren, S. (2020). Biogas-based fuels as renewable energy in the transport sector: an overview of the potential of using CBG, LBG and other vehicle fuels produced from biogas. *Biofuels*, 1–13. doi: 10.1080/17597269.2020.1821571

Daniela, K., Ñañez, K. B., Gonzalez, L., & Andrade, T. (2024). Efficient PAHs Removal and CO2 Fixation by marine microalgae in wastewater using an airlift photobioreactor for biofuel production. *Environmental Research*, *261*, 119672–119672. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119672

Datta, A., Hossain, A., & Roy, S. (2019). An Overview on Biofuels and Their Advantages and Disadvantages. *Asian Journal of Chemistry*, *31*(8), 1851–1858. https://doi.org/10.14233/ajchem.2019.22098

de Jong, P., Torres, E. A., de Melo, S. A. B. V., Mendes-Santana, D., & Pontes, K. V. (2023). Socio-economic and environmental aspects of bio-LPG and bio-dimethyl ether (Bio-DME) production and usage in developing countries: the case of Brazil. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 100055. doi: 10.1016/j.clcb.2023.100055

De Lorenzo, G., Piraino, F., Longo, F., Tinè, G., Boscaino, V., Panzavecchia, N., Caccia, M., & Fragiacomo, P. (2022). Modelling and Performance Analysis of an Autonomous Marine Vehicle Powered by a Fuel Cell Hybrid Powertrain. *Energies*, *15*(19), 6926. doi: 10.3390/en15196926

Debnath, D., Khanna, M., Rajagopal, D., & Zilberman, D. (2019). The Future of Biofuels in an Electrifying Global Transportation Sector: Imperative, Prospects and Challenges. *Applied Economic Perspectives and Policy*, *41*(4), 563–582. doi: 10.1093/aepp/ppz023

Dell'Aversano, S., Villante, C., Gallucci, K., Vanga, G., & Di Giuliano, A. (2024). E-Fuels: A Comprehensive Review of the Most Promising Technological

Alternatives towards an Energy Transition. *Energies*, *17*(16), 3995–3995. doi: 10.3390/en17163995

Demirbas, A. (2009). Biofuels securing the planet's future energy needs. *Energy Conversion and Management*, *50*(9), 2239–2249. doi: 10.1016/j.enconman.2009.05.010

Dimsdale, T. (2022). *Rules of the road: the geopolitics of electric vehicles in Eurasia*. E3G.

Doğan, A., Yuksel, G., Uğur, A., Boy, M., Kayabaşı, E., & ve Demirsöz, R. (2025). Synthetic Fuels as a Cornerstone of Net-Zero Emissions: A Review of Production Methods and Future Prospects. *University of Karabuk DÇE Doğa Bilimleri Dergisi (NSJ-ISI) ISI Natural Sciences Journal (NSJ-ISI)*, *5*(2), 113-131.

Dominković, D. F., Bačeković, I., Pedersen, A. S., & Krajačić, G. (2018). The future of transportation in sustainable energy systems: Opportunities and barriers in a clean energy transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*, 1823–1838. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.117

Dou, Y., Sun, L., Ren, J., & Dong, L. (2023). Opportunities and future challenges in hydrogen economy for sustainable development. In *Hydrogen Economy* (pp. 537-569). Academic press.

Dua, R., Edwards, A., Anand, U., & Bansal, P. (2024). Are American electric vehicle owners quitting? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *133*, 104272. doi: 10.1016/j.trd.2024.104272

Ekici, F., Orhan, G., Gümüş, Ö., & Bahce, A. B. (2022). A policy on the externality problem and solution suggestions in air transportation: The environment and sustainability. *Energy*, *258*, 124827. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124827

El-Araby, R. (2024). Biofuel production: exploring renewable energy solutions for a greener future. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, *17*(1). https://doi.org/10.1186/s13068-024-02571-9

El-Emam, R. S., & Özcan, H. (2019). Comprehensive review on the techno-economics of sustainable large-scale clean hydrogen production. *Journal of Cleaner Production*, *220*, 593–609. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.309

Elhenawy, S. E. M., Khraisheh, M., AlMomani, F., & Walker, G. (2020). Metal-Organic Frameworks as a Platform for CO2 Capture and Chemical Processes: Adsorption, Membrane Separation, Catalytic-Conversion, and Electrochemical Reduction of CO2. *Catalysts*, *10*(11), 1293. https://doi.org/10.3390/catal10111293

Enoma, N., O, I. I., Kwasi-Effah, C. C., Charles, A., Ovuru, P. D., & Aduwenye, B. K. (2022). A Comprehensive Review of Alternative Fuels for Automobiles: Benefits, Challenges and Future Direction. *Journal of Science and Technology Research*, *4*(4), 238–247. doi: 10.5281/zenodo.8018736

Etim, A. O., Jisieike, C. F., Ibrahim, T. H., & Betiku, E. (2022). Biodiesel and its properties. *Production of Biodiesel from Non-Edible Sources*, 39–79. doi: 10.1016/b978-0-12-824295-7.00004-8

Fayad, M. A., Abed, A. M., Salman Hussien Omran, Alaa Abdulhady Jaber, Radhi, A. A., Dhahad, H. A., Chaichan, M. T., & Talal Yusaf. (2022). Influence of Renewable Fuels and Nanoparticles Additives on Engine Performance and Soot Nanoparticles Characteristics. *International Journal of Renewable Energy Development*, *11*(4), 1068–1077. doi: 10.14710/ijred.2022.45294

Ferguson, C. R., & Kirkpatrick, A. (2016). *Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences*. John Wiley & Sons, Inc.

Foretich, A., Zaimes, G. G., Hawkins, T. R., & Newes, E. (2021). Challenges and opportunities for alternative fuels in the maritime sector. *Maritime Transport Research*, *2*, 100033. doi: 10.1016/j.martra.2021.100033

Gautam, P., Neha, I., Upadhyay, S. N., & Dubey, S. K. (2020). Bio-methanol as a renewable fuel from waste biomass: Current trends and future perspective. *Fuel*, *273*, 117783. doi: 10.1016/j.fuel.2020.117783

Ghadikolaei, M. A., Wong, P. K., Cheung, C. S., Zhao, J., Ning, Z., Yung, K.-F., Wong, H. C., & Gali, N. K. (2021). Why is the world not yet ready to use alternative fuel vehicles? *Heliyon*, *7*(7), e07527. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e07527

Ghosh, R. S., Dhillon, P. S., Harold, M. P., & Wang, D. (2021). Kinetics of NH3 oxidation on Pt/Al2O3: Rate enhancement and NH3 inhibition. *Chemical Engineering Journal*, *417*, 128273. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128273

Gis, W., & Merkisz, J. (2019). The development status of electric (BEV) and hydrogen (FCEV) passenger cars park in the world and new research possibilities of these cars in real traffic conditions. *Combustion Engines*, *178*(3), 144–149. doi: 10.19206/ce-2019-325

Glarborg, P. (2022). The NH3/NO2/O2 system: Constraining key steps in ammonia ignition and N2O formation. *Combustion and Flame*, *257*, 112311–112311. doi: 10.1016/j.combustflame.2022.112311

Gopan, G., Hauchhum, L., Pattanayak, S., Kalita, P., & Krishnan, R. (2022). Prediction of species concentration in syngas produced through gasification of different bamboo biomasses: a numerical approach. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, *13*(4), 1383–1394. https://doi.org/10.1007/s40095-022-00492-7

Gosar, H., & Priyam, A. (2025). A Review on Alternative Fuels for Internal Combustion Engine. *RERIC Proceedings, 1,* 95-100.

Gray, N., McDonagh, S., O'Shea, R., Smyth, B., & Murphy, J. D. (2021). Decarbonising ships, planes and trucks: An analysis of suitable low-carbon fuels for the maritime, aviation and haulage sectors. *Advances in Applied Energy*, *1*, 100008.

Hafis, M., Balaji, K., Tamilarasan, N., Senthilkumar, D., & Sakthivel, R. (2025). A review on alternative fuels: Spray characteristics, engine performance and emissions effect. *Sustainable Futures*, *9*, 100456. doi: 10.1016/j.sftr.2025.100456

Han, J., Feng, J., Chen, P., Liu, Y., & Peng, X. (2022). A review of key components of hydrogen recirculation subsystem for fuel cell vehicles. *Energy Conversion and Management: X*, *15*, 100265. doi: 10.1016/j.ecmx.2022.100265

Hasankhani, M., van Engelen, J., Çelik, S., & Carel Diehl, J. (2024). Unveiling complexity of hydrogen integration: A multi-faceted exploration of challenges in the Dutch context. *Journal of Cleaner Production*, *434*, 139927–139927. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139927

Hassan, Q., Azzawi, I. D. J., Sameen, A. Z., & Salman, H. M. (2023). Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Opportunities and Challenges. *Sustainability*, *15*(15), 11501. doi: 10.3390/su151511501

Hassan, Q., Saadoon Abdul Hafedh, Hussein Burhan Mohammed, Imad Saeed Abdulrahman, Salman, H. M., & Marek Jaszczur. (2022). A review of hydrogen production from bio-energy, technologies and assessments. *Energy Harvesting and Systems*, *11*(1), 20220117. doi: 10.1515/ehs-2022-0117

Havrysh, V., Nitsenko, V., Perevozova, I., Kulyk, T., Vasylyk, O. (2022). Alternative Vehicle Fuels Management: Energy, Environmental and Economic Aspects. In: Zaporozhets, A. (eds) Advanced Energy Technologies and Systems I. Studies in Systems, Decision and Control, vol 395. Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-030-85746-2_5

Heywood, J. B. (2018). *Internal combustion engine fundamentals* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.

Horváth, J., & Szemesová, J. (2023). Is a Carbon-Neutral Pathway in Road Transport Possible? A Case Study from Slovakia. *Sustainability*, *15*(16), 12246–12246. doi: 10.3390/su151612246

Hwang, F. S., Confrey, T., Reidy, C., Dorel Picovici, Callaghan, D., Culliton, D., & Nolan, C. (2024). Review of battery thermal management systems in electric vehicles. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, *192*, 114171–114171. doi: 10.1016/j.rser.2023.114171

Idris, M., & Koestoer, R. H. (2023). Environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles: lessons learned from selected countries. *Journal of Innovation Materials, Energy, and Sustainable Engineering*, *1*(1). doi: 10.61511/jimese.v1i1.2023.27

International Energy Agency (2023). *Global CO_2 emissions in 2022*. Διαθέσιμο από: https://www.iea.org/reports/global-co2-emissions-in-2022 [τελευταία πρόσβαση 22.05.2025].

Isaacs, S. A., Staples, M. D., Allroggen, F., Mallapragada, D. S., Falter, C. P., & Barrett, S. R. H. (2021). Environmental and Economic Performance of Hybrid Power-to-Liquid and Biomass-to-Liquid Fuel Production in the United States. *Environmental Science & Technology*, *55*(12), 8247–8257. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07674

Ishimoto, Y., Voldsund, M., Nekså, P., Roussanaly, S., Berstad, D., & Gardarsdottir, S. O. (2020). Large-scale production and transport of hydrogen from Norway to Europe and Japan: Value chain analysis and comparison of liquid hydrogen and ammonia as energy carriers. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(58), 32865–32883. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.017

Jaiswal, K. K., Chowdhury, C. R., Yadav, D., Verma, R., Dutta, S., Jaiswal, K. S., Sangmesh, B., & Karuppasamy, K. S. K. (2022). Renewable and Sustainable Clean Energy Development and Impact on social, economic, and Environmental Health. *Energy Nexus*, *7*(7), 100118. Sciencedirect. doi: 10.1016/j.nexus.2022.100118

Jeswani, H. K., Chilvers, A., & Azapagic, A. (2020). Environmental Sustainability of biofuels: a Review. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *476*(2243), 20200351. doi: 10.1098/rspa.2020.0351

Kalita, S., Ohlsson, J. A., Hanna Karlsson Potter, Nordberg, Å., Sandgren, M., & Hansson, P.-A. (2023). Energy performance of compressed biomethane gas production from co-digestion of Salix and dairy manure: factoring differences between Salix varieties. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, *16*(1). doi: 10.1186/s13068-023-02412-1

Khaleel, M., Nassar, Y., El-Khozondar, H. J., Elmnifi, M., Rajab, Z., Yaghoubi, E., & Yaghoubi, E. (2024). Electric Vehicles in China, Europe, and the United States: Current Trend and Market Comparison. *Int. J. Electr. Eng. And Sustain.*, *2*(1), 1–20.

Khawaja, A. S., Zaheer, M. A., Ahmad, A., Mirani, A. A., & Ali, Z. (2023). Advances in limitations and opportunities of clean biofuel production to promote decarbonization. *Fuel*, *342*, 127662. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127662

Kougias, I., Nikitas, A., Thiel, C., & Szabó, S. (2020). Clean energy and transport pathways for islands: A stakeholder analysis using Q method. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *78*, 102180. doi: 10.1016/j.trd.2019.11.009

Krishnan, M. G., Rajkumar, S., Thangaraja, J., & Devarajan, Y. (2023). Exploring the synergistic potential of higher alcohols and biodiesel in blended and dual fuel combustion modes in diesel engines: A comprehensive review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, *35*, 101180. doi: 10.1016/j.scp.2023.101180

Kumar, A., & Samadder, S. R. (2020). Performance evaluation of anaerobic digestion technology for energy recovery from organic fraction of municipal solid waste: A review. *Energy*, *197*, 117253. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117253

Kumar, R. R., & Alok, K. (2020). Adoption of electric vehicle: A literature review and prospects for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, *253*, 119911.

Kurc, B., Gross, X., Szymlet, N., Rymaniak, Ł., Woźniak, K., & Pigłowska, M. (2024). Hydrogen-Powered Vehicles: A Paradigm Shift in Sustainable Transportation. *Energies*, *17*(19), 4768–4768. doi: 10.3390/en17194768

Langella, G., de Joannon, M., Sabia, P., Iodice, P., & Amoresano, A. (2022). Ammonia as a fuel for internal combustion engines: latest advances and future challenges. *Journal of Physics*, *2385*(1), 012036–012036. doi: 10.1088/1742-6596/2385/1/012036

Leach, F., Kalghatgi, G., Stone, R., & Miles, P. (2020). The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. *Transportation Engineering*, *1*(1), 100005. doi: 10.1016/j.treng.2020.100005

Lebrouhi, B. E., Khattari, Y., Lamrani, B., Maaroufi, M., Zeraouli, Y., & Kousksou, T. (2021). Key challenges for a large-scale development of battery electric vehicles: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, *44*(2352-152X), 103273. doi: 10.1016/j.est.2021.103273

Li, S., Li, F., Zhu, X., Liao, Q., Chang, J.-S., & Ho, S.-H. (2022). Biohydrogen production from microalgae for environmental sustainability. *Chemosphere*, *291*, 132717. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132717

Li, W., Zhou, Y., Zhang, H., & Tang, X. (2023). A Review on Battery Thermal Management for New Energy Vehicles. *Energies*, *16*(13), 4845. doi: 10.3390/en16134845

Lieven, T., & Rietmann, N. (2020). Forecasting the trajectory of electric vehicle sales and the consequences for worldwide CO2 emissions. *Journal of Cleaner Production*, *261*(121038), 121038. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121038

Lindstad, E., Gamlem, G., Rialland, A., & Valland, A. (2021, October). Assessment of alternative fuels and engine technologies to reduce GHG. In *SNAME maritime convention* (p. D021S002R001). SNAME.

Liu, H., Qin, S., Sirohi, R., Ahluwalia, V., Zhou, Y., Sindhu, R., Binod, P., Rani Singhnia, R., Kumar Patel, A., Juneja, A., Kumar, D., Zhang, Z., Kumar, J., Taherzadeh, M. J., & Kumar Awasthi, M. (2021). Sustainable blueberry waste recycling towards biorefinery strategy and circular bioeconomy: A review. *Bioresource Technology*, *332*, 125181. doi: 10.1016/j.biortech.2021.125181

Liu, H., Yu, S., Wang, T., Li, J., & Wang, Y. (2024). A systematic review on sustainability assessment of internal combustion engines. *Journal of Cleaner Production*, *451*, 141996–141996. doi: 10.1016/j.jclepro.2024.141996

Liu, M., Shi, Y., & Fang, F. (2014). Combined cooling, heating and power systems: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *35*, 1–22. doi: 10.1016/j.rser.2014.03.054

Liu, P., Yang, Y., & Wang, Q. (2021). Mechanism insights into direct conversion of syngas into C2 oxygenates via key intermediate C2O2 over Ni-Supported graphene. *Carbon*, *175*, 322–333. doi: 10.1016/j.carbon.2021.01.008

Liu, Y., Chen, H., Gao, J., Li, Y., Dave, K., Chen, J., Federici, M., & Perricone, G. (2021). Comparative analysis of non-exhaust airborne particles from electric and internal combustion engine vehicles. *Journal of Hazardous Materials*, *420*(126626), 126626. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126626

Liu, Y., Yuan, Y., Ramya, G., Mohan Singh, S., Thuy Lan Chi, N., Pugazhendhi, A., Xia, C., & Mathimani, T. (2022). A review on the promising fuel of the future – Biobutanol; the hindrances and future perspectives. *Fuel*, *327*, 125166. doi: 10.1016/j.fuel.2022.125166

Lonis, F., Tola, V., & Cau, G. (2019). Renewable methanol production and use through reversible solid oxide cells and recycled CO2 hydrogenation. *Fuel*, *246*, 500–515. doi: 10.1016/j.fuel.2019.02.108

Mahapatra, S., Kumar, D., Singh, B., & Sachan, P. K. (2021). Biofuels and their sources of production: A review on cleaner sustainable alternative against conventional fuel, in the framework of the food and energy nexus. *Energy Nexus*, *4*(100036), 100036. doi: 10.1016/j.nexus.2021.100036

Mahmood, T., Hussain, N., Shahbaz, A., Mulla, S. I., Iqbal, H. M. N., & Bilal, M. (2022). Sustainable production of biofuels from the algae-derived biomass. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, *46*. doi: 10.1007/s00449-022-02796-8

Mahmoudzadeh Andwari, A., Pesiridis, A., Rajoo, S., Martinez-Botas, R., & Esfahanian, V. (2017). A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *78*, 414–430. doi: 10.1016/j.rser.2017.03.138

Malik, M. A. I., Kalam, M. A., Ikram, A., Zeeshan, S., & Raza Zahidi, S. Q. (2025). Energy transition towards electric vehicle technology: Recent advancements. *Energy Reports*, *13*, 2958–2996. doi: 10.1016/j.egyr.2025.02.029

Malik, M. A. I., Kalam, M. A., Mujtaba, M. A., & Almomani, F. (2023). A review of recent advances in the synthesis of environmentally friendly, sustainable, and nontoxic bio-lubricants: Recommendations for the future implementations. *Environmental Technology & Innovation*, *32*, 103366.

Marconi, P., & Rosa, L. (2023). Role of biomethane to offset natural gas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *187*, 113697. doi: 10.1016/j.rser.2023.113697

Martínez-Gómez, J., & Espinoza, V. S. (2024). Challenges and Opportunities for Electric Vehicle Charging Stations in Latin America. *World Electric Vehicle Journal*, *15*(12), 583. doi: 10.3390/wevj15120583

Martins, J., & Brito, F. P. (2020). Alternative Fuels for Internal Combustion Engines. *Energies*, *13*(16), 4086. doi: 10.3390/en13164086

Mat Aron, N. S., Khoo, K. S., Chew, K. W., Show, P. L., Chen, W., & Nguyen, T. H. P. (2020). Sustainability of the four generations of biofuels – A review. *International Journal of Energy Research*, *44*(12), 9266–9282. doi: 10.1002/er.5557

Meckling, J., & Nahm, J. (2019). The politics of technology bans: Industrial policy competition and green goals for the auto industry. *Energy Policy*, *126*(1), 470–479.

Mertens, J., Belmans, R., & Webber, M. (2020). Why the Carbon-Neutral Energy Transition Will Imply the Use of Lots of Carbon. *C — Journal of Carbon Research*, *6*(2), 39. doi: 10.3390/c6020039

Mignogna, D., Márta Szabó, Ceci, P., & Avino, P. (2024). Biomass Energy and Biofuels: Perspective, Potentials, and Challenges in the Energy Transition. *Sustainability*, *16*(16), 7036–7036. doi: 10.3390/su16167036

Milja, S., Milan, S., Pavle, P., & Zoran, P. (2020). Alternative fuels for public transport vehicles–actual trends. *Trans Motauto World*, *5*(3), 105-107.

Mohammed, L., Niesten, E., & Gagliardi, D. (2020). Adoption of alternative fuel vehicle fleets – A theoretical framework of barriers and enablers. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *88*, 102558. doi: 10.1016/j.trd.2020.102558

Moravvej, Z., Makarem, M. A., & Rahimpour, M. R. (2019). The fourth generation of biofuel. *Second and Third Generation of Feedstocks*, 557–597. doi: 10.1016/b978-0-12-815162-4.00020-3

Mossali, E., Picone, N., Gentilini, L., Rodrìguez, O., Pérez, J. M., & Colledani, M. (2020). Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments. *Journal of Environmental Management*, *264*(110500), 110500. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110500

Mounaïm-Rousselle, C., Bréquigny, P., Medina, A. V., Boulet, E., Emberson, D., & Løvås, T. (2021). Ammonia as Fuel for Transportation to Mitigate Zero Carbon Impact. *Energy, Environment, and Sustainability*, 257–279. doi: 10.1007/978-981-16-8717-4_11

Mushtaq, Z., Maqbool, R., & Bhat, K. A. (2023). Genetic engineering and fifth-generation biofuels. *Environmental Sustainability of Biofuels*, 237–251. doi: 10.1016/b978-0-323-91159-7.00015-1

Mustafa, A., Lougou, B. G., Shuai, Y., Wang, Z., & Tan, H. (2020). Current technology development for CO2 utilization into solar fuels and chemicals: A review. *Journal of Energy Chemistry*, *49*, 96-123.

Newman, R., & Noy, I. (2023). The global costs of extreme weather that are attributable to climate change. *Nature Communications*, *14*(1), 6103. doi: 10.1038/s41467-023-41888-1

Nie, Z., Huang, Y., Lu, Z., Liu, X., & Tian, G. (2024). Energy Efficiency Analysis of Ammonia-Fueled Power Systems for Vehicles Considering Residual Heat Recovery. *ArXiv (Cornell University)*. doi: 10.2139/ssrn.4888576

Niekurzak, M., Lewicki, W., & Wróbel, J. (2024). Efficiency Assessment of the Production of Alternative Fuels of High Usable Quality within the Circular Economy: An Example from the Cement Sector. *Sustainability*, *16*(20), 8762. doi: 10.3390/su16208762

Novella, R., García, A., Josep Gomez-Soriano, & Álvaro Fogué-Robles. (2023). Exploring dilution potential for full load operation of medium duty hydrogen engine for the transport sector. *Applied Energy*, *349*, 121635–121635. doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121635

Olabi, A. G., & Sayed, E. T. (2023). Developments in Hydrogen Fuel Cells. *Energies*, *16*(5), 2431. doi: 10.3390/en16052431

Olabi, A. G., Wilberforce, T., & Abdelkareem, M. A. (2021). Fuel cell application in the automotive industry and future perspective. *Energy*, *214*. doi: 10.1016/j.energy.2020.118955

Osman, W. N., Hakimi Rosli, M., Mazli, D. N. A., & Samsuri, S. (2024). Comparative review of biodiesel production and purification. *Carbon Capture Science & Technology*, *13*(100264), 100264–100264. doi: 10.1016/j.ccst.2024.100264

Paoli, L., & Gül, T. (2022). *Electric cars fend off supply challenges to more than double global sales – Analysis*. IEA; IEA. Διαθέσιμο στο: https://www.iea.org/commentaries/electric-cars-fend-off-supply-challenges-to-more-than-double-global-sales [τελευταία πρόσβαση 12.06.2025].

Parkhey, P. (2021). Biomethanol: possibilities towards a bio-based economy. *Biomass Conversion and Biorefinery*. doi: 10.1007/s13399-021-01907-x

Patel, A., Hrůzová, K., Rova, U., Christakopoulos, P., & Matsakas, L. (2019). Sustainable biorefinery concept for biofuel production through holistic volarization of food waste. *Bioresource Technology*, *294*, 122247. doi: 10.1016/j.biortech.2019.122247

Pedersen, K. A., Lewandowski, M. T., Schulze-Netzer, C., Pasternak, M., & Løvås, T. (2023). Ammonia in Dual-Fueled Internal Combustion Engines: Impact on

NO_x, N_2O, and Soot Formation. *Energy & Fuels*, *37*(22), 17585–17604. doi: 10.1021/acs.energyfuels.3c02549

Pełczyński, J. (2022). Outline of history and comparative analysis of internal combustion engines for flying models. *Combustion Engines*, *193*(2). doi: 10.19206/ce-155865

Pielecha, I. (2025). Hydrogen-diesel and ammonia-diesel as fuels for future diesel engines. *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe*. doi: 10.53502/rail-200880

Pinsky, R., Sabharwall, P., Hartvigsen, J., & O'Brien, J. (2020). Comparative review of hydrogen production technologies for nuclear hybrid energy systems. *Progress in Nuclear Energy*, *123*, 103317. doi: 10.1016/j.pnucene.2020.103317

Proctor, C. (2003). Internal Combustion Engines. *Www.sciencedirect.com*, 33–44. doi: 10.1016/B0-12-227410-5/00350-1

Rajesh Banu, J., Preethi, K., Kavitha, S., Gunasekaran, M., & Kumar, G. (2020). Microalgae based biorefinery promoting circular bioeconomy-techno economic and life-cycle analysis. *Bioresource Technology*, *302*, 122822. doi: 10.1016/j.biortech.2020.122822

Rajiu, S. (2003). The History of the Internal Combustion Engine. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoar, 1*(3), 145-148.

Ram, V., & Salkuti, S. R. (2023). An Overview of Major Synthetic Fuels. *Energies*, *16*(6), 2834. doi: 10.3390/en16062834

Reddy, V. J., Hariram, N. P., Maity, R., Ghazali, M. F., & Kumarasamy, S. (2024). Sustainable Vehicles for Decarbonizing the Transport Sector: A Comparison of Biofuel, Electric, Fuel Cell and Solar-Powered Vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, *15*(3), 93–93. doi: 10.3390/wevj15030093

Richter, S., Braun-Unkhoff, M., Hasselwander, S., & Haas, S. (2024). Evaluation of the Applicability of Synthetic Fuels and Their Life Cycle Analyses. *Energies*, *17*(5), 981–981. doi: 10.3390/en17050981

Roque, L. F. A., Berlini, R., de, Z., Coronado, C. J. R., Pinto, G. M., Cintra, A. J. A., Otávio Raats, Oliveira, B. M., G.V. Frez, & Alves, L. F. R. (2023). Experimental analysis and life cycle assessment of green diesel (HVO) in dual-fuel operation with bioethanol. *Journal of Cleaner Production*, *389*, 135989–135989. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.135989

Ruth, J. C., & Stephanopoulos, G. (2023). Synthetic fuels: what are they and where do they come from? *Current Opinion in Biotechnology*, *81*, 102919–102919. doi: 10.1016/j.copbio.2023.102919

Sadeq, M. A. (2024). *Alternative Fuels for Sustainable Combustion.* Διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/publication/382547111_Alternative_Fuels_for_Sustainable_Combustion?enrichId=rgreq-8dec564786c5db2704f8460c84a4a11f-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzM4MjU0NzExMTtBUzoxMTQzMTI4MTI2MzExMTcxNkAxNzIxOTE5NDY0Nzkz&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf [τελευταία πρόσβαση 12.06.2025].

Sapkota, P., Boyer, C., Dutta, R., Cazorla, C., & Aguey-Zinsou, K.-F. (2020). Planar polymer electrolyte membrane fuel cells: powering portable devices from hydrogen. *Sustainable Energy & Fuels*, *4*(2), 439–468. doi: 10.1039/c9se00861f

Saraswathi, V. N., & Ramachandran, V. P. (2024). A Comprehensive Review on Charger Technologies, Types, and Charging Stations Models for Electric Vehicles. *Heliyon*, *10*(20), e38945–e38945. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e38945

Sarkar, P. (2022). Principals of Internal Combustion Engine. *International Journal of Research Publication and Reviews, 3*(12), 1963-1970.

Schemme, S., Breuer, J. L., Köller, M., Meschede, S., Walman, F., Samsun, R. C., Peters, R., & Stolten, D. (2020). H2-based synthetic fuels: A techno-economic comparison of alcohol, ether and hydrocarbon production. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*. doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.05.028

Semalty, S., Bhardwaj, A., & Karn, S. K. (2024). Global Status of Microbial Engineering for Biofuel Production-Advances, Challenges, and Roadmap. In *Emerging Sustainable Technologies for Biofuel Production* (pp. 633-644). Cham: Springer Nature Switzerland.

Sery, J., & Leduc, P. (2021). Fuel cell behavior and energy balance on board a Hyundai Nexo. *International Journal of Engine Research*, *23*(5), 709–720. doi: 10.1177/14680874211059046

Shaheen, S., Martin, E., & Totte, H. (2020). Zero-emission vehicle exposure within U.S. carsharing fleets and impacts on sentiment toward electric-drive vehicles. *Transport Policy*, *85*, A23–A32. doi: 10.1016/j.tranpol.2019.09.008

Shusheng, X., Qiujie, S., Baosheng, G., Encong, Z., & Zhankuan, W. (2020). Research and development of on-board hydrogen-producing fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(34), 17844–17857. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.236

Sierzchula, W., Bakker, S., Maat, K., & van Wee, B. (2014). The Influence of Financial Incentives and Other socio-economic Factors on Electric Vehicle Adoption. *Energy Policy*, *68*, 183–194. doi: 10.1016/j.enpol.2014.01.043

Singh, A. P., Sharma, Y. C., Mustafi, N. N., & Agarwal, A. K. (Eds.). (2020). *Alternative fuels and their utilization strategies in internal combustion engines*. Springer Singapore.

Singh, N., Singhania, R. R., Nigam, P. S., Dong, C.-D., Patel, A. K., & Puri, M. (2022). Global status of lignocellulosic biorefinery: Challenges and perspectives. *Bioresource Technology*, *344*, 126415. doi: 10.1016/j.biortech.2021.126415

Singhania, R. R., Patel, A. K., Raj, T., Chen, C.-W., Ponnusamy, V. K., Tahir, N., Kim, S.-H., & Dong, C.-D. (2022). Lignin valorisation via enzymes: A sustainable approach. *Fuel*, *311*, 122608. doi: 10.1016/j.fuel.2021.122608

Singhania, R. R., Ruiz, H. A., Awasthi, M. K., Dong, C.-D., Chen, C.-W., & Patel, A. K. (2021). Challenges in cellulase bioprocess for biofuel applications.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, *151*, 111622. doi: 10.1016/j.rser.2021.111622

Smit, R., Helmers, E., Schwingshackl, M., Opetnik, M., & Kennedy, D. (2024). Greenhouse Gas Emissions Performance of Electric, Hydrogen and Fossil-Fuelled Freight Trucks with Uncertainty Estimates Using a Probabilistic Life-Cycle Assessment (pLCA). *Sustainability*, *16*(2), 762. doi: 10.3390/su16020762

Somashekarappa, M., & Shreeshail, N. (2022). Comparative analysis of alternative fuels for internal combustion engines: biofuels, synthetic fuels and hydrogen. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, *14*(2), 724–734. doi: 10.30574/wjarr.2022.14.2.0383

Sonker, M., Tiwary, S. K., Shreyash, N., Bajpai, S., Ray, M., Kar, S. K., & Balathanigaimani, M. S. (2022). Ammonia as an alternative fuel for vehicular applications: Paving the way for adsorbed ammonia and direct ammonia fuel cells. *Journal of Cleaner Production*, *376*, 133960. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133960

Stępień, Z. (2025). Ammonia as an alternative fuel to internal combustion engines. *Combustion Engines*, *200*(1), 117–127. doi: 10.19206/ce-200289

Szymlet, N., Rymaniak, Ł., & Kurc, B. (2024). Chromatographic Analysis of the Chemical Composition of Exhaust Gas Samples from Urban Two-Wheeled Vehicles. *Energies*, *17*(3), 709. doi: 10.3390/en17030709

Tan, Y., Pan, Z., Feng, X.-T., Zhang, D., Connell, L. D., & Li, S. (2019). Laboratory characterisation of fracture compressibility for coal and shale gas reservoir rocks: A review. *International Journal of Coal Geology*, *204*, 1–17. doi: 10.1016/j.coal.2019.01.010

Tanaka, S., Nagumo, K., Yamamoto, M., Chiba, H., Yoshida, K., & Okano, R. (2020). Fuel cell system for Honda CLARITY fuel cell. *ETransportation*, *3*, 100046. doi: 10.1016/j.etran.2020.100046

Tasnim, M. N., Akter, S., Shahjalal, M., Shams, T., Davari, P., & Iqbal, A. (2023). A critical review of the effect of light duty electric vehicle charging on the power grid. *Energy Reports*, *10*, 4126–4147. doi: 10.1016/j.egyr.2023.10.075

Thakur, A. K., Prabakaran, R., Elkadeem, M. R., Sharshir, S. W., Arıcı, M., Wang, C., & Saidur, R. (2020). A state of art review and future viewpoint on advance cooling techniques for Lithium–ion battery system of electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, *32*, 101771.

Timilsina, R. R., Zhang, J., Rahut, D. B., Patradool, K., & Sonobe, T. (2025). Global drive toward net-zero emissions and sustainability via electric vehicles: an integrative critical review. *Energy Ecology and Environment*, *10*, 125–144. doi: 10.1007/s40974-024-00351-7

Tirumareddy, P., Esmi, F., Masoumi, S., Borugadda, V. B., & Dalai, A. K. (2022). Introduction to green diesel. In *Green Diesel: An Alternative to Biodiesel and Petrodiesel* (pp. 1-40). Singapore: Springer Nature Singapore.

Tiwari, K. P., & Singh, R. N. (2023). A Technical Review on Performance and Emission Characteristics of Diesel Engine Fueled with Straight Vegetable Oil. *Current World Environment*, *18*(2), 462–482. doi: 10.12944/cwe.18.2.04

Tornatore, C., Marchitto, L., Sabia, P., & De Joannon, M. (2022). Ammonia as Green Fuel in Internal Combustion Engines: State-of-the-Art and Future Perspectives. *Frontiers in Mechanical Engineering*, *8*. doi: 10.3389/fmech.2022.944201

Tsita, K. G., Kiartzis, S. J., Ntavos, N. K., & Pilavachi, P. A. (2020). Next generation biofuels derived from thermal and chemical conversion of the Greek transport sector. *Thermal Science and Engineering Progress*, *17*, 100387. doi: 10.1016/j.tsep.2019.100387

U.S. EPA (2022). *Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990–2020*. Διαθέσιμο από: https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks [τελευταία πρόσβαση 12.06.2025].

Usman, M., Ijaz Malik, M. A., Ranjha, Q. A., Arif, W., Jamil, M. K., Miran, S., & Siddiqui, S. (2023). Experimental assessment of performance, emission and

lube oil deterioration using gasoline and LPG for a sustainable environment. *Case Studies in Thermal Engineering*, *49*, 103300. doi: 10.1016/j.csite.2023.103300

Valera-Medina, A., Xiao, H., Owen-Jones, M., David, W. I. F., & Bowen, P. J. (2018). Ammonia for power. *Progress in Energy and Combustion Science*, *69*, 63–102. doi: 10.1016/j.pecs.2018.07.001

Verma, S., Dwivedi, G., & Verma, P. (2022). Life cycle assessment of electric vehicles in comparison to combustion engine vehicles: A review. *Materials Today: Proceedings*, *49*, 217-222.

Vishwakarma, R. P., & Kumar, M. (2016). Internal Combustion Engine. International *Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 3*(1), 259-262.

Vlas, M., & Cerpanova, M. (2024). Exploring the internal combustion engine: a brief overview of its history, application, evolution, and environmental impact. *Conferinţa Tehnico-Ştiinţifică a Studenţilor, Masteranzilor şi Doctoranzilor, Universitatea Tehnică a Moldovei, 4*, 2530-2533.

Wolfram, P., Kyle, P., Zhang, X., Gkantonas, S., & Smith, S. (2022). Using ammonia as a shipping fuel could disturb the nitrogen cycle. *Nature Energy*, *7*(12), 1112–1114. doi: 10.1038/s41560-022-01124-4

World Health Organization. (2021). *Air quality guidelines: Global update 2021.* Διαθέσιμο από: https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228 [τελευταία πρόσβαση 12.06.2025].

Xu, H., Lee, U., & Wang, M. (2020). Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions of palm fatty acid distillate derived renewable diesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *134*, 110144.

Younas, M., Shafique, S., Hafeez, A., Javed, F., & Rehman, F. (2022). An Overview of Hydrogen Production: Current Status, Potential, and Challenges. *Fuel*, *316*, 123317. doi: 10.1016/j.fuel.2022.123317

Yue, M., Lambert, H., Pahon, E., Roche, R., Jemei, S., & Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *146*(111180), 111180. doi: 10.1016/j.rser.2021.111180

Yukesh Kannah, R., Kavitha, S., Preethi, Parthiba Karthikeyan, O., Kumar, G., Dai-Viet, N. Vo., & Rajesh Banu, J. (2021). Techno-economic assessment of various hydrogen production methods – A review. *Bioresource Technology*, *319*, 124175. doi: 10.1016/j.biortech.2020.124175

Zahedmanesh, A., Muttaqi, K. M., & Sutanto, D. (2020). Coordinated Charging Control of Electric Vehicles While Improving Power Quality in Power Grids Using a Hierarchical Decision-Making Approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, *69*(11), 12585–12596. doi: 10.1109/tvt.2020.3025809

Zhang, C., Shan, Y., Lian, J., Zhang, C., & Li, M. (2025). Optimizing Hydrogen Production for Sustainable Fuel Cell Electric Vehicles: Grid Impacts in the WECC Region. *Sustainability*, *17*(3), 1129–1129. doi: 10.3390/su17031129

Zhang, H., Lei, N., & Wang, Z. (2024). Ammonia-hydrogen propulsion system for carbon-free heavy-duty vehicles. *Applied Energy*, *369*, 123505–123505. doi: 10.1016/j.apenergy.2024.123505

Zhang, L., Sun, C., Cai, G., & Leong Hai Koh. (2023). Charging and discharging optimization strategy for electric vehicles considering elasticity demand response. *ETransportation*, *18*, 100262–100262. doi: 10.1016/j.etran.2023.100262

Zimakowska-Laskowska, M., & Laskowski, P. (2024). Comparison of pollutant emissions from various types of vehicles. *Combustion Engines*, *197*(2), 139–145. doi: 10.19206/ce-181193

Zuorro, A., García-Martínez, J. B., & Barajas-Solano, A. F. (2021). The Application of Catalytic Processes on the Production of Algae-Based Biofuels: A Review. *Catalysts*, *11*(1), 22. doi: 10.3390/catal11010022

Κλιάνης, Λ. Χ., Νικολός, Ι. Κ., & Σιδέρης, Ι. Α. (2017). Μηχανές Εσωτερικής Καύσης. Ίδρυμα Ευγενίδου. Διαθέσιμο από: https://www.eef.edu.gr/media/3766/e_j00067.pdf [τελευταία πρόσβαση 02.05.2025].