ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Προδιαγραφές EURO7 και η εξέλιξη στη χρήση των Εμβολοφόρων ΜΕΚ»

ΣΤΑΘΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

Α.Μ.: 6747

Επιβλέπων Καθηγητής:

Τζιράκης Ευάγγελος

ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2026

HELLENIC MEDITERRANEAN UNIVERSITY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

Thesis for the Undergraduate Degree

«EURO7 specifications and the evolution on use of internal combustion engines»

STATHAKIS EMMANOUEL

Student ID Number: 6747

Thesis Supervisor:

Tzirakis Evangelos

IRAKLION 2026

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2, 4 και 6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας, δεν προσβάλλει πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν αποτελεί προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής. Οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται αποκλειστικά στις βιβλιογραφικές παραπομπές.

Αποδέχομαι ότι η Βιβλιοθήκη του Ιδρύματος δύναται, χωρίς τροποποίηση του περιεχομένου της εργασίας, να τη διαθέτει σε ηλεκτρονική μορφή μέσω της Ψηφιακής Βιβλιοθήκης, να την αναπαράγει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και μορφότυπο, καθώς και να διατηρεί περισσότερα του ενός αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.

Ευχαριστίες:

Ολοκληρώνοντας την παρούσα πτυχιακή εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Τζιράκη Ευάγγελο, για τη συνεργασία και για την ευκαιρία που μου έδωσε, μέσω αυτής, να ολοκληρώσω τον κύκλο των σπουδών μου.

Ευχαριστώ επίσης τους διδάσκοντες του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών για τις γνώσεις και τα εφόδια που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, ευχαριστώ όσους στήριξαν την προσπάθεια αυτή.

Περίληψη Εργασίας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάζει τη νέα ευρωπαϊκή προδιαγραφή ορίων εκπομπών ρύπων, γνωστή ως Euro 7, με έμφαση στις τεχνικές και λειτουργικές επιπτώσεις της στους εμβολοφόρους κινητήρες εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) και στη μελλοντική πορεία της αυτοκινητοβιομηχανίας. Αρχικά παρουσιάζεται η ιστορική εξέλιξη των ευρωπαϊκών προτύπων εκπομπών, από το Euro 1 έως και το Euro 6, με σκοπό τη διαμόρφωση ενός σαφούς πλαισίου αναφοράς σχετικά με την αυστηροποίηση των απαιτήσεων και τους περιβαλλοντικούς στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Στη συνέχεια αναλύονται οι βασικοί τύποι ΜΕΚ, καθώς και οι τεχνολογίες που έχουν εφαρμοστεί διαχρονικά για τη μείωση των εκπομπών ρύπων και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Το κύριο μέρος της εργασίας επικεντρώνεται στις αλλαγές που εισάγει το πρότυπο Euro 7, όπως τα αυστηρότερα όρια εκπομπών, οι αναθεωρημένες διαδικασίες δοκιμών και οι αυξημένες απαιτήσεις σε πραγματικές συνθήκες οδήγησης. Παρουσιάζονται οι τεχνικές παρεμβάσεις που απαιτούνται για τη συμμόρφωση των ΜΕΚ, καθώς και οι προκλήσεις που αναμένεται να αντιμετωπίσουν οι κατασκευαστές σε επίπεδο κόστους, τεχνολογικής πολυπλοκότητας και προσαρμογής των υφιστάμενων μοντέλων.

Παράλληλα εξετάζονται εναλλακτικές τεχνολογίες, όπως η ηλεκτροκίνηση, η χρήση υδρογόνου, οι κυψέλες καυσίμου και τα συνθετικά καύσιμα, ως συμπληρωματικές ή μελλοντικές λύσεις στη μετάβαση προς οχήματα χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών. Τέλος, αξιολογούνται οι κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις της εφαρμογής του Euro 7, καθώς και οι προοπτικές διατήρησης ή σταδιακής απόσυρσης των ΜΕΚ στο μεταβαλλόμενο ενεργειακό και τεχνολογικό τοπίο.

Λέξεις-κλειδία

- Πρότυπα εκπομπών Euro 7
- Μηχανές εσωτερικής καύσης (ICE)
- Ηλεκτροκίνηση
- Συνθετικά καύσιμα (e-fuels)
- Βιοκαύσιμα
- Υδρογόνο
- Φίλτρα σωματιδίων (DPF, GPF)
- Συστήματα επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής (SCR)
- Στρατηγική downsizing
- Τεχνολογίες ψεκασμού και ανάφλεξης
- Εναλλακτικά καύσιμα
- Υβριδικά οχήματα
- Καινοτομία στην αυτοκινητοβιομηχανία
- Κόστος συμμόρφωσης
- Βιωσιμότητα

Περίληψη στα Αγγλικά (Abstract)

This thesis examines the new Euro 7 emission standard, focusing on its technical and operational impact on internal combustion engines (ICE) and the future direction of the automotive industry. It begins with an overview of the historical development of European emission regulations, from Euro 1 to Euro 6, outlining the progressive tightening of pollutant limits and the underlying objectives of the European Union regarding cleaner and more sustainable transportation. The main types of ICE are subsequently presented, together with the technologies employed to improve efficiency and reduce harmful emissions.

The core of the thesis focuses on the changes introduced by Euro 7, including stricter emission limits, revised testing procedures, and more demanding real-driving requirements. The technical modifications required for compliance are discussed, along with the challenges manufacturers are expected to face in terms of cost, engineering complexity, and the adaptation of existing engine platforms.

In addition, the study explores alternative and emerging technologies such as electrification, hydrogen combustion, fuel cells, and synthetic fuels as potential pathways toward low- or zero-emission mobility. Finally, the economic and societal implications of Euro 7 are assessed, highlighting its impact on vehicle pricing, the automotive market, and the broader transition of the transport sector in the coming years.

Keywords

- Euro 7 emission standards
- Internal combustion engines (ICE)
- Electrification
- Synthetic fuels (e-fuels)
- Biofuels
- Hydrogen
- Particulate filters (DPF, GPF)
- Selective catalytic reduction (SCR)
- Downsizing strategy
- Fuel injection and ignition technologies
- Alternative fuels
- Hybrid vehicles
- Automotive industry innovation
- Compliance costs
- Sustainability

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη Εργασίας..... 1
Λέξεις-κλειδία..... 2
Περίληψη στα Αγγλικά (Abstract)..... 3
Keywords..... 4
Κατάλογος εικόνων:..... 6
Εισαγωγή..... 7
Σκοπός εργασίας..... 8
Κεφάλαιο 1: Ιστορική εξέλιξη των προδιαγραφών Euro..... 9
1.1 Γενικά για τα πρότυπα Euro στην Ευρωπαϊκή Ένωση..... 9
1.2 Οι προδιαγραφές Euro 1 έως Euro 6..... 10
1.3 Στόχοι και επιδιώξεις των προδιαγραφών Euro..... 13
1.4 Τεχνολογικές παρεμβάσεις για τη συμμόρφωση των ΜΕΚ στα προηγούμενα στάδια Euro..... 14
Κεφάλαιο 2: Οι εμβολοφόρες ΜΕΚ και οι τεχνολογικές τους εξελίξεις..... 17
2.1 Βασικά είδη ΜΕΚ (βενζίνη – πετρέλαιο)..... 17
2.2 Συστήματα ψεκασμού και καύσης..... 21
2.3 Τεχνολογίες μείωσης εκπομπών..... 26
2.4 Τάσεις βελτίωσης ενεργειακής απόδοσης..... 33
Κεφάλαιο 3: Το Πρότυπο Euro 7..... 36
3.1 Νέες απαιτήσεις και όρια εκπομπών..... 36
3.2 Τρόποι μέτρησης και δοκιμών..... 39
3.3 Επιπτώσεις των νέων απαιτήσεων στις ΜΕΚ..... 42
3.4 Τεχνολογικές λύσεις για συμμόρφωση στο Euro 7..... 44
3.5 Προκλήσεις για τους κατασκευαστές..... 47
Κεφάλαιο 4: Εναλλακτικές τεχνολογίες και μελλοντικές τάσεις..... 49
4.1 Ηλεκτροκίνηση και υβριδικά συστήματα..... 49
4.2 Χρήση υδρογόνου σε εμβολοφόρες ΜΕΚ..... 53
4.3 Κυψέλες καυσίμου..... 56
4.4 Συνθετικά και εναλλακτικά καύσιμα..... 60
Κεφάλαιο 5: Συγκριτική αξιολόγηση και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις..... 64
5.1 Οικονομική επίδραση της μετάβασης στο Euro 7..... 64
5.2 Επιπτώσεις στην αυτοκινητοβιομηχανία..... 68
5.3 Επιπτώσεις στους καταναλωτές και στην αγορά..... 71
5.4 Προοπτικές και πιθανές μελλοντικές εξελίξεις..... 73
Συμπεράσματα..... 77
Βιβλιογραφία:..... 81
Παράρτημα Α: Λίστα Συντομογραφιών..... 84
Παράρτημα Β: Λίστα Ξενόγλωσσων Όρων..... 88

Κατάλογος εικόνων:

Εικόνα 1.1 Εξέλιξη των ορίων εκπομπών από το Euro 1 έως το Euro 6 για βενζινοκινητήρες και πετρελαιοκινητήρες…….. 12

Εικόνα 2.1 Τυπικό διάγραμμα λειτουργίας τετράχρονου κινητήρα σπινθηροανάφλεξης
(SI)..... 17

Εικόνα 2.2 Βασικό σχηματικό διάγραμμα τετράχρονου κινητήρα αυτανάφλεξης (CI)..... 19

Εικόνα 2.3 Σύγκριση συστημάτων ψεκασμού PFI και GDI σε βενζινοκινητήρες…. 22

Εικόνα 2.4 Σχηματικό διάγραμμα συστήματος common rail με αντλία υψηλής πίεσης και ηλεκτρονικούς εγχυτήρες…….. 24

Εικόνα 2.5 Σχηματική απεικόνιση συστήματος μετά-επεξεργασίας καυσαερίων σε πετρελαιοκινητήρα.……28

Εικόνα 2.6 Δομή φίλτρου σωματιδίων Diesel (DPF) τύπου wall-flow…….. 29

Εικόνα 2.7 Τυπική διάταξη συστήματος SCR με δοχείο AdBlue, δοσομετρητή και καταλύτη αναγωγής……...……. 30

Εικόνα 2.8 Σχηματικό διάγραμμα συστήματος EGR με ψυγείο και βαλβίδα ελέγχου ροής……. 31

Εικόνα 3.1 Σύγκριση ορίων εκπομπών Euro 6d και Euro 7 για επιβατικά οχήματα...37

Εικόνα 3.2 Διάταξη φορητού συστήματος μέτρησης εκπομπών εγκατεστημένου σε όχημα για δοκιμές πραγματικής οδήγησης……..... 40

Εικόνα 4.1 Σχηματική απεικόνιση βασικών αρχιτεκτονικών υβριδικών οχημάτων: (A) παράλληλη, (B) σειριακή και (C) μικτή/series-parallel διάταξη……...……. 50

Εικόνα 4.2 Σχηματικό διάγραμμα αρχιτεκτονικής οχήματος κυψέλης καυσίμου..... 58

Εικόνα 5.1 Σύγκριση άμεσου κόστους εφαρμογής του Euro 7 μεταξύ εκτιμήσεων βιομηχανίας και Ευρωπαϊκής Επιτροπής…… 65

Εισαγωγή

Η ραγδαία ανάπτυξη των οδικών μεταφορών κατά τις τελευταίες δεκαετίες έχει συμβάλει καθοριστικά στην οικονομική πρόοδο, την κοινωνική κινητικότητα και την τεχνολογική εξέλιξη, αποτελώντας βασικό πυλώνα της σύγχρονης κοινωνικής και παραγωγικής δραστηριότητας. Ωστόσο, η συνεχής αύξηση του αριθμού των οχημάτων συνοδεύεται από σημαντικές περιβαλλοντικές προκλήσεις, με κυριότερη την επιβάρυνση της ατμόσφαιρας μέσω των εκπομπών ρύπων από τις μηχανές εσωτερικής καύσης (Internal Combustion Engines, ICE, στο εξής ΜΕΚ). Οι εκπομπές αυτές, όπως το μονοξείδιο του άνθρακα (Carbon Monoxide, CO), τα οξείδια του αζώτου (Nitrogen Oxides, NOx), οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες (Hydrocarbons, HC) και τα αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter, PM), συνδέονται άμεσα με προβλήματα δημόσιας υγείας, τη ρύπανση των αστικών κέντρων και τη συνολική υποβάθμιση της ποιότητας ζωής. Παράλληλα, οι επιπτώσεις τους στην κλιματική αλλαγή καθιστούν επιτακτική τη λήψη αποτελεσματικών μέτρων για τη μείωση των εκπομπών (European Commission, 2022).

Ανταποκρινόμενη στις προκλήσεις αυτές, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 μια σειρά κανονισμών εκπομπών, γνωστών ως πρότυπα Euro. Κάθε νέο πρότυπο εισάγει αυστηρότερα όρια εκπομπών και απαιτεί από τους κατασκευαστές την εφαρμογή ολοένα και πιο αποδοτικών τεχνολογιών ελέγχου των ρύπων. Από το Euro 1 έως το Euro 6 έχουν υιοθετηθεί πολυάριθμες τεχνολογικές λύσεις, όπως η βελτίωση του ψεκασμού καυσίμου, τα συστήματα ανακυκλοφορίας καυσαερίων (Exhaust Gas Recirculation, EGR), οι καταλύτες οξείδωσης, τα φίλτρα σωματιδίων (Diesel Particulate Filter, DPF / Gasoline Particulate Filter, GPF) και τα συστήματα επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής (Selective Catalytic Reduction, SCR) (Heywood, 2018; Johnson, 2016; Twigg, 2011).

Παρά τις σημαντικές βελτιώσεις που έχουν επιτευχθεί, οι σύγχρονες απαιτήσεις για βιώσιμες μετακινήσεις και ο περιορισμός της κλιματικής αλλαγής οδηγούν στην ανάγκη για μια νέα γενιά κανονισμών. Το πρότυπο Euro 7 έρχεται να ανταποκριθεί σε αυτή την ανάγκη, αυστηροποιώντας περαιτέρω τα όρια εκπομπών και διευρύνοντας το πεδίο εφαρμογής τους. Για πρώτη φορά δίνεται έμφαση όχι μόνο στις εκπομπές του κινητήρα, αλλά και σε άλλες πηγές ρύπανσης, όπως τα σωματίδια από τα φρένα

και τα ελαστικά, γνωστές ως μη-εξατμιστικές εκπομπές (non-exhaust emissions, NEE). Επιπλέον, εισάγονται αυστηρότερες διαδικασίες δοκιμών, με αυξημένες απαιτήσεις διάρκειας ζωής των συστημάτων ελέγχου ρύπων και πιο απαιτητικές συνθήκες οδήγησης τόσο σε εργαστηριακό περιβάλλον (World-harmonised Light Vehicles Test Procedure, WLTP) όσο και σε πραγματικές συνθήκες δρόμου (Real Driving Emissions, RDE) (Council of the European Union, 2024; ICCT, 2024; JRC, 2021).

Οι αλλαγές αυτές αναμένεται να επηρεάσουν καθοριστικά την εξέλιξη των εμβολοφόρων ΜΕΚ, απαιτώντας τη χρήση νέων υλικών, εξελιγμένων συστημάτων καύσης, αποδοτικότερης θερμικής διαχείρισης και ανθεκτικότερων τεχνολογιών επεξεργασίας καυσαερίων. Παράλληλα, η αυτοκινητοβιομηχανία βρίσκεται σε φάση μετάβασης, κατά την οποία εναλλακτικές μορφές ενέργειας, όπως η ηλεκτροκίνηση, τα υβριδικά συστήματα (Hybrid Electric Vehicles, HEV / Plug-in Hybrid Electric Vehicles, PHEV), η χρήση υδρογόνου και τα συνθετικά καύσιμα (e-fuels), αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία στις στρατηγικές των κατασκευαστών (Ricardo, 2021; ICCT, 2024).

Σε αυτό το πλαίσιο, η αυξανόμενη αυστηρότητα των κανονισμών εκπομπών δεν αποτελεί μόνο περιβαλλοντική αναγκαιότητα, αλλά και βασικό παράγοντα που επηρεάζει άμεσα την τεχνολογική εξέλιξη της αυτοκινητοβιομηχανίας, λειτουργώντας ως καταλύτης για την ανάπτυξη νέων τεχνικών λύσεων. Η παρούσα εργασία επιδιώκει να παρουσιάσει ολοκληρωμένα το κανονιστικό και τεχνολογικό περιβάλλον που διαμορφώνει το πρότυπο Euro 7, να εξετάσει την εξέλιξη των εμβολοφόρων ΜΕΚ και τις επιπτώσεις του νέου προτύπου, καθώς και να αναδείξει τον ρόλο των εναλλακτικών τεχνολογιών στη μεταβατική αυτή περίοδο (ICCT, 2024; European Commission, 2022).

Σκοπός εργασίας

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση των προδιαγραφών του προτύπου Euro 7 και η αξιολόγηση των επιπτώσεών τους στις εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ). Η εργασία αποσκοπεί στην ολοκληρωμένη παρουσίαση του νέου κανονιστικού πλαισίου, των τεχνικών απαιτήσεων που αυτό επιβάλλει και

των αναγκαίων προσαρμογών που καλούνται να υλοποιήσουν οι κατασκευαστές οχημάτων. Παράλληλα, εξετάζεται η τεχνολογική εξέλιξη των ΜΕΚ έως σήμερα, οι λύσεις που εφαρμόστηκαν για τη συμμόρφωση με τα προηγούμενα πρότυπα Euro και οι λόγοι για τους οποίους το Euro 7 χαρακτηρίζεται ως το πιο απαιτητικό πρότυπο μέχρι σήμερα.

Επιπλέον, στόχος της εργασίας είναι η παρουσίαση και συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών τεχνολογιών που αναπτύσσονται στη σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία, όπως η ηλεκτροκίνηση, η χρήση υδρογόνου, οι κυψέλες καυσίμου και τα συνθετικά καύσιμα, καθώς και η αποτίμηση του ρόλου τους στη μετάβαση προς οχήματα χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών. Μέσα από τη σύγκριση των τεχνολογιών αυτών με τις συμβατικές ΜΕΚ στο νέο κανονιστικό περιβάλλον, επιδιώκεται η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις μελλοντικές τάσεις και τις προοπτικές της αυτοκινητοβιομηχανίας.

Τελικός στόχος της εργασίας είναι η συνολική κατανόηση του τρόπου με τον οποίο το πρότυπο Euro 7 αναμένεται να επηρεάσει την τεχνολογική εξέλιξη, την αγορά οχημάτων και τη μετάβαση προς πιο βιώσιμες μορφές κινητικότητας.

Κεφάλαιο 1: Ιστορική εξέλιξη των προδιαγραφών Euro

1.1 Γενικά για τα πρότυπα Euro στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Τα πρότυπα εκπομπών Euro αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα ρυθμιστικά εργαλεία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τον περιορισμό των αέριων ρύπων από τους κινητήρες εσωτερικής καύσης (Internal Combustion Engines – ICE, στο εξής «ΜΕΚ»). Θεσπίστηκαν για πρώτη φορά στις αρχές της δεκαετίας του 1990, με βασικούς στόχους τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα και την προστασία της δημόσιας υγείας (European Commission, 2021). Η ανάγκη για την ανάπτυξη ενός ενιαίου κανονιστικού πλαισίου εκπομπών προέκυψε από τη ραγδαία αύξηση της κυκλοφορίας οχημάτων και τη συσχέτισή της με την ατμοσφαιρική ρύπανση, ιδιαίτερα στα αστικά κέντρα, όπου οι συγκεντρώσεις οξειδίων του αζώτου (Nitrogen Oxides, NOx), μονοξειδίου του άνθρακα (Carbon Monoxide, CO) και αιωρούμενων

σωματιδίων (Particulate Matter, PM) υπερέβαιναν συστηματικά τα όρια ασφαλείας (ΕΕΑ, 2020).

Η εξέλιξη των προτύπων Euro συνδέεται στενά με την αυξανόμενη επιστημονική τεκμηρίωση σχετικά με τις επιπτώσεις των αέριων ρύπων στην ανθρώπινη υγεία. Η μακροχρόνια έκθεση σε NOx και PM έχει συσχετιστεί με αναπνευστικές και καρδιαγγειακές παθήσεις, καθώς και με αυξημένη θνησιμότητα σε ευάλωτες πληθυσμιακές ομάδες (WHO, 2018). Οι διαδοχικές βαθμίδες των προδιαγραφών από το Euro 1 και το Euro 2 έως το Euro 6 και τη μελλοντική βαθμίδα Euro 7 εισήγαγαν σταδιακά αυστηρότερα όρια εκπομπών, αναγκάζοντας τους κατασκευαστές να αναπτύξουν και να υιοθετήσουν προηγμένες τεχνολογίες καύσης, ψεκασμού και επεξεργασίας καυσαερίων (ACEA, 2022).

Παράλληλα, τα πρότυπα Euro αποτελούν βασικό μέσο υλοποίησης της ευρωπαϊκής στρατηγικής για καθαρότερες μεταφορές και έχουν ενσωματωθεί σε ευρύτερα προγράμματα πολιτικής, όπως το Clean Air for Europe και η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία. Οι πρωτοβουλίες αυτές στοχεύουν στη συνολική μείωση των εκπομπών ρύπων και αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα των μεταφορών, επηρεάζοντας άμεσα τον τεχνολογικό προσανατολισμό της αυτοκινητοβιομηχανίας και της ενεργειακής μετάβασης (European Commission, 2019).

Συνολικά, τα πρότυπα Euro έχουν συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης και αποτελούν θεμέλιο της ευρωπαϊκής προσπάθειας για την επίτευξη πιο καθαρών και βιώσιμων μεταφορών (ΕΕΑ, 2022).

1.2 Οι προδιαγραφές Euro 1 έως Euro 6

Η εξέλιξη των προδιαγραφών εκπομπών Euro από το 1992 έως και το Euro 6 αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παρεμβάσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης στον τομέα των οδικών μεταφορών, καθώς διαμόρφωσε σταδιακά το τεχνολογικό και ρυθμιστικό πλαίσιο στο οποίο λειτουργούν οι εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης (European Commission, 2021). Η πρώτη εφαρμογή, το Euro 1 το 1992, εισήγαγε για πρώτη φορά ενιαία όρια εκπομπών για όλα τα κράτη-μέλη,

επιβάλλοντας την καθολική χρήση τριοδικού καταλύτη (Three-Way Catalyst, TWC) και ηλεκτρονικού ελέγχου ψεκασμού. Τα μέτρα αυτά αποτέλεσαν το θεμέλιο της σύγχρονης τεχνολογίας ελέγχου ρύπων (ACEA, 2020).

Το Euro 2, που εφαρμόστηκε το 1996, εισήγαγε αυστηρότερες απαιτήσεις μείωσης των εκπομπών CO, υδρογονανθράκων (Hydrocarbons, HC) και NOx, αναγκάζοντας τους κατασκευαστές να αναβαθμίσουν τις στρατηγικές ψεκασμού και ανάφλεξης, ενώ παράλληλα ανέδειξε την ανάγκη για σταδιακές βελτιώσεις στους πετρελαιοκινητήρες, οι οποίοι άρχισαν να αντιμετωπίζουν αυστηρότερα όρια ως προς την παραγωγή καπνού και σωματιδίων (EEA, 2020).

Η μεγαλύτερη τεχνολογική μετάβαση πραγματοποιήθηκε το 2000 με την εφαρμογή του Euro 3, όπου για πρώτη φορά διαχωρίστηκαν οι εκπομπές HC και NOx στους βενζινοκινητήρες, ενώ στους πετρελαιοκινητήρες υιοθετήθηκε ευρέως η τεχνολογία common-rail, επιτρέποντας υψηλότερες πιέσεις ψεκασμού, καλύτερη ατομοποίηση καυσίμου και σημαντική βελτίωση στη διαδικασία καύσης (Bosch, 2019).

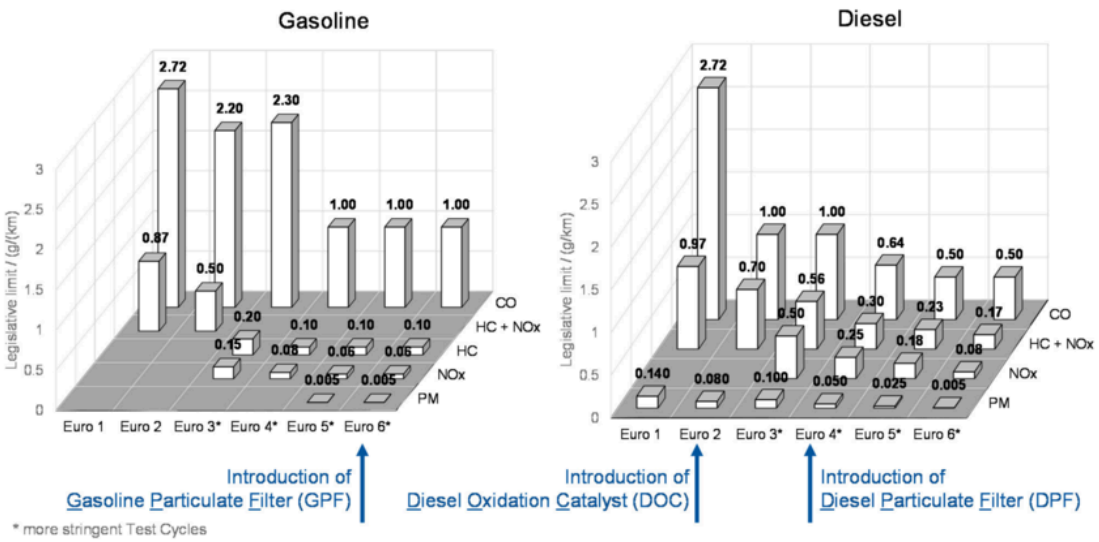
Το Euro 4 το 2005 επέβαλε δραστικές μειώσεις στα όρια NOx και PM, καθιστώντας αναγκαία τη χρήση εξελιγμένων συστημάτων ανακυκλοφορίας καυσαερίων (Exhaust Gas Recirculation, EGR) και αυξάνοντας περαιτέρω την πίεση ψεκασμού στους πετρελαιοκινητήρες (European Commission, 2016). Ήταν επίσης το πρώτο στάδιο στο οποίο έγινε σαφές ότι τα φίλτρα σωματιδίων θα αποτελούσαν μελλοντική απαίτηση, καθώς οι τεχνολογίες της εποχής δεν επαρκούσαν για να συγκρατήσουν τα PM σε χαμηλά επίπεδα.

Το Euro 5 το 2009 καθιέρωσε πλέον υποχρεωτικά τα φίλτρα συγκράτησης μικροσωματιδίων (Diesel Particulate Filter, DPF) στους πετρελαιοκινητήρες, μειώνοντας τα PM έως και 80%, ενώ παράλληλα αυστηροποίησε σημαντικά τα όρια NOx, οδηγώντας τους κατασκευαστές σε πιο σύνθετες στρατηγικές διαχείρισης καύσης και θερμοκρασίας (EEA, 2022).

Η τελική και αυστηρότερη βαθμίδα πριν το Euro 7, το Euro 6, εφαρμόστηκε το 2014 και σηματοδότησε μια ριζική αλλαγή στη διαδικασία πιστοποίησης, με την εισαγωγή των δοκιμών σε πραγματικές συνθήκες (Real Driving Emissions, RDE). Οι

πετρελαιοκινητήρες απαιτούσαν πλέον σχεδόν καθολικά συστήματα επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής (Selective Catalytic Reduction, SCR) με χρήση υδατικού διαλύματος ουρίας (AdBlue), ενώ οι βενζινοκινητήρες άμεσου ψεκασμού (Gasoline Direct Injection, GDI) υποχρεώθηκαν στη χρήση φίλτρων σωματιδίων βενζίνης (Gasoline Particulate Filter, GPF) για τη μείωση των μικροσωματιδίων (European Parliament, 2020).

Στην Εικόνα 1.1 παρουσιάζεται συγκριτικά η εξέλιξη των ορίων εκπομπών από το Euro 1 έως το Euro 6 τόσο για τους βενζινοκινητήρες όσο και για τους πετρελαιοκινητήρες. Η γραφική απεικόνιση καθιστά εμφανή τη σημαντική μείωση σε CO, NOx και PM μεταξύ διαδοχικών βαθμίδων, αλλά και τη χρονική στιγμή στην οποία εισήχθησαν τεχνολογίες ελέγχου ρύπων όπως ο οξειδωτικός καταλύτης ντίζελ (Diesel Oxidation Catalyst, DOC), τα φίλτρα σωματιδίων GPF/DPF και οι σύγχρονοι μηχανισμοί αντιρρύπανσης.



Εικόνα 1.1: Εξέλιξη των ορίων εκπομπών ρύπων από το πρότυπο Euro 1 έως το Euro 6 για βενζινοκινητήρες και πετρελαιοκινητήρες. Πηγή: ResearchGate, από τη δημοσίευση "Development of emission limits from Euro 1 to Euro 6 for gasoline and diesel engines" (n.d.). Η εικόνα χρησιμοποιείται αποκλειστικά για εικονογραφικούς σκοπούς.

Συνολικά, η τεχνολογική μετάβαση από το Euro 1 στο Euro 6 οδήγησε σε μείωση άνω του 90% σε βασικούς ρύπους, όπως NOx και PM, ενώ στη διάρκεια της ίδιας περιόδου βελτιώθηκαν σημαντικά η ενεργειακή απόδοση, η ποιότητα καύσης και ο συνολικός περιβαλλοντικός αντίκτυπος των οχημάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ACEA, 2022).

1.3 Στόχοι και επιδιώξεις των προδιαγραφών Euro

Οι προδιαγραφές εκπομπών Euro θεσπίστηκαν με πρωταρχικό στόχο τη δραστική μείωση των αέριων ρύπων που παράγονται από οχήματα με ΜΕΚ, οι οποίοι για δεκαετίες αποτέλεσαν έναν από τους βασικότερους παράγοντες υποβάθμισης της ποιότητας του αέρα στα ευρωπαϊκά αστικά κέντρα (EEA, 2021). Η έντονη αύξηση της κυκλοφορίας οχημάτων από τη δεκαετία του 1970 έως τις αρχές του 21ου αιώνα οδήγησε σε σημαντική επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με ρύπους όπως τα NOx, CO, HC και PM, οι οποίοι συνδέονται άμεσα με αναπνευστικές και καρδιαγγειακές παθήσεις. Η αντιμετώπιση των συνεπειών αυτών στη δημόσια υγεία αποτέλεσε βασικό πυλώνα της ευρωπαϊκής στρατηγικής για καθαρότερες μεταφορές.

Ένας δεύτερος στρατηγικός στόχος των προδιαγραφών Euro ήταν η δημιουργία ενός ενιαίου και ομοιόμορφου κανονιστικού πλαισίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Πριν την εφαρμογή των Euro, τα κράτη-μέλη εφάρμοζαν διαφορετικά συστήματα πιστοποίησης, όρια εκπομπών και μεθόδους δοκιμών, γεγονός που δημιουργούσε αβεβαιότητα στη βιομηχανία και εμπόδια στο διασυνοριακό εμπόριο (European Commission, 2019). Η θέσπιση κοινών ορίων εκπομπών και πρότυπων διαδικασιών δοκιμών συνέβαλε καθοριστικά στην τεχνολογική εναρμόνιση και διευκόλυνε τους κατασκευαστές στη διάθεση οχημάτων σε όλες τις ευρωπαϊκές αγορές με ενιαίες απαιτήσεις συμμόρφωσης.

Παράλληλα, οι προδιαγραφές Euro λειτούργησαν ως παράγοντας ενίσχυσης της τεχνολογικής καινοτομίας, ωθώντας την αυτοκινητοβιομηχανία να επενδύει σε νέες τεχνολογίες κινητήρων, υπερπλήρωσης, ηλεκτρονικού ελέγχου καύσης και συστημάτων επεξεργασίας καυσαερίων (Bosch, 2020). Η σταδιακή αυστηροποίηση των ορίων εκπομπών διαμόρφωσε ένα πλαίσιο συνεχούς τεχνολογικής αναβάθμισης, το οποίο οδήγησε από τους μηχανικά ελεγχόμενους κινητήρες προηγούμενων

δεκαετιών στα σύγχρονα, υψηλής ακρίβειας ηλεκτρονικά ελεγχόμενα συστήματα. Το ευρωπαϊκό κανονιστικό πλαίσιο συνέβαλε καθοριστικά στη βελτίωση της αποδοτικότητας και της περιβαλλοντικής απόδοσης των ΜΕΚ.

Ένας ακόμη σημαντικός στόχος των προδιαγραφών Euro αφορά την κοινωνική προστασία μέσω της βελτίωσης της δημόσιας υγείας. Η μείωση των συγκεντρώσεων NOx και PM θεωρείται από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος ένας από τους αποτελεσματικότερους τρόπους περιορισμού των πρόωρων θανάτων και των σοβαρών αναπνευστικών παθήσεων, ιδίως σε ευάλωτες ομάδες πληθυσμού όπως παιδιά, ηλικιωμένοι και άτομα με χρόνιες παθήσεις (EEA, 2022). Η συνεπής εφαρμογή των Euro προτύπων έχει συμβάλει στη σταδιακή βελτίωση της ποιότητας του αέρα, ιδιαίτερα σε μεγάλα αστικά κέντρα όπου η οδική κυκλοφορία αποτελεί κύρια πηγή εκπομπών.

Τέλος, οι προδιαγραφές Euro σχεδιάστηκαν ώστε να λειτουργούν ως μεταβατικό εργαλείο προς μια πιο καθαρή και βιώσιμη κινητικότητα. Η διαρκής αυστηροποίηση των ορίων καθιστά ολοένα και δυσκολότερη τη συμμόρφωση των παραδοσιακών τεχνολογιών ΜΕΚ χωρίς την αξιοποίηση προηγμένων συστημάτων ή τη συμπληρωματική χρήση εναλλακτικών τεχνολογιών, όπως τα υβριδικά συστήματα, η ηλεκτροκίνηση και τα συνθετικά ή μηδενικού άνθρακα καύσιμα (European Parliament, 2020). Με τον τρόπο αυτό, τα πρότυπα Euro δεν αποτελούν μόνο εργαλείο περιβαλλοντικής πολιτικής, αλλά και μέσο επιτάχυνσης της ενεργειακής και τεχνολογικής μετάβασης στον τομέα των μεταφορών.Συνολικά, οι στόχοι των προδιαγραφών Euro συνδυάζουν την περιβαλλοντική προστασία, την τεχνολογική πρόοδο, τη διασφάλιση της δημόσιας υγείας και τη μακροπρόθεσμη ενεργειακή στρατηγική, καθιστώντας τα έναν από τους πλέον ολοκληρωμένους ρυθμιστικούς μηχανισμούς που έχουν εφαρμοστεί στον τομέα της αυτοκίνησης.

1.4 Τεχνολογικές παρεμβάσεις για τη συμμόρφωση των ΜΕΚ στα προηγούμενα στάδια Euro

Η σταδιακή αυστηροποίηση των προδιαγραφών εκπομπών Euro από το 1992 έως και την εισαγωγή του Euro 6 οδήγησε σε μια σειρά σημαντικών τεχνολογικών παρεμβάσεων στις ΜΕΚ. Οι παρεμβάσεις αυτές είχαν ως στόχο τη μείωση των

εκπομπών αέριων ρύπων και μικροσωματιδίων, αλλά και τη βελτίωση της απόδοσης και της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς των κινητήρων, ώστε να ανταποκρίνονται στις όλο και αυστηρότερες απαιτήσεις. Η εφαρμογή των διαδοχικών προτύπων Euro λειτούργησε ως καταλύτης τεχνολογικής εξέλιξης, επιταχύνοντας την ανάπτυξη συστημάτων ψεκασμού, υπερπλήρωσης, ηλεκτρονικού ελέγχου και επεξεργασίας καυσαερίων (Bosch, 2020).

Μία από τις πρώτες και πλέον σημαντικές τεχνολογικές λύσεις ήταν η εισαγωγή του TWC στους βενζινοκινητήρες, ο οποίος επέτρεψε την ταυτόχρονη οξείδωση CO και HC και τη μείωση των NOx μέσω αναγωγής. Ο TWC αποτέλεσε θεμέλιο της συμμόρφωσης στα στάδια Euro 1 και Euro 2, καθώς για να λειτουργήσει αποτελεσματικά απαιτούσε ακριβή έλεγχο του λόγου αέρα–καυσίμου μέσω ηλεκτρονικών συστημάτων ψεκασμού και αισθητήρων λ. Η μετάβαση από τους μηχανικούς στους ηλεκτρονικά ελεγχόμενους ψεκασμούς επέτρεψε σταθερότερη καύση και σημαντική μείωση των εκπομπών (Heywood, 2018).

Για τους πετρελαιοκινητήρες, οι τεχνολογικές απαιτήσεις ήταν διαφορετικές λόγω της φύσης της καύσης diesel. Η χρήση συστημάτων EGR αποτέλεσε μία από τις πρώτες κρίσιμες παρεμβάσεις, καθώς με την επαναφορά μέρους των καυσαερίων στον θάλαμο καύσης μειωνόταν η θερμοκρασία καύσης, οδηγώντας σε περιορισμό των εκπομπών NOx. Η τεχνολογία EGR εξελίχθηκε προοδευτικά, ενσωματώνοντας συστήματα ψύξης και ηλεκτρονικό έλεγχο υψηλής ακρίβειας, ώστε να αποφεύγονται προβλήματα αξιοπιστίας, όπως επικαθίσεις και θερμική καταπόνηση (Stone, 2012).

Η μεγαλύτερη πρόκληση για τους πετρελαιοκινητήρες εμφανίστηκε με τα Euro 4 και Euro 5, όπου θεσπίστηκαν δραστικές μειώσεις στα μικροσωματίδια αιθάλης. Αυτό οδήγησε στην υποχρεωτική χρήση φίλτρων συγκράτησης σωματιδίων DPF, τα οποία συγκρατούν σωματίδια PM10 και PM2.5 και λειτουργούν μέσω διαδικασιών παθητικής ή ενεργητικής αναγέννησης. Κατά τη διάρκεια της αναγέννησης, τα εγκλωβισμένα σωματίδια καίγονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Η ενσωμάτωση των DPF απαίτησε σημαντικές αλλαγές στη στρατηγική ψεκασμού και στη θερμική διαχείριση των κινητήρων, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα στην Ευρώπη (Johnson, 2019)

Η περαιτέρω αυστηροποίηση των ορίων NOx στο Euro 5 και ιδιαίτερα στο Euro 6 οδήγησε στην ευρεία υιοθέτηση συστημάτων SCR. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν διάλυμα ουρίας (AdBlue) για τη μετατροπή των NOx σε άζωτο και νερό, επιτυγχάνοντας μειώσεις εκπομπών άνω του 90% σε πραγματικές συνθήκες οδήγησης. Η λειτουργία τους απαιτεί ακριβή έλεγχο θερμοκρασίας, εξελιγμένους αισθητήρες NOx και αξιόπιστες στρατηγικές ψεκασμού ουρίας, καθιστώντας τα από τα πλέον σύνθετα συστήματα αντιρρύπανσης (European Commission, 2020)

Παράλληλα, οι εξελίξεις στα συστήματα ψεκασμού διαδραμάτισαν καθοριστικό ρόλο στη συμμόρφωση με τα διαδοχικά στάδια Euro. Η ανάπτυξη των συστημάτων common rail στους πετρελαιοκινητήρες επέτρεψε ψεκασμούς πολύ υψηλής πίεσης, πολλαπλούς παλμούς ανά κύκλο και εξαιρετικά ακριβή έλεγχο της ατομοποίησης καυσίμου. Στους βενζινοκινητήρες, η τεχνολογία GDI βελτίωσε την απόδοση, ωστόσο συνοδεύτηκε από αυξημένη παραγωγή σωματιδίων, καθιστώντας αναγκαία τη χρήση φίλτρων GPF (Bosch, 2020).

Η τεχνολογία υπερπλήρωσης εξελίχθηκε επίσης σημαντικά. Η χρήση υπερσυμπιεστών υψηλής απόδοσης και μεταβλητής γεωμετρίας (Variable Geometry Turbocharger, VGT) ενίσχυσε το φαινόμενο του downsizing, επιτρέποντας τη μείωση του κυβισμού χωρίς απώλεια ισχύος και συμβάλλοντας στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (Carbon Dioxide, CO_2). Η βελτιστοποίηση της θερμικής διαχείρισης, των θαλάμων καύσης και η χρήση προηγμένων ηλεκτρονικών μονάδων ελέγχου (Electronic Control Units, ECU) επέτρεψαν τη λειτουργία των κινητήρων με υψηλότερη απόδοση και καθαρότερη καύση (Heywood, 2018).

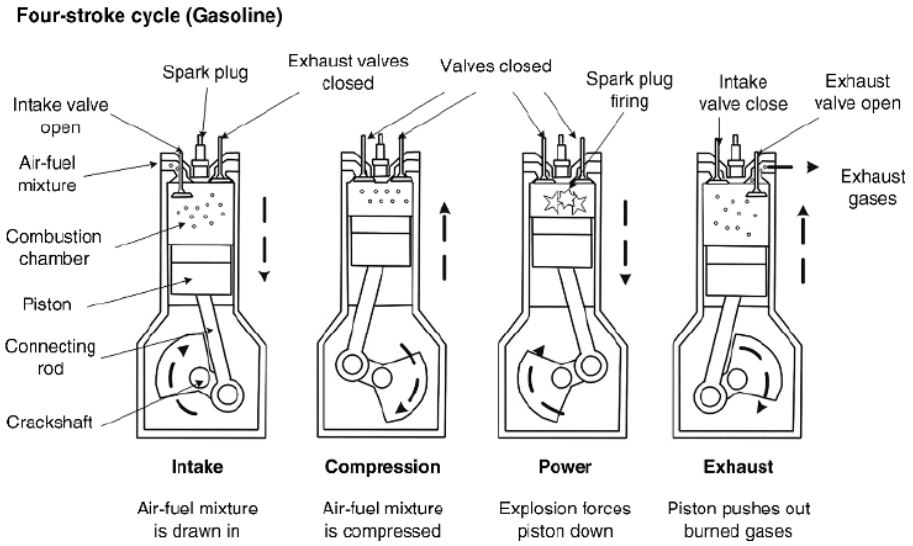
Συνολικά, οι τεχνολογικές παρεμβάσεις που εφαρμόστηκαν στα στάδια Euro 1 έως Euro 6 αποτέλεσαν το απαραίτητο υπόβαθρο για τη συμμόρφωση των κινητήρων με τα συνεχώς αυστηρότερα όρια εκπομπών. Η εξέλιξη των τεχνολογιών ψεκασμού, υπερπλήρωσης, φίλτρων σωματιδίων, ανακυκλοφορίας καυσαερίων και καταλυτικής επεξεργασίας διαμόρφωσε τις σύγχρονες εμβολοφόρες μηχανές υψηλής απόδοσης και χαμηλών εκπομπών, προετοιμάζοντας παράλληλα το έδαφος για τη μετάβαση στο πρότυπο Euro 7.

Κεφάλαιο 2: Οι εμβολοφόρες ΜΕΚ και οι τεχνολογικές τους εξελίξεις

2.1 Βασικά είδη ΜΕΚ (βενζίνη – πετρέλαιο)

Οι εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης (Internal Combustion Engines, ICE, στο εξής ΜΕΚ) διακρίνονται κατά κύριο λόγο σε βενζινοκινητήρες σπινθηρισμού (spark-ignition, SI) και πετρελαιοκινητήρες συμπίεσης (compression-ignition, CI). Η διάκριση εδράζεται στον μηχανισμό ανάφλεξης και στο αντίστοιχο θερμοδυναμικό και χημικό καθεστώς καύσης, με συνέπειες τόσο στην απόδοση όσο και στο προφίλ εκπομπών. Στους κινητήρες SI, η ανάφλεξη προκαλείται τεχνητά μέσω σπινθήρα και η καύση εξελίσσεται κατά κανόνα ως φλόγα διάδοσης σε μίγμα που έχει προετοιμαστεί με σχετικά ομογενή στοίχιση καυσίμου-αέρα. Στους κινητήρες CI, η ανάφλεξη προκύπτει αυτόματα όταν το ψεκασμένο καύσιμο εγχέεται σε ήδη θερμό και ισχυρά συμπιεσμένο αέρα, οδηγώντας σε καύση κυρίως ελεγχόμενη από τη μίξη (Heywood, 2018; Stone, 2012).

Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζεται σχηματικά ο τετράχρονος κύκλος λειτουργίας ενός βενζινοκινητήρα σπινθηροανάφλεξης (SI), όπου φαίνονται διαδοχικά οι φάσεις εισαγωγής, συμπίεσης, καύσης/εκτόνωσης και εξαγωγής.

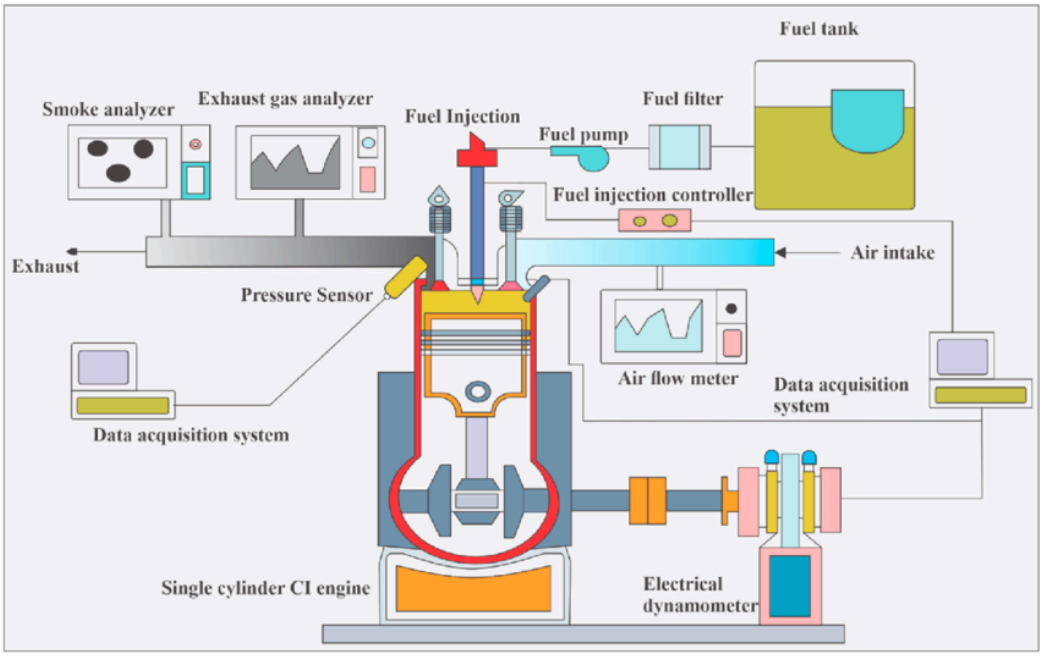


Εικόνα 2.1: Τυπικό σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας τετράχρονου κινητήρα σπινθηροανάφλεξης (Spark-Ignition, SI). Πηγή: ResearchGate, από το άρθρο “The gasoline Otto engine cycle” (n.d.). Η εικόνα χρησιμοποιείται αποκλειστικά για εικονογραφικούς σκοπούς.

Στους σύγχρονους βενζινοκινητήρες, η μετάβαση από τον έμμεσο στον άμεσο ψεκασμό (Gasoline Direct Injection, GDI) επέτρεψε ακριβέστερο έλεγχο της διαμόρφωσης του μίγματος στον κύλινδρο και ευρύτερη αξιοποίηση υψηλότερων λόγων συμπίεσης χωρίς έντονη κρουστικότητα, μέσω ψύξης εξάτμισης και ευέλικτων στρατηγικών στροβιλισμού και τύρβης (tumble, swirl) (Giechaskiel et al., 2019; Mamakos et al., 2018). Η ελεγχόμενη στρωμάτωση σε μερικά φορτία συνδυάζεται με βελτιωμένη αποδοτικότητα, αλλά εισάγει προκλήσεις σωματιδιακών εκπομπών ως προς τον αριθμό σωματιδίων (Particle Number, PN) λόγω τοπικών πλούσιων ζωνών και επιφανειακής εξάτμισης στα τοιχώματα, ιδίως σε ψυχρές εκκινήσεις. Για τον λόγο αυτό, τα φίλτρα σωματιδίων βενζίνης (Gasoline Particulate Filter, GPF) έχουν καθιερωθεί ως βασικό υποσύστημα στους κινητήρες SI άμεσου ψεκασμού, στοχεύοντας τη μείωση τόσο της μάζας σωματιδίων (Particulate Matter, PM) όσο και του PN (Mamakos et al., 2018).

Οι πετρελαιοκινητήρες χαρακτηρίζονται από υψηλή θερμοδυναμική απόδοση, σε σημαντικό βαθμό λόγω των υψηλότερων λόγων συμπίεσης και της λειτουργίας σε πτωχά μίγματα. Η καύση τους εμφανίζει τμήματα προανάμειξης και διάχυσης, με τον χρονισμό/σχήμα ρυθμού έγχυσης να επηρεάζει τον ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας, την ακουστικότητα και τις εκπομπές (Payri et al., 2013). Η εξέλιξη των συστημάτων common-rail και των πολλαπλών εγχύσεων (pilot-main-post) επέτρεψε βελτιστοποίηση θορύβου, οξειδίων του αζώτου (Nitrogen oxides, NOx) και αιθάλης, αλλά η εγγενής τάση για σχηματισμό NOx υπό πτωχή καύση απαιτεί εκτεταμένη εφαρμογή ανακυκλοφορίας καυσαερίων (Exhaust Gas Recirculation, EGR) χαμηλής/υψηλής πίεσης και προηγμένη μετά-επεξεργασία (Johnson, 2016).

Στην Εικόνα 2.2 φαίνεται ένα βασικό σχηματικό διάγραμμα τετράχρονου πετρελαιοκινητήρα συμπίεσης με τα κύρια υποσυστήματα τροφοδοσίας, μέτρησης και ελέγχου, που υποστηρίζουν την υψηλή πίεση ψεκασμού και την τυπική αρχιτεκτονική common-rail.



Εικόνα 2.2: Βασικό σχηματικό διάγραμμα τετράχρονου πετρελαιοκινητήρα συμπίεσης (Compression-Ignition, CI). Πηγή: ResearchGate, από το άρθρο "Single-cylinder compression ignition engine diagram" (n.d.). Η εικόνα χρησιμοποιείται αποκλειστικά για εικονογραφικούς σκοπούς.

Το προφίλ εκπομπών διαφοροποιεί ουσιωδώς τους δύο τύπους. Οι κινητήρες SI, λειτουργώντας γενικά σε στοιχειομετρικές συνθήκες, ευνοούν υψηλή απόδοση τριοδικού καταλύτη (Three-Way Catalyst, TWC) για ταυτόχρονη οξείδωση μονοξειδίου του άνθρακα (Carbon monoxide, CO), υδρογονανθράκων (Hydrocarbons, HC) και αναγωγή NOx, επιτυγχάνοντας χαμηλά επίπεδα εκπομπών σε θερμή λειτουργία. Οι προκλήσεις τους εστιάζουν στις μεταβατικές συνθήκες και ιδιαίτερα στις ψυχρές εκκινήσεις, όπου οι θερμοκρασίες πριν το light-off υπονομεύουν την άμεση αποτελεσματικότητα του TWC, αυξάνοντας σωρευτικές εκπομπές. Τα GPF αντιμετωπίζουν τα PN, ενώ προηγμένες στρατηγικές θερμικής διαχείρισης (ενεργητική καθυστέρηση σπινθήρα, ηλεκτρικοί θερμαντήρες καταλυτών) μειώνουν τον χρόνο επίτευξης light-off (McGrane & Douglas, 2021; Twigg, 2011)

Αντιθέτως, οι κινητήρες CI εμφανίζουν χαμηλότερες εκπομπές CO και HC λόγω υψηλών θερμοκρασιών οξείδωσης, αλλά υψηλότερη εγγενή προδιάθεση για NOx και

αιθάλη. Το ζεύγος οξειδωτικού καταλύτη ντίζελ (Diesel Oxidation Catalyst, DOC) και φίλτρου σωματιδίων ντίζελ (Diesel Particulate Filter, DPF), σε συνδυασμό με επιλεκτική καταλυτική αναγωγή (Selective Catalytic Reduction, SCR) και καταλύτη συγκράτησης αμμωνίας (Ammonia Slip Catalyst, ASC), έχει καταστεί αναγκαίο για την επίτευξη αυστηρών ορίων. Κρίσιμες παράμετροι αποτελούν η αποτελεσματική παγίδευση/αναγέννηση σωματιδίων και η εκλεκτική αναγωγή NOx σε ευρύ θερμοκρασιακό φάσμα (Johnson, 2016).

Η σύγκλιση τεχνολογιών στους δύο κόσμους είναι εμφανής. Η υπερπλήρωση και στους δύο τύπους βελτιώνει τον λόγο ισχύος και επιτρέπει downsizing με διατήρηση επιδόσεων, ενώ οι στρατηγικές μεταβλητού χρονισμού βαλβίδων (Variable Valve Timing/Variable Valve Lift, VVT/VVL) επηρεάζουν τον βαθμό ανακυκλοφορίας εσωτερικών καυσαερίων, την πλήρωση και τον έλεγχο θερμοκρασίας καύσης (Stone, 2012). Στους κινητήρες SI, η αύξηση της συμπίεσης με καύσιμα υψηλού δείκτη αντικρουσιμότητας (Research Octane Number, RON) και ο προσεκτικός έλεγχος σπινθήρα/προανάφλεξης συνδυάζονται με GDI και κύκλους Miller/Atkinson, αποφέροντας κέρδη στην ειδική κατανάλωση καυσίμου στον άξονα (Brake Specific Fuel Consumption, BSFC). Αντίστοιχα, στους κινητήρες CI η τροποποίηση του πορώδους/μεγέθους σταγονιδίων, η πολλαπλότητα εγχύσεων και οι βελτιώσεις στον αεροδυναμικό σχηματισμό μίγματος οδηγούν σε ταυτόχρονη βελτίωση της σχέσης μεταξύ εκπομπών NOx και αιθάλης (Payri et al., 2013; Kalghatgi, 2018).

Στο πλαίσιο των κανονισμών Euro, οι απαιτήσεις Real Driving Emissions (RDE) και World-harmonised Light Vehicles Test Procedure (WLTP) αύξησαν τη βαρύτητα της απόδοσης σε πραγματικές συνθήκες, αναδεικνύοντας την ανάγκη για σταθεροποιημένη λειτουργία σε ευρύτερο θερμοκρασιακό παράθυρο και σε μεταβατικές καταστάσεις. Στους κινητήρες SI, η εστίαση στα PN και, ειδικότερα, η επέκταση της μετρολογίας σε μικρότερα μεγέθη σωματιδίων καθιστούν κρίσιμη την ποιότητα ψεκασμού, την αποφυγή wall-wetting και την αποτελεσματικότητα των GPF με χαμηλές απώλειες πίεσης. Στους κινητήρες CI, η επίτευξη υψηλής απόδοσης SCR σε ψυχρές φάσεις απαιτεί θερμικές στρατηγικές «αφύπνισης» και, συχνά, αρχιτεκτονικές dual-SCR ή SCR-on-filter (SCRF), με καταλύτες χαμηλής θερμοκρασίας και βελτιστοποιημένη δόση ουρίας, υπό ισχυρή εποπτεία από

αισθητήρες NOx/αμμωνίας (Ammonia, NH_3) και προηγμένη επί του οχήματος επιτήρηση (On-Board Monitoring, OBM) (Giechaskiel et al., 2019; Ricardo, 2021).

Ενεργός παράγοντας διαφοροποίησης αποτελεί και η ποικιλία καυσίμων. Στους κινητήρες SI, η υιοθέτηση συνθετικών βενζινών υψηλού RON και χαμηλής αρωματικότητας μπορεί να μειώσει PN και να επιτρέψει υψηλότερη συμπίεση, ενώ στους κινητήρες CI μίγματα συνθετικού ντίζελ με ευνοϊκή καμπύλη αποστάξεων/κετανίου βελτιώνουν τη διαδικασία ανάμειξης και τον ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας, μειώνοντας αιθάλη χωρίς σημαντική ποινή στο NOx (Kalghatgi, 2018). Ωστόσο, οι αλληλεπιδράσεις με την αλυσίδα μετά-επεξεργασίας απαιτούν αναπροσαρμογή στρατηγικών ψεκασμού και θερμικής διαχείρισης, ώστε να διατηρείται η υψηλή απόδοση TWC/DPF/SCR σε μεταβαλλόμενες συνθήκες.

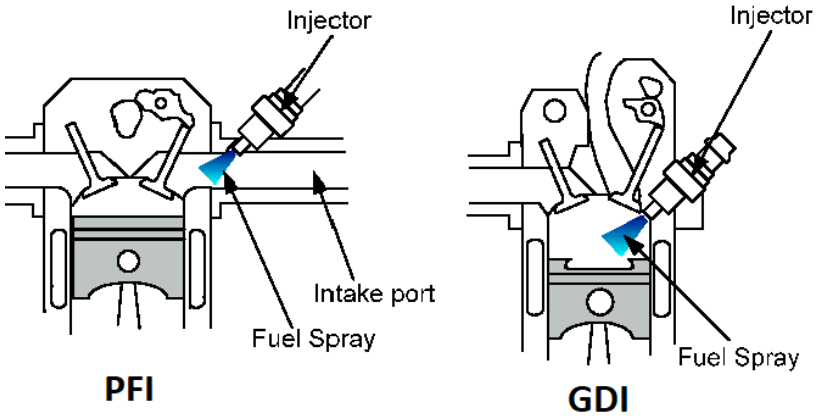
Τέλος, η αυξανόμενη ενσωμάτωση εξηλεκτρισμού μεταβάλλει οριζόντια και τους δύο τύπους. Σε ήπια υβριδικά 48 V (Mild Hybrid Electric Vehicles, MHEV), η ανάκτηση ενέργειας πέδησης και η υποβοήθηση ροπής μειώνουν τις απαιτήσεις σε πλούσιες στρατηγικές επιτάχυνσης, βελτιώνοντας την ποιότητα καύσης και τις εκπομπές. Σε υβριδικά/plug-in υβριδικά (Hybrid Electric Vehicles, HEV / Plug-in Hybrid Electric Vehicles, PHEV), η ανακατανομή του κύκλου λειτουργίας απομακρύνει τον κινητήρα από περιοχές δυσμενούς BSFC και περιορίζει τις ψυχρές εκκινήσεις, στοιχείο καίριο για τη συμμόρφωση σε σενάρια RDE (Ricardo, 2021). Έτσι, η σύγχρονη τυπολογία SI και CI οδεύει προς μια σύγκλιση λύσεων όπου η θερμοδυναμική βελτιστοποίηση, ο ακριβής έλεγχος καύσης/ψεκασμού και τα εξελιγμένα συστήματα μετεπεξεργασίας συνεργούν με ηλεκτρικά υποσυστήματα για την επίτευξη αυστηρότερων ορίων.

2.2 Συστήματα ψεκασμού και καύσης

Τα συστήματα τροφοδοσίας και οι μηχανισμοί καύσης στις εμβολοφόρες ΜΕΚ καθορίζουν σε θεμελιώδες επίπεδο την απόδοση, την ειδική κατανάλωση και το προφίλ εκπομπών. Στους κινητήρες SI, η μετάβαση από τον έμμεσο ψεκασμό στον αυλό εισαγωγής (Port Fuel Injection, PFI) στον GDI αποτέλεσε τομή, καθώς επιτρέπει χρονικά και χωρικά ακριβέστερη δόση καυσίμου, διαμόρφωση της ομοιογένειας/στρωμάτωσης του μίγματος και μείωση απωλειών άντλησης μέσω λειτουργίας με ανοιχτότερη πεταλούδα σε μερικά φορτία (Heywood, 2018; Stone,

2012). Στην ομοιογενή λειτουργία GDI, η έγχυση ολοκληρώνεται νωρίς στη φάση εισαγωγής, ώστε το καύσιμο να αναμιχθεί πλήρως με τον αέρα πριν τον σπινθήρα, αξιοποιώντας πεδία τύρβης tumble και swirl για ενίσχυση της ταχύτητας διάδοσης φλόγας. Στη στρωματωμένη λειτουργία, η καθυστερημένη έγχυση κοντά στην ανάφλεξη δημιουργεί τοπικά πλούσια ζώνη στη γειτονιά του μπουζί, επιτρέποντας υπερ-φτωχά μίγματα στον κύριο όγκο του θαλάμου. Η στρατηγική αυτή μειώνει τις απώλειες άντλησης, αλλά αυξάνει τον κίνδυνο σωματιδιακών εκπομπών ως προς τον αριθμό σωματιδίων, λόγω τοπικής υπερ-πλούσιας καύσης και wall-wetting (Giechaskiel et al., 2019; Mamakos et al., 2018). Η γεωμετρία της δέσμης και η στόχευση του εγχυτήρα (spray-guided, wall-guided, air-guided) αλληλεπιδρούν με τον στροβιλισμό και το σχήμα του θαλάμου, επηρεάζοντας την κατανομή μεγέθους σταγονιδίων (Sauter Mean Diameter, SMD), το βάθος διείσδυσης και τον χρόνο εξάτμισης (Lefebvre & McDonell, 2017).

Στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζεται συγκριτικά η γεωμετρική και λειτουργική διαφορά μεταξύ των συστημάτων ψεκασμού PFI και GDI, η οποία επηρεάζει καθοριστικά τη διαμόρφωση του μίγματος, τον κίνδυνο wall-wetting και τη δημιουργία σωματιδίων στους σύγχρονους βενζινοκινητήρες.



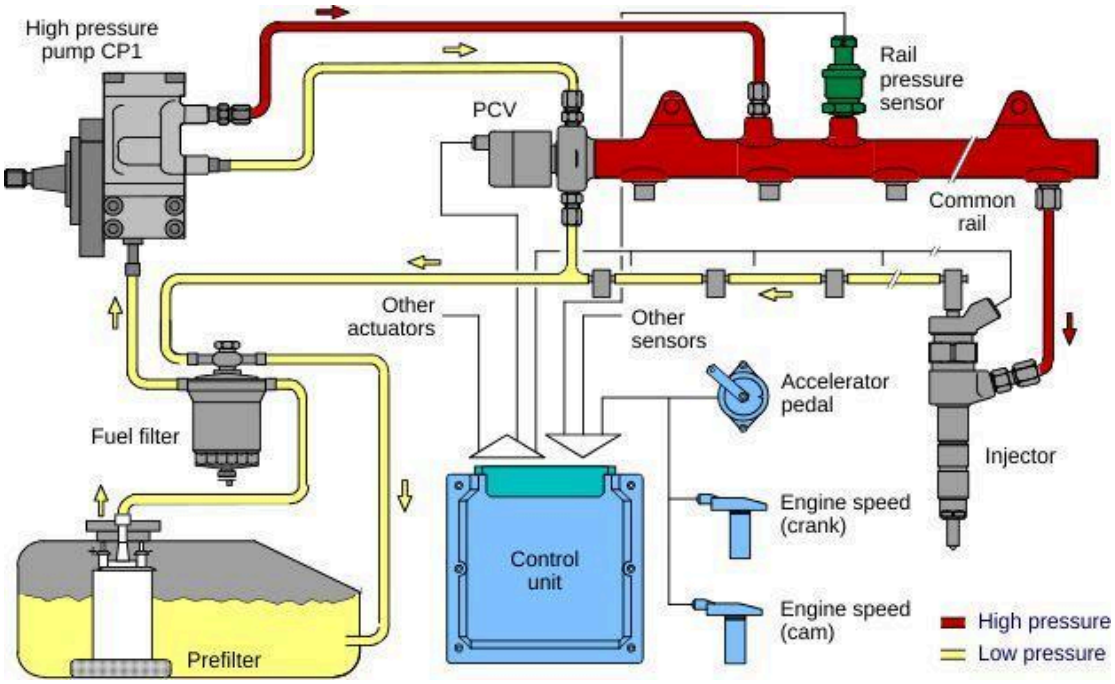
Εικόνα 2.3: Σύγκριση συστημάτων ψεκασμού καυσίμου σε βενζινοκινητήρες: ψεκασμός στον αυλό εισαγωγής (Port Fuel Injection, PFI) και άμεσος ψεκασμός στον κύλινδρο (Gasoline Direct Injection, GDI). Πηγή: ResearchGate, από το άρθρο "Direct and port fuel injection system" (n.d.). Η εικόνα χρησιμοποιείται αποκλειστικά για εικονογραφικούς σκοπούς.

Στους κινητήρες SI, ο σπινθήρας εκκινεί φλόγα διάδοσης που αναπτύσσεται υπό καθεστώς τυρβώδους καύσης. Ο αποτελεσματικός ρυθμός καύσης εξαρτάται από την ένταση τύρβης κοντά στο μπουζί, την τοπική στοιχειομετρία και την ταχύτητα χημικής αντίδρασης, η οποία επηρεάζεται από τον RON, τη θερμοκρασία, την EGR και τον λόγο συμπίεσης (Heywood, 2018). Ο βέλτιστος χρονισμός ανάφλεξης (Maximum Brake Torque timing, MBT) μετατοπίζεται με τη φόρτιση και την EGR, ενώ η αποφυγή κρουστικότητας (knock) και προανάφλεξης χαμηλών στροφών/υψηλού φορτίου (Low-Speed Pre-Ignition, LSPI) σε GDI με υπερπλήρωση απαιτεί προσεκτική χαρτογράφηση έγχυσης, επιλογή λαδιών/καυσίμων και έλεγχο αποθέσεων (Stone, 2012; Kalghatgi, 2018). Σε επίπεδο θερμοδυναμικού κύκλου, οι κύκλοι Miller/Atkinson σε συνδυασμό με υπερπλήρωση και υψηλό RON προσφέρουν βελτιώσεις στην BSFC, ιδίως όταν συνυπάρχει ηλεκτρική υποβοήθηση που επιτρέπει λειτουργία κοντά σε νησίδες υψηλής απόδοσης.

Οι κινητήρες CI βασίζονται σε αυτόματη ανάφλεξη μετά από καθυστέρηση ανάφλεξης, η οποία καθορίζεται από τη θερμοκρασία/πίεση του συμπιεσμένου αέρα και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του καυσίμου (κετανικός αριθμός). Στα σύγχρονα συστήματα common-rail, οι πιέσεις έγχυσης υπερβαίνουν συνήθως τα 2000–2500 bar, με ακριβή διαμόρφωση ρυθμού (rate shaping) και πολλαπλές εγχύσεις (pilot–main–post) για έλεγχο θορύβου, περιορισμό της προαναμειγμένης αιχμής απελευθέρωσης θερμότητας και διαχείριση NOx/αιθάλης (Payri et al., 2013; Dec, 2009). Η δομή της καύσης περιλαμβάνει ένα αρχικό προαναμειγμένο στάδιο, ακολουθούμενο από φάση ελεγχόμενη από τη μίξη. Παράμετροι όπως το μήκος lift-off, ο ρυθμός εμπλουτισμού με αέρα (entrainment) και η τοπική ισοδυναμία κατά μήκος του πίδακα καυσίμου καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τον συμβιβασμό μεταξύ εκπομπών NOx και αιθάλης. Η αυξημένη EGR μειώνει τη θερμοκρασία φλόγας και περιορίζει τα NOx, αλλά μπορεί να επιβαρύνει τη δημιουργία σωματιδίων, αν η ανάμειξη υποβαθμιστεί. Σε αυτό το πλαίσιο, η υψηλή πίεση έγχυσης και τα πολλαπλά στάδια εγχύσεων ενισχύουν τον ρυθμό ανάμειξης και περιορίζουν τα σωματίδια (Johnson, 2016; Payri et al., 2013).

Στην Εικόνα 2.4 παρουσιάζεται ένα πλήρες σχηματικό σύστημα common rail, όπου απεικονίζονται η αντλία υψηλής πίεσης, το rail, οι αισθητήρες και οι ηλεκτρονικά

ελεγχόμενοι εγχυτήρες που καθορίζουν τον ρυθμό και τη διαμόρφωση των εγχύσεων στους σύγχρονους πετρελαιοκινητήρες.



Εικόνα 2.4: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ψεκασμού common rail σε πετρελαιοκινητήρα, με αντλία υψηλής πίεσης, συσσωρευτή πίεσης (common rail), ηλεκτρονικά ελεγχόμενους εγχυτήρες και αισθητήρες πίεσης/στροφών. Πηγή: Bosch / DieselNet, "Common rail fuel injection" (n.d.). Η εικόνα χρησιμοποιείται αποκλειστικά για εικονογραφικούς σκοπούς.

Πέρα από τα βασικά καθεστώτα κινητήρων SI/CI, έχουν αναπτυχθεί τρόποι καύσης χαμηλής θερμοκρασίας (Low-Temperature Combustion, LTC), όπως η καύση ομοιογενούς φορτίου με αυτοανάφλεξη (Homogeneous Charge Compression Ignition / Controlled Auto-Ignition, HCCI/CAI), η καύση με προανάμειξη ή μερική προανάμειξη σε κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση (Premixed και Partially Premixed Compression Ignition, PCCI), η καύση βενζίνης με ανάφλεξη μέσω συμπίεσης (Gasoline Compression Ignition, GCI) και η καύση ελεγχόμενης αντιδραστικότητας με ανάφλεξη μέσω συμπίεσης (Reactivity-Controlled Compression Ignition, RCCI), με στόχο την ταυτόχρονη μείωση εκπομπών NOx και αιθάλης.

Στο καθεστώς HCCI/CAI, το σύνολο του μίγματος αυτοαναφλέγεται σχεδόν ταυτόχρονα υπό πτωχές και σχεδόν ομοιογενείς συνθήκες, οδηγώντας σε χαμηλές θερμοκρασίες καύσης και ιδιαίτερα ευνοϊκή συμπεριφορά εκπομπών. Ωστόσο, ο έλεγχος του χρονισμού και του ρυθμού καύσης είναι ιδιαίτερα απαιτητικός και επιτυγχάνεται μέσω συνδυασμού μεταβλητού χρονισμού βαλβίδων, αυξημένης ανακυκλοφορίας καυσαερίων και προσαρμογής της πτητικότητας και του αριθμού οκτανίου του καυσίμου (Noehre et al., 2006; Kalghatgi, 2018).

Στις διατάξεις PCCI/GCI, επιδιώκεται εκτεταμένη προανάμειξη του καυσίμου με τον αέρα πριν την αυτοανάφλεξη, με τη χρήση καυσίμων υψηλού αριθμού οκτανίου σε κινητήρες ανάφλεξης μέσω συμπίεσης, ώστε η καύση να μετατοπιστεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και μειωμένες εκπομπές. Βασικές προκλήσεις αποτελούν η διατήρηση της σταθερότητας λειτουργίας και ο έλεγχος του παραγόμενου θορύβου υπό δυναμικές συνθήκες (Dec, 2009).

Η ποιότητα του ψεκασμού αποτελεί κοινή συνισταμένη επίδοσης. Η γεωμετρία οπών, ο αριθμός/διάμετρος διαύλων και η κώνωση της δέσμης ρυθμίζουν τον SMD και τον ρυθμό εξάτμισης σε GDI. Ο σχεδιασμός αποσκοπεί σε γρήγορη εξάτμιση με ελάχιστο wall-wetting, ενώ σε κινητήρες CI επιδιώκεται υψηλός ρυθμός ανάμειξης χωρίς υπερβολική διείσδυση που θα οδηγούσε σε impingement στα τοιχώματα και τοπικά πλούσιες ζώνες (Lefebvre & McDonell, 2017). Ο χρονισμός έγχυσης είναι κρίσιμος, καθώς η μετακίνηση της κύριας έγχυσης σε κινητήρες SI πλησίον του σπινθήρα μειώνει τις απώλειες αλλά αυξάνει την ευαισθησία σε PN, ενώ στους κινητήρες CI ο διαχωρισμός pilot μειώνει τη θορυβώδη προανάφλεξη και προθερμαίνει τον θάλαμο για σταθερότερη κύρια καύση (Payri et al., 2013). Η θερμική διαχείριση του θαλάμου (θερμοκρασία εισαγωγής, λόγος συμπίεσης, EGR) και η ένταση της τύρβης κοντά στο Άνω Νεκρό Σημείο (ΑΝΣ) επηρεάζουν τη σταθερότητα της καύσης από κύκλο σε κύκλο. Η σταθερότητα εκφράζεται μέσω του συντελεστή μεταβλητότητας της ενδεικνυόμενης μέσης ενεργού πίεσης (COV_IMEP), καθώς και μέσω της αντοχής του κινητήρα σε φαινόμενα κρουστικότητας και προανάφλεξης (Heywood, 2018).

Σε επίπεδο εκπομπών, οι κινητήρες SI σε στοιχειομετρική λειτουργία αξιοποιούν πλήρως τον TWC για ταυτόχρονη οξείδωση CO/HC και αναγωγή NOx, με βασική πρόκληση τις ψυχρές εκκινήσεις και τις μεταβάσεις φορτίου όπου η θερμοκρασία

πριν το light-off είναι χαμηλή. Η ενσωμάτωση GPF με χαμηλή απώλεια πίεσης και κατάλληλη στρατηγική παθητικής/ενεργής αναγέννησης έχει καταστεί αναγκαία στους GDI λόγω PN (Mamakos et al., 2018; Twigg, 2011). Στους κινητήρες CI, η αλυσίδα μετά-επεξεργασίας DOC–DPF–SCR–ASC, συχνά υλοποιημένη σε διατάξεις SCR-on-Filter ή διπλού SCR, επιτρέπει την επίτευξη ιδιαίτερα χαμηλών εκπομπών NOx και PM σε ευρύ θερμοκρασιακό φάσμα λειτουργίας. Η αποτελεσματικότητα των συστημάτων αυτών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακριβή δοσομέτρηση ουρίας, καθώς και από την επαρκή θερμική αφύπνιση των καταλυτών κατά τις φάσεις ψυχρής εκκίνησης και χαμηλού φορτίου. Παράλληλα, η προοδευτική αυστηροποίηση των απαιτήσεων για μέτρηση PN έως και τα 10 nm υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας οδηγεί σε περαιτέρω βελτιστοποίηση της ποιότητας ψεκασμού, στον αυστηρό έλεγχο σχηματισμού αποθέσεων και στη σχεδίαση υποστρωμάτων φίλτρων με προσαρμοσμένο πορώδες και διαπερατότητα (Johnson, 2016).

Η σύζευξη των στρατηγικών καύσης με εξηλεκτρισμό αλλάζει τη βέλτιστη «συνταγή» ψεκασμού. Σε MHEV, η ηλεκτρική υποβοήθηση μετακινεί τη λειτουργία του κινητήρα σε νησίδες υψηλής απόδοσης, μειώνει τις απαιτήσεις πλούσιων επιταχύνσεων και περιορίζει τις ψυχρές εκκινήσεις, με αποτέλεσμα χαμηλότερες σωρευτικές εκπομπές και ηπιότερη επιβάρυνση του συστήματος μετά-επεξεργασίας. Παράλληλα, η χρήση καυσίμων προσαρμοσμένης σύστασης (π.χ. συνθετικές βενζίνες υψηλού RON και συνθετικό ντίζελ με ελεγχόμενη καμπύλη απόσταξης) επιτρέπει υψηλότερη συμπίεση και βελτιωμένο ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας, εφόσον ο ψεκασμός και ο χρονισμός ανάφλεξης επαναβαθμονομηθούν κατάλληλα (Kalghatgi, 2018).

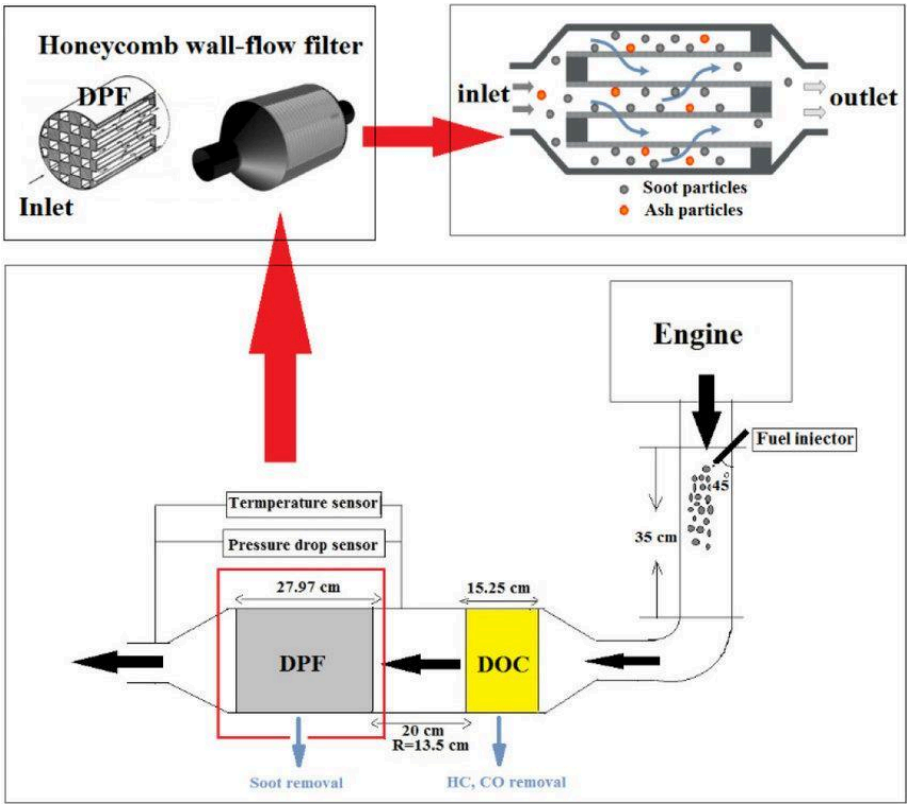
2.3 Τεχνολογίες μείωσης εκπομπών

Η μείωση των εκπομπών στις εμβολοφόρες ΜΕΚ στηρίζεται σε συνδυασμό πρωτογενών παρεμβάσεων (στον κύκλο καύσης) και δευτερογενών μέτρων μετά-επεξεργασίας, ώστε να επιτυγχάνεται συμμόρφωση τόσο σε εργαστηριακούς κύκλους όσο και σε συνθήκες πραγματικής οδήγησης. Στους κινητήρες SI, το κεντρικό εργαλείο παραμένει ο TWC, ο οποίος σε στοιχειομετρική λειτουργία επιτυγχάνει ταυτόχρονη οξείδωση CO/HC και αναγωγή NOx, υπό την προϋπόθεση στενού ελέγχου του λόγου αέρα–καυσίμου μέσω αισθητήρων λ και στρατηγικών

κλειστού βρόχου (Heywood, 2018; Twigg, 2011). Η αποτελεσματικότητα του TWC εξαρτάται κρίσιμα από την ταχεία επίτευξη της θερμοκρασίας light-off μετά από ψυχρή εκκίνηση. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζονται τεχνικές θερμικής διαχείρισης, όπως καθυστέρηση του χρονισμού σπινθήρα, ελεγχόμενος μετά-ψεκασμός, χρήση ηλεκτρικών θερμαντήρων του υποστρώματος, καθώς και προώθηση του καταλύτη πλησίον της βαλβίδας εξαγωγής με υψηλή φόρτιση πολύτιμων μετάλλων και βελτιστοποιημένο washcoat (McGrane & Douglas, 2021; Twigg, 2011).

Η μετάβαση σε κινητήρες GDI βελτίωσε τη θερμική απόδοση, εισήγαγε όμως αυξημένες σωματιδιακές εκπομπές λόγω σχηματισμού τοπικά πλούσιων ζωνών και φαινομένων wall-wetting. Ως αποτέλεσμα, τα GPF έχουν καταστεί τυπικό υποσύστημα, συχνά σε συνδυασμό με TWC, σε αρχιτεκτονικές τυμπανωτού υποστρώματος με χαμηλές απώλειες πίεσης και ελεγχόμενες αναγεννήσεις (Mamakos et al., 2018; Giechaskiel et al., 2019).

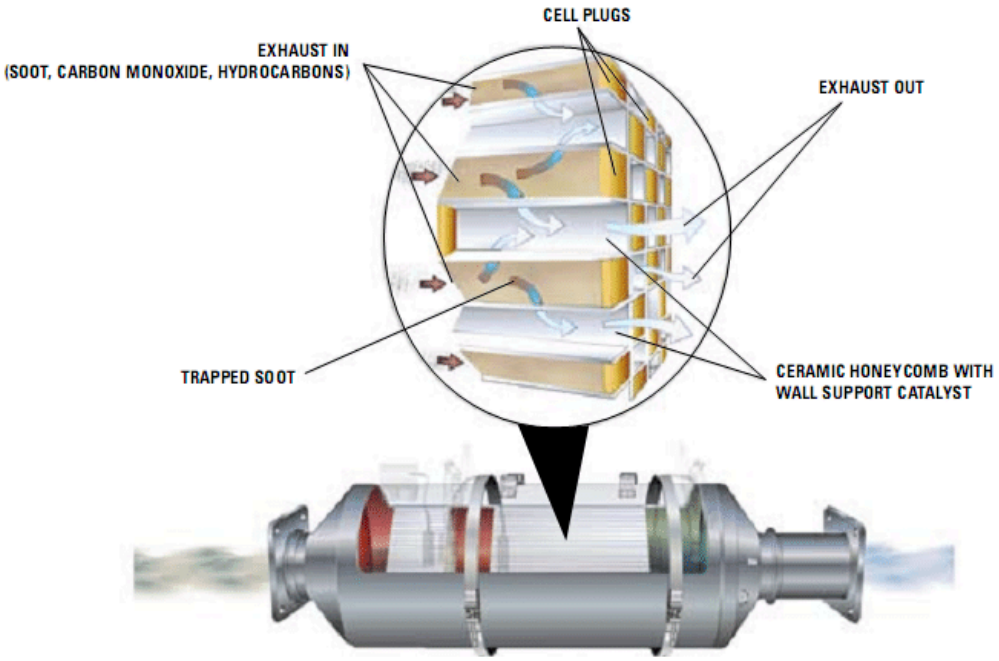
Στους κινητήρες CI, ο έλεγχος των εκπομπών NOx και αιθάλης επιτυγχάνεται κατά βάση μέσω αλυσίδας μετά-επεξεργασίας DOC–DPF–SCR–ASC, συχνά σε παραλλαγές με SCRF ή διπλό στάδιο SCR (Johnson, 2016). Ο DOC οξειδώνει CO και HC και συμβάλλει στη μετατροπή μονοξειδίου του αζώτου (Nitric Oxide, NO) σε διοξείδιο του αζώτου (Nitrogen Dioxide, NO_2), το οποίο προάγει την παγίδευση σωματιδίων και την παθητική αναγέννηση του DPF. Στην Εικόνα 2.5 απεικονίζεται συνδυασμένο σύστημα μετά-επεξεργασίας DOC–DPF με δευτερεύουσα έγχυση καυσίμου, η οποία χρησιμοποιείται για την υποστήριξη ενεργών αναγεννήσεων του φίλτρου σωματιδίων.



Εικόνα 2.5: Σχηματική απεικόνιση συστήματος μετά-επεξεργασίας καυσαερίων σε πετρελαιοκινητήρα, αποτελούμενου από οξειδωτικό καταλύτη ντίζελ (Diesel Oxidation Catalyst, DOC) σε συνδυασμό με φίλτρο σωματιδίων ντίζελ τύπου wall-flow (Diesel Particulate Filter, DPF). Πηγή: ResearchGate, από το άρθρο "After-treatment system DOC-CDPF with secondary fuel injection" (n.d.). Η εικόνα χρησιμοποιείται αποκλειστικά για εικονογραφικούς σκοπούς.

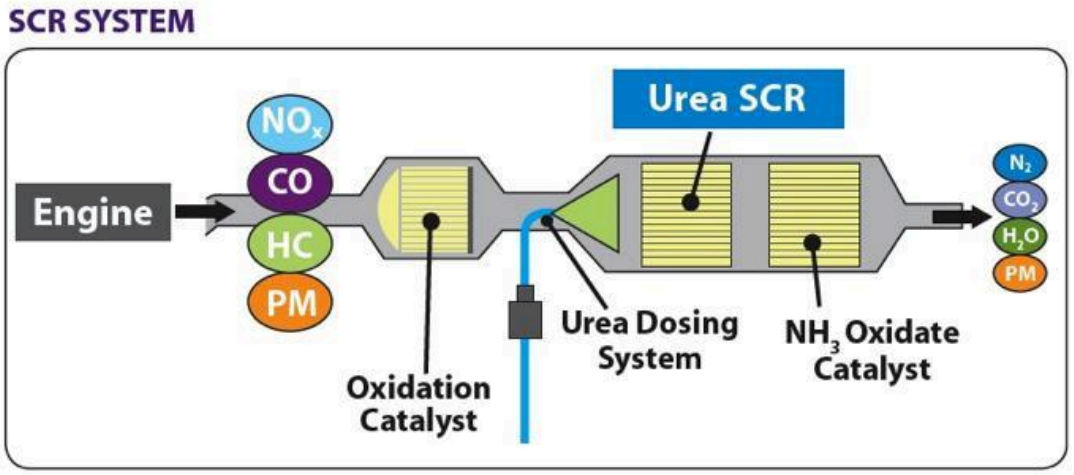
Το DPF κατακρατά αιθάλη και ανόργανη τέφρα σε πορώδες υπόστρωμα, με παθητικές αναγεννήσεις που υποβοηθούνται από NO_2 ή ενεργές αναγεννήσεις μέσω ανύψωσης της θερμοκρασίας των καυσαερίων, συνήθως με καύση καυσίμου μέσω μετεγχύσεων. Ο σχεδιασμός του συστήματος επιδιώκει ισορροπία μεταξύ αποτελεσματικότητας παγίδευσης και πτώσης πίεσης, ώστε να περιορίζεται η επίδραση στην κατανάλωση καυσίμου (Johnson, 2016). Στην Εικόνα 2.6 παρουσιάζεται η εσωτερική δομή ενός φίλτρου σωματιδίων diesel τύπου wall-flow. Απεικονίζεται η κεραμική κυψελωτή δομή με εναλλάξ φραγμένα κανάλια εισόδου και εξόδου, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η μηχανική κατακράτηση αιθάλης και

σωματιδίων, ενώ τα καθαρισμένα καυσαέρια διέρχονται διαμέσου των πορωδών τοιχωμάτων.



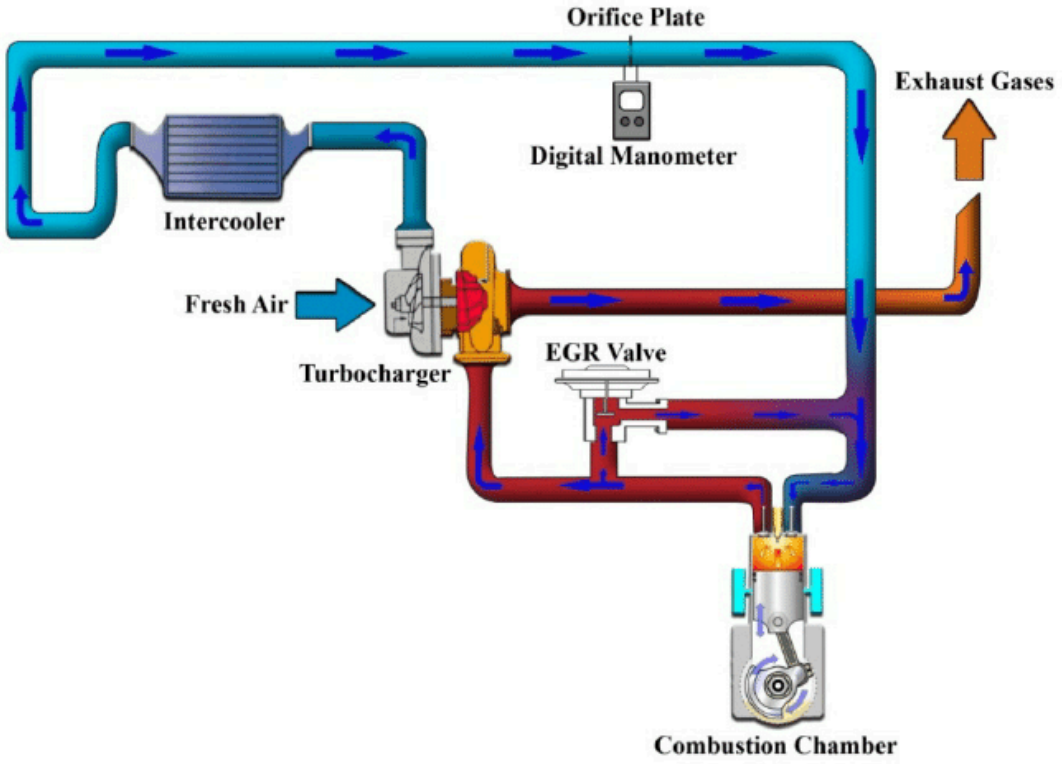
Εικόνα 2.6: Δομή φίλτρου σωματιδίων ντίζελ (Diesel Particulate Filter, DPF) τύπου wall-flow. Πηγή: ResearchGate, "Wall-flow Diesel Particulate Filter" (n.d.). Η εικόνα χρησιμοποιείται αποκλειστικά για εικονογραφικούς σκοπούς.

Η SCR χρησιμοποιεί διάλυμα ουρίας (AdBlue) για την παραγωγή NH_3, η οποία αναγάγει τα NOx σε N_2 σε καταλυτικά υποστρώματα υψηλής δραστικότητας σε χαμηλές θερμοκρασίες (π.χ. Cu-zeolite). Η παρουσία ASC downstream περιορίζει το φαινόμενο NH_3 slip, διατηρώντας τη συμμόρφωση σε ευρύ θερμοκρασιακό παράθυρο λειτουργίας (Johnson, 2016). Οι αρχιτεκτονικές SCRF συνδυάζουν την κατακράτηση PM και τη μείωση NOx στον ίδιο φορέα, μειώνοντας τον απαιτούμενο όγκο και τη μάζα του συστήματος και βελτιώνοντας τη θερμική αξιοποίηση κατά τις ψυχρές φάσεις, με αντάλλαγμα αυξημένες απαιτήσεις βαθμονόμησης ως προς τις στρατηγικές αναγέννησης και τη δοσομέτρηση ουρίας. Στην Εικόνα 2.7 απεικονίζεται μια τυπική διάταξη συστήματος SCR με δοχείο AdBlue, δοσομετρητή και καταλύτη αναγωγής.



Εικόνα 2.7: Τυπική διάταξη συστήματος επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής (Selective Catalytic Reduction, SCR) σε πετρελαιοκινητήρα. Πηγή: "SCR Technology Overview" (n.d.). Η εικόνα χρησιμοποιείται αποκλειστικά για εικονογραφικούς σκοπούς.

Η EGR λειτουργεί συμπληρωματικά στους δύο τύπους κινητήρων. Στους κινητήρες SI εφαρμόζεται κυρίως ως εσωτερική ή εξωτερική EGR για αύξηση της ειδικής απόδοσης και μείωση των εκπομπών NOx σε υψηλά φορτία, υποστηρίζοντας λειτουργία με αυξημένη συμπίεση και κύκλους Miller/Atkinson. Αντίστοιχα, στους κινητήρες CI η EGR υψηλής και χαμηλής πίεσης μειώνει τη θερμοκρασία φλόγας και περιορίζει τα NOx, απαιτώντας όμως ισχυρή υποστήριξη από υψηλές πιέσεις έγχυσης και πολλαπλές εγχύσεις, ώστε να περιοριστεί η δημιουργία αιθάλης (Heywood, 2018; Payri et al., 2013). Η βέλτιστη σύζευξη EGR με τη μετά-επεξεργασία ορίζει τον κλασικό συμβιβασμό NOx–soot στους κινητήρες CI και NOx–απόδοση στους κινητήρες SI. Στην Εικόνα 2.8 παρουσιάζεται ένα τυπικό σύστημα EGR με ψύκτη καυσαερίων και βαλβίδα ελέγχου ροής. Η ανακυκλοφορία μέρους των καυσαερίων προς τον θάλαμο καύσης μειώνει τη θερμοκρασία καύσης και περιορίζει τον σχηματισμό NOx, ιδιαίτερα σε μερικά φορτία λειτουργίας.



Εικόνα 2.8: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ανακυκλοφορίας καυσαερίων (Exhaust Gas Recirculation, EGR) με ψύκτη καυσαερίων και βαλβίδα ελέγχου ροής. Πηγή: ResearchGate, "A schematic diagram of EGR system" (n.d.). Η εικόνα χρησιμοποιείται αποκλειστικά για εικονογραφικούς σκοπούς.

Οι τεχνολογίες ελέγχου αμμωνίας/νιτρώδους, οι αισθητήρες και η διαγνωστική υποδομή έχουν εξελιχθεί σημαντικά. Αισθητήρες NOx upstream/downstream του SCR, αισθητήρες NH_3 και πίεσης/θερμοκρασίας σε DPF/GPF επιτρέπουν μοντελοβασισμένο έλεγχο (model-based control) και ακριβείς εκτιμήσεις φόρτου σωματιδίων, ολίσθησης αμμωνίας και κατάστασης οξείδωσης washcoat. Η διεύρυνση των κανονιστικών απαιτήσεων για μέτρηση PN έως 10 nm και οι αυστηρότερες φάσεις κρύας εκκίνησης σε RDE επέβαλαν θερμικές στρατηγικές «αφύπνισης» (catalyst heating), e-turbos για διατήρηση θερμικής ενέργειας, καθώς και αναβαθμίσεις στη μετρολογία και στους αλγορίθμους OBD/OBM, ώστε να ανιχνεύεται γήρανση ή απόκλιση επί του οχήματος (Giechaskiel et al., 2019; JRC, 2018). Στους κινητήρες SI-GDI, ο συνδυασμός TWC και GPF απαιτεί προσεκτική διαχείριση αναγεννήσεων για αποφυγή οξείδωσης θείου και αύξησης της ολίσθησης

NOx. Αντίστοιχα, σε κινητήρες CI η συνέργεια DOC–DPF–SCR μεγιστοποιείται με στρατηγικές που αυξάνουν προσωρινά την εξαγόμενη ενθαλπία καυσαερίων (π.χ. post-injection, late-injection, intake throttling), ιδιαίτερα σε αστική οδήγηση χαμηλού φορτίου (Johnson, 2016).

Πρωτογενείς παρεμβάσεις στον θάλαμο καύσης παραμένουν καθοριστικές. Στους κινητήρες SI, η βελτιστοποίηση του ψεκασμού, της στόχευσης και του χρονισμού, η μείωση του wall-wetting και η χρήση καυσίμων υψηλού RON με χαμηλή αρωματικότητα μειώνουν PN και επιτρέπουν υψηλότερους λόγους συμπίεσης. Στους κινητήρες CI, οι πολύ υψηλές πιέσεις common-rail, το rate shaping και οι πολλαπλές εγχύσεις περιορίζουν το πλάτος της προαναμειγμένης αιχμής και βελτιώνουν τον ρυθμό ανάμειξης, μειώνοντας ταυτόχρονα NOx και αιθάλη (Payri et al., 2013; Kalghatgi, 2018). Επιπλέον, η ανάπτυξη καθεστώτων LTC μέσω HCCI/CAI, PCCI/GCI και RCCI επιδιώκει εγγενή μείωση NOx και PM με μετατόπιση της καύσης σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Ωστόσο, η πλήρης αξιοποίηση σε μεταβατικές συνθήκες παραμένει ερευνητική πρόκληση και συνήθως απαιτεί ισχυρό έλεγχο EGR, μεταβλητό χρονισμό βαλβίδων και στενή ολοκλήρωση με υβριδικές αρχιτεκτονικές (Dec, 2009; Heywood, 2018).

Η αντιμετώπιση των μη-εξατμιστικών εκπομπών, αν και εξωκινητηριακή, επηρεάζει τη βαθμονόμηση ισχύος και ανάκτησης. Η αυξημένη ανάκτηση ενέργειας πέδησης σε MHEV/HEV μειώνει την εξάρτηση από τα υλικά τριβής φρένων, περιορίζοντας brake PM. Παράλληλα, βελτιστοποιημένες συνθέσεις ελαστικών χαμηλής φθοράς και κύλισης μειώνουν τα σωματίδια τροχιάς. Η ενσωμάτωση αυτών των στοιχείων στις στρατηγικές ελέγχου οχήματος είναι πλέον αναγκαία, καθώς τα όρια για PN10 και brake PM ελέγχονται στο ίδιο πλαίσιο συμμόρφωσης με τις σωληνοεκπομπές (JRC, 2021).

Συνολικά, το «καθαρό» σύστημα πρόωσης αποτελεί πλέον σύζευξη θερμοδυναμικής βελτιστοποίησης, προηγμένου ψεκασμού και καύσης και πολυσταδιακής μετά-επεξεργασίας, επιτηρούμενη από αισθητήρες δεύτερης γενιάς και αλγορίθμους πρόγνωσης γήρανσης. Η επίτευξη χαμηλών εκπομπών σε όλο το παράθυρο RDE προϋποθέτει ταχεία αφύπνιση καταλυτών, αποτελεσματική παγίδευση και αναγέννηση σωματιδίων, υψηλή απόδοση SCR σε χαμηλές θερμοκρασίες και

αυστηρό έλεγχο λ. Παράλληλα, η σύζευξη με εξηλεκτρισμό αποσυμφορεί τις ψυχρές και μεταβατικές φάσεις που ιστορικά καθόριζαν τις σωρευτικές εκπομπές (Johnson, 2016; McGrane & Douglas, 2021).

2.4 Τάσεις βελτίωσης ενεργειακής απόδοσης

Η σύγχρονη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης στις εμβολοφόρες ΜΕΚ ακολουθεί μια πολυεπίπεδη στρατηγική που συνδυάζει θερμοδυναμικό κύκλο, τριβές και παρασιτικά φορτία, διαδικασία καύσης, υπερπλήρωση και ολοκλήρωση με εξηλεκτρισμό. Στους κινητήρες σπινθηρισμού, η υιοθέτηση κύκλων Miller/Atkinson με μεταβλητό χρονισμό/ύψος βαλβίδων μειώνει τις απώλειες άντλησης και επιτρέπει υψηλότερους λόγους συμπίεσης όταν συνδυάζεται με υπερπλήρωση και καύσιμα υψηλού RON, μετατοπίζοντας τη λειτουργία προς νησίδες χαμηλού BSFC χωρίς κρουστικότητα (Heywood, 2018; Stone, 2012). Η προπορεία σπινθήρα κοντά στο MBT παραμένει ζητούμενο υπό μεταβατικές συνθήκες. Η εκτεταμένη EGR (συμπεριλαμβανομένης ψυχρής EGR) μειώνει τη θερμοκρασία φλόγας, βελτιώνει τον βαθμό απόδοσης και αναστέλλει την κρουστικότητα, ιδίως σε υπερπληρωμένες εφαρμογές GDI (Heywood, 2018).

Η εξέλιξη της ανάφλεξης αποτελεί κεντρικό μοχλό απόδοσης. Η προθαλαμική ανάφλεξη με στροβιλώδη πίδακα δημιουργεί ισχυρούς πυρήνες φλόγας που επιτρέπουν πολύ φτωχά μίγματα και υψηλή EGR χωρίς αστάθεια, μειώνοντας απώλειες άντλησης και θερμοκρασία καύσης (Toulson et al., 2010). Συμπληρωματικά, η έγχυση νερού/μίγματος νερού–μεθανόλης περιορίζει τις θερμοκρασίες κορυφής και επιτρέπει μεγαλύτερη προπορεία/συμπίεση, με κέρδη BSFC σε περιοχές υψηλού φορτίου (Kalghatgi, 2018). Στους κινητήρες GDI, η συστηματική αντιμετώπιση του LSPI μέσω βαθμονόμησης ψεκασμού/πίεσης, ελαίων χαμηλού ασβεστίου και ελεγχόμενης στρωμάτωσης αυξάνει την αξιοπιστία σε υψηλές εντάσεις υπερπλήρωσης χωρίς ποινή στην απόδοση (Heywood, 2018).

Στους πετρελαιοκινητήρες, η ενεργειακή βελτίωση προκύπτει από υψηλές πιέσεις common-rail, εξελιγμένη διαμόρφωση ρυθμού (rate shaping) και πολλαπλές εγχύσεις που εξομαλύνουν τον ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας και διευκολύνουν την ανάμειξη, επιτρέποντας λειτουργία σε περιοχές χαμηλού BSFC με περιορισμένο

θόρυβο καύσης (Payri et al., 2013). Η συνδυασμένη χρήση EGR υψηλής/χαμηλής πίεσης και υπερπλήρωσης μεταβλητής γεωμετρίας (VGT) ή/και ηλεκτρικής υποβοήθησης (e-turbo) διατηρεί υψηλό λόγο περίσσειας αέρα και βέλτιστο σάρωμα σε όλο τον χάρτη, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες άντλησης και τις θερμικές ποινές (Johnson, 2016). Η μετατόπιση προς καθεστώτα καύσης χαμηλής θερμοκρασίας (HCCI/PCCI/GCI) στοχεύει περαιτέρω μείωση θερμικών απωλειών, αν και ο έλεγχος χρονισμού/σταθερότητας σε μεταβατικές συνθήκες παραμένει ερευνητική πρόκληση (Dec, 2009; Kalghatgi, 2018).

Οι μειώσεις τριβών και παρασιτικών φορτίων συνιστούν διαρκές πεδίο βελτιστοποίησης. Επικαλύψεις άνθρακα τύπου διαμαντιού (Diamond-Like Carbon, DLC) σε δακτυλίους/εκκεντροφόρους, δακτύλιοι χαμηλής τάσης, βελτιωμένη γεωμετρία κουζινέτων και λιπαντικά χαμηλού ιξώδους με προσεκτική διαχείριση High-Temperature High-Shear (HTHS) μειώνουν τις μηχανικές απώλειες χωρίς να υποβαθμίζουν την αντοχή (Heywood, 2018). Η ηλεκτροποίηση βοηθητικών συστημάτων (ηλεκτρικές αντλίες νερού/λαδιού, ηλεκτρομαγνητικός συμπλέκτης συμπιεστή A/C) και ο έξυπνος έλεγχος θερμικής διαχείρισης (split-cooling, ενεργές γρίλιες, ταχεία θέρμανση λαδιού) επιταχύνουν την επίτευξη θερμικού καθεστώτος υψηλής απόδοσης και μειώνουν τις απώλειες άντλησης. Η αποσύζευξη αξεσουάρ από το στρόφαλο και η on-demand λειτουργία τους είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές σε κύκλους με υψηλό μερίδιο μερικών φορτίων (Stone, 2012).

Η υπερπλήρωση και η αρχιτεκτονική εισαγωγής/εξαγωγής καθορίζουν την ποιότητα πλήρωσης και τον ισοζυγισμό απωλειών. Συνδυασμοί serial/parallel turbo, e-booster για χαμηλά στροφόμετρα, ψύκτες ανακυκλοφορίας και ψύξη συμπιεσμένου αέρα με χαμηλό Δp (πτώση πίεσης) βελτιώνουν την ειδική κατανάλωση και μειώνουν τον χρόνο υπερπλήρωσης, αυξάνοντας τη χρησιμότητα του downsizing χωρίς φαινόμενα lag (Heywood, 2018). Η βελτιστοποίηση του συστήματος εξαγωγής με ελαχιστοποίηση backpressure και συντονισμό παλμών (pulse tuning) περιορίζει τις απώλειες άντλησης στους κινητήρες SI και βελτιώνει τον λόγο περίσσειας αέρα στους κινητήρες CI. Παράλληλα, τεχνολογίες ανάκτησης θερμότητας (π.χ. turbocompounding ή οργανικοί κύκλοι Rankine μικρής κλίμακας) προσφέρουν

πρόσθετα περιθώρια απόδοσης σε βαρέα καθήκοντα, με αυστηρές όμως απαιτήσεις συσκευασίας/κόστους (Ricardo, 2021).

Στο επίπεδο στρατηγικής λειτουργίας, η διαχείριση κυλίνδρων (cylinder deactivation, skip-fire) επιτρέπει λειτουργία των ενεργών κυλίνδρων σε υψηλότερα φορτία, πλησιέστερα στις νησίδες βέλτιστου BSFC, περιορίζοντας τις απώλειες άντλησης σε μερικά φορτία. Ο συνδυασμός με ευφυείς μεταδόσεις (ευρεία κλιμάκωση σχέσεων, DCT υψηλής απόδοσης) μεγιστοποιεί τον χρόνο παραμονής στη «γλυκιά ζώνη» απόδοσης, ενώ η χαρτογράφηση ροπής/πεντάλ και τα συστήματα πρόβλεψης (eco-routing, predictive shifting) εναρμονίζουν τον θερμικό κύκλο με τις πραγματικές συνθήκες οδήγησης (Heywood, 2018; Ricardo, 2021).

Ο εξηλεκτρισμός λειτουργεί καταλυτικά για την ενεργειακή απόδοση των ΜΕΚ. Τα 48 V MHEV μειώνουν τις απώλειες μέσω ανάκτησης πέδησης, υποβοήθησης ροπής στις μεταβατικές φάσεις και εκτεταμένου stop-start, ενώ τα HEV/PHEV ανακατανέμουν τον κύκλο λειτουργίας, αποφεύγοντας θερμικά δυσμενείς περιοχές και ψυχρές εκκινήσεις, με ουσιαστικά κέρδη BSFC και εκπομπών (Ricardo, 2021). Η στενή ολοκλήρωση ελέγχου ισχύος με θερμικές στρατηγικές (π.χ. προθέρμανση καταλυτών/DPF, intake heating) επιτρέπει να διατηρείται υψηλή ενεργειακή απόδοση χωρίς να θυσιάζεται η απόδοση μετά-επεξεργασίας.

Τέλος, οι ιδιότητες του καυσίμου παραμένουν μοχλός απόδοσης. Βενζίνες υψηλού RON/μέτριας ευαισθησίας με χαμηλή αρωματικότητα και ευνοϊκή πτητικότητα μειώνουν τις ανάγκες εμπλουτισμού/ψύξης και επιτρέπουν υψηλότερη συμπίεση στους κινητήρες SI, ενώ πετρέλαια με ελεγχόμενη καμπύλη απόσταξης και υψηλό κετανικό αριθμό βελτιώνουν την προανάμειξη και τον ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας στους κινητήρες CI, με οφέλη στον συμβιβασμό NOx–soot και στο BSFC (Kalghatgi, 2018). Η σταδιακή εισαγωγή συνθετικών καυσίμων με κατάλληλη μοριακή σχεδίαση δύναται να συνδυάσει θερμοφυσικές ιδιότητες που μειώνουν θερμικές/χημικές απώλειες και βελτιώνουν τη συνεργασία με TWC/DPF/SCR, υπό την προϋπόθεση αντίστοιχης βαθμονόμησης ψεκασμού/ανάφλεξης.

Κεφάλαιο 3: Το Πρότυπο Euro 7

3.1 Νέες απαιτήσεις και όρια εκπομπών

Το Euro 7 συνιστά την πιο συνεκτική μεταρρύθμιση του ευρωπαϊκού πλαισίου εκπομπών μετά το Euro 6, καθώς ενοποιεί τις απαιτήσεις για ελαφρά και βαρέα οχήματα, επεκτείνει το εύρος των ρύπων, ενισχύει την επιτήρηση σε πραγματικές συνθήκες και εισάγει για πρώτη φορά συστηματική ρύθμιση μη-εξατμιστικών εκπομπών. Στα ελαφρά οχήματα με κινητήρες σπινθηροανάφλεξης (spark-ignition, SI) ή αυτανάφλεξης (compression-ignition, CI), η φιλοσοφία δεν περιορίζεται σε οριακές μειώσεις αριθμητικών ορίων, αλλά μετατοπίζεται προς την αξιόπιστη επίδοση σε ευρύτερο θερμοκρασιακό και λειτουργικό παράθυρο, ενσωματώνοντας την ψυχρή εκκίνηση, τη διάρκεια ζωής συστημάτων και τη συνεχή παρακολούθηση επί του οχήματος (European Commission, 2022; Council of the European Union, 2024).

Η μετρολογία του αριθμού σωματιδίων επεκτείνεται από τα 23 nm στα 10 nm (Particle Number 10 nm, PN10), αντιμετωπίζοντας την αυξημένη συμβολή πολύ μικρών σωματιδίων σε σενάρια άμεσου ψεκασμού και ψυχρών φάσεων. Το μέτρο αυτό επηρεάζει τόσο τους βενζινοκινητήρες άμεσου ψεκασμού όσο και διαμορφώσεις πετρελαιοκινητήρων με εξελιγμένα συστήματα μετά-επεξεργασίας (Giechaskiel et al., 2019; JRC, 2018, 2021). Παράλληλα, το πλαίσιο εισάγει ρητές απαιτήσεις για αμμωνία (ammonia, NH_3) και, κατά περίπτωση, για αέρια όπως υποξείδιο του αζώτου (nitrous oxide, N_2O) και μεθάνιο (methane, CH_4), με στόχο τον περιορισμό δευτερογενών εκπομπών που μπορεί να προκύψουν από στρατηγικές μείωσης οξειδίων του αζώτου (Nitrogen Oxides, NOx) ή από ειδικά καύσιμα/κύκλους καύσης (Johnson, 2016; UNECE GRPE, 2022). Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζεται συνοπτική σύγκριση των ορίων εκπομπών Euro 6d και Euro 7 για επιβατικά οχήματα, περιλαμβάνοντας βασικές διαφοροποιήσεις σε NOx, μονοξείδιο του άνθρακα (Carbon Monoxide, CO), σωματιδιακή ύλη (Particulate Matter, PM), PN10 και NH_3, καθώς και τη μεταβολή των διαδικασιών του εργαστηριακού κύκλου δοκιμών (World-harmonised Light Vehicles Test Procedure, WLTP) και των δοκιμών πραγματικής οδήγησης (Real Driving Emissions, RDE).

Ρύπος	Euro 6d	Euro 7
NOx (mg/km)	60 (βενζίνη) / 80 (ντίζελ)	60 (και βενζίνη και να ντίζελ)
CO (mg/km)	1000 (βενζίνη)/500 (νίζελ)	1000 (βενζίνη)/ 500
PM (mg/km)	4,5	4,5
PN ≥ 23 nm (#/km)	6×10^{11}	6×10^{11}
PN ≥ 10 nm (#/km)	Δεν απαιτούνταν	10 mg/km
NH_3 (mg/km)	Δεν απαπούνταν σωβατα	10 mg/km
N_2O (γνvkm)	Δεν ρυθμιῶσταν	Ρύψυμση κατά περίπτωσοεις
CH_4 (γνvkm)	Δεν ευθμιζνόταν	Ρύμμιση σε είδικές περιπτ.
WLTP	Υποχρεωτική	Υποχρέωτική
RDE (on-toad)	Υποχρεωτική, με ανοχές	Διευνρμενά εύρσς θερμόκρασίών
PN μετρήσιμο σεRDE	≥ 160 000	≥ 10 nm (PN10)
Δίαρκεια ζωής	160.000 km*	200.000 km + ενιοχυνενα πρστόκολα
OBD	Κλασικό OBD	OBM – σοντηρος επιτύρησι NOwPN

Εικόνα 3.1: Σύγκριση ορίων εκπομπών Euro 6d και Euro 7 για επιβατικά οχήματα. Πηγή: Σύνθεση στοιχείων από European Commission (2022), Council of the EU (2024) και JRC Technical Reports.

Ιδιαίτερη καινοτομία αποτελεί η προσθήκη ορίων για μη-εξατμιστικές πηγές, αρχικά για σωματίδια φθοράς φρένων σε επιβατικά και ελαφρά επαγγελματικά οχήματα, με προοδευτική σύσφιξη στο μεσοπρόθεσμο χρονοδιάγραμμα. Η ρύθμιση αυτή αναγνωρίζει ότι, όσο οι σωληνοεκπομπές μειώνονται, η σχετική συμβολή των σωματιδίων από τριβή φρένων και επαφή ελαστικών–οδοστρώματος γίνεται σημαντική για την ποιότητα του αέρα. Σε πρακτικό επίπεδο, αυτό οδηγεί σε υλικά χαμηλής φθοράς/χαμηλού χαλκού, επανασχεδιασμό δισκοπλακών και, στις εξηλεκτρισμένες διαμορφώσεις, σε αυξημένη αξιοποίηση αναγεννητικής πέδησης ώστε να περιορίζεται η χρήση μηχανικών φρένων (ICCT, 2024; Council of the European Union, 2024). Για τα ηλεκτροκίνητα οχήματα προβλέπονται επίσης ελάχιστες απαιτήσεις αντοχής μπαταριών (state-of-health), ώστε να διασφαλίζεται ότι τα χαρακτηριστικά απόδοσης και αυτονομίας διατηρούνται σε βάθος χρόνου υπό πραγματικές συνθήκες (European Commission, 2022).

Στο επίπεδο διαδικασιών, το Euro 7 εδραιώνει μια περισσότερο «ρεαλιστική» μεθοδολογία συμμόρφωσης. Ο εργαστηριακός κύκλος WLTP παραμένει το θεμέλιο για την τυποποιημένη σύγκριση, αλλά το παράθυρο των δοκιμών RDE διευρύνεται σημαντικά ως προς θερμοκρασία, υψόμετρο, προφίλ ταχυτήτων και απαιτήσεις δυναμικής, με ρητή ενίσχυση της συνεισφοράς ψυχρής εκκίνησης στη συνολική εκπομπή. Η χρήση φορητών συστημάτων μέτρησης (Portable Emissions Measurement Systems, PEMS) καθίσταται κεντρική όχι μόνο για NOx αλλά και για PN έως 10 nm, με συνοδευτικά πρωτόκολλα αβεβαιότητας/βαθμονόμησης που διασφαλίζουν αναπαραγωγιμότητα μεταξύ εργαστηρίων και πεδίου (JRC, 2018, 2021; UNECE GRPE, 2022). Επιπλέον, οι απαιτήσεις διάρκειας ζωής αυξάνονται τόσο ως προς το χιλιομετρικό ισοδύναμο όσο και ως προς τη διατήρηση απόδοσης καταλυτών, φίλτρων σωματιδίων και αισθητήρων, με αποτέλεσμα να απαιτούνται αυστηρότερα προγράμματα γήρανσης, αναγεννήσεων και διάγνωσης.

Η υποδομή επιτήρησης επί του οχήματος αναβαθμίζεται από κλασική διάγνωση (On-Board Diagnostics, OBD) σε επιτήρηση (On-Board Monitoring, OBM), η οποία δεν περιορίζεται στην ανίχνευση βλαβών αλλά παρακολουθεί και αξιολογεί διαρκώς την περιβαλλοντική επίδοση υποσυστημάτων με βάση μετρούμενα ή εκτιμώμενα μεγέθη. Η μετάβαση αυτή απαιτεί αισθητήρες δεύτερης γενιάς για NOx, πιθανώς ενσωμάτωση αισθητήρων αμμωνίας και αριθμού σωματιδίων, καθώς και μοντελοβασισμένους αλγορίθμους που μπορούν να διακρίνουν μεταξύ φυσιολογικής γήρανσης και πραγματικής απόκλισης απόδοσης. Αντίστοιχα, η διαφάνεια δεδομένων και τα όρια ανοχής επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο οι κατασκευαστές σχεδιάζουν τις στρατηγικές θερμικής διαχείρισης και αναγέννησης, ιδίως σε αστικά προφίλ οδήγησης όπου οι θερμοκρασίες εξαγωγής παραμένουν χαμηλές (Johnson, 2016; Ricardo, 2021).

Ως προς τα ίδια τα όρια εκπομπών, η φιλοσοφία του Euro 7 διατηρεί τη σύγκλιση μεταξύ διαφορετικών καυσίμων και διαμορφώσεων, αποφεύγοντας μεγάλες διαφοροποιήσεις που θα οδηγούσαν σε στρεβλώσεις ανάπτυξης. Η ουσία μετακινείται από την «ονομαστική» τιμή σε πάγιο εύρος συνθηκών όπου η επίδοση πρέπει να είναι σταθερά καλή. Για τους βενζινοκινητήρες, το αυστηρότερο PN10 σε κρύες και μεταβατικές φάσεις καθιστά πρακτικά αναγκαίο τον συνδυασμό καταλύτη

τριών δρόμων με φίλτρο σωματιδίων (Three-Way Catalyst, TWC, με Gasoline Particulate Filter, GPF) χαμηλής πτώσης πίεσης και καλής συμπεριφοράς σε συχνές αναγεννήσεις. Για τους πετρελαιοκινητήρες, η απαίτηση υψηλής απόδοσης απομείωσης NOx σε ευρύ θερμοκρασιακό φάσμα ωθεί σε αρχιτεκτονικές διπλής επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής (dual-Selective Catalytic Reduction, dual-SCR) ή/και φίλτρα SCR-on-Filter (SCRF), με αυξημένη ακρίβεια στη δοσομέτρηση ουρίας και βελτιωμένη διαχείριση θερμοκρασίας εξαγωγής στις κρύες φάσεις. Σε αμφότερους τους τύπους, η επιτυχής συμμόρφωση προϋποθέτει ολιστική βαθμονόμηση ψεκασμού, ανάφλεξης, ανακυκλοφορίας καυσαερίων (Exhaust Gas Recirculation, EGR) και θερμικής διαχείρισης, ώστε να επιτυγχάνεται ταχεία «αφύπνιση» καταλυτών και σταθερή απόδοση υπό RDE (Giechaskiel et al., 2019; McGrane & Douglas, 2021; Ricardo, 2021).

Συνολικά, το Euro 7 μετατρέπεται από έναν κατάλογο αριθμητικών ορίων σε ένα σύστημα διασφάλισης επίδοσης στον πραγματικό κόσμο, με διευρυμένη μετρολογία σωματιδίων, ενισχυμένο RDE και απαιτήσεις ανθεκτικότητας/εποπτείας σε βάθος χρόνου. Η συνέπεια αυτών των αλλαγών είναι ότι ο σχεδιασμός του συστήματος πρόωσης δεν μπορεί πλέον να αντιμετωπίζεται αποκομμένα: η θερμοδυναμική του κύκλου, ο ψεκασμός/η καύση, η μετά-επεξεργασία, η θερμική αρχιτεκτονική, οι αισθητήρες και ο εξηλεκτρισμός πρέπει να συν-σχεδιάζονται εξαρχής με σκοπό την επίδοση εκπομπών σε «εύρος» και όχι σε μία μεμονωμένη συνθήκη δοκιμής (European Commission, 2022; Council of the European Union, 2024; UNECE GRPE, 2022).

3.2 Τρόποι μέτρησης και δοκιμών

Το πλαίσιο συμμόρφωσης του Euro 7 δομείται πάνω σε δύο συμπληρωματικούς πυλώνες: την εργαστηριακή πιστοποίηση στον κύκλο WLTP και την επιβεβαίωση επίδοσης σε RDE με χρήση φορητών συστημάτων μέτρησης (Portable Emissions Measurement Systems, PEMS). Ο WLTP παραμένει το βασικό συγκρίσιμο σημείο αναφοράς, με ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες και τυποποιημένα προφίλ ταχυτήτων και επιταχύνσεων. Ωστόσο, το ουσιαστικό βάρος μετατοπίζεται στη διασφάλιση επίδοσης στον πραγματικό κόσμο: το παράθυρο RDE του Euro 7 διευρύνεται ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, το υψόμετρο, τη δυναμική

οδήγησης και τη ρητή συμμετοχή ψυχρής εκκίνησης, ενώ αυξάνονται οι απαιτήσεις διάρκειας ζωής και επιτήρησης επί του οχήματος (European Commission, 2022; ICCT, 2024).



Εικόνα 3.2: Διάταξη φορητού συστήματος μέτρησης εκπομπών (PEMS) AVL M.O.V.E iS+ εγκατεστημένου σε όχημα για δοκιμές πραγματικής οδήγησης (RDE). Πηγή: AVL, AVL M.O.V.E iS+ (n.d.).

Η επέκταση της μετρολογίας αριθμού σωματιδίων από τα 23 nm στα 10 nm (PN10) αποτελεί καίρια τομή, καθώς στοχεύει τα πολύ μικρά σωματίδια που παράγονται ιδίως σε διαμορφώσεις άμεσου ψεκασμού και σε κρύες φάσεις. Προς τούτο, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή και το Joint Research Centre (JRC) έχουν τεκμηριώσει προδιαγραφές και αβεβαιότητες για PN-PEMS στα 10 nm, ώστε η on-road μέτρηση να είναι αναπαραγώγιμη (Giechaskiel et al., 2020; JRC, 2018; JRC, 2021).

Στις δοκιμές RDE, το όχημα εξοπλίζεται με PEMS για NOx, CO και PN10, καθώς και με αισθητήρες ροής και θερμοκρασιών, σύμφωνα με πρωτόκολλα βαθμονόμησης και ελέγχων αβεβαιότητας που έχουν αναπτυχθεί στο πλαίσιο UNECE/GRPE και JRC. Η ανάλυση δεδομένων βασίζεται σε παραθύρωση κινούμενου μέσου (moving-average window, MAW), ευθυγραμμισμένη με τις ροές εκπομπών αναφοράς, ώστε να διασφαλίζεται ισοδυναμία ενεργειακού έργου μεταξύ εργαστηριακής και οδικής αξιολόγησης. Παράλληλα, εφαρμόζονται κανόνες εγκυρότητας για την κάλυψη αστικού, υπεραστικού και αυτοκινητοδρόμου σε ελάχιστες διάρκειες και με όρια

δυναμικής (UNECE GRPE, 2022; JRC, 2018, 2021). Σε αντιδιαστολή με παλαιότερα στάδια, το Euro 7 δίνει έμφαση στη συστηματική ενσωμάτωση της ψυχρής εκκίνησης στη συνολική εκπομπή του ταξιδιού και στην επαλήθευση της σταθερότητας επίδοσης σε ευρύτερο θερμοκρασιακό εύρος, εξέλιξη που επηρεάζει άμεσα τις στρατηγικές θερμικής διαχείρισης καταλυτών και φίλτρων.

Παράλληλα με τις τυπικές δοκιμές, το Euro 7 εισάγει ενισχυμένες απαιτήσεις αντοχής. Η συμμόρφωση οφείλει να διατηρείται σε μεγαλύτερο «κύριο» και «πρόσθετο» χρόνο ζωής, με ρητές προδιαγραφές γήρανσης και επαλήθευσης μετά από αυξημένα χιλιόμετρα ή ώρες λειτουργίας. Η ρύθμιση προβλέπει On-Board Monitoring (OBM), το οποίο παρακολουθεί σε συνεχή βάση ενδεικτικά μεγέθη για NOx και PM (και NH_3 στα βαρέα οχήματα), καταγράφοντας σημαντικές υπερβάσεις για χρήση σε ελέγχους καταλληλότητας κυκλοφορίας και εποπτεία συμμόρφωσης τύπων (ICCT, 2024). Συμπληρωματικά, τα συστήματα On-Board Fuel/Energy Consumption Monitoring (OBFCM) επεκτείνονται ώστε να καταγράφουν—και να καθιστούν διαθέσιμα ακόμη και μέσω over-the-air—δεδομένα κατανάλωσης καυσίμου ή ενέργειας, τα οποία διασταυρώνονται με τις τυποποιημένες και οδικές επιδόσεις.

Για τη μέτρηση PN10, πρόσφατα τεχνικά κείμενα του JRC επιβεβαιώνουν ότι σύγχρονα PN-PEMS μπορούν να επιτύχουν συμφωνία τάξης ±40% έναντι εργαστηριακών αναφορών, με χρήση κατάλληλα χαρακτηρισμένων γραμμών δειγματοληψίας και προσαρμογών απωλειών, υπό την προϋπόθεση τήρησης των διαδικασιών βαθμονόμησης και επαληθεύσεων (Giechaskiel et al., 2020; JRC, 2018). Σε συνδυασμό με τη θερμοκρασιακή και δυναμική επέκταση της RDE, η επιτυχής συμμόρφωση μετατοπίζεται από τη «στιγμιαία» επίδοση σε κύκλο προς ανθεκτική επίδοση σε φάσματα συνθηκών που αντικατοπτρίζουν τη χρήση στον δρόμο. Τέλος, το Euro 7 προβλέπει εκτελεστικές πράξεις για τις λεπτομέρειες δοκιμών, μεθοδολογιών και ελέγχων προειδοποίησης/υποκίνησης, στοιχείο κρίσιμο για την πλήρη τυποποίηση WLTP/RDE/PEMS και τη διαφάνεια δεδομένων (ICCT, 2024; Council of the European Union, 2024).

3.3 Επιπτώσεις των νέων απαιτήσεων στις ΜΕΚ

Η μετάβαση στο Euro 7 μετατοπίζει το βάρος από την επίδοση «στο δυναμόμετρο» στη σταθερή συμμόρφωση σε ευρύ φάσμα πραγματικών συνθηκών, γεγονός που επηρεάζει ριζικά τη σχεδίαση και τη βαθμονόμηση των εμβολοφόρων ΜΕΚ. Για τους κινητήρες SI, η επέκταση της μετρολογίας αριθμού σωματιδίων από τα 23 nm στα 10 nm σε WLTP και RDE καθιστά την ποιότητα ψεκασμού και την αποφυγή wall-wetting κρίσιμες ακόμη και σε ομοιογενείς στρατηγικές. Πρακτικά, οι διατάξεις τριοδικού καταλύτη με φίλτρο σωματιδίων βενζίνης (TWC με GPF) γίνονται καθολικές και απαιτούν φίλτρα χαμηλής πτώσης πίεσης με σταθερή αποτελεσματικότητα και ελεγχόμενες αναγεννήσεις. Παράλληλα, η ταχεία «αφύπνιση» του TWC μέσω θερμικής διαχείρισης—όπως ηλεκτρικοί θερμαντήρες, καθυστέρηση σπινθήρα και κοντινή τοποθέτηση καταλύτη—είναι απαραίτητη ώστε να μειωθούν οι σωρευτικές εκπομπές στην κρύα εκκίνηση. Η διεύρυνση του παραθύρου RDE ως προς θερμοκρασία και δυναμική οδηγεί σε ανάγκη πιο «πλατιών» χαρτογραφήσεων ψεκασμού και ανάφλεξης, καθώς και σε εντονότερη χρήση EGR, με στόχο την επαναφορά της λειτουργίας κοντά στον χρονισμό μέγιστης ροπής πέδησης (Maximum Brake Torque timing, MBT) χωρίς αύξηση του PN10 (European Commission, 2022; JRC, 2018; JRC, 2021; ICCT, 2024).

Στους κινητήρες CI, η απαίτηση υψηλής απόδοσης απομείωσης NOx σε ευρύτερο θερμοκρασιακό εύρος—ιδίως κατά τις ψυχρές και αστικές φάσεις RDE—ωθεί την υιοθέτηση αρχιτεκτονικών διπλής επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής (dual-SCR) ή/και φίλτρων SCR-on-Filter (SCRF), με φορείς χαμηλής θερμοκρασίας (π.χ. Cu-ζεόλιθους), ακριβέστερη δοσομέτρηση ουρίας και προχωρημένες στρατηγικές θερμικής «αφύπνισης», όπως post-injection, intake throttling και ηλεκτρική υποβοήθηση υπερπλήρωσης (e-turbo). Παράλληλα, η μακροχρόνια διατήρηση απόδοσης του DPF επιβάλλει σχεδίαση υποστρωμάτων και επικαλύψεων που ελαχιστοποιούν την πτώση πίεσης και επιτρέπουν ελεγχόμενες αναγεννήσεις χωρίς υπερφόρτωση του οξειδωτικού καταλύτη ντίζελ (Diesel Oxidation Catalyst, DOC). Η συνέπεια είναι αυξημένοι όγκοι και μάζες συστημάτων μετά-επεξεργασίας, ισχυρότερες απαιτήσεις συσκευασίας και λεπτομερέστερη συν-βαθμονόμηση ψεκασμού, EGR και θερμικής διαχείρισης, ώστε να διασφαλίζεται σταθερή απόδοση

σε PN10 και NOx σε όλο το φάσμα χρήσης (Council of the European Union, 2024; ICCT, 2024).

Η θεσμοθέτηση μη-εξατμιστικών ορίων—πρωτίστως για σωματίδια φρένων σε επιβατικά και ελαφρά επαγγελματικά οχήματα—μεταφέρει μέρος της «πίεσης συμμόρφωσης» από τον κινητήρα στο επίπεδο οχήματος. Σε εφαρμογές ΜΕΚ, η μείωση του μηχανικού φρεναρίσματος μέσω εκτεταμένης ανάκτησης ενέργειας σε ήπιο ή πλήρη υβριδισμό (MHEV/HEV), η χρήση υλικών χαμηλής φθοράς και χαμηλού χαλκού, καθώς και διατάξεις συλλογής PM φρένων, εντάσσονται πλέον στο βασικό πακέτο συμμόρφωσης. Ιδιαίτερα για οχήματα με υψηλό αστικό προφίλ, ο ανασχεδιασμός του συστήματος πέδησης και η στρατηγική ροπής ανακοπής αποτελούν αναγκαίες παρεμβάσεις ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι brake-PM χωρίς επιβάρυνση θορύβου, άνεσης ή απόδοσης πέδησης (ICCT, 2024; Council of the European Union, 2023).

Το κανονιστικό πέρασμα από OBD σε ενισχυμένο OBM μεταβάλλει το πλαίσιο ελέγχου: δεν αρκεί πλέον η ανίχνευση βλαβών, αλλά απαιτείται συνεχής εποπτεία της περιβαλλοντικής απόδοσης. Για τις ΜΕΚ αυτό συνεπάγεται αισθητήρες δεύτερης γενιάς (NOx upstream/downstream, πιθανώς NH_3 και PN), μοντελοβασισμένους εκτιμητές φόρτου φίλτρων και ολίσθησης αμμωνίας, καθώς και αλγορίθμους που διακρίνουν τη φυσιολογική γήρανση από πραγματική απόκλιση απόδοσης. Η αυξημένη διαφάνεια δεδομένων επιβάλλει πιο «συντηρητικές» στρατηγικές θερμικών αναγεννήσεων και αντιμετώπισης χαμηλών θερμοκρασιών εξαγωγής, καθώς συστηματικές αποτυχίες επίτευξης light-off ή υπερβάσεις NH_3 και PN αποτυπώνονται άμεσα στην εποπτεία OBM (JRC, 2021; ICCT, 2024).

Οι απαιτήσεις αντοχής και διάρκειας ζωής επηρεάζουν άμεσα τη χημεία καταλυτών και τα προγράμματα γήρανσης. Η διατήρηση απόδοσης των TWC, GPF, DPF και SCR σε μεγαλύτερους χιλιομετρικούς ορίζοντες οδηγεί σε αυξημένες φορτίσεις πολύτιμων μετάλλων, washcoats με βελτιωμένη αντοχή σε θερμικές και θειικές προσβολές, καθώς και σε ενισχυμένα προγράμματα προ-γήρανσης για σκοπούς πιστοποίησης. Στο πεδίο της μετρολογίας PN10, τεχνικά κείμενα του JRC δείχνουν ότι σύγχρονα PN-PEMS μπορούν να επιτύχουν συμφωνία τάξης ±40% έναντι εργαστηριακών αναφορών, υπό αυστηρές διαδικασίες βαθμονόμησης και ελέγχων

απωλειών· συνεπώς, οι βαθμονομήσεις κινητήρα και μετά-επεξεργασίας πρέπει να είναι «ανθεκτικές» στην αβεβαιότητα του πεδίου (Giechaskiel et al., 2020; JRC, 2018).

Σε συστημικό επίπεδο, οι κατασκευαστές καλούνται να ισορροπήσουν μεταξύ επένδυσης σε βαθιά βελτίωση των ΜΕΚ μέσω προηγμένης καύσης, υψηλής απόδοσης μετά-επεξεργασίας και εξελιγμένης θερμικής αρχιτεκτονικής και σε εξηλεκτρισμό. Η συμμόρφωση στον πραγματικό κόσμο «επιβραβεύει» υβριδικές αρχιτεκτονικές που αποφεύγουν ψυχρές και μεταβατικές φάσεις και μειώνουν brake-PM μέσω ανάκτησης ενέργειας. Η επιλογή πλατφόρμας, όπως 48 V MHEV έναντι HEV ή PHEV, καθορίζει όχι μόνο την τεχνική διαδρομή συμμόρφωσης αλλά και το συνολικό κόστος κύκλου ζωής, ιδίως υπό ταυτόχρονες απαιτήσεις για ελάχιστη αντοχή μπαταρίας στα ηλεκτροκίνητα οχήματα (European Commission, 2022; Council of the European Union, 2024).

3.4 Τεχνολογικές λύσεις για συμμόρφωση στο Euro 7

Η συμμόρφωση με το Euro 7 απαιτεί συνδυαστική προσέγγιση που ξεκινά από τον κύκλο καύσης και εκτείνεται στη θερμική αρχιτεκτονική, στη μετά-επεξεργασία, στους αισθητήρες και αλγορίθμους επιτήρησης, καθώς και στην ολοκλήρωση με εξηλεκτρισμό. Οι τεχνολογικές λύσεις που αναπτύσσονται δεν αντιμετωπίζουν μεμονωμένα όρια, αλλά στοχεύουν στη διατήρηση σταθερής περιβαλλοντικής επίδοσης σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, φορτίων και καταστάσεων οδήγησης, όπως απαιτείται από τις δοκιμές WLTP και RDE του Euro 7.

Στους κινητήρες SI, η ελαχιστοποίηση του αριθμού σωματιδίων έως τα 10 nm βασίζεται πρωτίστως στη βελτίωση της διαδικασίας σχηματισμού μίγματος. Η ακριβής χωροχρονική στόχευση του ψεκασμού, ο περιορισμός του wall-wetting και η βελτιστοποίηση της τύρβης κοντά στο μπουζί επιτρέπουν ομοιογενή ή ήπια στρωματωμένη καύση με περιορισμένες τοπικά πλούσιες ζώνες, μειώνοντας τη δημιουργία πρωτογενών σωματιδίων κατά την ψυχρή φάση λειτουργίας (Heywood, 2018; Giechaskiel et al., 2019). Η καθολική πλέον χρήση GPF χαμηλής πτώσης πίεσης, με υποστρώματα βελτιστοποιημένου πορώδους και καταλυτική επικάλυψη συμβατή με TWC, αποτελεί βασικό πυλώνα συμμόρφωσης. Ιδιαίτερη σημασία έχει η

στρατηγική αναγέννησης, όπου προτιμώνται παθητικές ή ήπιες ενεργές αναγεννήσεις ώστε να αποφεύγεται θερμική καταπόνηση του washcoat και αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου, ιδίως σε αστικές συνθήκες (Mamakos et al., 2018; Twigg, 2011).

Η ταχεία επίτευξη της θερμοκρασίας ενεργοποίησης του TWC παραμένει κρίσιμη για τον περιορισμό των σωρευτικών εκπομπών CO, HC και NOx κατά την ψυχρή εκκίνηση. Για τον σκοπό αυτό εφαρμόζονται διατάξεις close-coupled, αυξημένες φορτίσεις πολύτιμων μετάλλων και βελτιωμένη θερμική σύζευξη με την πολλαπλή εξαγωγής. Σε επίπεδο ελέγχου, χρησιμοποιούνται καθυστέρηση χρονισμού σπινθήρα, περιορισμένες μετά-ενέσεις και, σε ορισμένες εφαρμογές, ηλεκτρικά θερμαινόμενα υποστρώματα, ώστε να αυξάνεται η ενθαλπία των καυσαερίων χωρίς δυσανάλογη ποινή στην κατανάλωση (McGrane & Douglas, 2021; Heywood, 2018). Στις υπερπληρωμένες διαμορφώσεις GDI, η συστηματική αντιμετώπιση του LSPI μέσω χαρτογράφησης ψεκασμού και επιλογής κατάλληλων λιπαντικών επιτρέπει λειτουργία εγγύτερα στο MBT, περιορίζοντας τις ανάγκες εμπλουτισμού και τις θερμικές απώλειες (Kalghatgi, 2018).

Στους κινητήρες CI, η απαίτηση υψηλής απόδοσης μείωσης NOx σε ευρύ θερμοκρασιακό παράθυρο οδηγεί σε αρχιτεκτονικές dual-SCR ή/και SCRF, με αξιοποίηση καταλυτικών φορέων χαμηλής θερμοκρασίας για αποτελεσματικότητα στις ψυχρές φάσεις και δεύτερο στάδιο υψηλότερης θερμοκρασίας για σταθερή απόδοση σε συνθήκες αυτοκινητοδρόμου (Johnson, 2016). Η ακριβής δοσομέτρηση ουρίας, η ενεργή διαχείριση της θερμοκρασίας εξαγωγής και ο έλεγχος της ολίσθησης αμμωνίας μέσω ASC είναι απαραίτητα στοιχεία για τη συμμόρφωση υπό RDE. Παράλληλα, η διασφάλιση της μακροχρόνιας απόδοσης του DPF απαιτεί υποστρώματα κατάλληλης μικροδομής και στρατηγικές παθητικής και ενεργής αναγέννησης που περιορίζουν την πτώση πίεσης και την κατανάλωση καυσίμου, με τη συνδρομή DOC ικανών να παράγουν επαρκές NO_2 σε χαμηλές θερμοκρασίες (Johnson, 2016; Payri et al., 2013).

Κοινός παρονομαστής και για τους δύο τύπους κινητήρων είναι η αναβαθμισμένη θερμική διαχείριση του συστήματος εξαγωγής, η οποία στο Euro 7 μετατρέπεται σε βασικό εργαλείο συμμόρφωσης. Η χρήση e-turbos ή e-boosters συμβάλλει στη

διατήρηση υψηλότερης ενθαλπίας καυσαερίων σε χαμηλά φορτία, επιταχύνοντας την αφύπνιση καταλυτών και βελτιώνοντας τη σταθερότητα λειτουργίας των συστημάτων SCR. Σε επίπεδο κύκλου, η εφαρμογή κύκλων Miller/Atkinson με εκτεταμένη EGR και μεταβλητό χρονισμό και ύψος βαλβίδων μειώνει τις απώλειες άντλησης και περιορίζει την ανάγκη εμπλουτισμού σε μεταβατικές φάσεις (Heywood, 2018; Stone, 2012). Η προθαλαμική ανάφλεξη τύπου TJI προσφέρει επιπλέον περιθώρια λειτουργίας με φτωχά μίγματα, μειώνοντας θερμοκρασίες καύσης και εκπομπές NOx με ταυτόχρονη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης (Toulson et al., 2010).

Ιδιαίτερο βάρος αποκτά η μετρολογία και ο έλεγχος του PN10. Η ενσωμάτωση εκτιμητών φόρτου φίλτρων, η πρόβλεψη της κατάστασης GPF και DPF και η μοντελοβασισμένη διαχείριση αναγεννήσεων μειώνουν την πιθανότητα υπερβάσεων σε πραγματικές συνθήκες. Η μετάβαση από OBD σε OBM επιβάλλει συνεχή αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίδοσης, με χρήση αισθητήρων δεύτερης γενιάς για NOx ανάντη και κατάντη των καταλυτών και, κατά περίπτωση, αισθητήρων αμμωνίας ή σωματιδίων. Οι αλγόριθμοι επιτήρησης καλούνται να διακρίνουν μεταξύ φυσιολογικής γήρανσης και πραγματικής απόκλισης απόδοσης, ενεργοποιώντας προστατευτικές ή διορθωτικές στρατηγικές λειτουργίας (JRC, 2021; ICCT, 2024).

Ο εξηλεκτρισμός λειτουργεί ως καταλύτης συμμόρφωσης. Σε αρχιτεκτονικές 48 V, η ανάκτηση ενέργειας πέδησης, η υποβοήθηση ροπής και το εκτεταμένο stop-start μειώνουν τις μεταβατικές φάσεις λειτουργίας της ΜΕΚ και περιορίζουν τις σωρευτικές εκπομπές PN και NOx (Ricardo, 2021). Σε HEV και PHEV, η ανακατανομή του κύκλου λειτουργίας διατηρεί τον κινητήρα σε περιοχές υψηλής απόδοσης και επιτρέπει προθέρμανση καταλυτών και φίλτρων με ελάχιστη κατανάλωση, ενώ η αναγεννητική πέδηση συμβάλλει ουσιαστικά στη συμμόρφωση με τα νέα όρια για σωματίδια φρένων (ICCT, 2024). Σε διαμορφώσεις range-extended, η λειτουργία της ΜΕΚ σε στενή περιοχή υψηλής απόδοσης διευκολύνει περαιτέρω τον έλεγχο εκπομπών.

Συμπληρωματικά, η ποιότητα και η σύσταση των καυσίμων προσφέρουν πρόσθετα περιθώρια. Βενζίνες υψηλού RON και χαμηλής αρωματικότητας μειώνουν την τάση σχηματισμού σωματιδίων και επιτρέπουν υψηλότερη συμπίεση στους κινητήρες SI, ενώ συνθετικά καύσιμα ντίζελ με υψηλό κετανικό αριθμό και ελεγχόμενη καμπύλη

αποστάξεων βελτιώνουν την προανάμειξη και μετατοπίζουν ευνοϊκά τον συμβιβασμό NOx–αιθάλης στους κινητήρες CI (Kalghatgi, 2018). Η αξιοποίησή τους προϋποθέτει αντίστοιχη επαναβαθμονόμηση ψεκασμού και θερμικής διαχείρισης.

Τέλος, οι μη-εξατμιστικές απαιτήσεις του Euro 7 επιβάλλουν λύσεις σε επίπεδο οχήματος. Υλικά φρένων χαμηλής φθοράς και χαμηλού χαλκού, βελτιστοποιημένος σχεδιασμός δίσκων, συστήματα συλλογής σωματιδίων φρένων και ελαστικά χαμηλής φθοράς εντάσσονται πλέον στο βασικό πακέτο συμμόρφωσης. Ο συνδυασμός τους με έξυπνες στρατηγικές κατανομής ροπής και υψηλό ποσοστό αναγεννητικής πέδησης επιτρέπει την επίτευξη των νέων ορίων brake-PM χωρίς υποβάθμιση της ασφάλειας ή της αίσθησης πέδησης (ICCT, 2024).

3.5 Προκλήσεις για τους κατασκευαστές

Η μετάβαση στο Euro 7 αναβαθμίζει την πολυπλοκότητα του συστήματος πρόωσης από ένα σύνολο επιμέρους υποσυστημάτων σε ένα ενιαίο «οικοσύστημα» θερμικής, χημικής και αλγοριθμικής συν-βελτιστοποίησης. Σε επίπεδο μηχανολογικού σχεδιασμού, η απαίτηση για σταθερά χαμηλές εκπομπές σε ευρύ θερμοκρασιακό και λειτουργικό παράθυρο καθιστά κρίσιμη τη γρήγορη αφύπνιση των καταλυτών και την αποδοτική λειτουργία των φίλτρων σε αστικό και ψυχρό φορτίο. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερες μάζες ενεργών υλικών, κοντινή τοποθέτηση υποστρωμάτων, εφαρμογή ηλεκτρικής θέρμανσης και ενισχυμένη θερμική σύζευξη με την πολλαπλή εξαγωγής, υπό αυστηρούς περιορισμούς συσκευασίας και πτώσης πίεσης που επηρεάζουν θόρυβο, κατανάλωση και αξιοπιστία (Heywood, 2018; McGrane & Douglas, 2021). Στους κινητήρες CI, η σταθερή απόδοση απομείωσης NOx σε χαμηλές θερμοκρασίες επιβάλλει αρχιτεκτονικές dual-SCR ή/και φίλτρα SCRF με καταλύτες χαμηλής θερμοκρασίας και εξαιρετικά ακριβή δοσομέτρηση ουρίας, οδηγώντας σε σύνθετες στρατηγικές θερμικής διαχείρισης για κύκλους αστικής κυκλοφορίας (Johnson, 2016).

Σε επίπεδο καύσης και ψεκασμού, η επέκταση της μετρολογίας αριθμού σωματιδίων έως τα 10 nm υποχρεώνει σε αυστηρό έλεγχο του wall-wetting, των αποθέσεων και της αποφυγής τοπικά πλούσιων ζωνών ακόμη και σε ομοιογενείς στρατηγικές καύσης. Τα φίλτρα σωματιδίων βενζίνης χαμηλής αντίστασης εισάγουν λεπτή

ισορροπία μεταξύ αποτελεσματικότητας παγίδευσης, πτώσης πίεσης και σταθερότητας αναγεννήσεων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας (Giechaskiel et al., 2019; Mamakos et al., 2018). Η βαθμονόμηση καθίσταται πολυδιάστατο πρόβλημα, καθώς σπινθήρας, έγχυση, ανακυκλοφορία καυσαερίων, υπερπλήρωση και θερμικές στρατηγικές πρέπει να βελτιστοποιούνται ταυτόχρονα με στόχους ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, θερμικής αντοχής εξαρτημάτων και συμμόρφωσης σε RDE με μετρήσεις PEMS (JRC, 2018; JRC, 2021).

Η θεσμική μετάβαση από την OBD στην ενισχυμένη OBM εισάγει νέες απαιτήσεις αισθητήρων και λογισμικού: αισθητήρες δεύτερης γενιάς για NOx ανάντη και κατάντη, εκτιμητές φόρτου φίλτρων σωματιδίων, έλεγχος ολίσθησης αμμωνίας και, δυνητικά, επιτόπια εκτίμηση αριθμού σωματιδίων. Αυτό απαιτεί επενδύσεις σε μοντελοβασισμένους ελεγκτές, ψηφιακά δίδυμα και υποδομές διαχείρισης δεδομένων, ώστε να διακρίνεται αξιόπιστα η φυσιολογική γήρανση από πραγματική απόκλιση, χωρίς υπερβολικά συντηρητικές στρατηγικές που θα επιβάρυναν κατανάλωση και οδική συμπεριφορά (JRC, 2021; Ricardo, 2021). Η αυξημένη διαφάνεια δεδομένων που εισάγει το Euro 7 μεταφέρει το ρίσκο συμμόρφωσης σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του οχήματος, επηρεάζοντας εγγυήσεις, ανακλήσεις και υπολειμματικές αξίες στόλου (European Commission, 2022; ICCT, 2024).

Σε βιομηχανικό επίπεδο, η αλυσίδα εφοδιασμού πιέζεται από την αυξημένη ζήτηση σε πολύτιμα μέταλλα, προηγμένους φορείς καταλυτών, φίλτρα χαμηλής πτώσης πίεσης και αισθητήρες δεύτερης γενιάς. Η τυποποίηση υποσυστημάτων μετά-επεξεργασίας και η ενίσχυση της κάθετης ολοκλήρωσης αναδεικνύονται κρίσιμες για τον έλεγχο κόστους και ρίσκου (ACEA, 2023). Παράλληλα, η ικανότητα δοκιμών καθίσταται περιοριστικός παράγοντας: εκτεταμένοι στόλοι επικύρωσης RDE, PEMS για PN10 και προγράμματα γήρανσης αντοχής αυξάνουν δραματικά τον χρόνο και το κόστος πιστοποίησης, καθιστώντας αναγκαία τη χρήση HIL, SIL, αυτοματοποιημένων πάγκων και συνθετικών κύκλων προ-γήρανσης (JRC, 2018; JRC, 2021).

Οι μη-εξατμιστικές απαιτήσεις για σωματίδια φρένων και, προοδευτικά, για ελαστικά μεταθέτουν μέρος της συμμόρφωσης από το σύστημα πρόωσης στο σύνολο του οχήματος. Απαιτούνται νέα υλικά τριβής χαμηλής φθοράς και χαμηλού χαλκού,

βελτιστοποιημένες γεωμετρίες δίσκων και, σε αστικές εφαρμογές, συστήματα συλλογής σωματιδίων φρένων, ενώ η μεγιστοποίηση της αναγεννητικής πέδησης πρέπει να επιτευχθεί χωρίς υποβάθμιση της ασφάλειας και της αίσθησης πέδησης (ICCT, 2024). Για HEV, PHEV και αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα (Battery Electric Vehicle, BEV), οι απαιτήσεις αντοχής μπαταριών επηρεάζουν τη θερμική αρχιτεκτονική και τις στρατηγικές φόρτισης, εισάγοντας πρόσθετες παραμέτρους σχεδίασης πέραν των εκπομπών (Council of the European Union, 2024).

Στρατηγικά, οι κατασκευαστές καλούνται να ισορροπήσουν μεταξύ επένδυσης σε βαθιά βελτίωση των ΜΕΚ και επιτάχυνσης του εξηλεκτρισμού. Η συμμόρφωση στον πραγματικό κόσμο ευνοεί υβριδικές αρχιτεκτονικές που μειώνουν τις ψυχρές και μεταβατικές φάσεις λειτουργίας, καθώς και τις μη-εξατμιστικές εκπομπές, αλλά η τελική κατανομή τεχνολογιών θα εξαρτηθεί από τις αγορές πρώτων υλών, τις οικονομίες κλίμακας και τους στόχους CO_2 στόλου (Ricardo, 2021; ACEA, 2023). Συνολικά, η επιτυχής προσαρμογή στο Euro 7 προϋποθέτει ενιαίο συν-σχεδιασμό συστήματος πρόωσης και οχήματος, με πρόωρη ενσωμάτωση των απαιτήσεων RDE και PN10 στον κύκλο ανάπτυξης, ώστε η κανονιστική συμμόρφωση να επιτευχθεί χωρίς υπέρμετρη επιβάρυνση στο συνολικό κόστος ιδιοκτησίας ή στη θέση του προϊόντος στην αγορά (European Commission, 2022; Council of the European Union, 2024; ICCT, 2024).

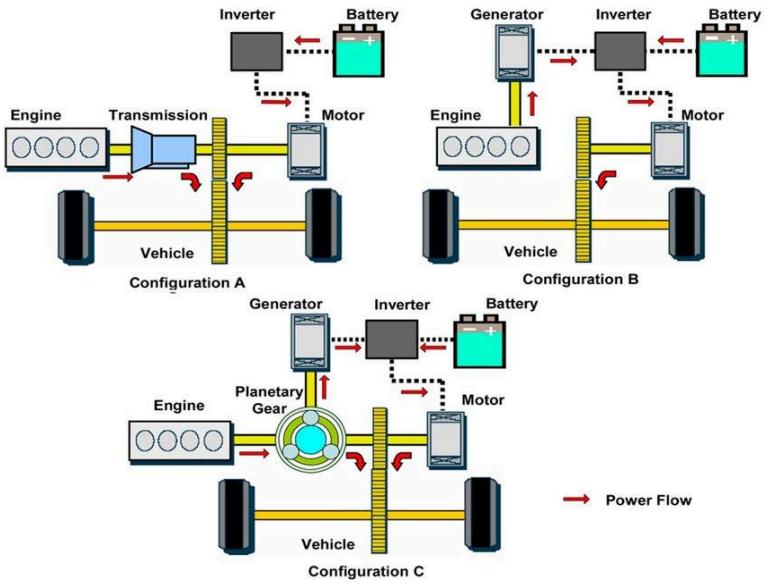
Κεφάλαιο 4: Εναλλακτικές τεχνολογίες και μελλοντικές τάσεις

4.1 Ηλεκτροκίνηση και υβριδικά συστήματα

Η ηλεκτροκίνηση συνιστά ταυτόχρονα τεχνολογία απεξάρτησης από τις ψυχρές και μεταβατικές φάσεις της μηχανής εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) και μοχλό βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης σε πραγματικές συνθήκες οδήγησης. Στις υβριδικές αρχιτεκτονικές σειράς, παράλληλης και μεικτής (series–parallel), ο θερμικός κινητήρας λειτουργεί για μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου σε ζώνες χαμηλής ειδικής κατανάλωσης καυσίμου στον άξονα (Brake Specific Fuel Consumption, BSFC), με την ηλεκτρική μηχανή να αναλαμβάνει τις αιχμές ροπής και να ανακτά ενέργεια πέδησης, μεταβάλλοντας ριζικά το προφίλ θερμικών και χημικών διεγέρσεων του συστήματος μετά-επεξεργασίας (Heywood, 2018; Stone, 2012).

Στα υβριδικά ισχύος (Hybrid Electric Vehicles, HEV) με μεικτή σύζευξη και ηλεκτρονικά ελεγχόμενο κιβώτιο συνεχώς μεταβαλλόμενης σχέσης (eCVT), η διαχείριση ενέργειας κατανέμει το φορτίο μεταξύ ΜΕΚ και ηλεκτρικής μηχανής, ώστε οι κύκλοι ανάφλεξης να παραμένουν κοντά στον βέλτιστο χρονισμό (Minimum Advance for Best Torque, MBT), με ελεγχόμενο λόγο περίσσειας αέρα και επαρκείς θερμοκρασίες εξαγωγής για ταχεία «αφύπνιση» (light-off) καταλυτών και φίλτρων. Η χρήση εκτεταμένης ανακυκλοφορίας καυσαερίων (Exhaust Gas Recirculation, EGR), σε συνδυασμό με ηλεκτρική υποβοήθηση, επιτρέπει υψηλότερη συμπίεση και προπορεία χωρίς κρουστικότητα και μειώνει τις απώλειες άντλησης (Heywood, 2018).

Στα plug-in υβριδικά (Plug-in Hybrid Electric Vehicles, PHEV), τα προφίλ καθημερινής μετακίνησης καλύπτονται συχνά ηλεκτρικά, με αποτέλεσμα σημαντική συρρίκνωση των σωρευτικών εκπομπών σωλήνα, ενώ ο θερμικός κινητήρας, όταν απαιτείται, μπορεί να λειτουργήσει ως επαυξητής αυτονομίας (range extender) σε σταθερό σημείο υψηλής απόδοσης (Ricardo, 2021).



Εικόνα 4.1: Σχηματική απεικόνιση βασικών αρχιτεκτονικών υβριδικών συστημάτων πρόωσης: (A) παράλληλη διάταξη, (B) σειριακή διάταξη και (C) μικτή/διαχωρισμένη ισχύος (series–parallel ή power-split). Πηγή: ResearchGate, “Hybrid vehicle configurations: (A) parallel; (B) series; and (C) power-split” (n.d.). Η εικόνα χρησιμοποιείται για εικονογραφικούς σκοπούς.

Κρίσιμη πτυχή για τη συμμόρφωση στο Euro 7 είναι η αντιμετώπιση της ψυχρής εκκίνησης και των σύντομων θερμικών κύκλων. Τα HEV και PHEV μπορούν να μεταθέσουν μέρος του έλκοντος έργου στην ηλεκτρική μηχανή κατά την προθέρμανση, επιτρέποντας θερμικές στρατηγικές που αυξάνουν στοχευμένα την ενθαλπία προς τους καταλύτες (π.χ. καθυστέρηση σπινθήρα/μετενέσεις με μικρό καύσιμο-κόστος ή/και ηλεκτρική θέρμανση υποστρωμάτων όταν υπάρχει επαρκές ηλεκτρικό απόθεμα) μέχρι το light-off του τριοδικού καταλύτη (Three-Way Catalyst, TWC) ή/και των φίλτρων σωματιδίων (Gasoline/Diesel Particulate Filter, GPF/DPF). Παράλληλα, οι στρατηγικές «engine-off coasting» και «sailing» μειώνουν τις φάσεις εμπλουτισμού και την παραγωγή αριθμού σωματιδίων έως 10 nm (PN10) σε μεταβατικά γεγονότα υψηλής δυναμικής, ενώ η ανάκτηση πέδησης μετατρέπει τις μηχανικές απώλειες φρένων σε ηλεκτρική ενέργεια, περιορίζοντας τις μη-εξατμιστικές εκπομπές σωματιδίων από τριβή (brake-PM) που πλέον ρυθμίζονται ρητά στο πλαίσιο του Euro 7 (Council of the European Union, 2024; ICCT, 2024).

Η αρχιτεκτονική υψηλής τάσης και τα ηλεκτρικά υποσυστήματα διαμορφώνουν τον θερμικό ισολογισμό του οχήματος. Η χρήση αντιστροφέων (inverters) με ημιαγωγούς καρβιδίου του πυριτίου (Silicon Carbide, SiC) και διατάξεων 400–800 V μειώνει τις απώλειες ισχύος και βελτιώνει την αποδοτικότητα φόρτισης/εκφόρτισης, ενώ οι αντλίες θερμότητας επιτρέπουν προσαρμοσμένη θερμική διαχείριση καμπίνας/μπαταρίας με χαμηλό ενεργειακό κόστος, ιδίως σε χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Η θερμοκρασιακή σταθερότητα της μπαταρίας και η διαχείριση κατάστασης φόρτισης/υγείας (State of Charge, SOC / State of Health, SOH) είναι καίρια, ώστε οι στρατηγικές προθέρμανσης καταλυτών να μην υποβαθμίζουν τη βιωσιμότητα του ηλεκτρικού σκέλους. Ταυτόχρονα, οι ελάχιστες απαιτήσεις αντοχής μπαταριών που εισάγονται στο Euro 7 για τα εξηλεκτρισμένα οχήματα επιβάλλουν προηγμένα συστήματα διαχείρισης μπαταρίας (Battery Management System, BMS), ακριβείς εκτιμητές κατάστασης και πολιτικές φόρτισης που περιορίζουν τη γήρανση χωρίς ποινή στη χρήση (European Commission, 2022; Council of the European Union, 2024).

Σε επίπεδο ελέγχου, τα υβριδικά συστήματα προσφέρουν επιπλέον βαθμούς ελευθερίας για τήρηση των αυστηρότερων μετρολογικών απαιτήσεων PN10. Η

ηλεκτρική παροχή ροπής μπορεί να απορροφήσει αιχμές φορτίου που θα απαιτούσαν εμπλουτισμό ή καθυστέρηση ανάφλεξης, αποφεύγοντας πυρήνωση σωματιδίων σε βενζινοκινητήρες άμεσου ψεκασμού (Gasoline Direct Injection, GDI) κατά την επιτάχυνση. Η δυνατότητα «ηλεκτρικής γέφυρας» σε ανηφόρες/παρατεταμένα μερικά φορτία περιορίζει τη λειτουργία σε ζώνες όπου η ποιότητα ψεκασμού υποβαθμίζεται και αυξάνεται ο κίνδυνος wall-wetting. Σε πετρελαιοκινητήρες υβριδικών διαμορφώσεων, η ηλεκτρική συνδρομή επιτρέπει διατήρηση υψηλού λόγου περίσσειας αέρα με μικρότερη EGR, συμβάλλοντας σε σταθερότερη απόδοση επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής (Selective Catalytic Reduction, SCR) σε χαμηλές θερμοκρασίες και σε ευκολότερη θερμική «αφύπνιση» στην αρχή του ταξιδιού (Johnson, 2016; Ricardo, 2021).

Η ενσωμάτωση συστημάτων On-Board Monitoring (OBM) και η διαθεσιμότητα δεδομένων On-Board Fuel/Energy Consumption Monitoring (OBFCM) δημιουργούν νέο πλαίσιο επαλήθευσης πραγματικής επίδοσης. Τα υβριδικά οχήματα, λόγω πλουσιότερης αισθητηριακής υποδομής και ακριβών ενεργειακών μετρήσεων, διευκολύνουν τον μοντελοβασισμένο έλεγχο γήρανσης καταλυτών και φίλτρων και την έγκαιρη ανίχνευση αποκλίσεων σε πραγματική χρήση. Η «ψηφιακή δίδυμη» αναπαράσταση του συστήματος πρόωσης αξιοποιεί τα τηλεμετρικά δεδομένα για πρόληψη υπερβάσεων PN και διατήρηση της απόδοσης εντός ορίων σε διαφορετικά κλίματα και υψόμετρα (JRC, 2021; ICCT, 2024).

Παρά τις σημαντικές ωφέλειες, υφίστανται τεχνικοί περιορισμοί. Η επαναλαμβανόμενη έναρξη και παύση της ΜΕΚ σε αστικά προφίλ μπορεί να κατακερματίσει τη θερμική ιστορία του καταλύτη, απαιτώντας προγνωστικό έλεγχο και στρατηγικές «θερμικής μνήμης», ώστε οι εκκινήσεις να πραγματοποιούνται εντός θερμοκρασιακού παραθύρου αποδοτικής κατάλυσης. Η διαστασιολόγηση μπαταρίας και ηλεκτρικής μηχανής, καθώς και ο σχεδιασμός της μετάδοσης, επηρεάζουν την ικανότητα «γεφύρωσης» δυσμενών θερμικών φάσεων χωρίς υπερφόρτωση του ηλεκτρικού σκέλους. Επιπλέον, η επίτευξη χαμηλών εκπομπών brake-PM εξαρτάται από τη ραφιναρισμένη βαθμονόμηση της κατανομής ροπής πέδησης μεταξύ αναγεννητικής και τριβικής πέδησης, ώστε να διατηρείται η αίσθηση φρένων και η

δυναμική ευστάθεια, ειδικά σε χαμηλές ταχύτητες ή χαμηλό SOC (ICCT, 2024; Council of the European Union, 2024).

Συνοψίζοντας, η ηλεκτροκίνηση — από τα ήπια υβριδικά 48 V (Mild Hybrid Electric Vehicles, MHEV) έως τα HEV, PHEV και τα αμιγώς ηλεκτρικά (Battery Electric Vehicles, BEV) — λειτουργεί ως καταλύτης συμμόρφωσης στο Euro 7, επειδή μειώνει τις ψυχρές και μεταβατικές επιβαρύνσεις, βελτιστοποιεί την κατανομή έργου γύρω από τις νησίδες βέλτιστου BSFC, επιτρέπει προχωρημένες θερμικές στρατηγικές για γρήγορη επίτευξη light-off και περιορίζει τις μη-εξατμιστικές εκπομπές μέσω εκτεταμένης ανάκτησης ενέργειας πέδησης. Η επιτυχία, ωστόσο, προϋποθέτει συστημικό συν-σχεδιασμό θερμικής αρχιτεκτονικής, ελέγχου ισχύος και μετά-επεξεργασίας, καθώς και συμμόρφωση με τις ελάχιστες απαιτήσεις αντοχής μπαταριών που αναδεικνύουν τη σημασία ώριμου BMS και ακριβούς θερμικής και ενεργειακής διαχείρισης (European Commission, 2022; Council of the European Union, 2024; Ricardo, 2021).

4.2 Χρήση υδρογόνου σε εμβολοφόρες ΜΕΚ

Η καύση υδρογόνου (Hydrogen, H_2) σε εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) αναδύεται ως ελκυστική ενδιάμεση στρατηγική απανθρακοποίησης, συνδυάζοντας ώριμη μηχανολογική βάση με μηδενικές σωληνοεκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (Carbon Dioxide, CO_2). Το H_2 διαθέτει εξαιρετικά ευρεία αναφλεξιμότητα, υψηλή στοιχειομετρική θερμογόνο δύναμη ανά μονάδα μάζας και μεγάλη ταχύτητα φλόγας, χαρακτηριστικά που επιτρέπουν εκτεταμένη EGR και έντονα φτωχή λειτουργία χωρίς αστάθεια καύσης. Αντίρροπα, η πολύ μικρή ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης, η μικρή απόσταση σβέσης και η υψηλή διάχυση δημιουργούν κινδύνους πρόωρης ανάφλεξης, ανάφλεξης από θερμά σημεία και ανάστροφης φλόγας προς τον αυλό εισαγωγής, ιδίως σε διαμορφώσεις έγχυσης στον αυλό (Port Fuel Injection, PFI) (Verhelst & Wallner, 2009; Heywood, 2018).

Η αρχιτεκτονική τροφοδοσίας καθορίζει την ωφέλιμη ειδική ισχύ και το προφίλ εκπομπών. Στην διάταξη με PFI, το αέριο H_2 καταλαμβάνει μέρος του όγκου εισαγόμενου αέρα, μειώνοντας την πληρότητα και την ειδική ισχύ έναντι ενός βενζινοκινητήρα ίδιου κυβισμού. Αντιθέτως, ο άμεσος ψεκασμός υδρογόνου στον

κύλινδρο (Direct Injection, DI), σε υψηλή πίεση και με καθυστερημένο χρονισμό, ελαχιστοποιεί την εκτόπιση αέρα, βελτιώνει την ειδική ισχύ, περιορίζει τον κίνδυνο ανάστροφης φλόγας και επιτρέπει ακριβέστερη διαμόρφωση ισοδυναμίας κοντά στο μπουζί. Η γεωμετρία θαλάμου, η στόχευση της δέσμης και τα πεδία τύρβης (tumble/swirl) είναι κρίσιμα για ταχεία ομογενοποίηση χωρίς δημιουργία τοπικά πλούσιων ή υπερθερμών ζωνών που ευνοούν τα οξείδια του αζώτου (Nitrogen Oxides, NOx) ή προανάφλεξη (Verhelst & Wallner, 2009; Bauer & Verhelst, 2015).

Κεντρική μηχανολογική επιδίωξη είναι η πλήρης αξιοποίηση της γρήγορης φλόγας του H_2 χωρίς εκτροπές σε ανώμαλη καύση. Η λειτουργία σε φτωχά μίγματα ($\lambda \gg 1$) μειώνει σημαντικά τις θερμοκρασίες φλόγας και, συνεπώς, τον θερμικό σχηματισμό NOx, ενώ βελτιώνει την απόδοση περιορίζοντας τις απώλειες άντλησης. Υψηλά ποσοστά EGR, ψύξη εισαγωγής, πολλαπλή έναυση (multi-spark) και προ-θαλαμική ανάφλεξη με στροβιλώδη πίδακα (Turbulent Jet Ignition, TJI) επιτρέπουν ακόμη φτωχότερη λειτουργία με σταθερή ανάφλεξη και υψηλή ταχύτητα πυρήνωσης, μεταθέτοντας τον χάρτη σε νησίδες χαμηλής BSFC χωρίς κρουστικότητα (Toulson et al., 2010; Heywood, 2018). Σε περιοχές κοντά στη στοιχειομετρία, ο έλεγχος NOx γίνεται καταλυτικά, αλλά η πρακτική κατεύθυνση για κινητήρες σπινθηρισμού υδρογόνου είναι η έντονα φτωχή λειτουργία ώστε να ελαχιστοποιείται η καταλυτική εξάρτηση.

Οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (Carbon Monoxide, CO), άκαυστων υδρογονανθράκων (Hydrocarbons, HC) και σωματιδίων (Particulate Matter, PM) από την ίδια την καύση του H_2 είναι πρακτικά αμελητέες. Ωστόσο, εμφανίζονται ίχνη CO/HC/αερολυμάτων από το σύστημα λίπανσης και αριθμός σωματιδίων (Particle Number, PN) που συνδέεται με τέφρα λιπαντικών, ιδίως σε υψηλά φορτία. Η επιλογή λιπαντικών χαμηλής πτητικότητας/τέφρας και ο προσεκτικός έλεγχος εξαερισμού μειώνουν τις άτυπες σωματιδιακές εκπομπές, διευκολύνοντας τη συμμόρφωση με την απαίτηση PN έως 10 nm του Euro 7 (Bauer & Verhelst, 2015; Verhelst & Wallner, 2009). Ο έλεγχος NOx παραμένει καθοριστικός: σε πολύ φτωχά μίγματα, ο θερμικός σχηματισμός περιορίζεται και μπορεί να μην απαιτείται σύνθετη μετά-επεξεργασία σε μετρίως φτωχά/στοιχειομετρικά καθεστώτα εφαρμόζονται TWC ή/και SCR με

καταλύτη ολίσθησης αμμωνίας (Ammonia Slip Catalyst, ASC) για σταθερή απόδοση στο θερμοκρασιακό παράθυρο (Heywood, 2018).

Η υπερπλήρωση λειτουργεί ως ισχυρός πολλαπλασιαστής απόδοσης. Η ταχεία κινητική του H_2 επιτρέπει μεγαλύτερη προπορεία ανάφλεξης χωρίς αστάθεια, ενώ η υψηλή περίσσεια αέρα και/ή EGR περιορίζουν θερμικά φορτία και NOx. Ο συνδυασμός κινητήρα με άμεσο ψεκασμό υδρογόνου με υπερπλήρωση και κύκλους Miller/Atkinson βελτιώνει ειδική ισχύ και BSFC, διατηρώντας θερμοκρασίες/πιέσεις εντός ορίων. Η σύζευξη με ήπιο ή πλήρες υβριδισμό μεταθέτει έργο σε ζώνες υψηλής απόδοσης και περιορίζει ψυχρές φάσεις, διευκολύνοντας συμμόρφωση εκπομπών σε πραγματικές συνθήκες οδήγησης (Real Driving Emissions, RDE) (Toulson et al., 2010; Heywood, 2018).

Σε κινητήρες συμπίεσης υδρογόνου, μικρή «πιλοτική» έγχυση ντίζελ ανάβει πτωχό προαναμειγμένο φορτίο υδρογόνου. Το αποτέλεσμα είναι δραστική μείωση αιθάλης/σωματιδίων σε σχέση με κλασικούς πετρελαιοκινητήρες, με την πρόκληση ελέγχου NOx μέσω EGR και διαχείρισης του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας ώστε να αποφεύγεται θορυβώδης καύση. Οι αρχιτεκτονικές αυτές διπλού καυσίμου αξιοποιούν υφιστάμενη τεχνογνωσία κινητήρων CI και αλυσίδες μετά-επεξεργασίας, επιτρέποντας σταδιακή μείωση κατανάλωσης ντίζελ όπου το καθήκον λειτουργίας το επιτρέπει (Bari & Esmaeil, 2010; Bauer & Verhelst, 2015).

Η ασφάλεια και η αξιοπιστία του συστήματος καυσίμου είναι απαιτητικές. Αποθήκευση σε 350–700 bar με σύνθετα δοχεία υψηλής αντοχής, βαλβίδες ασφαλείας, ανίχνευση διαρροών και ελεγχόμενους εξαερισμούς. Η υδρογονο-εμβολή επιβάλλει κατάλληλα κράματα/επιστρώσεις σε σωληνώσεις, μπεκ και ρυθμιστές. Οι εγχυτήρες αερίου υψηλής ταχύτητας απαιτούν μικρές μάζες κινούμενων μερών και υψηλά δυναμικά περιθώρια ακρίβειας δόσης. Η διαχείριση purge/venting και η αποφυγή συγκεντρώσεων σε κοιλότητες αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους παθητικής ασφάλειας σε επίπεδο οχήματος (Verhelst & Wallner, 2009).

Η συμμόρφωση με Euro 7 κρίνεται σε πραγματικές συνθήκες. Οι κινητήρες υδρογόνου πρέπει να επιτυγχάνουν χαμηλά NOx και PN10 σε διαδικασίες δοκιμών, ταχεία «αφύπνιση» καταλυτών και σταθερή απόδοση σε ψυχρές/αστικές φάσεις. Η

έντονα φτωχή λειτουργία, η εκτεταμένη EGR, η TJI/πολλαπλή ανάφλεξη και ο DI ψεκασμός συνθέτουν το βασικό πακέτο ελαχιστοποίησης NOx με μικρή καταλυτική εξάρτηση. Σε απαιτητικά καθήκοντα ή σε dual-fuel CI κινητήρες, οι αρχιτεκτονικές SCR/ASC παραμένουν ρεαλιστική λύση για σταθεροποίηση NOx στον δρόμο. Επιπλέον, οι μη-εξατμιστικές απαιτήσεις (φρένα/ελαστικά) ισχύουν κανονικά. Αναγεννητική πέδηση και υλικά χαμηλής φθοράς απαιτούνται, ανεξάρτητα από την «καθαρότητα» του καυσίμου (Council of the European Union, 2024).

Σε επίπεδο ολοκλήρωσης πλατφόρμας, η συμβατότητα του συστήματος υδρογόνου με τη μετά-επεξεργασία και την υβριδική υποδομή, οι διαδρομές υψηλής πίεσης, οι χώροι εξαερισμού και η θερμική αρχιτεκτονική του θαλάμου επανασχεδιάζονται. Η επιτήρηση επί του οχήματος (On-Board Monitoring, OBM) και τα δεδομένα παρακολούθησης κατανάλωσης καυσίμου/ενέργειας (On-Board Fuel/Energy Consumption Monitoring, OBFCM) επεκτείνονται σε σενάρια H_2 με έμφαση στη συνεχή εποπτεία NOx και στη μοντελοβασισμένη διάγνωση γήρανσης καταλυτών/αισθητήρων. Η ακριβής χαρτογράφηση εκκινήσεων/σβέσεων σε υβριδικά προφίλ (HEV/PHEV) είναι κρίσιμη ώστε να αποφεύγονται επαναλαμβανόμενες κρύες φάσεις και να διατηρείται χαμηλό σωρευτικό NOx σε RDE (Heywood, 2018).

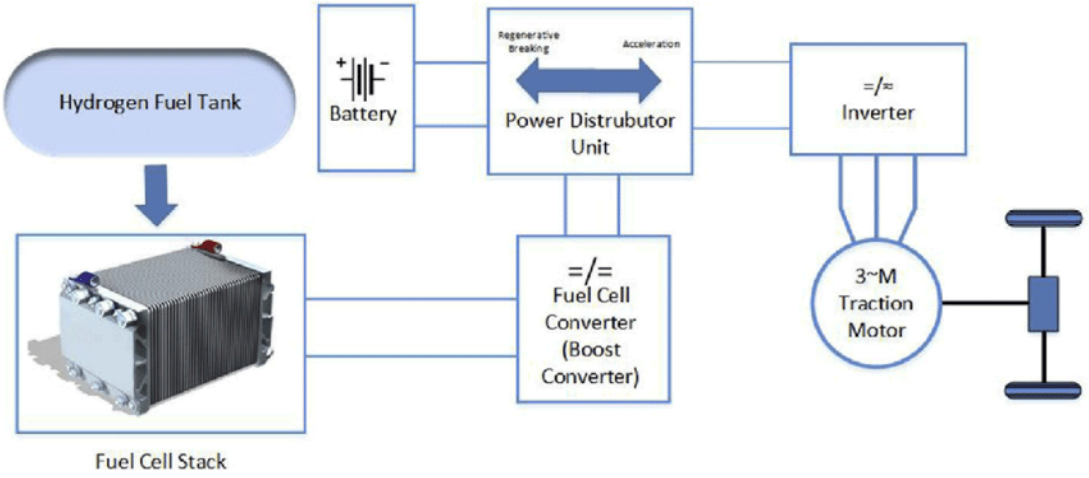
Συνολικά, οι ΜΕΚ υδρογόνου προσφέρουν ώριμο «διάδρομο» ταχείας μείωσης σωληνοεκπομπών, με κύρια τεχνικά εμπόδια τον έλεγχο NOx και την αποφυγή ανώμαλης καύσης. Η επιλογή μεταξύ H_2-SI (φτωχό/DI) και H_2-dual-fuel CI εξαρτάται από τη βάση πλατφόρμας, το καθήκον και τη ζητούμενη ειδική απόδοση. Σε κάθε περίπτωση, η συν-βελτιστοποίηση ψεκασμού, ανάφλεξης, EGR, υπερπλήρωσης και (όπου απαιτείται) μετά-επεξεργασίας, σε συνδυασμό με υβριδική υποβοήθηση, συνιστά ρεαλιστική οδό συμμόρφωσης Euro 7 με υδρογόνο (Bauer & Verhelst, 2015; Heywood, 2018; Verhelst & Wallner, 2009).

4.3 Κυψέλες καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν ηλεκτροχημικές διατάξεις άμεσης μετατροπής της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική χωρίς ενδιάμεσο θερμικό κύκλο, γεγονός που επιτρέπει υψηλές βαθμίδες απόδοσης σε μερικά φορτία και μηδενικές σωληνοεκπομπές ρύπων στο σημείο χρήσης. Για αυτοκινητικές εφαρμογές έχει

επικρατήσει η κυψέλη με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) λόγω χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας (~60–95 °C), υψηλής ειδικής ισχύος και γρήγορης δυναμικής απόκρισης. Εναλλακτικά, οι κυψέλες στερεού οξειδίου (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) προσφέρουν υψηλή θερμική απόδοση και ανεκτικότητα σε καύσιμα μειωμένης καθαρότητας, αλλά η θερμική αδράνεια/διαχείριση τις καθιστά σήμερα καταλληλότερες για σταθερές ή range-extender εφαρμογές (Barbir, 2013; O'Hayre et al., 2016).

Η τυπική αρχιτεκτονική PEMFC περιλαμβάνει στοιχειοσειρά (stack) με μεμβράνη πολυμερικού ηλεκτρολύτη, καταλύτες πλατίνας σε άνοδο/κάθοδο, διπολικές πλάκες με κανάλια ροής, και το σύνολο υποσυστημάτων ισοζυγίου εγκατάστασης (Balance-of-Plant, BoP): συμπιεστή/φυσσητήρα αέρα, υγραντήρες, αντλίες/βαλβίδες υδρογόνου, εναλλάκτες θερμότητας και ηλεκτρονικά ισχύος (DC/DC) για σύζευξη με μπαταρία/ηλεκτροκινητήρα. Η ηλεκτροχημική απόδοση περιορίζεται από υπερτάσεις ενεργοποίησης (ιδίως στην κάθοδο), ωμικές απώλειες μεμβράνης και περιορισμούς μεταφοράς μάζας σε υψηλά ρεύματα γι' αυτό κρίσιμα είναι ο σχεδιασμός καναλιών ροής, η επαρκής ύγρανση μεμβράνης και η ακριβής θερμική διαχείριση για χαμηλές υπερτάσεις και ομοιομορφία ρεύματος (Barbir, 2013; O'Hayre et al., 2016). Η ποιότητα υδρογόνου διέπεται από το ISO 14687:2019 (όρια για CO, H_2S, NH_3, υγρασία, αλογονωμένα), καθώς ίχνη ρύπων δηλητηριάζουν τους καταλύτες ή υποβαθμίζουν τη μεμβράνη συνεπώς, φίλτρα και παγίδες ρύπων στο BoP είναι αναπόσπαστα (ISO 14687:2019)



Εικόνα 4.2: Σχηματικό διάγραμμα αρχιτεκτονικής οχήματος κυψέλης καυσίμου (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV). Πηγή: ResearchGate, "Schematic illustration of fuel cell electric vehicle (FCEV)" (n.d.). Η εικόνα χρησιμοποιείται για εικονογραφικούς σκοπούς.

Η δυναμική αυτοκινητικής χρήσης επιβάλλει σύζευξη με μπαταρία ιόντων λιθίου (Fuel-Cell Hybrid Electric Vehicle, FC-HEV). Η κυψέλη παρέχει τη βασική ισχύ σε αποδοτικό σημείο, ενώ η μπαταρία καλύπτει αιχμές ισχύος και απορροφά την αναγεννητική πέδηση. Έτσι, το σύστημα λειτουργεί κοντά στη «νησίδα» μέγιστης ηλεκτροχημικής απόδοσης, περιορίζοντας απώλειες από διακυμάνσεις ρεύματος και βελτιώνοντας τη διάρκεια ζωής. Ο ελεγκτής ενέργειας διατηρεί τη στοίβα σε υψηλή απόδοση ρυθμίζοντας παροχή αέρα/υδρογόνου, θερμοκρασία και σημείο λειτουργίας DC/DC, ενώ αναθέτει στη μπαταρία τα σύντομα μεταβατικά γεγονότα (Barbir, 2013). Η απορριπτόμενη θερμότητα διαχειρίζεται μέσω κυκλώματος χαμηλής θερμοκρασίας με μεγάλες επιφάνειες ψύξης (μικρά $\Delta T \Rightarrow$ υψηλές παροχές), ενώ αντλία θερμότητας καμπίνας επιτρέπει ανάκτηση θερμότητας και βελτίωση της συνολικής αποδοτικότητας.

Σε επίπεδο σωληνοεκπομπών, οι PEMFC δεν εκπέμπουν CO, HC, NOx ή PM όμως το Euro 7 εισάγει μη-εξατμιστικές απαιτήσεις (π.χ. σωματίδια φρένων) που ισχύουν ανεξάρτητα από το σύστημα πρόωσης. Η υψηλή αναγεννητική πέδηση των FC-HEV μειώνει τη χρήση τριβικών φρένων, άρα και τα brake-PM. Οι ελάχιστες απαιτήσεις αντοχής μπαταριών για εξηλεκτρισμένα οχήματα αφορούν και τα FC-HEV, καθώς η ισχύς/ικανότητα της μπαταρίας επηρεάζει άμεσα τη συμμόρφωση σε πραγματικές

συνθήκες (ψυχρές φάσεις, απότομες επιταχύνσεις) (Council of the European Union, 2024).

Τα κύρια ζητήματα γήρανσης και αξιοπιστίας των PEMFC περιλαμβάνουν τη διάβρωση του φορέα του καταλύτη, την απώλεια ενεργής πλατίνας μέσω συσσωμάτωσης και διάχυσης, καθώς και τη μηχανική και χημική υποβάθμιση της μεμβράνης, με χαρακτηριστικό σχηματισμό μικροοπών (pin-holes) λόγω δράσης ελευθέρων ριζών. Παράλληλα, η άνιση ύγρανση και το φαινόμενο flooding στην κάθοδο περιορίζουν τη μεταφορά μάζας και επιβαρύνουν την απόδοση του στοιχείου. Οι βασικές στρατηγικές μετριασμού περιλαμβάνουν τη χρήση κραμάτων πλατίνας (Pt-Co, Pt-Ni), ανθεκτικότερων φορέων άνθρακα ή εναλλακτικών υποστρωμάτων, τροποποιήσεις της μεμβράνης, καθώς και προηγμένα πρωτόκολλα ελέγχου παροχής αέρα και υδρατμών, με στόχο την αποφυγή κύκλων ξηρότητας και υπερύγρανσης. Η λειτουργία σε συνθήκες ψυχρής εκκίνησης κάτω από 0 °C απαιτεί προθέρμανση, εκκένωση του παραμένοντος νερού και ελεγχόμενους κύκλους λειτουργίας, ώστε να αποφεύγεται ο σχηματισμός πάγου και οι επακόλουθες μηχανικές καταπονήσεις του στοιχείου (Barbir, 2013; O'Hayre et al., 2016).

Η αποθήκευση και ο ανεφοδιασμός υδρογόνου σε πιέσεις 350–700 bar με σύνθετες δεξαμενές τύπου IV καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη χωροταξία και τον σχεδιασμό των οχημάτων κυψέλης καυσίμου. Οι απαιτήσεις ασφάλειας περιλαμβάνουν βαλβίδες ανακούφισης υπερπίεσης, αισθητήρες ανίχνευσης διαρροής υδρογόνου, κατευθυνόμενο σύστημα εξαερισμού (venting) και διαμόρφωση κοιλοτήτων ώστε να αποτρέπεται η συσσώρευση αερίου. Κατά τον ανεφοδιασμό, το φαινόμενο θέρμανσης λόγω Joule–Thomson επιβάλλει ειδικές προδιαγραφές υλικών και ενεργό έλεγχο θερμοκρασίας για την προστασία των δεξαμενών και τη διατήρηση της διάρκειας ζωής τους. Η συνολική ενεργειακή αποδοτικότητα των οχημάτων κυψέλης καυσίμου, τόσο σε επίπεδο δεξαμενής-σε-τροχό (tank-to-wheel) όσο και πηγής-σε-τροχό (well-to-wheel), εξαρτάται καθοριστικά από τον κύκλο παραγωγής, συμπίεσης και διανομής του υδρογόνου, καθώς και από τις αντίστοιχες υποδομές εφοδιασμού (IEA, 2022).

Σε σύγκριση με ΜΕΚ Euro 7, τα FCEV «μετακινούν» το περιβαλλοντικό αποτύπωμα προς το well-to-wheel: η υπεροχή επιβεβαιώνεται όταν το H_2 προέρχεται από

χαμηλού άνθρακα διεργασίες (ηλεκτρόλυση με ΑΠΕ ή αναμόρφωση με δέσμευση CO_2). Σε οχηματική απόδοση, τα FC-HEV υπερτερούν σε σταθερά/μακρά καθήκοντα λόγω υψηλής απόδοσης σε μεσαία φορτία και σύντομου ανεφοδιασμού, ενώ στα καθαρά αστικά οι BEV έχουν απλούστερη αρχιτεκτονική και υψηλή ενεργειακή απόδοση. Η πρακτική επιλογή τεχνολογίας εξαρτάται από αυτονομία, προφίλ χρήσης και υποδομές H_2 (IEA, 2022; Staffell et al., 2019).

Ως προς τη συμμόρφωση Euro 7, τα FCEV καλύπτουν εξ ορισμού τις σωληνοεκπομπές (CO/HC/NOx/PN) και αντιμετωπίζουν τις μη-εξατμιστικές μέσω στρατηγικής πέδησης/υλικών. Οι τεχνικές προτεραιότητες εστιάζουν σε αξιοπιστία BoP, ανθεκτικότητα στο πραγματικό προφίλ (stop-and-go, θερμικοί κύκλοι), ασφάλεια H_2 και ενεργειακή αποδοτικότητα θερμικής διαχείρισης ώστε το πλεονέκτημα μηδενικών εκπομπών να συνοδεύεται από χαμηλό κόστος κύκλου ζωής και σταθερή απόδοση σε όλο το φάσμα χρήσης.

4.4 Συνθετικά και εναλλακτικά καύσιμα

Τα συνθετικά καύσιμα (e-fuels) και τα προηγμένα βιοκαύσιμα αποτελούν συμπληρωματικούς διαδρόμους απανθρακοποίησης για τις ΜΕΚ, καθώς επιτρέπουν σημαντική μείωση εκπομπών κύκλου ζωής χωρίς ριζική αλλαγή της θερμικής αρχιτεκτονικής ή του δικτύου ανεφοδιασμού. Τα e-fuels παράγονται τυπικά μέσω ηλεκτρολυτικής παραγωγής υδρογόνου με ανανεώσιμες πηγές και σύνθεσης με CO_2 από βιογενείς/ατμοσφαιρικές ροές ή βιομηχανικές απαερίσεις, οδηγώντας σε συνθετικούς υδρογονάνθρακες (Power-to-Liquid, PtL: e-gasoline/e-diesel/e-jet) ή οξυγονούχα καύσιμα (e-μεθανόλη, e-αιθανόλη, e-DME) μέσω διαδρομών Fischer–Tropsch, μεθανόλης-σε-βενζίνη και συναφών διεργασιών (Kalghatgi, 2018; IEA, 2022). Τα προηγμένα βιοκαύσιμα, ιδίως εκείνα που δεν ανταγωνίζονται την τροφική αλυσίδα (λιγνοκυτταρινούχα, HVO/HEFA, BtL), προσφέρουν ώριμες επιλογές μίξης σε υπάρχοντα πρότυπα καυσίμων, με βελτιώσεις στις ιδιότητες καύσης και στις εκπομπές υπό την προϋπόθεση κατάλληλης βαθμονόμησης (Edwards et al., 2018; IEA, 2021).

Στους βενζινοκινητήρες, οι συνθετικές βενζίνες υψηλού αριθμού οκτανίου (Research Octane Number, RON) και ελεγχόμενης ευαισθησίας ευνοούν υψηλότερους λόγους

συμπίεσης και λειτουργία με εκτεταμένη EGR, μειώνοντας τις απώλειες άντλησης και το θερμικό φορτίο. Η χαμηλότερη αρωματικότητα και ο προσεκτικά διαμορφωμένος δείκτης εξάτμισης περιορίζουν τον σχηματισμό σωματιδίων, ιδίως σε GDI, μειώνοντας τα PN-spikes κατά την ψυχρή εκκίνηση και τις απότομες μεταβάσεις φορτίου. Μεθοδολογικά, τα κέρδη στη σωματιδιακή εκπομπή προκύπτουν από την ευνοϊκή αεριοποίηση/εξάτμιση των ελαφρύτερων κλασμάτων και την απουσία βαρέων αρωματικών που ευνοούν επιφανειακή πυρόλυση και πυρήνωση (Mamakos et al., 2018; Giechaskiel et al., 2019). Επιπλέον, τα οξυγονούχα συνθετικά (π.χ. μεθανόλη/αιθανόλη παραγόμενες με «πράσινο» H_2) αυξάνουν την ταχύτητα φλόγας και επιτρέπουν βαθύτερη αραίωση, με θετικό αντίκτυπο στη θερμοδυναμική απόδοση, αν και απαιτούνται προσαρμογές υλικών/συμβατότητας και έλεγχος εξατμιστικών εκπομπών λόγω υψηλότερης πτητικότητας (Heywood, 2018; Stone, 2012).

Στους πετρελαιοκινητήρες, συνθετικό ντίζελ παραγόμενο μέσω Fischer–Tropsch ή υδρογονοεπεξεργασμένων φυτικών ελαίων (Hydrotreated Vegetable Oil, HVO) παρουσιάζει υψηλό κετανικό αριθμό, στενή καμπύλη αποστάξεων και πρακτικά μηδενική αρωματικότητα. Ο συνδυασμός αυτός βελτιώνει την προανάμειξη πριν την αυτοανάφλεξη, περιορίζει τη διάρκεια του διάχυτου σταδίου καύσης και μετακινεί τον συμβιβασμό NOx–αιθάλης προς χαμηλότερη αιθάλη χωρίς υπερβολική αύξηση NOx. Σε εφαρμογές με υψηλά ποσοστά EGR και πολλαπλές εγχύσεις, τα καύσιμα αυτά επιτρέπουν χαμηλότερες θερμοκρασίες οξείδωσης στο DPF, μειώνοντας τη συχνότητα/ένταση αναγεννήσεων και συνεπώς το penalty καυσίμου σε αστικές χρήσεις (Johnson, 2016; Payri et al., 2013). Ο εναλλακτικός δρόμος των οξυγονούχων συνθετικών, όπως ο διμεθυλαιθέρας, προσφέρει εξαιρετική πτητικότητα και ταχεία ανάμιξη με πολύ χαμηλή αιθάλη, απαιτώντας όμως ειδικές αντλίες/συστήματα έγχυσης και έλεγχο λίπανσης λόγω ιδιοτήτων διαλύτη (Heywood, 2018).

Η συμμόρφωση στο Euro 7 σε πραγματικές συνθήκες καθιστά κρίσιμη τη συσχέτιση ιδιοτήτων καυσίμου με τις στρατηγικές ψεκασμού/ανάφλεξης και με την απόδοση της μετά-επεξεργασίας. Σε GDI, οι συνθετικές βενζίνες χαμηλής αρωματικότητας μειώνουν τον κίνδυνο wall-wetting και τα τοπικά πλούσια στρώματα που οδηγούν σε PN10, διευκολύνοντας την επίτευξη χαμηλών σωματιδιακών φορτίων στο GPF και

επιτρέποντας υποστρώματα χαμηλότερης πτώσης πίεσης. Σε κινητήρες CI, το FT-ντίζελ και το HVO παράγουν λιγότερη αιθάλη, μειώνοντας την ανάγκη για συχνές ενεργές αναγεννήσεις του DPF και επιτρέποντας υψηλότερη μέση απόδοση του συστήματος SCR, αφού η θερμική στρατηγική μπορεί να σχεδιαστεί λιγότερο επιθετικά. Ωστόσο, η χαμηλότερη περιεκτικότητα σε αρωματικά ενδέχεται να επηρεάσει την παραγωγή διοξείδιου του αζώτου (Nitrogen Dioxide, NO_2) στον οξειδωτικό καταλύτη (Diesel Oxidation Catalyst, DOC), στοιχείο που πρέπει να ληφθεί υπόψη στη συν-βαθμονόμηση DOC/DPF/SCR (Johnson, 2016; Twigg, 2011).

Σε επίπεδο θερμοδυναμικής απόδοσης, τα e-fuels μπορούν να προσφέρουν άμεσα κέρδη όταν επιτρέπουν αύξηση λόγου συμπίεσης, βαθύτερη EGR και λειτουργία κοντά στο Minimum spark advance for Best Torque (MBT) χωρίς κρουστικότητα ή Low-Speed Pre-Ignition (LSPI). Σε υπερπληρωμένες διαμορφώσεις, ο υψηλός RON και η αυξημένη αντοχή σε προανάφλεξη επιτρέπουν λειτουργία με υψηλότερους λόγους πίεσης υπερπλήρωσης και μειωμένη ανάγκη εμπλουτισμού για θερμική προστασία, γεγονός που περιορίζει τις σωρευτικές εκπομπές CO και HC, καθώς και την ενεργοποίηση στρατηγικών προστασίας καταλυτών κατά τις ανηφορικές επιταχύνσεις. Αντίστοιχα, σε diesel, ο υψηλός κετανικός αριθμός (CN) και η ευνοϊκή πτητικότητα βελτιώνουν τον ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας και τον έλεγχο θορύβου καύσης, με ευεργετικό αντίκτυπο στη λειτουργία σε χαμηλά/μεσαία φορτία που κυριαρχούν στις διαδρομές RDE (Kalghatgi, 2018; Payri et al., 2013).

Το βασικό όριο κλιμάκωσης των e-fuels δεν είναι τεχνικό αλλά συστημικό. Η διαθεσιμότητα «πράσινου» υδρογόνου χαμηλού κόστους, καθαρού CO_2 και επαρκούς ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενεργειακή απόδοση well-to-wheel των διαδρομών PtL είναι κατώτερη από την απευθείας ηλεκτροκίνηση, αλλά η συμβατότητα με τον υπάρχοντα στόλο/υποδομές και η δυνατότητα χρήσης σε βαριά/μακρά καθήκοντα ή σε αεροπορία/ναυτιλία ενισχύουν τον ρόλο τους σε ένα μίγμα τεχνολογιών (IEA, 2022; Staffell et al., 2019). Για τις οδικές εφαρμογές Euro 7, η ρεαλιστική πορεία χρήσης είναι μέσω μιγμάτων σε υφιστάμενα πρότυπα (π.χ. E10–E20, B7–B20, X% HVO/FT-diesel), με σταδιακή αύξηση μεριδίων ανάλογα με τη διαθεσιμότητα τροφοδοσίας και το κόστος άνθρακα. Η βαθμονόμηση θα πρέπει να προσαρμοστεί ώστε να διατηρείται η απόδοση καταλυτών/φίλτρων και να

αποφεύγονται παρενέργειες όπως αυξημένα aldehydes σε υψηλές συγκεντρώσεις οξυγονούχων ή διαφοροποιήσεις στον σχηματισμό υποξείδιου του αζώτου (Nitrous oxide, N_2O) σε συγκεκριμένες θερμοκρασιακές ζώνες του SCR.

Στις ψυχρές εκκινήσεις, ορισμένα e-fuels βελτιώνουν την πτητικότητα και την αναφλεξιμότητα, επιταχύνοντας την «αφύπνιση» καταλυτών και μειώνοντας τη σωρευτική εκπομπή CO/HC πριν το light-off. Παράλληλα, η χαμηλότερη τάση σχηματισμού αιθάλης σε συνθετικά ντίζελ περιορίζει την ανάγκη για εμπλουτισμό/θερμικές στρατηγικές προς το DPF, στοιχείο κρίσιμο για την επίδοση σε αστικά προφίλ RDE. Για την πλήρη αξιοποίηση των καυσίμων αυτών, κρίσιμη είναι η συν-σχεδίαση καυσίμου–υλικού–ελέγχου. Οι χάρτες έγχυσης/σπινθήρα, πίεση rail, γεωμετρία μπεκ και αλγόριθμοι θερμικής διαχείρισης πρέπει να αναβαθμιστούν ώστε να αποφεύγονται παρενέργειες (Heywood, 2018; Stone, 2012).

Από κανονιστική σκοπιά, το Euro 7 αξιολογεί την επίδοση εκπομπών στο σημείο χρήσης συνεπώς, τα e-fuels και τα προηγμένα βιοκαύσιμα κρίνονται με τα ίδια όρια PN10/NOx/CO/HC και τις ίδιες διαδικασίες WLTP/RDE/OBM. Η υπεροχή τους εκδηλώνεται κυρίως σε επίπεδο κύκλου ζωής, όπου η ενσωματωμένη ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια και η χρήση βιογενούς/δεσμευμένου CO_2 μειώνουν δραστικά το αποτύπωμα CO_2-eq ανά χιλιόμετρο. Για τον στόχο συμμόρφωσης, αυτό σημαίνει ότι οι κατασκευαστές μπορούν να αξιοποιήσουν τις χημικές ιδιότητες των e-fuels για να μειώσουν PN και να βελτιώσουν θερμοδυναμική απόδοση, ενώ η πολιτική/αγοραία διάσταση (πιστοποίηση προέλευσης, τιμή άνθρακα, κίνητρα μιγμάτων) θα καθορίσει τον ρυθμό υιοθέτησης (IEA, 2022; Staffell et al., 2019).

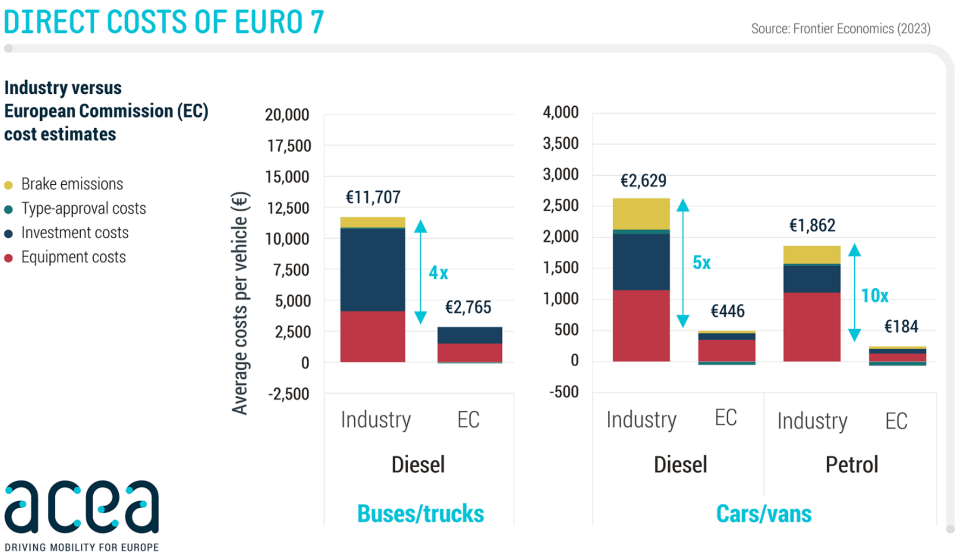
Τέλος, η εφοδιαστική και η συμβατότητα υλικών πρέπει να εξεταστούν. Τα συνθετικά καύσιμα με χαμηλό αρωματικό περιεχόμενο έχουν ευνοϊκές ιδιότητες απορροής/καθαρότητας αλλά διαφορετική συμπεριφορά διαστολής/συμβατότητας με ελαστομερή, ενώ οι υψηλές συγκεντρώσεις οξυγονούχων απαιτούν ανθεκτικά υλικά σε γραμμές καυσίμου και προσεκτική διαχείριση εξατμιστικών εκπομπών. Οι απαιτήσεις λιπαντικών μπορεί να διαφοροποιηθούν λόγω αλλαγών στην αιθάλη/οξείδωση, με πιθανές ευκαιρίες για χαμηλότερη τέφρα σε κινητήρες GDI/CI που λειτουργούν συστηματικά με e-fuels (Johnson, 2016; Twigg, 2011). Η συστηματική αξιολόγηση Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life-Cycle Assessment, LCA)

και οι δοκιμές πεδίου υπό PN10-PEMS θα αποτελέσουν τον τελικό κριτή για την πρακτική ένταξη των καυσίμων αυτών στις πλατφόρμες Euro 7.

Κεφάλαιο 5: Συγκριτική αξιολόγηση και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις

5.1 Οικονομική επίδραση της μετάβασης στο Euro 7

Η οικονομική επίδραση του Euro 7 διαμορφώνεται από τη σύζευξη τριών βασικών συνιστωσών: (α) το άμεσο κατασκευαστικό κόστος των απαιτούμενων τεχνολογικών λύσεων, (β) το κόστος μηχανικής ολοκλήρωσης και βαθμονόμησης έως τη συμμόρφωση με τα πρωτόκολλα Παγκοσμίως Εναρμονισμένη Διαδικασία Δοκιμών Ελαφρών Οχημάτων (World-harmonised Light Vehicles Test Procedure, WLTP), Πραγματικές Εκπομπές Οδήγησης (Real Driving Emissions, RDE) και Επιτήρηση Επί του Οχήματος (On-Board Monitoring, OBM), και το κόστος κύκλου ζωής που επηρεάζει την τιμολόγηση, την υπολειμματική αξία και τη συνολική ανταγωνιστικότητα των μοντέλων. Σε επίπεδο υλικών, η αύξηση της μάζας ενεργών καταλυτικών υλικών και η καθολικοποίηση των φίλτρων σωματιδίων βενζίνης (Gasoline Particulate Filter, GPF) στους κινητήρες σπινθηρισμού (Spark-Ignition, SI), καθώς και οι αρχιτεκτονικές εκλεκτικής καταλυτικής αναγωγής (Selective Catalytic Reduction on Filter, SCRF/Dual-Selective Catalytic Reduction, Dual-SCR) στους κινητήρες συμπίεσης (Compression-Ignition, CI), συνεπάγονται υψηλότερες δαπάνες σε πολύτιμα μέταλλα, φορείς ζεολιθικών καταλυτών και υποστρώματα φίλτρων χαμηλής πτώσης πίεσης. Η μετάβαση από το διαγνωστικό σύστημα επί του οχήματος On-Board Diagnostics (OBD) σε ενισχυμένο OBM επιβάλλει αισθητήρες δεύτερης γενιάς και ισχυρότερες ηλεκτρονικές μονάδες ελέγχου, αυξάνοντας το κόστος hardware αλλά και το κόστος λογισμικού/επικύρωσης που απαιτείται για συνεχές monitoring επί του οχήματος (European Commission, 2022; Council of the European Union, 2024; ICCT, 2024). Στην Εικόνα 5.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι εκτιμήσεις άμεσου κόστους του Euro 7.



Εικόνα 5.1: Σύγκριση άμεσου κόστους εφαρμογής του Euro 7 μεταξύ εκτιμήσεων βιομηχανίας και Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Πηγή: ACEA (2023).

Πέραν του υλικού κόστους, το σκέλος δοκιμών και βαθμονόμησης αποτελεί πλέον κυρίαρχο οικονομικό παράγοντα. Η επέκταση των απαιτήσεων σε αριθμό σωματιδίων έως 10 nm (Particle Number, PN10), το διευρυμένο παράθυρο RDE και οι αυστηρότερες προδιαγραφές αντοχής μετακινούν μεγάλο μέρος της δαπάνης σε στόλους πιστοποίησης πεδίου με Φορητά Συστήματα Μέτρησης Εκπομπών (Portable Emissions Measurement Systems, PEMS), σε εργαστηριακές υποδομές προ-γήρανσης και σε αλγοριθμικό έλεγχο με μοντελοβασισμένες μεθοδολογίες. Ο «χρόνος στο δυναμόμετρο» δεν αρκεί, απαιτείται επανάληψη κύκλων σχεδίασης και επικύρωσης σε πολλαπλά κλίματα, υψόμετρα και προφίλ χρήσης, με αποτέλεσμα η διάρκεια έργου και το λειτουργικό κεφάλαιο να αυξάνονται σε σχέση με το Euro 6d (JRC, 2018; JRC, 2021; ICCT, 2024). Η ενσωμάτωση ισχυρών θερμικών στρατηγικών (ηλεκτρικά θερμαινόμενα υποστρώματα, e-turbos) επιβάλλει επίσης μηχανολογικές τροποποιήσεις σε συσκευασία, θωρακίσεις και ψύξη, οι οποίες προσθέτουν εργοστασιακό κόστος αλλά και μη επαναλαμβανόμενο κόστος ανάπτυξης για την εκ νέου πιστοποίηση πλατφορμών.

Η οικονομική εικόνα διαφοροποιείται έντονα ανά αρχιτεκτονική πρόωσης. Στους κινητήρες SI άμεσου ψεκασμού (Gasoline Direct Injection, GDI), η καθολική

προσθήκη GPF, οι τριοδικοί καταλύτες (Three-Way Catalysts, TWC) υψηλής φόρτισης και τα σενάρια ηλεκτρικής θέρμανσης ενισχύουν το αρχικό κόστος, όμως η βελτιστοποίηση θερμικής διαχείρισης και η μείωση των εμπλουτισμών σε δυναμικές φάσεις μπορούν να επιστρέψουν κέρδη κατανάλωσης που μερικώς συμψηφίζουν την αρχική επένδυση στο Συνολικό Κόστος Ιδιοκτησίας (Total Cost of Ownership, TCO). Στους κινητήρες CI, η απαίτηση υψηλής απόδοσης οξειδίων του αζώτου (Nitrogen Oxides, NOx) σε ψυχρές/αστικές φάσεις επιβάλλει Dual-SCR ή SCRF, με κόστος που αρχικά είναι υψηλότερο, αλλά αποδίδει μέσω μειωμένων αναγεννήσεων του φίλτρου σωματιδίων ντιζελ (Diesel Particulate Filter, DPF), βελτιωμένης απόδοσης σε πραγματική οδήγηση και χαμηλότερου ρίσκου συμμόρφωσης on-road, στοιχεία που μειώνουν την πιθανότητα επανακλήσεων ή προστίμων (Johnson, 2016; Ricardo, 2021). Σε όλες τις περιπτώσεις, οι καμπύλες μάθησης/κλίμακας παραγωγής συνήθως οδηγούν σε απομείωση κόστους ανά μονάδα μέσα στα πρώτα 2–3 έτη πλήρους εφαρμογής, ιδίως όταν επιτευχθεί τυποποίηση υποσυστημάτων και πλατφορμών.

Ο εξηλεκτρισμός μεταβάλλει ουσιαστικά τον οικονομικό υπολογισμό. Τα ήπια υβριδικά 48 V (Mild Hybrid Electric Vehicles, MHEV) προσθέτουν μέτριο κόστος μπαταρίας/ηλεκτρομηχανικών υποσυστημάτων, αλλά προσφέρουν σημαντικές εξοικονομήσεις στην πιστοποίηση, επειδή μειώνουν τις ψυχρές/μεταβατικές επιβαρύνσεις που ιστορικά καθόριζαν τις σωρευτικές εκπομπές. Τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (Hybrid Electric Vehicles, HEV) και τα επαναφορτιζόμενα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (Plug-in Hybrid Electric Vehicles, PHEV) απαιτούν ανώτερη επένδυση σε υψηλή τάση και διαχείριση μπαταρίας, ωστόσο μειώνουν δραστικά το κόστος κινδύνου συμμόρφωσης σε RDE και σωματιδιακές εκπομπές από φθορά φρένων (brake particulate matter, brake-PM) χάρη στην αναγεννητική πέδηση, ενώ επιτυγχάνουν χαμηλότερη πραγματική κατανάλωση, με θετική επίδραση στο λειτουργικό κόστος χρήσης και στην υπολειμματική αξία (Council of the European Union, 2024; ICCT, 2024). Ταυτόχρονα, οι ελάχιστες απαιτήσεις αντοχής μπαταρίας που εισάγονται στο Euro 7 για τα εξηλεκτρισμένα οχήματα θωρακίζουν την απόδοση στον χρόνο, μειώνοντας τον κίνδυνο δυσαρέσκειας πελατών και μεταβλητότητας αξιών, αλλά επιβάλλουν ισχυρότερα συστήματα διαχείρισης μπαταρίας (Battery

Management Systems, BMS) , αυστηρότερη θερμική διαχείριση και, άρα, πρόσθετο αρχικό κόστος ολοκλήρωσης (European Commission, 2022).

Σε επίπεδο αγοράς, η μετακύλιση του κόστους στον τελικό αγοραστή εξαρτάται από τον βαθμό τυποποίησης, τον ανταγωνισμό μεταξύ τεχνολογικών διαδρομών και τις πολιτικές κινήτρων. Κατασκευαστές με μεγάλο όγκο και κοινές αρχιτεκτονικές μετά-επεξεργασίας σε πολλαπλές πλατφόρμες επιτυγχάνουν οικονομίες κλίμακας και μειώνουν το μοναδιαίο κόστος ταχύτερα. Η διαθεσιμότητα και η τιμή πολύτιμων μετάλλων και εξειδικευμένων ζεολίθων επηρεάζουν άμεσα τον προϋπολογισμό, καθιστώντας κρίσιμη τη διαχείριση κινδύνου εφοδιαστικής αλυσίδας, την κάθετη ολοκλήρωση και τα μακροπρόθεσμα συμβόλαια προμήθειας (ACEA, 2023). Η υιοθέτηση συνθετικών καυσίμων υψηλού αριθμού οκτανίων (Research Octane Number, RON) ή καυσίμων τύπου Fischer–Tropsch (FT) / Υδρογονοκατεργασμένου Φυτικού Ελαίου (Hydrotreated Vegetable Oil, HVO) σε στόλους μπορεί να μειώσει τα λειτουργικά κόστη μέσω λιγότερων αναγεννήσεων φίλτρων και βελτιωμένης θερμοδυναμικής απόδοσης. Ωστόσο, το κόστος των καυσίμων αυτών παραμένει σήμερα υψηλό και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις πολιτικές χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος και τους μηχανισμούς πιστοποίησης κύκλου ζωής. (Kalghatgi, 2018; IEA, 2022).

Ο πλήρης οικονομικός λογαριασμός περιλαμβάνει και τα «κόστη ρίσκου συμμόρφωσης». Η μετατόπιση σε OBM, όπου η περιβαλλοντική επίδοση παρακολουθείται σε πραγματικό χρόνο και μπορεί να αξιοποιείται σε ελέγχους καταλληλότητας κυκλοφορίας ή ρυθμιστικούς ελέγχους, μειώνει την ανοχή σε υποβαθμισμένες στρατηγικές. Η επένδυση σε αισθητήρες και αλγορίθμους, καθώς και σε «ψηφιακά δίδυμα» που προλαμβάνουν υπερβάσεις PN10 ή αμμωνίας (Ammonia, NH_3) και διατηρούν την απόδοση των καταλυτών μετά από γήρανση, λειτουργεί ως ασφάλιστρο έναντι προστίμων, καθυστερήσεων πιστοποίησης ή ανακλήσεων, τα οποία παραδοσιακά έχουν υπερ-γραμμική επίπτωση στο κόστος και στη φήμη. (JRC, 2021; Ricardo, 2021). Επιπλέον, η βελτίωση της απόδοσης σε πραγματική οδήγηση μειώνει το λειτουργικό κόστος καυσίμου και ενισχύει τα προγράμματα εγγύησης/συντήρησης, στοιχεία που επηρεάζουν θετικά την υπολειμματική αξία και την ελκυστικότητα χρηματοδοτικών προϊόντων.

Συνολικά, η μετάβαση στο Euro 7 οδηγεί σε υψηλότερο αρχικό κόστος ανά όχημα, με διαφορική επιβάρυνση μεταξύ κινητήρων SI, κινητήρων CI και εξηλεκτρισμένων διαμορφώσεων. Ωστόσο, η ολιστική βελτιστοποίηση θερμικού κύκλου, μετά-επεξεργασίας, αισθητηριακής υποδομής και θερμικής αρχιτεκτονικής, σε συνδυασμό με εξηλεκτρισμό, μειώνει το κόστος ρίσκου συμμόρφωσης και μπορεί να αποδώσει καθ' όλη τη διάρκεια ζωής μέσω χαμηλότερης πραγματικής κατανάλωσης, μειωμένων αναγεννήσεων/συντηρήσεων και υψηλότερης υπολειμματικής αξίας. Σε βιομηχανικό επίπεδο, η τυποποίηση υποσυστημάτων, οι οικονομίες κλίμακας και η κάθετη ολοκλήρωση στην αλυσίδα καταλυτικών υλικών και αισθητήρων είναι οι κύριοι μοχλοί απομείωσης κόστους σε ορίζοντα μοντελοσειράς (European Commission, 2022; Council of the European Union, 2024; ICCT, 2024; ACEA, 2023).

5.2 Επιπτώσεις στην αυτοκινητοβιομηχανία

Η εφαρμογή του Euro 7 λειτουργεί ως «καταλύτης» οργανωτικού και τεχνολογικού μετασχηματισμού σε όλη την αλυσίδα αξίας της αυτοκινητοβιομηχανίας. Σε επίπεδο προϊόντος, οι απαιτήσεις για σταθερή επίδοση εκπομπών σε RDE, η επέκταση της μετρολογίας σωματιδίων έως 10 nm και η μετάβαση από OBD σε ενισχυμένο OBM επιβάλλουν ανασχεδιασμό πλατφορμών με έμφαση στη θερμική αρχιτεκτονική, την αεροθερμική διαχείριση του συστήματος εξαγωγής και την ευρεία ενσωμάτωση αισθητήρων δεύτερης γενιάς (European Commission, 2022; JRC, 2018, 2021; Council of the European Union, 2024). Η μηχανολογική διάρθρωση μετατοπίζεται από τη ξεχωριστή βελτιστοποίηση υποσυστημάτων στη συν-βελτιστοποίηση κινητήρα, συστήματος μετά-επεξεργασίας και ελέγχου, με αποτέλεσμα αυξημένες ανάγκες για δοκιμές υλικού-στο-βρόχο (Hardware-in-the-Loop, HIL) και δοκιμές λογισμικού-στο-βρόχο (Software-in-the-Loop, SIL), αξιοποίηση ψηφιακών διδύμων, καθώς και αυτοματοποιημένη ανάλυση μεγάλων συνόλων δεδομένων από στόλους RDE (Ricardo, 2021).

Οι επιπτώσεις στην εφοδιαστική αλυσίδα είναι εξίσου βαθιές. Η καθολική χρήση GPF στους κινητήρες SI και οι αρχιτεκτονικές SCRF/Dual-SCR) στους πετρελαιοκινητήρες αυξάνουν τη ζήτηση για καταλύτες χαμηλής θερμοκρασίας, φορείς υψηλής επιφάνειας, πολύτιμα μέταλλα και αισθητήρες NOx/NH_3/PN με

βελτιωμένη αντοχή και ακρίβεια. Η διαφοροποίηση προμηθευτών σε κρίσιμα υλικά και η κάθετη ολοκλήρωση σε επιμέρους στάδια (π.χ. υποστρώματα φίλτρων, ζεολίθοι, πολύτιμα μέταλλα) μειώνουν το ρίσκο διαθεσιμότητας και τιμολόγησης, αλλά απαιτούν κεφαλαιουχικές επενδύσεις και μακροπρόθεσμες συμβάσεις (ACEA, 2023). Παράλληλα, οι μη-εξατμιστικές απαιτήσεις για σωματίδια φρένων και η προοδευτική προσοχή στα ελαστικά δημιουργούν νέα πεδία συνεργασίας μεταξύ κατασκευαστών πρωτότυπου εξοπλισμού (Original Equipment Manufacturer, OEM) και προμηθευτών υλικών τριβής, επιστρώσεων δίσκων και συνθέσεων ελαστικών, με διεπιστημονική σύζευξη τριβολογίας, υλικών και ελέγχου οχήματος (ICCT, 2024).

Η παραγωγή και η βιομηχανική μηχανοποίηση υφίστανται αναδιάταξη λόγω των πρόσθετων απαιτήσεων συσκευασίας καταλυτών/φίλτρων, θωρακίσεων και ψύξης. Η αύξηση όγκου/μάζας μετά-επεξεργασίας και οι κοντινές τοποθετήσεις προς την πολλαπλή εξαγωγής μεταβάλλουν τις γεωμετρίες εναρμόνισης με αμάξωμα/πλαίσιο, ενώ οι ηλεκτρικά θερμαινόμενοι φορείς και τα e-turbos απαιτούν νέα υποσυστήματα υψηλής ισχύος και τροποποιήσεις στην καλωδίωση υψηλής τάσης, ακόμη και σε υβρδικά συστήματα (McGrane & Douglas, 2021; Ricardo, 2021). Τα εργοστάσια δοκιμών αναβαθμίζονται με πάγκους προ-γήρανσης, θαλάμους ελεγχόμενων περιβαλλοντικών συνθηκών και στόλους φορητών συστημάτων μέτρησης εκπομπών (Portable Emissions Measurement Systems, PEMS), καθώς η δοκιμαστική δυναμικότητα καθίσταται κρίσιμος περιοριστικός παράγοντας για τον χρόνο διάθεσης στην αγορά. Αυτό, σε συνδυασμό με τις μεγαλύτερες απαιτήσεις αντοχής/διάρκειας ζωής, αυξάνει το μη επαναλαμβανόμενο κόστος ανάπτυξης και πιέζει τα χρονοδιαγράμματα λανσαρίσματος (JRC, 2018, 2021; ICCT, 2024).

Σε επίπεδο συνολικής στρατηγικής σχεδιασμού προϊόντων, η συμμόρφωση στον πραγματικό κόσμο ευνοεί πλατφόρμες με εξηλεκτρισμό, διότι η ηλεκτρική υποβοήθηση μειώνει τις ψυχρές/μεταβατικές φάσεις που ιστορικά καθόριζαν τις σωρευτικές εκπομπές. Η κλιμάκωση ήπιων υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων (Mild Hybrid Electric Vehicles, MHEV) / υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων (Hybrid Electric Vehicles, HEV) / επαναφορτιζόμενων υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων (Plug-in Hybrid Electric Vehicles, PHEV) μειώνει το κόστος «ρίσκου συμμόρφωσης» και διευκολύνει την επίτευξη ορίων σωματιδιακής ύλης από φρένα (brake Particulate

Matter, brake-PM) μέσω αναγεννητικής πέδησης, μετατοπίζοντας πόρους έρευνας και ανάπτυξης προς συστήματα ισχύος, συστήματα διαχείρισης μπαταρίας (Battery Management Systems, BMS) και συστήματα θερμικής διαχείριση υψηλής τάσης (Council of the European Union, 2024; Ricardo, 2021).

Ταυτόχρονα, η ύπαρξη σαφών ελάχιστων απαιτήσεων αντοχής μπαταριών επιδρά θετικά στη βιωσιμότητα προϊόντων σε βάθος χρόνου, αλλά αυξάνει την τεχνική ένταση σε ελέγχους κύκλου ζωής και δεδομένα OBFCM και OBM (European Commission, 2022; JRC, 2021).

Ο μετασχηματισμός δεξιοτήτων είναι αναπόφευκτος. Η πυκνότερη ενσωμάτωση αισθητήρων και η συνεχής επιτήρηση επί του οχήματος απαιτούν συνδυασμό ικανοτήτων σε καταλυτική χημεία, συστήματα μετά-επεξεργασίας, μοντελοβασισμένο έλεγχο, λογισμικό ασφαλείας και ανάλυση δεδομένων πεδίου. Η συνεργασία με προμηθευτές λογισμικού και η ανάπτυξη «ψηφιακών διδύμων» για on-line εκτίμηση γήρανσης καταλυτών/φίλτρων μειώνουν την ανάγκη υπερ-συντηρητικών ρυθμίσεων που αυξάνουν την κατανάλωση και υποβαθμίζουν τη λειτουργική απόδοση και ομαλότητα του συστήματος, αλλά προϋποθέτουν ώριμα σχήματα διακυβέρνησης δεδομένων και κυβερνοασφάλειας (Ricardo, 2021; ICCT, 2024). Η μετάβαση της διαγνωστικής από αντιδραστική σε προγνωστική μορφή μεταβάλλει θεμελιωδώς την πολιτική εγγυήσεων, τη δομή υπηρεσιών συντήρησης και την υπολειμματική αξία στόλου, δεδομένου ότι η αυξημένη διαφάνεια του OBM μειώνει δραστικά τα περιθώρια εφαρμογής υποαποδοτικών στρατηγικών λειτουργίας στο πεδίο (JRC, 2021).

Οι συνέπειες επεκτείνονται και στο στάδιο συντήρησης και τεχνικής υποστήριξης των οχημάτων. Η παρουσία GPF/DPF/SCRF με αυστηρές απαιτήσεις αισθητήρων/αναγεννήσεων αυξάνει την τεχνική πολυπλοκότητα συντήρησης, απαιτώντας εξειδικευμένα διαγνωστικά και κατάλληλα λιπαντικά/καύσιμα για διατήρηση απόδοσης σε βάθος χρόνου. Οι κατασκευαστές που θα τυποποιήσουν υποσυστήματα και θα προσφέρουν συνεκτικά προγράμματα συντήρησης/εγγυήσεων θα μειώσουν το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας (Total Cost of Ownership, TCO) και θα ενισχύσουν την αποδοχή της αγοράς, ιδίως σε ελαφρά επαγγελματικά όπου ο χρόνος ακινητοποίησης έχει δυσανάλογο οικονομικό κόστος (ACEA, 2023; Ricardo, 2021).

Τέλος, η γεωγραφία της συμμόρφωσης αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Η μέτρηση PN10 με PEMS σε διαφορετικά κλίματα και υψόμετρα και η έμφαση στις κρύες φάσεις ωθούν τους OEM σε πολυτοπικά δίκτυα δοκιμών και σε συνεργασίες με τεχνικά κέντρα εκτός των παραδοσιακών κόμβων. Η πρόωρη ενσωμάτωση των εκτελεστικών πράξεων/οδηγιών στην ανάπτυξη προϊόντων και η ταχεία ανατροφοδότηση από πιλοτικούς στόλους, αποδεικνύονται κρίσιμα για την αποφυγή καθυστερήσεων πιστοποίησης και για τη μείωση του κόστους συμμόρφωσης στην εμπορική κλίμακα (ICCT, 2024; Council of the European Union, 2024).

Συνοψίζοντας, οι επιπτώσεις του Euro 7 στην αυτοκινητοβιομηχανία δεν εξαντλούνται σε αυξημένο κατάλογος υλικών (Bill of Materials, BOM) συμπυκνώνονται σε μια συστημική μετατόπιση προς ολοκληρωμένες θερμικές αρχιτεκτονικές, προχωρημένη μετά-επεξεργασία χαμηλών θερμοκρασιών, εξηλεκτρισμό, αισθητήρες/OBM και ψηφιακό έλεγχο κύκλου ζωής. Οι κατασκευαστές που θα επιτύχουν τυποποίηση υποσυστημάτων, κάθετη ολοκλήρωση κρίσιμων υλικών, ισορροπημένο μίγμα εξηλεκτρισμού και ισχυρά εργαλεία μοντελοβασισμένου ελέγχου θα μειώσουν το κόστος ρίσκου συμμόρφωσης και θα διατηρήσουν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα σε ορίζοντα μοντελοσειράς (Ricardo, 2021; ACEA, 2023; ICCT, 2024; JRC, 2021).

5.3 Επιπτώσεις στους καταναλωτές και στην αγορά

Η εφαρμογή του Euro 7 αναμένεται να επηρεάσει βραχυπρόθεσμα τις τιμές κτήσης νέων οχημάτων, καθώς η ενσωμάτωση GPF/DPF χαμηλής πτώσης πίεσης, αρχιτεκτονικών SCRF/Dual-SCR, αισθητήρων δεύτερης γενιάς και υποδομών OBM αυξάνει το κατασκευαστικό κόστος και το μη επαναλαμβανόμενο κόστος ανάπτυξης (European Commission, 2022; Council of the European Union, 2024). Ωστόσο, σε ορίζοντα κύκλου ζωής, μέρος αυτής της επιβάρυνσης αντισταθμίζεται από χαμηλότερη πραγματική κατανάλωση—λόγω θερμικής βελτιστοποίησης και εξηλεκτρισμού—και από μειωμένη συχνότητα ενεργών αναγεννήσεων/επισκευών στα φίλτρα σωματιδίων, ιδίως σε κόσμους με κίνηση πόλης όπου το Euro 7 «επιβραβεύει» σταθερή απόδοση σε ψυχρές/μεταβατικές συνθήκες (ICCT, 2024; Ricardo, 2021).

Για τον ιδιώτη αγοραστή, ο δείκτης TCO θα εξαρτηθεί από το μείγμα τεχνολογίας. Τα MHEV προσθέτουν περιορισμένο αρχικό κόστος αλλά βελτιώνουν την κατανάλωση και μειώνουν τις σωρευτικές εκπομπές σε αστική οδήγηση, ενώ τα HEV/PHEV μπορούν να συρρικνώσουν σημαντικά τη χρήση της ΜΕΚ στις πρώτες χιλιομετρικές ζώνες του ταξιδιού, άρα και τις φθορές/συντηρήσεις που σχετίζονται με θερμικούς κύκλους ψυχρής εκκίνησης (Council of the European Union, 2024; ICCT, 2024). Η απαίτηση ελάχιστης αντοχής μπαταριών για τα εξηλεκτρισμένα οχήματα, μολονότι αυξάνει τις προδιαγραφές του BMS, τείνει να σταθεροποιεί την υπολειμματική αξία, περιορίζοντας τον κίνδυνο απότομης απαξίωσης λόγω πρόωρης γήρανσης (European Commission, 2022).

Η διαφάνεια που εισάγει το OBM μεταβάλλει τη σχέση χρήστη-οχήματος: η συνεχής επιτήρηση της περιβαλλοντικής επίδοσης και η καταγραφή πραγματικών δεδομένων κατανάλωσης/εκπομπών διευκολύνουν τις αρχές να συνδέσουν τέλη/φορολόγηση με πραγματική χρήση, ενώ ασφαλιστικά προϊόντα «pay-as-you-drive/emit» γίνονται τεχνικά εφικτά (JRC, 2021; ICCT, 2024). Για τους καταναλωτές αυτό σημαίνει μεγαλύτερη προβλεψιμότητα κόστους, αλλά και μικρότερη ανοχή σε πρακτικές που αυξάνουν εκπομπές, π.χ. παρατεταμένη οδήγηση σε θερμικά δυσμενείς ζώνες ή χρήση υποβαθμισμένων καυσίμων/λιπαντικών που επηρεάζουν φίλτρα και καταλύτες.

Στη μεταχειρισμένη αγορά, η αυξημένη πολυπλοκότητα μετά-επεξεργασίας θα καταστήσει κρίσιμη τη «διαφάνεια συντήρησης»: ιστορικά δεδομένα αναγεννήσεων, φόρτος φίλτρων και κατάσταση αισθητήρων θα επηρεάζουν περισσότερο από πριν την αποτίμηση. Οχήματα με αποδεδειγμένα σταθερή επίδοση σε PN10 / NOx υπό πραγματικές συνθήκες και με ενημερωμένο λογισμικό θα διατηρούν υψηλότερη υπολειμματική αξία, ενώ οι πλατφόρμες που συνδυάζουν GDI + GPF ή CI με SCRF και έξυπνη θερμική διαχείριση θα εμφανίζουν χαμηλότερο ρίσκο «απρόοπτων» επισκευών (JRC, 2018; Ricardo, 2021). Παράλληλα, η σταδιακή ρύθμιση μη-εξατμιστικών εκπομπών (σωματίδια φρένων) ευνοεί υβριδικά συστήματα με υψηλό μερίδιο αναγεννητικής πέδησης, μειώνοντας το λειτουργικό κόστος αναλωσίμων φρένων και τη σχετική ρύπανση σε πόλεις (Council of the European Union, 2024; ICCT, 2024).

Στη ζήτηση καυσίμων, το Euro 7 δεν επιβάλλει άμεσα διαφοροποιήσεις ποιότητας, αλλά οι καταναλωτές ενδέχεται να δουν αυξημένη διαθεσιμότητα μιγμάτων με υψηλότερο RON/κετανικό αριθμό ή συνθετικών/βιογενών κλασμάτων που βελτιώνουν PN και κατανάλωση, εφόσον η τιμή άνθρακα και τα εθνικά κίνητρα ενισχύσουν την προσφορά (Kalghatgi, 2018; ICCT, 2024). Σε τέτοια σενάρια, το όφελος στον χρήστη προκύπτει κυρίως από μειωμένες αναγεννήσεις φίλτρων και πιο προβλέψιμη απόδοση σε κρύο/δυναμικό προφίλ, κάτι που μπορεί να μεταφραστεί σε χαμηλότερο TCO για οδηγούς με υψηλό αστικό μερίδιο.

Από πλευράς δημόσιας υγείας/πόλεων, τα οφέλη είναι άμεσα αντιληπτά: η διεύρυνση του RDE και η μείωση PN έως 10 nm στοχεύουν ακριβώς τις συνθήκες όπου κινούνται οι περισσότεροι χρήστες, βελτιώνοντας την ποιότητα αέρα σε μποτιλιαρίσματα/χαμηλές θερμοκρασίες και μειώνοντας την έκθεση σε πολύ μικρά σωματίδια που συνδέονται με καρδιοαναπνευστικούς κινδύνους (European Commission, 2022; ICCT, 2024). Η συμμόρφωση μη-εξατμιστικών εκπομπών, σε συνδυασμό με εξηλεκτρισμό, συμβάλλει περαιτέρω στη μείωση σωματιδιακού φορτίου σε αστικό περιβάλλον.

Τέλος, η επιλογή κινητήριας τεχνολογίας από τον καταναλωτή θα γίνει περισσότερο «κατά περίπτωση». Οδηγοί με μικτές/αστικές διαδρομές θα αποκομίσουν μεγαλύτερα οφέλη από HEV/PHEV Euro 7, λόγω μειωμένων ψυχρών εκκινήσεων και χαμηλότερων μη-εξατμιστικών, ενώ όσοι διανύουν μεγάλες αποστάσεις αυτοκινητοδρόμου θα αξιοποιήσουν CI με Dual-SCR/SCRF και βελτιστοποιημένη θερμική διαχείριση, εφόσον τα καύσιμα είναι ποιοτικά και οι στρατηγικές αναγεννήσεων σωστά βαθμονομημένες (Ricardo, 2021; Council of the European Union, 2024). Σε κάθε περίπτωση, η μετάβαση σε ένα καθεστώς «πραγματικού κόσμου» σημαίνει ότι το τελικό κόστος και η εμπειρία χρήσης θα εξαρτώνται περισσότερο από τη συμβατότητα προφίλ οδήγησης–τεχνολογίας και λιγότερο από την ονομαστική επίδοση σε εργαστηριακό κύκλο.

5.4 Προοπτικές και πιθανές μελλοντικές εξελίξεις

Η μετάβαση στο Euro 7 δεν συνιστά ένα τελικό στάδιο, αλλά το σημείο εκκίνησης για ένα καθεστώς «συνεχούς συμμόρφωσης» όπου η απόδοση εκπομπών αξιολογείται

διαρκώς, σε πραγματικές συνθήκες και σε βάθος χρόνου. Η άμεση προοπτική είναι η σύγκλιση τεχνολογιών: θερμικά συστήματα υψηλής απόδοσης με εξελιγμένη μετά-επεξεργασία χαμηλών θερμοκρασιών και στενή ολοκλήρωση με εξηλεκτρισμό. Στους βενζινοκινητήρες, η καθολική υιοθέτηση GPF με χαμηλή πτώση πίεσης, οι τριοδικοί καταλύτες υψηλής μάζας δραστικών μετάλλων και οι στρατηγικές ταχείας «αφύπνισης» (μέσω ηλεκτρικής θέρμανσης ή καλιμπραρισμένων θερμικών σεναρίων) θα αποτελέσουν το βασικό υπόβαθρο. Στους πετρελαιοκινητήρες, η σταθεροποίηση της απόδοσης NOx σε κρύες/αστικές φάσεις προοιωνίζεται διπλά στάδια SCR ή/και SCRF με φορείς χαμηλής θερμοκρασίας και ακριβέστερη δοσομέτρηση ουρίας, με έμφαση στη θερμική αρχιτεκτονική του συστήματος εξαγωγής (Heywood, 2018; Johnson, 2016).

Παράλληλα, η αισθητηριακή και αλγοριθμική υποδομή θα μετασχηματίσει τον κύκλο ανάπτυξης. Η μετεξέλιξη από OBD σε διευρυμένο OBM και η διάχυση δεδομένων OBFCM δημιουργούν τις προϋποθέσεις για μοντελοβασισμένο έλεγχο δεύτερης γενιάς: ακριβέστεροι αισθητήρες NOx/NH_3 και εκτιμητές φόρτου GPF/DPF, πιλοτικά σχήματα on-board εκτίμησης PN10 και «ψηφιακά δίδυμα» που τροφοδοτούνται με δεδομένα στόλου θα επιτρέψουν προγνωστική διάγνωση γήρανσης και προληπτικές παρεμβάσεις καλιμπράρισης. Η σύζευξη αυτών με over-the-air ενημερώσεις λογισμικού και εργαλεία machine learning θα μειώσει το κόστος ρίσκου συμμόρφωσης, υπό την προϋπόθεση ώριμης διακυβέρνησης δεδομένων και κυβερνοασφάλειας (JRC, 2021; Ricardo, 2021).

Στις μη-εξατμιστικές εκπομπές, το πλαίσιο Euro 7 «μετατοπίζει τον διάλογο» από το αποκλειστικά σωληνοκεντρικό στο οχηματοκεντρικό. Η μεσοπρόθεσμη τάση δείχνει περαιτέρω καινοτομία σε υλικά τριβής χαμηλής φθοράς και επεξεργασίες δίσκων, παράλληλα με επιτάχυνση της αναγεννητικής πέδησης σε MHEV/HEV/PHEV/BEV ως κύρια στρατηγική ελέγχου brake-PM. Στην οδό, η λεπτομερής μέτρηση/αναφορά μη-εξατμιστικών θα ενισχύσει τη συστημική αντιμετώπιση του σωματιδιακού φορτίου πόλεων και θα επιβραβεύσει πλατφόρμες με υψηλή ανάκτηση ενέργειας και προσεκτικά σχεδιασμένα ελαστικά χαμηλής φθοράς (ICCT, 2024; Council of the European Union, 2024).

Ο εξηλεκτρισμός θα λειτουργεί όλο και περισσότερο ως «θερμικός ρυθμιστής» για τις ΜΕΚ. Η αυξανόμενη διείσδυση MHEV και ιδίως HEV/PHEV θα μειώνει τις ψυχρές/μεταβατικές φάσεις και θα επιτρέπει προχωρημένες στρατηγικές προθέρμανσης καταλυτών/φίλτρων με μικρό ενεργειακό κόστος. Σε συνδυασμό με κύκλους Miller/Atkinson, e-turbos και προ-θαλάμους ανάφλεξης Turbulent Jet Ignition (TJI), οι κινητήρες SI θα διατηρούν υψηλή θερμοδυναμική απόδοση και χαμηλά PN10 υπό καθεστώς RDE. Στους κινητήρες CI, η ηλεκτρική υποβοήθηση θα υποστηρίζει υψηλούς λόγους περίσσειας αέρα σε χαμηλές θερμοκρασίες, σταθεροποιώντας την απόδοση SCR και μειώνοντας την ανάγκη επιθετικών θερμικών στρατηγικών (Johnson, 2016; Heywood, 2018).

Η καυσίμου-κεντρική καινοτομία θα συνεχίσει να συμπληρώνει τον μηχανολογικό βραχίονα. Συνθετικά καύσιμα βενζίνης υψηλού RON, με χαμηλή περιεκτικότητα σε αρωματικούς υδρογονάνθρακες, καθώς και ντίζελ παραγόμενα μέσω διεργασίας Fischer–Tropsch (FT) ή υδρογονοκατεργασίας φυτικών ελαίων (Hydrotreated Vegetable Oil, HVO), με υψηλό κετανικό αριθμό αναμένεται να χρησιμοποιούνται σε στοχευμένα μίγματα για τη μείωση PN και τη βελτίωση του Brake Specific Fuel Consumption (BSFC), ιδίως σε στόλους με έντονο αστικό προφίλ. Η πρακτική ένταξη θα εξαρτηθεί από τη διαθεσιμότητα «πράσινου» υδρογόνου και του διοξειδίου του άνθρακα (Carbon Dioxide, CO_2), από το ρυθμιστικό πλαίσιο πιστοποίησης κύκλου ζωής και από το κόστος άνθρακα. Σε εφαρμογές όπου οι απαιτήσεις αυτονομίας/φόρτου είναι υψηλές, τα e-fuels μπορούν να λειτουργήσουν ως «γέφυρα» απανθρακοποίησης με ελάχιστες παρεμβάσεις στο υφιστάμενο hardware, εφόσον συνοδεύονται από επανεξισορρόπηση ψεκασμού/ανάφλεξης και επαλήθευση απόδοσης μετά-επεξεργασίας (Kalghatgi, 2018; IEA, 2022).

Σε ορίζοντα μοντελοσειράς, ο βιομηχανικός μετασχηματισμός αναμένεται να χαρακτηρίζεται από τυποποίηση υποσυστημάτων μετά-επεξεργασίας, κάθετη ολοκλήρωση σε καταλυτικά υλικά, ζεόλιθους και αισθητήρες, καθώς και από ενίσχυση της δοκιμαστικής ικανότητας μέσω πάγκων προ-γήρανσης και στόλων PEMS για την επαλήθευση των απαιτήσεων PN10. Η σταδιακή μεταφορά της διαδικασίας δοκιμών από το εργαστήριο στο πεδίο επιβάλλει νέες ροές εργασίας, με αυξημένο βάρος σε δοκιμές HIL και SIL, συνθετικές διαδρομές RDE και κύκλους

βαθμονόμησης βασισμένους σε δεδομένα. Η εξέλιξη αυτή αναμένεται να συμπιέσει τον χρόνο διάθεσης στην αγορά για τους οργανισμούς που θα υιοθετήσουν έγκαιρα ψηφιακά εργαλεία και κλειστού βρόχου ανατροφοδότηση από στόλους δοκιμών (JRC, 2018; Ricardo, 2021).

Η αγορά θα κινηθεί προς «κατά περίπτωση» βέλτιστες λύσεις. Σε αστικές/μικτές χρήσεις, HEV/PHEV Euro 7 θα αποδίδουν σημαντικές πραγματικές μειώσεις εκπομπών και TCO, ενώ σε μεγάλες αποστάσεις/βαριά καθήκοντα οι κινητήρες CI με Dual-SCR/SCRF και θερμικά βελτιστοποιημένη αρχιτεκτονική θα παραμείνουν ανταγωνιστικοί, ιδίως αν συνδυαστούν με καύσιμα υψηλής ποιότητας ή μίγματα συνθετικών. Η προοδευτική ωρίμανση αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων (Battery Electric Vehicle, BEV) και Οχήματα Κυψελών Καυσίμου (Fuel Cell Vehicles, FCV) θα μεταβάλλει το μίγμα ανάλογα με υποδομές/κόστος ενέργειας, όμως για μεγάλο μέρος του στόλου η «βέλτιστη συμμόρφωση στον πραγματικό κόσμο» θα προκύπτει από υβριδικές θερμικές λύσεις με ισχυρή μετά-επεξεργασία και προηγμένο έλεγχο (ICCT, 2024; Council of the European Union, 2024).

Σε επιστημονικό επίπεδο, η έρευνα θα εστιάσει σε καταλύτες πολύ χαμηλής θερμοκρασίας, σε επικαλύψεις φίλτρων με χαμηλό backpressure και ανθεκτικότητα σε θείο/φωσφόρο, σε αισθητήρες PN μικρότερων διαμέτρων με σταθερότητα στο πεδίο, καθώς και σε αλγοριθμικές μεθόδους που διακρίνουν με αξιοπιστία φυσιολογική γήρανση από πραγματική απόκλιση. Η ολοκλήρωση αυτών με προγνωστικά BMS και θερμικά διασυνδεδεμένα κυκλώματα σε HEV/PHEV/BEV θα επιτρέψει συν-βελτιστοποίηση ενεργειακής/περιβαλλοντικής επίδοσης, με αποτέλεσμα χαμηλότερη κατανάλωση, μειωμένα PN-spikes και σταθερή απόδοση καταλυτών/φίλτρων στο πέρασμα του χρόνου (JRC, 2021; Stone, 2012).

Τέλος, το ρυθμιστικό περιβάλλον αναμένεται να ενισχύσει τη διαφάνεια μέσω καθολικής συλλογής δεδομένων χρήσης και στοχευμένων ελέγχων καταλληλότητας κυκλοφορίας με PEMS. Η πρακτική συνέπεια είναι ότι η συμμόρφωση παύει να είναι «γεγονός πιστοποίησης» και γίνεται ιδιότητα του προϊόντος καθ' όλη τη διάρκεια ζωής. Οι κατασκευαστές που θα ευθυγραμμίσουν εγκαίρως θερμική αρχιτεκτονική, μετά-επεξεργασία, αισθητήρες, λογισμικό και καύσιμο, στρατηγικές με το πνεύμα του Euro 7, δηλαδή με την επίδοση στον πραγματικό κόσμο ως πρωτεύον στόχο θα

διατηρήσουν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα, με χαμηλότερο κόστος ρίσκου συμμόρφωσης και υψηλότερη αξιοπιστία στόλου (European Commission, 2022; Ricardo, 2021).

Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη ανέδειξε ότι το Euro 7 δεν αποτελεί απλή αριθμητική σύσφιξη ορίων, αλλά μετασχηματίζει δομικά τον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε και ελέγχουμε τις εκπομπές. Η ουσία μετακινείται από τη συμμόρφωση σε έναν συγκεκριμένο εργαστηριακό κύκλο προς την αποδεδειγμένη, ανθεκτική επίδοση σε πραγματικές συνθήκες οδήγησης, σε ευρύ θερμοκρασιακό και λειτουργικό παράθυρο και σε βάθος χρόνου. Η διεύρυνση της μετρολογίας σωματιδίων έως 10 nm, η ενίσχυση του RDE, οι αυστηρότερες απαιτήσεις αντοχής και η μετάβαση από την κλασική OBD σε στοχευμένο OBM συγκροτούν ένα νέο, απαιτητικό πλαίσιο «συνεχούς συμμόρφωσης». Η επίτευξη χαμηλών εκπομπών δεν μπορεί πλέον να αντιμετωπίζεται αποσπασματικά προϋποθέτει ολιστική συν-βελτιστοποίηση του θερμικού κύκλου, της μετά-επεξεργασίας, της θερμικής αρχιτεκτονικής, των αισθητήρων και του λογισμικού ελέγχου.

Στο επίπεδο των βενζινοκινητήρων σπινθηρισμού, η καθολική υιοθέτηση GPF και η αναβάθμιση του TWC με στόχο την ταχεία επίτευξη light-off αποτελούν κεντρικούς άξονες συμμόρφωσης. Η ακρίβεια στη χωροχρονική στόχευση του ψεκασμού, η ελαχιστοποίηση του wall-wetting και ο έλεγχος της τύρβης κοντά στο μπουζί αποδεικνύονται κρίσιμα για τον περιορισμό του PN στην κρύα εκκίνηση και στις μεταβατικές φάσεις. Περαιτέρω, κύκλοι Miller/Atkinson, εκτεταμένη EGR και, όπου ενδείκνυται, προ-θαλαμική ανάφλεξη επιτρέπουν λειτουργία με υψηλή θερμοδυναμική απόδοση και μειωμένα θερμικά φορτία, περιορίζοντας ταυτόχρονα τις ανάγκες εμπλουτισμού. Το τεχνικό συμπέρασμα είναι σαφές: η συμμόρφωση στον πραγματικό κόσμο «επιβραβεύει» βαθιά θερμοδυναμική βελτιστοποίηση σε σύζευξη με ευφυή θερμική διαχείριση.

Στους πετρελαιοκινητήρες συμπίεσης, η σταθερή απόδοση απομείωσης NOx σε χαμηλές θερμοκρασίες και αστικά προφίλ οδήγησης αναδεικνύει αρχιτεκτονικές dual-SCR ή/και SCRF, με φορείς χαμηλής θερμοκρασίας, ακριβή δοσομέτρηση

ουρίας και προχωρημένο έλεγχο ολίσθησης αμμωνίας. Η μακροζωία και η χαμηλή πτώση πίεσης στα DPF, σε συνδυασμό με στρατηγικές παθητικών/ήπιων ενεργών αναγεννήσεων, μειώνουν το καύσιμο-penalty και αυξάνουν την αξιοπιστία σε κύκλους stop-and-go. Το υπόδειγμα που προκύπτει είναι ένα «θερμικά έξυπνο» σύστημα εξαγωγής που αφυπνίζεται γρήγορα, διατηρεί υψηλή αποτελεσματικότητα σε ευρύ φάσμα και είναι διαγνώσιμο σε πραγματικό χρόνο από αισθητήρες δεύτερης γενιάς.

Η ρητή εισαγωγή μη-εξατμιστικών εκπομπών στο κανονιστικό πλαίσιο μεγεθύνει το αντικείμενο από τον κινητήρα στο σύνολο του οχήματος. Η μείωση των σωματιδίων φρένων μέσω υλικών χαμηλής φθοράς και κυρίως μέσω υψηλού μεριδίου αναγεννητικής πέδησης αλλάζει την αρχιτεκτονική των συστημάτων πέδησης και την καλιμπράριση της κατανομής ροπής. Συνεπώς, η συμμόρφωση στο Euro 7 δεν είναι μόνο υπόθεση κινητήρα/εξάτμισης, αλλά προϊόν συνολικού σχεδιασμού πλατφόρμας, όπου η απόδοση του συστήματος πρόωσης και η στρατηγική ελέγχου οχήματος συνεργάζονται για τη μείωση του συνολικού σωματιδιακού φορτίου.

Ο εξηλεκτρισμός λειτουργεί ως καταλύτης συμμόρφωσης και όχι απλώς ως εναλλακτική πρόωσης. Υβριδικές και εξηλεκτρισμένες στρατηγικές συμμόρφωσης απορροφούν τις πιο «βρώμικες» φάσεις του θερμικού κύκλου όπως κρύες εκκινήσεις και μεταβατικές αιχμές και επιτρέπουν στοχευμένες θερμικές στρατηγικές με ελάχιστο καύσιμο-κόστος, βελτιώνοντας και την ενεργειακή απόδοση και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε RDE. Η επιτυχία, εντούτοις, δεν είναι αυτόματη απαιτείται συν-σχεδίαση θερμικής αρχιτεκτονικής, BMS, ηλεκτρονικών ισχύος και χαρτογράφησης του θερμικού κινητήρα, ώστε να επιτυγχάνεται σταθερή αποδοτικότητα και γρήγορη «αφύπνιση» καταλυτών/φίλτρων χωρίς υποβάθμιση αξιοπιστίας.

Οι εναλλακτικές τεχνολογίες, όπως οι ΜΕΚ υδρογόνου και οι κυψέλες καυσίμου, προσφέρουν ρεαλιστικούς διαδρόμους απανθρακοποίησης για συγκεκριμένα καθήκοντα. Οι κινητήρες υδρογόνου, ιδίως με άμεσο ψεκασμό και φτωχή καύση, μπορούν να επιτύχουν χαμηλούς NOx με περιορισμένη εξάρτηση από μετά-επεξεργασία, υπό την προϋπόθεση ακριβούς ελέγχου ανάφλεξης/μίγματος και προσεκτικής θερμικής αρχιτεκτονικής. Οι PEMFC, σε διατάξεις FC-HEV, μετακινούν

τις σωληνοεκπομπές σε μηδενικά επίπεδα, με την πρόκληση να εντοπίζεται πλέον στην αξιοπιστία του balance-of-plant και στην αλυσίδα καθαρού υδρογόνου. Στον ίδιο άξονα, τα συνθετικά καύσιμα υψηλού RON ή υψηλού κετανίου, όταν συν-καλιμπράρονται με τον θερμικό κύκλο και τη μετά-επεξεργασία, μειώνουν τον PN και την αιθάλη και επιτρέπουν υψηλότερη απόδοση αν και το τελικό τους αποτύπωμα εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα «πράσινων» προδρόμων και το κόστος ενέργειας.

Σε βιομηχανικό επίπεδο, η συμμόρφωση στο Euro 7 επιβάλλει νέα ισορροπία μεταξύ υλικού κόστους, λογισμικού και «κόστους ρίσκου συμμόρφωσης». Η επένδυση σε αισθητήρες ακριβείας, σε μοντελοβασισμένους ελεγκτές και σε «ψηφιακά δίδυμα» μειώνει την πιθανότητα υπερβάσεων στο πεδίο και, κατ' επέκταση, το ρίσκο προστίμων ή ανακλήσεων. Ταυτόχρονα, η τυποποίηση υποσυστημάτων μετά-επεξεργασίας και η κάθετη ολοκλήρωση κρίσιμων υλικών αποτελούν τους βασικούς μοχλούς απομείωσης κόστους ανά μονάδα σε ορίζοντα μοντελοσειράς. Η ικανότητα γρήγορης ανακύκλωσης ανάμεσα σε πάγκο, πεδίο και λογισμικό, με στόλους PEMS και αυτοματοποιημένα HIL/SIL, θα διαφοροποιήσει τους οργανισμούς που θα επιτύχουν έγκαιρη και βιώσιμη συμμόρφωση.

Από κοινωνικοοικονομική σκοπιά, οι καταναλωτές θα αντιμετωπίσουν βραχυπρόθεσμη αύξηση τιμής κτήσης λόγω της προσθήκης φίλτρων, καταλυτών και αισθητήρων δεύτερης γενιάς, αλλά θα ωφεληθούν από χαμηλότερη πραγματική κατανάλωση, μειωμένες ανάγκες ενεργών αναγεννήσεων και βελτιωμένη ποιότητα αέρα σε αστικές συνθήκες. Η ενσωμάτωση OBM και η διαθεσιμότητα δεδομένων OBFCM δημιουργούν πλαίσιο μεγαλύτερης διαφάνειας και ευθυγράμμισης κόστους-χρήσης, επιτρέποντας πολιτικές και ασφαλιστικά προϊόντα που αντανακλούν την πραγματική περιβαλλοντική επίδοση. Σε επίπεδο δημόσιας υγείας, η στοχοποίηση πολύ μικρών σωματιδίων και η ρύθμιση των brake-PM αντιμετωπίζουν ακριβώς εκείνες τις πηγές έκθεσης που κυριαρχούν στις πόλεις.

Το ερευνητικό αποτύπωμα που αναδύεται είναι διττό. Αφενός, απαιτούνται καταλύτες και επικαλύψεις φίλτρων με υψηλή δραστικότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες και ανθεκτικότητα σε θείο/φωσφόρο, αισθητήρες NOx/NH_3/PN με σταθερότητα πεδίου και ακριβείς εκτιμητές φόρτου φίλτρων. Αφετέρου, χρειάζονται αλγοριθμικές μέθοδοι

που να διακρίνουν αξιόπιστα φυσιολογική γήρανση από πραγματική απόκλιση, ώστε να υποστηρίζονται προγνωστικές στρατηγικές συντήρησης και στοχευμένες, over-the-air βελτιστοποιήσεις καλιμπράρισης χωρίς θυσίες στην κατανάλωση ή στη δυναμική του οχήματος. Η σύζευξη των παραπάνω με εξηλεκτρισμό και με καύσιμα σχεδιασμένης χημείας χαράσσει τον πιο ρεαλιστικό δρόμο χαμηλών εκπομπών στον πραγματικό κόσμο.

Συνοψίζοντας, το Euro 7 λειτουργεί ως πλαίσιο «απόδοσης σε εύρος» και όχι ως απλή συμμόρφωση σε σημείο. Η τεχνικά επιτυχημένη απάντηση συνίσταται στη συστημική συν-βελτιστοποίηση κινητήρα μετά επεξεργασίας θερμικής αρχιτεκτονικής ελέγχου, ενισχυμένη από εξηλεκτρισμό και ανάπτυξη αισθητήρων/αλγορίθμων δεύτερης γενιάς. Σε αυτό το υπόδειγμα, οι πλατφόρμες που συνδυάζουν γρήγορη αφύπνιση καταλυτών/φίλτρων, σταθερή απόδοση SCR / TWC / GPF / DPF υπό RDE, χαμηλά brake-PM μέσω αναγεννητικής πέδησης και ψηφιακά εργαλεία προγνωστικής διάγνωσης θα επιτύχουν όχι μόνο ρυθμιστική συμμόρφωση, αλλά και ανταγωνιστικό πλεονέκτημα σε κόστος κύκλου ζωής και αξιοπιστία στόλου. Για τα επόμενα βήματα, το βάρος μετατοπίζεται στην αξιοποίηση των δεδομένων πεδίου και στη συνεχή, τεκμηριωμένη βελτίωση: η συμμόρφωση παύει να είναι γεγονός πιστοποίησης και καθίσταται μόνιμη ιδιότητα του προϊόντος.

Βιβλιογραφία:

- ACEA. (2020). Euro emissions standards. European Automobile Manufacturers' Association.
- ACEA. (2022). Vehicles and air quality. European Automobile Manufacturers' Association.
- ACEA. (2023). ACEA position on Euro 7. European Automobile Manufacturers' Association.
- AVL. (n.d.). AVL M.O.V.E iS+ portable emissions measurement system. AVL List GmbH.
- Barbir, F. (2013). PEM fuel cells: Theory and practice (2nd ed.). Academic Press.
- Bari, S., & Esmaeil, M. M. (2010). Effect of hydrogen addition on diesel engine performance and emissions. International Journal of Hydrogen Energy, 35(20), 11301–11306.
- Bauer, C., & Verhelst, S. (2015). A hydrogen internal combustion engine for passenger cars. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 229(6), 697–715.
- Bosch. (2019). Diesel engine management systems. Robert Bosch GmbH.
- Bosch. (2020). Gasoline engine management systems. Robert Bosch GmbH.
- Council of the European Union. (2023). Proposal for a Regulation on type-approval requirements for motor vehicles and engines and on durability of batteries (Euro 7) – General approach.
- Council of the European Union. (2024). Regulation on Euro 7 emission standards.
- Dec, J. E. (2009). Advanced compression-ignition engines—Understanding the in-cylinder processes. Proceedings of the Combustion Institute, 32(2), 2727–2742.
- Edwards, R., Hass, H., Larivé, J. F., Lonza, L., Maas, H., & Rickeard, D. (2018). Well-to-wheels analysis of future automotive fuels. Joint Research Centre, European Commission.

- European Commission. (2016). Impact assessment on Euro 6/VI vehicle emissions.
- European Commission. (2019). The European Green Deal.
- European Commission. (2020). Impact assessment accompanying the proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on type-approval requirements for motor vehicles and engines and on durability of batteries (Euro 7). Publications Office of the European Union.
- European Commission. (2021). EU vehicle emission standards.
- European Commission. (2022). Proposal for a Regulation on Euro 7.
- European Environment Agency. (2020). Air quality in Europe — 2020 report.
- European Environment Agency. (2021). Air quality and health impacts.
- European Environment Agency. (2022). Air quality in Europe — 2022 report.
- European Parliament. (2020). Vehicle emissions and type-approval.
- Giechaskiel, B., et al. (2019). Particle number measurement in European vehicle legislation. SAE International Journal of Engines, 12(4), 245–259.
- Giechaskiel, B., et al. (2020). Evaluation of PN-PEMS for particle number measurements down to 10 nm. SAE Technical Paper 2020-01-2211.
- Heywood, J. B. (2018). Internal combustion engine fundamentals (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- ICCT. (2024). Euro 7 standards: Impacts, costs and challenges. International Council on Clean Transportation.
- IEA. (2021). Advanced biofuels. International Energy Agency.
- IEA. (2022). Global hydrogen review. International Energy Agency.
- ISO. (2019). ISO 14687: Hydrogen fuel quality — Product specification. International Organization for Standardization.
- Johnson, T. (2016). Review of diesel emissions and control. SAE International Journal of Engines, 9(2), 1258–1278.
- Johnson, T. (2019). Vehicular emissions in review. SAE International Journal of Engines, 12(1), 1–18.
- Joint Research Centre (JRC). (2018). Light-duty vehicle emissions under real driving conditions. European Commission.

- Joint Research Centre (JRC). (2021). Monitoring vehicle emissions with on-board monitoring. European Commission.
- Kalghatgi, G. (2018). Fuel/engine interactions. SAE International.
- Lefebvre, A. H., & McDonell, V. G. (2017). Atomization and sprays (2nd ed.). CRC Press.
- Mamakos, A., et al. (2018). Effects of fuel properties on particle number emissions. SAE Technical Paper 2018-01-0380.
- McGrane, J., & Douglas, R. (2021). Electrification of exhaust thermal management. SAE Technical Paper 2021-01-0531.
- Noehre, C., Andersson, Ö., Johansson, B., & Hultqvist, A. (2006). Characterization of partially premixed combustion. SAE Technical Paper 2006-01-3412.
- O'Hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W., & Prinz, F. B. (2016). Fuel cell fundamentals (3rd ed.). Wiley.
- Payri, F., et al. (2013). Diesel spray mixing and combustion processes. Progress in Energy and Combustion Science, 39(6), 677–718.
- Ricardo. (2021). Implications of Euro 7 for vehicle powertrains. Ricardo Energy & Environment.
- Staffell, I., et al. (2019). The role of hydrogen in the future energy system. Energy & Environmental Science, 12(2), 463–491.
- Stone, R. (2012). Introduction to internal combustion engines (4th ed.). Palgrave Macmillan.
- Toulson, E., et al. (2010). Turbulent jet ignition for spark-ignition engines. SAE Technical Paper 2010-01-2266.
- Twigg, M. (2011). Catalytic control of automotive emissions. Platinum Metals Review, 55(3), 165–171.
- UNECE GRPE. (2022). Informal documents on real driving emissions and particle number measurement.
- Verhelst, S., & Wallner, T. (2009). Hydrogen-fueled internal combustion engines. Progress in Energy and Combustion Science, 35(6), 490–527.
- WHO. (2018). Ambient air pollution and health. World Health Organization.

Παράρτημα Α: Λίστα Συντομογραφιών

- ACEA – Ευρωπαϊκή Ένωση Κατασκευαστών Αυτοκινήτων – European Automobile Manufacturers' Association
- ASC – Καταλύτης ολίσθησης αμμωνίας – Ammonia Slip Catalyst
- AdBlue – Υδατικό διάλυμα ουρίας για SCR – Aqueous Urea Solution (Urea–Water Solution)
- BEV – Αμιγώς ηλεκτρικό όχημα – Battery Electric Vehicle
- BMS – Σύστημα διαχείρισης μπαταρίας – Battery Management System
- BSFC – Ειδική κατανάλωση καυσίμου πέδησης – Brake Specific Fuel Consumption
- BoP – Υποσυστήματα υποστήριξης κυψέλης καυσίμου – Balance of Plant
- BtL – Βιομάζα σε υγρό καύσιμο – Biomass-to-Liquid
- CAI – Ελεγχόμενη αυτανάφλεξη – Controlled Auto-Ignition
- CI – Ανάφλεξη με συμπίεση – Compression Ignition
- CN – Κετανικός αριθμός – Cetane Number
- CO – Μονοξείδιο του άνθρακα – Carbon Monoxide
- COV_IMEP – Συντελεστής μεταβλητότητας ενδεικνυόμενης μέσης ενεργού πίεσης – Coefficient of Variation of IMEP
- CO_2 – Διοξείδιο του άνθρακα – Carbon Dioxide
- DC/DC – Μετατροπέας συνεχούς τάσης – DC-to-DC Converter
- DCT – Κιβώτιο διπλού συμπλέκτη – Dual Clutch Transmission
- DI – Άμεσος ψεκασμός – Direct Injection
- DLC – Επίστρωση άνθρακα τύπου διαμαντιού – Diamond-Like Carbon
- DME – Διμεθυλαιθέρας – Dimethyl Ether
- DOC – Οξειδωτικός καταλύτης ντίζελ – Diesel Oxidation Catalyst
- DPF – Φίλτρο σωματιδίων ντίζελ – Diesel Particulate Filter
- EGR – Ανακυκλοφορία καυσαερίων – Exhaust Gas Recirculation
- ECU – Ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου – Electronic Control Unit
- EEA – Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος – European Environment Agency
- EU – Ευρωπαϊκή Ένωση – European Union

- FC-HEV – Υβριδικό όχημα κυψέλης καυσίμου – Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle
- FCEV – Όχημα κυψέλης καυσίμου – Fuel Cell Electric Vehicle
- FCV – Όχημα κυψέλης καυσίμου – Fuel Cell Vehicle
- FT – Διεργασία Fischer–Tropsch – Fischer–Tropsch
- GCI – Βενζίνη με ανάφλεξη μέσω συμπίεσης – Gasoline Compression Ignition
- GDI – Άμεσος ψεκασμός βενζίνης – Gasoline Direct Injection
- GPF – Φίλτρο σωματιδίων βενζίνης – Gasoline Particulate Filter
- GRPE – Ομάδα Εργασίας UNECE για Ρύπανση & Ενέργεια – Working Party on Pollution and Energy (UNECE)
- H_2 – Υδρογόνο – Hydrogen
- HC – Υδρογονάνθρακες – Hydrocarbons
- HCCI – Ομοιογενές φορτίο με αυτανάφλεξη – Homogeneous Charge Compression Ignition
- HEFA – Υδρογονοεπεξεργασμένοι εστέρες και λιπαρά οξέα – Hydroprocessed Esters and Fatty Acids
- HEV – Υβριδικό ηλεκτρικό όχημα – Hybrid Electric Vehicle
- HIL – Δοκιμές υλικού-στο-βρόχο – Hardware-in-the-Loop
- HTHS – Υψηλή θερμοκρασία/υψηλή διάτμηση (ιξώδες) – High-Temperature High-Shear
- HVO – Υδρογονοκατεργασμένο φυτικό έλαιο – Hydrotreated Vegetable Oil
- ICCT – Διεθνές Συμβούλιο Καθαρών Μεταφορών – International Council on Clean Transportation
- IEA – Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας – International Energy Agency
- IMEP – Ενδεικνυόμενη μέση ενεργός πίεση – Indicated Mean Effective Pressure
- ISO – Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης – International Organization for Standardization
- JRC – Κοινό Κέντρο Ερευνών – Joint Research Centre
- LCA – Ανάλυση κύκλου ζωής – Life-Cycle Assessment

- LSPI – Προανάφλεξη χαμηλών στροφών – Low-Speed Pre-Ignition
- LTC – Καύση χαμηλής θερμοκρασίας – Low-Temperature Combustion
- MAW – Κινούμενο παράθυρο μέσου όρου – Moving Average Window
- MBT – Ελάχιστη προπορεία για μέγιστη ροπή – Minimum Advance for Best Torque
- MHEV – Ήπια υβριδικό ηλεκτρικό όχημα – Mild Hybrid Electric Vehicle
- N_2 – Άζωτο – Nitrogen
- N_2O – Υποξείδιο του αζώτου – Nitrous Oxide
- NH_3 – Αμμωνία – Ammonia
- NO – Μονοξείδιο του αζώτου – Nitric Oxide
- NO_2 – Διοξείδιο του αζώτου – Nitrogen Dioxide
- NOx – Οξείδια του αζώτου – Nitrogen Oxides
- OBD – Διαγνωστικό σύστημα επί του οχήματος – On-Board Diagnostics
- OBFCM – Παρακολούθηση κατανάλωσης καυσίμου/ενέργειας επί του οχήματος – On-Board Fuel/Energy Consumption Monitoring
- OBM – Επιτήρηση επί του οχήματος – On-Board Monitoring
- OEM – Κατασκευαστής πρωτότυπου εξοπλισμού – Original Equipment Manufacturer
- PEM – Μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων – Proton Exchange Membrane
- PEMFC – Κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων – Proton Exchange Membrane Fuel Cell
- PEMS – Φορητά συστήματα μέτρησης εκπομπών – Portable Emissions Measurement Systems
- PFI – Ψεκασμός στον αυλό εισαγωγής – Port Fuel Injection
- PHEV – Επαναφορτιζόμενο υβριδικό ηλεκτρικό όχημα – Plug-in Hybrid Electric Vehicle
- PM – Σωματιδιακή ύλη – Particulate Matter
- PM10 – Σωματίδια $\leq$ 10 μm – Particulate Matter $\leq$ 10 μm
- PM2.5 – Σωματίδια $\leq$ 2.5 μm – Particulate Matter $\leq$ 2.5 μm
- PN – Αριθμός σωματιδίων – Particle Number
- PN10 – Αριθμός σωματιδίων $\geq$ 10 nm – Particle Number $\geq$ 10 nm

- PN-PEMS – Φορητό σύστημα μέτρησης αριθμού σωματιδίων – Particle Number PEMS
- PtL – Ισχύς σε υγρό καύσιμο – Power-to-Liquid
- RCCI – CI ελεγχόμενης αντιδραστικότητας – Reactivity-Controlled Compression Ignition
- RDE – Πραγματικές εκπομπές οδήγησης – Real Driving Emissions
- RON – Αριθμός οκτανίου έρευνας – Research Octane Number
- SAE – Ένωση Μηχανικών Αυτοκινήτου – SAE International (Society of Automotive Engineers)
- SCR – Επιλεκτική καταλυτική αναγωγή – Selective Catalytic Reduction
- SCRF – SCR ενσωματωμένο σε φίλτρο – Selective Catalytic Reduction on Filter
- SI – Ανάφλεξη με σπινθήρα – Spark Ignition
- SI-GDI – SI με άμεσο ψεκασμό βενζίνης – Spark-Ignition Gasoline Direct Injection
- SIL – Δοκιμές λογισμικού-στο-βρόχο – Software-in-the-Loop
- SOC – Κατάσταση φόρτισης – State of Charge
- SOFC – Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου – Solid Oxide Fuel Cell
- SOH – Κατάσταση υγείας – State of Health
- SMD – Μέση διάμετρος Sauter – Sauter Mean Diameter
- TCO – Συνολικό κόστος ιδιοκτησίας – Total Cost of Ownership
- TDC – Άνω νεκρό σημείο – Top Dead Center
- TJI – Ανάφλεξη με στροβιλώδη πίδακα – Turbulent Jet Ignition
- TWC – Τριοδικός καταλύτης – Three-Way Catalyst
- UNECE – Οικονομική Επιτροπή του ΟΗΕ για την Ευρώπη – United Nations Economic Commission for Europe
- VGT – Υπερσυμπιεστής μεταβλητής γεωμετρίας – Variable Geometry Turbocharger
- VVL – Μεταβλητό βύθισμα βαλβίδων – Variable Valve Lift
- VVT – Μεταβλητός χρονισμός βαλβίδων – Variable Valve Timing
- WHO – Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας – World Health Organization

- WLTP – Παγκοσμίως εναρμονισμένη διαδικασία δοκιμών ελαφρών οχημάτων – World-harmonised Light Vehicles Test Procedure
- eCVT – Ηλεκτρονικά ελεγχόμενο συνεχώς μεταβαλλόμενο κιβώτιο – electronic Continuously Variable Transmission
- ΑΝΣ – Άνω Νεκρό Σημείο – Top Dead Center
- ΑΠΕ – Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας – Renewable Energy Sources
- ΜΕΚ – Μηχανή εσωτερικής καύσης – Internal Combustion Engine
- ΟΗΕ – Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών – United Nations

Παράρτημα Β: Λίστα Ξενόγλωσσων Όρων

- Backpressure – Πίεση αντίστασης στην εξαγωγή καυσαερίων που αυξάνει απώλειες άντλησης και επηρεάζει την απόδοση/αναγεννήσεις.
- Brake-PM – Σωματίδια από φθορά φρένων (μη-εξατμιστικές εκπομπές).
- Close-coupled (catalyst) – Τοποθέτηση καταλύτη πολύ κοντά στην πολλαπλή εξαγωγής για ταχύτερη "αφύπνιση".
- Downsizing – Μείωση κυβισμού με διατήρηση ισχύος μέσω υπερπλήρωσης/βελτιστοποίησης καύσης.
- Dual-fuel – Λειτουργία κινητήρα με δύο καύσιμα (π.χ. H_2–diesel).
- Eco-routing – Επιλογή διαδρομής με στόχο ελαχιστοποίηση κατανάλωσης/εκπομπών (με βάση δεδομένα κυκλοφορίας/κλίσης κ.λπ.).
- e-fuels – Συνθετικά καύσιμα παραγόμενα με "πράσινο" H_2 και CO_2 (διάδρομος χαμηλότερου αποτυπώματος κύκλου ζωής).
- Engine-off coasting – Κίνηση με προσωρινή απενεργοποίηση κινητήρα για μείωση κατανάλωσης/εκπομπών.
- Fischer–Tropsch – Διεργασία σύνθεσης υδρογονανθράκων από CO και H_2 (π.χ. συνθετικό diesel).
- Flooding – Υπερβολική συσσώρευση υγρού (π.χ. στην κάθοδο PEMFC) που περιορίζει τη μεταφορά μάζας και την απόδοση.
- Intake heating – Θέρμανση του αέρα (ή/και του μίγματος) στην εισαγωγή για βελτίωση ψυχρής εκκίνησης και υποστήριξη θερμικής διαχείρισης/μετά-επεξεργασίας

- Intake throttling – Στραγγαλισμός εισαγωγής (περιορισμός ροής αέρα) για θερμική/εκπομπική στρατηγική ή υποβοήθηση aftertreatment.
- Late-injection – Καθυστερημένη έγχυση καυσίμου (μεταγενέστερα στον κύκλο) για αύξηση ενθαλπίας καυσαερίων/υποβοήθηση aftertreatment.
- Light-off – Θερμοκρασία/στιγμή ενεργοποίησης αποτελεσματικής καταλυτικής δράσης.
- Machine learning – Μέθοδοι μάθησης από δεδομένα, εδώ για υποστήριξη επιτήρησης/βελτιστοποίησης στρατηγικών και διάγνωσης.
- Model-based control – Μοντελοβασισμένος έλεγχος: χρήση μαθηματικού μοντέλου για εκτίμηση κατάστασης (φόρτος φίλτρων, slip NH_3 κ.λπ.) και έλεγχο.
- Over-the-air updates – Απομακρυσμένες ενημερώσεις λογισμικού χωρίς φυσική πρόσβαση στο όχημα.
- Pay-as-you-drive / Pay-as-you-emit – Μοντέλα τιμολόγησης/ασφάλισης βάσει πραγματικής χρήσης ή/και εκπομπών.
- Post-injection – Μετεγχύσεις/δευτερεύουσες εγχύσεις μετά την κύρια καύση για αύξηση θερμοκρασίας καυσαερίων και αναγεννήσεις.
- Predictive shifting – Προγνωστικός έλεγχος αλλαγών σχέσεων κιβωτίου με χρήση δεδομένων διαδρομής/οδήγησης για βελτιστοποίηση BSFC/εκπομπών.
- Range extender – Θερμική μονάδα που λειτουργεί ως επαυξητής αυτονομίας σε εξηλεκτρισμένη πλατφόρμα.
- Rate shaping – Διαμόρφωση ρυθμού έγχυσης (pilot–main–post) για έλεγχο θορύβου, NOx και αιθάλης.
- Scavenging – "Σάρωση" κυλίνδρου: ανανέωση φορτίου/απομάκρυνση καυσαερίων, κρίσιμη για απόδοση/απώλειες άντλησης.
- Stop-and-go – Αστική οδήγηση με συχνές στάσεις/εκκινήσεις
- Swirl – Στροβιλισμός ροής στον κύλινδρο γύρω από τον άξονά του, που επηρεάζει ανάμειξη/καύση.
- Tumble – Στροβιλισμός τύπου "ανακύκλωσης" (κάθετη κυκλοφορία) στον κύλινδρο που ενισχύει ανάμειξη/ταχύτητα φλόγας.

εργα

- Wall-wetting – Εναπόθεση καυσίμου στα τοιχώματα (ειδικά σε GDI), που αυξάνει PN/HC και επιβαρύνει την ψυχρή φάση.
- Washcoat – Πορώδες καταλυτικό επίστρωμα στο υπόστρωμα καταλύτη/φίλτρου (φορέας ενεργών υλικών), κρίσιμο για δραστικότητα/γήρανση.
- Well-to-wheel – Αξιολόγηση εκπομπών/ενέργειας από την πηγή παραγωγής έως τον τροχό (κύκλος ζωής χρήσης).