



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Οι Προκλήσεις των Μελλοντικών Μηχανών Εσωτερικής Καύσης

ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ

ΑΓΑΛΙΑΝΟΣ ΠΕΤΡΟΣ

ΑΜ

46145856

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΙΩΑΝΝΗΣ ΣΑΡΡΗΣ

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2021-2022

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική
Επιτροπή :

A/A	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	ΙΩΑΝΝΗΣ ΣΑΡΡΗΣ	
2	ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ ΓΚΟΥΝΤΑΣ	
3	ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ-ΙΩΑΝΝΗΣ ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΑΓΑΛΙΑΝΟΣ ΠΕΤΡΟΣ του ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ, με αριθμό μητρώου 46145856 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο/Η Δηλών/ούσα



Περίληψη

Η αστική ατμοσφαιρική ρύπανση είναι ένα πολύ περίπλοκο πρόβλημα. Οι εκπομπές καυσαερίων από κινητήρες εσωτερικής καύσης ευθύνονται για το μεγαλύτερο μέρος αυτού του προβλήματος. Ο στόχος κάθε κινητήρα είναι να μετατρέψει την ενέργεια από κάποια άλλη μορφή σε «μηχανική δύναμη και κίνηση». Οι όροι «μηχανική δύναμη» και «κίνηση» χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν τον σημαντικό ρόλο που έχουν τόσο η παραγωγή εργασίας (δηλαδή πόση δύναμη μπορεί να εφαρμοστεί για να μετακινηθεί κάτι σε μια δεδομένη απόσταση), καθώς και η ισχύς εξόδου (πόσο γρήγορα μπορεί να ολοκληρωθεί η εργασία). Η καύση του καυσίμου στους κινητήρες εσωτερικής καύσης, είναι σχεδόν πάντα ημιτελής και δημιουργεί εκπομπές που μολύνουν το περιβάλλον και συμβάλλουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη, στην όξινη βροχή, στην αιθαλομίχλη, σε οσμές, σε αναπνευστικά και πολλά άλλα προβλήματα υγείας. Τα τρέχοντα ζητήματα της κλιματικής αλλαγής και της περιβαλλοντικής ρύπανσης έχουν οδηγήσει στην εμφάνιση της έρευνας για τη μετάβαση στη βιωσιμότητα, η οποία στοχεύει στη δημιουργία περισσότερων βιώσιμων τρόπων παραγωγής και κατανάλωσης. Η συγκεκριμένη εργασία μελετά το πλαίσιο των προκλήσεων των μελλοντικών μηχανών εσωτερικής καύσης. Στόχος της εργασίας αποτελεί τόσο η ανάδειξη της τελευταίας τεχνολογίας, όσο και οι προκλήσεις της τελευταίας τεχνολογίας που μπορεί να εμποδίσουν την γενικότερη ανάπτυξη.

Λέξεις-Κλειδιά

Τεχνολογία, εσωτερική καύση, καύσιμα, μηχανές

Abstract

Urban air pollution is a very complex problem. Exhaust emissions from internal combustion engines are responsible for most of this problem. The goal of any engine is to convert energy from another form into "mechanical power and motion". The terms "mechanical force" and "motion" are used to express the important role that both labor output has (i.e. how much force can be applied to move something over a given distance), as well as output power (how fast it can work completed). Combustion of fuel in internal combustion engines is almost always incomplete and creates emissions that pollute the environment and contribute to global warming, acid rain, smog, odors, respiratory and many other health problems. Current issues of climate change and environmental pollution have led to the emergence of research on the transition to sustainability, which aims to create more sustainable modes of production and consumption. This thesis examines the context of the challenges of future internal combustion engines. The aim of the work is to highlight both the latest technology and the challenges of the latest technology that can hinder the overall development.

Keywords

Technology, internal combustion, fuels, engines

Περιεχόμενα

Περίληψη	4
Abstract.....	5
1. Εισαγωγή	8
1.1. Κινητήρες Εσωτερικής Καύσης και Εκπομπές Ρύπων	8
1.2. Αναγκαιότητα και Επιπτώσεις Απαγόρευσης των ICE.....	13
1.2.1. Επιπτώσεις Αποτυπώματος Άνθρακα με την Απαγόρευση των ICE	17
1.2.2. Σύστημα foreground - εκπομπές CO ₂ από την εξάτμιση	19
1.2.3. Σύστημα background – Ο κύκλος του καυσίμου.....	19
1.2.4. Σύστημα foreground – Ο κύκλος του οχήματος	20
1.2.5. Επιπτώσεις στις εκπομπές CO ₂ από την εξάτμιση	22
1.2.6. Επιπτώσεις Πολιτικής από την Εφαρμογή Απαγόρευσης των ICE.....	23
2. Μηχανές Εσωτερικής Καύσης.....	27
2.1. Κινητήρες Εσωτερικής Καύσης.....	27
2.2. Ιστορική Επισκόπηση Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης.....	29
2.3. Παλινδρομικός (Εμβολοφόρος) Κινητήρας	33
2.4. Κύκλοι Λειτουργίας Κινητήρα.....	35
2.5. Αναγκαιότητα Βελτίωσης Κινητήρων Εσωτερικής Καύσης για την Αντιμετώπιση της Κλιματικής Αλλαγής	38
2.6. Κινητήρες Εσωτερικής Καύσης και Εκπομπές Αερίων	39
2.7. Εκπομπές CO ₂ : Νέα Γενιά ΜΕΚ και ηλεκτροκίνηση.....	39
3. Συμβατικές Μηχανές Εσωτερικής Καύσης και Παραγωγή Ρύπων.....	48
3.1. Συμβατικά Καύσιμα και Ρύποι.....	48
3.1.1. Εκπομπές Υδρογονανθράκων	48
3.1.2. Εκπομπές Μονοξειδίου του Άνθρακα	51
3.1.3. Οξείδια του Αζώτου.....	52
3.1.4. Άλλες Εκπομπές.....	54

3.2. Νομοθεσία και Αναγκαιότητα Εμβολοφόρων Μηχανών Νέας Τεχνολογίας	
55	
3.2.1. Απαγόρευση Κινητήρων Εσωτερικής Καύσης από την Ε.Ε.	55
3.2.2. Η Αντίδραση των Κατασκευαστών Αυτοκινήτων.....	56
3.2.3. Η Οπτική της Ε.Ε.....	58
4. Νέες Υβριδικές Τεχνολογίες Μηχανών Εσωτερικής Καύσης	59
4.1. Επίδραση των Νέων Τεχνολογιών στη Μείωση των Ρύπων	59
4.2. Εναλλακτικά καύσιμα για κινητήρες εσωτερικής καύσης.....	63
4.2.1. Ακετυλένιο	64
4.2.2. Φυσικό Αέριο.....	67
4.2.3. Αιθανόλη.....	68
4.2.4. Υδρογόνο	69
4.2.5. Εναλλακτικά Καύσιμα για Νέες Εφαρμογές ICE.....	70
5. Συμπεράσματα.....	73
Βιβλιογραφία	76

1. Εισαγωγή

1.1. Κινητήρες Εσωτερικής Καύσης και Εκπομπές Ρύπων

Η αστική ατμοσφαιρική ρύπανση είναι ένα πολύ περίπλοκο πρόβλημα. Οι εκπομπές καυσαερίων από κινητήρες εσωτερικής καύσης ευθύνονται για το μεγαλύτερο μέρος αυτού του προβλήματος (Ferguson, 1986). Σύμφωνα με τη μελέτη του Ferguson (1986), μέχρι τα μέσα του 20ου αιώνα, ο αριθμός των μηχανών εσωτερικής καύσης ανά τον κόσμο ήταν αρκετά μικρός. Λόγω αυτού, η ρύπανση που εξέπεμπαν κυμαίνονταν σε ανεκτά επίπεδα, ενώ με τη βοήθεια του ηλιακού φωτός, το περιβάλλον παρέμενε σχετικά καθαρό. Όσο όμως αυξανόταν ο παγκόσμιος πληθυσμός, οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας, τα εργοστάσια και ο αριθμός των αυτοκινήτων, η μόλυνση του αέρα έφτασε σε μη επιθυμητά επίπεδα. Κατά τη δεκαετία του 1940, η ατμοσφαιρική ρύπανση αναγνωρίστηκε για πρώτη φορά ως πρόβλημα στη λεκάνη του Λος Άντζελες, στην Καλιφόρνια (Obert, 1973). Δύο βασικές αιτίες ήταν η μεγάλη πληθυσμιακή πυκνότητα και οι φυσικές καιρικές συνθήκες της περιοχής. Ο μεγάλος πληθυσμός οδήγησε στη δημιουργία πολλών μονάδων και εργοστασίων παραγωγής ενέργειας, καθώς και σε ραγδαία αύξηση του αριθμού αυτοκινήτων ανά τον κόσμο. Ο καπνός και άλλοι ρύποι που προέρχονταν από τα εργοστάσια και τα αυτοκίνητα, σε συνδυασμό με την ομίχλη που αποτελούσε σύνηθες φαινόμενο σε αυτή την ωκεάνια περιοχή, οδήγησαν στη δημιουργία αιθαλομίχλης.

Κατά τη δεκαετία του 1950, το πρόβλημα της αιθαλομίχλης αυξήθηκε μαζί με την αύξηση της πυκνότητας του πληθυσμού και της πυκνότητας των αυτοκινήτων. Τα αυτοκίνητα θεωρούνταν ως οι κύριοι συνεισφέροντες στο πρόβλημα ενώ από τη δεκαετία του 1960 επιβλήθηκαν στην Καλιφόρνια τα πρώτα πρότυπα εκπομπών καυσαερίων (Obert, 1973). Κατά τις δεκαετίες που ακολούθησαν, τα πρότυπα εκπομπών υιοθετήθηκαν στις υπόλοιπες Ηνωμένες Πολιτείες, στην Ευρώπη και στην Ιαπωνία. Με βάση τη μελέτη του Ferguson (1986), η βελτίωση της απόδοσης των κινητήρων καθώς και η επεξεργασία των καυσίμων, οδήγησε σε μείωση των εκπομπών HC, CO και NO_x ανά όχημα, κατά περίπου 95% (τις δεκαετίες του 1970 και του 1980). Ο μόλυβδος (ένας από τους σημαντικότερους ατμοσφαιρικούς ρύπους), καταργήθηκε σταδιακά ως πρόσθετο καύσιμο κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980, ενώ μέχρι τη δεκαετία του 1990 αναπτύχθηκαν πιο αποδοτικοί κινητήρες. Έτσι, το μέσο αυτοκίνητο καταναλώνει πλέον λιγότερο από το μισό καύσιμο σε σχέση με προηγουμένως. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου ο αριθμός των αυτοκινήτων αυξήθηκε ακόμα

περισσότερο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη μη συνολική μείωση της χρήσης του καυσίμου.

Τη σημερινή εποχή και καθώς αυξάνεται συνεχώς ο παγκόσμιος πληθυσμός, τα πρότυπα εκπομπών γίνονται αναγκαστικά ολοένα και πιο αυστηρά. Οι κύριες αιτίες αυτών των εκπομπών εξαρτώνται από διάφορες παραμέτρους (παραμέτροι σχεδιασμού κινητήρα, λειτουργικές παράμετροι, καυσαέρια μετά την επεξεργασία, τύποι καυσίμων, πρόσθετα καυσίμων και λιπαντικά). Ως εκ τούτου, οι ερευνητές στρέφονται προς το σχεδιασμό νέων κινητήρων εσωτερικής με στόχο τη βιωσιμότητα και τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων. Η ιδέα της βιωσιμότητας υπερβαίνει τη μηχανική και την επιστήμη που συνδέονται με την πράσινη χημεία και τη μηχανική. Στόχος της είναι να ενσωματώσει κοινωνικούς/υγειονομικούς και οικονομικούς παράγοντες στη συζήτηση των καταλληλότερων τεχνολογιών προς εφαρμογή. Η βιωσιμότητα περιλαμβάνει τις έννοιες των οικοσυστημάτων και της ανθρώπινης υγείας. Η ενσωμάτωση αυτών των θεμάτων στον μηχανολογικό σχεδιασμό δημιουργεί νέες προκλήσεις όσον αφορά την αποτίμηση, δηλαδή τη σκέψη σε παγκόσμια κλίμακα. Σύμφωνα με την Επιτροπή Brundtland (παλαιότερα γνωστή ως Παγκόσμια Επιτροπή για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη), η βιώσιμη ανάπτυξη ορίζεται γενικά ως «παροχή για τις ανθρώπινες ανάγκες χωρίς να διακυβεύεται η ικανότητα των μελλοντικών γενεών να καλύψουν τις όποιες ανάγκες τους» (Obert, 1973).

Η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (U.S. Environmental Protection Agency) περιγράφει τη βιωσιμότητα από δύο οπτικές γωνίες (Valenti, 1995): μια προοπτική δημόσιας πολιτικής θα όριζε τη βιωσιμότητα ως την ικανοποίηση βασικών οικονομικών, κοινωνικών και αναγκών ασφάλειας τόσο στο παρόν όσο και στο μέλλον, χωρίς να υπονομεύεται η βάση των φυσικών πόρων και η περιβαλλοντική ποιότητα από την οποία εξαρτάται η ζωή των ανθρώπων. Από επιχειρηματική σκοπιά, ο στόχος της βιωσιμότητας είναι να αυξήσει τα μακροπρόθεσμα κέρδη και την κοινωνική αξία, με ταυτόχρονη μείωση της χρήσης υλικών από τη βιομηχανία και μείωση των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον. Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης διαδραματίζουν κυρίαρχο ρόλο στους τομείς της ισχύος, της πρόωσης, της ενέργειας και της οικονομίας. Ο βιώσιμος σχεδιασμός συνδέεται στενά με τα καύσιμα που αναφλέγονται και τη συνολική απόδοση, ενώ απαιτούνται αξιόπιστοι ψεκασμοί και ανάφλεξη για τη σχετική απόδοση του συστήματος. Οι διαδικασίες ανάφλεξης και καύσης επηρεάζουν έντονα τον σχηματισμό ρύπων και την έκταση της μετατροπής του καυσίμου. Ακόμη και μια

μικρή βελτίωση μπορεί να συμβάλλει στη σημαντική μείωση του σχηματισμού ρύπων και των εκπομπών. Η χρήση του αυτοκινήτου έχει σημαντικό αντίκτυπο στην κλιματική αλλαγή, καθώς περίπου το 12% των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, (δηλαδή του κύριου αερίου του θερμοκηπίου), προέρχεται από τα καύσιμα που καταναλώνουν τα επιβατικά αυτοκίνητα. Για το λόγο αυτό, έχουν προταθεί κανονισμοί για τη μείωση των εκπομπών αυτού του αερίου από τα καύσιμα που καταναλώνουν τα οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης. Αυτή η κίνηση στοχεύει στην εφαρμογή των αρχών των επιστημών της μηχανικής (θερμοδυναμική, μηχανική ρευστών, μεταφορά θερμότητας και χημεία) και στην ανάλυση και τη βελτίωση των μεταβλητών λειτουργίας που σχετίζονται με την περιβαλλοντική απόδοση της μηχανής. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται συνδυαστικά διαφορετικές τεχνολογίες για την ανάλυση και τη διερεύνηση των παραμέτρων και των διεργασιών που ελέγχουν την ανάφλεξη, το σχηματισμό μείγματος, τη σταθερότητα της καύσης και τις εκπομπές ρύπων, με τελικό στόχο την μετατροπή του κινητήρα σε ένα βιώσιμο και πιο φιλικό προς το περιβάλλον, σύστημα.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι ένας από τους σημαντικότερους περιβαλλοντικούς παράγοντες κινδύνου για την υγεία παγκοσμίως. Ο τομέας των μεταφορών, ιδίως των οδικών, αποτελεί την κύρια πηγή επιβάρυνσης της υγείας (Pietrzak & Pietrzak, 2020). Η Ευρωπαϊκή Ένωση και τα κράτη μέλη της λαμβάνουν διάφορα μέτρα για τη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων των μεταφορών στο περιβάλλον και την υγεία. Ο τομέας των μεταφορών στην Ευρώπη έχει επιτύχει σημαντικές μειώσεις σε ορισμένες εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων, κυρίως λόγω των προτύπων εκπομπών, των οικονομικών μέτρων, των εναλλακτικών καυσίμων και των μέτρων αποφυγής των μεταφορών¹. Ωστόσο, οι εκπομπές από τον τομέα των μεταφορών της ΕΕ (Ευρωπαϊκή Ένωση) δεν παρουσιάζουν μείωση αρκετά σημαντική ώστε να οδηγήσουν σε αντίστοιχη μείωση των περιβαλλοντικών και κλιματικών επιπτώσεων στην Ευρώπη. Οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHG) που οφείλονται στις μεταφορές έχουν αυξηθεί τα τελευταία τρία χρόνια ενώ αποτελούν την κύρια πηγή σκόνης, διοξειδίου του αζώτου και εκπομπών θορύβου².

¹ European Environment Agency. Transport and Public Health. Available online: <https://www.eea.europa.eu/signals/signals-2016/articles/transport-and-public-health>

² European Environment Agency. Climate Change Mitigation. Available online: <https://www.eea.europa.eu/themes/climate/eugreenhouse-gas-inventory>

Οι πρόσφατες προσπάθειες για τη μείωση των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων από τα ICEV οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης (internal combustion engine vehicles- ICEV), είναι απαραίτητες για την προσοχή που πρέπει να δοθεί στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στον τομέα των οδικών μεταφορών. Οι βελτιώσεις στις τεχνολογίες ελέγχου των εκπομπών καυσαερίων που εισήχθησαν από κάθε νέο Euro-πρότυπο στην Ευρώπη, μείωσαν σημαντικά τις εκπομπές NOx (οξείδια του αζώτου) και PM (σωματίδια) από την άνοδο που είχε σημειωθεί κατά τη δεκαετία του 1990 (Mehlig et al., 2021). Παρά αυτές τις μειώσεις, οι εκπομπές από επιβατική οχήματα τύπου ντίζελ Euro 5 και 6 και ICELDV (ελαφρά επαγγελματικά οχήματα) παρέμειναν πολύ πάνω από το επιθυμητό όριο NOx υπό πραγματικές συνθήκες (O'Driscoll et al., 2018). Ωστόσο, τα πιο πρόσφατα ευρωπαϊκά πρότυπα βασίζονται σε ένα RDE (Real Driving Test), με αποτέλεσμα οι κατασκευαστές να εισάγουν προηγούμενες διαθέσιμες και αποτελεσματικές τεχνολογίες ελέγχου των NOx σε νέα πετρελαιοκίνητα οχήματα. Το πιο πρόσφατο πρότυπο θα μπορούσε τελικά να προσφέρει «την επιθυμητή πραγματική απόδοση που απαιτείται για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα των Ευρωπαϊκών πόλεων» (Owczuk et al., 2018).

Αυτή η τρέχουσα βελτίωση στις πραγματικές εκπομπές NOx χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη των (Zimakowska-Laskowska & Laskowski, 2022) για να προβλέψει πώς μπορεί να αποδώσουν οι μελλοντικές βελτιώσεις των οχημάτων ICE σε σύγκριση με την εισαγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση εναλλακτικών καυσίμων συμβάλλει επίσης στη μείωση των εκπομπών NOx και PM (σωματίδια που αντιμετωπίζονται ως TSP–Total Suspended Particles) (Owczuk et al., 2018).

Αυτή η επείγουσα ανάγκη για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι επίσης εμφανής στις προσπάθειες για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, ειδικά μετά την απαίτηση για την επίτευξη καθαρών «μηδενικών» εκπομπών αερίων θερμοκηπίου έως το 2050 (Mehlig et al., 2021) μέσω της εφαρμογής του fit55. Οι παραδοχές της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και η επιδίωξη της κλιματικής ουδετερότητας είναι παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη των BEV. [11,12]. Η μείωση των εκπομπών από τις οδικές μεταφορές αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την επίτευξη των στόχων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και του κλίματος. Η υπόσχεση νέων τεχνολογιών όπως τα ηλεκτρικά οχήματα (EV) μπορεί να βοηθήσει στην επίτευξη αυτών των στόχων. Ωστόσο, αυτή η διαδρομή της απανθρακοποίησης μέσω των

ηλεκτρικών οχημάτων πρέπει να λάβει υπόψη τις επιπτώσεις που θα προκύψουν στην ποιότητα του αέρα.

Ο αριθμός των BEV, κυρίως ηλεκτρικών επιβατικών αυτοκινήτων, έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια καθώς οι πολιτικές πολλών κυβερνήσεων συνεχίζουν να ενθαρρύνουν τη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων (Li et al., 2019). Η ηλεκτροδότηση των οχημάτων έχει αναγνωριστεί ως μια λύση έναντι της ατμοσφαιρικής ρύπανσης η οποία προσφέρει μηδενικές εκπομπές και υπόσχεται καθαρότερο αστικό αέρα (Liu et al., 2021).

Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η πηγή των εκπομπών ρύπων των οχημάτων δεν είναι μόνο η εξάτμιση. Ωστόσο, οι υποστηρικτές του ηλεκτρικού κλίματος συχνά υποτιμούν τις εκπομπές σωματιδίων (PM) από εκπομπές μη καυσαερίων, συμπεριλαμβανομένης της φθοράς των φρένων, της φθοράς των ελαστικών, της φθοράς του δρόμου και της εκ νέου ανάρτησης της οδικής σκόνης. Οι εκπομπές μη καυσαερίων έχουν αναγνωριστεί ως βασικός παράγοντας για τα PM στο περιβάλλον καθώς τα πρότυπα εκπομπών της εξάτμισης για τα ICEV γίνονται πιο αυστηρά (Liu et al., 2021). Οι εκπομπές χωρίς καυσαέρια, οι εκπομπές σωματιδίων που προκύπτουν από την τριβή των φρένων, των ελαστικών και των επιφανειών του δρόμου υπερβαίνουν επί του παρόντος τις εκπομπές καυσαερίων για PM_{2.5} και PM₁₀ στην Ευρώπη [5,20]. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις βελτιώσεις στο σύστημα της τεχνολογίας ελέγχου των καυσαερίων στα ICEV, που συνέπεσε με το αυξανόμενο ενδιαφέρον για οχήματα μηδενικών εκπομπών ρύπων, δηλαδή τα BEV. Η αυξημένη σημασία των καθαρών εκπομπών και ο αυξανόμενος αριθμός των BEV οδήγησαν σε μια συζήτηση στη βιβλιογραφία που συγκρίνει τα ποσοστά καυσαερίων και μηδενικών εκπομπών μεμονωμένων BEV και ICEV. Η διαφορά στις εκπομπές καυσαερίων για τα ηλεκτρικά οχήματα βασίζεται στη σχέση μεταξύ του συγκρατημένου βάρους του οχήματος και των τιμών των εκπομπών καυσαερίων (Hong et al., 2020). Μια τέτοια σχέση θα αύξανε τις εκπομπές των ελαστικών και του δρόμου για τα ηλεκτρικά οχήματα, καθώς έχουν υψηλότερο βάρος συγκράτησης από τα ICEV, κυρίως λόγω της μπαταρίας του ηλεκτρικού οχήματος. Ωστόσο, η αναγεννητική πέδηση μπορεί να μειώσει τις εκπομπές φθοράς των φρένων των ηλεκτρικών οχημάτων. Πολυάριθμες μελέτες έχουν δείξει πως ένας στόλος ηλεκτροκίνητων επιβατικών αυτοκινήτων μπορεί να συντελέσει στη σημαντική βελτίωση της ποιότητας του αέρα (Mehlig et al., 2021).

Σκοποί της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση των κινητήρων εσωτερικής καύσης ως προς τους εκπεμπόμενους ρύπους, τη νομοθεσία που οδηγεί στον νέο σχεδιασμό τους, τις νέες τεχνολογίες σχεδίασης για τη μείωση των ρύπων και τις δυνατότητες χρήσης εναλλακτικών καυσίμων. Οι συγκεκριμένοι σκοποί θα αποδοθούν με τη μέθοδο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

1.2. Αναγκαιότητα και Επιπτώσεις Απαγόρευσης των ICE

Η απαλλαγή από οδικές μεταφορές που στηρίζονται στον άνθρακα είναι σημαντική για την επίτευξη μακροπρόθεσμων στόχων μετριασμού της κλιματικής αλλαγής, τόσο για την επίτευξη του στόχου της συμφωνίας του Παρισιού όσο και για μεμονωμένες χώρες. Οι πολιτικές για την απανθρακοποίηση των οδικών μεταφορών τείνουν να αναπτύσσονται γύρω από προσεγγίσεις όπως μια κοινωνία πιο αποδοτική στον τομέα των μεταφορών (συμπεριλαμβανομένου του σχεδιασμού συστημάτων μεταφορών), οχήματα ενεργειακά αποδοτικότερα, μεγαλύτερα μερίδια ανανεώσιμων καυσίμων και ταχύτερη εισαγωγή επαναφορτιζόμενων αυτοκινήτων (de Coninck et al., 2018).

Πολλές χώρες, συμπεριλαμβανομένου του Καναδά, της Γαλλίας, της Ιαπωνίας, του Μεξικού και του Ηνωμένου Βασιλείου, έχουν ανακοινώσει στόχους ή σχέδια για τη σταδιακή κατάργηση των κινητήρων εσωτερικής καύσης (internal combustion engines-ICE) (Wappelhorst, 2020). Μια τέτοια σταδιακή κατάργηση θα αφαιρούσε αποτελεσματικά την άμεση χρήση ορυκτών καυσίμων από το σύστημα επιβατικών αυτοκινήτων, μεταφέροντας τις ανησυχίες για την απανθρακοποίηση των εκπομπών σε δραστηριότητες όπως οι αλυσίδες εφοδιασμού καυσίμων και ηλεκτρικής ενέργειας. Το 2019, η σουηδική κυβέρνηση ξεκίνησε δημόσια έρευνα σχετικά με τις δυνατότητες και τις επιπτώσεις της σταδιακής κατάργησης των ορυκτών καυσίμων και των ICE και αργότερα ανακοίνωσε ότι οι πωλήσεις νέων αυτοκινήτων που έχουν σαν καύσιμο ντίζελ και βενζίνη δεν θα πρέπει να επιτρέπονται από το 2030 και μετά. Το 2018, η σουηδική κυβέρνηση επέβαλε επίσης μια ποσόστωση υποχρέωσης μείωσης των εκπομπών στις οδικές μεταφορές, η οποία απαιτεί από τους προμηθευτές καυσίμων να μειώσουν τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHG) βενζίνης και ντίζελ αναμειγνύοντάς τα με

βιοκαύσιμα. Η πολιτική έχει ενισχυθεί για την επίτευξη του στόχου μείωσης των εκπομπών το 2030 κατά –70% σε σύγκριση με το 2010³.

Η συζήτηση για το καταλληλότερο υποκατάστατο των ορυκτών καυσίμων στα επιβατικά αυτοκίνητα με σκοπό τη μείωση των εκπομπών GHG συνεχίζεται εδώ και δεκαετίες (de Coninck et al., 2018). Οι βασικοί φορείς ενέργειας και οι τεχνολογίες που συνήθως συζητούνται είναι τα βιοκαύσιμα που χρησιμοποιούνται σε οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICEV), η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται σε ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία (BEV) και το υδρογόνο που χρησιμοποιείται σε ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου. Οι επικρατούσες τάσεις υποδηλώνουν ισχυρή αύξηση των BEV που αντιστοιχούσε στο 1% του παγκόσμιου στόλου το 2019 και προβλέπεται να αυξηθεί σε 8–14% έως το 2030, σε σχέση πάντα με τις παγκόσμιες πολιτικές για το κλίμα. Το μερίδιο της παγκόσμιας ζήτησης οδικών μεταφορών που καλύπτεται από τα βιοκαύσιμα αντιστοιχούσε στο 2,8% το 2019 και προβλέπεται να φτάσει στο 5,4% έως το 2025 (IEA, 2020b). Τα ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλες καυσίμου παρουσιάζουν πολύ μικρή ανάπτυξη όσον αφορά τη χρήση τους ως επιβατικά αυτοκίνητα (IEA, 2020a). Έχουν υπάρξει εκτενείς συζητήσεις αναφορικά με τα συνθετικά καύσιμα ουδέτερα από άνθρακα (Hannula & Reiner, 2019), τα οποία περιλαμβάνουν ηλεκτροκαύσιμα που παράγονται με χρήση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), νερό και ηλεκτρική ενέργεια ως πρώτη ύλη και συνθετικά βιοκαύσιμα που παράγονται με αεριοποίηση. Το κόστος παραγωγής ηλεκτροκαυσίμων είναι υψηλότερο από την παραγωγή συνθετικών βιοκαυσίμων και το κατά πόσο τα ηλεκτροκαύσιμα θα είναι ανταγωνιστικά σε σχέση με τα BEV εξαρτάται από το πόσο γρήγορα θα μειωθεί το κόστος της μπαταρίας (Hannula & Reiner, 2019), το οποίο ανά kWh χωρητικότητας (kWhc) έχει μειωθεί κατά 85% από το 2010 και προβλέπεται να μειωθεί περαιτέρω μετά από οικονομίες κλίμακας. Σε ένα τέτοιο σενάριο, τα ηλεκτρικά καύσιμα θα ληφθούν υπόψη κυρίως για μεταφορές βαρέως τύπου οι οποίες μπορεί να είναι δύσκολο να ηλεκτροδοτηθούν με τη χρήση μπαταριών ως το μοναδικό ενσωματωμένο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, εξ' αιτίας του μεγάλου κόστους και της χαμηλής ενεργειακής απόδοσης της παραγωγής ηλεκτροκαυσίμου. Ως εκ τούτου, τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου καθώς και τα ηλεκτροκαύσιμα δεν πρόκειται να αναλυθούν

³ Swedish Government, 2020b. Branslebyttet "forst" arks" med hogre" inblandning av fornybart" i drivmedel (The emissions reduction obligation quota policy is reinforced with increasing the share of renewables in vehicle fuels) [WWW Document]. URL <https://www.regeringen.se/pressmeddelanden/2020/09/branslebyttetforstarks-med-hogre-inblandning-av-fornybart-i-drivmedel/>

περαιτέρω, δεδομένου του ότι η μελέτη των (Morfeldt et al., 2021) αφορά τα επιβατικά αυτοκινήτα.

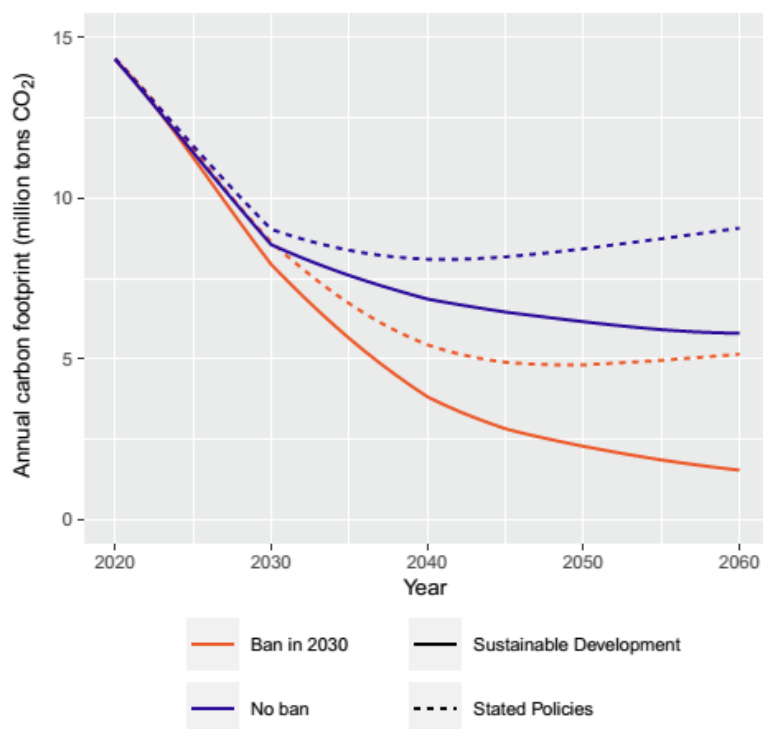
Τα βιοκαύσιμα, συμπεριλαμβανομένων των συνθετικών βιοκαυσίμων, μπορούν να αποτελούν από ένα μεγάλο ευεργετικό αποτέλεσμα μετριασμού της κλιματικής αλλαγής, (εάν η μείωση των εκπομπών του συστήματος μεταφορών συνδυάζεται με αυξήσεις του άνθρακα στην ξηρά και χαμηλές εκπομπές μη-CO₂), έως μία ανεπιθύμητη συνέπεια, (εάν οι απώλειες άνθρακα της γης υπερβαίνουν τις όποιες μειώσεις στις εκπομπές συστημάτων μεταφορών για μια σχετικά μεγάλη χρονική περίοδο). Υπάρχουν επίσης πολλά πιθανά συν-οφέλη και δυσμενείς παρενέργειες των συστημάτων βιοκαυσίμων. Έτσι, οι επιπτώσεις στον μετριασμό και σε άλλα κριτήρια βιωσιμότητας εξαρτώνται από το πλαίσιο και επηρεάζονται από την πρώτη ύλη, το καθεστώς διαχείρισης, τις εδαφικές και κλιματικές συνθήκες, την τεχνολογία μετατροπής, την κλίμακα ανάπτυξης κ.λ.π (Jeswani et al., 2020). Η πιθανή σύνδεση μεταξύ της αυξανόμενης παραγωγής βιοκαυσίμων και της έμμεσης αλλαγής χρήσης γης (ILUC) που προκαλεί, π.χ. επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα και στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, αποτελεί μια ανησυχία που τροφοδότησε τόσο τη μελέτη όσο και την ανάπτυξη πολιτικής την τελευταία δεκαετία (Santos, 2020). Οι κλιματικές επιπτώσεις συζητούνται λόγω του γεγονότος ότι τα υδρογονωμένα φυτικά έλαια με βάση το φοινικέλαιο (HVO) συμβάλλουν σημαντικά στο μείγμα βιοκαυσίμων, το οποίο θα μπορούσε να οδηγήσει σε περαιτέρω αποψίλωση των δασών στις χώρες εξαγωγής με επακόλουθες εκπομπές GHG (Uning et al., 2020). Τα εγχώρια παραγόμενα βιοκαύσιμα αναμένεται να συμβάλουν με ποσοστό διαρκώς αυξανόμενο, ως συνέπεια της νομοθεσίας της ΕΕ (Ευρωπαϊκό Συμβούλιο, 2018) που περιορίζει τα λεγόμενα βιοκαύσιμα υψηλού κινδύνου ILUC, αλλά και του αυξανόμενου ενδιαφέροντος για τη δασική βιομηχανία. Στην βιβλιογραφία αναφέρονται αντικρουόμενες διαπιστώσεις σχετικά με τις κλιματικές επιπτώσεις των δασικών βιοκαυσίμων, που οφείλονται εν μέρει στην διαφορετική εμβέλεια αλλά και στη χρήση διαφορετικών χωρικών και χρονικών ορίων του συστήματος κατά τον υπολογισμό των ισοζυγίων άνθρακα. Ως εκ τούτου, ενδέχεται να υπάρχουν περιορισμοί στη μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη βιοκαυσίμων που, μαζί με τον ανταγωνισμό όσον αφορά τη χρήση βιοκαυσίμων με άλλους τομείς, έχουν οδηγήσει σε αυξημένο ενδιαφέρον που εστιάζει στον ηλεκτρισμό του στόλου των επιβατηγών αυτοκινήτων.

Τα επαναφορτιζόμενα αυτοκίνητα, συμπεριλαμβανομένων των plug-in υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων (PHEV) και των BEV, παρουσιάζουν άλλα προβλήματα βιωσιμότητας. Εκτός από τα κοινωνικά και περιβαλλοντικά ζητήματα μετά την εξόρυξη υλικών που χρησιμοποιούνται σε μπαταρίες ιόντων λιθίου, η διαδικασία παραγωγής είναι επίσης υψηλής έντασης ηλεκτρική ενέργεια και προκαλεί μεγάλες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά παραγωγή της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας (Emilsson & Dahllof, 2019). Το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί στο 44% έως το 2040, εάν διατηρηθούν οι επί του παρόντος αναφερόμενες πολιτικές και θα συμβάλει στην σχεδόν πλήρη απαλλαγή από τον άνθρακα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, εάν οι χώρες ακολουθήσουν μονοπάτια σύμφωνα με τη συμφωνία του Παρισιού (de Coninck et al., 2018). Ως εκ τούτου, μια αναγωγή του τρέχοντος συστήματος στο μέλλον θα οδηγήσει σε αδικαιολόγητα υψηλές εκτιμώμενες εκπομπές GHG που σχετίζονται με τη μελλοντική κατασκευή μπαταριών. Το ίδιο ισχύει και για την ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται για τη φόρτιση των αυτοκινήτων, όπου η ένταση άνθρακα της ηλεκτρικής ενέργειας έχει πολύ μεγάλες επιπτώσεις στη φάση χρήσης ενός BEV (Kamiya et al., 2019). Το δυναμικό μετριασμού της ηλεκτροδότησης του στόλου με χρήση BEV μπορεί να υποτιμηθεί εκτός εάν ληφθούν υπόψη οι τοπικές παραλλαγές και η μελλοντική απαλλαγή από τον άνθρακα στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα μοντέλα κύκλου εργασιών στόλου οχημάτων είναι χρήσιμα για την ανάλυση του αντίκτυπου των τεχνολογικών τάσεων και των διαφόρων μέσων πολιτικής στην εξέλιξη του στόλου και μπορούν να συνδυαστούν με την αξιολόγηση κύκλου ζωής (LCA) για την εκτίμηση των ενεργειακών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ωστόσο, πρόσφατες μελέτες (Milovanoff et al., 2019) δεν εξετάζουν τη μελλοντική ανάπτυξη άλλων συστημάτων παραγωγής εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ούτε αναλύουν τον αντίκτυπο στα αποτυπώματα άνθρακα στο πλαίσιο ανταγωνιστικών στρατηγικών μετριασμού, όπως η αυξανόμενη χρήση βιοκαυσίμων. Αυτό το ερευνητικό κενό καταγράφεται με την εφαρμογή ενός μοντέλου που ονομάζεται Vehicle Turnover Model Assessing Future Mobility services (V-TAFM) για την εκτίμηση του μελλοντικού αποτυπώματος άνθρακα των ταξιδιών με επιβατικά αυτοκίνητα με βάση το μελλοντικό LCA, συμπεριλαμβανομένων προσομοιώσεων ροής αποθεμάτων του κύκλου εργασιών του στόλου οχημάτων σε συνδυασμό με τα

παγκόσμια σενάρια μετριασμού της έντασης της κλιματικής αλλαγής που αποτυπώνουν την *απαλλαγή των συστημάτων παραγωγής και κατασκευής ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνθρακα*.

Συγκεκριμένα, η μελέτη των (Morfeldt et al., 2021) έχει σαν στόχο την εκτίμηση των επιπτώσεων στο αποτύπωμα άνθρακα που προκύπτει από την απαγόρευση των ICE στις πωλήσεις νέων αυτοκινήτων. Το V-TAFM παρέχει πληροφορίες για το μελλοντικό στόλο αυτοκινήτων, τη χρήση καυσίμου και τις εκπομπές CO₂ σε όλο τον κύκλο ζωής των αυτοκινήτων, πτυχές που είναι κρίσιμες για να κατανοηθούν για το σχεδιασμό της μελλοντικής πολιτικής για το κλίμα και τις μεταφορές.



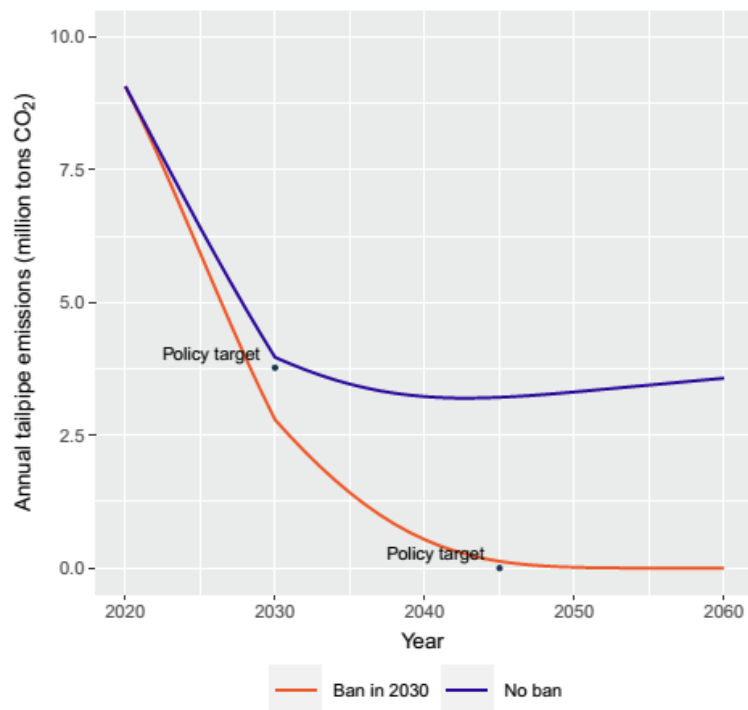
Σχήμα 1. Ετήσια αποτυπώματα άνθρακα για ταξίδια με επιβατικά αυτοκίνητα που υπογραμμίζουν τον αντίκτυπο της θέσπισης της απαγόρευσης τους το 2030 (το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στην εισαγωγή απαγόρευσης ενώ το μπλε για την περίπτωση της μη απαγόρευσης, για τα δύο σενάρια. Η διαδρομή που αφορά τη βιώσιμη ανάπτυξη παρουσιάζεται συνεχής ενώ η διακεκομμένη αντιστοιχεί στις δηλωμένες πολιτικές.

1.2.1. Επιπτώσεις Αποτυπώματος Άνθρακα με την Απαγόρευση των ICE

Η εισαγωγή απαγόρευσης των ICE έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές μειώσεις στα ετήσια αποτυπώματα άνθρακα (όπως φαίνεται **σε παραπάνω σχήμα**). Οι ετήσιες εκπομπές από τα 14 εκατομμύρια τόνους CO₂ (MtCO₂) το 2020 θα πρέπει να

κυμαίνονται από 1,5 έως 5,1 MtCO₂ έως το 2060, ανάλογα με την απανθρακοποίηση των συστημάτων. Χωρίς την απαγόρευση των ICE, οι ετήσιες εκπομπές θα κυμαίνονται μεταξύ 5,8 και 9,1 MtCO₂ έως το 2060, ανάλογα με την απανθρακοποίηση των συστημάτων όπου 1,0 MtCO₂ της μείωσης είναι αποτέλεσμα χαμηλότερης έντασης άνθρακα στην παραγωγή βιοκαυσίμων. Ανεξάρτητα από το εάν επιβληθεί απαγόρευση ή όχι, οι εκπομπές αρχίζουν να αυξάνονται ξανά προς το τέλος του χρονικού ορίζοντα μοντελοποίησης στο σενάριο των Δηλωμένων Πολιτικών ως αποτέλεσμα της αυξανόμενης ταξιδιωτικής ζήτησης. Αυτή η επίδραση εξουδετερώνεται από την απαλλαγή των συστημάτων από άνθρακα στο σενάριο της Βιώσιμης Ανάπτυξης.

Τα ετήσια αποθέματα και ροές οχημάτων καθώς και η χρήση ενέργειας του οχήματος παρέχονται στο SM 2.6–2.10. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ξεκάθαρα την επίδραση της απαγόρευσης στις πωλήσεις νέων αυτοκινήτων με ICE και τον αντίκτυπο στην ηλεκτροκίνηση του στόλου. Το απόθεμα αυτοκινήτων δείχνει ότι τα ICEV καταργούνται πλήρως από ολόκληρο τον στόλο έως το 2050, καθώς η διάρκεια ζωής του αυτοκινήτου είναι πν 17 χρόνια.



Σχήμα 2. Ετήσιες εκπομπές CO₂ από τις εξατμίσεις που παράγονται από τα επιβατικά αυτοκίνητα. Ο ενδεικτικός στόχος πολιτικής για το 2030 αντιστοιχεί σε μείωση 70% των

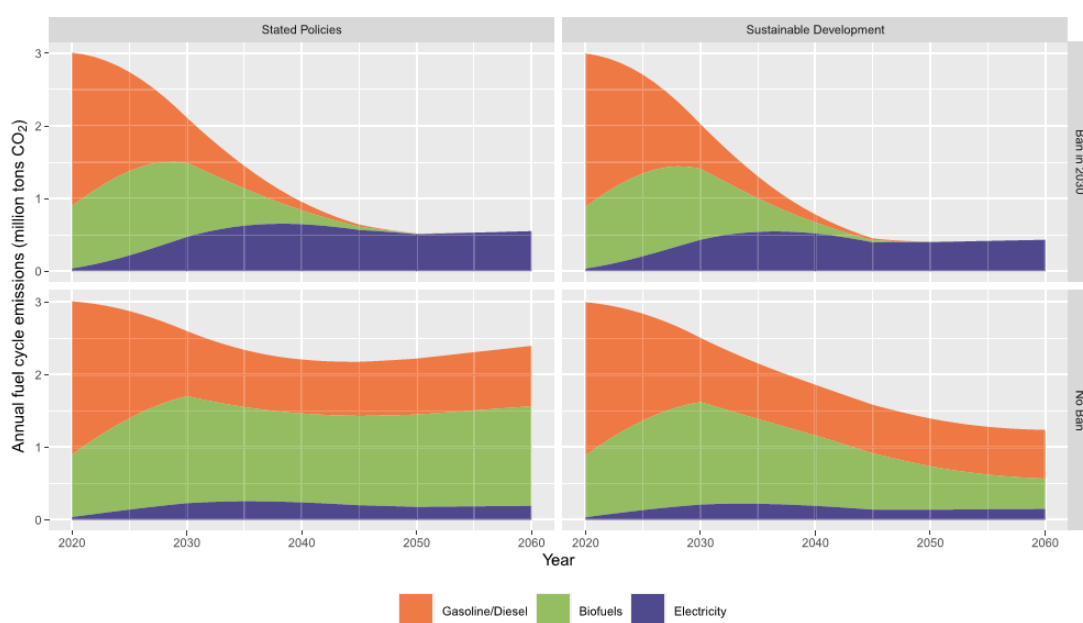
ετήσιων εκπομπών σε σύγκριση με το 2010 και ο ενδεικτικός στόχος πολιτικής για το 2045 αντιστοιχεί σε μηδενικές εκπομπές.

1.2.2. Σύστημα foreground - εκπομπές CO₂ από την εξάτμιση

Οι ετήσιες εκπομπές καυσαερίων από τα επιβατικά αυτοκίνητα θα πρέπει να μειωθούν γρήγορα από 9,1 MtCO₂ το 2020 σε μηδέν μεταξύ 2045 και 2050, εάν επιβληθεί απαγόρευση στα ICE. Χωρίς απαγόρευση, οι εκπομπές θα μειώνονται σημαντικά μέχρι το 2030 χάρη στην πολιτική για τα βιοκαύσιμα και στη συνέχεια θα συνεχίζουν να μειώνονται ελαφρά έως το 2042, λόγω των υποτιθέμενων βελτιώσεων στην ενεργειακή απόδοση, για να αυξηθούν και πάλι φτάνοντας σε επίπεδο 3,6 MtCO₂ έως το 2060, ως αποτέλεσμα της αυξημένης ταξιδιωτικής ζήτησης με συνέπεια την επιπεδοποίηση των δυνητικών βελτιώσεων ενεργειακής απόδοσης (όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, 4)

1.2.3. Σύστημα background – Ο κύκλος του καυσίμου

Οι ετήσιες εκπομπές που συμβαίνουν στον κύκλο του καυσίμου έφθασαν σε 3,0 MtCO₂ το 2020 και πρόκειται να μειωθούν σημαντικά στην περίπτωση που επιβληθεί απαγόρευση στα ICE, (ακόλουθο σχήμα). Οι οδοί υπογραμμίζουν τη σημαντική επίδραση στις εκπομπές του κύκλου καυσίμου από τη σταδιακή κατάργηση των υγρών καυσίμων (τόσο ορυκτών όσο και βιολογικών), φτάνοντας σε ετήσια επίπεδα από 0,43 έως 0,55 MtCO₂ έως το 2060, ανάλογα με το βαθμό απανθρακοποίησης των συστημάτων background.



Σχήμα 3. Ετήσιες εκπομπές CO₂ κύκλου καυσίμου για ταξίδια με επιβατικό αυτοκίνητο. Οι ετικέτες υποδηλώνουν τα σενάρια foreground (Απαγόρευση το 2030 ή Χωρίς απαγόρευση) και background (δηλαδή, δηλωμένες πολιτικές ή βιώσιμη ανάπτυξη) σε κάθε δευτερεύουσα πλοκή

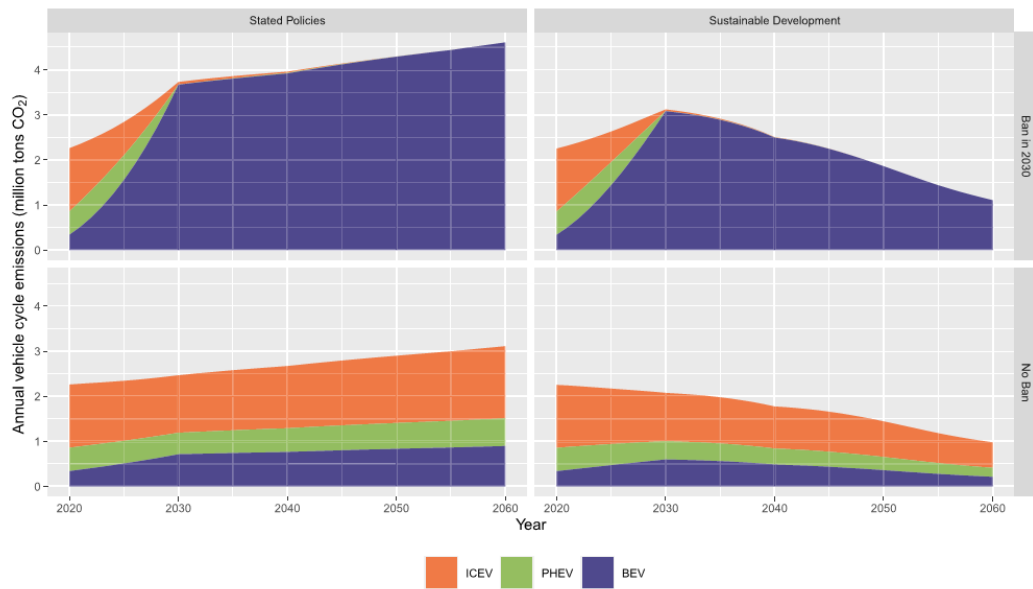
Η απαγόρευση του άνθρακα των συστημάτων background δεν επιφέρει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα για το σενάριο της απαγόρευσης των ICE κάτι που εξηγείται εξαιτίας της γρήγορης μετατόπισης όσον αφορά τη χρήση ενέργειας των οχημάτων από τα υγρά καύσιμα στην ηλεκτρική ενέργεια και επειδή η ένταση άνθρακα της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή και υποτίθεται ότι είναι παρόμοια για τα σενάρια δηλωμένων πολιτικών και βιώσιμης ανάπτυξης.

Για το σενάριο χωρίς απαγόρευση των ICE, οι ετήσιες εκπομπές στον κύκλο του καυσίμου διαφέρουν πιο σημαντικά ανάλογα με την απαγόρευση του άνθρακα των σεναρίων background. Οι ετήσιες εκπομπές του κύκλου καυσίμου ακολουθούν μια φθίνουσα πορεία σε επίπεδο 1,2 MtCO₂ έως το 2060 για το σενάριο της Βιώσιμης Ανάπτυξης, ενώ το σενάριο των Δηλωμένων Πολιτικών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των εκπομπών από το 2043 και μετά φτάνοντας τα ετήσια επίπεδα των 2,4 MtCO₂ έως το 2060.

1.2.4. Σύστημα foreground – Ο κύκλος του οχήματος

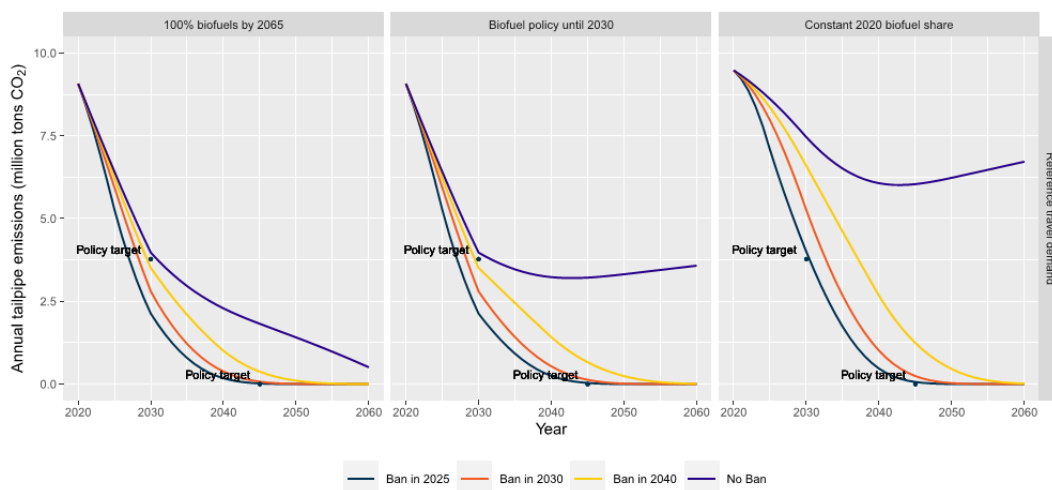
Οι ετήσιες εκπομπές κατά τον κύκλο του οχήματος υπολογίστηκαν σε 2,3 MtCO₂ το 2020 και φαίνεται ότι αρχικά αυξάνονται γρήγορα εάν επιβληθεί απαγόρευση στα ICE, (**ακόλουθο σχήμα**) Πρόκειται ουσιαστικά για το αποτέλεσμα της αυξημένης κατασκευής μπαταριών που απαιτούνται για τα BEV και PHEV. Οι ετήσιες εκπομπές του κύκλου των οχημάτων θα αρχίζουν να μειώνονται μετά το 2030 στο σενάριο της Βιώσιμης Ανάπτυξης, καθώς οι διαδικασίες παραγωγής απαλλάσσονται από τον άνθρακα και η ετήσια ζήτηση νέων μπαταριών γίνεται πιο σταθερή. Οι εκπομπές θα φθάνουν τελικά σε επίπεδο 1,1 MtCO₂ έως το 2060. Εάν τα συστήματα παρασκηνίου ακολουθήσουν το σενάριο των Δηλωμένων Πολιτικών, οι ετήσιες εκπομπές του κύκλου των οχημάτων αυξάνονται συνεχώς σε επίπεδο 4,6 MtCO₂ έως το 2060, καθώς οι εκπομπές ανά μεμονωμένο κατασκευασμένο BEV παραμένουν σχεδόν σταθερές. Μια αύξηση της έντασης άνθρακα της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται στην κατασκευή κατά 50% θα είχε ως αποτέλεσμα οι ετήσιες εκπομπές στον κύκλο του οχήματος να αυξάνονται κατά 0,5 έως 0,6–0,8 MtCO₂ έως το 2030, ανάλογα με την απανθρακοποίηση των συστημάτων background, και θα μπορούσε να φτάσει σε επίπεδο

5,6 MtCO₂ το 2060 για το σενάριο των Δηλωμένων Πολιτικών (δηλαδή, 1,0 MtCO₂ μεγαλύτερο το 2060 σε σύγκριση με το ακόλουθο **σχήμα**).



Σχήμα 4. Ετήσιες εκπομπές CO₂ κύκλου οχημάτων για ταξίδια με επιβατικό αυτοκίνητο. Οι ετικέτες υποδηλώνουν τα σενάρια foreground (δηλ. Απαγόρευση το 2030 ή Χωρίς απαγόρευση) και background (δηλαδή, δηλωμένες πολιτικές ή βιώσιμη ανάπτυξη) σε κάθε δευτερεύουσα πλοκή.

Το σενάριο χωρίς απαγόρευση των ICE οδηγεί σε χαμηλότερες εκπομπές στον κύκλο του οχήματος σε σύγκριση με τα σενάρια που περιλαμβάνουν απαγόρευση. Οι ετήσιες εκπομπές το 2030 χωρίς απαγόρευση κυμαίνονται μεταξύ 2,1 και 2,5 MtCO₂ (ανάλογα με το background σενάριο) το οποίο γίνεται συγκρίσιμο με τις τιμές 3,1 - 3,7 MtCO₂ (ανάλογα με το Background σενάριο) στην περίπτωση απαγόρευσης. Αυτή η διαφορά οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην αυξημένη ανάγκη για χωρητικότητα μπαταρίας. Στην περίπτωση χωρίς την απαγόρευση, η απαλλαγή των συστημάτων από τον άνθρακα είναι ζωτικής σημασίας για την αύξηση ή μείωση των εκπομπών του κύκλου των οχημάτων με την πάροδο του χρόνου, με αποτέλεσμα οι εκπομπές να κυμαίνονται μεταξύ 1,0 και 3,1 MtCO₂ έως το 2060.



Σχήμα 5. Ετήσιες εκπομπές CO₂ από την εξάτμιση που υπογραμμίζουν τον αντίκτυπο του χρόνου απαγόρευσης του ICE και το ποσοστό χρήσης βιοκαυσίμων. Η ζήτηση ταξιδιού αναφοράς υποτίθεται. Ο ενδεικτικός στόχος πολιτικής για το 2030 αντιστοιχεί σε μείωση 70% των ετήσιων εκπομπών σε σύγκριση με το 2010 και ο ενδεικτικός στόχος πολιτικής για το 2045 αντιστοιχεί σε μηδενικές εκπομπές.

1.2.5. Επιπτώσεις στις εκπομπές CO₂ από την εξάτμιση

Όπως αναμενόταν, οι ετήσιες εκπομπές από την εξάτμιση επηρεάζονται σημαντικά τόσο από το χρονοδιάγραμμα της απαγόρευσης των ICE όσο και από την υποτιθέμενη χρήση βιοκαυσίμων, όπως απεικονίζεται στο προηγούμενο σχήμα). Εάν η χρήση βιοκαυσίμων υποτεθεί ότι είναι σταθερή στα τρέχοντα επίπεδα, μόνο μια απαγόρευση το 2025 θα ήταν σε αρμονία με τους στόχους πολιτικής μείωσης 70% των εκπομπών καυσαερίων μεταξύ 2010 και 2030 για τον τομέα των μεταφορών (το παραπάνω αποτυπώνεται φαίνεται ως ενδεικτικό επίπεδο στο προηγούμενο **σχήμα** όπου αναμένονται ισοδύναμες μειώσεις για τις μετακινήσεις με επιβατικά αυτοκίνητα και για τον τομέα των μεταφορών γενικά). Χωρίς απαγόρευση, η πολιτική για τα βιοκαύσιμα μόνο μέχρι το 2030 δεν θα είναι αρκετή για μείωση 70% μεταξύ 2010 και 2030 (αν και ο στόχος θα χαθεί μόνο με πολύ μικρό περιθώριο). Ανάλογα με το χρονοδιάγραμμα της απαγόρευσης, ο στόχος μείωσης κατά 70% υπερκαλύπτεται σε διάφορους βαθμούς. Το ενδεικτικό επίπεδο για το 2045, το οποίο πρόκειται να φτάσει κοντά στο μηδέν, επιτυγχάνεται μόνο με το συνδυασμό μιας πρώιμης απαγόρευσης (σε ισχύ έως το 2025 ή το 2030) με την αύξηση της χρήσης βιοκαυσίμων τουλάχιστον έως το 2030.

Οι μειώσεις των εκπομπών της εξάτμισης από την αυξημένη χρήση βιοκαυσίμων συνεπάγονται το κόστος των αυξημένων εκπομπών του κύκλου καυσίμου. Σε ένα ευρύτερο πλαίσιο, αυτό είναι πιθανό να ισχύει και σε άλλες χώρες, στην περίπτωση βέβαια που κινηθούν προς τις οδούς μείωσης των εκπομπών που απαιτούνται για την επίτευξη των κλιματικών στόχων που αναφέρονται στη συμφωνία του Παρισιού, λαμβάνοντας υπόψη την ανάπτυξη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και τις μελλοντικές προοπτικές για τον τομέα αυτό (de Coninck et al., 2018).

Οι εκπομπές από την εξάτμιση επηρεάζονται επίσης σε κάποιο βαθμό από την υποτιθέμενη μελλοντική ταξιδιωτική ζήτηση, αλλά οι επιπτώσεις είναι ελάχιστες σε σχέση με τους ενδεικτικούς στόχους πολιτικής. Οι σωρευτικές εκπομπές καυσαερίων αλλάζουν κατά $\pm 3-9\%$ για τις περιπτώσεις που εισάγουν απαγόρευση και $\pm 10-16\%$ για τις περιπτώσεις που δεν εισάγουν απαγόρευση, όπου τα εύρη εξαρτώνται από άλλες υποθέσεις στο προσκήνιο. Ωστόσο, η ταξιδιωτική ζήτηση θα μπορούσε να επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις στη ζήτηση βιοκαυσίμων στην περίπτωση σεναρίων χωρίς απαγόρευση (π.χ. από 39 TWh ετησίως για την περίπτωση υψηλής ταξιδιωτικής ζήτησης σε 24 TWh ετησίως για την περίπτωση χαμηλής ταξιδιωτικής ζήτησης το 2060, υποθέτοντας συνεχή αύξηση το μερίδιο των βιοκαυσίμων) και τον αριθμό των BEV που απαιτούνται για την κάλυψη της ταξιδιωτικής ζήτησης σε σενάρια με απαγόρευση (από 10 εκατομμύρια αυτοκίνητα για την περίπτωση υψηλής ταξιδιωτικής ζήτησης σε 6,2 εκατομμύρια αυτοκίνητα για την περίπτωση χαμηλής ταξιδιωτικής ζήτησης το 2060). Ως εκ τούτου, οι πτυχές της ζήτησης ταξιδιών είναι πιθανό να είναι σημαντικές δεδομένων των περιορισμών της προσφοράς βιοενέργειας και της προσφοράς κρίσιμων υλικών που είναι απαραίτητα για τις μπαταρίες.

1.2.6. Επιπτώσεις Πολιτικής από την Εφαρμογή Απαγόρευσης των ICE

Ένα από τα κίνητρα για τη δημόσια έρευνα είναι ότι οι εκπομπές από τις εγχώριες μεταφορές δεν μειώνονται αρκετά γρήγορα ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι που εγκρίθηκαν στο πλαίσιο της παγκόσμιας πολιτικής για το κλίμα. Στην περίπτωση των εγχώριων μεταφορών, ο στόχος καθαρού μηδενός ουσιαστικά σημαίνει μηδενικές εκπομπές ώστε να μπορούν να επιτραπούν ορισμένες εναπομένουσες εκπομπές σε άλλους τομείς που είναι πιο δύσκολο να μειωθούν. Η θέσπιση απαγόρευσης των ICE θα μπορούσε να μειώσει τις ετήσιες εκπομπές της εξάτμισης καθώς και το σωρευτικό

αποτύπωμα άνθρακα. Ωστόσο, το πλήρες αποτέλεσμα της σταδιακής κατάργησης των υγρών καυσίμων ως αποτέλεσμα της θέσπισης απαγόρευσης παρατηρείται περίπου 20 χρόνια μετά την απαγόρευση (δηλαδή, ο χρόνος που απαιτείται για τα περισσότερα αυτοκίνητα να φτάσουν στο τέλος της ζωής τους). Κατά συνέπεια, μόνο μια απαγόρευση που θα τεθεί σε ισχύ ήδη από το 2025 θα μπορούσε, μεμονωμένα από άλλες πολιτικές, να επιτύχει τις ετήσιες μειώσεις των εκπομπών από την εξάτμιση που απαιτούνται για να επιτευχθεί μείωση των εκπομπών κατά 70% το 2030 σε σύγκριση με τις τιμές του 2010. Εάν το μερίδιο των βιοκαυσίμων αυξηθεί έως το 2030, ως αποτέλεσμα της εφαρμογής της πολιτικής ποσοτώσεων υποχρέωσης μείωσης των εκπομπών, σε συνδυασμό με την απαγόρευση των ICE το 2025, ο ενδεικτικός στόχος πολιτικής θα μπορούσε αντ'αυτού να υπερκαλυφθεί σημαντικά (φθάνοντας μια μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 83% έως το 2030 σε σύγκριση με το 2010). Ο συνδυασμός μιας απαγόρευσης το 2030 με την πολιτική για τα βιοκαύσιμα θα οδηγήσει σε μειώσεις των εκπομπών της εξάτμισης κατά 78%. Αυτό είναι λογικό αφού τα επίπεδα μείωσης της πολιτικής καθορίστηκαν με βάση ένα συντηρητικό σενάριο ηλεκτροδότησης (Swedish Energy Agency, 2019a). Συγκριτικά προκύπτει ότι, οι ετήσιες εκπομπές καυσαερίων θα μειωνόταν κατά 68% έως το 2030 σε σύγκριση με το 2010, εάν η πολιτική για τα βιοκαύσιμα εφαρμοστεί χωρίς πρόσθετες πολιτικές για την ηλεκτροδότηση των μεταφορών επιβατηγών αυτοκινήτων (ούτε πολιτικές για μια αποδοτική κοινωνία των μεταφορών πέρα από το σενάριο της ζήτησης ταξιδιών αναφοράς). Ως εκ τούτου, μια πρόωπη απαγόρευση των ICEs θα μπορούσε να επιτρέψει πιο αργό μετριασμό σε τμήματα των εγχώριων μεταφορών που μπορεί να είναι πιο δύσκολο να μετριαστούν δεδομένου ότι ο στόχος πολιτικής που υιοθετήθηκε είναι δεσμευτικός για τις εγχώριες μεταφορές στο σύνολό τους. Από την άλλη πλευρά, ο πρόωπος χρόνος απαγόρευσης των ICE μπορεί να είναι δύσκολο να εφαρμοστεί για διάφορους λόγους, π.χ. μοντέλα BEV που δεν καλύπτουν ακόμη τη γκάμα των απαιτούμενων αυτοκινήτων, περιορισμοί στην παροχή μπαταριών, αρνητικές κοινωνικές και περιβαλλοντικές συνέπειες εφοδιαστική αλυσίδα των μπαταριών, έλλειψη τεχνογνωσίας μηχανικής και υψηλό κόστος κατασκευής μπαταριών.

Ωστόσο, η θέσπιση απαγόρευσης των ICE παρουσιάζει μια σημαντική μακροπρόθεσμη επιλογή για τη μείωση των εκπομπών, καθώς η αυξανόμενη χρήση βιοκαυσίμων μπορεί να είναι βιώσιμη μόνο βραχυπρόθεσμα. Η μεγάλη εξάρτηση από τα βιοκαύσιμα μετά το 2030 συνοδεύεται από διάφορους κινδύνους όσον αφορά την

προμήθεια και τη χρήση βιοκαυσίμων. Εκτός από τους πιθανούς περιορισμούς εφοδιασμού λόγω ανταγωνισμού με άλλους τομείς, υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με την πιθανή σύνδεση μεταξύ της αύξησης της παραγωγής βιοκαυσίμων και της ILUC που προκαλεί, για παράδειγμα, απώλειες στη βιοποικιλότητα και πρόσθετες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Santos, 2020). Μερικές από αυτές τις ανησυχίες μπορεί να είναι ο μετριασμός μέσω της μετάβασης από την εισαγωγή βιοκαυσίμων στην εγχώρια παραγωγή, ως αποτέλεσμα της πολιτικής πίεσης και του ενδιαφέροντος στη δασική βιομηχανία. Τα δάση αποτελούνται από ένα μωσαϊκό συστάδων διαφορετικών ηλικιών. Οι απώλειες άνθρακα σε ορισμένες συστάδες αντισταθμίζουν τα κέρδη άνθρακα σε άλλες συστάδες, έτσι ώστε σε ολόκληρο το δάσος το απόθεμα άνθρακα να κυμαίνεται γύρω από μια γραμμή τάσης που για πολλές δεκαετίες βαίνει αυξανόμενη (Berndes et al., 2013). Η αυξανόμενη παραγωγή βιοκαυσίμων μπορεί να επηρεάσει θετικά ή αρνητικά τα αποθέματα άνθρακα της γης, ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο οι ιδιοκτήτες δασών και οι αγρότες σχεδιάζουν τη χρήση της γης τους ως απάντηση στις πολιτικές και τους κανονισμούς καθώς και στην τρέχουσα και αναμενόμενη ζήτηση για βιοκαύσιμα και άλλα προϊόντα. Η κατανόηση του πλήρους κλιματικού αντίκτυπου της χρήσης βιοκαυσίμων σε σχέση με διαφορετικές στρατηγικές ηλεκτροδότησης είναι ένας σημαντικός τομέας για μελλοντική έρευνα. Επιπλέον, η κατανομή των επιπτώσεων μεταξύ διαφορετικών προϊόντων θα μπορούσε να συγκαλύψει τις εκπομπές από τα συστήματα παραγωγής βιοκαυσίμων, εάν δεν προσαρμοστούν καθώς η παραγωγή εξελίσσεται στη συμπαραγωγή βιοκαυσίμων με άλλα προϊόντα και όχι απλώς στη χρήση απορριμμάτων (Källmén et al., 2019). Εάν τα βιοκαύσιμα παραμείνουν ως κατά κύριο λόγο εισαγόμενα, η χρήση τους θα μπορούσε επίσης να οδηγήσει σε διαρροή άνθρακα εάν εισάγονται από χώρες που δεν έχουν αρκετά φιλόδοξους στόχους μετριασμού της κλιματικής αλλαγής ή δεν ρυθμίζουν την παραγωγή βιοκαυσίμων σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού.

Από την άλλη πλευρά, ο ταχύτερος εξηλεκτρισμός του στόλου ενέχει επίσης κίνδυνο διαρροής άνθρακα λόγω της μεγάλης ζήτησης για μπαταρίες μετά από μια σταδιακή κατάργηση των ICE που καθοδηγείται από την πολιτική. Η κατασκευή μπαταριών είναι επί του παρόντος υψηλή έντασης CO₂. Εάν η κατασκευή βρίσκεται σε χώρες με λιγότερο φιλόδοξους στόχους και πολιτικές για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, υπάρχει κίνδυνος οι ενσωματωμένες εκπομπές στα οχήματα (συμπεριλαμβανομένων των μπαταριών) να μην μειωθούν με την πάροδο του χρόνου.

Αυτός ο κίνδυνος είναι ιδιαίτερα υψηλός για σενάρια με απαγόρευση των ICE όπου τα συστήματα background (δηλαδή η κατασκευή μπαταριών) δεν είναι ελεύθερα άνθραξα σύμφωνα με τους διεθνώς συμφωνημένους στόχους. Εν τω μεταξύ, το δυναμικό μετριασμού στην κατασκευή μπαταριών είναι σημαντικό και θα μπορούσε να μειώσει τη διαφορά στην ενσωματωμένη ένταση εκπομπών μεταξύ ICEV και BEV με την πάροδο του χρόνου, εάν πραγματοποιηθεί πλήρως. Επιπλέον, η εξόρυξη υλικών που χρησιμοποιούνται σε μπαταρίες μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά κοινωνικά και περιβαλλοντικά προβλήματα στο εξωτερικό, όπως αρνητικές επιπτώσεις στους υδάτινους πόρους, στα τοπικά οικοσυστήματα και στις τοπικές κοινωνίες. Αυτές οι δραστηριότητες εξόρυξης πρέπει να κλιμακωθούν σημαντικά εάν τα BEV αποκτήσουν κυριαρχία στις παγκόσμιες αγορές επιβατικών αυτοκινήτων. Ως εκ τούτου, πρέπει να ληφθούν υπόψη μέτρα διασφάλισης ώστε να ελαχιστοποιηθούν τέτοια προβλήματα.

Οι τρόποι αντιμετώπισης των κινδύνων διαρροής άνθρακα και παροχής κινήτρων για τη μείωση των εκπομπών στις διαδικασίες κατασκευής περνούν μέσα από περαιτέρω πολιτικές παρεμβάσεις, π.χ. ρύθμιση του πλήρους αποτυπώματος άνθρακα των νέων αυτοκινήτων. Υπάρχουν πολλές επιλογές για τη συμπερίληψη της σκέψης του κύκλου ζωής στην πολιτική για το κλίμα για τα επιβατικά αυτοκίνητα, από κανονισμούς με μεγαλύτερη έμφαση στην ποιότητα των δεδομένων έως συστήματα πίστωσης που παρέχουν κίνητρα για μέτρα μείωσης στις αλυσίδες εφοδιασμού (Lehmann et al., 2018). Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2019) εξετάζει τα πλήρη αποτυπώματα άνθρακα σε μελλοντικούς κανονισμούς για τα επιβατικά αυτοκίνητα, αλλά μέχρι στιγμής έχει ανακοινωθεί μόνο η ανάπτυξη μιας κοινής μεθοδολογίας για την αναφορά δεδομένων. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2020) πρότεινε επίσης έναν νέο κανονισμό για τις βιώσιμες μπαταρίες που θα μπορούσε να μετριάσει τις περιβαλλοντικές αλλά και κοινωνικές ανησυχίες στην κατασκευή μπαταριών, εάν εγκριθεί με όρια αποτυπωμάτων άνθρακα σύμφωνα με το προσδιορισμένο δυναμικό μετριασμού στις αλυσίδες εφοδιασμού μπαταριών. Σημειωτέο ότι τέτοια κατώτατα όρια, ανεξάρτητα από το επίπεδο φιλοδοξίας τους, δεν θα επιβληθούν μέχρι το 2027.

2. Μηχανές Εσωτερικής Καύσης

2.1. Κινητήρες Εσωτερικής Καύσης

Ο στόχος κάθε κινητήρα είναι να μετατρέψει την ενέργεια από κάποια άλλη μορφή σε «μηχανική δύναμη και κίνηση». Οι όροι «μηχανική δύναμη» και «κίνηση» χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν τον σημαντικό ρόλο που έχουν τόσο η παραγωγή εργασίας (δηλαδή πόση δύναμη μπορεί να εφαρμοστεί για να μετακινηθεί κάτι σε μια δεδομένη απόσταση), καθώς και η ισχύς εξόδου (πόσο γρήγορα μπορεί να ολοκληρωθεί η εργασία). Στρέφοντας την προσοχή στην μετατρεπόμενη ενέργεια για την αντίστοιχη επιθυμητή εργασία, ένα εξαιρετικά σημαντικό κομμάτι είναι η χημική ενέργεια που περιέχεται στη μοριακή δομή ενός καυσίμου υδρογονάνθρακα. Τα γεγονότα ότι χρειάζεται ενέργεια για να σπάσει ένας χημικός δεσμός και ότι η ενέργεια απελευθερώνεται όταν σχηματίζονται νέοι δεσμοί, είναι θεμελιώδη για κάθε χημική αντίδραση (Awogbemi et al., 2021). Εάν η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά το σχηματισμό νέων δεσμών είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για τη διάσπαση των παλαιών δεσμών, παράγονται μια εξώθερμη αντίδραση αλλά και καθαρή ενέργεια που διατίθεται για την εκτέλεση της εργασίας. Επιπρόσθετα, θεμελιώδης για κάθε κινητήρα εσωτερικής καύσης, είναι η αντίδραση ενός καυσίμου υδρογονάνθρακα με οξυγόνο ούτως ώστε να σχηματιστεί διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Αυτή η αντίδραση καύσης είναι εξαιρετικά εξώθερμη (απελευθερώνεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας). Σε αυτή τη περίπτωση, ο στόχος του κινητήρα θα είναι να χρησιμοποιεί αυτή την ενέργεια επανειλημμένα, αποτελεσματικά και οικονομικά (Zhen & Wang, 2015).

Σύμφωνα με τα παραπάνω και έχοντας πλέον μια εικόνα σχετικά με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης, μπορούν να γίνουν κατανοητές ορισμένες διακρίσεις μεταξύ διαφόρων τύπων κινητήρων. Αυτές οι διακρίσεις μπορεί να βασίζονται τόσο σε αποφάσεις θερμοδυναμικής διεργασίας όσο και στο μηχανικό υλικό. Η πρώτη διάκριση που πρέπει να γίνει είναι αυτή μεταξύ του θερμικού κινητήρα και του κινητήρα εσωτερικής καύσης. Αν και είναι δύο διαφορετικά πράγματα, έχουν συσχετιστεί εσφαλμένα ουκ ολίγες φορές. Εξ ορισμού, ένας θερμικός κινητήρας είναι μια μηχανή στην οποία ένα λειτουργικό ρευστό υφίσταται διάφορες αλλαγές κατάστασης κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας. Το ρευστό εργασίας υφίσταται μια προσθήκη θερμότητας κατά την οποία αυξάνονται η πίεση και η θερμοκρασία του. Στη συνέχεια, περνάει από μια διεργασία μετατρέποντας ένα μέρος της ενέργειάς του σε λειτουργία.

Τέλος, η ολοκλήρωση του κύκλου απαιτεί απόρριψη θερμότητας από το ρευστό στο περιβάλλον (Kalkan et al., 2014).

Ο κύκλος Otto (Otto cycle) και ο κύκλος ντίζελ είναι θεωρητικές αναπαραστάσεις διεργασιών παρόμοιες με αυτές ενός κινητήρα ανάφλεξης με σπινθηριστή (spark-ignition - SI) ή κινητήρα ντίζελ, αλλά υποθέτουν ότι το λειτουργικό ρευστό είναι ο αέρας, ο οποίος κερδίζει ενέργεια από μια εξωτερική πηγή. Στον πραγματικό κινητήρα ντίζελ ή SI, η απελευθέρωση ενέργειας λαμβάνει χώρα εντός του συστήματος και το λειτουργικό ρευστό υφίσταται όχι μόνο μια αλλαγή κατάστασης αλλά και μια αλλαγή στη χημική του σύνθεση (Yip et al., 2019). Αν και η μηχανική συσκευή μπορεί να υποβληθεί σε έναν ιδανικό θερμοδυναμικό κύκλο, το υγρό καύσιμο δεν έχει αυτή τη δυνατότητα. Το καύσιμο και ο αέρας εισέρχονται στο σύστημα, περνούν από μια σειρά θερμοδυναμικών διεργασιών και στη συνέχεια εξαντλούνται από το σύστημα. Ένα άλλο παράδειγμα πρακτικού κινητήρα εσωτερικής καύσης είναι ο αεριοστρόβιλος (δεν πρέπει να συγχέεται με τον τυπικό κύκλο Brayton).

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, κάθε πρακτικός κινητήρας αναμένεται να παράγει έργο επανειλημμένα (ή συνεχώς για κάποιο χρονικό διάστημα), αποτελεσματικά και οικονομικά. Αυτοί οι όροι έχουν επιλεγεί προσεκτικά για να μεταφέρουν ξεχωριστές προσδοκίες και πρέπει να ικανοποιούνται όλοι για να θεωρείται πρακτικός ένας κινητήρας (Carbot-Rojas et al., 2017). Αρχικά, δίνεται έμφαση στην αποδοτικότητα και τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας. Η αποδοτικότητα είναι ένας ευρέως χρησιμοποιούμενος μηχανικός όρος, σύμφωνα με τον οποίο μπορεί να εκτιμήσει κανείς με ακρίβεια τη διαθέσιμη ενέργεια που μπορεί να μετατραπεί σε χρήσιμη εργασία. Από την άλλη πλευρά, η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας είναι ένα πιο δύσκολο μέτρο ως προς την εκτίμηση της ακρίβειας και είναι λιγότερο κατανοητό από τους μηχανικούς. Ωστόσο, είναι εξίσου σημαντικό (και σε πολλές περιπτώσεις πολύ πιο σημαντικό) για έναν επιτυχημένο σχεδιασμό. Παρακάτω παρατίθενται τα διάφορα στοιχεία που καθορίζουν τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας ενός κινητήρα (Zhen & Wang, 2015).

- Κόστος ανάπτυξης, παραγωγής και διανομής
- Έξοδα συντήρησης
- Κόστος καυσίμου
- Ανοικοδόμηση του κόστους κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής

- Κόστος διάθεσης εξαρτημάτων και υγρών
- Μείον την αξία μεταπώλησης στο τέλος της περιόδου χρήσης

Τα στοιχεία που αναφέρονται μαζί στην πρώτη γραμμή, αντανακλώνται τελικά στην τιμή αγοράς του κινητήρα. Ως εκ τούτου, παρέχουν το πιο άμεσο μέτρο για το εάν ένας δεδομένος κινητήρας θα είναι βιώσιμος. Τα υπόλοιπα στοιχεία παρακολουθούνται σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό σε συγκεκριμένες αγορές. Για παράδειγμα, ενώ πολλοί αγοραστές αυτοκινήτων θα λάβουν υπόψη μόνο την τιμή αγοράς (από αυτήν τη λίστα) για να λάβουν την απόφαση αγοράς τους, η εταιρεία που αγοράζει αρκετές εκατοντάδες φορτηγά ή λεωφορεία (από τα οποία εξαρτάται η οικονομική της βιωσιμότητα) σχεδόν σίγουρα, θα παρακολουθεί στενά κάθε στοιχείο της παραπάνω λίστας. Ο συνδυασμός αυτών των μέτρων εξηγεί διεξοδικά, τον λόγο για τον οποίο ο κινητήρας εσωτερικής καύσης παραμένει τόσο δύσκολος στην αντικατάσταση.

Τέλος, οι τύποι κινητήρων που αναφέρθηκαν και προηγουμένως, διακρίνονται από το συνδυασμό της διαδικασίας καύσης και της μηχανικής τους διαμόρφωσης. Η διαδικασία καύσης μπορεί να είναι συνεχής, όπως με τον κινητήρα αεριοστροβίλου, ή διακοπτόμενη, όπως με τους κινητήρες ντίζελ και SI. Στη συνέχεια, πρέπει να επιλεγεί μια μηχανική διαμόρφωση που να πληροί τα κριτήρια της αποδοτικότητας και της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας, καθώς και να επιτρέπει τη συνεχή παραγωγή του έργου. Ο τελικός στόχος είναι να δημιουργηθεί μια μηχανική διάταξη που να περιέχει τη διαδικασία καύσης και να χρησιμοποιεί την υψηλή πίεση και θερμοκρασία των προϊόντων καύσης προκειμένου να παράγει χρήσιμο έργο.

2.2. Ιστορική Επισκόπηση Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης

Η ιστορία του επιτυχημένου κινητήρα εσωτερικής καύσης ξεκίνησε τη δεκαετία του 1910 μετά την επικράτηση της τεχνολογίας στον ανταγωνισμό έναντι των πρώιμων μορφών κινητήρων ηλεκτρικών, υβριδικών και ατμομηχανών (Foray, 1997). Τις επόμενες δεκαετίες, η MEK επικράτησε ως ο κυρίαρχος σχεδιασμός για κινητήρες αυτοκινήτων χωρίς ουσιαστική ρυθμιστική ή ανταγωνιστική πίεση. Ωστόσο, από το 1960 και μετά, αρκετές κυβερνήσεις στις ΗΠΑ, την Ιαπωνία και την Ευρώπη άρχισαν να εφαρμόζουν τους πρώτους κανονισμούς σχετικά με την εκπομπή μονοξειδίου του άνθρακα, υδρογονανθράκων και οξειδίων του αζώτου. Σημαντικά κίνητρα για αυτούς τους αρχικούς κανονισμούς έλαβαν χώρα στο ευρύτερο πλαίσιο της MEK. Αντίστοιχα, οι ανησυχίες του κοινού σχετικά με τις αρνητικές επιπτώσεις των εκπομπών στην

ανθρώπινη υγεία και την έναρξη προβλημάτων ατμοσφαιρικής ρύπανσης στις μητροπολιτικές πόλεις ολοένα και αυξάνονταν, ασκώντας πίεση στους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής. Επιπλέον, οι τιμές του πετρελαίου αυξήθηκαν απότομα κατά τη δεκαετία του 1970, γεγονός που με τη σειρά του αύξησε την τιμή του καυσίμου ως κρίσιμου εμπορεύματος για το ICE-TIS.

Ακόμη πιο αυστηροί κανονισμοί άρχισαν να εφαρμόζονται στη δεκαετία του 1990 λόγω των αυξανόμενων ανησυχιών για την κλιματική αλλαγή, π.χ. η εντολή για οχήματα μηδενικών εκπομπών στην Καλιφόρνια, τα ευρωπαϊκά πρότυπα εκπομπών στην Ευρωπαϊκή Ένωση και το Πρόγραμμα Καθαρού Αέρα της Ιαπωνίας. Επιπλέον, πολλές κυβερνήσεις άρχισαν να εφαρμόζουν πολιτικές υποστήριξης για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και αυξήθηκε επίσης η ευαισθητοποίηση του κοινού σχετικά με τις συνέπειες των εκπομπών άνθρακα. Επιπροσθέτως, οι τιμές του πετρελαίου συνέχισαν να αυξάνονται και όλο και περισσότερες χώρες άρχισαν να δημιουργούν τοπικές ζώνες χαμηλών εκπομπών. Από τη μία πλευρά, αυτές οι πτυχές ενέτειναν την πίεση στην τεχνολογική ανάπτυξη των ICE όσον αφορά την πρόληψη των εκπομπών και την οικονομία καυσίμου. Από την άλλη πλευρά, αυτό οδήγησε σε αύξηση της ανταγωνιστικής πίεσης δίνοντας κίνητρα στην αναζήτηση εναλλακτικών κινητήρων, που μέχρι τώρα δεν θεωρούνταν σοβαρές εναλλακτικές λύσεις σε αυτοκίνητα με κινητήρες εσωτερικής καύσης.

Τη σημερινή εποχή, υπάρχουν συνεχώς αυξανόμενοι κανονισμοί εκπομπών για αυτοκίνητα με κινητήρες εσωτερικής καύσης, με αποκορύφωμα ολόκληρες απαγορεύσεις και στόχους σταδιακής κατάργησης σε πολλές χώρες (Wappelhorst, 2020). Επιπλέον, η ανταγωνιστική πίεση των εναλλακτικών κινητήρων συνεχίζει να αυξάνεται λόγω των συνεχών τεχνολογικών βελτιώσεων στην τεχνολογία μπαταριών και κυψελών καυσίμου. Υπάρχουν τρεις πιθανές τεχνολογικές δυνατότητες για το ICE-TIS προκειμένου να μπορέσει να αντιμετωπίσει αυτές τις πιέσεις. Οι δύο πρώτες ακολουθούν την τρέχουσα κυρίαρχη σχεδίαση των ICE και βασίζονται σε περαιτέρω (προοδευτικές) βελτιώσεις των κινητήρων βενζίνης ή ντίζελ. Τα υβριδικά κινητήρια σύνολα αποτελούν την τρίτη πιθανή δυνατότητα για το ICE-TIS, για την αντιμετώπιση των αυξανόμενων κανονισμών. Χρησιμοποιώντας έναν πρόσθετο ηλεκτρικό κινητήρα, τα υβριδικά αυτοκίνητα προσπαθούν να λειτουργήσουν τον κινητήρα εσωτερικής καύσης με μέγιστη απόδοση, μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων, π.χ. χρησιμοποιώντας τον ηλεκτρικό κινητήρα για επιτάχυνση ή θερμαίνοντας

τα συστήματα μετεπεξεργασίας καυσαερίων στη βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους. Έτσι, ανάλογα με τη συγκεκριμένη διαμόρφωση του υβριδικού οχήματος (κύκλωμα σε σειρά, παράλληλο ή διάσπασης ισχύος/σειρά-παράλληλο υβριδικό), τον τύπο ΜΕΚ που χρησιμοποιείται (βενζινοκινητήρας ή ντίζελ) και τον βαθμό υβριδισμού (ελάχιστο, μέτριο ή πλήρες υβριδικό), η κατανάλωση καυσίμου μπορεί να μειωθεί έως και 30%.

Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις τρεις πιθανές δυνατότητες των ICE και όσον αφορά τις κύριες αγορές αυτοκινήτων, υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην τάση προς μια συγκεκριμένη τεχνολογία συστήματος μετάδοσης κίνησης. Για παράδειγμα, από το 1995, η χρήση αυτοκινήτων πετρελαιοκινητήρων αυξάνεται σταθερά στην ΕΕ ενώ το 2016, κατέλαβε ένα μέσο μερίδιο αγοράς της τάξης του 42% (Cames & Helmers, 2013). Αντίθετα και σύμφωνα με την ίδια έρευνα, τα πετρελαιοκίνητα αυτοκίνητα δεν είχαν τα αντίστοιχα ποσοστά πωλήσεων στις ΗΠΑ, φτάνοντας μόλις στο 1–3%. Η αυξανόμενη αποστροφή για τα αυτοκίνητα ντίζελ είναι ιδιαίτερα έντονη στην Ιαπωνία. Σε αυτή την περίπτωση, το μέγεθος του στόλου των αυτοκινήτων ντίζελ ήταν παρόμοιο με αυτό της ΕΕ, με μερίδιο αγοράς περίπου 10% τη δεκαετία του 1990, αλλά μειώθηκε σταθερά σε περίπου 1-2% τα τελευταία χρόνια. Συγκεκριμένα, οι κινητήρες ντίζελ παραμένουν το πιο διαδεδομένο σύστημα μετάδοσης κίνησης για βαρέα επαγγελματικά οχήματα στις περισσότερες χώρες, με ορισμένες εξαιρέσεις στις τοπικές μεταφορές επιβατών και παράδοσης. Παρόμοιες διαφορές μπορούν να παρατηρηθούν στην περίπτωση των υβριδικών αυτοκινήτων, τα οποία σημείωσαν σχετικά σημαντικές πωλήσεις στις ΗΠΑ και την Ιαπωνία σε σύγκριση με τις χαμηλές πωλήσεις στην αγορά της ΕΕ (ACEA, 2018).

Εν ολίγοις, το ICE-TIS αντιμετωπίζει πολλές μετασχηματιστικές πιέσεις λόγω αλλαγών τόσο στο εστιακό TIS όσο και στο πλαίσιο του, που επηρεάζουν όλες τις μεγάλες αγορές αυτοκινήτων. Αναμφισβήτητα, όπως προτείνει ο (Markard, 2020), οι σχετικές μετασχηματιστικές αλλαγές στην εστιακή δομή του TIS φαίνεται να επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από σημαντικές αλλαγές στις δομές του περιβάλλοντος. Ειδικότερα, οι ανησυχίες για τις αρνητικές επιπτώσεις των ρυπογόνων εκπομπών των οχημάτων στην ανθρώπινη υγεία και το κλίμα, η ατμοσφαιρική ρύπανση στις μητροπολιτικές πόλεις, οι αυξήσεις στις τιμές του πετρελαίου και των καυσίμων και η άνοδος εναλλακτικών κινητήρων έχουν οδηγήσει σε μεταμορφωτικές αλλαγές στη δομή του ICE-TIS. Κατά συνέπεια, οι κατεστημένοι φορείς του αντιμετωπίζουν αυξανόμενες μετασχηματιστικές

πιέσεις με τη μορφή κανονισμών εκπομπών, τοπικών απαγορεύσεων ICE και τεχνολογικού ανταγωνισμού με εναλλακτικά συστήματα μετάδοσης κίνησης. Σε αυτό το πλαίσιο, είναι ακόμα εντελώς ασαφές ποια τεχνολογία κινητήρων είναι η καλύτερη λύση για το ICE-TIS προκειμένου να αντιμετωπίσει αυτές τις μετασχηματιστικές πιέσεις.

Επιπρόσθετα, όπως καταδεικνύεται από τις διαφορές στην τάση προς συγκεκριμένες τεχνολογίες συστημάτων μετάδοσης κίνησης, φαίνεται να υπάρχουν σημαντικές και συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος που επηρεάζουν τη διαδικασία προσαρμογής στις μετασχηματιστικές πιέσεις. Αντίστοιχα και σύμφωνα με τους (Bergek et al., 2015), το ώριμο ICE-TIS φαίνεται να έχει αναπτύξει δομικές συζεύξεις με εδαφικά στοιχεία, τα οποία επηρεάζουν τη χωρική ανάπτυξη της τεχνολογίας. Επομένως, όπως προκύπτει και από τις προηγούμενες αναφερθείσες μελέτες για τη χωρική ανάπτυξη του TIS, γίνεται μια εστίαση ως προς την ανάλυση του στις τρεις πιο σημαντικές αγορές αυτοκινήτων, δηλαδή στις ΗΠΑ, την ΕΕ και την Ιαπωνία. Παρόλα αυτά και σύμφωνα με μελέτη τους, οι (Binz & Truffer, 2017) απέχουν από μια διεθνή ανάλυση του ICE-TIS, καθώς αναμένουν ότι οι αντίστοιχες κυρίαρχες τεχνολογικές τροχιές εξαρτώνται πολύ περισσότερο από τις ειδικές συνθήκες στις εδαφικές αγορές αυτοκινήτων. Αυτό είναι κάτι που έχει απήχηση με την έννοια του καθοδηγούμενου από την παραγωγή TIS, το οποίο χαρακτηρίζεται από ισχυρές εδαφικές συζεύξεις. Με αυτόν τον τρόπο, επικεντρώνονται κυρίως σε παράγοντες που σχετίζονται με την πολιτική, καθώς η σημασία τους έχει τονιστεί αρκετά συχνά σε προηγούμενες μελέτες π.χ. (Berggren & Magnusson, 2012) και (Hascic et al., 2008). Επομένως, δεν παρουσιάζουν μια πλήρη σύγκριση όλων των πιθανών σχετικών δομών εδαφικού πλαισίου και αναφέρονται κυρίως σε μελέτες σχετικά με τις εθνικές τεχνολογικές τροχιές στην αυτοκινητοβιομηχανία και τις εδαφικές ιδιαιτερότητες των μεγαλύτερων αγορών αυτοκινήτων.

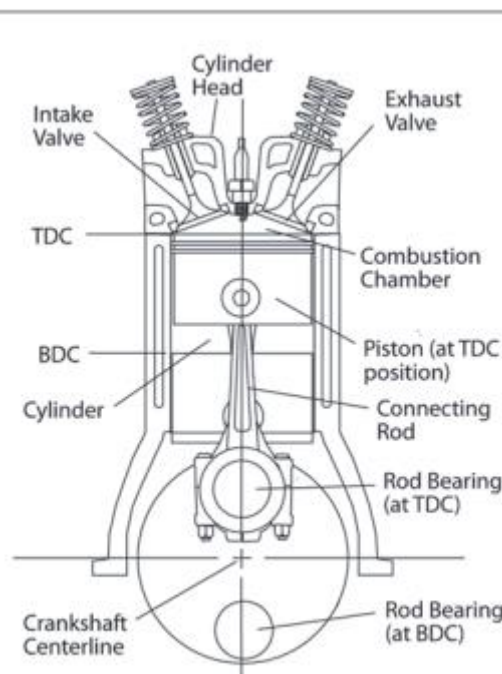
Κλείνοντας, οι εξελίξεις στο πλαίσιο του ICE-TIS συνεπάγονται σημαντικές τάσεις που επηρεάζουν ομοίως τις αγορές αυτοκινήτων στις ΗΠΑ, την ΕΕ και την Ιαπωνία (π.χ. παράγοντες επιρροής εκτός του εστιακού TIS, όπως ανταγωνιστικές ή συμπληρωματικές TIS, οικολογικές αλλαγές, και ευρύτερες αλλαγές στις κοινωνικές προτιμήσεις και ανάγκες). Ωστόσο, επειδή οι συνθήκες του εδαφικού πλαισίου, π.χ. οι εθνικοί κανονισμοί, οι πόροι, οι υποδομές και ο τεχνολογικός ανταγωνισμός, επηρεάζουν κάθε μία από αυτές τις αγορές αυτοκινήτων ξεχωριστά, αναμένονται

ποικίλες αλλαγές στις εδαφικές δομές του TIS ως απάντηση στις μετασχηματιστικές πιέσεις. Με τη σειρά τους, οι τελευταίες διαμορφώνουν την κυρίαρχη τεχνολογική τροχιά που επικρατεί στην αντίστοιχη επικράτεια.

Υπάρχουν προβλέψεις για αύξηση χρήσης MEK (και σε βαρέα οχήματα π.χ. στη γεωργία), κατ'επέκταση για αύξηση ρύπων και κατα πόσο τα υβριδικά θα συμβάλλουν σε μεσοπρόθεσμη μείωσή τους;

2.3. Παλινδρομικός (Εμβολοφόρος) Κινητήρας

Αν και πολλές διαμορφώσεις έχουν προταθεί, κατοχυρωθεί και συνεχίζουν να επιδεικνύονται, λίγες έχουν γνωρίσει εμπορική επιτυχία. Αυτή η επιτυχία προκύπτει από την ικανότητα αντιμετώπισης του συνδυασμού αποδοτικότητας και κόστους-αποτελεσματικότητας που συζητήθηκε προηγουμένως. Σε αυτή την υπό-ενότητα γίνεται μια λεπτομερής ανάλυση ως προς τον κινητήρα με παλινδρομικό έμβολο. Αυτός ο κινητήρας χαρακτηρίζεται από έναν μηχανισμό στροφάλου ολίσθησης που μετατρέπει την παλινδρομική, κυκλική κίνηση ενός εμβόλου σε έναν κύλινδρο, σε περιστροφική κίνηση ενός στροφαλοφόρου άξονα. Τα κύρια εξαρτήματα του παλινδρομικού κινητήρα φαίνονται στην Εικόνα 1 παρακάτω.



Εικόνα 1. Κύρια εξαρτήματα λειτουργίας του κινητήρα εσωτερικής καύσης με παλινδρομικό έμβολο.

Πηγή: (Hoag & Dondlinger, 2016).

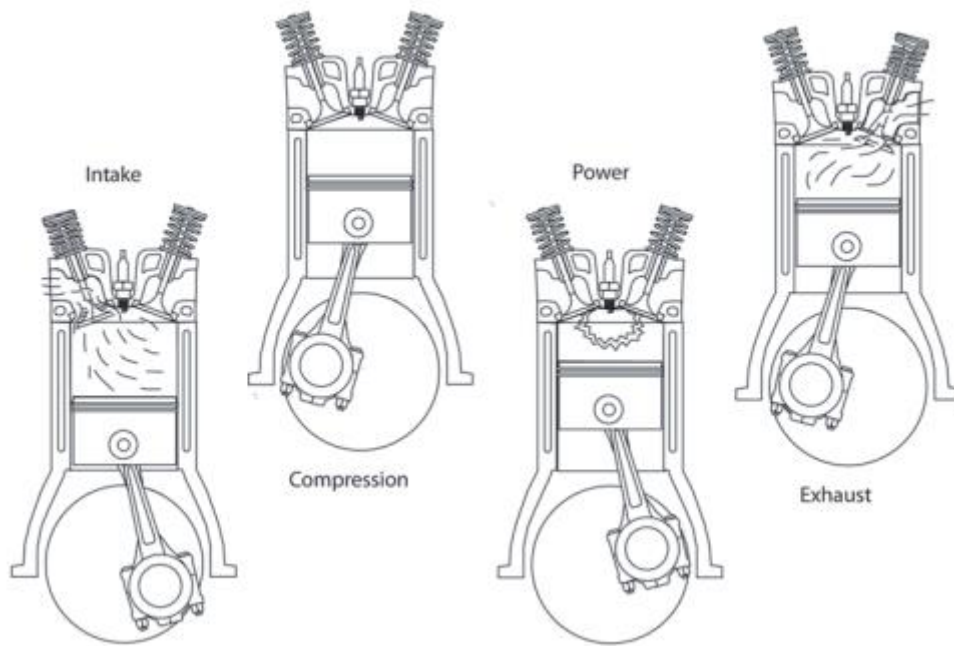
Το κινούμενο έμβολο ελέγχει τον όγκο του θαλάμου καύσης μεταξύ ενός ελάχιστου στο άνω νεκρό σημείο (top dead center - TDC) και ενός μέγιστου στο κάτω νεκρό σημείο (bottom dead center - BDC). Η αναλογία μεταξύ του όγκου στο BDC και του όγκου στο TDC αναφέρεται ως λόγος συμπίεσης, ενώ η μεταβολή του όγκου ως μετατόπιση του κυλίνδρου. Κατά συνέπεια, η μετατόπιση του κυλίνδρου, (πολλαπλασιασμένη με τον αριθμό των κυλίνδρων) αποτελεί τη μετατόπιση του κινητήρα. Έπειτα, ο κύλινδρος σφραγίζεται απέναντι από το κινούμενο έμβολο της κυλινδροκεφαλής ενώ όπως φαίνεται και στην ίδια εικόνα αλλά και στους περισσότερους κινητήρες, οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής είναι τοποθετημένοι στην κυλινδροκεφαλή (Kalkan et al., 2014).

Το έμβολο συνδέεται με τον στροφαλοφόρο άξονα μέσω μιας ράβδου σύνδεσης. Καθώς ο στροφαλοφόρος άξονας περιστρέφεται γύρω από την κεντρική του γραμμή (την κύρια οπή του εδράνου στο μπλοκ κυλίνδρων), η μετατόπιση του εμβόλου της ράβδου από το κύριο έδρανο, είναι αυτή που καθορίζει τη διαδρομή του εμβόλου. Στη συνέχεια και καθώς ο στροφαλοφόρος άξονας περιστρέφεται κατά μισή περιστροφή από τη θέση που φαίνεται στην εικόνα, το έμβολο μετακινείται από τη θέση του TDC στη θέση του BDC. Η απόσταση που διανύει το έμβολο αναφέρεται ως διαδρομή του κινητήρα και είναι ίση με τη διπλάσια μετατόπιση μεταξύ του κύριου εδράνου και του κεντρικού εδράνου της ράβδου του στροφαλοφόρου άξονα. Η διάμετρος του κυλίνδρου αναφέρεται ως οπή του και ο συνδυασμός οπής και διαδρομής καθορίζει τη μετατόπιση του κυλίνδρου (Zhen & Wang, 2015).

Ο στροφαλοφόρος άξονας προεξέχει από το πίσω μέρος του κινητήρα, όπου είναι συνδεδεμένος ένας σφόνδυλος και ένα πακέτο συμπλέκτη ή εύκαμπτη πλάκα, καθώς και ένας μετατροπέας ροπής μέσω του οποίου θα μεταδοθεί το φορτίο. Συνήθως, στο μπροστινό μέρος του κινητήρα, ο στροφαλοφόρος άξονας οδηγεί τον εκκεντροφόρο μέσω ενός συστήματος γραναζιών, μιας αλυσίδας ή ενός οδοντωτού ιμάντα. Στη συνέχεια, οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής ενεργοποιούνται από τον(τους) εκκεντροφόρο(ους), είτε απευθείας είτε μέσω μιας σειράς βαλβίδων. Απαιτούνται επίσης διάφορα συστήματα υποστήριξης τόσο για την ψύξη και τη λίπανση του κινητήρα όσο και για την τροφοδοσία του καυσίμου και την ανάφλεξη του μείγματος (Awogbemi et al., 2021).

2.4. Κύκλοι Λειτουργίας Κινητήρα

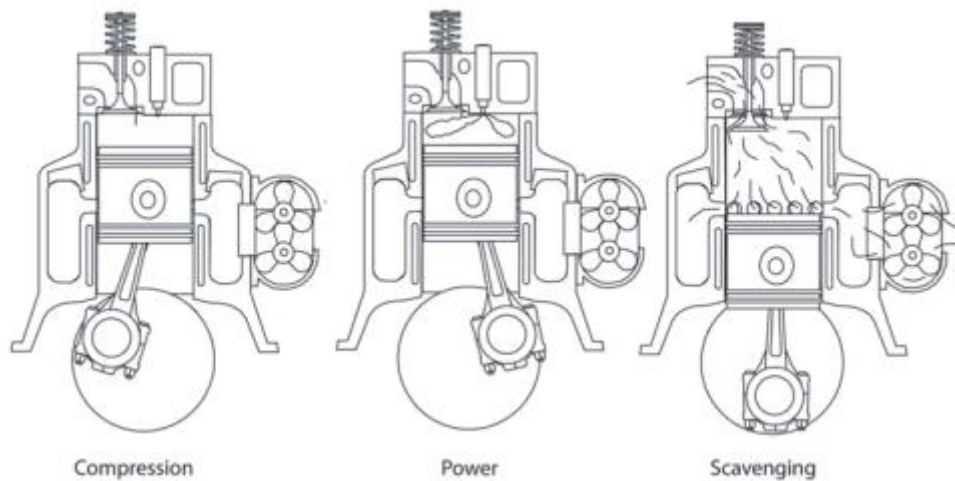
Σε αυτή την υπό-ενότητα εξετάζονται οι συγκεκριμένες διαδικασίες που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της λειτουργίας των κινητήρων. Ειδικότερα, στην Εικόνα 2 απεικονίζεται ο τετράχρονος κύκλος λειτουργίας ο οποίος (όπως υποδηλώνει το όνομα του), απαιτεί τέσσερις διαδρομές του εμβόλου (δηλαδή δύο πλήρεις στροφές του στροφαλοφόρου άξονα) για την ολοκλήρωση ενός κύκλου. Στον εικονιζόμενο κινητήρα ανάφλεξης με σπινθηριστή, έλκεται μια «φόρτιση» προαναμεμιγμένου αέρα και καυσίμου στον κύλινδρο, μέσω της βαλβίδας εισαγωγής κατά τη διάρκεια της διαδρομής εισαγωγής (Kamil et al., 2014). Στη συνέχεια, κλείνει η βαλβίδα και το μείγμα συμπιέζεται κατά τη διάρκεια της διαδρομής συμπίεσης. Καθώς το έμβολο πλησιάζει το TDC, ένας ηλεκτρικός σπινθήρας υψηλής ενέργειας παρέχει την ενέργεια που απαιτείται για την έναρξη της διαδικασίας καύσης, αναγκάζοντας το έμβολο να μειώσει τη διαδρομή ισχύος του. Από την άλλη πλευρά και καθώς το έμβολο πλησιάζει το BDC, η βαλβίδα εξαγωγής ανοίγει και τα εξαντλημένα προϊόντα καύσης αναγκάζονται να βγουν από τον κύλινδρο κατά τη διάρκεια της διαδρομής εξάτμισης. Σε αυτή την περίπτωση, η απόδοση εργασίας ελέγχεται από μία ρυθμιστική δικλείδα, η οποία περιορίζει την ποσότητα του μείγματος αέρα-καυσίμου που μπορεί να περάσει από τη βαλβίδα εισαγωγής. Ένας τετράχρονος κύκλος λειτουργίας ενός κινητήρα ντίζελ, αποτελείται από τις ίδιες διαδικασίες ωστόσο στη προκειμένη περίπτωση, μόνο ο αέρας έλκεται και συμπιέζεται στον κινητήρα. Ο σπινθηριστής αντικαθίσταται από έναν ψεκαστήρα καυσίμου ο οποίος πλησιάζοντας στο τέλος της διαδικασίας συμπίεσης, ψεκάζει το καύσιμο απευθείας στον κύλινδρο. Η ενέργεια διέγερσης παρέχεται από την υψηλή θερμοκρασία και πίεση του αέρα στον οποίο εγχέεται το καύσιμο, ενώ η απόδοση της εργασίας ελέγχεται από την ποσότητα του ψεκαζόμενου καυσίμου (Kalkan et al., 2014).



Εικόνα 2. Απεικόνιση του τετράχρονου κύκλου λειτουργίας ενός κινητήρα ανάφλεξης με σπινθηριστή.
 Πηγή: (Hoag & Dondlinger, 2016).

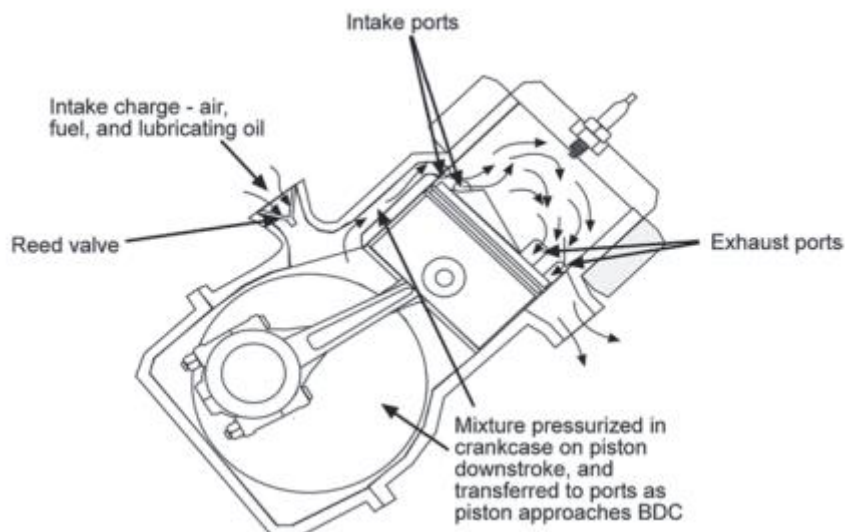
Μια εναλλακτική του τετράχρονου κύκλου είναι ο δίχρονος κύκλος (βλ. Εικόνα 3). Όπως υπονοείται, ένας πλήρης κύκλος λειτουργίας επιτυγχάνεται με κάθε δύο διαδρομές του εμβόλου (μία περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα). Αν και οι διαδρομές συμπίεσης και ισχύος είναι παρόμοιες με αυτές του τετράχρονου κινητήρα, στον δίχρονο κύκλο η ανταλλαγή αερίων λαμβάνει χώρα καθώς το έμβολο πλησιάζει το BDC. Η εν λόγω διαδικασία ονομάζεται διαδικασία καθαρισμού. Κατά τη διάρκεια του καθαρισμού, οι δίοδοι εισαγωγής και εξαγωγής είναι ανοιχτοί ταυτοχρόνως και ο κινητήρας βασίζεται σε πίεση τροφοδοσίας εισαγωγής. Αυτή η πίεση διατηρείται σε υψηλότερα επίπεδα σε σχέση με την πίεση εξάτμισης, ούτως ώστε να εξαναγκάσει την απομάκρυνση των εξαντλημένων προϊόντων και να γεμίσει τον κύλινδρο με καθαρό αέρα ή μείγμα αέρα-καυσίμου. Ο κινητήρας που φαίνεται στην Εικόνα 3 είναι ένας δίχρονος ντίζελ βαρέως τύπου. Σε αυτόν, ο εισερχόμενος αέρας συμπιέζεται με συμπίεση μέσω ενός στροφαλοφόρου άξονα και εισέρχεται δια μέσου θυρών κοντά στο κάτω μέρος του κυλίνδρου. Οι βαλβίδες εξαγωγής (οι οποίες είναι παρόμοιες με αυτές του τετράχρονου κινητήρα) είναι τοποθετημένες στην κυλινδροκεφαλή. Από την άλλη πλευρά, οι δίχρονοι κινητήρες ελαφρού τύπου είναι συχνά υπερτροφοδοτούμενοι με στροφαλοθάλαμο. Στους εν λόγω κινητήρες, κάθε φορά που το έμβολο κινείται προς

το πάνω μέρος του κυλίνδρου, ένα νέο φορτίο (αναμεμειγμένο με λιπαντικό) σύρεται στον στροφαλοθάλαμο. Καθώς το έμβολο κινείται προς τα κάτω, ο στροφαλοθάλαμος σφραγίζεται και το μείγμα συμπιέζεται. Έπειτα, το μείγμα μεταφέρεται από τον στροφαλοθάλαμο μέσω των θυρών εισαγωγής, καθώς το έμβολο πλησιάζει το BDC. Αυτή η διαμόρφωση απεικονίζεται στην Εικόνα 4. Τέλος, στη διάταξη ανάφλεξης με σπινθηριστή, ο κινητήρας υφίσταται το μειονέκτημα ότι κατά τη διάρκεια κάθε περιόδου καθαρισμού, αποβάλλονται (και) μίγματα φρέσκου αέρα-καυσίμου μέσω της εξάτμισης. Έτσι και προκειμένου να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα, δίνεται μεγάλη έμφαση στην απευθείας έγχυση του καυσίμου στον κύλινδρο μετά τη σφράγιση των θυρών (Awad et al., 2020).



Εικόνα 3. Απεικόνιση δίχρονου κύκλου λειτουργίας ενός κινητήρα ντίζελ βαρέως τύπου.

Πηγή: (Hoag & Dondlinger, 2016).



Εικόνα 4. Δίχρονος κινητήρας ελαφρού τύπου. Πηγή: (Hoag & Dondlinger, 2016).

2.5. Αναγκαιότητα Βελτίωσης Κινητήρων Εσωτερικής Καύσης για την Αντιμετώπιση της Κλιματικής Αλλαγής

Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης (Internal combustion engines - ICE) είναι τα κύρια συστήματα πρόωσης στις οδικές μεταφορές. Στα μέσα του 2017, ο (Serrano, 2017) αναφέρθηκε σε μελέτη του, στην αδυναμία αντικατάστασής τους ως μονάδα παραγωγής ενέργειας στα περισσότερα οχήματα. Σήμερα, αυτή η διατύπωση ισχύει ακόμη και όταν εξετάζεται το καλύτερο σενάριο ανάπτυξης για τα πλήρως ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα. Σύμφωνα με τις μελέτες των (Ding et al., 2018) και (Nguyen & Duy, 2018), τα επιχειρήματα που υποστηρίζουν αυτή τη θέση λαμβάνουν υπόψη την αυξανόμενη ζήτηση για μεταφορές, την ισχυρή ανάπτυξη καθαρότερων και αποτελεσματικότερων ICE, τη διαθεσιμότητα ορυκτών καυσίμων και την υψηλή ενεργειακή πυκνότητα των εν λόγω συμβατικών καυσίμων. Συνολικά, φαίνεται να υπάρχουν ισχυρά επιχειρήματα για την υποστήριξη της μεσομακροπρόθεσμης βιωσιμότητας των ICE ως του κυρίαρχου σταθμού παραγωγής ενέργειας για εφαρμογές οδικών μεταφορών. Ωστόσο, η κατάσταση έχει αλλάξει δραματικά τα τελευταία χρόνια. Σύμφωνα με την εφημερίδα (El Mundo, 2018), τα μέσα ενημέρωσης και άλλοι παράγοντες της αγοράς ισχυρίζονται την πτώση των ICE μεσοπρόθεσμα. Επιπρόσθετα, πολιτικοί από πολλές χώρες της G7, όπως η Γαλλία, η Ισπανία και το Ηνωμένο Βασίλειο, έχουν ανακοινώσει την απαγόρευση των ICE στις αγορές τους (Times, 2019). Μεγάλες πόλεις, όπως το

Λονδίνο, το Παρίσι, η Μαδρίτη και το Βερολίνο εξετάζουν επίσης την εισαγωγή αυστηρών ορίων στα οχήματα που κινούνται με ICE.

2.6. Κινητήρες Εσωτερικής Καύσης και Εκπομπές Αερίων

Πρέπει να δοθεί μεγαλύτερη έμφαση στους ρύπους και πως παράγονται αυτοί οι ρύποι στους παραπάνω τύπους ΜΕΚ εφόσον συμβάλλουν σημαντικά, σε παγκόσμιο επίπεδο, με τη χρήση τους. Επιπλέον, ένας από τους σκοπούς της διπλωματικής αφορά στη μείωση ρύπων.

Τα επιχειρήματα των μέσων ενημέρωσης κατά των ICE κυμαίνονται από την ανάγκη μείωσης των εκπομπών CO₂ (υπερθέρμανση του πλανήτη) έως την ανάγκη βελτίωσης της ποιότητας του αέρα στις πόλεις (NO_x και εκπομπές σωματιδίων). Μεγάλο μέρος αυτής της συζήτησης για το μέλλον των ICE, προέκυψε λόγω του σκανδάλου Dieselgate (Brand, 2016). Έτσι, εξαιτίας μίας λάθος απόφασης από διοικητική και μηχανολογική άποψη σε συγκεκριμένο χρόνο και τόπο, δημιουργήθηκε ένα λεγόμενο παγκόσμιο φαινόμενο πεταλούδας στην αυτοκινητοβιομηχανία, δηλαδή μια μικρή λεπτομέρεια εξελίχθηκε σε κάτι πολύ σημαντικό. Ωστόσο, σε μια προσπάθεια να μετριαστεί αυτό το πρόβλημα, το Dieselgate έχει οδηγήσει σε νέους κανονισμούς που αποσκοπούν στην απόκτηση πολύ πιο αποτελεσματικών και καθαρότερων ICE (Ming et al., 2017). Όπως συμβαίνει συνήθως, οι παλιοί και χαλαροί κανονισμοί για τους ρύπους έχουν οδηγήσει πλέον σε ένα εκκρεμές αποτέλεσμα αντίθετων θέσεων, χαροποιώντας τα μέσα ενημέρωσης και δημιουργώντας υπερβολικές πολιτικές αντιδράσεις χωρίς κάποια σαφή επιστημονική βάση. Όλα αυτά αντικατοπτρίζονται στην ανάγκη για δημοσίευση μιας αρκετά δημοφιλής ή καλής καινοτομίας. Αν και οι νέοι κανονισμοί (οι οποίοι αναγκάζουν την τεχνολογία των ICE να είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον) είναι ευπρόσδεκτοι, οι απαγορεύσεις που υποκινούνται από κακή διάγνωση της κατάστασης δεν έχουν βοηθήσει καθόλου, ούτε στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα αλλά ούτε και στον μετριασμό της υπερθέρμανσης του πλανήτη.

2.7. Εκπομπές CO₂: Νέα Γενιά ΜΕΚ και ηλεκτροκίνηση

Σύμφωνα με την έρευνα των (Payri et al., 2019), οι περιορισμοί στα αέρια του θερμοκηπίου (CO₂), στους αέριους ρύπους και στις εκπομπές θορύβου θα είναι ολοένα και πιο σοβαροί, αναγκάζοντας την αυτοκινητοβιομηχανία να επενδύσει σε πιο καινοτόμες τεχνολογίες για τη μείωσή τους. Οι πραγματικές δοκιμές εκπομπών μέσω της οδήγησης, υιοθετούνται στις μεγάλες παγκόσμιες οικονομικές ζώνες καθώς αυτή η

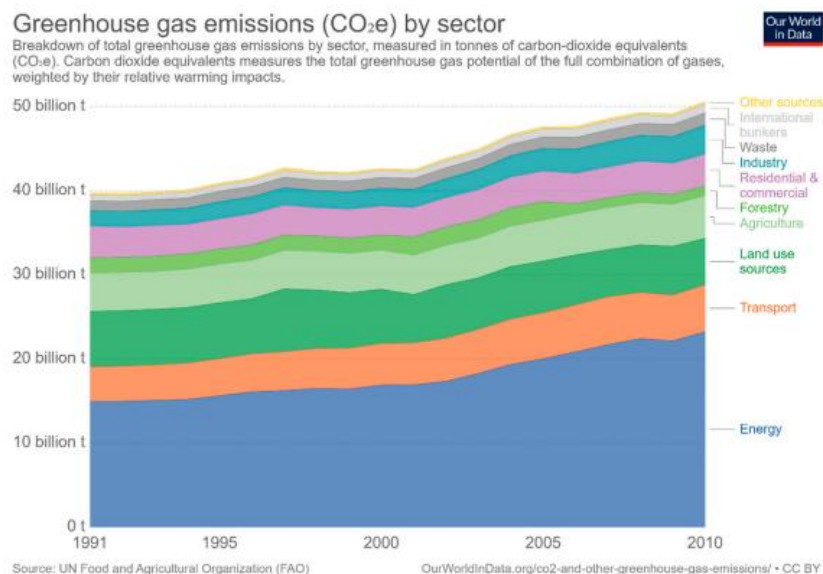
στρατηγική επεκτείνει το λειτουργικό εύρος των ICE, βάση του οποίου οι εκπομπές ρύπων πρέπει να διατηρούνται κάτω από τα όρια έγκρισης (Luján et al., 2018). Επιπλέον και σύμφωνα με τους (Serrano et al., 2018), πλησιάζει μια επανάσταση σε σχέση με τους παραδοσιακούς κινητήρες βενζίνης και ντίζελ, οι οποίοι εξαφανίζουν τα όρια μεταξύ τους καθώς αποκτάται βαθύτερη γνώση και μεγαλύτερος έλεγχος της διαδικασίας της καύσης. Τα προηγμένα συστήματα έγχυσης, οι στροβιλοσυμπιεστές, οι οργανικοί κύκλοι Rankine (organic Rankine cycles - ORC), ο υβριδισμός, οι λύσεις πολλαπλών καυσίμων ή οι προηγμένες ιδέες καύσης γίνονται μέρος του πλαισίου των ICE. Όλες αυτές οι στρατηγικές είναι αφιερωμένες στην εξαγωγή κάθε Joule ενέργειας, από το καύσιμο. Η έρευνα των (Bermúdez et al., 2017) για συστήματα μετεπεξεργασίας που βασίζονται σε μονολιθικούς αντιδραστήρες, προσφέρει ενδιαφέρουσες δυνατότητες για τον αποτελεσματικό καθαρισμό των καυσαερίων σε απίστευτα όρια. Τη σήμερα ημέρα, η αυτοκινητοβιομηχανία δε μπορεί να βρει κάτι αρκετά καινοτόμο ώστε να καλύψει την αναμενόμενη, μεσοπρόθεσμη ζήτηση για καθαρότερους και πιο αποτελεσματικούς ICE. Τα ορυκτά καύσιμα είναι φθηνά και διαθέσιμα, ενώ η εξάντληση του πετρελαίου δεν αποτελεί πλέον θέμα συζήτησης, καθώς η τεχνολογία υδραυλικής θραύσης (fracking) έχει προσφέρει νέες δυνατότητες, καθιστώντας τις ΗΠΑ ως τον μεγαλύτερο παραγωγό ορυκτών καυσίμων στον κόσμο (BP Statistical Review of World Energy, 2018).

Οι ICE εκπέμπουν σωματίδια, αέριους ρύπους και CO₂ τοπικά. Σε μια ανάλυση κύκλου ζωής, ούτε η παραγωγή των μπαταριών αλλά ούτε και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαλλαγμένες από εκπομπές CO₂ και ρύπους. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προκαλεί εκπομπές CO₂ πολύ μεγαλύτερες από τη σύνθεση υγρών ορυκτών καυσίμων, καθώς είναι ένας ενεργειακός φορέας που είναι πολύ πιο δύσκολο να ληφθεί και να μεταφερθεί. Ομοίως, μπορεί να ειπωθεί ότι η κατασκευή των ICE παράγει εκπομπές CO₂, αν και λιγότερες από ό,τι στην περίπτωση των μπαταριών και των ηλεκτρικών κινητήρων (φαίνεται επίσης στην Εικόνα 2).

Επομένως, τι μπορούν να κάνουν οι ICE για να αυξήσουν την ποιότητα του αέρα; Όπως επιβεβαιώνεται μέσω της έρευνας των (Kan et al., 2012), οι σύγχρονοι κινητήρες ντίζελ Euro 6d Temp μπορούν να καθαρίσουν τον αέρα από σωματίδια και αιθαλομίχλη σε πολύ μολυσμένες περιοχές (π.χ. Κίνα), ενώ τα φίλτρα σωματιδίων των σύγχρονων κινητήρων εσωτερικής καύσης μειώνουν το επίπεδο των PM₁₀ κάτω από τη μέση ατμοσφαιρική τιμή. Επιπρόσθετα και έχοντας διαθέσιμη την κατάλληλη τεχνολογία, η

έρευνα των (Serrano et al., 2019) έχει ως στόχο να επιτρέψει στην επόμενη γενιά των ICE, να λειτουργεί ως καθαριστικό ατμοσφαιρικών ρύπων σε μεγάλες πόλεις (των οποίων η πηγή ρύπανσης δεν είναι μόνο η οδική κυκλοφορία των παλαιών ICE). Αυτό είναι κάτι που δεν μπορούν να κάνουν οι ηλεκτροκινητήρες με μπαταρίες. Για παράδειγμα, το νέο Diesel Euro 6d Temp εκπέμπει 80% λιγότερα NOx από αυτά που ορίζει το πρότυπο. Αυτό σημαίνει ότι οι ICE νέας γενιάς καθαρίζουν τον αέρα από εκπομπές που προέρχονται ακόμα και από άλλες πηγές. Παρόλα αυτά, για την επίτευξη των παραπάνω απαιτούνται αποτελεσματικές ενεργειακές πολιτικές για την ανανέωση των στόλων μεταφορών σε όλο τον κόσμο, όπως προκύπτει για παράδειγμα από τη μελέτη των (Serrano et al., 2019) για την περίπτωση της Ευρώπης. Η συζήτηση μεταξύ των χωρών δεν πρέπει να επικεντρώνεται μόνο στο είδος της τεχνολογίας αλλά και στην ενσωμάτωση των πιο σύγχρονων εκδόσεών της.

Ένα άλλο σημαντικό γεγονός σχετικά με τους ICE είναι ότι η συμβολή των μεταφορών στις παγκόσμιες εκπομπές GWPs (Global Warming Potential) παρέμεινε ιστορικά στο 11%. Όπως προκύπτει από την Εικόνα 4 παρακάτω που αναλύεται από τα δεδομένα του Οργανισμού Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (Food and Agriculture Organization - FAO), η βιομηχανία, η γεωργία, η εξόρυξη πόρων, η επεξεργασία απορριμμάτων και η οικιακή και εμπορική κατανάλωση διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο. Επομένως, μια παγκόσμια μαζική αλλαγή στα ηλεκτρικά οχήματα, θα σήμαινε μια πιθανή παγκόσμια μείωση κατά 11% των ισοδύναμων τόνων CO₂ που εκπέμπεται υπό την παραδοχή χρήσης πηγών ενέργειας και οι οποίες θα ήταν πλήρως απαλλαγμένες από CO₂ για τη φόρτιση των μπαταριών των BEVs.



Εικόνα 4. Κατανομή των συνολικών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου ανά τομέα, μετρούμενη σε τόνους ισοδυνάμων διοξειδίου του άνθρακα. Πηγή: (Ritchie & Roser, 2020).

Ωστόσο, μόνο το 10% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας είναι απαλλαγμένο από CO₂, πράγμα που σημαίνει ότι στην καλύτερη περίπτωση, η μείωση θα ήταν 10% από 11%. Ακόμη και το προηγούμενος υπολογισμένο 1,1% δεν είναι πλήρως προσβάσιμο σε μια ανάλυση κύκλου ζωής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Μακροπρόθεσμα, μπορεί να υποστηριχθεί ότι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα θα μειώσουν σημαντικά τις εκπομπές CO₂ εάν η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται αποκλειστικά από ανανεώσιμες ή πυρηνικές πηγές. Λαμβάνοντας υπόψη χώρες όπως η Γερμανία ή η Ισπανία με περίπου 35% των ανανεώσιμων πηγών στο μείγμα, οι μέσες ισοδύναμες εκπομπές CO₂ είναι ελαφρώς καλύτερες από το Diesel E6d Temp του 2019. Εφόσον γίνει μια παρέκταση στο μέλλον, θα χρειαστεί να αυξηθεί το μείγμα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας περισσότερο από 60% ούτως ώστε να υπάρχει το ίδιο ανταγωνιστικό πλεονέκτημα έναντι των τεχνολογιών καύσης που βασίζονται στην ανάφλεξη με συμπίεση (compression ignition - CI) στις εκπομπές CO₂ (Blaiich, 2019). Επομένως, ακόμα και σε περίπτωση που επιτυγχανόταν ένα ποσοστό 100% στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τα ηλεκτρικά οχήματα δεν θα είχαν ποτέ μηδενικές ισοδύναμες εκπομπές CO₂ (σύμφωνα και με τον κύκλο ζωής και όχι μόνο με την τοπική χρήση).

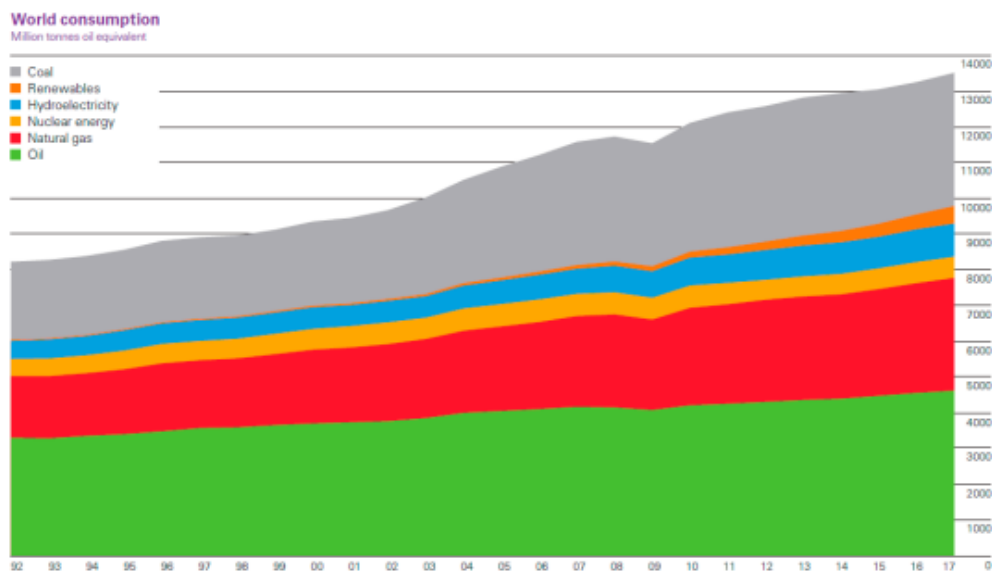
Ένας ακόμα τρόπος με τον οποίο οι ICE νέας γενιάς μπορούν να βελτιώσουν τις υπάρχουσες προσδοκίες, είναι η χρήση συνθετικών καυσίμων από τη δέσμευση και τη χρήση ατμοσφαιρικού CO₂ (utilization of the captured CO₂ - CCU) (Cormos & Cormos, 2017). Υπάρχουν ήδη πολλά έργα έρευνας και ανάπτυξης (Research and Development - R&D) στην Ελβετία, τη Γερμανία και τον Καναδά που επικεντρώνονται στη CCU. Πρόκειται για συστήματα ικανά να μετατρέπουν το CO₂ που λαμβάνεται απευθείας από τον αέρα, σε υγρά καύσιμα που ονομάζονται «καύσιμα PtX» (e-fuels, συμπεριλαμβανομένου του e-Diesel). Αυτό γίνεται με υδρογόνωση του CO₂ χρησιμοποιώντας H₂ που παράγεται με ηλεκτρόλυση από ανανεώσιμες πηγές (Kramer et al., 2018). Υπάρχουν επίσης έργα για την άντληση του δεσμευμένου CO₂ από τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής προς τις πετρελαιοπηγές και στη συνέχεια τη μετατροπή του σε ουδέτερο πετρέλαιο από την οπτική του CO₂. Άλλες μελέτες προσεγγίζουν τα οχήματα που δεσμεύουν CO₂, τόσο για τις δικές τους εκπομπές CO₂ όσο και για το ατμοσφαιρικό CO₂, στοχεύοντας στην ενιαία παραγωγή καυσίμου ουδέτερου CO₂. Με αυτόν τον τρόπο, η self-CCU θα μπορούσε ακόμη και να συμβάλει στη μείωση του

ατμοσφαιρικού CO₂. Επιπλέον, εάν τα καύσιμα που χρησιμοποιούνταν σε αυτά τα αυτοκίνητα δέσμευσης CO₂ ήταν ως επί το πλείστον βιοκαύσιμα, όπως συμβαίνει στη Βραζιλία, αυτό θα αποτελούσε έναν αποτελεσματικό τρόπο απομάκρυνσης του CO₂ από την ατμόσφαιρα. Ωστόσο, η ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας εξαρτάται από την αποτελεσματική ανάκτηση της ενέργειας των καυσαερίων μέσω των ICE. Συμπερασματικά και σε περιπτώσεις κατά τις οποίες απαιτείται αλλαγή προτύπου, τα οχήματα που λειτουργούν ως δεσμευτές CO₂ (για να δημιουργήσουν μια κυκλική οικονομία CO₂) μπορεί να προκύψουν ως η πιο ενδεδειγμένη λύση (Desantes et al., 2019). Αυτή είναι μια δυνατότητα που δεν μπορούν να προσφέρουν τα BEVs.

Εν κατακλείδι, η δημόσια χρηματοδότηση και οι κυβερνητικές προσπάθειες θα πρέπει να στοχεύουν στην προώθηση ερευνών για τη μείωση των ρυπογόνων εκπομπών. Εκ του αποτελέσματος, οι άμεσες επιδοτήσεις σε οποιονδήποτε κλάδο ή τεχνολογία και η απαγόρευση άλλων (χωρίς αρκετά επιστημονικά αποδεδειγμένα επιχειρήματα), δεν αποτέλεσαν βήματα προς τη σωστή κατεύθυνση. Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια φαίνεται ότι οι ευρωπαϊκές αρχές άρχισαν επιτέλους να δίνουν βάση στους ισχυρισμούς των επιστημόνων και των μηχανικών όσον αφορά το δυναμικό καθαρισμού των πόλεων από τα συστήματα απορρύπανσης των ICE τελευταίας γενιάς. Γενικά, η προώθηση ερευνητικών δραστηριοτήτων οποιασδήποτε τεχνολογίας και ανεξαρτήτως πεδίου έρευνας, παρείχε πάντα μεγάλα οφέλη για τις μελλοντικές γενιές και ήταν συνήθως ο φθηνότερος δρόμος για την πρόοδο της κοινωνίας.

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως, προκύπτει η ανάγκη για μία μεσομακροπρόθεσμη εναλλακτική των τρεχόντων ICE. Αυτή διαμορφώνεται μέσω των νέων ηλεκτρικών κινητήρων και μπαταριών σε αυτοκίνητα με μηδενικές εκπομπές ρύπων. Τα άσχημα νέα είναι ότι η ενέργεια δε δημιουργείται ούτε καταστρέφεται, αλλά αντιθέτως, μεταμορφώνεται. Επομένως, οι ηλεκτρικοί κινητήρες και οι μπαταρίες δεν είναι καινούργιοι και γενικά δεν είναι απαλλαγμένοι από προβλήματα. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστούν δύο πολύ σημαντικά και σχετικά προβλήματα. Το πρώτο πρόβλημα είναι ότι η πρόωση του οχήματος περιλαμβάνει ενεργειακούς μετασχηματισμούς και ο ηλεκτροκινητήρας δεν χρησιμοποιεί μια πρωτογενή πηγή ενέργειας, αλλά ένα διάλυμα ενέργειας. Αν και η κοινή γνώμη έχει ξεκάθαρη ιδέα για τον τρόπο με τον οποίο ορισμένες διεργασίες (όπως η τριβή), μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τις εφαρμογές μεταφοράς, η κατανόηση του αντίκτυπου του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής, είναι περιορισμένη. Το κύριο σημείο του προβλήματος είναι ότι η

ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να παράγεται (συνήθως από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας), κατά ένα ποσοστό που αντιστοιχεί περίπου στο 60% σε ενεργειακές απώλειες και στη συνέχεια να μεταφέρεται, γεγονός που προσθέτει ένα επιπλέον ποσοστό της τάξης του 20% σε περαιτέρω απώλειες. Δυστυχώς, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1 παρακάτω, οι ανανεώσιμες πηγές αποτελούν μόλις το 10% του παγκόσμιου ενεργειακού μείγματος, χωρίς να υπάρχει κάποια μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη σημαντικής αύξησης.



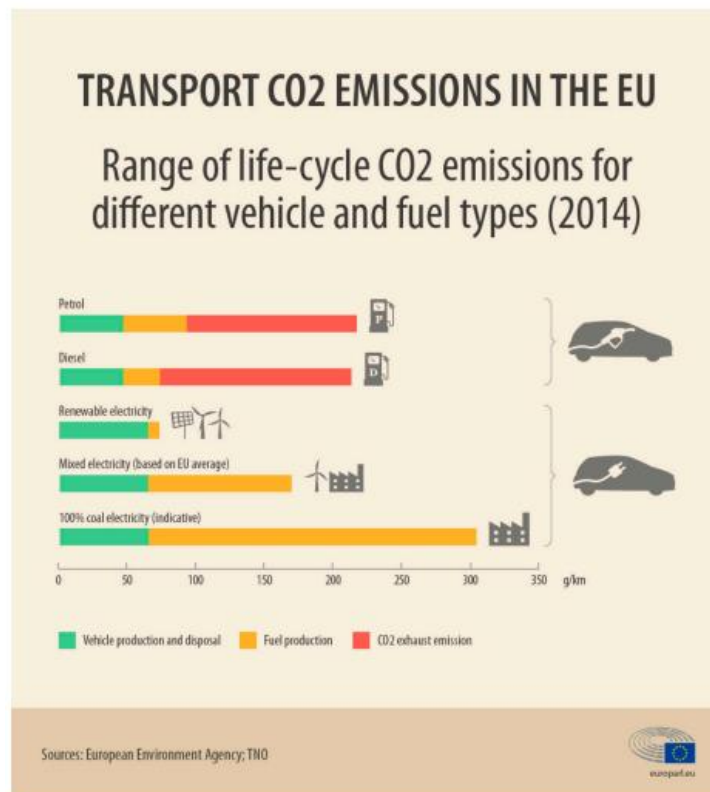
Εικόνα 5. Εξέλιξη της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας κατά προέλευση τα τελευταία 25 χρόνια.

Πηγή: (BP Statistical Review of World Energy, 2018).

Σε ορισμένες χώρες όπως οι ΗΠΑ, η Κίνα, η Ρωσία, η Πολωνία, η Νότια Κορέα και η Γερμανία, τα ορυκτά καύσιμα, συμπεριλαμβανομένου ενός καλού ποσοστού άνθρακα, παραμένουν η μεγαλύτερη πηγή ενέργειας ως πρώτη ύλη, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε μια πρώτη προσέγγιση, η μόνη χώρα της G8 με πραγματικές εναλλακτικές για τις τεχνολογίες εκπομπής CO₂ είναι η Γαλλία λόγω της συνεχούς δέσμευσής της για την πυρηνική ενέργεια. Επομένως, με το τρέχον ενεργειακό μείγμα και με μια ανάλυση του πλήρους κύκλου ζωής, η εναλλακτική των ηλεκτροκινητήρων δεν μπορεί να εξαλείψει τις παγκόσμιες εκπομπές CO₂.

Σχετικά με αυτήν την ανησυχία, η Εικόνα 2 η οποία λαμβάνει τα δεδομένα από την αρχή μέχρι την ανάλυση που εκπονήθηκε από τη συνεργασία των JEC (Joint Research Centre)-EUCAR (European Council for Automotive R&D)-CONCAWE, απεικονίζει αποτελεσματικά την μείωση των εκπομπών CO₂ (δεν δύναται να αφαιρεθούν

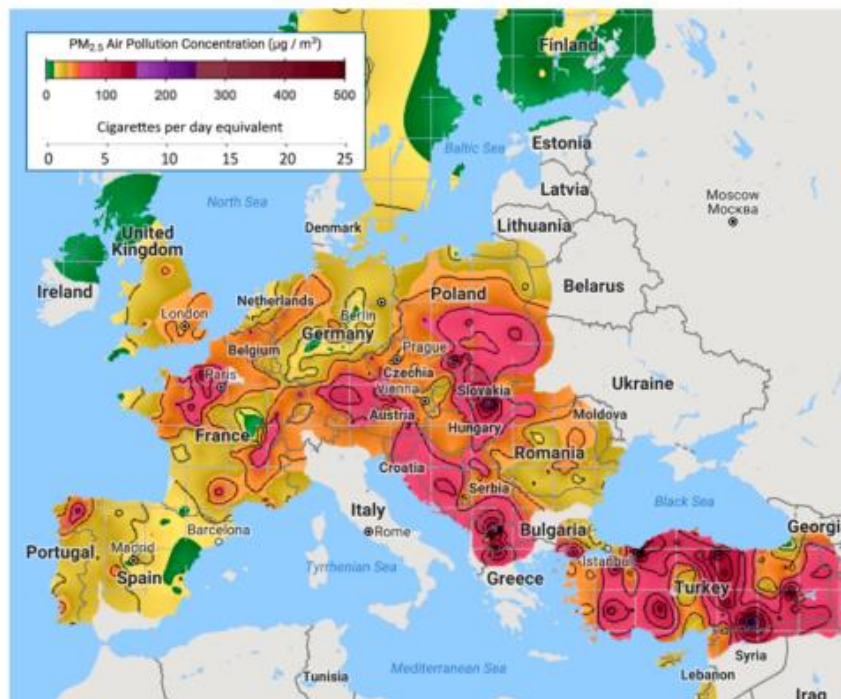
ολοκληρωτικά) λόγω της χρήσης ηλεκτρικών οχημάτων με μπαταρία (battery electric vehicles - BEVs). Πιο συγκεκριμένα, η μείωση του μείγματος ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης εκτιμάται σε 40 gCO₂/km (από 210 σε 170 gCO₂/km) σε μια συνολική μετατόπιση από τους ICE στα BEVs. Ωστόσο, η ΕΕ φτάνει το 35% του μείγματος μεταξύ ανανεώσιμων και υδραυλικών πηγών ενέργειας, ενώ παγκοσμίως το ποσοστό αγγίζει μόλις το 10% (Εικόνα 1).



Εικόνα 6. Εκπομπές CO₂ του κύκλου ζωής ως συνάρτηση της πηγής ενέργειας με δεδομένα από τη μελέτη των (Edwards et al., 2014). Πηγή: (European Environment Agency, 2019).

Πιο πρόσφατα, τον Απρίλιο του 2019, τα διεθνή μέσα ενημέρωσης πρόβαλαν μια πρόσφατη μελέτη από το γερμανικό IFO (Institute Center for Economic Studies, CESifo GmbH) που διεξήχθη από τους (Buchal et al. 2019). Αυτοί υπολόγισαν ότι ένα Tesla Class 3 εκπέμπει από 156 έως 180 gCO₂/km κατά τη διάρκεια της ζωής του με βάση το γερμανικό ενεργειακό μείγμα. Αυτό το αποτέλεσμα κυμαίνεται από 11% έως 28% περισσότερο στις εκπομπές CO₂ συγκριτικά με τους σύγχρονους κινητήρες Diesel E6d Temp. Επιπλέον, μια ανάλυση κύκλου ζωής της πλήρους ηλεκτροδότησης των οδικών μεταφορών που αναφέρεται στη μελέτη του (Messagie, 2017), δείχνει ότι οι αέριες

εκπομπές μεταφέρονται μόνο από τις πόλεις προς τα περίχωρα μεγάλων θερμοηλεκτρικών σταθμών και κέντρων παραγωγής. Δυστυχώς, η υπερθέρμανση του πλανήτη και τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα όπως η όξινη βροχή και τα σύννεφα σωματιδίων (PM 2.5), έχουν επανειλημμένα αποδείξει (όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3), ότι δεν γνωρίζουν όρια και είναι πολύ δύσκολο να αντιμετωπιστούν. Συνοπτικά, για τον συνδυασμό μιας μαζικής ηλεκτροδότησης των οδικών μεταφορών και του τρέχοντος παγκόσμιου ενεργειακού μείγματος, το μέγιστο όφελος είναι η μετεγκατάσταση του εκπεμπόμενου CO₂. Ωστόσο, καθώς δεν αναμένονται ουσιαστικές αλλαγές στο σημερινό ηλεκτρικό μείγμα μέχρι το 2030, η ηλεκτροδότηση των μεταφορών ως μία ξεκάθαρη λύση στο πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής, θα πρέπει να αναβληθεί.



Εικόνα 7. Ευρωπαϊκά επίπεδα PM_{2.5}.

Πηγή: (berkeleyearth.org/wp-content/uploads/2017/01/Europe-air-pollution.png, 2019).

Το δεύτερο πρόβλημα με τα ηλεκτρικά οχήματα προέρχεται από την ανάγκη αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να παράγεται καθώς καταναλώνεται, με έναν απλό και βασικό τρόπο. Φυσικά, υπάρχει και η επιλογή των μπαταριών ως λύση αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (αν και όχι σε σημαντική ποσότητα για εφαρμογές οδικών μεταφορών). Όπως οι ICE, έτσι και οι μπαταρίες είναι μια παλιά και πολύ γνωστή έννοια που περιλαμβάνει επίσης επιβλαβείς χημικές

ενώσεις. Παρά τις προοδευτικές βελτιώσεις, οι μπαταρίες είναι μια εντελώς ανώριμη τεχνολογία στο εύρος ισχύος και ενέργειας που απαιτείται για τις περισσότερες εφαρμογές οδικών μεταφορών. Υπάρχουν τέσσερις σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν:

- Ο χρόνος φόρτισης της μπαταρίας είναι πολύ μεγάλος, δημιουργώντας προβλήματα σε πολλούς χρήστες
- Η ενεργειακή πυκνότητα βρίσκεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα, με τις πραγματικές αυτονομίες να κυμαίνονται κάτω από 250 km σε συμπαγή οχήματα και περίπου 300 km σε спор αστικά οχήματα (sport urban vehicles - SUVs)
- Η διάρκεια ζωής των μπαταριών είναι περιορισμένη και μικρότερη σε σχέση με τη διάρκεια ζωής του οχήματος. Αρκετές μελέτες όπως αυτές των συγγραφέων (Tang et al., 2016) και (Bloom et al., 2001) αναφέρονται σε αυτό το γεγονός και συζητούν τόσο τους κινδύνους, όσο και το κόστος που συνδέονται με την ανακύκλωση ή την απόρριψή τους.
- Η προμήθεια πρώτων υλών για τη μεταποίηση, όπως το νικέλιο, το λίθιο, το κοβάλτιο, ο χαλκός και το μαγγάνιο, μεταξύ άλλων, είναι ένα αναδυόμενο εμπόδιο, καθώς φτάνουν γρήγορα σε υψηλές τιμές και αποκτούν υψίστη σημασία στις γεωπολιτικές στρατηγικές. Σύμφωνα με τη Sarah Maryssael, παγκόσμια διευθύντρια μεταλλικών προμηθειών για την Tesla (García, 2019) το κύριο πρόβλημα είναι επί του παρόντος η προμήθεια κοβαλτίου, το οποίο είναι απαραίτητο για την άνοδο των μπαταριών ιόντων λιθίου. Για παράδειγμα, ένα Tesla Model X χρειάζεται 7 κιλά ανά όχημα ενώ ένα Tesla Model 3 περίπου 4,5 κιλά (Serrano et al., 2019). Αυτό το ορυκτό εξάγεται κυρίως από τη Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό, όπου τα ανθρώπινα δικαιώματα παραβιάζονται μέσω της παιδικής εργασίας και τα ορυχεία ξεχωρίζουν (μεταξύ άλλων), για τις κακές συνθήκες ασφαλείας τους (Broom, 2019). Στη συνέχεια, το κοβάλτιο φτάνει στις διεθνείς αγορές και η προέλευσή του αραιώνεται λόγω της χαμηλής ιχνηλασιμότητας της αλυσίδας παραγωγής. Τέλος, υποβάλλεται σε ουσιαστική επεξεργασία στην Κίνα αποτελώντας παράδειγμα της δυνατότητας αυτής της τεχνολογίας για περαιτέρω οικονομική πίεση.

3. Συμβατικές Μηχανές Εσωτερικής Καύσης και Παραγωγή Ρύπων

3.1. Συμβατικά Καύσιμα και Ρύποι

Η καύση του καυσίμου στους κινητήρες εσωτερικής καύσης, είναι σχεδόν πάντα ημιτελής και δημιουργεί εκπομπές που μολύνουν το περιβάλλον και συμβάλλουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη, στην όξινη βροχή, στην αιθαλομίχλη, σε οσμές, σε αναπνευστικά και πολλά άλλα προβλήματα υγείας. Σύμφωνα με τον (Caton, 2001), οι κύριες αιτίες αυτών των εκπομπών είναι οι μη στοιχειομετρικές συνθήκες καύσης, η διάσταση του αζώτου, οι ακαθαρσίες στο καύσιμο, ο αέρας και άλλες λειτουργικές παράμετροι του κινητήρα. Οι εκπομπές που προκαλούν ανησυχία είναι οι υδρογονάνθρακες (hydrocarbons - HC), το μονοξείδιο του άνθρακα (carbon monoxide - CO), τα οξείδια του αζώτου (nitrogen oxides - NO_x), το θείο και τα στερεά σωματίδια άνθρακα.

3.1.1. Εκπομπές Υδρογονανθράκων

Τα καυσαέρια που εξέρχονται από τον θάλαμο καύσης μιας μηχανής εσωτερικής καύσης, περιέχουν έως και 6000 ppm συστατικών υδρογονανθράκων, που ισοδυναμεί με το 1–1,5% του καυσίμου (Heywood, 1988). Περίπου το 40% αυτών των αερίων είναι άκαυστα συστατικά βενζίνης, ενώ το υπόλοιπο 60% αποτελείται από μερικώς αντιδραστήρια συστατικά, τα οποία δεν υπήρχαν στο αρχικό καύσιμο. Αυτά αποτελούνται από μικρά μόρια μη ισορροπίας, που σχηματίζονται όταν διασπώνται μεγάλα μόρια καυσίμου (θερμική πυρόλυση) κατά την αντίδραση της καύσης και είναι προτιμότερο να αντιμετωπίζονται σαν να περιείχαν ένα άτομο άνθρακα. Επιπλέον, η σύνθεση των εκπομπών HC είναι διαφορετική για κάθε μείγμα βενζίνης, ανάλογα με τα αρχικά συστατικά του καυσίμου. Η γεωμετρία του θαλάμου καύσης και οι παράμετροι λειτουργίας του κινητήρα, επηρεάζουν επίσης την παραγωγή εξαρτημάτων HC. Όταν οι εκπομπές υδρογονανθράκων εισέρχονται στην ατμόσφαιρα λειτουργούν ως ερεθιστικοί παράγοντες και αρωματικές ενώσεις (μερικές από αυτές είναι καρκινογόνες). Όλα τα συστατικά (εκτός του CH₄), αντιδρούν με τα ατμοσφαιρικά αέρια για να σχηματίσουν φωτοχημική αιθαλομίχλη που παράγει υψηλά ατμοσφαιρικά αποτελέσματα, καθιστώντας έτσι απαραίτητο τον έλεγχο της παραγωγής της. Οι κύριες αιτίες των εκπομπών HC είναι η μη στοιχειομετρική αναλογία καυσίμου αέρα, η ατελής καύση, οι όγκοι ρωγμών, οι εναποθέσεις και το λάδι στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης.

Μη στοιχειομετρική αναλογία αέρα-καυσίμου

Τα επίπεδα εκπομπών των υδρογονανθράκων είναι μια ισχυρή συνάρτηση της αναλογίας αέρα-καυσίμου. Όταν ένα μείγμα είναι πλούσιο σε καύσιμα, δεν υπάρχει αρκετό οξυγόνο για να αντιδράσει με όλο τον άνθρακα, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται υψηλά επίπεδα HC και CO στα προϊόντα της εξάτμισης. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα στην εκκίνηση του κινητήρα όπου το μείγμα αέρα-καυσίμου είναι (σκόπιμα), πολύ εμπλουτισμένο. Ισχύει επίσης (σε μικρότερο βαθμό) και κατά την ταχεία επιτάχυνση υπό φορτίο αλλά και σε πολύ άπαχα μείγματα λόγω κακής καύσης και αστοχιών. Επομένως, είναι προτιμότερο να δημιουργηθούν οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας για κάθε κινητήρα ούτως ώστε να ελαχιστοποιηθεί η παραγωγή HC.

Ατελής καύση

Ακόμα και σε περιπτώσεις όπου το καύσιμο και ο αέρας που εισέρχονται σε έναν κινητήρα βρίσκονται στην ιδανική στοιχειομετρική αναλογία, δεν επιτυγχάνεται τέλεια καύση, με αποτέλεσμα κάποιο ποσοστό HC να καταλήγει στα καυσαέρια. Υπάρχουν πολλές αιτίες που συμβαίνει αυτό: (1) Η ατελής ανάμειξη του αέρα και του καυσίμου έχει ως αποτέλεσμα ορισμένα σωματίδια καυσίμου να μην μπορούν να βρουν οξυγόνο για να προκαλέσουν αντίδραση, (2) Το σβήσιμο της φλόγας στα τοιχώματα αφήνει ως υπόλειμμα έναν μικρό όγκο μείγματος αέρα-καυσίμου (που δεν αντέδρασε). Αυτό το άκαυστο στρώμα έχει πάχος μόλις λίγα δέκατα του mm. Έπειτα, ένα μέρος του μείγματος αναφλέγεται κατά τη διαδικασία της καύσης λόγω της πρόσθετης ανάμειξης που δημιουργείται εξαιτίας του στροβιλισμού και διαφόρων αναταράξεων. (3) Μια άλλη αιτία της σβέσης της φλόγας, είναι η διαστολή που συμβαίνει κατά την καύση και την φάση εκτόνωσης.

Όγκος ρωγμής

Κατά τη διάρκεια της διαδρομής συμπίεσης και του πρώιμου μέρους της διαδικασίας καύσης, ο αέρας και το καύσιμο συμπιέζονται στον όγκο της ρωγμής του θαλάμου καύσης, σε υψηλή πίεση. Πιο συγκεκριμένα, έως και 3% του καυσίμου που βρίσκεται στον θάλαμο μπορεί να εισέλθει σε αυτόν τον όγκο ρωγμής. Αργότερα, κατά τη διάρκεια της διαδρομής της διαστολής, η πίεση στον κύλινδρο μειώνεται κάτω από την πίεση του όγκου της ρωγμής και εμφανίζεται μια αντιστροφή στη φορά κίνησης. Το καύσιμο και ο αέρας ρέουν πίσω στον θάλαμο καύσης όπου το μεγαλύτερο μέρος του μείγματος καταναλώνεται στην αντίδραση της φλόγας. Ωστόσο, μέχρι να εμφανιστούν τα τελευταία στοιχεία της αντιστροφής ροής, η αντίδραση της φλόγας έχει ήδη σβήσει και

τα σωματίδια καυσίμου που δεν αντέδρασαν, παραμένουν στα καυσαέρια. Επιπροσθέτως, η θέση του σπινθηριστή σε σχέση με το άνω διάκενο του δακτυλίου συμπίεσης, επηρεάζει την ποσότητα HC στα καυσαέρια του κινητήρα, καθώς το διάκενο δακτυλίου καταλαμβάνει ένα μεγάλο ποσοστό του όγκου της ρωγμής. Επομένως, όσο πιο μακριά βρίσκεται ο σπινθηριστής από το διάκενο του δακτυλίου, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό HC στην εξάτμιση. Αυτό συμβαίνει επειδή αναγκάζεται να εισέλθει περισσότερο καύσιμο στο κενό (πριν περάσει το μέτωπο της φλόγας). Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι ο όγκος των ρωγμών γύρω από τους δακτυλίους του εμβόλου, είναι μεγαλύτερος όταν ο κινητήρας είναι ακόμα κρύος λόγω των διαφορών στη θερμική διαστολή των υλικών.

Αποθέσεις σε τοιχώματα θαλάμου καύσης

Τα σωματίδια αερίου, συμπεριλαμβανομένων των ατμών καυσίμου, απορροφώνται από τις εναποθέσεις στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης. Η ποσότητα απορρόφησης είναι μια συνάρτηση της πίεσης του αερίου, έτσι ώστε η μέγιστη τιμή να εμφανίζεται κατά τη συμπίεση και την καύση. Αργότερα στον θερμικό κύκλο, όταν δηλαδή ανοίξει η βαλβίδα εξαγωγής και μειωθεί η πίεση της φιάλης, η ικανότητα απορρόφησης του υλικού απόθεσης μειώνεται και τα σωματίδια αερίου εκροφούνται πίσω στη φιάλη. Στη συνέχεια, αυτά τα σωματίδια (συμπεριλαμβανομένου κάποιου ποσοστού HC), αποβάλλονται από τη φιάλη κατά τη διάρκεια της διαδρομής της εξάτμισης. Αυτό το πρόβλημα είναι μεγαλύτερο σε κινητήρες με υψηλότερους λόγους συμπίεσης, λόγω του ότι παράγουν υψηλότερη πίεση (σε αυτή τη περίπτωση υπάρχει μεγαλύτερη απορρόφηση αερίου). Τα καθαρά τοιχώματα του θαλάμου καύσης που έχουν ελάχιστες εναποθέσεις, μειώνουν τις εκπομπές HC στα καυσαέρια, ενώ τα περισσότερα μείγματα βενζίνης περιλαμβάνουν πρόσθετα για τη μείωση της συσσώρευσης εναποθέσεων στους κινητήρες. Οι παλαιότεροι κινητήρες έχουν συνήθως μεγαλύτερη συσσώρευση τοιχωμάτων και αντίστοιχη αύξηση των εκπομπών HC.

Λάδι στους τοίχους του θαλάμου καύσης

Ένα πολύ λεπτό στρώμα λαδιού εναποτίθεται στα τοιχώματα του κυλίνδρου ενός κινητήρα, προκειμένου να παρέχει λίπανση μεταξύ αυτού και του κινούμενου εμβόλου. Κατά τη διάρκεια των διαδρομών εισαγωγής και συμπίεσης, ο εισερχόμενος αέρας και το καύσιμο, έρχονται σε επαφή με αυτό το φιλμ λαδιού. Με τον ίδιο περίπου τρόπο (π.χ. εναποθέσεις τοιχωμάτων), αυτό το φιλμ λαδιού απορροφά και εκροφά σωματίδια

αερίου ανάλογα με την πίεση του αερίου. Κατά τη συμπίεση και την καύση, όταν η πίεση της φιάλης είναι υψηλή, σωματίδια αερίου, συμπεριλαμβανομένων των ατμών καυσίμου, απορροφώνται στο φιλμ λαδιού. Αργότερα, όταν μειωθεί η πίεση (κατά τη διάρκεια της διαστολής και του φυσήματος), η ικανότητα απορρόφησης του λαδιού μειώνεται και τα σωματίδια του καυσίμου εκροφούνται πίσω στην φιάλη. Τέλος, ένα μέρος αυτού του καυσίμου καταλήγει στην εξάτμιση.

Καθώς αυξάνεται η χρήση ενός κινητήρα με την πάροδο του χρόνου, το διάκενο μεταξύ των δακτυλίων του εμβόλου και των τοιχωμάτων του κυλίνδρου γίνεται μεγαλύτερο, με αποτέλεσμα να προσκολλάται στα τοιχώματα ένα παχύτερο φιλμ λαδιού. Μέρος αυτού, αφαιρείται από τα τοιχώματα κατά τη διάρκεια της διαδρομής συμπίεσης και καταλήγει να αναφλέγεται κατά την καύση. Το λάδι είναι μια ένωση υδρογονάνθρακα υψηλού μοριακού βάρους που δεν φλέγεται τόσο εύκολα όσο η βενζίνη. Ωστόσο, ορισμένη ποσότητα λαδιού καταλήγει ως εκπομπή HC. Όταν είναι καινούργιος ο κινητήρας αυτό συμβαίνει με πολύ αργό ρυθμό, αλλά η διαδικασία επιταχύνεται όσο αυξάνονται η ηλικία και οι φθορές του. Η κατανάλωση λαδιού αυξάνεται επίσης όταν φθείρονται οι δακτύλιοι του εμβόλου και τα τοιχώματα του κυλίνδρου. Σε παλαιότερους κινητήρες, το λάδι που καίγεται στο θάλαμο καύσης αποτελεί μια σημαντική πηγή εκπομπών HC. Επομένως, η αύξηση των εκπομπών HC οφείλεται τόσο στην καύση του λαδιού όσο και στην προστιθέμενη ροή του όγκου των ρωγμών.

3.1.2. Εκπομπές Μονοξειδίου του Άνθρακα

Το μονοξείδιο του άνθρακα το οποίο είναι ένα άχρωμο, άοσμο και δηλητηριώδες αέριο, παράγεται σε έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης όταν λειτουργεί με αναλογία ισοδυναμίας πλούσια σε καύσιμα. Όταν δεν υπάρχει αρκετό οξυγόνο ούτως ώστε να μετατραπεί όλος ο άνθρακας σε CO₂, το καύσιμο δεν καίγεται εντελώς και ορισμένοι άνθρακες καταλήγουν ως μονοξείδιο του άνθρακα. Συνήθως, η εξάτμιση ενός κινητήρα ανάφλεξης με σπινθήρα (spark-ignition engine – SI) περιέχει περίπου 0,2-0,5% μονοξείδιο του άνθρακα (Heywood, 1988). Ένας καλά σχεδιασμένος κινητήρας SI που λειτουργεί υπό ιδανικές συνθήκες μπορεί να έχει μοριακό κλάσμα καυσαερίων CO έως και 10⁻³%. Δεδομένου ότι οι κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα λειτουργούν συχνά και κοντά σε στοιχειομετρικές συνθήκες με μερικό φορτίο (αλλά και σε συνθήκες πλούσιες από καύσιμο, με πλήρες φορτίο), οι εκπομπές CO είναι πολύ σημαντικές και πρέπει να ελέγχονται διεξοδικά. Τα επίπεδα CO που παρατηρούνται στα καυσαέρια του κινητήρα

SI είναι χαμηλότερα από τις μέγιστες τιμές που μετρώνται εντός του θαλάμου καύσης, αλλά υψηλότερα από τις τιμές ισορροπίας για τις συνθήκες καυσαερίων. Έτσι, οι διαδικασίες που διέπουν τα επίπεδα εξάτμισης CO ελέγχονται κινητικά. Τέλος και όσον αφορά τις φλόγες αέρα προαναμεμειγμένων υδρογονανθράκων, η συγκέντρωση του CO αυξάνεται γρήγορα στη ζώνη της φλόγας φτάνοντας σε μια μέγιστη τιμή, η οποία είναι μεγαλύτερη από την τιμή ισορροπίας σε σχέση με το αδιαβατικό μείγμα καυσίμου-αέρα.

3.1.3. Οξειδία του Αζώτου

Τα καυσαέρια ενός κινητήρα μπορούν να έχουν έως και 2000 ppm οξειδίων του αζώτου (Heywood, 1988). Το μεγαλύτερο μέρος αυτού αποτελείται από NO, με χαμηλές ποσότητες NO₂ και ίχνη άλλων συνδυασμών οξυγόνου αζώτου. Όλα αυτά ομαδοποιούνται ως NO_x, με το x να αντιπροσωπεύει κάποιον κατάλληλο αριθμό. Λόγω του ότι το οξείδιο του αζώτου είναι μια πολύ ανεπιθύμητη εκπομπή, οι κανονισμοί που περιορίζουν την επιτρεπόμενη ποσότητα του γίνονται ολοένα και πιο αυστηροί. Τα απελευθερωμένα οξείδια του αζώτου αντιδρούν στην ατμόσφαιρα για να σχηματίσουν όζον και αποτελούν μία από τις κύριες αιτίες της φωτοχημικής αιθαλομίχλης. Το οξείδιο του αζώτου δημιουργείται κυρίως από άζωτο που υπάρχει στον αέρα. Το άζωτο μπορεί επίσης να βρεθεί σε μείγματα καυσίμων, τα οποία μπορεί να περιέχουν ίχνη NH₃, NC και HCN. Σύμφωνα με την έρευνα των (Rakopoulos et al., 2008), υπάρχει ένας αριθμός πιθανών αντιδράσεων που σχηματίζουν μονοξείδιο του αζώτου (μηχανισμός Zeldovich) οι οποίες, κατά πάσα πιθανότητα, λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της καύσης αλλά και αμέσως μετά.

Το όζον της επιφάνειας εδάφους είναι επιβλαβές για τους πνεύμονες και για άλλους βιολογικούς ιστούς. Είναι επίσης επιβλαβές για τα δέντρα και αντιδρά με καουτσούκ, πλαστικά και άλλα υλικά, παράγοντας επιβλαβή αέρια. Οι πιο σημαντικές μεταβλητές του κινητήρα που επηρεάζουν τις εκπομπές NO, είναι η αναλογία ισοδυναμίας καυσίμου/αέρα, το κλάσμα του αερίου καύσης και ο χρονισμός του σπινθήρα. Το κλάσμα του αερίου καύσης εξαρτάται από την ποσότητα του αραιωτικού, όπως το ανακυκλωμένο καυσαέριο (recycled exhaust gas - EGR) που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των εκπομπών NO_x, καθώς και από το κλάσμα του υπολειμματικού αερίου (Hassan et al., 2006). Οι ιδιότητες του καυσίμου επηρεάζουν εξίσου τις συνθήκες του αερίου καύσης. Ωστόσο, η επίδραση των κανονικών διακυμάνσεων στις ιδιότητες της βενζίνης κυμαίνεται σε μέτρια επίπεδα. Σε αυτές τις παραμέτρους, η επίδραση των

διακυμάνσεων μπορεί να επεξηγηθεί από τον μηχανισμό σχηματισμού του μονοξειδίου του αζώτου. Τέλος, πολύ σημαντικοί παράγοντες είναι τόσο οι αλλαγές στο προφίλ θερμοκρασίας και στη συγκέντρωση οξυγόνου στα αέρια καύσης (κατά τη διαδικασία καύσης), όσο και στο αρχικό στάδιο της διαδρομής της διαστολής.

Αναλογία αέρα-καυσίμου

Τεράστιες ποσότητες εκπομπών NO προκύπτουν όταν η θερμοκρασία της φιάλης αερίου βρίσκεται στην μέγιστη τιμή. Λεπτομερείς προβλέψεις για τις συγκεντρώσεις NO στα αέρια καύσης, υποδηλώνουν ότι η συγκέντρωση συγκριτικά με το χρόνο και υπό συνθήκες άλιπης κατανάλωσης καυσίμου, διαφέρει (ως προς τον χαρακτήρα) από εκείνες που αφορούν συνθήκες πλούσιες σε καύσιμα. Σε άπαχα μείγματα, οι συγκεντρώσεις NO ψύχονται νωρίς κατά τη διαδικασία διαστολής και λαμβάνει χώρα μια μικρή αποσύνθεση του NO. Από την άλλη πλευρά, σε πλούσια μείγματα, η ουσιαστική αποσύνθεση NO προκύπτει από τις συγκεντρώσεις κορυφής όταν η πίεση της φιάλης έχει φτάσει στο μέγιστο επίπεδο.

Κλάσμα αερίου καύσης

Το άκαυστο μείγμα που βρίσκεται στη φιάλη περιέχει ατμούς καυσίμου, αέρα και αέρια καύσης. Τα αέρια καύσης είναι υπολειμματικά αέρια από τον προηγούμενο θερμικό κύκλο και από τυχόν καυσαέρια που ανακυκλώνονται στην εισαγωγή για τον έλεγχο των εκπομπών NOx. Το κλάσμα του υπολειπόμενου αερίου επηρεάζεται από το φορτίο, το χρονισμό της βαλβίδας και σε μικρότερο βαθμό, από την ταχύτητα, την αναλογία αέρα-καυσίμου και την αναλογία συμπίεσης. Τα αέρια καύσης δρουν ως αέρια αραιώσης στο άκαυστο μείγμα ενώ η θερμοκρασία που επιτυγχάνεται μετά την καύση, ποικίλλει αντιστρόφως με το κλάσμα μάζας του αερίου. Ως εκ τούτου, η αύξηση του κλάσματος του αερίου καύσης μειώνει τα επίπεδα εκπομπών NO.

Χρονισμός σπινθήρα

Ο χρονισμός του σπινθήρα επηρεάζει σημαντικά τα επίπεδα εκπομπών NO. Η προώθηση του χρονισμού, ούτως ώστε η καύση να συμβεί νωρίτερα στον θερμικό κύκλο, αυξάνει την πίεση αιχμής στη φιάλη (λόγω του ότι καίγεται περισσότερο καύσιμο πριν από τον θερμικό κύκλο (thermal cycle – TC) και επειδή η πίεση αιχμής πλησιάζει τον TC). Από την άλλη πλευρά, η επιβράδυνση του χρονισμού μειώνει τη μέγιστη πίεση στη φιάλη (επειδή καίγεται περισσότερο καύσιμο μετά τον TC).

Υψηλότερες μέγιστες πιέσεις συνεπάγονται με υψηλότερες θερμοκρασίες αιχμής στο αέριο καύσης και ως εκ τούτου, υψηλότερους ρυθμούς σχηματισμού NO. Σε αντίθετη περίπτωση και για χαμηλότερες μέγιστες πιέσεις, προκύπτουν χαμηλότεροι ρυθμοί σχηματισμού.

3.1.4. Άλλες Εκπομπές

Τα καυσαέρια των κινητήρων εσωτερικής καύσης περιέχουν σωματίδια συμπαγούς αιθάλης άνθρακα, τα οποία παράγονται στις πλούσιες σε καύσιμα ζώνες, εντός του κυλίνδρου κατά την καύση. Αυτά θεωρούνται ως καπνός καυσαερίων και είναι μια ανεπιθύμητη οσμή ρύπανσης. Η μέγιστη πυκνότητα εκπομπών των σωματιδίων, προκύπτει όταν ο κινητήρας βρίσκεται υπό έγχυση καυσίμου με μέγιστο φορτίο (για την παροχή μέγιστης ισχύος). Τα σωματίδια αιθάλης είναι συστάδες στερεών σφαιρών άνθρακα. Σύμφωνα με τον (Stephen, 2000) οι εν λόγω σφαίρες έχουν διάμετρο από 10–80 nm με τις περισσότερες να κυμαίνονται μεταξύ 15–30 nm. Ένα μόνο σωματίδιο αιθάλης περιέχει έως και 4000 σφαίρες άνθρακα.

Επιπρόσθετα και σύμφωνα με την έρευνα του (Valenti, 1995), η παραγωγή σωματιδίων μπορεί να μειωθεί με το σχεδιασμό του κινητήρα και τον έλεγχο των συνθηκών λειτουργίας. Σε πολλές περιπτώσεις όμως, αυτό προκαλεί άλλα δυσμενή αποτελέσματα. Εάν ο χρόνος καύσης παραταθεί με το σχεδιασμό του θαλάμου καύσης και τον έλεγχο χρονισμού, οι ποσότητες σωματιδίων στα καυσαέρια μπορούν να μειωθούν. Τα σωματίδια αιθάλης που δημιουργήθηκαν στο αρχικό στάδιο, θα έχουν μεγαλύτερο χρόνο να αναμειχθούν με οξυγόνο και να αναφλεγούν σε CO₂. Ωστόσο, μεγαλύτερος χρόνος καύσης σημαίνει υψηλή θερμοκρασία κυλίνδρου και περισσότερα παραγόμενα NO_x. Η αραιώση με EGR μειώνει τις εκπομπές NO_x αλλά αυξάνει τις εκπομπές σωματιδίων και HC. Η υψηλότερη πίεση έγχυσης δίνει λεπτότερο μέγεθος σταγονιδίων, το οποίο μειώνει τις εκπομπές HC και σωματιδίων αλλά αυξάνει τη θερμοκρασία του κυλίνδρου και τις εκπομπές NO_x. Τα συστήματα διαχείρισης κινητήρα είναι προγραμματισμένα να ελαχιστοποιούν τις εκπομπές NO_x, HC, CO και σωματιδίων, ελέγχοντας το χρονισμό ανάφλεξης, την πίεση ψεκασμού, το χρονισμό ψεκασμού ή/και το χρονισμό της βαλβίδας. Παρόλα αυτά, στους περισσότερους κινητήρες οι ποσότητες των σωματιδίων των καυσαερίων δεν μπορούν να μειωθούν σε αποδεκτά επίπεδα, αποκλειστικά και μόνο από το σχεδιασμό και τον έλεγχο του κινητήρα.

3.1.6 Καταλύτες καυσαερίων

3.2. Νομοθεσία και Αναγκαιότητα Εμβολοφόρων Μηχανών Νέας Τεχνολογίας

3.2.1. Απαγόρευση Κινητήρων Εσωτερικής Καύσης από την Ε.Ε.

Σύμφωνα με τη βιομηχανία, οι προτεινόμενοι κανόνες εκπομπών Euro 7 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής σε αυτοκίνητα, φορτηγά και λεωφορεία θα ισοδυναμούσαν με μια άτυπη μορφή απαγόρευσης των κινητήρων εσωτερικής καύσης από το 2025, εφόσον εφαρμοστούν στην τρέχουσα μορφή τους. Οι κανόνες «Euro 7» στοχεύουν να διασφαλίσουν ότι τα οχήματα είναι καθαρά καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας τους, βοηθώντας την Ευρώπη να επιτύχει τους στόχους της για τις εκπομπές ρύπων της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας. Οι ακριβείς λεπτομέρειες του μέτρου είναι ακόμη υπό συζήτηση, αλλά προκαλούν ήδη ανησυχία στην Ένωση Βιομηχανίας Μηχανολόγων Μηχανικών (Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbau – VDMA), η οποία είναι μια γερμανική εμπορική ένωση που εκπροσωπεί εταιρείες μηχανολογίας.

Η εν λόγω ένωση πιστεύει ότι η προγραμματισμένη υποχρέωση ότι τα νέα οχήματα στην Ευρώπη πρέπει να είναι πρακτικά και χωρίς εκπομπές ρύπων από το 2025 και μετά θα ήταν μια οικολογική, οικονομική και τεχνολογική παρέκκλιση. Σύμφωνα με την VDMA, οι προτάσεις για τον κανονισμό Euro 7 που συζητήθηκαν μέχρι στιγμής θέτουν σε κίνδυνο αλυσίδες αξίας πολύ πέρα από την αυτοκινητοβιομηχανία, οδηγώντας σε μια ουσιαστική απαγόρευση των αυτοκινήτων και φορτηγών που κινούνται αποκλειστικά με κινητήρες εσωτερικής καύσης. Η VDMA υποστηρίζει επίσης ότι η εισαγωγή των ηλεκτρονικών καυσίμων σημαίνει ότι ο κινητήρας εσωτερικής καύσης θα συνεχίσει να παίζει ρόλο στην τροπή προς τις πράσινες μεταφορές. Τα ηλεκτρονικά καύσιμα, όπως το υγρό υδρογόνο, μπορούν να δημιουργηθούν από ηλεκτρική ενέργεια που παρέχεται από ανανεώσιμες πηγές, προσφέροντας μια πράσινη εναλλακτική λύση στα ορυκτά καύσιμα. Ωστόσο, αυτά τα συνθετικά καύσιμα έχουν επί του παρόντος πολύ υψηλότερο κόστος παραγωγής και απαιτούν μεγάλες ποσότητες ανανεώσιμης ενέργειας για να είναι ουδέτερες από άνθρακα.

Ο Frans Timmermans, επικεφαλής της ΕΕ για την κλιματική πολιτική, δήλωσε ότι οι αποφάσεις θα ληφθούν σε διάλογο με την αυτοκινητοβιομηχανία, αλλά τόνισε ότι πρόθεσή του δεν ήταν να αποφύγει «δύσκολα θέματα και δύσκολες αποφάσεις». Ο Timmermans αναγνώρισε τον κρίσιμο ρόλο της κατασκευής αυτοκινήτων για την

ευρωπαϊκή οικονομία, αλλά δήλωσε ότι η βιομηχανία πρέπει τώρα να κινηθεί προς τα ηλεκτρικά οχήματα και τη χρήση υδρογόνου για βαρύτερες μεταφορές. Πρόσθεσε επίσης ότι μέσω του διαλόγου μπορεί να εξομαλυνθεί η κατάσταση και να λυθούν τα οποιαδήποτε προβλήματα αλλά ισχυρίστηκε ότι δεν μπορεί να υπάρξει περαιτέρω αναμονή και συγκεκριμένα έως το 2029, για επιπλέον μείωση των επιβλαβών εκπομπών.

3.2.2. Η Αντίδραση των Κατασκευαστών Αυτοκινήτων

Η Ένωση Ευρωπαϊκών Κατασκευαστών Αυτοκινήτων (European Automobile Manufacturers Association - ACEA) δήλωσε ότι δεν υπάρχουν «αποδείξεις» ότι τα σενάρια που προτείνονται στην πρόταση είναι τεχνικά εφικτά επί του παρόντος, ιδίως καθώς τα αυστηρά όρια εκπομπών πρέπει να τηρούνται ακόμη και σε ακραίες συνθήκες οδήγησης, όπως για ταξίδια σε μεγάλα υψόμετρα ή σε αντίξοες καιρικές συνθήκες (ACEA, 2022). Σύμφωνα με τον εκπρόσωπο της ACEA, πρακτικά αυτό σημαίνει ότι οι στόχοι που θα θέτουν οι κατασκευαστές για την ανάπτυξη μηχανικής πρέπει να είναι πολύ χαμηλότεροι από τα προβλεπόμενα όρια. Επιπλέον, η ACEA πιστεύει ότι αντί να ανακοινωθούν βραχυπρόθεσμα απαγορεύσεις στον κινητήρα εσωτερικής καύσης, αυτό που χρειάζεται είναι μια επείγουσα και ισχυρή πολιτική δέσμευση για τη δημιουργία όλων των ευνοϊκών συνθηκών προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια μετάβαση στην κινητικότητα μηδενικών εκπομπών όπως η υποδομή φόρτισης και τα κίνητρα.

Ο CCFA (Comite Constructeurs Francais Automobile), ένας όμιλος που εκπροσωπεί γαλλικές κατασκευαστικές εταιρίες αυτοκινήτων, συμπεριλαμβανομένης της Renault, δήλωσε ότι ανησυχεί για τα πρότυπα Euro 7, αλλά αναμένει αλλαγές πριν από τη δημοσίευση της τελικής έκδοσης. Σύμφωνα με τον CCFA οι πρώτες προτάσεις που έχουν γίνει απαιτούν μείωση από 60% έως 90% των εκπομπών, κάτι που δεν είναι καθόλου ρεαλιστικό. Είναι ένας πολύ περίπλοκος στόχος που πρέπει να επιτευχθεί σχετικά με τα μη ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Για τη μείωση και τη σταδιακή κατάργηση των εκπομπών, μια λύση θα ήταν η χρήση καθαρών ενεργειών όπως τα βιοκαύσιμα. Η άλλη λύση είναι να πωλούνται μόνο ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα, αλλά δεν είμαι σίγουρη ότι οι καταναλωτές θα τα εγκρίνουν και θα τα αγοράσουν.

Επιπρόσθετα, η Γερμανική Ένωση Αυτοκινητοβιομηχανίας (German Association of the Automotive Industry - VDA) κινείται και αυτή προς την ίδια κατεύθυνση και εκφράζει τις ανησυχίες της. Πιο συγκεκριμένα, η πρόεδρος της Ένωσης, Hildegard Müller

ανέφερε ότι το γεγονός είναι ότι η τρέχουσα πρόταση απειλεί να καταστήσει αδύνατο τον κινητήρα εσωτερικής καύσης και την πρόοδο που έχει σημειωθεί μέχρι στιγμής. Αυτό που πωλείται ως βιώσιμο είναι τελικά ακόμη και επιβλαβές για το κλίμα: η ανανέωση των υπαρχόντων οχημάτων δεν προχωρά αρκετά γρήγορα, οι καταναλωτές είναι άστατοι και τα προηγούμενα οχήματα συνεχίζουν να οδηγούνται. Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο για πολύ καιρό ακόμη. Τόνισε επίσης την αρνητική συνέπεια για την ηλεκτροκίνηση, υποδηλώνοντας ένα πρόωρο τέλος του κινητήρα εσωτερικής καύσης που εμποδίζει, καθιστά πιο ακριβή και καθυστερεί την τεράστια διαδικασία μετασχηματισμού των εταιριών αυτοκινητοβιομηχανίας (κατασκευαστές και προμηθευτές).

Η μεγάλη γερμανική κατασκευάστρια εταιρία οχημάτων BMW, δήλωσε ότι οι «αποδοτικοί» κινητήρες καύσης θα συνεχίσουν να διαδραματίζουν βασικό ρόλο για ορισμένους πελάτες, όπως για παράδειγμα για εκείνους που ζουν σε αγροτικές περιοχές, λόγω του ότι δεν έχουν εύκολη πρόσβαση στην υποδομή φόρτισης. Η εταιρεία εξέφρασε την ανησυχία ότι το Euro 7 θα έθετε παραμέτρους εκπομπών που δεν μπορούν τεχνικά να επιτευχθούν σε κάθε οδηγική κατάσταση, με αποτέλεσμα την έμμεση απαγόρευση του κινητήρα εσωτερικής καύσης. Επιπλέον, πιστεύει ότι μια περαιτέρω εξέλιξη προς το Euro 7 πρέπει να γίνει με αίσθηση αναλογίας και εστίαση στην περαιτέρω βελτίωση της ποιότητας του αέρα. Ο συνδυασμός των οριακών τιμών και των συνθηκών πλαισίου πρέπει να ρυθμιστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν με τεχνικά ουσιαστικό τρόπο και να έχουν μια ισορροπημένη σχέση κόστους-οφέλους.

Ακόμα, η επίσης γερμανική και τεράστιου βεληνεκούς εταιρία Mercedes-Benz, εξέφρασε επίσης την αντίθεσή της στην απαγόρευση εσωτερικής καύσης. Σύμφωνα με την εταιρεία, η μετατροπή σε κινητικότητα χωρίς εκπομπές απαιτεί χρόνο και πραγματοποιείται ήδη σήμερα μέσω της νομοθεσίας για το CO₂, των επιδοτήσεων για τους αγοραστές και των υποδομών. Από την άποψή μας, τα σενάρια που συζητούνται αυτή τη στιγμή δεν είναι τεχνικά εφικτά, δήλωσε η εταιρεία μέσω email στο EURACTIV. Στο ίδιο μήκος κύματος, η Volkswagen, μια από τις μάρκες αυτοκινήτων με τις μεγαλύτερες πωλήσεις στον κόσμο, δήλωσε ότι οι τρέχουσες προτάσεις Euro 7 θα οδηγήσουν σε αύξηση των τιμών στα οχήματα. Ειδικότερα, ανέφερε ότι τα σενάρια του Euro 7 που συζητήθηκαν θα ήταν δυνατά μόνο με εκτεταμένα τεχνικά μέτρα που είναι πολύπλοκα και επομένως πολύ δαπανηρά. Μια ολοκληρωμένη επέκταση των

καυσαερίων μετά την επεξεργασία και σε συνδυασμό με την ανάγκη για υβριδισμό θα έκανε τα περισσότερα οχήματα αρκετά πιο ακριβά. Όσον αφορά το ιδιαίτερα ευαίσθητο τμήμα των μικρών αυτοκινήτων, η επιπλέον χρέωση δεν θα ήταν πλέον αποδεκτή για πολλούς πελάτες.

3.2.3. Η Οπτική της Ε.Ε.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή αναφέρει ότι προσπαθεί να διατηρήσει την ανταγωνιστικότητα της αυτοκινητοβιομηχανίας προστατεύοντας παράλληλα την υγεία των πολιτών και το περιβάλλον. Το εκτελεστικό όργανο της ΕΕ επισημαίνει ότι δεν έχει ολοκληρώσει την αξιολόγησή για πιθανές λύσεις και ότι για την πρόταση Euro 7 έχει οριστεί ως προθεσμία το τέλος του 2022. Η Επιτροπή αξιολογεί προσεκτικά διάφορα σενάρια αυστηρότητας εκπομπών και θα εξισορροπήσει τις εκπομπές που εξοικονομούνται έναντι του πρόσθετου κόστους που απαιτείται για την επίτευξή τους. Είναι πιο πιθανό ότι οι κινητήρες εσωτερικής καύσης θα πάψουν να υπάρχουν εάν δεν ληφθούν εναρμονισμένα μέτρα για να καταστούν λιγότερο ρυπογόνοι» δήλωσε αξιωματούχος της εκτελεστικής εξουσίας της ΕΕ, τονίζοντας επίσης πόλεις και χώρες της ΕΕ που έχουν ήδη απαγορεύσει τα οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης για λόγους βελτίωσης του αέρα, ποιότητας και προστασίας των πολιτών.

4. Νέες Υβριδικές Τεχνολογίες Μηχανών Εσωτερικής Καύσης

4.1. Επίδραση των Νέων Τεχνολογιών στη Μείωση των Ρύπων

Τα τρέχοντα ζητήματα της κλιματικής αλλαγής και της περιβαλλοντικής ρύπανσης έχουν οδηγήσει στην εμφάνιση της έρευνας για τη μετάβαση στη βιωσιμότητα, η οποία στοχεύει στη δημιουργία περισσότερων βιώσιμων τρόπων παραγωγής και κατανάλωσης. Ειδικά στην περίπτωση της βιομηχανίας ηλεκτρικής ενέργειας και αυτοκινήτων, τέτοιες μεταβάσεις βασίζονται στην εμφάνιση βιώσιμων τεχνολογιών και στη σταδιακή κατάργηση των μη βιώσιμων τεχνολογιών. Ως αποτέλεσμα, η προσέγγιση του συστήματος τεχνολογικής καινοτομίας (technological innovation system - TIS) αναδείχθηκε ως ένα εξέχον πλαίσιο για τη διερεύνηση της ανάπτυξης και της διάδοσης των τεχνολογιών σε μεταβάσεις βιωσιμότητας. Σύμφωνα με τους (Carlsson & Stankiewicz, 1991), το TIS ασχολείται με την ανάπτυξη, την εφαρμογή και τη διάδοση μιας συγκεκριμένης εστιακής τεχνολογίας από μια συστημική προοπτική που περιλαμβάνει διάφορους αλληλεπιδρώντες παράγοντες. Ωστόσο, η ιδέα του TIS έχει επικεντρωθεί κυρίως στη διαδικασία μετασχηματισμού των αναδυόμενων τεχνολογιών, δηλαδή καλύπτοντας την περίοδο από την αρχική τους ανάπτυξη έως τη μαζική εμπορευματοποίηση. Σε αυτό το πλαίσιο, ο συγγραφέας (Markard, 2020) προτείνει τον κύκλο ζωής του TIS προκειμένου να επεκτείνει το τρέχον πλαίσιο προσθέτοντας έμφαση στην παρακμή των τεχνολογιών. Συγκεκριμένα, προσθέτει μια φάση παρακμής στην προηγούμενη ιδέα ανάπτυξης του TIS, η οποία σύμφωνα με τους (Hekkert et al., 2011) σταμάτησε στη φάση σταθεροποίησης και ωρίμανσης. Η τελευταία ενεργοποιείται εάν το TIS δεν είναι σε θέση να προσαρμοστεί στις αυξανόμενες μετασχηματιστικές πιέσεις που προκαλούνται από τις εξελίξεις στο ίδιο το σύστημα ή στο πλαίσιο του, π.χ. ανταγωνιστικές τεχνολογίες, απώλεια πολιτικής υποστήριξης και μεταβαλλόμενες προσδοκίες της κοινωνίας. Ορισμένες πρόσφατες εμπειρικές έρευνες όπως αυτές των (Isoaho & Markard, 2020) και (Markard et al., 2020), άρχισαν να θέτουν σε λειτουργία τον κύκλο ζωής του TIS προκειμένου να διερευνήσουν τις διαφορετικές διαστάσεις πτώσης και να χαρτογραφήσουν τη διαδικασία προσαρμογής του ώριμου TIS. Ωστόσο, η δυναμική της παρακμής εξακολουθεί να θεωρείται δύσκολη ως προς την πλήρη ερμηνεία της, ειδικά λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανές διαφορές στην τεχνολογική ανάπτυξη μεταξύ των εθνών ή των περιοχών.

Αναγνωρίζοντας αυτό το κενό γνώσης, η μελέτη των συγγραφέων (Weiss & Schere, 2022) διερευνά τη διαδικασία προσαρμογής ως προς την κατεύθυνση της τεχνολογικής ανάπτυξης, σε ένα ώριμο TIS. Εννοιολογικά, αυτό αντιπροσωπεύεται από αλλαγές στην κυρίαρχη τεχνολογική τροχιά που αποτυπώνουν την τεχνολογική ανάπτυξη ως μια σωρευτική και εξαρτώμενη από το μονοπάτι πρόοδο, μέσα σε ένα τεχνολογικό πρότυπο. Με τη σειρά της, η κυρίαρχη τροχιά καθορίζει την κατεύθυνση αναζήτησης και συσσώρευσης γνώσης στο TIS. Επιπλέον, οι συγγραφείς λαμβάνουν υπόψη διάφορες μελέτες για τη χωρική ανάπτυξη του TIS εξετάζοντας τη διαδικασία προσαρμογής σε ετερογενείς περιοχές του. Κατά συνέπεια και σύμφωνα με τους (Coenen & Truffer, 2012), οι συνθήκες του εδαφικού πλαισίου όσον αφορά τους πόρους, τους κανονισμούς και τον ανταγωνισμό επηρεάζουν την τοπική ανάπτυξη του TIS, οδηγώντας σε ουσιαστικές διαφορές μεταξύ των εθνών ή των περιφερειών. Ειδικότερα και προκειμένου να ανακαλύψουν τη δυναμική της τεχνολογικής προσαρμογής στο ώριμο TIS, οι (Weiss & Schere, 2022) εστιάζουν την εμπειρική τους ανάλυση στον κινητήρα εσωτερικής καύσης (internal combustion engine- ICE) όσον αφορά την αυτοκινητοβιομηχανία. Ιστορικά, το σύστημα ICE-TIS υφίσταται αυξανόμενη μετασχηματιστική πίεση λόγω αλλαγών στο περιβάλλον του, με το πιο σημαντικό να είναι οι κοινωνικές ανησυχίες για την περιβαλλοντική ρύπανση. Αυτό ανάγκασε τους κατασκευαστές αυτοκινήτων να βελτιώσουν την απόδοση και την αποδοτικότητα των ICE, χρησιμοποιώντας βενζίνη, ντίζελ (diesel) ή υβριδικά συστήματα μετάδοσης κίνησης. Είναι ενδιαφέρον να αναφερθεί ότι παρατηρούνται ιστορικά, διαφοροποιημένες τάσεις προς διαφορετικές τεχνολογίες μετάδοσης κίνησης στις κύριες αγορές αυτοκινήτων. Πιο συγκεκριμένα, από μια επίμονη ισχυρή θέση στην αγορά των αυτοκινήτων ντίζελ στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) σε σύγκριση με την άνοδο της υβριδικής τεχνολογίας, έως το κυρίαρχο εναλλακτικό σύστημα μετάδοσης κίνησης στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (ΗΠΑ) και την Ιαπωνία (Bohnsack et al., 2015). Τα ευρήματα αυτών των μελετών δείχνουν ότι το ICE-TIS φαίνεται να έχει αναπτύξει δομικές ζεύξεις με εδαφικά στοιχεία, τα οποία επηρέασαν σε μεγάλο βαθμό τη χωρική ανάπτυξη της τεχνολογίας. Με βάση τα παραπάνω, τίθενται ορισμένα ερευνητικά ερωτήματα όπως: Υπάρχει προσαρμογή της τεχνολογικής τροχιάς του ICE με την πάροδο του χρόνου λόγω μετασχηματιστικών πιέσεων; Παρατηρούνται διαφορές στην προσαρμογή των τροχιών σε διαφορετικές περιοχές στο ICE-TIS;

Προκειμένου να εξετάσουν τις αλλαγές των κυρίαρχων τεχνολογικών τροχιών και τις υποκείμενες διαδικασίες αναζήτησης γνώσης στο ICE-TIS, οι (Weiss & Schere, 2022) εφαρμόζουν τη μέθοδο της ανάλυσης κύριας διαδρομής στα δίκτυα αναφοράς διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας. Αυτή προσδιορίζει τις πιο σημαντικές διαδικασίες αναζήτησης γνώσης, αξιοποιώντας τη σωρευτική και εξαρτώμενη από τη διαδρομή φύση της ανάπτυξης γνώσης, σε όλο το δίκτυο. Σε σύγκριση με παρόμοιες μελέτες TIS π.χ. (Negro et al., 2008) και (Islam & Miyazaki, 2009), η εν λόγω προσέγγιση επιτρέπει την παρακολούθηση τυχόν αλλαγών στην κατεύθυνση της τεχνολογικής ανάπτυξης, ποσοτικά. Η εμπειρική τους ανάλυση ξεκινά με την εξέταση των αλλαγών στο ICE-TIS των ΗΠΑ με την πάροδο του χρόνου. Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι μέχρι το 2003 οι επικρατούσες διαδικασίες αναζήτησης γνώσης αφορούσαν βελτιώσεις στα συστήματα έγχυσης καυσίμου και φίλτρων καυσίμου για την αντιμετώπιση των μετασχηματιστικών πιέσεων στην επικράτεια των ΗΠΑ. Ένα ενδιαφέρον πόρισμα είναι ότι μετά το 2003, η ερευνητική δέσμευση μετατοπίστηκε προς το υβριδικό σύστημα μετάδοσης κίνησης, το οποίο μπορεί να απεικονιστεί ως μια «μέση στρατηγική» που επιτρέπει στους κατασκευαστές αυτοκινήτων να εκμεταλλεύονται τη συμπληρωματικότητα μεταξύ των επικρατούντων περιβαλλοντικών περιορισμών, των απαιτήσεων απόδοσης των πελατών και των δικών τους τεχνολογικών ικανοτήτων (Oltra, & Jean, 2005). Αντίστοιχα, για την ΕΕ, παρατηρείται μια κυρίαρχη τεχνολογική τροχιά που αφορά την τεχνολογία ντίζελ, ενώ για τις ΗΠΑ και την Ιαπωνία, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν το υβριδικό σύστημα μετάδοσης κίνησης ως την επικρατούσα διαδικασία αναζήτησης γνώσης. Λαμβάνοντας αυτό υπόψη, επισημαίνεται η ρύθμιση πολιτικής ως μία από τις βασικές διαφορές στις εδαφικές δομές TIS που προκαλούν αυτήν την ανισότητα.

Συνολικά, αναγνωρίζοντας τη δομή του συστήματος γνώσης TIS που εξαρτάται από τη διαδρομή και την επικράτεια, τα αποτελέσματά των μελετών αποτυπώνουν τη συνεχή δέσμευση των ευρωπαϊκών εταιρειών στην έρευνα της τεχνολογίας ντίζελ. Αντίστοιχα, εξαρτώμενες από το εδαφικό πλαίσιο, οι ιστορικές επιλογές που έγιναν από ευρωπαίους πολιτικούς και κατασκευαστές αυτοκινήτων, επηρέασαν τις επιδόσεις και τις περιβαλλοντικές αντισταθμίσεις μεταξύ των επιλογών του συστήματος μετάδοσης κίνησης και σε σύγκριση με τις ΗΠΑ και την Ιαπωνία, κατέδειξαν τον κινητήρα ντίζελ ως τον πιο πολλά υποσχόμενο. Όσον αφορά την ΕΕ και σύμφωνα με σχετικές εμπειρικές μελέτες, (Frenken et al., 2004) και (Köhler et al., 2013), αυτή η εξαγωγή

συμπερασμάτων δεν έχει ακόμη συζητηθεί καθώς οι προσεγγίσεις δεν λαμβάνουν υπόψη την εξέλιξη της δομής του δικτύου αναφοράς, στα διπλώματα ευρεσιτεχνίας.

Τέλος, τα αποτελέσματά που προκύπτουν από την έρευνα των (Bohnsack et al., 2015), βοηθούν στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η τεχνολογική διάσταση ενός ώριμου TIS προσαρμόζεται στις αναδυόμενες μετασχηματιστικές πιέσεις προς τη φάση της παρακμής. Το πιο σημαντικό κομμάτι είναι ότι απεικονίζουν την αναγκαιότητα που υπάρχει προκειμένου να εξεταστούν οι μετασχηματιστικές εξελίξεις όχι μόνο με την πάροδο του χρόνου, αλλά και σε χωρικά διαφοροποιημένες περιοχές του εστιακού TIS. Ως εκ τούτου, η εν λόγω έρευνα εστιάζει στη διαφορά μεταξύ των διεθνών και εδαφικών τεχνολογικών τροχιών ενός TIS, τονίζοντας έτσι την ανάγκη για συζήτηση σχετικά με πιθανά μέτρα πολιτικής και για την ευθυγράμμιση αυτών, κινούμενα προς περισσότερο βιώσιμες τεχνολογικές λύσεις. Στην επόμενη ενότητα αναλύεται ένα θεωρητικό πλαίσιο, το οποίο περιλαμβάνει την έννοια των τεχνολογικών τροχιών, των συστημάτων τεχνολογικής καινοτομίας και του πλαισίου κύκλου ζωής του TIS, καθώς και μια ιστορική αναδρομή του κινητήρα εσωτερικής καύσης.

Το πρώτο τεχνολογικό δομικό στοιχείο είναι η έννοια των τεχνολογικών τροχιών. Έχοντας αρχικά εισαχθεί από τον συγγραφέα (Dosi, 1982), οι τεχνολογικές τροχιές περιγράφουν τη σωρευτική και εξαρτώμενη από το μονοπάτι πρόοδο μιας τεχνολογίας, μέσα σε ένα τεχνολογικό πρότυπο. Το τελευταίο προσδιορίζει την έννοια της τεχνολογικής προόδου και ως εκ τούτου, προκαθορίζει τις κατευθύνσεις ανάπτυξης που πρέπει να ακολουθηθούν μαζί με ορισμένες τεχνο-οικονομικές ανταλλαγές. Επομένως, μια τροχιά διαμορφώνεται άμεσα από ιστορικές επιλογές που συνιστούν την εξάρτηση πορείας της τεχνολογικής ανάπτυξης, καθώς οι τρέχουσες επιλογές ανάπτυξης εξαρτώνται από το παρελθόν της. Επιπλέον, οι ιστορικές και οι τρέχουσες επιλογές καθορίζονται από τις συγκεκριμένες συνθήκες που περιβάλλουν την ανάπτυξη μιας τεχνολογίας. Αυτό σημαίνει ότι η μετάβαση από τη μια τροχιά στην άλλη συνδέεται με δυσκολίες, όχι μόνο από την άποψη του οικονομικού κόστους αλλά και λόγω της αβεβαιότητας για τις μελλοντικές τεχνολογικές εξελίξεις.

Η έννοια των τεχνολογικών τροχιών είναι ενσωματωμένη στο δεύτερο θεωρητικό δομικό στοιχείο, δηλαδή την έννοια του TIS, η οποία ασχολείται με την ανάπτυξη, τη χρήση και τη διάδοση μιας συγκεκριμένης εστιακής τεχνολογίας. Το υποκείμενο σύστημα μπορεί να απεικονιστεί ως ένα αλληλοεπιδρώντα σύνολο παραγόντων,

δικτύων, υποδομών και θεσμών που εμπλέκονται στην πρόοδο της εστιακής τεχνολογίας του TIS. Σε σύγκριση με τα εθνικά ή περιφερειακά συστήματα καινοτομίας, τα συστήματα τεχνολογικής καινοτομίας δεν έχουν οριστικά εδαφικά σύνορα και μπορούν να περικλείουν διάφορες ετερογενείς περιοχές, βιομηχανίες, τομείς και χώρες. Τα δομικά στοιχεία περιλαμβάνουν διαφορετικούς παράγοντες, δίκτυα και ιδρύματα, π.χ. κατασκευαστές, ερευνητικά ινστιτούτα, διοργανωτικές συμμαχίες, (υποστηρικτικές) δημόσιες πολιτικές ή κοινωνικούς κανόνες και προσδοκίες. Η διαδικασία καινοτομίας του TIS διαμορφώνεται από τις αλληλεπιδράσεις αυτών των διαφορετικών στοιχείων και ακολουθεί μια ορισμένη τεχνολογική τροχιά, η οποία επηρεάζει την κατεύθυνση αναζήτησης και συσσώρευσης γνώσης με την πάροδο του χρόνου στο TIS.

Το ίδιο το εστιακό TIS βρίσκεται σε ένα περιβάλλον, το οποίο συνεπάγεται όλους τους σχετικούς παράγοντες εκτός του εστιακού TIS, όπως δίκτυα, θεσμούς, ανταγωνιστικά ή συμπληρωματικά TIS και κοινωνικές και οικολογικές αλλαγές. Το εστιακό TIS και το πλαίσιο του είναι αλληλένδετα και μπορούν να επηρεάσουν το ένα το άλλο με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τους (Markard et al., 2016), το TIS και το πλαίσιο σχετίζονται μεταξύ τους είτε μέσω εξωτερικών συνδέσμων (σε αυτή τη περίπτωση το πλαίσιο επηρεάζει μόνο το TIS), είτε μέσω δομικών συζεύξεων (το πλαίσιο και το TIS επηρεάζουν το ένα το άλλο μέσω κοινών στοιχείων). Σύμφωνα με αυτό, η τροχιά της εστιακής τεχνολογίας και η συσσώρευση γνώσης διαμορφώνονται από τους δύο παράγοντες στο εστιακό TIS και από το πλαίσιο του.

4.2.Εναλλακτικά καύσιμα για κινητήρες εσωτερικής καύσης

Το πετρέλαιο είναι αδιαμφισβήτητα η μεγαλύτερη πηγή ενέργειας για κινητήρες εσωτερικής καύσης (internal combustion engines - ICE). Ωστόσο, η ταχεία εξάντληση του πετρελαίου λόγω του αυξανόμενου αριθμού οχημάτων, οι εκπομπές ρύπων στα προϊόντα καύσης του που απειλούν το οικολογικό σύστημα, καθώς και οι ανησυχίες για την ασφάλεια του εφοδιασμού λόγω των αποθεμάτων πετρελαίου που είναι άνισα κατανομημένα στον κόσμο (περίπου το 50 % βρίσκεται στη Μέση Ανατολή), ενθαρρύνει την εξερεύνηση πηγών καυσίμων που είναι πιο φιλικές προς το περιβάλλον και έχουν εκτεταμένα αποθέματα σε ολόκληρο τον πλανήτη (Markard et al., 2016).

Η βενζίνη και τα καύσιμα ντίζελ που παράγονται από αργό πετρέλαιο, μπορούν επίσης να παραχθούν συνθετικά από αέρια CO και H₂ με τη μέθοδο που ανακάλυψαν οι

Γερμανοί χημικοί Franz Fischer και Hans Tropsch το 1923. Η σύνθεση Fischer-Tropsch, μια κατοχυρωμένη μέθοδος από το 1926, παρέχει τη λήψη συνθετικού υγρού καυσίμου από πολλά διαφορετικά είδη πρώτων υλών, τα οποία προέρχονται από άνθρακα και υδρογόνο. Γενικά, ο άνθρακας, το φυσικό αέριο και το μεθάνιο χρησιμοποιούνται για τη λήψη μεγάλων ποσοτήτων CO και H₂ αερίων που είναι απαραίτητα για τις αντιδράσεις σύνθεσης. Σήμερα, η Γερμανία, η Ινδία, η Κίνα και η Νότια Αφρική διαθέτουν μεγάλα αποθέματα άνθρακα και παράγουν εμπορικά συνθετικά καύσιμα με σύνθεση Fischer-Tropsch (Schulz, 1999). Ωστόσο, επειδή οι συνθέσεις της συνθετικής βενζίνης και των καυσίμων ντίζελ είναι παρόμοιες με τη φυσική βενζίνη και τα καύσιμα ντίζελ, οι επιπτώσεις τους στις εκπομπές ρύπων που προκύπτουν από τα αυτοκίνητα, είναι επίσης πανομοιότυπες.

Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στους ICE παράγονται γενικά από πρωτογενείς πόρους. Για τη μετατροπή μιας πηγής σε καύσιμο και τη μεταφορά αυτού του καυσίμου σε ένα όχημα, πραγματοποιούνται αναλύσεις WTT (well to tank) όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (greenhouse gas – GHG). Οι εν λόγω αναλύσεις είναι ένας μέσος όρος όλων των εκπομπών GHG που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα από την παραγωγή, την επεξεργασία και την παράδοση ενός φορέα καυσίμου ή ενέργειας.

4.2.1. Ακετυλένιο

Το ακετυλένιο χρησιμοποιήθηκε ως καύσιμο σε κινητήρες εσωτερικής καύσης, στις αρχές του 1900. Ο Gustave Whitehead χρησιμοποίησε έναν κινητήρα 15 kW που τροφοδοτούσε με ακετυλένιο την ιπτάμενη μηχανή του το 1901. Προς τη δεκαετία του 1940, το ακετυλένιο άρχισε να χρησιμοποιείται στα αυτοκίνητα (Schobert, 2014). Εκείνη την εποχή είχαν εκδοθεί περίπου 4000 άδειες για τη μετατροπή οχημάτων σε εναλλακτικά καύσιμα και περισσότερες από τις μισές, αφορούσαν τη μετατροπή σε ακετυλένιο. Σήμερα, το ακετυλένιο χρησιμοποιείται μόνο σε μεταλλικές και χημικές βιομηχανίες και όχι σε οχήματα. Ωστόσο, οι πειραματικές μελέτες σχετικά με τη χρήση ακετυλενίου στους ICE, έχουν αποκτήσει δυναμική τα τελευταία χρόνια λόγω της υψηλής ταχύτητας της φλόγας και της πυκνότητας που έχει η ενέργεια. Το ακετυλένιο ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά από τον Edmund Davy το 1836 αλλά λησμονήθηκε γρήγορα. Το 1860, ο Marcellin Berthelot ανακάλυψε ξανά αυτήν την ένωση υδρογονάνθρακα και την ονόμασε «ακετυλένιο». Το ακετυλένιο, όντας το πρώτο μέλος

των αλκυνίων (C_nH_{2n-2}), είναι ένα άχρωμο και άοσμο αέριο. Όταν όμως παράγεται από καρβίδιο του ασβεστίου, αποκτά οσμή παρόμοια με αυτή του σκόρδου. Το αέριο ακετυλένιο δεν υπάρχει σε ποσότητες στη φύση, αλλά λαμβάνεται συνήθως από την αντίδραση του καρβιδίου ασβεστίου με το νερό (Odell, 1929). Το καρβίδιο του ασβεστίου (CaC_2) παράγεται με θέρμανση του μείγματος ασβέστη και οπτάνθρακα σε φούρνους ηλεκτρικού τόξου στους 2000–2100°C. Ο άσβεστος (CaO) παράγεται με θέρμανση του ανθρακικού ασβεστίου ($CaCO_3$) περίπου στους 900°C (Schobert, 2014).

Το ακετυλένιο έχει υψηλότερη ταχύτητα φλόγας και πυκνότητα ενέργειας από τη βενζίνη και το ντίζελ, επομένως οι κινητήρες ακετυλενίου θα μπορούσαν να προσεγγίσουν περισσότερο τη θερμοδυναμική, ιδανική απόδοση ενός κύκλου κινητήρα (Behera et al., 2014). Ωστόσο, ο αριθμός οκτανίων του ακετυλενίου είναι χαμηλότερος από άλλα καύσιμα που χρησιμοποιούνται σε κινητήρες εσωτερικής καύσης. Ως εκ τούτου, η μέγιστη ποσότητα κατανάλωσης ακετυλενίου περιορίζεται στην έναρξη της πυροδότησης. Σύμφωνα με τους (Lakshmanan & Nagarajan, 2009), η χαμηλότερη ενέργεια ανάφλεξης, η υψηλή ταχύτητα φλόγας, τα μεγάλα όρια αναφλεξιμότητας και ο χαμηλότερος αριθμός οκτανίων, οδηγούν σε πρόωρη ανάφλεξη και σε ένα ανεπιθύμητο φαινόμενο καύσης που ονομάζεται πυροδότηση (knock). Αυτά είναι τα κύρια προβλήματα που αντιμετωπίζονται κατά τη χρήση του ακετυλενίου ως καύσιμο σε κινητήρες εσωτερικής καύσης.

Στους κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα (spark-ignition engine – SI), το ακετυλένιο και η βενζίνη είτε εγχέονται στην πολλαπλή εισαγωγή, είτε εγχέονται απευθείας στον κύλινδρο. Έπειτα, το μείγμα αναφλέγεται με έναν σπινθηριστή στο τέλος της διαδρομής συμπίεσης. Στους κινητήρες ντίζελ, το ακετυλένιο είτε εισάγεται μαζί με τον αέρα εισαγωγής είτε εγχέεται απευθείας στον κύλινδρο και συμπιέζεται. Ωστόσο, το μείγμα αέρα-ακετυλενίου δεν αυτοαναφλέγεται λόγω της πολύ υψηλής θερμοκρασίας αυτανάφλεξής του. Μια μικρή ποσότητα καυσίμου ντίζελ που ονομάζεται πιλοτικό καύσιμο (pilot fuel), εγχέεται στο μείγμα προς το τέλος της διαδρομής συμπίεσης. Αρχικά, το πιλοτικό καύσιμο ντίζελ αυτοαναφλέγεται και στη συνέχεια αναφλέγει το μείγμα ακετυλενίου-αέρα, όπως ο σπινθηριστής. Με αυτόν τον τρόπο, οι κινητήρες ντίζελ διπλού καυσίμου συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά και των κινητήρων SI και εσωτερικής καύσης (Lakshmanan & Nagarajan, 2010).

Σύμφωνα με τις έρευνες των (İlhak et al., 2018) και (Gupta et al., 2018), τα κύρια πλεονεκτήματα της χρήσης ακετυλενίου ως μείγμα βενζίνης-ακετυλενίου σε κινητήρες SI είναι τα εξής:

- Τα μείγματα ακετυλενίου-βενζίνης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κινητήρες SI σε κάθε φορτίο, από χαμηλό έως πλήρες. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως μεμονωμένο καύσιμο σε μερικά φορτία.
- Εάν το ακετυλένιο αναμιχθεί με βενζίνη υπό στοιχειομετρικές συνθήκες, προκαλείται μείωση της κατανάλωσης βενζίνης σε μια σταθερή ισχύ εξόδου.
- Το ακετυλένιο αυξάνει το ανεπαρκές όριο καύσης (σε μερικά φορτία) στους κινητήρες SI. Ο κινητήρας μπορεί να λειτουργήσει σε πιο αδύνατες συνθήκες με μείγματα βενζίνης-ακετυλενίου.
- Το ακετυλένιο λειτουργεί σε κινητήρες ντίζελ με μια λειτουργία διπλού καυσίμου μέσω μιας μικρής τροποποίησης του κινητήρα και μειώνει τις εκπομπές NO_x, HC, CO και CO₂, συμβάλλοντας σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης καυσίμου ντίζελ. Όμως, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ενιαίο καύσιμο σε κινητήρες ντίζελ λόγω της υψηλής αναλογίας συμπίεσης.

Σύμφωνα με τους (Basha et al., 2016) και (Pravinkumar & Bhavsar, 2017), τα κύρια μειονεκτήματα του ακετυλενίου ως εναλλακτικού καυσίμου κινητήρα, είναι τα ακόλουθα:

- Το ακετυλένιο είναι ένα πολύ εκρηκτικό αέριο που είναι ευαίσθητο στην πίεση και τη θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό, σε οχήματα που το χρησιμοποιούν ως καύσιμο, θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη τα μέτρα ασφαλείας.
- Το ακετυλένιο είναι ένα καύσιμο με πολύ χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης και μπορεί να προκαλέσει πρόωρη ανάφλεξη στην πολλαπλή εισαγωγή.
- Καθώς η αντίσταση κρούσης του ακετυλενίου είναι χαμηλή, η αναλογία αέρα-καυσίμου πρέπει να ρυθμιστεί με ακρίβεια για να αποφευχθεί η πυροδότηση.
- Το ακετυλένιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως το μοναδικό καύσιμο σε κινητήρες SI, μόνο υπό συνθήκες πολύ άπαχου μίγματος αέρα-καυσίμου. Σε πολύ φτωχές συνθήκες, δεν μπορεί να αντληθεί η μέγιστη ισχύς από τον κινητήρα.
- Η αποθήκευση ακετυλενίου στα οχήματα είναι ακόμη ένα άλυτο πρόβλημα. Καθώς το ακετυλένιο αποσυντίθεται σε πίεση 2,5 bar, δεν μπορεί να αποθηκευτεί ως συμπιεσμένο αέριο όπως άλλα αέρια. Το ακετυλένιο

αποθηκεύεται διαλυμένο σε ακετόνη που περιέχεται σε μεταλλικό κύλινδρο με πορώδες υλικό πλήρωσης υπό πίεση 18 bar. Όταν οι κύλινδροι ακετυλενίου είναι άδειοι, δεν είναι δυνατή η επιτόπια πλήρωση. Ως εκ τούτου, η αποσυναρμολόγηση και η συναρμολόγηση του κυλίνδρου είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα.

4.2.2. Φυσικό Αέριο

Το φυσικό αέριο είναι ένα ορυκτό καύσιμο που βρίσκεται σε φυσικά καταφύγια, είτε είναι συνδεδεμένο με το πετρέλαιο είτε όχι. Το κόστος απόκτησης του από τη φύση είναι χαμηλότερο σε σχέση με άλλα ορυκτά καύσιμα. Το φυσικό αέριο αποτελείται από περίπου 90% μεθάνιο, 3% αιθάνιο, 3% άζωτο, 2% προπάνιο και άλλα ιχνοαέρια. Το μεθάνιο που είναι πάντα το κυρίαρχο συστατικό του φυσικού αερίου, είναι το πρώτο μέλος της οικογένειας των αλκανίων (Tangöz et al., 2015). Δεδομένου ότι έχει υψηλή αναλογία H/C, το φυσικό αέριο είναι γνωστό ως το καθαρότερο καύσιμο στα ορυκτά καύσιμα. Λόγω των οικολογικών πλεονεκτημάτων του, τα αστικά λεωφορεία πολλών χωρών λειτουργούν με κινητήρες φυσικού αερίου. Το φυσικό αέριο, το οποίο κανονικά θα έπρεπε να κυμαίνεται μεταξύ 180 και 280 ppm στην ατμόσφαιρα, έφτασε τα 405 ppm από τον Σεπτέμβριο του 2018 λόγω υπερβολικής χρήσης ορυκτών καυσίμων. Ως εκ τούτου, πολλές χώρες ενθαρρύνουν τη χρήση του φυσικού αερίου στα αυτοκίνητα, αντί για βενζίνη και ντίζελ. Επειδή το φυσικό αέριο αναμειγνύεται εξαιρετικά με τον αέρα, αναφλέγεται εύκολα, παρέχει καθαρή καύση και δίνει υψηλή θερμότητα. Η θερμική απόδοση των κινητήρων φυσικού αερίου είναι υψηλότερη από αυτή των βενζινοκινητήρων επειδή έχουν υψηλότερο λόγο συμπίεσης (Tangöz et al., 2015).

Σε αντίθεση με τους κινητήρες βενζίνης και ντίζελ, οι κινητήρες εσωτερικής καύσης με φυσικό αέριο, δεν απαιτούν εμπλουτισμό καυσίμου κατά την ψυχρή εκκίνηση και οι εκπομπές καυσαερίων δεν επηρεάζονται από τις χαμηλές θερμοκρασίες. Επιπρόσθετα, τα αυτοκίνητα φυσικού αερίου (Natural gas vehicles - NGV) παράγουν τιμές εκπομπών χαμηλότερες από το πρότυπο EURO 6. Σύμφωνα με την έκθεση της NGV Global, ο αριθμός των πρατηρίων NGV και καυσίμων στον κόσμο αυξάνεται ραγδαία. Βάση στοιχείων που δόθηκαν στη δημοσιότητα για το έτος 2018, η Κίνα κατατάχθηκε πρώτη στο NGV Park με 6.080.000 οχήματα και 8.400 πρατήρια καυσίμων και ακολούθησαν το Ιράν, η Ινδία και το Πακιστάν. Ο συνολικός αριθμός των NGV έφτασε τα 26.130.000 τον Ιούνιο του 2018.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα για τον τομέα μεταφοράς NGV προέρχεται από την πρόκληση αποθήκευσης φυσικού αερίου. Το φυσικό αέριο είναι ελαφρύτερο αέριο από τον αέρα. Ακόμα, ενώ η πυκνότητα του αέρα στο επίπεδο της θάλασσας (στους 15°C), είναι 1.225 kg/m³, η πυκνότητα του φυσικού αερίου ποικίλλει ανάλογα με τη σύνθεσή του, (συνήθως είναι περίπου 0,71 kg/m³). Καθώς το φυσικό αέριο είναι ένα ελαφρύ αέριο, η ενεργειακή πυκνότητα του ανά μονάδα όγκου είναι χαμηλή. Έτσι, προκειμένου να εξασφαλιστεί μια λογική απόσταση οδήγησης, ο όγκος αποθήκευσης θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος. Ευτυχώς, λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης της τεχνολογίας, το φυσικό αέριο έχει αρχίσει να αποθηκεύεται σε σωλήνες χάλυβα ή άνθρακα σε πίεση 200 bar με συμπιεστές υψηλής πίεσης. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η στάθμευση αυτοκινήτων φυσικού αερίου σε κλειστούς χώρους είναι επικίνδυνη για λόγους ασφαλείας. Σήμερα, τα αυτοκίνητα με κινητήρες φυσικού αερίου έχουν αυτονομία άνω των 300 μιλίων με ένα μόνο γέμισμα. Επίσης, το φυσικό αέριο δεν αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας όπως άλλα ορυκτά καύσιμα.

4.2.3. Αιθανόλη

Γενικά, η αιθανόλη παράγεται από ανανεώσιμες πηγές όπως η βιομάζα και η γεωργική πρώτη ύλη. Λόγω αυτού, έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως ως εναλλακτικό καύσιμο σε κινητήρες εσωτερικής καύσης. Ο αριθμός οκτανίων της αιθανόλης είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό οκτανίων της βενζίνης. Ο υψηλός αριθμός οκτανίων της αιθανόλης επιτρέπει τη χρήση της ως καύσιμο σε κινητήρα SI με υψηλότερο λόγο συμπίεσης. Η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης της αιθανόλης, αυξάνει το αποτέλεσμα ψύξης στον κύλινδρο, οδηγώντας σε αύξηση της ογκομετρικής απόδοσης (Tibaquirá et al., 2018). Η αιθανόλη καίγεται καθαρότερα σε σχέση με τη βενζίνη και το ντίζελ και παράγει λιγότερο CO και NO_x. Επίσης, έχει χαμηλή διαχυτικότητα και δυσκολία ανάφλεξης σε χαμηλή θερμοκρασία. Επομένως, η καύση δεν ολοκληρώνεται σε χαμηλή θερμοκρασία και το HC αυξάνεται σε σύγκριση με τη βενζίνη (σε χρήση αιθανόλης). Η χημική σύνθεση της αιθανόλης είναι C₂H₅OH ενώ το ποσοστό υδρογόνου της αιθανόλης είναι υψηλότερο από αυτό της βενζίνης.

Πρόσφατα, οι περιβαλλοντικές αρχές στα μεγάλα αστικά κέντρα εξέφρασαν τις ανησυχίες τους για την πραγματική επίδραση της χρήσης μειγμάτων αιθανόλης. Ειδικότερα, έως και 20% εν χρήσει οχημάτων χωρίς καμία τροποποίηση στη διάταξη της μονάδας ελέγχου κινητήρα (engine control unit - ECU) και για τις παραλλαγές

αυτών των επιπτώσεων κατά τα έτη λειτουργίας των εν λόγω οχημάτων (Tibaquirá et al., 2018). Η καθαρή αιθανόλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κινητήρες εσωτερικής καύσης, αλλά παρουσιάζονται και ορισμένα προβλήματα όπως τα ακόλουθα:

1. Λόγω του ότι η αιθανόλη έχει χαμηλή ταχύτητα φλόγας, έχει επίσης κακή λειτουργία ψυχρής εκκίνησης. Επομένως, η χρήση της ως καύσιμο κατά τους χειμερινούς μήνες είναι αρκετά δύσκολη.
2. Δεν υπάρχει επιβατικό αυτοκίνητο που να είναι σχεδιασμένο για αιθανόλη στο 100%. Η χρήση καθαρής αιθανόλης μπορεί να βλάψει τους κινητήρες ενώ ακόμη και οι κινητήρες που μπορούν να λειτουργήσουν με μείγματα βενζίνης-αιθανόλης, μπορούν να φτάσουν έως και το 85% αιθανόλης.
3. Η αιθανόλη είναι ένα διαβρωτικό καύσιμο. Έτσι, τα υλικά και οι επιφάνειες των τμημάτων του θαλάμου καύσης, αλλά και όλων των πλαστικών υλικών που έρχονται σε επαφή με το καύσιμο και το σύστημα ψεκασμού καυσίμου, πρέπει να βελτιωθούν περαιτέρω.

4.2.4. Υδρογόνο

Αν και το υδρογόνο είναι το πιο κοινό στοιχείο στον κόσμο, δεν υπάρχει στη φύση στην καθαρή του κατάσταση. Επομένως, πρέπει να παράγεται από πηγές όπως το νερό και το φυσικό αέριο. Σύμφωνα με τη μελέτη των (Bossel & Eliasson, 2003), ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος και η ενεργειακή απόδοση του υδρογόνου εξαρτάται από τον τρόπο παραγωγής του. Το υδρογόνο έχει μελετηθεί ως εναλλακτικό καύσιμο αερίου για μεγάλο χρονικό διάστημα. Έχει συμπεριφορές καθαρής καύσης και δεν αντιμετωπίζει ορισμένα προβλήματα που σχετίζονται με τα υγρά καύσιμα, όπως το κλείδωμα ατμού, η απόσβεση του κρύου τοιχώματος, η ανεπαρκής εξάτμιση και η άπαχη ανάμειξη. Καθώς φλέγεται το υδρογόνο, παράγει (κυρίως) νερό. Η καύση του υδρογόνου δεν απελευθερώνει τοξικά προϊόντα όπως οι υδρογονάνθρακες, το μονοξείδιο του άνθρακα και το διοξείδιο του άνθρακα. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του υδρογόνου είναι ότι δεν παράγει αέριο CO₂, το οποίο είναι μία από τις σημαντικότερες πηγές υπερθέρμανσης του πλανήτη. Επιπλέον, το υδρογόνο έχει ευρύτερο όριο ευφλεκτότητας από τη βενζίνη, το ντίζελ και το φυσικό αέριο, υψηλή ταχύτητα φλόγας και υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης. Επίσης, μπορεί να θερμανθεί εύκολα σε εξαιρετικά άπαχα μείγματα ενώ η ενέργεια που απαιτείται για την ανάφλεξη του μείγματος υδρογόνου-αέρα, είναι μόλις 0,02 MJ. Τέλος, το υδρογόνο μπορεί να

χρησιμοποιηθεί σε μεγάλους ρυθμούς συμπίεσης σε κινητήρες εσωτερικής καύσης, καθώς η θερμοκρασία αυτανάφλεξης του υδρογόνου είναι πολύ υψηλή. Λόγω των προαναφερθέντων ιδιοτήτων του, πολλές μελέτες όπως αυτές των (Ma et al., 2011) και (Yamin et al., 2000) έχουν εξετάσει εις βάθος, τη χρήση του σε κινητήρες εσωτερικής καύσης.

Παρά τα αρκετά και πολύ σημαντικά πλεονεκτήματά του, το υδρογόνο έχει και ορισμένα μειονεκτήματα. Λόγω της χαμηλής ενέργειας που απαιτείται για την ανάφλεξη του, το μείγμα αναφλέγεται αμέσως μόλις έρθει σε επαφή με ένα θερμό σημείο στον κύλινδρο. Ως αποτέλεσμα, μπορεί να προκληθεί πυροδότηση. Ένα άλλο μειονέκτημα του υδρογόνου είναι η χαμηλή ενεργειακή του πυκνότητα. Επιπλέον, οι σχηματισμοί των εκπομπών NOx αυξάνονται με την καύση υδρογόνου λόγω της υψηλής θερμοκρασίας της φλόγας. Πιο συγκεκριμένα, τα πειράματα που τροφοδοτήθηκαν από καθαρό υδρογόνο και βενζίνη στη μελέτη των (Kahraman et al., 2007), πραγματοποιήθηκαν σε τετρακύλινδρο, τετράχρονο κινητήρα SI με καρμπυρατέρ και με αναλογία συμπίεσης 8, 8:1. Ο χρονισμός ανάφλεξης ρυθμίστηκε στις 10° πριν από το ανώτατο νεκρό σημείο (top dead center - BTDC), ενώ ο κινητήρας λειτουργούσε μεταξύ 2600 και 3800 στροφών. Στην πειραματική μελέτη των (Wang et al., 2011), οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε στροφές κινητήρα 1400 rpm, με πίεση αέρα πολλαπλής 61,5 kPa, με χρονισμό σπινθήρα μέγιστης ροπής πέδησης (maximum brake torque – MBT) και με διαφορετικούς λόγους περίσσειας αέρα (1,0–2,6). Τέλος, στη μελέτη των (Ithak et al., 2019) για την προσομοίωση του υδροξυγόνου, η γραμμομοριακή αναλογία υδρογόνου-οξυγόνου καθορίστηκε στο 2:1 μέσω της προσαρμογής της διάρκειας έγχυσης υδρογόνου και οξυγόνου. Επιπλέον, υιοθετήθηκαν στις δοκιμές και τρία τυπικά κλάσματα όγκου υδροξυγόνου στο συνολικό αέριο εισαγωγής, με ποσοστά 0, 2 και 4%.

4.2.5. Εναλλακτικά Καύσιμα για Νέες Εφαρμογές ICE

Σήμερα, ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στη χρήση κινητήρων εσωτερικής καύσης είναι η παραγωγή επιβλαβών εκπομπών αερίων. Για το λόγο αυτό, έχουν διεξαχθεί πολλές μελέτες για τη μείωση των εκπομπών με παράλληλη διατήρηση των επιδόσεων του κινητήρα, χρησιμοποιώντας τις νέες εφαρμογές ICE όπως HCCI, RCCI, PCCI και PPC. Επιπλέον, για τον σκοπό της μείωσης των εκπομπών, ορισμένες από αυτές τις μελέτες επικεντρώθηκαν στη χρήση εναλλακτικών καυσίμων. Στους νέους

κινητήρες, οι εφαρμογές έχουν μια συγκεκριμένη διαδικασία κατά την οποία ένα ομοιογενές μείγμα αέρα και καυσίμου συμπιέζεται υπό ορισμένες συνθήκες. Βάση αυτών, προκύπτει αυτόματη ανάφλεξη στο τέλος της διαδρομής συμπίεσης, ακολουθούμενη από καύση, η οποία είναι σημαντικά ταχύτερη συγκριτικά με το συμβατικό ντίζελ ή την καύση Otto. Σύμφωνα με τους (Liu et al., 2018), η αυτόματη ανάφλεξη και η φάση καύσης στον κύλινδρο, ελέγχονται από τη στρωματοποίηση του μείγματος και το χρονισμό έγχυσης καυσίμου. Αυτές οι εφαρμογές κινητήρων σε σύγκριση με τους συμβατικούς κινητήρες, επιτρέπουν τη μείωση των εκπομπών οξειδίου του αζώτου και αιθάλης και την επίτευξη υψηλότερης θερμικής απόδοσης. Ωστόσο, είναι πολύ δύσκολο να ελεγχθεί η αυτόματη ανάφλεξη στους συγκεκριμένους κινητήρες.

Μία από τις πιο σημαντικές νέες εφαρμογές ICE, είναι η ανάφλεξη με ομογενή συμπίεση φορτίου (homogeneous charge compression ignition - HCCI). Για τον έλεγχο της διαδικασίας αυτόματης ανάφλεξης στον κινητήρα HCCI, χρησιμοποιούνται ως εναλλακτικό καύσιμο, ορισμένα καύσιμα με υψηλή θερμοκρασία αυτόματης ανάφλεξης. Η ανάφλεξη με συμπίεση ελεγχόμενης αντιδραστικότητας (Reactivity controlled compression ignition - RCCI), η ανάφλεξη με συμπίεση προαναμεμιγμένης φόρτισης (premixed charge compression ignition - PCCI) και η μερική προαναμεμιγμένη καύση (partially premixed combustion - PPC), αποτελούν τις υπόλοιπες νέες εφαρμογές ICE. Στις εφαρμογές του κινητήρα, το καύσιμο χαμηλής αντιδραστικότητας εισάγεται από την θύρα εισαγωγής προκειμένου να σχηματίσει ένα ομοιογενές μείγμα στον κύλινδρο, ενώ το καύσιμο με υψηλό αριθμό κετανίου εγχέεται απευθείας στον κύλινδρο για να ελέγξει τη φάση και τη διάρκεια της καύσης. Τα καύσιμα υψηλού οκτανίου ή η χαμηλή αντιδραστικότητα με αντίσταση στην αυθόρμητη ανάφλεξη, είναι πιο ευνοϊκά για καύση RCCI, PCCI και PPC. Για το λόγο αυτό, οι περισσότερες από τις μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σε κινητήρες RCCI, PCCI και PPC, επικεντρώνονται στο φυσικό αέριο και στην αιθανόλη ως εναλλακτικά καύσιμα (Esfahanian et al., 2017), (Elzahaby et al., 2017).

Ως αποτέλεσμα, οι παράμετροι λειτουργίας όπως ο τύπος καυσίμου, η σύνθεση του καυσίμου, η αναλογία καυσίμου αέρα και η θερμοκρασία εισόδου, παρατηρήθηκε ότι επηρεάζουν σημαντικά το καθεστώς λειτουργίας των νέων εφαρμογών ICE. Ωστόσο, εικάζεται ότι δεν έχει παρασχεθεί ένα πλήρες πλαίσιο για κάθε τρόπο λειτουργίας εφαρμογής ICE. Τέλος και παρά τη σημαντική μείωση των εκπομπών NO_x και αιθάλης

που παρατηρείται στις εφαρμογές που τροφοδοτούνται από τα εναλλακτικά καύσιμα, σημαντικές ποσότητες εκπομπών HC και CO που σχηματίζονται, συνεχίζουν να προκαλούν προβληματισμό.

5. Συμπεράσματα

Η αστική ατμοσφαιρική ρύπανση είναι ένα πολύ περίπλοκο πρόβλημα. Οι εκπομπές καυσαερίων από κινητήρες εσωτερικής καύσης ευθύνονται για το μεγαλύτερο μέρος αυτού του προβλήματος (Ferguson, 1986). Σύμφωνα με τη μελέτη του Ferguson (1986), μέχρι τα μέσα του 20ου αιώνα, ο αριθμός των μηχανών εσωτερικής καύσης ανά τον κόσμο ήταν αρκετά μικρός. Λόγω αυτού, η ρύπανση που εξέπεμπαν κυμαίνονταν σε ανεκτά επίπεδα, ενώ με τη βοήθεια του ηλιακού φωτός, το περιβάλλον παρέμενε σχετικά καθαρό. Όσο όμως αυξανόταν ο παγκόσμιος πληθυσμός, οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας, τα εργοστάσια και ο αριθμός των αυτοκινήτων, η μόλυνση του αέρα έφτασε σε μη επιθυμητά επίπεδα. Κατά τη δεκαετία του 1940, η ατμοσφαιρική ρύπανση αναγνωρίστηκε για πρώτη φορά ως πρόβλημα στη λεκάνη του Λος Άντζελες, στην Καλιφόρνια (Obert, 1973). Δύο βασικές αιτίες ήταν η μεγάλη πληθυσμιακή πυκνότητα και οι φυσικές καιρικές συνθήκες της περιοχής. Ο μεγάλος πληθυσμός οδήγησε στη δημιουργία πολλών μονάδων και εργοστασίων παραγωγής ενέργειας, καθώς και σε ραγδαία αύξηση του αριθμού αυτοκινήτων ανά τον κόσμο. Ο καπνός και άλλοι ρύποι που προέρχονταν από τα εργοστάσια και τα αυτοκίνητα, σε συνδυασμό με την ομίχλη που αποτελούσε σύνθετο φαινόμενο σε αυτή την ωκεάνια περιοχή, οδήγησαν στη δημιουργία αιθαλομίχλης.

Ο στόχος κάθε κινητήρα είναι να μετατρέψει την ενέργεια από κάποια άλλη μορφή σε «μηχανική δύναμη και κίνηση». Οι όροι «μηχανική δύναμη» και «κίνηση» χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν τον σημαντικό ρόλο που έχουν τόσο η παραγωγή εργασίας (δηλαδή πόση δύναμη μπορεί να εφαρμοστεί για να μετακινηθεί κάτι σε μια δεδομένη απόσταση), καθώς και η ισχύς εξόδου (πόσο γρήγορα μπορεί να ολοκληρωθεί η εργασία). Στρέφοντας την προσοχή στην μετατρεπόμενη ενέργεια για την αντίστοιχη επιθυμητή εργασία, ένα εξαιρετικά σημαντικό κομμάτι είναι η χημική ενέργεια που περιέχεται στη μοριακή δομή ενός καυσίμου υδρογονάνθρακα. Τα γεγονότα ότι χρειάζεται ενέργεια για να σπάσει ένας χημικός δεσμός και ότι η ενέργεια απελευθερώνεται όταν σχηματίζονται νέοι δεσμοί, είναι θεμελιώδη για κάθε χημική αντίδραση (Awogbemi et al., 2021). Εάν η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά το σχηματισμό νέων δεσμών είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για τη διάσπαση των παλαιών δεσμών, παράγονται μια εξώθερμη αντίδραση αλλά και καθαρή ενέργεια που διατίθεται για την εκτέλεση της εργασίας. Επιπρόσθετα, θεμελιώδης για κάθε κινητήρα εσωτερικής καύσης, είναι η αντίδραση ενός καυσίμου υδρογονάνθρακα με

οξυγόνο ούτως ώστε να σχηματιστεί διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Αυτή η αντίδραση καύσης είναι εξαιρετικά εξώθερμη (απελευθερώνεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας). Σε αυτή τη περίπτωση, ο στόχος του κινητήρα θα είναι να χρησιμοποιεί αυτή την ενέργεια επανειλημμένα, αποτελεσματικά και οικονομικά (Zhen & Wang, 2015).

Η καύση του καυσίμου στους κινητήρες εσωτερικής καύσης, είναι σχεδόν πάντα ημιτελής και δημιουργεί εκπομπές που μολύνουν το περιβάλλον και συμβάλλουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη, στην όξινη βροχή, στην αιθαλομίχλη, σε οσμές, σε αναπνευστικά και πολλά άλλα προβλήματα υγείας. Σύμφωνα με τον (Caton, 2001), οι κύριες αιτίες αυτών των εκπομπών είναι οι μη στοιχειομετρικές συνθήκες καύσης, η διάσταση του αζώτου, οι ακαθαρσίες στο καύσιμο, ο αέρας και άλλες λειτουργικές παράμετροι του κινητήρα. Οι εκπομπές που προκαλούν ανησυχία είναι οι υδρογονάνθρακες (hydrocarbons - HC), το μονοξείδιο του άνθρακα (carbon monoxide - CO), τα οξείδια του αζώτου (nitrogen oxides - NO_x), το θείο και τα στερεά σωματίδια άνθρακα.

Τα τρέχοντα ζητήματα της κλιματικής αλλαγής και της περιβαλλοντικής ρύπανσης έχουν οδηγήσει στην εμφάνιση της έρευνας για τη μετάβαση στη βιωσιμότητα, η οποία στοχεύει στη δημιουργία περισσότερων βιώσιμων τρόπων παραγωγής και κατανάλωσης. Ειδικά στην περίπτωση της βιομηχανίας ηλεκτρικής ενέργειας και αυτοκινήτων, τέτοιες μεταβάσεις βασίζονται στην εμφάνιση βιώσιμων τεχνολογιών και στη σταδιακή κατάργηση των μη βιώσιμων τεχνολογιών. Ως αποτέλεσμα, η προσέγγιση του συστήματος τεχνολογικής καινοτομίας (technological innovation system - TIS) αναδείχθηκε ως ένα εξέχον πλαίσιο για τη διερεύνηση της ανάπτυξης και της διάδοσης των τεχνολογιών σε μεταβάσεις βιωσιμότητας. Σύμφωνα με τους (Carlsson & Stankiewicz, 1991), το TIS ασχολείται με την ανάπτυξη, την εφαρμογή και τη διάδοση μιας συγκεκριμένης εστιακής τεχνολογίας από μια συστημική προοπτική που περιλαμβάνει διάφορους αλληλεπιδρώντες παράγοντες. Ωστόσο, η ιδέα του TIS έχει επικεντρωθεί κυρίως στη διαδικασία μετασχηματισμού των αναδυόμενων τεχνολογιών, δηλαδή καλύπτοντας την περίοδο από την αρχική τους ανάπτυξη έως τη μαζική εμπορευματοποίηση. Σε αυτό το πλαίσιο, ο συγγραφέας (Markard, 2020) προτείνει τον κύκλο ζωής του TIS προκειμένου να επεκτείνει το τρέχον πλαίσιο προσθέτοντας έμφαση στην παρακμή των τεχνολογιών. Συγκεκριμένα, προσθέτει μια φάση παρακμής στην προηγούμενη ιδέα ανάπτυξης του TIS, η οποία σύμφωνα με τους (Hekkert et al., 2011) σταμάτησε στη φάση σταθεροποίησης και ωρίμανσης. Η τελευταία

ενεργοποιείται εάν το TIS δεν είναι σε θέση να προσαρμοστεί στις αυξανόμενες μετασχηματιστικές πιέσεις που προκαλούνται από τις εξελίξεις στο ίδιο το σύστημα ή στο πλαίσιο του, π.χ. ανταγωνιστικές τεχνολογίες, απώλεια πολιτικής υποστήριξης και μεταβαλλόμενες προσδοκίες της κοινωνίας. Ορισμένες πρόσφατες εμπειρικές έρευνες όπως αυτές των (Isoaho & Markard, 2020) και (Markard et al., 2020), άρχισαν να θέτουν σε λειτουργία τον κύκλο ζωής του TIS προκειμένου να διερευνήσουν τις διαφορετικές διαστάσεις πτώσης και να χαρτογραφήσουν τη διαδικασία προσαρμογής του ώριμου TIS. Ωστόσο, η δυναμική της παρακμής εξακολουθεί να θεωρείται δύσκολη ως προς την πλήρη ερμηνεία της, ειδικά λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανές διαφορές στην τεχνολογική ανάπτυξη μεταξύ των εθνών ή των περιοχών.

Βιβλιογραφία

- ACEA, A. (2018). Report: Vehicles in Use Europe, 2017.
- Awad, O. I., Ma, X., Kamil, M., Ali, O. M., Ma, Y., & Shuai, S. (2020). Overview of polyoxymethylene dimethyl ether additive as an eco-friendly fuel for an internal combustion engine: Current application and environmental impacts. *Science of The Total Environment*, 715, 136849.
- 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.
- Basha, S. K., Rao, P. S., & Gopal, K. R. (2016). Experimental investigation of performance of acetylene fuel based diesel engine. *Int. J. Adv. Technol*, 7(1), 151.
- Behera, P., Murugan, S., & Nagarajan, G. (2014). Dual fuel operation of used transformer oil with acetylene in a DI diesel engine. *Energy conversion and management*, 87, 840-847.
- Bergek, A., Hekkert, M., Jacobsson, S., Markard, J., Sandén, B., & Truffer, B. (2015). Technological innovation systems in contexts: Conceptualizing contextual structures and interaction dynamics. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 16, 51-64.
- Berggren, C., & Magnusson, T. (2012). Reducing automotive emissions—The potentials of combustion engine technologies and the power of policy. *Energy Policy*, 41, 636-643.
- Bermúdez, V., Serrano, J. R., Piqueras, P., & Sanchis, E. J. (2017). On the impact of particulate matter distribution on pressure drop of wall-flow particulate filters. *Applied Sciences*, 7(3), 234.
- Berndes, G., Ahlgren, S., Börjesson, P., & Cowie, A. L. (2013). Bioenergy and land use change—state of the art. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2(3), 282-303.
- Binz, C., & Truffer, B. (2017). Global Innovation Systems—A conceptual framework for innovation dynamics in transnational contexts. *Research policy*, 46(7), 1284-1298.

- Blaich, M. (2019). El motor diésel y la conflictiva tendencia a la electrificación. *Interempresas.net. Automoción*.
- Bloom, I., Cole, B. W., Sohn, J. J., Jones, S. A., Polzin, E. G., Battaglia, V. S., ... & Case, H. L. (2001). An accelerated calendar and cycle life study of Li-ion cells. *Journal of power sources*, 101(2), 238-247.
- Bohnsack, R., Kolk, A., & Pinkse, J. (2015). Catching recurring waves: low-emission vehicles, international policy developments and firm innovation strategies. *Technological Forecasting and Social Change*, 98, 71-87.
- Bossel, U., & Eliasson, B. (2003). Energy and the hydrogen economy. *European Fuel Cell News*, January 2003.
- Brand, C. (2016). Beyond 'Dieselgate': Implications of unaccounted and future air pollutant emissions and energy use for cars in the United Kingdom. *Energy Policy*, 97, 1-12.
- Buchal, C., Karl, H. D., & Sinn, H. W. (2019). Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: was zeigt die CO₂-Bilanz?. *ifo Schnelldienst*, 72(08), 40-54.
- Cames, M., & Helmers, E. (2013). Critical evaluation of the European diesel car boom-global comparison, environmental effects and various national strategies. *Environmental Sciences Europe*, 25(1), 1-22.
- Carbot-Rojas, D. A., Escobar-Jiménez, R. F., Gómez-Aguilar, J. F., & Téllez-Anguiano, A. C. (2017). A survey on modeling, biofuels, control and supervision systems applied in internal combustion engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1070-1085.
- Carlsson, B., & Stankiewicz, R. (1991). On the nature, function and composition of technological systems. *Journal of evolutionary economics*, 1(2), 93-118.
- Caton, J. A. (2001). Comparisons of instructional and complete versions of thermodynamic engine cycle simulations for spark-ignition engines. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 29(4), 283-306.
- Coenen, L., & Truffer, B. (2012). Places and spaces of sustainability transitions: geographical contributions to an emerging research and policy field. *European Planning Studies*, 20(3), 367-374.

- Cormos, A. M., & Cormos, C. C. (2017). Techno-economic evaluations of post-combustion CO₂ capture from sub-and super-critical circulated fluidised bed combustion (CFBC) power plants. *Applied Thermal Engineering*, *127*, 106-115.
- de Coninck, H., Revi, A., Babiker, M., Bertoldi, P., Buckeridge, M., Cartwright, A., ... & Sugiyama, T. (2018). Chapter 4: strengthening and implementing the global response. *Global warming of, 1*.
- Desantes, J. M., Benajes, J., Serrano, J. R., Arnau, F., Garcia-Cuevas, L. M., Serra, J. M., & Catalán, D. (2019). Motor de Combustión Interna. *OEPM Madrid: Madrid, Spain, 201930285*.
- Ding, Y., Sui, C., & Li, J. (2018). An experimental investigation into combustion fitting in a direct injection marine diesel engine. *Applied Sciences*, *8*(12), 2489.
- Dosi, G. (1982). Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. *Research policy*, *11*(3), 147-162.
- Edwards, R., Larivé, J. F., Rickeard, D., & Weindorf, W. (2014). JEC Well-to-wheels analysis: Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. *JRC Tech. Rep.*
- Elzahaby, A. M., Elkelawy, M., Bastawissi, H. A. E., El-Malla, S. M., & Naceb, A. M. M. (2017, April). Effect of Ethanol–Diesel Fuel Blends on Autoignition and Combustion Characteristics in HCCI Engines. In *International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology* (Vol. 17, No. AEROSPACE SCIENCES & AVIATION TECHNOLOGY, ASAT-17–April 11-13, 2017, pp. 1-15). The Military Technical College.
- Emilsson, E., & Dahllöf, L. (2019). Lithium-Ion Vehicle Battery Production-Status 2019 on Energy Use, CO₂ Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling.
- Esfahanian, V., Salahi, M. M., Gharehghani, A., & Mirsalim, M. (2017). Extending the lean operating range of a premixed charged compression ignition natural gas engine using a pre-chamber. *Energy*, *119*, 1181-1194.
- European Environment Agency. 2019.

- Ferguson, C. R., & Engines, I. C. (1986). Applied thermosciences. *Internal Combustion Engines*.
- Fonseca, L., Olmeda, P., Novella, R., & Valle, R. M. (2020). Internal combustion engine heat transfer and wall temperature modeling: an overview. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(5), 1661-1679.
- Foray, D. (1997). The dynamic implications of increasing returns: Technological change and path dependent inefficiency. *International Journal of Industrial Organization*, 15(6), 733-752.
- Frenken, K., Hekkert, M., & Godfroij, P. (2004). R&D portfolios in environmentally friendly automotive propulsion: variety, competition and policy implications. *Technological Forecasting and Social Change*, 71(5), 485-507.
- García, F. (2019). Alarma ante la posible escasez de baterías para vehículos eléctricos. *El Mundo: Madrid, Spain*.
- Gupta, K., Suthar, K., Jain, S. K., Agarwal, G. D., & Nayyar, A. (2018). Design and experimental investigations on six-stroke SI engine using acetylene with water injection. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(23), 23033-23044.
- Hannula, I., & Reiner, D. M. (2019). Near-term potential of biofuels, electrofuels, and battery electric vehicles in decarbonizing road transport. *Joule*, 3(10), 2390-2402.
- Hascic, I., de Vries, F. P., Johnstone, N., & Medhi, N. (2008). Effects of environmental policy on the type of innovation: the case of automotive emissions control technologies. *OECD Journal: Economic Studies*, 2009(1), 49-66.
- Hassan, A. A., El-Kassaby, M. M., Osman, M. M., & Hanafy, M. A. (2006). A theoretical investigation on the effect of exhaust gas recycle versus excess air on spark-ignition engine performance. *Mechanical Eng. Dept., Faculty of Eng., Alexandria University, Alexandria Engineering Journal*, 45(3).
- Hekkert, M., Negro, S., Heimeriks, G., & Harmsen, R. (2011). Technological Innovation System Analysis: A Manual for Analysts. Utrecht University, Report for Joint Research Center. *Energy Institute*.
- Heywood, J. B. (1988). Combustion engine fundamentals. 1ª Edição. *Estados Unidos*, 25, 1117-1128.

- Hoag, K., & Dondlinger, B. (2016). The Internal Combustion Engine—An Introduction. In *Vehicular Engine Design* (pp. 1-16). Springer, Vienna.
- Hong, N., Guan, Y., Yang, B., Zhong, J., Zhu, P., Ok, Y. S., ... & Liu, A. (2020). Quantitative source tracking of heavy metals contained in urban road deposited sediments. *Journal of hazardous materials*, *393*, 122362.
- İlhak, M. İ., Akansu, S. O., Kahraman, N., & Ünalın, S. (2018). Experimental study on an SI engine fuelled by gasoline/acetylene mixtures. *Energy*, *151*, 707-714.
- İlhak, M. I., Tangoz, S., Akansu, S. O., & Kahraman, N. (2019). Alternative Fuels for Internal Combustion Engines. *The Future of Internal Combustion Engines*.
- Islam, N., & Miyazaki, K. (2009). Nanotechnology innovation system: Understanding hidden dynamics of nanoscience fusion trajectories. *Technological forecasting and social change*, *76*(1), 128-140.
- Isoaho, K., & Markard, J. (2020). The politics of technology decline: discursive struggles over coal phase-out in the UK. *Review of Policy Research*, *37*(3), 342-368.
- Jeswani, H. K., Chilvers, A., & Azapagic, A. (2020). Environmental sustainability of biofuels: a review. *Proceedings of the Royal Society A*, *476*(2243), 20200351.
- Kahraman, E., Ozcanlı, S. C., & Ozerdem, B. (2007). An experimental study on performance and emission characteristics of a hydrogen fuelled spark ignition engine. *International journal of hydrogen energy*, *32*(12), 2066-2072.
- Kalkan, N., Luo, K. H., & Guk, E. (2014). An Overview of Hydrogen Fuelled Internal Combustion Engines. *IJASR International Journal of Academic and Scientific Research*, *2*(4), 58-70.
- Källmén, A., Andersson, S., & Rydberg, T. (2019). Well-to-wheel LCI data for HVO fuels on the Swedish market. *Tillgänglig: https://f3centre.se/app/uploads/f3-23-17_2019-04_Källmén-et-al_Rev_190508_FINAL.pdf* Hämtad, 20(12), 2019.
- Kamil, M., Rahman, M. M., & Bakar, R. A. (2014). An integrated model for predicting engine friction losses in internal combustion engines. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, *9*(1), 1695-1708.

- Kamiya, G., Axsen, J., & Crawford, C. (2019). Modeling the GHG emissions intensity of plug-in electric vehicles using short-term and long-term perspectives. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 69, 209-223.
- Kan, H., Chen, R., & Tong, S. (2012). Ambient air pollution, climate change, and population health in China. *Environment international*, 42, 10-19.
- Köhler, J., Schade, W., Leduc, G., Wiesenthal, T., Schade, B., & Espinoza, L. T. (2013). Leaving fossil fuels behind? An innovation system analysis of low carbon cars. *Journal of Cleaner Production*, 48, 176-186.
- Kramer, U., Ortloff, F., & Stollenwerk, S. (2018). *Defossilizing the Transportation Sector: Options and Requirements for Germany*. FVV.
- Lakshmanan, T., & Nagarajan, G. (2009). Performance and emission of acetylene-aspirated diesel engine. *JJMIE*, 3(2), 125-130.
- Lakshmanan, T., & Nagarajan, G. (2010). Experimental investigation on dual fuel operation of acetylene in a DI diesel engine. *Fuel processing technology*, 91(5), 496-503.
- Lee, W., Schubert, E., Li, Y., Li, S., Bobba, D., & Sarlioglu, B. (2016). Overview of electric turbocharger and supercharger for downsized internal combustion engines. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 3(1), 36-47.
- Lehmann, A., Berger, M., & Finkbeiner, M. (2018). Life Cycle Based CO₂ Emission Credits: Options for Improving the Efficiency and Effectiveness of Current Tailpipe Emissions Regulation in the Automotive Industry. *Journal of Industrial Ecology*, 22(5), 1066-1079.
- Li, J., Jiao, J., & Tang, Y. (2019). An evolutionary analysis on the effect of government policies on electric vehicle diffusion in complex network. *Energy policy*, 129, 1-12.
- Liu, J., Wang, J., & Zhao, H. (2018). Optimization of the injection parameters and combustion chamber geometries of a diesel/natural gas RCCI engine. *Energy*, 164, 837-852.

- Liu, Y., Chen, H., Gao, J., Li, Y., Dave, K., Chen, J., ... & Perricone, G. (2021). Comparative analysis of non-exhaust airborne particles from electric and internal combustion engine vehicles. *Journal of Hazardous Materials*, 420, 126626.
- Luján, J. M., Bermúdez, V., Dolz, V., & Monsalve-Serrano, J. (2018). An assessment of the real-world driving gaseous emissions from a Euro 6 light-duty diesel vehicle using a portable emissions measurement system (PEMS). *Atmospheric Environment*, 174, 112-121.
- Ma, F., He, Y., Deng, J., Jiang, L., Naeve, N., Wang, M., & Chen, R. (2011). Idle characteristics of a hydrogen fueled SI engine. *International journal of hydrogen energy*, 36(7), 4454-4460.
- Markard, J. (2020). The life cycle of technological innovation systems. *Technological Forecasting and Social Change*, 153, 119407.
- Markard, J., Bento, N., Kittner, N., & Nunez-Jimenez, A. (2020). Destined for decline? Examining nuclear energy from a technological innovation systems perspective. *Energy Research & Social Science*, 67, 101512.
- Markard, J., Wirth, S., & Truffer, B. (2016). Institutional dynamics and technology legitimacy—A framework and a case study on biogas technology. *Research Policy*, 45(1), 330-344.
- Mehlig, D., Woodward, H., Oxley, T., Holland, M., & ApSimon, H. (2021). Electrification of Road Transport and the Impacts on Air Quality and Health in the UK. *Atmosphere*, 12(11), 1491.
- Message, M. (2017). Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles Transp.
- Milovanoff, A., Kim, H. C., De Kleine, R., Wallington, T. J., Posen, I. D., & MacLean, H. L. (2019). A dynamic fleet model of US light-duty vehicle lightweighting and associated greenhouse gas emissions from 2016 to 2050. *Environmental science & technology*, 53(4), 2199-2208.
- Ming, Z., Jun, Z., Stefano, C., & Luigi, L. (2017). Particulate matter emission suppression strategies in a turbocharged gasoline direct-injection engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 139(10).

- MUNDO, E. (2018). España pretende prohibir las matriculaciones de coches diésel, gasolina e híbridos a partir de 2040. *El Mundo*.
- Negro, S. O., Hekkert, M. P., & Smits, R. E. (2008). Stimulating renewable energy technologies by innovation policy. *Science and Public Policy*, 35(6), 403-416.
- Obert, E. F. (1973). Internal combustion engines and air pollution.
- Odell, W. W. (1929). *Facts Relating to the Production and Substitution of Manufactured Gas for Natural Gas* (No. 301). Department of Commerce, Bureau of Mines.
- O'Driscoll, R., Stettler, M. E., Molden, N., Oxley, T., & ApSimon, H. M. (2018). Real world CO₂ and NO_x emissions from 149 Euro 5 and 6 diesel, gasoline and hybrid passenger cars. *Science of the total environment*, 621, 282-290.
- Oltra, V., & Jean, M. S. (2005). The dynamics of environmental innovations: three stylised trajectories of clean technology. *Economics of Innovation and New Technology*, 14(3), 189-212.
- Owczuk, M., Matuszewska, A., Wojs, M. K., & Orlinski, P. (2018). The effect of fuel type used in the spark-ignition engine on the chemical composition of exhaust gases. *Przemysl Chemiczny*, 97(11), 1910-1915.
- Payri, R., De La Morena, J., Monsalve-Serrano, J., Pesce, F. C., & Vassallo, A. (2019). Impact of counter-bore nozzle on the combustion process and exhaust emissions for light-duty diesel engine application. *International Journal of Engine Research*, 20(1), 46-57.
- Pietrzak, K., & Pietrzak, O. (2020). Environmental effects of electromobility in a sustainable urban public transport. *Sustainability*, 12(3), 1052.
- Pravinkumar, S. C., & Bhavsar, A. A. (2017). Experimental investigation of diesel engine operating parameters for a mixture of acetylene and turpentine oil with diesel by design of experiment. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 3(2), 11-16.
- Rakopoulos, C. D., Antonopoulos, K. A., Rakopoulos, D. C., & Hountalas, D. T. (2008). Multi-zone modeling of combustion and emissions formation in DI diesel engine operating on ethanol–diesel fuel blends. *energy conversion and management*, 49(4), 625-643.

- Ritchie, H., & Roser, M. (2020). CO₂ and greenhouse gas emissions. *Our world in data*.
- Santos, I. T. (2020). Confronting governance challenges of the resource nexus through reflexivity: A cross-case comparison of biofuels policies in Germany and Brazil. *Energy Research & Social Science*, 65, 101464.
- Schulz, H. (1999). Short history and present trends of Fischer–Tropsch synthesis. *Applied Catalysis A: General*, 186(1-2), 3-12.
- Serrano, J. R. (2017). Imagining the future of the internal combustion engine for ground transport in the current context. *Applied Sciences*, 7(10), 1001.
- Serrano, J. R., Novella, R., & Piqueras, P. (2019). Why the development of internal combustion engines is still necessary to fight against global climate change from the perspective of transportation. *Applied Sciences*, 9(21), 4597.
- Serrano, J. R., Novella, R., Gomez-Soriano, J., & Martinez-Hernandez, P. J. (2018). Computational Methodology for Knocking Combustion Analysis in Compression-Ignited Advanced Concepts. *Applied Sciences*, 8(10), 1707.
- Serrano, J. R., Piqueras, P., Abbad, A., Tabet, R., Bender, S., & Gómez, J. (2019). Impact on reduction of pollutant emissions from passenger cars when replacing Euro 4 with Euro 6d diesel engines considering the altitude influence. *Energies*, 12(7), 1278.
- Stephen, R. (2000). Turns. An introduction to combustion: concepts and applications. *Mechanical Engineering Series. McGraw Hill*.
- Talupula, N. M. B., Rao, P. S., Kumar, B. S. P., & Praveen, C. (2017). Alternative fuels for internal combustion engines: overview of current research. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering(SSRGIJME)* volume, 4.
- Tang, L., Rizzoni, G., & Cordoba-Arenas, A. (2016). Battery life extending charging strategy for plug-in hybrid electric vehicles and battery electric vehicles. *IFAC-PapersOnLine*, 49(11), 70-76.
- Tangöz, S., Akansu, S. O., Kahraman, N., & Malkoç, Y. (2015). Effects of compression ratio on performance and emissions of a modified diesel engine fueled by HCNG. *international journal of hydrogen energy*, 40(44), 15374-15380.

- Tibaquirá, J. E., Huertas, J. I., Ospina, S., Quirama, L. F., & Niño, J. E. (2018). The effect of using ethanol-gasoline blends on the mechanical, energy and environmental performance of in-use vehicles. *Energies*, *11*(1), 221.
- Times, F. (2019). Dyson Presses UK Government for Earlier Petrol Car Ban. *Financial Times*.
- Tripathi, G., Dhar, A., & Sadiki, A. (2018). Recent advancements in after-treatment technology for internal combustion engines—an overview. *Advances in Internal Combustion Engine Research*, 159-179.
- Uning, R., Latif, M. T., Othman, M., Juneng, L., Mohd Hanif, N., Nadzir, M. S. M., ... & Takriff, M. S. (2020). A review of Southeast Asian oil palm and its CO2 fluxes. *Sustainability*, *12*(12), 5077.
- Valenti, M. (1995). Pollution-reducing cars. *Mechanical Engineering*, *117*(7), 12-12.
- Viet Nguyen, D., & Nguyen Duy, V. (2018). Numerical analysis of the forces on the components of a direct diesel engine. *Applied Sciences*, *8*(5), 761.
- Wang, S., Ji, C., Zhang, J., & Zhang, B. (2011). Improving the performance of a gasoline engine with the addition of hydrogen–oxygen mixtures. *International journal of hydrogen energy*, *36*(17), 11164-11173.
- Wappelhorst, S. (2020). The end of the road? An overview of combustion-engine car phase-out announcements across Europe. *Washington, DC: International Council on Clean Transportation*.
- Weiss, D., & Scherer, P. (2022). Mapping the Territorial Adaptation of Technological Innovation Systems—Trajectories of the Internal Combustion Engine. *Sustainability*, *14*(1), 113.
- Yamin, J. A., Gupta, H. N., Bansal, B. B., & Srivastava, O. N. (2000). Effect of combustion duration on the performance and emission characteristics of a spark ignition engine using hydrogen as a fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, *25*(6), 581-589.
- Yip, H. L., Srna, A., Yuen, A. C. Y., Kook, S., Taylor, R. A., Yeoh, G. H., ... & Chan, Q. N. (2019). A review of hydrogen direct injection for internal combustion engines: towards carbon-free combustion. *applied sciences*, *9*(22), 4842.

Zhen, X., & Wang, Y. (2015). An overview of methanol as an internal combustion engine fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 477-493.

Available online: [berkeleyearth.org/wp-content/uploads/2017/01/Europe-air-pollution.png](https://www.berkeleyearth.org/wp-content/uploads/2017/01/Europe-air-pollution.png), 2019

BP Statistical Review of World Energy. June 2018.

Broom, D. (2019, March). The dirty secret of electric vehicles. In *The World Economic Forum: Geneva, Switzerland*.