

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

« Το μέλλον των κινητήρων εσωτερικής καύσης »



Σπουδαστής: Λαμπρόπουλος Φίλιππος ΑΜ:7081

Επιβλέπων καθηγητής: Μαυρίδης Κωνσταντίνος

Πάτρα 2021-2022

Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και αναφέρεται ως «Το μέλλον των κινητήρων εσωτερικής καύσης».

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Μαυρίδη Κωνσταντίνο για την παρούσα πτυχιακή εργασία. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουν επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο σπουδαστής

.....

.....

(Υπογραφή)

Περίληψη

Σύμφωνα με αρκετές μελέτες, ο παλινδρομικός κινητήρας εσωτερικής καύσης (ICE) θα συνεχίσει να χρησιμοποιείται ευρέως σε όλους τους τομείς στο μέλλον στις μεταφορές (ξηρά, θάλασσα και ουρανός), όσο και στη βιομηχανία και την παραγωγή ενέργειας. Παρά τη σημαντική ηλεκτροκίνηση αρκετών νέων κινητήρων σε σχέση με τους κλασσικούς κινητήρες ICE στις χερσαίες μεταφορές (τομέας με τη μεγαλύτερη διείσδυση του ηλεκτρισμού), ο θερμικός κινητήρας θα παραμείνει ένας από τους κύριους κινητήρες. Στην πραγματικότητα, η πλειοψηφία των σεναρίων που έχουν ερευνηθεί θεωρούν ότι διάφοροι τύποι κινητήρων που χρησιμοποιούν υγρά, ή αέρια καύσιμα με βάση τον άνθρακα θα εξακολουθούν να καλύπτουν έως και το 80% του παγκόσμιου στόλου ακόμη και το 2050 (ακόμη και αν το μεγαλύτερο μέρος αυτών των κινητήρων σίγουρα θα υβριδοποιηθεί και θα υπάρξει ένα μερικώς ηλεκτρικό κομμάτι). Επομένως, οι επόμενοι ICE, θα πρέπει να συνεχίσουν να σχεδιάζονται σύμφωνα με το εκάστοτε πεδίο εφαρμογής και να συμμορφώνονται με τους περιορισμούς των ρύπων, καθώς και τα επίπεδα εκπομπών CO₂ διατηρώντας, ή αυξάνοντας την απόδοσή τους.

Λέξεις κλειδιά: Κινητήρας εσωτερικής καύσης, μέλλον

Abstract

According to numerous assessments, the reciprocating internal combustion engine (ICE) will continue to be widely utilized in all areas of transportation (land, sea, and air), manufacturing, and energy generation in the future. Despite the substantial electrification of numerous new motors in comparison to traditional ICE motors in land transportation (the area with the highest electricity penetration), the thermal motor will continue to be one of the most common motors. In reality, according to the majority of the scenarios examined, several types of engines utilizing liquid or carbon-based gaseous fuels would continue to achieve up to 80% of the worldwide objective by 2050 (even if most of them will surely hybridize and include a partly electric component). As a result, future ICEs should continue to be constructed in accordance with the specified scope, meet with pollution restrictions, and enhance CO₂ emissions by maintaining or improving their efficiency.

Keywords: Internal combustion engine, future

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 14 -
1.1 ΤΕΧΝΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	- 14 -
1.1.1 Αριθμός οκτανίων.....	- 14 -
1.2 ΓΕΝΙΚΑ	- 15 -
1.3 ΙΣΤΟΡΙΚΟ	- 18 -
1.4 ΚΥΚΛΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ	- 20 -
1.4.1 Κινητήρας ανάφλεξης με σπινθήρα	- 21 -
1.4.2 Μηχανή ανάφλεξης με συμπίεση	- 22 -
1.4.3 Δίχρονος κύκλος	- 23 -
1.5 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ	- 24 -
1.5.1 Διάταξη βαλβίδων εισαγωγής και εξαγωγής (εξάτμισης)	- 25 -
1.5.2 Υπερσυμπιεστές και στροβιλοσυμπιεστές	- 26 -
1.5.3 Εγχυτήρες καυσίμου και καρμπυρατέρ	- 27 -
1.5.4 Συστήματα ψύξης.....	- 27 -
1.6 ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	- 29 -
1.7 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΙΣΧΥΟΣ	- 30 -
1.7.1 Ηλεκτρικοί κινητήρες.....	- 30 -
1.7.2 Κυψέλες καυσίμου	- 32 -
1.7.3 Κινητήρες αεριοστροβίλων	- 32 -
1.8 ΒΙΟΑΕΡΙΟ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ	- 33 -
1.8.1 Εμπόδια για την προσαρμογή του βιοαερίου στα οδικά οχήματα-	36 -
2. ΈΡΕΥΝΑ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ	- 39 -
2.1 ΓΕΝΙΚΑ	- 39 -
2.2 ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΜΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΠΙΔΑΚΑ	- 40 -
2.3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΕΜΒΟΛΟΥ ΓΙΑ ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	- 43 -
2.4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΙΑ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΒΕΝΖΙΝΗΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ	- 46 -

2.5	ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΤΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	- 48 -
2.6	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΔΙΑΣΤΟΛΕΑ ΩΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΕΝΑ ΣΥΓΧΡΟΝΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ WANKEL	- 49 -
2.7	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΗΣ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΓΕΝΙΑΣ ΤΗΣ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑΣ «ΝΕΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ».....	- 52 -
2.8	ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΥΚΑΙΡΙΕΣ ΤΗΣ ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗΣ ΑΛΥΣΙΔΑΣ.....	- 56 -
3.	ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	- 58 -
3.1	ΚΑΤΑΛΥΤΗΣ ΓΙΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΒΑΡΕΩΣ ΤΥΠΟΥ CNG	- 58 -
3.2	ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΟΥ EURO 7 ΣΤΗΝ ΑΛΥΣΙΔΑ ΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ	- 61 -
3.2.1	Κανονισμοί παγκόσμιων εκπομπών	- 62 -
3.2.2	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ	- 64 -
3.2.3	Βενζίνη.....	- 64 -
3.2.4	Πετρέλαιο.....	- 64 -
3.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΕ ΒΑΡΕΩΣ ΤΥΠΟΥ ΝΤΙΖΕΛ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΙ ΈΛΕΓΧΟ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ	- 65 -
4.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	- 69 -
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	- 72 -

Συντομογραφίες

- AIML: Αρχιτεκτονική ανεξάρτητης μοντελοποίησης
- BEV: Ηλεκτρικά αυτοκίνητα μπαταρίας
- CAFE: Πρότυπο Federal Corporate Average Fuel Fuel
- CFR: Μονοκύλινδρος δοκιμαστικός κινητήρας
- CSSR: Λειτουργία καθυστέρησης του σπινθήρα στην ψυχρή εκκίνηση
- DHE: Αποκλειστικοί υβριδικοί κινητήρες
- DHT: Υβριδικό κιβώτιο ταχυτήτων
- DI: Άμεσος ψεκασμός
- DOC: Καταλύτης οξειδωσης
- DPF: Φίλτρο σωματιδίων ντίζελ
- ECM: Μονάδα ελέγχου κινητήρα
- EGR: Ανακυκλοφορία των καυσαερίων
- EGT: Θερμοκρασία των καυσαερίων
- EIVC: Πρόωρο κλείσιμο των βαλβίδων εισόδου
- EV: Ηλεκτρικά οχήματα
- FCM: Μονάδα ελέγχου ροής
- FPE: Κινητήρας ελεύθερου εμβόλου
- FPEG: Κινητήρας ελεύθερης γεννήτριας εμβόλου
- FVOP: Μεταβλητή αντλία λαδιού
- GHG: Αέρια του θερμοκηπίου
- GHG: Αέρια του θερμοκηπίου
- GPF: Φίλτρο σωματιδίων βενζίνης

HCCI: Ομοιογενής ανάφλεξη με συμπίεση φορτίου

HD: Βαρέως τύπου οχήματα

HEV: Υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα

ICE: Κινητήρας εσωτερικής καύσης

IDI: Έμμεσος ψεκασμός

IEM: Ενσωματωμένη πολλαπλή εξαγωγή

IMEP: Μέση αποτελεσματική πίεση

IVC: Κλείσιμο των βαλβίδων εισαγωγής

LINC: Κλείσιμο των βαλβίδων εισόδου

MON: Αριθμός οκτανίων κινητήρα

MSW: Αστικά στερεά απόβλητα

NIE: Καθαρή αναφερόμενη απόδοση

PCCI: Προαναμεμειγμένη ανάφλεξη συμπίεσης φορτίου

PCJ: Ψεκαστήρες εμβόλου

PEM: Μembrάνη πολυμερών-ηλεκτρολυτών

PFI: Ψεκασμός καυσίμου θύρας

PN: Εκπομπές ρύπων

PPC: Μερικώς προαναμεμειγμένο φορτίο

RDE: Πραγματικές εκπομπές οδήγησης

RON: Αριθμός οκτανίων έρευνας

SCR: Σύστημα εκλεκτικής καταλυτικής αναγωγής

SI: Κινητήρας ανάφλεξης με σπινθήρα

SoC: Κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας

SOI: Έναρξη της έγχυσης

TRE: Παραδοσιακός παλινδρομικός κινητήρας

TWC: Καταλυτικός μετατροπέας τριών οδών

VGT: Τουρμπίνα μεταβλητής γεωμετρίας

E&A: Έρευνα και ανάπτυξη

OEM: Επίσημος κατασκευαστής ανταλλακτικών

Λίστα σχημάτων

Σχήμα 1.1: Πιστόνι [2]	- 16 -
Σχήμα 1.2: Κινητήρας αυτοκινήτου [4]	- 17 -
Σχήμα 1.3: Θαλάσσιος κινητήρας [5]	- 18 -
Σχήμα 1.4: Τετράχρονος κινητήρας ανάφλεξης με σπινθήρα	- 21 -
Σχήμα 1.5: Διάφορες γεωμετρίες κυλίνδρων-πιστονιών [8]	- 25 -
Σχήμα 1.6: Υπερσυμπιεστής [10]	- 26 -
Σχήμα 1.7: Σύστημα ψύξης υγρού [11]	- 28 -
Σχήμα 1.8: Ψύξη με αέρα ενός μοντέλου κινητήρα αεροσκάφους [12]	- 29 -
Σχήμα 2.1: Μοντέλο που δείχνει μερικώς το συγκρότημα προθαλάμου σε κυλινδροκεφαλή [20]	- 42 -
Σχήμα 2.2: Μοντέλο που δείχνει μερικώς το συγκρότημα προθαλάμου σε κυλινδροκεφαλή [20]	- 43 -
Σχήμα 2.3:Κινητήρας FPEG [21]	- 44 -
Σχήμα 2.4: Υβριδικό κιβώτιο ταχυτήτων (DHT) [29]	- 46 -
Σχήμα 2.5: Σχήματα των τροχοειδών διαμορφώσεων 3:2 και 2:1 που δείχνουν την ακτίνα R και την εκκεντρικότητα του άξονα e [35]	- 50 -
Σχήμα 3.1: Κινητήρας Scania G340 με χρήση αερίου [38]	- 59 -
Σχήμα 3.2: Καταλυτικός μετατροπέας τριών οδών (TWC) [42]	- 60 -

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο συζητούνται γενικά θέματα που αντικατοπτρίζουν τους κινητήρες εσωτερικής καύσης, όπως τις μηχανικές παραμέτρους (θερμική απόδοση, μέση αποτελεσματική πίεση, ειδική κατανάλωση καυσίμου) που χρησιμοποιούνται για το χαρακτηρισμό της γενικής απόδοσης των κινητήρων εσωτερικής καύσης. Καλύπτονται επίσης κάποιοι κύριοι κύκλοι των κινητήρων, διαμορφώσεις και γεωμετρίες.

1.1 ΤΕΧΝΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Σε αυτό το υποκεφάλαιο αναφέρονται κάποια από τα σημαντικότερα τεχνικά θέματα για την πλήρη κατανόηση των επόμενων υποκεφαλαίων και κεφαλαίων.

1.1.1 Αριθμός οκτανίων

Ο αριθμός των οκτανίων είναι ένα μέτρο της αντίστασης του καυσίμου στην αυτόματη ανάφλεξη. Οι βενζινοκινητήρες που λειτουργούν με σπινθήρα χρειάζονται κάποιο υψηλό καύσιμο οκτανίου για να αποφύγουν το χτύπημα σε αντίθεση με τους κινητήρες ντίζελ που βασίζονται στην αυτόματη ανάφλεξη και έτσι απαιτούν καύσιμο χαμηλού οκτανίου (ή υψηλού αριθμού κετανίου). Ο αριθμός των οκτανίων ενός καυσίμου μετριέται σε μια ειδική μηχανή δοκιμής γνωστή ως κινητήρας CFR που είναι ένας μονοκύλινδρος δοκιμαστικός κινητήρας με μεταβλητό λόγο συμπίεσης που χρονολογείται από το 1928. Παρόλο που η δοκιμή βελτιώνεται προοδευτικά με τα χρόνια, η βασική διαμόρφωση για τη δοκιμή του κινητήρα, καθώς και οι συνθήκες παραμένουν οι ίδιες. Οι δοκιμές στις αρχές της δεκαετίας του 1930 έδειξαν ότι η συμπεριφορά των καυσίμων στα οχήματα εκείνης της εποχής δεν σχετίζεται με το μετρημένο αριθμό Οκτανίου Έρευνας, επομένως αναπτύχθηκε ένας νέος, πιο αυστηρός, αριθμός Οκτανίου Κινητήρα. Τόσο η μία, όσο και η άλλη μέθοδος εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα.

Ο αριθμός οκτανίων έρευνας (RON) μετριέται σε ταχύτητα 600 σ.α.λ. με καθορισμένη θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής ίση με 52 °C και παραδοσιακά συνδέεται με ήπιες έως και μέτριες συνθήκες οδήγησης.

Ο αριθμός οκτανίου κινητήρα (MON) εισήχθη για να προσομοιώσει πιο σοβαρές συνθήκες υψηλότερου φορτίου και χρησιμοποιεί υψηλότερες στροφές του κινητήρα ίσες με 900 σ.α.λ. και ρυθμιζόμενη θερμοκρασία φόρτισης στους 149 °C. Το MON ενός καυσίμου είναι τυπικά περίπου 10 αριθμούς χαμηλότερο από το RON λόγω των πιο σοβαρών συνθηκών δοκιμής, αν και η διαφορά μεταξύ RON και MON ποικίλλει ανάλογα με τη σύνθεση του καυσίμου.

Ο αριθμός των οκτανίων ενός καυσίμου καθορίζεται συγκρίνοντας την απόδοσή του στον κινητήρα με ένα μείγμα καθαρών ενώσεων ισο-οκτανίου, που ορίζεται ως 100 οκτάνια και ν-επτανίου, με μηδενικό αριθμό οκτανίων. Αν και οι συνθήκες δοκιμής του κινητήρα, ειδικά οι στροφές του κινητήρα, μοιάζουν πολύ διαφορετικές από τις σημερινές μηχανές, ο αριθμός των οκτανίων έχει αποδειχθεί πολύτιμος δείκτης της ποιότητας του καυσίμου μέχρι σήμερα. Η απαίτηση των οκτανίων ακόμη και των πιο προηγμένων οχημάτων μπορεί να

περιγραφεί ως συνάρτηση του RON και του MON. Οι προδιαγραφές του καυσίμου συνήθως καθορίζουν τις ελάχιστες απαιτήσεις τόσο για το RON όσο και για το MON. Στα περισσότερα μέρη του κόσμου, το RON είναι το κύριο μέτρο οκτανίου της βενζίνης στο σημείο πώλησης. Στις ΗΠΑ, τον Καναδά και σε ορισμένες άλλες χώρες, χρησιμοποιείται διαφορετικό σύστημα όπου το μέτρο των οκτανίων που εμφανίζεται στο σημείο πώλησης είναι ο δείκτης Anti-Knock, ο οποίος ορίζεται ως $(RON+MON)/2$.

Ο τρόπος απόκρισης ενός μεμονωμένου οδικού οχήματος στον αριθμό των οκτανίων εξαρτάται από τις λεπτομέρειες του σχεδιασμού και της βαθμονόμησης του κινητήρα του. Η «απαίτηση των οκτανίων» ενός οχήματος παραδοσιακά προσδιορίζεται με δοκιμές σε συνθήκες πλήρους φορτίου επί των συνθηκών επιτάχυνσης, ή σταθερής ταχύτητας, είτε στο δρόμο, είτε στο δυναμόμετρο του πλαισίου. Λειτουργώντας με μια σειρά από ειδικά αναμειγμένα καύσιμα δοκιμής με προοδευτικά μεταβαλλόμενο αριθμό οκτανίων, μπορεί να προσδιοριστεί ο χαμηλότερος αριθμός οκτανίων που θα κινείται στο όχημα χωρίς χτύπημα.

Στο παρελθόν, δοκιμάστηκε ένας μεγάλος αριθμός οχημάτων σε προγράμματα συνεργατικής βιομηχανίας στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ για να δημιουργηθεί μια εικόνα του στόλου των οδικών οχημάτων, έτσι ώστε ο αριθμός των οκτανίων των καυσίμων που πωλήθηκαν να ταιριάζει με τις ανάγκες του στόλου των οχημάτων. Πλέον, οι αριθμοί των οκτανίων καθορίζονται καθαρά από τις προδιαγραφές του καυσίμου και τα οχήματα έχουν αναπτυχθεί για να λειτουργούν σύμφωνα με αυτούς. Ωστόσο, ένας αυξανόμενος όγκος των δεδομένων των δοκιμών των οχημάτων δείχνει πως η άποψη ότι το RON συσχετίζεται με ήπιες συνθήκες λειτουργίας και το MON με πιο σοβαρή οδήγηση δεν ισχύει πλέον ιδιαίτερα σε ενισχυμένους μειωμένους κινητήρες που μπορεί να είναι αντιπροσωπευτικοί των μελλοντικών οχημάτων.

1.2 ΓΕΝΙΚΑ

Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης εφευρέθηκε και αναπτύχθηκε με επιτυχία στα τέλη της δεκαετίας του 1860. Θεωρείται μία από τις σημαντικότερες εφευρέσεις του περασμένου αιώνα και είχε σημαντικό αντίκτυπο στην κοινωνία, ιδιαίτερα στην κινητικότητα των ανθρώπων. Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης αποτέλεσε το θεμέλιο για την επιτυχή ανάπτυξη πολλών εμπορικών τεχνολογιών. Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης έχει μεταμορφώσει τη βιομηχανία των μεταφορών, επιτρέποντας την εφεύρεση και τη βελτίωση των αυτοκινήτων, των φορτηγών, των αεροπλάνων και των τρένων. Η υιοθέτηση και η συνεχής χρήση του κινητήρα εσωτερικής καύσης σε διαφορετικούς τομείς εφαρμογής έχει ως αποτέλεσμα το σχετικά χαμηλό κόστος, την ευνοϊκή σχέση ισχύος ως προς το βάρος, την υψηλή απόδοση και τα σχετικά απλά και στιβαρά χαρακτηριστικά λειτουργίας [1].

Ένας κινητήρας εσωτερικής καύσης είναι ένας κινητήρας στον οποίο η χημική ενέργεια του καυσίμου απελευθερώνεται μέσα στον κινητήρα και χρησιμοποιείται απευθείας για μηχανική εργασία, σε αντίθεση με έναν κινητήρα εξωτερικής καύσης στον οποίο χρησιμοποιείται ξεχωριστός καυστήρας για την καύση του καυσίμου. Η παλινδρομική γεωμετρία εμβόλου-κυλίνδρου είναι η κύρια γεωμετρία που έχει χρησιμοποιηθεί σε κινητήρες εσωτερικής καύσης και φαίνεται στο Σχήμα 1.1: Πιστόνι



Σχήμα 1.1: Πιστόνι [2]

Ένα έμβολο ταλαντεύεται μπροστά-πίσω σε κυκλικό μοτίβο σε έναν κύλινδρο, μεταδίδοντας ισχύ σε έναν κινητήριο άξονα μέσω μίας ράβδου σύνδεσης και ενός μηχανισμού στροφαλοφόρου άξονα. Βαλβίδες ή θυρίδες χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ροής του αερίου μέσα και έξω από τον κινητήρα. Αυτή η διαμόρφωση ενός παλινδρομικού κινητήρα εσωτερικής καύσης, με μπλοκ κινητήρα, έμβολα, βαλβίδες, στροφαλοφόρο άξονα και μπιέλα, παρέμεινε ουσιαστικά αμετάβλητη από τα τέλη του 1800.

Οι κύριες διαφορές μεταξύ ενός σύγχρονου κινητήρα και ενός που κατασκευάστηκε πριν από 100 χρόνια μπορούν να γίνουν αντιληπτές συγκρίνοντας την αξιοπιστία, τη θερμική απόδοση και το επίπεδο των εκπομπών. Για πολλά χρόνια, η έρευνα των κινητήρων εσωτερικής καύσης είχε ως στόχο τη βελτίωση της θερμικής απόδοσης και τη μείωση του θορύβου και των κραδασμών. Κατά συνέπεια, η θερμική απόδοση αυξήθηκε από περίπου 10-20% στις αρχές του εικοστού αιώνα σε τιμές έως και 50% σήμερα. Ομοίως, η ισχύς ανά μονάδα όγκου έχει αυξηθεί από περίπου 0,5 kW/L σε 50-100 kW/L.

Η απόδοση του κινητήρα εσωτερικής καύσης συνεχίζει να αυξάνεται, λόγω της νομοθεσίας και της ανάγκης μείωσης του λειτουργικού κόστους. Το βασικό πρότυπο χιλιομετρικής απόστασης των ΗΠΑ είναι το πρότυπο Federal Corporate Average Fuel (CAFE). Το πρότυπο CAFE για επιβατικά οχήματα και ελαφρά φορτηγά ήταν 27,5 μίλια ανά γαλόνι (mpg) για 20 χρόνια από το 1990 έως το 2010. Τα πρότυπα CAFE έχουν αυξηθεί τα τελευταία χρόνια και αναμένεται να διπλασιαστούν τα επόμενα δεκαετία. Αυτή η αύξηση των απαιτήσεων για τα χιλιόμετρα του οχήματος θα απαιτήσει εκτεταμένη χρήση τεχνικών όπως ηλεκτρονικό έλεγχο, μείωση του κινητήρα, υπερσυμπίεση, υπερφόρτιση, μεταβλητό χρόνο βαλβίδων, καύση χαμηλής θερμοκρασίας και ηλεκτροκινητήρες και κιβώτια ταχυτήτων [3].

Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης έχουν γίνει η κυρίαρχη τεχνολογία πρωτογενούς κίνησης σε πολλούς τομείς. Το 1900, τα περισσότερα αυτοκίνητα ήταν ατμού ή ηλεκτρικά, αλλά μέχρι το 1920 τα περισσότερα αυτοκίνητα κινούνταν από βενζινοκινητήρες. Από το έτος 2020, μόνο στις Ηνωμένες Πολιτείες υπάρχουν περίπου 220 εκατομμύρια μηχανοκίνητα οχήματα που κινούνται με κινητήρες εσωτερικής καύσης, με περίπου 12 εκατομμύρια νέα οχήματα να κατασκευάζονται κάθε χρόνο.

Το 1900, οι ατμομηχανές χρησιμοποιήθηκαν για την τροφοδοσία πλοίων και σιδηροδρομικών μηχανών. Σήμερα χρησιμοποιούνται δίχρονοι και τετράχρονοι κινητήρες πετρελαίου. Πριν από το 1950, τα αεροσκάφη βασίζονταν σχεδόν αποκλειστικά σε εμβολοφόρους κινητήρες. Σήμερα, οι αεριοστρόβιλοι είναι η μονάδα παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιείται σε μεγάλα αεροπλάνα και οι εμβολοφόροι κινητήρες εξακολουθούν να κυριαρχούν στην αγορά σε μικρά αεροπλάνα.

Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί για να αποδίδουν ισχύ από 0,01 kW έως 20×10^3 kW, ανάλογα με τον κυβισμό τους. Ανταγωνίζονται στην αγορά με ηλεκτροκινητήρες, ανεμογεννήτριες και ατμομηχανές. Οι κύριες εφαρμογές τους είναι για τα οχήματα (Σχήμα 1.2: Κινητήρας αυτοκινήτου), τα τρένα, τα θαλάσσια οχήματα (Σχήμα 1.3: Θαλάσσιος κινητήρας), τα αεροσκάφη, αλλά και για τις οικιακές χρήσεις. Η συντριπτική πλειοψηφία των κινητήρων εσωτερικής καύσης παράγονται για εφαρμογές οχημάτων, απαιτώντας ισχύ εξόδου περίπου κατά μέσο όρο 100 kW.

Από το 1970, με την αναγνώριση της σημασίας των περιβαλλοντικών θεμάτων, όπως ο αντίκτυπος της ποιότητας του αέρα στην υγεία, έχει καταβληθεί μεγάλη προσπάθεια για τη μείωση των διαφόρων εκπομπών από τους κινητήρες. Τα επίπεδα εκπομπών των σημερινών κινητήρων εσωτερικής καύσης έχουν μειωθεί στο 5% περίπου των επιπέδων εκπομπών σε σχέση με πριν από 40 χρόνια.

Επί του παρόντος, η ικανοποίηση των απαιτήσεων των εκπομπών είναι ένας από τους κύριους παράγοντες στο σχεδιασμό και τη λειτουργία των κινητήρων εσωτερικής καύσης. Οι κυριότερες εκπομπές από κινητήρες εσωτερικής καύσης περιλαμβάνουν οξείδια του αζώτου (NO_x), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), υδρογονάνθρακες (HC), σωματίδια (PM) και αλδεΐδες. Αυτά τα προϊόντα καύσης αποτελούν σημαντική πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης, καθώς ο κινητήρας εσωτερικής καύσης είναι σήμερα η πηγή περίπου των μισών ρύπων NO_x, CO και HC στο περιβάλλον.



Σχήμα 1.2: Κινητήρας αυτοκινήτου [4]



Σχήμα 1.3: Θαλάσσιος κινητήρας [5]

Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), ενός πρωτογενούς προϊόντος καύσης των κινητήρων εσωτερικής καύσης με υδρογονάνθρακες είναι πλέον ρυθμιζόμενες, καθώς το CO_2 , είναι ο κυρίαρχος παράγοντας στην κλιματική αλλαγή. Υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για καύσιμα χωρίς άνθρακα για κινητήρες εσωτερικής καύσης, δηλαδή υδρογόνο και αμμωνία.

1.3 ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

Σε αυτήν την ενότητα αναφέρονται μερικά από τα κύρια στοιχεία της εφεύρεσης και της ανάπτυξης του κινητήρα εσωτερικής καύσης. Η εφευρετικότητα και η δημιουργικότητα που επέδειξαν οι πρώτοι μηχανικοί στην παραγωγή αυτών των επιτυχημένων εφευρέσεων αποτελούν έμπνευση για τους σημερινούς σχεδιαστές των κινητήρων. Το 1858, ο J. Lenior (1822–1900), Βέλγος μηχανικός, ανέπτυξε ένα δίχρονο κινητήρα που είχε 6 ίππους με απόδοση περίπου 5%. Κατά τη διάρκεια της διαδρομής εισαγωγής, ένα μίγμα αερίου-αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση ανασύρθηκε στον κινητήρα και αναφλέχθηκε από έναν σπινθήρα, προκαλώντας αύξηση της πίεσης του κυλίνδρου κατά το τελευταίο μισό της διαδρομής, παράγοντας έργο. Η διαδρομή επιστροφής χρησιμοποιήθηκε για την αφαίρεση των προϊόντων καύσης μέσω της βαλβίδας εξαγωγής. Ο κινητήρας Lenior χρησιμοποιήθηκε κυρίως σε σταθερές εφαρμογές ισχύος.

Το 1872, ο George Brayton (1830-1892), ένας Αμερικανός μηχανικός, κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας και εμπορευματοποίησε έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης σταθερής πίεσης, τον «Brayton's Ready Engine». Ο κινητήρας χρησιμοποίησε δύο παλινδρομικούς κυλίνδρους με έμβολο, έναν κύλινδρο συμπίεσης και έναν κύλινδρο διαστολής. Αυτός ο

κύκλος ονομάστηκε επίσης κύκλος φλόγας, καθώς η ανάφλεξη του μίγματος αερίου-αέρα έγινε με πιλοτική φλόγα και το μίγμα αναφλέχθηκε και κίνησε σε σταθερή πίεση, καθώς αντλήθηκε από τον κύλινδρο συμπίεσης στον κύλινδρο διαστολής. Ο εμβολοφόρος κινητήρας Brayton χρησιμοποιήθηκε στο πρώτο αυτοκίνητο το 1878. Ο κύκλος Brayton είναι ο θερμοδυναμικός κύκλος που χρησιμοποιείται τώρα από τους αεριοστρόβιλους, οι οποίοι χρησιμοποιούν περιστρεφόμενες λεπίδες ανεμιστήρα για να συμπιέσουν και να επεκτείνουν το αέριο που ρέει μέσω του στροβίλου.

Ο Nikolaus Otto (1832–1891), Γερμανός μηχανικός, ανέπτυξε το «Otto Silent Engine», τον πρώτο πρακτικό τετράχρονο κινητήρα με συμπίεση στον κύλινδρο, το 1876. Με λόγο συμπίεσης 2,5, ο κινητήρας αερίου απέδιδε 2 ίππους στις 160 σ.α.λ. και είχε απόδοση πέδησης 14%. Ο Nikolaus Otto θεωρείται ο εφευρέτης του σύγχρονου κινητήρα εσωτερικής καύσης και ο ιδρυτής της βιομηχανίας των κινητήρων εσωτερικής καύσης. Η έννοια ενός τετράχρονου κινητήρα είχε σχεδιαστεί και κατοχυρωθεί με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον A. de Rochas το 1861, ωστόσο ο Otto αναγνωρίζεται ως ο πρώτος άνθρωπος που κατασκεύασε και εμπορευματοποίησε μια μηχανή ανάφλεξης με φλόγα που παράγει έργο. Ο Otto δεν είχε σπουδάσει σε κάποια επίσημη σχολή μηχανικής, αλλά ήταν αυτοδίδακτος. Αφιέρωσε ολόκληρη την καριέρα του στην πρόοδο του κινητήρα εσωτερικής καύσης. Το 1872, ίδρυσε την πρώτη εταιρεία κατασκευής κινητήρων καύσης, NA Otto και Cie, και προσέλαβε τους Gottlieb Daimler και Wilhelm Maybach, οι οποίοι θα ξεκινήσουν έπειτα την πρώτη αυτοκινητοβιομηχανία, την Daimler Motor Company, το 1890. Ο γιος του Otto, Gustav ίδρυσε την αυτοκινητοβιομηχανία που είναι πλέον γνωστή ως BMW.

Ο πρώτος πρακτικός δίχρονος κινητήρας εφευρέθηκε και κατασκευάστηκε από τον Sir Dugald Clerk (1854-1932), Σκωτσέζο μηχανολόγο μηχανικό, το 1878. Ο Clerk αποφοίτησε από το Yorkshire College το 1876 και κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το δίχρονο κινητήρα του το 1881. Είναι καλά γνωστός για τη μακροχρόνια συνεισφορά του στη βελτίωση των διαδικασιών καύσης σε δίχρονους κινητήρες. Ο κινητήρας του Clerk ήταν κατασκευασμένος από δύο κυλίνδρους, όπου ο ένας κύλινδρος χρησιμοποιούνταν για την παραγωγή ισχύος και ο άλλος κύλινδρος άντλησης για συμπίεση και μεταφορά του μίγματος αέρα εισαγωγής και καυσίμου στον κύλινδρο εργασίας. Οι βαλβίδες χρησιμοποιήθηκαν για τη ροή της εισαγωγής. Επίσης μια θύρα του κυλίνδρου που καλυπτόταν από το έμβολο κατά τη διαδρομή της διαστολής χρησιμοποιήθηκε για να εξάγει τα αέρια της καύσης.

Πολλοί από αυτούς τους κινητήρες πρώτης εσωτερικής καύσης, όπως οι κινητήρες Lenior, Brayton και Otto, τροφοδοτούνταν από αέριο άνθρακα, ένα μείγμα μεθανίου, υδρογόνου, μονοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων που παράγονται από τη μερική πυρόλυση του άνθρακα. Στη δεκαετία του 1880, τα διυλιστήρια αργού πετρελαίου άρχισαν να παράγουν βενζίνη και κηροζίνη σε ποσότητες επαρκείς για να δημιουργήσουν μια αγορά για κινητήρες εσωτερικής καύσης με υγρά καύσιμα.

Ο Gottlieb Daimler (1834-1900), Γερμανός μηχανικός, αναγνωρίζεται ως ένας από τους ιδρυτές της αυτοκινητοβιομηχανίας. Ανέπτυξε έναν τετράχρονο κινητήρα υψηλής ταχύτητας, υδρόψυκτο το 1883. Ο κινητήρας είχε διάμετρο 70 mm και διαδρομή 100 mm και απέδιδε περίπου 1 ίππο στις 650 σ.α.λ. Το καύσιμο βενζίνης εξατμίστηκε και αναμίχθηκε με τον αέρα εισαγωγής σε ένα καρμπυρατέρ. Στη συνέχεια, πέρασε από μια βαλβίδα εισαγωγής με ελατήριο, η οποία ενεργοποιούνταν με πίεση στον κύλινδρο. Το μίγμα καυσίμου-αέρα αναφλεγόταν από ένα σωλήνα φλόγας που βρισκόταν ακριβώς κάτω από τη βαλβίδα εισαγωγής. Η βαλβίδα εξαγωγής λειτουργούσε από ένα έκκεντρο στο σφόνδυλο. Το 1886, ο Daimler κατασκεύασε το πρώτο τετράτροχο αυτοκίνητο και ίδρυσε την Daimler Motor Company το 1890.

Ο Karl Benz (1844-1929), Γερμανός μηχανικός, ανέπτυξε με επιτυχία έναν τετράχρονο κινητήρα 3,5 ίππων με καυστήρα καρμπυρατέρ και σπινθήρα. Επιπλέον, αποτελούνταν από ένα αφαιρούμενο μπουζί τοποθετημένο στην κυλινδροκεφαλή, παρόμοιο με αυτό που υπάρχει

στους σημερινούς κινητήρες. Ο κινητήρας εγκαταστάθηκε σε ένα προσαρμοσμένο τρίτροχο όχημα το 1886, το πρώτο όχημα «άμαξα χωρίς άλογο». Η μετάδοση ήταν στην ουσία μια διάταξη δύο αλυσίδων που συνέδεε τον κινητήρα με τον πίσω άξονα.

Το 1897, ο Rudolph Diesel (1858-1913), Γερμανός μηχανικός, ανέπτυξε τον πρώτο πρακτικό τετράχρονο κινητήρα, χρησιμοποιώντας απευθείας έγχυση υγρού καυσίμου στο θάλαμο καύσης. Ο υψηλός λόγος συμπίεσης του κινητήρα οδήγησε σε αυτοανάφλεξη και καύση του μείγματος καυσίμου-αέρα. Ο Diesel αποφοίτησε από το Πολυτεχνείο του Μονάχου το 1880 και συνεργάστηκε με τον πρώην καθηγητή του, Καρλ φον Λίντε, αρχικά στην ψύξη του κύκλου Rankine και στη συνέχεια συνεργάστηκε με την εταιρεία MAN για την ανάπτυξη κινητήρων ανάφλεξης με συμπίεση. Σχεδίασε τους κινητήρες του για να ακολουθούν τις θερμοδυναμικές αρχές του Carnot όσο το δυνατόν πιο στενά. Συνεπώς, ο αρχικός του στόχος ήταν να έχει σταθερή θερμοκρασία καύσης. Ωστόσο, αυτό δεν πραγματοποιήθηκε στην πράξη και υιοθέτησε τη στρατηγική της συνεχούς καύσης υπό πίεση.

Ο μονοκύλινδρος κινητήρας του Rudolph Diesel είχε οπή 250 mm, διαδρομή 400 mm, για κυβισμό 20 λίτρων. Το καύσιμο ντίζελ ψεκαζόταν με χρήση ψεκασμού αέρα, μια τεχνική όπου ο πεπιεσμένος αέρας έμπαινε μαζί με το καύσιμο ντίζελ στο μπεκ και το μετέφερε στον κύλινδρο. Ο κινητήρας λειτουργούσε με ταχύτητα 170 σ.α.λ., και απέδιδε 18 ίππους, με απόδοση 27% σε πλήρες φορτίο. Αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη απόδοση από τις ατμομηχανές και τις μηχανές ανάφλεξης με σπινθήρα που χρησιμοποιούνταν εκείνη την εποχή.

Ο Sir Harry Ricardo (1885–1974), απόφοιτος μηχανολόγων μηχανικών του Κέιμπριτζ και διακεκριμένος Άγγλος μηχανικός, κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας τη χρήση ενός σφαιρικού προθάλαμου, του «Κομήτη» του Ricardo για να αυξήσει σημαντικά το ρυθμό ανάμιξης καυσίμου-αέρα, επιτρέποντας τη χρήση κινητήρων ντίζελ σε εφαρμογές υψηλής ταχύτητας, 2000 σ.α.λ. και άνω. Κατά τη διάρκεια της καριέρας του, ο Ricardo συνέβαλε επίσης στην καλύτερη κατανόηση του ρόλου της αναταραχής, του στροβιλισμού και στην ενίσχυση της ταχύτητας της φλόγας τόσο στους κινητήρες με σπινθήρα όσο και στους πετρελαιοκινητήρες. Επίσης, συνέβαλε στις εμπορευματοποιημένες βαλβίδες για κινητήρες αεροσκαφών, ανέπτυξε ένα σύστημα βαθμολόγησής τους και ίδρυσε τη σημερινή εταιρεία Ricardo Consulting Engineers Company.

Οι πρώτοι κινητήρες ψύχονταν με αέρα, αφού παρήγαγαν σχετικά χαμηλή ισχύ. Η φυσική ψύξη του νερού με τη χρήση της αρχής του θερμοσυφώνου και η εξαναγκασμένη ψύξη με μεταφορά με αντλίες νερού υιοθετήθηκαν μετά το 1910 περίπου, για κινητήρες υψηλότερης ιπποδύναμης. Ο κινητήρας Model Henry Ford του 1908 και ο κινητήρας Wright Brother's Flyer του 1903 χρησιμοποιούσαν φυσική ψύξη νερού με συναγωγή.

Οι πρώτοι πολύ-κύλινδροι πετρελαιοκινητήρες για φορτηγά ήταν διαθέσιμοι μέχρι το 1924. Το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο ντίζελ αυτοκίνητο ήταν το Mercedes 260D, που παρουσιάστηκε αρχικά το 1936. Είχε τετρακύλινδρο κινητήρα ντίζελ 2,6 λίτρων, ο οποίος απέδιδε 45 ίππους στις 3000 σ.α.λ.

Οι διαμορφώσεις των κινητήρων για αυτοκίνητα στο πρώτο μισό του εικοστού αιώνα ήταν κυρίως τετράχρονες, υδρόψυκτες, με τέσσερις ή έξι κυλίνδρους σε σειρά, εξοπλισμένες με πλευρικές βαλβίδες. Οι βαλβίδες βρίσκονταν δηλαδή στο πλάι του κυλίνδρου.

1.4 ΚΥΚΛΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

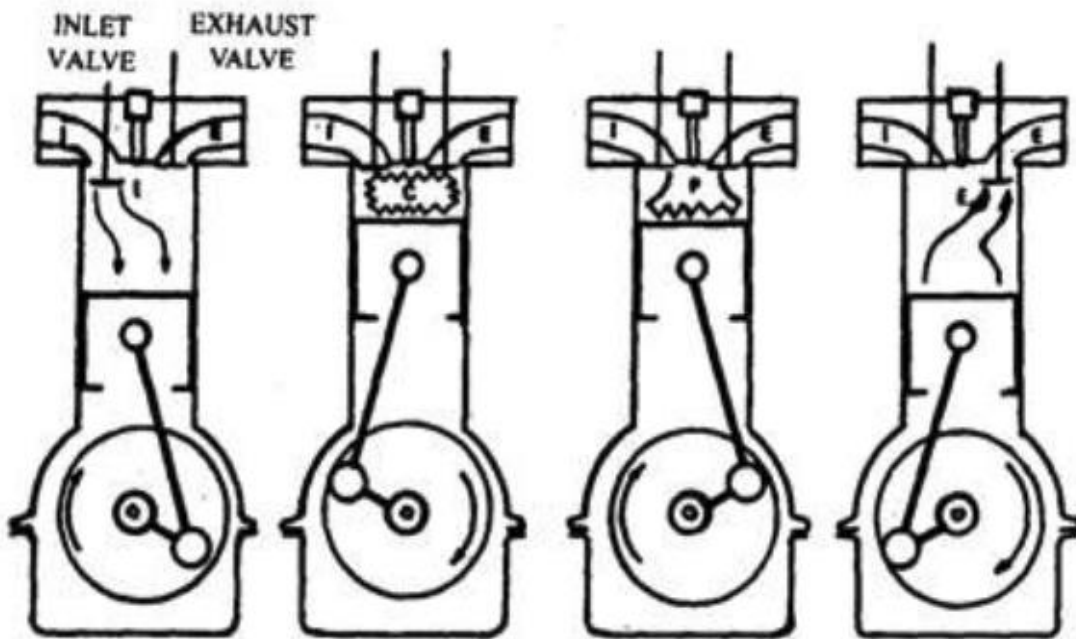
Οι δύο κύριοι κύκλοι που χρησιμοποιούνται σήμερα στους κινητήρες εσωτερικής καύσης ονομάζονται κύκλοι ανάφλεξης με σπινθήρα και ανάφλεξης με συμπίεση, επίσης γνωστοί ως κύκλοι Otto και Diesel, που πήραν το όνομά τους από τους δύο άνδρες που πιστώθηκαν για την εφεύρεσή τους. Ο κύκλος Otto διαμορφώνεται ως κύκλος καύσης σταθερού όγκου και ο κύκλος Diesel διαμορφώνεται ως κύκλος καύσης σταθερής πίεσης.

Αυτοί οι κύκλοι μπορούν να διαμορφωθούν είτε ως δίχρονοι κύκλοι στους οποίους το έμβολο παράγει ισχύ σε κάθε καθοδική διαδρομή, είτε σε τετράχρονους κύκλους στους οποίους το έμβολο παράγει ισχύ σε κάθε άλλη καθοδική διαδρομή [6].

1.4.1 Κινητήρας ανάφλεξης με σπινθήρα

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4, ο τετράχρονος κινητήρας ανάφλεξης με σπινθήρα έχει την ακόλουθη ακολουθία λειτουργιών:

1. Μια διαδρομή εισαγωγής τραβά ένα εύφλεκτο μείγμα καυσίμου και αέρα πέρα από το γκάζι και τη βαλβίδα εισαγωγής στον κύλινδρο.
2. Μια διαδρομή συμπίεσης με κλειστές τις βαλβίδες αυξάνει τη θερμοκρασία του μείγματος. Ένας σπινθήρας ανάβει το μείγμα προς το τέλος της διαδρομής συμπίεσης.
3. Επέκταση ή ισχύς προκύπτει από την καύση του μείγματος καυσίμου-αέρα.
4. Μέσω της εξάτμισης σπρώχνονται τα καμένα αέρια από τη βαλβίδα εξαγωγής.



Σχήμα 1.4: Τετράχρονος κινητήρας ανάφλεξης με σπινθήρα.

Ο αέρας εισέρχεται στον κινητήρα μέσω της πολλαπλής εισαγωγής μέσω ενός τμήματος διόδων που κατανέμουν ομοιόμορφα το μίγμα του αέρα σε μεμονωμένους κυλίνδρους. Το καύσιμο, συνήθως βενζίνη, αναμιγνύεται με τον αέρα εισόδου χρησιμοποιώντας έναν εγχυτήρα καυσίμου, ή καρμπυρατέρ στην πολλαπλή εισαγωγή, τη θύρα εισαγωγής, ή εγχέεται απευθείας στον κύλινδρο, με αποτέλεσμα να γεμίσει ο κύλινδρος με ένα ομοιογενές μείγμα. Όταν το μείγμα αναφλεγεί από έναν σπινθήρα, αναπτύσσεται μια φλόγα και διαδίδεται μέσα στο μίγμα, αυξάνοντας τη θερμοκρασία και την πίεση του κυλίνδρου. Η φλόγα σβήνει όταν φτάσει στα τοιχώματα του κυλίνδρου. Εάν, η αρχική πίεση είναι πολύ υψηλή, τα συμπιεσμένα αέρια μπροστά από τη φλόγα θα αυτοαναφλεγούν, προκαλώντας ένα πρόβλημα που ονομάζεται

χτύπημα. Η εμφάνιση του χτυπήματος περιορίζει τη μέγιστη αναλογία συμπίεσης και συνεπώς την απόδοση των κινητήρων ανάφλεξης με σπινθήρα. Τα καμένα αέρια εξέρχονται από τον κινητήρα πέρα από τις βαλβίδες εξαγωγής μέσω της πολλαπλής εξαγωγής. Η πολλαπλή εξαγωγή διοχετεύει την εξάτμιση από μεμονωμένους κυλίνδρους σε έναν κεντρικό σωλήνα εξάτμισης.

Στον κύκλο ανάφλεξης με σπινθήρα, χρησιμοποιείται γκάζι για τον έλεγχο της ποσότητας του αέρα που προκαλείται. Καθώς το γκάζι είναι κλειστό, η ποσότητα του αέρα που εισέρχεται στον κύλινδρο μειώνεται, προκαλώντας αναλογική μείωση της πίεσης του κυλίνδρου. Δεδομένου ότι η ροή του καυσίμου μετράται ανάλογα με τη ροή του αέρα, το γκάζι σε έναν κινητήρα ανάφλεξης με σπινθήρα, ουσιαστικά, ελέγχει την ισχύ.

1.4.2 Μηχανή ανάφλεξης με συμπίεση

Ο τετράχρονος κινητήρας ανάφλεξης με συμπίεση λειτουργεί με την ακόλουθη σειρά:

1. Μια διαδρομή εισαγωγής τραβάει τον αέρα εισόδου από τη βαλβίδα εισαγωγής στον κύλινδρο.
2. Μια διαδρομή συμπίεσης αυξάνει τη θερμοκρασία του αέρα πάνω από τη θερμοκρασία αυτοανάφλεξης του καυσίμου. Το καύσιμο ντίζελ ψεκάζεται στον κύλινδρο κοντά στο τέλος της διαδρομής συμπίεσης.
3. Η εξάτμιση, η ανάμειξη, η ανάφλεξη και η καύση του καυσίμου ντίζελ συμβαίνουν κατά τα τελευταία στάδια της διαδρομής συμπίεσης και της διαδρομής διαστολής.
4. Έπειτα σπρώχνονται τα καμένα αέρια από τη βαλβίδα εξαγωγής.

Ο αέρας εισαγωγής στον πετρελαιοκινητήρα είναι απαλλαγμένος και η καύση είναι αδύνατη. Η δύναμη ελέγχεται από την ποσότητα του καυσίμου που εγχέεται και την επακόλουθη ανάμειξη του ψεκασμού καυσίμου με τον αέρα εισόδου. Η διάρκεια του ψεκασμού είναι ανάλογη με το φορτίο του κινητήρα. Προκειμένου να αναφλεγεί το μείγμα καυσίμου-αέρα, οι κινητήρες ντίζελ πρέπει να λειτουργούν σε υψηλότερη αναλογία συμπίεσης, σε σύγκριση με τους κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα (SI), με τυπικές τιμές στο εύρος 15 έως 20, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη θεωρητική απόδοση. Δεδομένου ότι το καύσιμο ντίζελ αναμειγνύεται με αέρα λίγο πριν ξεκινήσει η καύση, ο περιορισμός του χτυπήματος που συμβαίνει στους κινητήρες SI μειώνεται σημαντικά.

Η απόδοση του κινητήρα ντίζελ περιορίζεται από το χρόνο που απαιτείται για την ανάμειξη καυσίμου και αέρα, καθώς η ατελής ανάμειξη και η καύση οδηγούν σε μειωμένη ισχύ, αυξημένες άκαυστες εκπομπές υδρογονανθράκων και ορατό καπνό. Πολλά διαφορετικά σχέδια θαλάμων καύσης ντίζελ έχουν εφευρεθεί για να επιτευχθεί επαρκής ανάμειξη. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι συστημάτων καύσης ντίζελ, ο άμεσος ψεκασμός (DI) στον κύριο κύλινδρο και ο έμμεσος ψεκασμός (IDI) σε έναν προθάλαμο που συνδέεται με τον κύριο κύλινδρο. Οι κινητήρες άμεσου ψεκασμού κυριαρχούν όταν το εύρος λειτουργίας του κινητήρα είναι αρκετά στενό, όπως σε πλοία, μηχανές κίνησης και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι έμμεσοι κινητήρες ψεκασμού τείνουν να χρησιμοποιούνται, όταν ο κινητήρας αναμένεται να λειτουργεί σε υψηλές ταχύτητες σε ένα ευρύ φάσμα φορτίων, όπως σε ένα αυτοκίνητο.

Με έμμεσο ψεκασμό, ο αέρας συμπιέζεται σε προθάλαμο κατά τη διάρκεια της διαδρομής της συμπίεσης, παράγοντας ένα εξαιρετικά ταραγμένο πεδίο ροής και συνεπώς

υψηλούς ρυθμούς ανάμιξης όταν το καύσιμο ντίζελ ψεκάζεται στον προθάλαμο προς το τέλος της διαδρομής συμπίεσης. Η διαδικασία καύσης ξεκινά στον προθάλαμο, αυξάνοντας την πίεση στον προθάλαμο πάνω από αυτόν του κύριου θαλάμου, η οποία αναγκάζει τη ροή του μίγματος του καυσίμου και των καμένων αερίων στον κύριο θάλαμο, με αποτέλεσμα τη διάδοση μιας στροβιλιστικής φλόγας στον κύριο θάλαμο.

Δεδομένου ότι ο χρόνος ανάμιξης είναι αντιστρόφως ανάλογος με τις στροφές του κινητήρα, οι κινητήρες ντίζελ ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες, υψηλής ταχύτητας, μέσης ταχύτητας και χαμηλής ταχύτητας. Οι πετρελαιοκινητήρες υψηλής ταχύτητας έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν με ταχύτητες 1000 σ.α.λ. ή υψηλότερες, έχουν διάτρηση έως 300 mm και χρησιμοποιούν καύσιμα αποστάγματος υψηλής ποιότητας. Οι ντίζελ μεσαίας ταχύτητας λειτουργούν με ταχύτητες 375-1000 σ.α.λ., έχουν μέση οπή τυπικά μεταξύ 200 και 600 mm και μπορούν να λειτουργήσουν με μια σειρά καυσίμων. Η κατηγορία χαμηλών στροφών των κινητήρων ντίζελ λειτουργεί με ταχύτητες μικρότερες από 375 σ.α.λ., είναι συνήθως δίχρονοι κινητήρες μεγάλων διαστάσεων (> 600 mm) και χρησιμοποιούν υπολειπόμενο μαζούτ. Κάθε κατασκευαστής κινητήρα έχει εργαστεί για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Επίσης αρκετοί κατασκευαστές παράγουν κινητήρες με μοναδικά χαρακτηριστικά δείχνοντας ότι ο βέλτιστος σχεδιασμός εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

1.4.3 Δίχρονος κύκλος

Όπως υποδηλώνει το όνομά του, οι δίχρονοι κινητήρες χρειάζονται μόνο δύο διαδρομές του εμβόλου, ή μία περιστροφή για να ολοκληρώσουν έναν κύκλο. Υπάρχει ένα χτύπημα ισχύος σε κάθε περιστροφή, αντί για κάθε δύο στροφές όπως στους τετράχρονους κινητήρες. Οι δίχρονοι κινητήρες είναι μηχανικά απλούστεροι από τους τετράχρονους κινητήρες και έχουν υψηλότερη ειδική ισχύ δηλαδή την αναλογία της ισχύος ως προς το βάρος. Μπορούν να χρησιμοποιούν κύκλους ανάφλεξης με σπινθήρα, ή συμπίεση. Ένας από τους περιορισμούς της απόδοσης των δίχρονων κινητήρων είναι η διαδικασία σάρωσης, εξαντλώντας ταυτόχρονα το καμένο μίγμα και εισάγοντας το φρέσκο μίγμα καυσίμου-αέρα στον κύλινδρο. Μια μεγάλη ποικιλία δίχρονων κινητήρων έχει εφευρεθεί για να εξασφαλίσει ένα αποδεκτό επίπεδο σάρωσης.

Η αρχή της λειτουργίας ενός δίχρονου κινητήρα στροφαλοθαλάμου βασίζεται σε συγκεκριμένες παραμέτρους. Κατά τη διάρκεια της συμπίεσης του στροφαλοθαλάμου, ο δίχρονος κύκλος, δημιουργείται από μια υποατμοσφαιρική πίεση στο στροφαλοθάλαμο. Στην ουσία ανοίγει μια βαλβίδα που αφήνει τον αέρα να εισχωρήσει στο στροφαλοθάλαμο. Μόλις το έμβολο αντιστρέψει την κατεύθυνση κατά την καύση και αρχίσει η διαστολή, ο αέρας στο στροφαλοθάλαμο κλείνει τη βαλβίδα έτσι ώστε να συμπιέζεται. Καθώς, το έμβολο ταξιδεύει περαιτέρω, αποκαλύπτει οπές ή θυρίδες εξάτμισης και τα καυσαέρια αρχίζουν να φεύγουν, μειώνοντας γρήγορα την πίεση του κυλίνδρου στην πίεση της ατμόσφαιρας. Στη συνέχεια ανοίγουν οι θυρίδες εισαγωγής και ο πεπιεσμένος αέρας ρέει στον κύλινδρο ωθώντας τα υπόλοιπα καυσαέρια. Αυτή η ώθηση της εξάτμισης από τον εισερχόμενο αέρα ονομάζεται καθαρισμός.

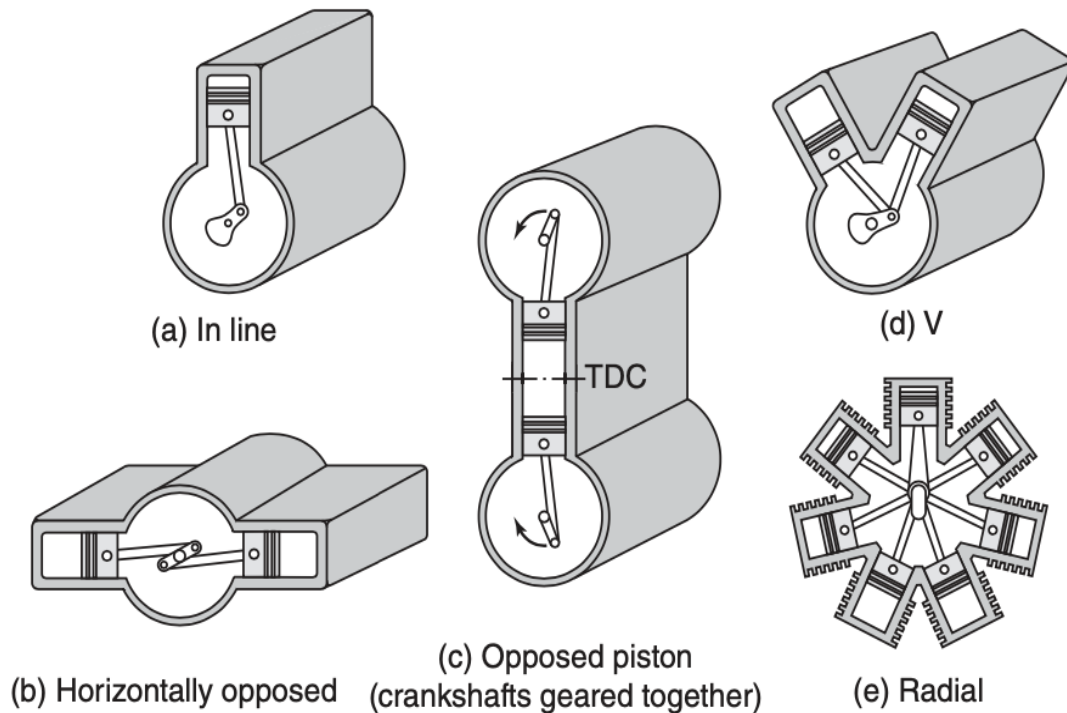
Εδώ έγκειται ένα πρόβλημα με τους δίχρονους κινητήρες: ο καθαρισμός δεν είναι τέλειος. Μέρος του αέρα θα περάσει κατευθείαν από τον κύλινδρο και θα βγει από τη θύρα εξάτμισης, μια διαδικασία που ονομάζεται «βραχυκύκλωμα». Κάποιος αέρας θα αναμιχθεί επίσης με καυσαέρια και ο υπόλοιπος εισερχόμενος αέρας θα σπρώξει ένα μέρος αυτού του μίγματος. Το μέγεθος του προβλήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα σχέδια των θυρών και το σχήμα της κορυφής του εμβόλου.

Ιδιαίτερη ανησυχία προκαλείται σε σχέση με το τέλειο καθάρισμα εάν ο κινητήρας είναι ένας καρμπυραρισμένος κινητήρας αερίου, γιατί αντί να υπάρχει αέρας στο στροφαλοθάλαμο υπάρχει ένα μείγμα καυσίμου-αέρα. Κάποιο από αυτό το μίγμα καυσίμου-αέρα θα βραχυκυκλώσει και θα εμφανιστεί στην εξάτμιση, χάνοντας καύσιμο και αυξάνοντας ταυτόχρονα τις εκπομπές των υδρογονανθράκων. Οι καρμπυραρισμένοι δίχρονοι κινητήρες χρησιμοποιούνται όταν η αποτελεσματικότητα δεν αποτελεί πρωταρχικό μέλημα και μπορεί να αξιοποιηθεί η απλότητα του κινητήρα. Αυτό μεταφράζεται σε χαμηλότερο κόστος και υψηλότερη ισχύ ανά μονάδα βάρους. Γνωστά παραδείγματα περιλαμβάνουν μοτοσυκλέτες, αλυσοπρίονα, εξωλέμβιους κινητήρες και μοντέλα κινητήρων αεροπλάνου. Ωστόσο, η χρήση στις μοτοσυκλέτες μειώνεται επειδή έχουν χαμηλά χαρακτηριστικά εκπομπών. Οι δίχρονοι βιομηχανικοί κινητήρες είναι ως επί το πλείστον ντίζελ και συνήθως υπερτροφοδοτούνται. Με δίχρονο πετρελαιοκινητήρα ή βενζινοκινητήρα με έγχυση καυσίμου, ο αέρας χρησιμοποιείται μόνο για καθαρισμό, οπότε η απώλεια του καυσίμου από βραχυκύκλωμα, ή η ανάμιξη με καυσαέρια δεν αποτελεί κάποιο ιδιαίτερο πρόβλημα.

1.5 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης μπορούν να κατασκευαστούν σε πολλές διαφορετικές διαμορφώσεις. Για ένα δεδομένο κινητήρα, χρησιμοποιώντας έναν τετράχρονο ή δίχρονο κύκλο Otto ή Diesel, οι διαμορφώσεις χαρακτηρίζονται από τη γεωμετρία του κυλίνδρου του εμβόλου, τη γεωμετρία της βαλβίδας εισαγωγής και εξαγωγής, τη χρήση υπερτροφοδοτών ή υπερσυμπιεστών, τον τύπο του συστήματος παροχής καυσίμου και τον τύπο του συστήματος ψύξης. Ο παλινδρομικός συνδυασμός εμβόλου-κυλίνδρου παραμένει η κυρίαρχη διαμόρφωση του κινητήρα εσωτερικής καύσης [7].

Από την εφεύρεση του κινητήρα εσωτερικής καύσης έχουν σχεδιαστεί πολλές διαφορετικές γεωμετρίες εμβόλου-κυλίνδρων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5: Διάφορες γεωμετρίες κυλίνδρων-πιστονιών. Η επιλογή μιας δεδομένης διάταξης εξαρτάται από έναν αριθμό παραγόντων και περιορισμών, όπως η εξισορρόπηση του κινητήρα και ο διαθέσιμος όγκος. Ο εν σειρά κινητήρας είναι ο πιο διαδεδομένος επειδή είναι ο πιο απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση. Ο κινητήρας V σχηματίζεται από δύο γραμμές κυλίνδρων σε σειρά που είναι γωνιακές μεταξύ τους, σχηματίζοντας το γράμμα V. Ένας οριζόντιος αντίθετος ή επίπεδος κινητήρας είναι ένας κινητήρας V με μετατοπισμένες τις βάσεις εμβόλου κατά 180°. Ο κινητήρας W σχηματίζεται από τρεις σειρές κυλίνδρων σε σειρά που είναι γωνιακές μεταξύ τους, σχηματίζοντας το γράμμα W. Ένας ακτινικός κινητήρας έχει όλους τους κυλίνδρους σε ένα επίπεδο με ίση απόσταση μεταξύ των αξόνων των κυλίνδρων. Οι ακτινικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται σε αεροπορικές εφαρμογές αφού κάθε κύλινδρος μπορεί να ψύχεται εξίσου. Δεδομένου ότι οι κύλινδροι βρίσκονται σε ένα επίπεδο, χρησιμοποιείται μια κύρια συνδετική ράβδος για έναν κύλινδρο και αρθρωτές ράβδοι είναι προσαρτημένες στην κύρια ράβδο. Έχουν επίσης αναπτυχθεί εναλλακτικές λύσεις στην παλινδρομική διάταξη εμβόλου-κυλίνδρου, όπως ο περιστροφικός κινητήρας Wankel, στον οποίο ένας ρότορας τριγωνικού σχήματος περιστρέφεται εκκεντρικά σε ένα περίβλημα για να επιτύχει τη συμπίεση, την ανάφλεξη και τη διαστολή του μείγματος καυσίμου-αέρα.



Σχήμα 1.5: Διάφορες γεωμετρίες κυλίνδρων-πιστονιών [8]

1.5.1 Διάταξη βαλβίδων εισαγωγής και εξαγωγής (εξάτμισης)

Τα αέρια εισέρχονται και αποβάλλονται από τους κυλίνδρους με βαλβίδες που ανοίγουν και κλείνουν την κατάλληλη στιγμή, ή με θύρες που είναι ακάλυπτες ή καλύπτονται από το έμβολο. Υπάρχουν πολλές παραλλαγές του σχεδιασμού για τον τύπο και τη θέση της βαλβίδας εισαγωγής και εξαγωγής. Οι βαλβίδες poppet είναι ο κύριος τύπος βαλβίδων που χρησιμοποιούνται σε κινητήρες εσωτερικής καύσης, καθώς έχουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά στεγανοποίησης. Τα ελατήρια χρησιμοποιούνται για να επιστρέψουν τη βαλβίδα σε κλειστή θέση. Έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί βαλβίδες με περιστροφές, αλλά δεν σφραγίζουν τον θάλαμο καύσης καθώς και άλλων ειδών βαλβίδες.

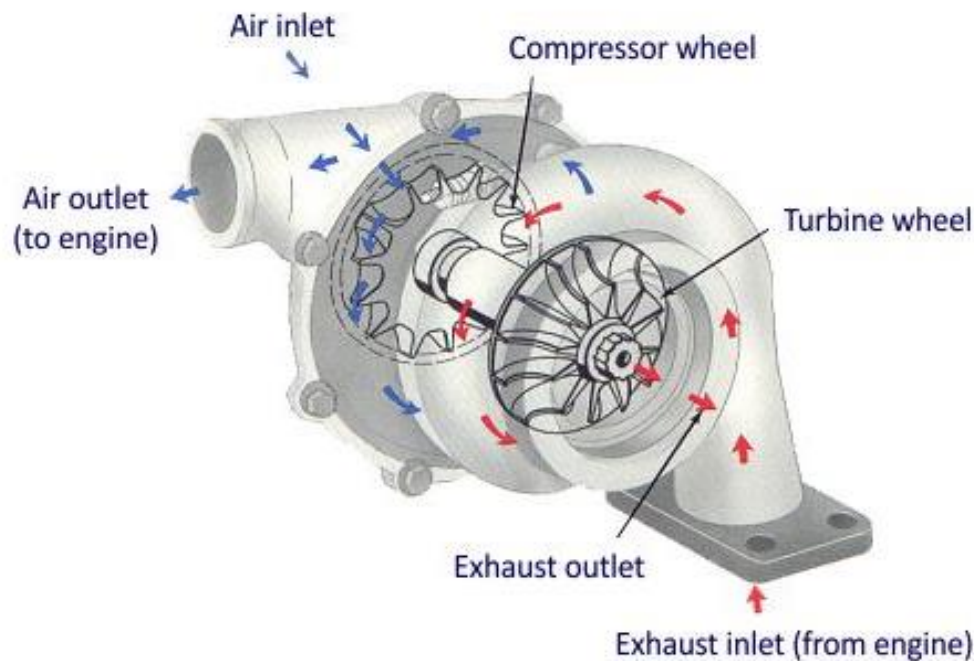
Οι βαλβίδες poppet μπορούν να βρίσκονται είτε στο μπλοκ του κινητήρα είτε στην κυλινδροκεφαλή, ανάλογα με τη ροή του αέρα, την ψύξη και τις παραμέτρους της κατασκευής. Οι παλαιότεροι κινητήρες και οι μικροί τετράχρονοι κινητήρες έχουν τις βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής στο μπλοκ παράλληλα με τους κυλίνδρους. Αυτή η διαμόρφωση ονομάζεται κάτω κεφαλή ή κεφαλή L. Αυτή η διαμόρφωση παρέχει καλή ψύξη στις βαλβίδες από το ψυκτικό υγρό του μπλοκ του κινητήρα, ωστόσο με άλλου είδους κινητήρες (διάτρηση <χτυπήματος) η μέγιστη διάμετρος της βαλβίδας είναι περιορισμένη, με αποτέλεσμα μια κακή ογκομετρική απόδοση. Η διαμόρφωση της κεφαλής F τοποθετεί τη βαλβίδα εισαγωγής στην κυλινδροκεφαλή ακριβώς πάνω από τον κύλινδρο, αυξάνοντας την ογκομετρική απόδοση, με τη βαλβίδα εξαγωγής να παραμένει στο πλάι.

Επί του παρόντος, οι περισσότεροι κινητήρες χρησιμοποιούν βαλβίδες που βρίσκονται στην κυλινδροκεφαλή, μια γενική διαμόρφωση ή μια κεφαλή I, καθώς αυτή η διαμόρφωση επιτρέπει αυξημένη διάμετρο της βαλβίδας με αποτέλεσμα καλά χαρακτηριστικά στη ροή εισόδου αλλά και της εξάτμισης. Ωστόσο, αυτές βαλβίδες ψύχονται πιο δύσκολα από τις βαλβίδες κεφαλής L.

Ο χρονισμός της βαλβίδας ελέγχεται από έναν εκκεντροφόρο άξονα που περιστρέφεται στη μισή ταχύτητα του κινητήρα για έναν τετράχρονο κινητήρα. Οι λοβοί στον εκκεντροφόρο άξονα μαζί με ανυψωτικά, ωστήρια και βραχίονες ελέγχου, ελέγχουν την κίνηση της βαλβίδας. Οι βαλβίδες εισαγωγής στους πρώτους (περίπου 1910) κινητήρες εισάγονταν με ελατήριο και άνοιγαν κατά τη διαδρομή εισόδου από το διαφορικό πίεσης μεταξύ κυλίνδρου και ατμόσφαιρας [9].

1.5.2 Υπερσυμπίεστές και στροβιλοσυμπίεστές

Όλοι οι κινητήρες που συζητήθηκαν μέχρι τώρα είναι φυσικής αναρρόφησης, καθώς το αέριο εισαγωγής εισέρχεται από την προς τα κάτω κίνηση του εμβόλου. Οι κινητήρες μπορούν επίσης να είναι υπερτροφοδοτούμενοι. Η υπερφόρτιση είναι η μηχανική συμπίεση του αέρα εισόδου σε πίεση υψηλότερη από την τυπική ατμόσφαιρα από έναν συμπίεστή που τροφοδοτείται από το στροφαλοφόρο άξονα. Ο συμπίεστής αυξάνει την πυκνότητα του αέρα εισαγωγής, έτσι ώστε να παρέχεται περισσότερο καύσιμο και αέρας στον κύλινδρο για αύξηση της ισχύος. Η έννοια του υπερσυμπίεστή απεικονίζεται στο Σχήμα 1.6: Υπερσυμπίεστής .



Σχήμα 1.6: Υπερσυμπίεστής [10]

Το καυσαέριο που φεύγει από τον κινητήρα επεκτείνεται περαιτέρω μέσω τουρμπίνας που κινεί έναν συμπίεστή. Τα οφέλη είναι διπλά:

1. Ο κινητήρας είναι πιο αποδοτικός επειδή η ενέργεια που διαφορετικά θα είχε σπαταληθεί ανακτάται από τα καυσαέρια.
2. Ένας μικρότερος κινητήρας μπορεί να κατασκευαστεί για να παράγει μια δεδομένη ισχύ επειδή είναι πιο αποδοτικός και επειδή η πυκνότητα του εισερχόμενου φορτίου είναι μεγαλύτερη. Η ισχύς που διατίθεται από τον συμπίεστή είναι μια μη γραμμική συνάρτηση των στροφών του κινητήρα, έτσι ώστε σε χαμηλές στροφές να υπάρχει

μικρή (αν υπάρχει) αύξηση (αύξηση πυκνότητας), ενώ σε υψηλές ταχύτητες η ώθηση είναι η μέγιστη. Είναι επίσης χαμηλή στο μερικό γκάζι και υψηλή στο μεγαλύτερο γκάζι. Αυτά είναι επιθυμητά χαρακτηριστικά για έναν κινητήρα αυτοκινήτων, καθώς οι απώλειες στο γκάζι, ή την άντληση ελαχιστοποιούνται. Οι περισσότεροι μεγάλοι και μεσαίου μεγέθους κινητήρες ντίζελ είναι υπερτροφοδοτούμενοι για να αυξήσουν την απόδοσή τους. Με την αναμενόμενη υιοθέτηση των ηλεκτρικών συστημάτων 48V στα οχήματα, θα υπάρχει αυξημένη χρήση των ηλεκτρικών υπερσυμπιεστών που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με απλό υπερσυμπιεστή για τη μείωση της «καθυστέρησης του turbo».

1.5.3 Εγχυτήρες καυσίμου και καρμπυρατέρ

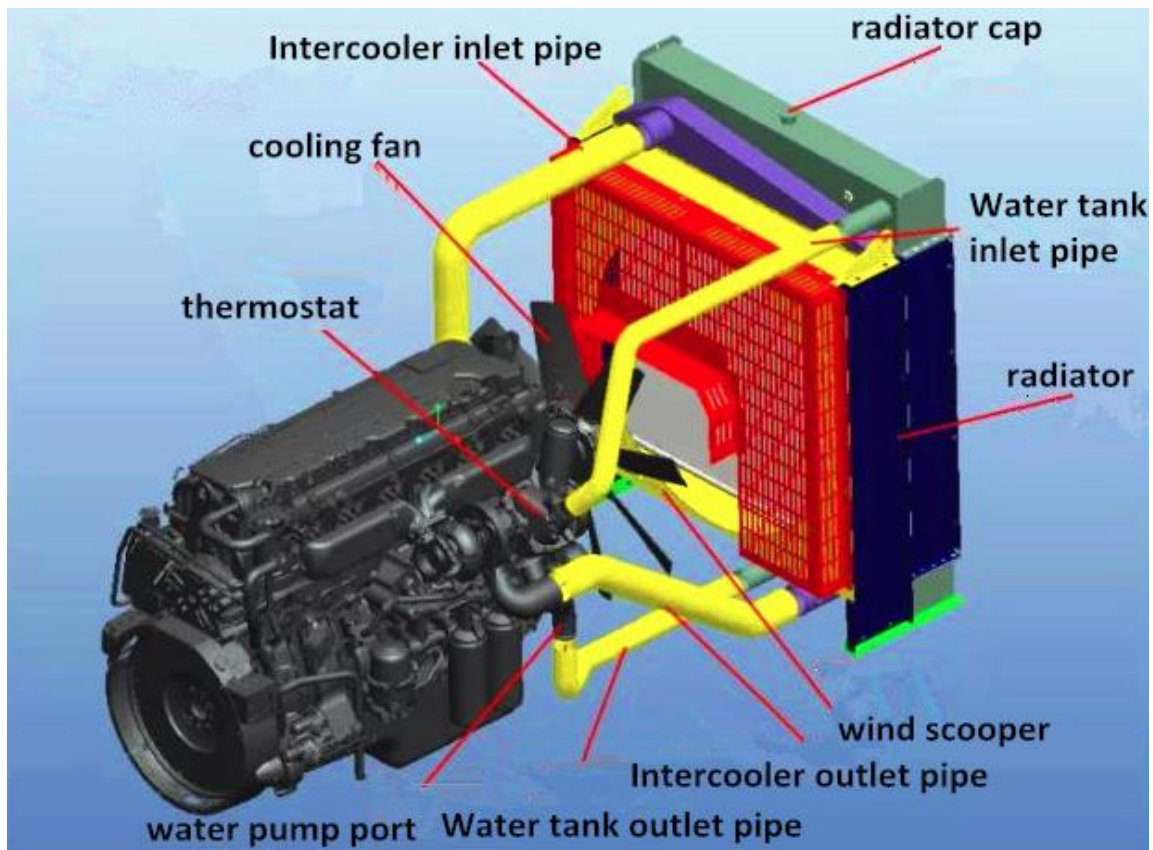
Επαναστατικές αλλαγές έχουν γίνει με τα χειριστήρια του κινητήρα και τα συστήματα παροχής καυσίμου τα τελευταία χρόνια και η πρόοδος συνεχίζεται. Τα συστήματα ανάφλεξης και ψεκασμού του καυσίμου του κινητήρα ελέγχονται πλέον από υπολογιστές. Τα συμβατικά καρμπυρατέρ στα αυτοκίνητα αντικαταστάθηκαν από μπεκ καυσίμου πεταλούδας γκαζιού τη δεκαετία του 1980, τα οποία με τη σειρά τους αντικαταστάθηκαν από μπεκ ψεκασμού καυσίμου τη δεκαετία του 1990. Τα μπεκ ψεκασμού καυσίμου βρίσκονται στη θύρα εισαγωγής κάθε κυλίνδρου ακριβώς ανάντη της βαλβίδας εισαγωγής, οπότε υπάρχει ένας εγχυτήρας για κάθε κύλινδρο. Το μπεκ ψεκασμού δεν χρειάζεται να διατηρεί ένα συνεχόμενο ψεκασμό καυσίμου, καθώς η χρονική υστέρηση για την παροχή του καυσίμου είναι πολύ μικρότερη από αυτή ενός μπεκ γκαζιού.

Οι κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα άμεσου ψεκασμού είναι διαθέσιμοι σε πολλούς κινητήρες παραγωγής. Με άμεσο ψεκασμό, το καύσιμο ψεκάζεται απευθείας στον κύλινδρο κατά τα τελευταία στάδια της διαδρομής της συμπίεσης. Σε σύγκριση με τον ψεκασμό των θυρών, οι κινητήρες άμεσου ψεκασμού μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλότερη αναλογία συμπίεσης και ως εκ τούτου θα έχουν υψηλότερη θεωρητική απόδοση, καθώς μειώνονται οι περιορισμοί του χτυπήματος της καύσης. Η εξάτμιση του ψεκασμένου καυσίμου στο θάλαμο καύσης θα έχει ένα ψυκτικό αποτέλεσμα, το οποίο θα αυξήσει επίσης την ογκομετρική απόδοση.

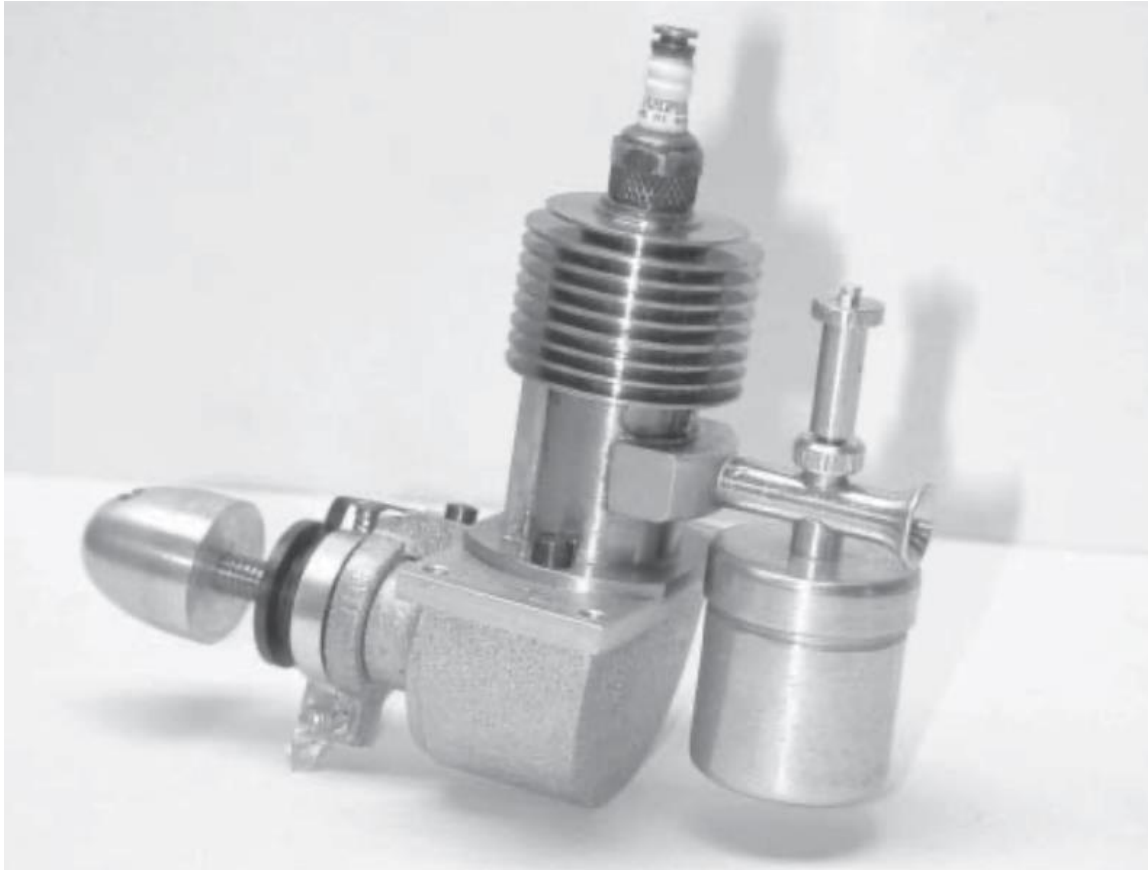
1.5.4 Συστήματα ψύξης

Απαιτείται κάποιος τύπος συστήματος ψύξης για την απομάκρυνση του περίπου 30% της ενέργειας του καυσίμου που απορρίπτεται ως απορριπτόμενη θερμότητα. Η ψύξη με υγρό, ή αέρα είναι οι δύο κύριοι τύποι συστημάτων ψύξης. Το σύστημα ψύξης υγρού (Σχήμα 1.7: Σύστημα ψύξης υγρού) είναι συνήθως ένας βρόχος όπου μια αντλία νερού στέλνει ψυκτικό υγρό στο μπλοκ του κινητήρα και στη συνέχεια στην κεφαλή. Ζεστό ψυκτικό ρέει μέσα από την πολλαπλή εισαγωγή για να ζεσταθεί και έτσι να βοηθήσει στην εξάτμιση του καυσίμου. Στη συνέχεια, το ψυκτικό υγρό θα ρέει σε ένα ψυγείο ή έναν εναλλάκτη θερμότητας, απορρίπτει την απορριπτόμενη θερμότητα στην ατμόσφαιρα και επιστρέφει στην αντλία. Όταν ο κινητήρας είναι κρύος, ένας θερμοστάτης εμποδίζει το ψυκτικό να επιστρέψει στο ψυγείο, με αποτέλεσμα την ταχύτερη προθέρμανση του κινητήρα. Οι υδρόψυκτοι κινητήρες είναι πιο αθόρυβοι από τους αερόψυκτους, αλλά έχουν προβλήματα διαρροής, βρασμού και κατάψυξης. Οι κινητήρες με σχετικά χαμηλή ισχύ εξόδου, μικρότερη από 20 kW, χρησιμοποιούν κυρίως ψύξη αέρα. Τα συστήματα ψύξης αέρα χρησιμοποιούν περύγια για να μειώσουν τη θερμοκρασία της επιφάνειας της πλευράς του αέρα (Σχήμα 1.8: Ψύξη με αέρα ενός μοντέλου κινητήρα αεροσκάφους). Υπάρχουν ιστορικά παραδείγματα συνδυασμένης ψύξης νερού και

αέρα. Το Mors, ένα αυτοκίνητο της δεκαετίας του 1920, είχε έναν κύλινδρο αερόψυκτου πετυγίου και υδρόψυκτες κεφαλές.



Σχήμα 1.7: Σύστημα ψύξης υγρού [11]



Σχήμα 1.8: Ψύξη με αέρα ενός μοντέλου κινητήρα αεροσκάφους [12]

1.6 ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Η θερμοδυναμική παίζει σημαντικό ρόλο στην υψηλή απόδοση των κινητήρων. Οι μελέτες ανάπτυξης του κινητήρα έχουν υποδείξει ότι ορισμένα χαρακτηριστικά του κινητήρα μπορούν να βελτιώσουν δραματικά την απόδοσή του (υψηλότερες σχέσεις συμπίεσης, υψηλά επίπεδα EGR¹ και μικρότερη διάρκεια καύσης). Η συμβολή του καθενός από αυτά τα χαρακτηριστικά του κινητήρα παίζει διαφορετικό ρόλο στην αύξηση της θερμικής απόδοσης και μπορούν να περιγραφούν οι θερμοδυναμικοί λόγοι για τις βελτιώσεις. Το κλειδί για την ανάπτυξη τέτοιων κινητήρων είναι η διαχείριση της διαδικασίας καύσης. Αυτή η πρόοδος της διαδικασίας καύσης περιγράφεται εν συντομία στη συνέχεια.

Ένας μεγάλος αριθμός δραστηριοτήτων της έρευνας και ανάπτυξης των κινητήρων έχει επικεντρωθεί στις διαδικασίες καύσης του κινητήρα και έχει επικυρωθεί η χρήση νέων τεχνικών καύσης για την επίτευξη χαμηλών εκπομπών νιτρικού οξειδίου και σωματιδίων με ταυτόχρονη υψηλή θερμική απόδοση. Αυτές οι δραστηριότητες έχουν χρησιμοποιήσει μια ποικιλία καινοτόμων τεχνολογιών καύσης που έχουν συμπεριλάβει διάφορες επιλογές χαμηλής θερμοκρασίας και μερικώς προαναμεμιγμένου καυσίμου. Αυτός ο τρόπος καύσης συχνά ονομάζεται και ομοιογενής ανάφλεξη με συμπίεση φορτίου (HCCI), ή προαναμεμιγμένη ανάφλεξη συμπίεσης φορτίου (PCCI), μερικώς προαναμεμιγμένο φορτίο (PPC) κ.λπ. Αυτές οι εξελίξεις περιλαμβάνουν τη χρήση υψηλότερων λόγων συμπίεσης, διάφορα μείγματα, υψηλό

¹ Η ανακυκλοφορία των καυσαερίων (EGR) είναι μια αποτελεσματική στρατηγική για τον έλεγχο των εκπομπών NOx από τους κινητήρες ντίζελ. Το EGR μειώνει τα NOx μειώνοντας τη συγκέντρωση του οξυγόνου στο θάλαμο καύσης, καθώς και μέσω της απορρόφησης της θερμότητας.

EGR, πολλαπλούς ψεκασμούς καυσίμου, δύο διαφορετικά καύσιμα, μεταβλητό χρονισμό των βαλβίδων και υψηλές πιέσεις εισόδου (ώθηση). Αυτοί οι τρόποι καύσης συχνά οδηγούν σε ταχεία καύση. Ο σχεδιασμός που παρέχει την πιο αποτελεσματική λειτουργία δεν είναι ακόμη γνωστός, αλλά αυτοί οι τύποι χαρακτηριστικών είναι σαφώς σημαντικοί.

Λόγω της ποικιλίας των διαμορφώσεων του κινητήρα και των συστημάτων EGR, δεν είναι καθολική καμία μοναδική υπόθεση για την πίεση των καυσαερίων. Ορισμένοι κινητήρες ενδέχεται να χρησιμοποιούν υπερσυμπιεστή. Η πίεση της εξάτμισης (ειδικά για έναν υπερτροφοδοτούμενο κινητήρα που χρησιμοποιεί υψηλό επίπεδο EGR) μπορεί να αναμένεται να είναι σημαντικά υψηλότερη από την πίεση εισόδου. Η χρήση υπερσυμπιεστή θα μπορούσε να έχει ως αποτέλεσμα πρόσθετες μηχανικές τριβές. Ένα άλλο στοιχείο που μπορεί να διαφέρει για διαφορετικούς κινητήρες είναι η θερμοκρασία εισόδου η οποία επηρεάζεται από το βαθμό ψύξης του EGR.

1.7 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΙΣΧΥΟΣ

Σε αυτήν την ενότητα, συζητείται η εναλλακτική τεχνολογία των κινητήρων, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτροκινητήρων, των κυψελών καυσίμου και των αεριοστροβίλων ως προς την εφαρμογή τους. Επίσης αναφέρονται κάποια πλεονεκτήματά τους σε σχέση με τον κλασικό κινητήρα εσωτερικής καύσης.

1.7.1 Ηλεκτρικοί κινητήρες

Οι ηλεκτροκινητήρες ανταγωνίζονται τους κινητήρες εσωτερικής καύσης στην περιοχή ισχύος μικρότερης από περίπου 500 kW. Λόγω της ανάγκης υιοθέτησης τεχνολογίας χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα τόσο για τη μείωση των εκπομπών CO₂ όσο και για τη βελτίωση της ποιότητας του εξωτερικού αέρα, ο ρυθμός αλλαγής της ηλεκτροκίνησης των οχημάτων ήταν πολύ ταχύτερος από τον αναμενόμενο τα τελευταία χρόνια. Οι κατασκευαστές των οχημάτων μετακινούνται από την προβολή των ηλεκτροκινητήρων ως δευτερεύουσας ή εφεδρικής πηγής, προς την υιοθέτηση των ηλεκτρικών κινητήρων ως μια κύρια πηγή ισχύος. Αυτό συνεπάγεται τη χρήση των κινητήρων εσωτερικής καύσης ως μια δευτερεύουσα πηγή ισχύος.

Τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα οχήματα εσωτερικής καύσης. Τα ηλεκτρικά οχήματα είναι αθόρυβα, έχουν χαμηλότερα επίπεδα κραδασμών και κοστίζουν λιγότερο στη λειτουργία τους, περίπου 1 λεπτό ανά μίλι έναντι 10 λεπτών ανά μίλι για τα οχήματα εσωτερικής καύσης. Έχουν αναπτυχθεί ηλεκτρικοί κινητήρες που έχουν χαρακτηριστικά υψηλής ταχύτητας ροπής ανώτερα από αυτά των κινητήρων εσωτερικής καύσης και παρέχουν επίσης ισχύ έως 150 kW ανά τροχό. Οι περισσότεροι ηλεκτρικοί κινητήρες που χρησιμοποιούνται σήμερα σε υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα είναι κινητήρες DC χωρίς ψήκτες, με μόνιμους μαγνήτες τοποθετημένους σε ένα ρότορα. Ωστόσο, η χρήση των κινητήρων επαγωγής AC, στους οποίους το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παράγεται από ηλεκτρικά ρεύματα στο στάτορα, αυξάνεται λόγω του χαμηλότερου κόστους τους και της λιγότερο περίπλοκης ενσωμάτωσής του στον κινητήρα. Γενικότερα σήμερα, χρησιμοποιούνται χάρτες απόδοσης των ηλεκτροκινητήρων που περιέχουν περιγράμματα απόδοσης του κινητήρα σε αεροπλάνα για την επιλογή ηλεκτρικών κινητήρων για εφαρμογές οχημάτων.

Οι υποστηρικτές των ηλεκτρικών οχημάτων επισημαίνουν ότι σχεδόν οποιοδήποτε καύσιμο, ηλιακά φωτοβολταϊκά πάνελ ή ανεμογεννήτριες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται από ένα ηλεκτρικό όχημα,

μειώνοντας την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Επίσης, μέσω της χρήσης τους δε θα υπάρχουν τοπικές εκπομπές καυσαερίων που θα εκπέμπονται από το ηλεκτρικό όχημα σε κάθε αστικό περιβάλλον. Ωστόσο, εάν η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από ένα σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιεί τον άνθρακα ως καύσιμο, η ατμοσφαιρική ρύπανση που παράγεται από τη μονάδα παραγωγής ενέργειας από τον άνθρακα θα αναιρέσει το πλεονέκτημα της ποιότητας του αέρα του ηλεκτρικού οχήματος (έμμεσος επηρεασμός του περιβάλλοντος).

Το κύριο πρόβλημα με τα ηλεκτρικά οχήματα είναι οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της ενέργειας. Είναι γενικά αναγνωρισμένο ότι απαιτείται μια σημαντική πρόοδος στην τεχνολογία των μπαταριών προκειμένου τα ηλεκτρικά οχήματα να γίνουν σημαντικό μέρος του στόλου των αυτοκινήτων. Οι μπαταρίες για τα οχήματα συγκεντρώνονται γενικά από ομάδες μεμονωμένων μπαταριών ιόντων λιθίου, συνολικής μάζας περίπου 3500 κιλών και έχουν διάρκεια ζωής περίπου 5 χρόνια. Η χωρητικότητα της μπαταρίας για τα αυτοκίνητα κυμαίνεται από περίπου 25-100 kWh και για παράδειγμα τα πλήρως ηλεκτρικά αστικά λεωφορεία είναι εξοπλισμένα με μπαταρίες χωρητικότητας από 600 έως 1000 kWh. Τα ηλεκτρικά οχήματα που έχουν κατασκευαστεί μέχρι σήμερα έχουν περιορισμένη εμβέλεια μόνο 160–320 χιλιόμετρα (100–200 μίλια), της τάξης του μισού από αυτά που μπορούν εύκολα να γίνουν με ένα βενζινοκινητήρα.

Επιπλέον, η ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου είναι επί του παρόντος 0,5-1 MJ/L (150-300 Wh/L), με ενεργειακές πυκνότητες της τάξης των 5 MJ/L υπό ανάπτυξη, σημαντικά χαμηλότερες από τα καύσιμα βενζίνης, ή ντίζελ με ενεργειακές πυκνότητες της τάξης των 35 MJ/L. Σε κρύο καιρό, υπάρχει υποβάθμιση της απόδοσης της μπαταρίας της τάξης του 15-30%. Ένα παγκόσμιο δίκτυο σταθμών φόρτισης υψηλής τάσης (240 έως 950 V) χρειάζεται για να αντισταθμίσει την περιορισμένη γκάμα των ηλεκτρικών οχημάτων. Ο χρόνος φόρτισης των μπαταριών των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι τουλάχιστον δύο ώρες, ανάλογα με την τάση του σταθμού φόρτισης, σε σύγκριση με το χρόνο ανεφοδιασμού υγρών καυσίμων που είναι της τάξης των μερικών λεπτών.

Τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (HEV), τα οποία ενσωματώνουν ένα μικρό κινητήρα εσωτερικής καύσης με ηλεκτρικό κινητήρα και μπαταρίες αποθήκευσης, έχουν φτάσει στο στάδιο παραγωγής, κυρίως λόγω της χαμηλής κατανάλωσης του καυσίμου και των χαμηλών και σταθερών εκπομπών. Ένα υβριδικό ηλεκτρικό όχημα διαθέτει κινητήρα εσωτερικής καύσης για να παρέχει ενέργεια για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της αυτονομίας του οχήματος. Στη συνέχεια, η μπαταρία παρέχει την πρόσθετη ισχύ που απαιτείται για την επιτάχυνση και την αναρρίχηση σε λόφους. Η μπαταρία σε ένα όχημα HEV τυπικά έχει χωρητικότητα περίπου 50 MJ (14 kWh). Τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα έχουν μακρά ιστορία, καθώς το πρώτο HEV, το αυτοκίνητο «Woods Dual Power», παρουσιάστηκε το 1916. Παρόμοιος συνδυασμός κινητήρα-μπαταρίας έχει χρησιμοποιηθεί σε ντίζελ-ηλεκτρικά υποβρύχια από το 1900 για να επιτραπεί τόσο η επιφανειακή όσο και η υποβρύχια λειτουργία.

Υπάρχουν δύο βασικές διαμορφώσεις για ένα HEV. Αυτές είναι η διαμόρφωση σε σειρά ή παράλληλα. Σε μια διαμόρφωση σειράς, μόνο ο ηλεκτροκινητήρας με ισχύ από την μπαταρία ή τη γεννήτρια χρησιμοποιείται για να κινεί τους τροχούς. Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης διατηρείται στα πιο αποδοτικά και χαμηλότερα σημεία εκπομπών για να λειτουργεί η γεννήτρια και να φορτίζει τις μπαταρίες αποθήκευσης. Με την παράλληλη διαμόρφωση, ο κινητήρας και ο ηλεκτροκινητήρας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξεχωριστά, ή μαζί για να τροφοδοτήσουν το όχημα. Ορισμένα υβριδικά οχήματα χρησιμοποιούν κινητήρα εσωτερικής καύσης για να τροφοδοτούν τους μπροστινούς τροχούς και έναν ηλεκτροκινητήρα για να τροφοδοτούν τους πίσω τροχούς και τα συγχρονίζουν για να παρέχουν την ικανότητα της τετρακίνησης. Οι κινητήρες χρησιμοποιούνται επίσης ως γεννήτριες κατά το φρενάρισμα για να αυξήσουν την απόδοση του οχήματος.

1.7.2 Κυψέλες καυσίμου

Μια κυψέλη καυσίμου μετατρέπει τη χημική ενέργεια σε ένα καύσιμο απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Η πρώτη κυψέλη καυσίμου εφευρέθηκε από τον W. Grove, Άγγλο επιστήμονα, το 1838. Για εφαρμογές σε οχήματα, το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως καύσιμο και το οξυγόνο είναι ο οξειδωτικός παράγοντας. Η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου ανταγωνίζεται καλά σε εφαρμογές που απαιτούν μειωμένες εκπομπές, καθώς οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία της μεμβράνης πολυμερών-ηλεκτρολυτών (PEM) δείχνουν ότι μια κυψέλη καυσίμου PEM παράγει πολύ χαμηλότερες εκπομπές CO_2 σε σχέση με έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης. Μια κυψέλη καυσίμου PEM λειτουργεί με υδρογόνο που παρέχεται στην άνοδο και οξυγόνο που παρέχεται στην κάθοδο.

Τόσο η άνοδος όσο και η κάθοδος αποτελούνται από σωματίδια λευκόχρυσου ενσωματωμένα σε μια υποστρωματική επιφάνεια πορώδους άνθρακα. Στην άνοδο, το υδρογόνο χωρίζεται σε πρωτόνια H^+ και ηλεκτρόνια e^- στην αντίδραση $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$. Τα πρωτόνια μεταναστεύουν μέσω ενός πολυμερούς ηλεκτρολύτη στην κάθοδο και τα ηλεκτρόνια παρέχουν το απαιτούμενο ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα του φορτίου, όπως μια μπαταρία. Στην κάθοδο, το οξυγόνο αντιδρά με τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια για να σχηματίσει νερό, στην αντίδραση $\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$.

Οι τρέχουσες στοίβες των κυψελών καυσίμου PEM είναι αρκετά μικρές για να χωρέσουν κάτω από το πάτωμα ενός οχήματος δίπλα στις μπαταρίες αποθήκευσης και επί του παρόντος μπορούν να αποδώσουν έως και 125 kW σε έναν ηλεκτροκινητήρα. Μελέτες υποδεικνύουν ότι οι καλύτερες ευκαιρίες για την υιοθέτηση των κυψελών καυσίμου βρίσκονται στην αγορά των εμπορικών οχημάτων, δηλαδή για χρήση σε φορτηγά και άλλες εφαρμογές εκτός του δρόμου. Δεδομένου ότι προς το παρόν δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη υποδομή αποθήκευσης των καυσίμων υδρογόνου, μία επιλογή είναι η μετατροπή του καυσίμου της μεθανόλης επί του σκάφους σε υδρογόνο και CO_2 . Η απόδοση της μεταρρύθμισης είναι περίπου 60%, επομένως σε συνδυασμό με την απόδοση της κυψέλης καυσίμου στο 70% και την απόδοση του κινητήρα στο 90%, η συνολική απόδοση του κινητήρα κυψέλης καυσίμου είναι της τάξης του 40%, περίπου ίδια με έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης υψηλής απόδοσης.

1.7.3 Κινητήρες αεριοστροβίλων

Οι κινητήρες αεριοστροβίλων ανταγωνίζονται τους κινητήρες εσωτερικής καύσης στο άλλο άκρο του φάσματος ισχύος, με ισχύ μεγαλύτερη από περίπου 500 kW. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρονται εξαρτώνται από την εφαρμογή. Παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι η απόδοση και η ισχύς ανά μονάδα βάρους. Ένας αεριοστρόβιλος αποτελείται βασικά από ένα συνδυασμό συμπιεστή-καυστήρα-στροβίλου που παρέχει ζεστό αέριο υψηλής πίεσης. Αυτό μπορεί στη συνέχεια να επεκταθεί μέσω ενός ακροφυσίου (στροβιλοκινητήρα), για να οδηγήσει μια έλικα (στροβιλοκινητήρα), ή για να περιστρέψει έναν άξονα σε σταθερή ή δυναμική εφαρμογή.

Ένα πλεονέκτημα που προσφέρει ένας κινητήρας αεριοστροβίλων στο σχεδιαστή είναι ότι το υλικό που είναι υπεύθυνο για τη συμπίεση, την καύση και την επέκταση αποτελείται από τρεις διαφορετικές συσκευές, ενώ σε έναν εμβολοφόρο κινητήρα όλες αυτές οι διαδικασίες γίνονται μέσα στον κύλινδρο. Το υλικό για κάθε διαδικασία σε έναν κινητήρα αεριοστροβίλων μπορεί στη συνέχεια να βελτιστοποιηθεί ξεχωριστά, λαμβάνοντας υπόψη ότι σε έναν κινητήρα εμβόλων πρέπει να γίνονται συμβιβασμοί με οποιαδήποτε δεδομένη διαδικασία, δεδομένου ότι το υλικό αναμένεται να εκτελέσει τρεις εργασίες. Ωστόσο, πρέπει να επισημανθεί ότι οι υπερσυμπιεστές δίνουν στο σχεδιαστή των κινητήρων συμβατικής εσωτερικής καύσης κάποιους νέους βαθμούς ελευθερίας ως προς τη βελτιστοποίηση.

Με τα όρια της θερμοκρασίας που επιβάλλονται από τα υλικά, ο παλινδρομικός κινητήρας μπορεί να έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία στον κύκλο από τον κινητήρα αεριοστροβίλων. Σε έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης, τα αέρια σε οποιαδήποτε θέση μέσα στον κινητήρα διαφέρουν περιοδικά από ζεστά σε κρύα. Έτσι, η μέση θερμοκρασία κατά τη μεταφορά της θερμότητας στα τοιχώματα δεν είναι ούτε πολύ ζεστή ούτε κρύα. Από την άλλη πλευρά, η θερμοκρασία του αερίου σε οποιαδήποτε θέση του αεριοστροβίλου είναι σταθερή και η θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου είναι πάντα πολύ ζεστή, τείνοντας έτσι να θερμαίνει το υλικό σε αυτό το σημείο σε μεγαλύτερη θερμοκρασία από οποιαδήποτε σε ένα έμβολο ενός κινητήρα.

Η θερμική απόδοση ενός κινητήρα αεριοστροβίλων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αδιαβατική απόδοση των εξαρτημάτων του, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος και τις συνθήκες λειτουργίας τους. Οι μεγάλοι αεριοστροβίλοι τείνουν να είναι πιο αποδοτικοί από τους μικρούς αεριοστροβίλους. Το γεγονός ότι τα αεροπλάνα είναι μεγαλύτερα από τα αυτοκίνητα είναι ένας λόγος που οι αεριοστροβίλοι υπερέρχονται από τους εμβολοφόρους κινητήρες στα αεροπλάνα, αλλά όχι στα αυτοκίνητα. Ομοίως, οι αεριοστροβίλοι αρχίζουν να εισχωρούν στη θαλάσσια βιομηχανία, αν και όχι τόσο γρήγορα, καθώς η ισχύς ανά μονάδα βάρους δεν είναι τόσο σημαντική με τα πλοία όσο με τα αεροπλάνα.

Ένας άλλος παράγοντας που ευνοεί τη χρήση των αεριοστροβίλων σε αεροπλάνα (και πλοία) είναι ότι ο χρόνος που περνά ο κινητήρας σε μερική ή πλήρη φόρτιση είναι μικρός σε σύγκριση με τον χρόνο που περνάει ο κινητήρας σε πλεύση, επομένως ο κινητήρας μπορεί να βελτιστοποιηθεί για μέγιστη απόδοση στην κρουαζιέρα ή στην πτήση. Υπάρχει μια μικρή ανησυχία ότι σε μερική φόρτιση, ή σε συνθήκες απογείωσης η απόδοση του κινητήρα διακυβεύεται. Τα αυτοκίνητα, από την άλλη πλευρά, λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα φορτίου και ταχύτητας, οπότε μια καλή απόδοση σε όλες τις συνθήκες είναι καλύτερη από μια ελαφρώς καλύτερη απόδοση στις πιο πιθανές συνθήκες λειτουργίας και μια χειρότερη απόδοση σε όλα τα υπόλοιπα.

Οι κινητήρες ατμού ή κύκλου ατμού είναι πολύ λιγότερο αποδοτικοί από τους κινητήρες εσωτερικής καύσης, καθώς οι μέγιστες θερμοκρασίες τους είναι περίπου 800 K, πολύ χαμηλότερες από τις θερμοκρασίες αιχμής ($\approx 2500\text{K}$ ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης). Χρησιμοποιούνται σήμερα σχεδόν πλήρως σε σταθερές εφαρμογές, όπου η πηγή ενέργειας αποκλείει τη χρήση κινητήρων εσωτερικής καύσης. Τέτοιες πηγές ενέργειας περιλαμβάνουν άνθρακα, αποθέματα τροφοδοσίας απόβλητα, πυρηνική, ηλιακή και απορριπτόμενη θερμότητα στα καυσαέρια των συσκευών καύσης, συμπεριλαμβανομένων των κινητήρων εσωτερικής καύσης.

Σε ορισμένες εφαρμογές, τα χαρακτηριστικά των εκπομπών του κινητήρα μπορεί να είναι ένας παράγοντας ελέγχου. Στη δεκαετία του 1970, στην πραγματικότητα, έγινε μεγάλη ανάπτυξη για την παραγωγή της ατμομηχανής των αυτοκινήτων, όταν δεν ήταν γνωστό εάν οι εκπομπές από τον κινητήρα εσωτερικής καύσης θα μπορούσαν να μειωθούν αρκετά για να πληρούν τα πρότυπα που υπαγορεύονταν από τη μέριμνα για τη δημόσια υγεία. Ωστόσο, η ανάπτυξη καταλυτικών μετατροπέων, επέτρεψε στον κινητήρα εσωτερικής καύσης να πληροί τα πρότυπα εκπομπών εκείνη την εποχή και να παραμείνει μια κυρίαρχη τεχνολογία πρωτογενούς κίνησης.

1.8 ΒΙΟΑΕΡΙΟ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

Ο τομέας των μεταφορών είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος τομέας κατανάλωσης της ενέργειας στον κόσμο και θεωρείται συνήθως ως ένας από τους πιο ζωτικούς τομείς για την οικονομική ανάπτυξη κάθε χώρας. Σε παγκόσμιο επίπεδο, ο τομέας των μεταφορών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ορυκτά καύσιμα. Η τρέχουσα παγκόσμια ζήτηση για συμβατικά

καύσιμα πετρελαίου σε αυτόν τον τομέα είναι τεράστια και αυξάνεται ραγδαία με την πάροδο του χρόνου. Η παγκόσμια κατανάλωση της ενέργειας στις μεταφορές έχει αυξηθεί σημαντικά σε σχέση με παλαιότερα.

Η βελτιωμένη κατανόηση των πόρων της γης αντικατοπτρίζει ότι τα αποθέματα του πετρελαίου είναι μάλλον περιορισμένα και οι ρύποι που δημιουργούνται από την κατανάλωσή του επηρεάζουν σοβαρά το οικοσύστημα και την ανθρώπινη υγεία. Ως εκ τούτου, η εξαγωγή ορυκτών καυσίμων με βάση το πετρέλαιο και η κατανάλωσή τους πρέπει να μειωθούν προκειμένου να ανταποκριθούν στις νέες περιβαλλοντικές και κλιματικές προκλήσεις και να ελαχιστοποιήσουν τους κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία. Έγινε επίσης κατανοητό ότι το κενό μεταξύ της ζήτησης και της προσφοράς των πετρελαιοειδών πρέπει να καλυφθεί από βιώσιμα εναλλακτικά και φιλικά προς το περιβάλλον καύσιμα. Διεθνείς συνθήκες όπως η Ατζέντα 21, το Πρωτόκολλο του Κιότο ή η Συμφωνία των Παρισίων έχουν ήδη τονίσει τον επείγοντα χαρακτήρα της ανάπτυξης και της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που μπορούν ενδεχομένως να γεφυρώσουν αυτό το χάσμα, προστατεύοντας παράλληλα το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, αυτό αντιμετωπίζεται σε διαφορετικά επίπεδα και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας διεισδύουν με επιτυχία σε διάφορες ενεργειακές αγορές για να επιτύχουν αυτήν την πρόκληση. Η ΕΕ έχει ήδη θέσει στόχο τουλάχιστον το 10% των καυσίμων μεταφορών να προέρχονται από ανανεώσιμους πόρους (με 6% λιγότερα καύσιμα άνθρακα από τα βασικά καύσιμα ντίζελ και βενζίνης). Μεταξύ των διάφορων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η βιομάζα έχει το μεγαλύτερο δυναμικό για να καλύψει τη ζήτηση για τα καύσιμα των μεταφορών παγκοσμίως. Οι πόροι της βιομάζας είναι άφθονοι, πανταχού παρόντες και ευπροσάρμοστοι. Σήμερα η βιομάζα αντιπροσωπεύει το 10% του παγκόσμιου πρωτογενούς ενεργειακού φάσματος. Τα βιοκαύσιμα (καύσιμα μεταφοράς που προέρχονται από βιομάζα) όπως το βιοντίζελ, το βιοαέριο και οι βιοαλκοόλες χρησιμοποιούνται σήμερα ως καύσιμα μεταφοράς παγκοσμίως σε εξειδικευμένες αγορές. Είναι αρκετά περίπλοκο να αποφασιστεί ποια εναλλακτικά καύσιμα είναι η καλύτερη επιλογή για να υποκαταστήσουν τα ορυκτά καύσιμα στον τομέα των μεταφορών σε τοπικό πλαίσιο. Το βιοαέριο εμφανίζεται σαφώς ως εναλλακτικό καύσιμο για εφαρμογές των οχημάτων παγκοσμίως και έχει προσελκύσει αυξημένη προσοχή τα τελευταία χρόνια.

Οι κύριες κινητήριες δυνάμεις για την προσαρμογή του βιοαερίου στον τομέα των μεταφορών είναι οι εξής:

- αυστηρότεροι κανονισμοί και φόροι για τη διάθεση των αποβλήτων, τους κινδύνους για την υγεία και τις εκπομπές μεθανίου (CH_4) από τα απόβλητα
- αύξηση της ζήτησης για ανανεώσιμους πόρους καυσίμων
- υποχρέωση για χρήση καυσίμων μεταφοράς χαμηλής έντασης άνθρακα, και
- υποχρέωση βελτίωσης της ποιότητας του αστικού αέρα χρησιμοποιώντας καθαρά/πράσινα καύσιμα μεταφορών

Η τεχνολογία του βιοαερίου είναι τεχνολογία διπλού σκοπού αφού μειώνει τον όγκο των στερεών οργανικών αποβλήτων καθώς τα μετατρέπει σε χρήσιμα αέρια καύσιμα, αποφεύγοντας έτσι την άμεση εκπομπή μεθανίου (CH_4) στην ατμόσφαιρα. Σύμφωνα με μια εκτίμηση, ένας μετρικός τόνος οργανικών στερεών αποβλήτων μπορεί ενδεχομένως να εκπέμπει 50-110 m^3 CO_2 και 90-140 m^3 CH_4 στην ατμόσφαιρα, εάν δεν υποβληθεί σε επεξεργασία και έχει ως αποτέλεσμα απώλεια ενέργειας ισοδύναμης με ~ 400.

Το βιοαέριο παράγεται κυρίως από κάθε οργανικό απόβλητο, το οποίο διασπάται από μικροοργανισμούς και ένζυμα σε περιβάλλον χωρίς οξυγόνο, με μια διαδικασία που ονομάζεται αναερόβια πέψη. Τα τυπικά αποθέματα των ζωοτροφών περιλαμβάνουν μια ποικιλία αποβλήτων όπως ιλύς λυμάτων, κοπριά (γουρούνι, πουλερικά, βοοειδή και ανθρώπινα περιττώματα), ενεργειακές καλλιέργειες (καλαμπόκι, γλυκό σόργο, ζαχαρότευτλα κλπ.), γεωργικά απόβλητα (ρύζι και άχυρο σιταριού, ρίζωμα μανιόκα, υπολείμματα ζαχαροκάλαμου, καλαμπόκι κ.λπ.), οργανικά στερεά απόβλητα από βιομηχανίες, απόβλητα τροφίμων από σπίτια και εστιατόρια, απόβλητα από λαχαναγορές, απόβλητα από βιομηχανίες επεξεργασίας τροφίμων, μύλοι ζάχαρης, μεταποίηση ψαριών και σφαγεία, αστικά στερεά απόβλητα (MSW). Το βιοαέριο παράγεται με αναερόβια ζύμωση και η συνολική διαδικασία παραγωγής ακολουθεί διαδοχικές βιοχημικές διεργασίες, συμπεριλαμβανομένης της υδρόλυσης, της οξέωσης, της ακετογένεσης και της μεθανογένεσης.

Η απόδοση του αερίου επηρεάζεται γενικά από τον τύπο της πρώτης ύλης που χρησιμοποιείται, το εύρος των θερμοκρασιών (για μεσοφιλικές: 30-40 ° C) και το pH (7-8.5). Το βιοαέριο που παράγεται έτσι είναι ένα μείγμα αερίων, που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2).

Το βιοαέριο ως ανανεώσιμος ενεργειακός πόρος, μπορεί να έχει πολλαπλές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας και της ενέργειας μαγειρέματος, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως καύσιμο για τα οχήματα.

Το βιοαέριο ως καύσιμο μεταφοράς μπορεί δυνητικά να μειώσει τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου (GHG) από τον τομέα των μεταφορών (πιθανές μειώσεις 60-80% σε σύγκριση με τις δραστηριότητες βενζίνης). Οι μεγαλύτεροι παραγωγοί βιοαερίου το 2016 για εφαρμογές των μεταφορών ήταν η Γερμανία, η Σουηδία, η Ελβετία, το Ηνωμένο Βασίλειο και οι ΗΠΑ. Παρόλα αυτά, η συμβολή του βιοαερίου στον τομέα των μεταφορών παγκοσμίως παραμένει αρκετά ασήμαντη (<1%), κάτι που δεν αντικατοπτρίζει πραγματικά τις δυνατότητές του.

Το αναβαθμισμένο βιοαέριο, είτε με τη μορφή CBM είτε LBM, θεωρείται ως μια ανανεώσιμη εναλλακτική λύση στα συμβατικά ορυκτά καύσιμα που μπορούν να τροφοδοτήσουν κατάλληλα διαφορετικές κατηγορίες οχημάτων, συμπεριλαμβανομένων των ελαφρών οχημάτων, των λεωφορείων διαμετακόμισης, των βαρέων φορτηγών κλπ. Η χρήση του βιομεθανίου ως καύσιμο των οχημάτων είναι επομένως μια πολλά υποσχόμενη λύση στα τρέχοντα περιβαλλοντικά ζητήματα, καθώς μπορεί δυνητικά να μειώσει τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα μεταφοράς και να μειώσει και την εξάρτηση από εισαγόμενα καύσιμα πετρελαίου (Anderson 2015). Το βιομεθάνιο που έχει παρόμοια ποιότητα με το NG μπορεί να χειρίζεται οχήματα NG χωρίς συγκεκριμένες απαιτήσεις. Ωστόσο, το βιομεθάνιο είναι καύσιμο χαμηλής ενέργειας σε όγκο σε σύγκριση με τη βενζίνη (1 λίτρο βενζίνης ισοδυναμεί με 4 λίτρα CBG στα 200 bar ή 1,7 λίτρα LBM)

Τα οχήματα βενζίνης μπορούν είτε να λειτουργούν σε λειτουργία δύο καυσίμων είτε μόνο σε λειτουργία αερίου. Η μετατροπή δύο καυσίμων γίνεται απλά με την ενσωμάτωση ενός δεύτερου συστήματος τροφοδοσίας καυσίμου για κατανάλωση βιοαερίου, ενώ η άλλη λειτουργία απαιτεί μια απλή μετατροπή για να λειτουργεί ως αποκλειστικός κινητήρας αερίου. Τόσο στη μία όσο και στην άλλη περίπτωση, οι μπουκάλες αποθήκευσης του βιομεθανίου ενσωματώνονται στο υπάρχον σύστημα τροφοδοσίας, με επιπλέον κόστος για τα οχήματα. Τα τρέχοντα οχήματα μπορούν να εξοπλιστούν εκ νέου για λειτουργία μόνο με καύσιμο ή αέριο για εφαρμογές βιομεθανίου.

Ένα βενζινοκίνητο όχημα μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε όχημα βενζίνης δύο καυσίμων χρησιμοποιώντας το kit μετατροπής που διατίθεται στο εμπόριο, το οποίο συνήθως αποτελείται από μπουκάλες αποθήκευσης καυσίμων, σωλήνες καυσίμου, ρυθμιστή και αναμικτήρα καυσίμου-αέρα. Τα οχήματα δύο καυσίμων μπορούν εύκολα να αλλάξουν μεταξύ βενζίνης και φυσικού αερίου ή βιομεθανίου μέσω ενός διακόπτη στο ταμπλό. Δεδομένου ότι

το μεθάνιο έχει μεγαλύτερο αριθμό οκτανίων από τη βενζίνη, οι μηχανές που λειτουργούν με βιομεθάνιο μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλότερο λόγο συμπίεσης, οδηγώντας σε ελαφρώς καλύτερη θερμική απόδοση από τη λειτουργία της βενζίνης. Τα ειδικά οχήματα βιομεθανίου μπορούν να βελτιστοποιηθούν για μια ανώτερη θερμική απόδοση. Σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης του βιομεθανίου είναι ότι οι εκπομπές CO_2 μπορούν να μειωθούν έως και 99% εάν καταναλώνεται ηλεκτρική ενέργεια για την αναβάθμιση και τη συμπίεση του βιοαερίου. Για παράδειγμα, η ηλεκτρική ενέργεια είναι σχεδόν απαλλαγμένη από εκπομπές CO_2 στη Σουηδία και την Ελβετία, οι οποίες είναι γνωστές ως οι κορυφαίες χώρες παραγωγής και χρήσης του βιοαερίου στον κόσμο. Έχει αναφερθεί ότι εκτός από το CO_2 , οι εκπομπές NO_x και μη μεθανίου υδρογονανθράκων (NMHC) μειώνονται επίσης σημαντικά για τη λειτουργία του βιομεθανίου.

Τα οχήματα ντίζελ, από την άλλη πλευρά, μπορούν να λειτουργούν σε λειτουργία διπλού καυσίμου για τροφοδοσία βιοαερίου και να καταναλώνουν ντίζελ ως δευτερεύον καύσιμο και βιοαέριο ως κύριο καύσιμο ταυτόχρονα. Τέτοιες λειτουργίες διπλού καυσίμου κυρίως σε υψηλά φορτία κινητήρα υπόσχονται μια πετρελαιοκίνητη ή κάπως καλύτερη απόδοση. Όπως και οι βενζινοκινητήρες, το σύστημα διπλού καυσίμου απαιτεί επίσης περιορισμένες τροποποιήσεις του κινητήρα και τη δυνατότητα να λειτουργεί με 100% ντίζελ ως εφεδρικό, το οποίο είναι το κύριο πλεονέκτημά του. Συνήθως, σε λειτουργία διπλού καυσίμου, το ντίζελ 60-65% αντικαθίσταται από βιοαέριο και έτσι μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Οι εκπομπές σωματιδίων από τα οχήματα με καύση βιομεθανίου μειώνονται γενικά σημαντικά σε σύγκριση με τους σύγχρονους κινητήρες ντίζελ εξοπλισμένους με φίλτρα σωματιδίων.

1.8.1 Εμπόδια για την προσαρμογή του βιοαερίου στα οδικά οχήματα

Αν και το βιομεθάνιο ως καύσιμο για εφαρμογές οχημάτων έχει τεράστιο δυναμικό, η προσαρμογή του ως καυσίμου των οχημάτων αντιμετωπίζει εμπόδια, τα οποία δεν έχουν ακόμη ξεπεραστεί. Υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με την παραγωγή του βιομεθανίου, τη διανομή του, τις μετατροπές των οχημάτων για την προσαρμογή του βιοαερίου, τη συμπεριφορά των καταναλωτών, τους συναφείς οικονομικούς κινδύνους, την αγορά των καυσίμων, τις συγκεκριμένες πολιτικές ανά χώρα κ.λπ. Αυτά αναφέρονται παρακάτω:

- Παρόλο που η παραγωγή του βιοαερίου είναι ελκυστική λόγω των πολλαπλών πλεονεκτημάτων της, η παραγωγή του βιομεθανίου προκαλεί ανησυχία καθώς απαιτεί σημαντικές επενδύσεις, χρήση σύνθετων συστημάτων, υψηλές τεχνολογικές δεξιότητες για εγκατάσταση, λειτουργία και συντήρηση και απαίτηση πρόσθετης ενέργειας.
- Η διαθεσιμότητα των πρώτων υλών βιομάζας είναι γενικά αποκεντρωμένη, γεγονός που σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να περιορίσει την ικανότητα παραγωγής του βιοαερίου ή να αυξήσει τις ανάγκες μεταφοράς. Καθένα από αυτά μπορεί να οδηγήσει σε υψηλό κόστος παραγωγής του βιοαερίου.
- Το κόστος παραγωγής του βιομεθανίου μπορεί να είναι αρκετά υψηλό, αφού εξαρτάται από την ποιότητα και την ποσότητα του βιοαερίου, την τεχνολογία που χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό και την αναβάθμιση του βιοαερίου, τη θέση των εγκαταστάσεων, τις ειδικές για

κάθε χώρα πολιτικές (αναπτυσσόμενες χώρες και περιπτώσεις ανεπτυγμένων χωρών) κ.λπ. συνθήκες. Η παροχή του βιομεθανίου ως καυσίμου μπορεί να είναι σχετικά πιο δαπανηρή σε σύγκριση με τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα.

- Η έλλειψη ευαισθητοποίησης μεταξύ των πολιτικών και του κοινού σχετικά με τα οφέλη του βιοαερίου ως ανανεώσιμης πηγής ενέργειας για τις μεταφορές αποτελεί σημαντικό εμπόδιο για την απόκτηση επαρκούς υποστήριξης από τους πιθανούς ενδιαφερόμενους.
- Τα μακροπρόθεσμα οικονομικά οφέλη από τη χρήση οχημάτων φυσικού αερίου ή βιομεθανίου σε σύγκριση με οχήματα βενζίνης ή ντίζελ συχνά δεν είναι γνωστά από τους καταναλωτές.
- Η υπάρχουσα υποδομή για οχήματα που λειτουργούν με φυσικό αέριο μπορεί να μοιραστεί δυνητικά οχήματα με βιομεθάνιο. Ωστόσο, εάν δεν υπάρχει τέτοια υποδομή (δίκτυο φυσικού αερίου, πρατήρια καυσίμων, οχήματα φυσικού αερίου), η ανάπτυξη μιας εντελώς νέας υποδομής της προσαρμογής του καυσίμου του βιοαερίου για οδικά οχήματα μπορεί να είναι δύσκολη.
- Ακόμη και με την υπάρχουσα υποδομή για οχήματα NG, η έλλειψη των κατάλληλων κανονισμών σχετικά με την πρόσβαση στο δίκτυο του φυσικού αερίου μπορεί να εμποδίσει την προσαρμογή του καυσίμου από βιοαέριο.
- Το βιοαέριο ως αέριο καύσιμο μπορεί να μην προσελκύει τους οδηγούς και τους καταναλωτές που χρησιμοποιούν συμβατικά υγρά καύσιμα πετρελαίου. Τεχνικοί περιορισμοί συμπεριλαμβανομένης της εμβέλειας της οδήγησης, του χώρου στο αυτοκίνητο που καταλαμβάνεται από τη μπουκάλια αερίου μεγάλου μεγέθους, μπορεί να αναδειχθούν κρίσιμοι για κάποιους σε σύγκριση με τη συμβατική λειτουργία των υγρών καυσίμων.
- Η έλλειψη βιώσιμων και αποτελεσματικών ρυθμιστικών πλαισίων συχνά αποτυγχάνει να πείσει τους ενδιαφερόμενους φορείς για επενδύσεις έργων με βάση το βιοαέριο.
- Οι υπάρχουσες δομές και τα ενδιαφερόμενα μέρη είτε στην αγορά των καυσίμων είτε στην αγορά των οχημάτων συχνά δεν επιτρέπουν την είσοδο νέου μέλους.
- Η έλλειψη ευαισθητοποίησης για τα προβλήματα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που προκαλούνται από τα οχήματα, ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές που μπορούν να υποχρεώσουν τους πελάτες να αναζητήσουν πιο πράσινα καύσιμα, όπως βιοαέριο για οχήματα.
- Η έλλειψη ευαισθητοποίησης του τμήματος της διαχείρισης των αποβλήτων σχετικά με τους αποτελεσματικούς και φιλικούς προς το περιβάλλον τρόπους διάθεσης των αποβλήτων καθώς και θέματα

σχετικά με τα απόβλητα στην ενέργεια υπονομεύουν συχνά τη σημασία της παραγωγής βιοαερίου και των εφαρμογών του.

- Έλλειψη χρηματοδότησης και οικονομική υποστήριξη για τους επενδυτές και τους πελάτες να υιοθετήσουν το βιοαέριο ως καύσιμο για τα οχήματα.
- Η ελλιπής τεχνολογία, η εξειδικευμένη εργασία και η επαρκής τεχνική υποστήριξη συχνά εμποδίζει την προσαρμογή νέων τεχνολογιών, όπως η παραγωγή βιοαερίου/βιομεθανίου και η χρήση τους ως καύσιμο μεταφοράς.
- Διαθεσιμότητα άλλων εναλλακτικών λύσεων για φιλικές προς το περιβάλλον μεταφορές, όπως βιοαλκοόλες και ηλεκτρικά οχήματα.

Η χρήση του αναβαθμισμένου βιοαερίου ή βιομεθανίου για εφαρμογές οχημάτων είναι πολλά υποσχόμενη, καθώς τα οργανικά απόβλητα είναι τα αποθέματα των ζωοτροφών για την παραγωγή του βιοαερίου. Η τεχνολογία της παραγωγής του βιοαερίου είναι ελκυστική γιατί χειρίζεται τα οργανικά απόβλητα με οικονομικό τρόπο και λύνει ζητήματα όπως η μείωση των αποβλήτων και η πρόληψη των εκπομπών GHG (CH₄) στο περιβάλλον, ενώ παρέχει ανανεώσιμο βιοαέριο για πολλαπλές εφαρμογές και πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά οργανικό λίπασμα για τη γεωργία.

Η χρήση του βιοαερίου ως καύσιμο των οχημάτων έχει αυξηθεί λόγω των περιβαλλοντικών και υγειονομικών προβλημάτων και αυτά τα οχήματα εκπέμπουν δυνητικά χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, καθώς παρέχουν πράσινες μεταφορές, ιδιαίτερα στις πόλεις. Το βιοαέριο ως καύσιμο των οχημάτων έχει τεράστιες δυνατότητες να υποκαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα όπως η βενζίνη και το ντίζελ και να μειώσει την εξάρτηση από τα εισαγόμενα καύσιμα του πετρελαίου.

Οι τεχνολογίες του βιοαερίου και του βιομεθανίου έχουν ήδη ωριμάσει. Ωστόσο, υπάρχει περιθώριο για περαιτέρω E&A ως προς την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής. Οι τρέχουσες τεχνολογικές βελτιώσεις στις τεχνολογίες αναβάθμισης του βιοαερίου έχουν καταστήσει ήδη το κόστος του βιομεθανίου ανταγωνιστικό σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα για εφαρμογές οχημάτων. Η χρήση του βιοαερίου για εφαρμογές οχημάτων έχει αυξηθεί σε χώρες της ΕΕ (όπως η Σουηδία, η Γερμανία, η Δανία, η Ελβετία, η Φινλανδία κ.λπ.) λόγω της διαθεσιμότητας των διαφόρων προγραμμάτων υποστήριξης βιομεθανίου. Πολλοί πάροχοι υπηρεσιών βιοαερίου/βιομεθανίου είναι πλέον διαθέσιμοι, ειδικά σε χώρες της ΕΕ. Το βιοαέριο/βιομεθάνιο μπορεί να θεωρηθεί ως ο πιο προσβάσιμος ενεργειακός πόρος παγκοσμίως αφού προέρχεται από τα απόβλητα. Ωστόσο, υπάρχουν εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν όσον αφορά την οικονομικά αποδοτική τεχνολογία, την απαίτηση σημαντικών επενδύσεων για την ανάπτυξη των απαραίτητων υποδομών, την ανάπτυξη καυσίμων βιοαερίου καθώς και την αγορά οχημάτων φυσικού αερίου, την έλλειψη επίγνωσης των πλεονεκτημάτων της χρήσης βιοαερίου ως καυσίμου των οχημάτων κ.λπ. Χώρες που ήδη διαθέτουν εγκαταστάσεις NG και χρησιμοποιούν οχήματα NG βρίσκονται σε πλεονεκτική θέση καθώς το βιομεθάνιο με τα επιθυμητά πρότυπα ποιότητας μπορεί απλά να εγχυθεί στο υπάρχον δίκτυο NG. Συνεπώς, απαιτούνται απαραίτητες πρωτοβουλίες και προσπάθειες από κυβερνητικούς-ιδιωτικούς φορείς καθώς και από οργανισμούς διαχείρισης των αποβλήτων για να ξεπεραστούν τα αναφερόμενα εμπόδια. Σε αρκετή συζήτηση στις μέρες μας υπάρχει το γεγονός ότι αυτό το καύσιμο ίσως αποτελέσει την ενδιάμεση λύση για «πιο πράσινα» οχήματα και την αναδιαμόρφωση κάποιων εκ των κινητήρων εσωτερικής καύσης.

2. ΈΡΕΥΝΑ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

Το παρόν κεφάλαιο αναφέρεται στα διάφορα σημεία έρευνας στους κινητήρες εσωτερικής καύσης των τελευταίων χρόνων, τα οποία βοηθούν στον προσδιορισμό του μέλλοντος και της τάσης σχετικά με τη χρήση τους.

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα τελευταία χρόνια, υπάρχει μια τάση υβριδοποίησης των οχημάτων και των συστημάτων που χρησιμοποιούν κινητήρα ICE γενικότερα. Φυσικά, μία μόνο τεχνολογία δε μπορεί από μόνη της να οδηγήσει στη λύση του περιβαλλοντικού προβλήματος μέσω της μείωσης για παράδειγμα του CO_2 . Οι διάφορες διαθέσιμες τεχνολογίες που υπάρχουν σήμερα θα πρέπει να αναλυθούν ώστε να υπάρξει ο κατάλληλος συνδυασμός τους.

Σε επίπεδο παραγωγής των καυσίμων, τα βιοκαύσιμα (αέρια ή υγρά) αντιπροσωπεύουν μια διώξιμη λύση όσον αφορά τη μείωση του CO_2 , δεδομένου του κύκλου "σχεδόν μηδενικού" CO_2 που τα χαρακτηρίζει. Ένα βιοκαύσιμο είναι ένα καύσιμο που παράγεται μέσω σύγχρονων βιολογικών διεργασιών, όπως η γεωργία και η αναερόβια πέψη. Από την άλλη οι γεωλογικές διεργασίες από την προϊστορική βιολογική ύλη παράγουν ορυκτά καύσιμα, όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο. Εάν οι εκπομπές του CO_2 μπορούν να μειωθούν με τα βιοκαύσιμα, τα προβλήματα της ρύπανσης παραμένουν ουσιαστικά αμετάβλητα. Ωστόσο, ο σεβασμός των κριτηρίων βιωσιμότητας για τα βιοκαύσιμα περιορίζει την εκμετάλλευση της βιομάζας για την παραγωγή βιοκαυσίμων.

Άλλες λύσεις που έχουν ερευνηθεί είναι τα συνθετικά καύσιμα, όπως το υδρογόνο, το σύνθετο αέριο και τα λεγόμενα ηλεκτρονικά καύσιμα. Η παραγωγή τους, η οποία μπορεί να συμβάλει στην ανακύκλωση του CO_2 που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα κατά την καύση, απαιτεί σε αρκετές περιπτώσεις σημαντική ποσότητα ενέργειας. Επομένως, τα συνθετικά καύσιμα έχουν νόημα μόνο εάν η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή τους λαμβάνεται από ανανεώσιμες πηγές.

Μια καλή ενδιάμεση λύση αναγνωρίζεται ως η χρήση εναλλακτικών ορυκτών καυσίμων που είναι ήδη διαθέσιμα στη φύση, όπως το μεθάνιο, το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου. Με τον τρόπο αυτό, μετριάζεται ο αντίκτυπος της φάσης παραγωγής των καυσίμων. Η χρήση του μεθανίου οδηγεί στη μείωση, αλλά δεν αποφεύγει την εκπομπή του CO_2 και των ρύπων.

Σε επίπεδο παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, τα τελευταία χρόνια έχει συμβάλει σημαντικά στη μείωση του CO_2 από τη σημαντική εξάπλωση των εκμεταλλεύσεων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Φωτοβολταϊκά εργοστάσια, αιολικά πάρκα, γεωθερμικοί και υδροηλεκτρικοί σταθμοί, αντιπροσωπεύουν σήμερα περισσότερο από το 20% της παγκόσμιας ζήτησης της ενέργειας. Το μεγάλο πρόβλημα αυτών των τεχνολογιών αντιπροσωπεύεται από τη διαθεσιμότητά τους, εγγενώς περιορισμένη σε χρόνο και χώρο, καθώς και την αξιοπιστία τους. Είναι προφανές, λοιπόν, ότι επί του παρόντος θεωρούνται ως ολοκληρωτικές και όχι ως υποκατάστατες πηγές ενέργειας. Μια πιθανή λύση στα προαναφερθέντα προβλήματα θα ήταν

η ανάπτυξη τεχνολογιών ικανών να αποθηκεύουν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής διαθεσιμότητας (όπως γίνεται σήμερα στις περισσότερες υδροηλεκτρικές μονάδες όταν υπάρχει υπερβάλλουσα ηλεκτρική ενέργεια, που παράγεται τις νυχτερινές ώρες από θερμικούς σταθμούς, χρησιμοποιείται για την άντληση νερού σε μεγάλο υψόμετρο, οπότε βοηθά στην επαναφόρτιση των υδροηλεκτρικών σταθμών την επόμενη ημέρα). Κατά την άποψη αυτή, η εκμετάλλευση της υπερβάλλουσας ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται όταν είναι διαθέσιμη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή των προαναφερθέντων συνθετικών καυσίμων, αέριων και υγρών.

Τέλος, σε επίπεδο σχεδιασμού του κινητήρα, μια σημαντική συμβολή στη μείωση του CO_2 μπορεί να προέλθει από τη μείωση των βοηθητικών απωλειών ισχύος, αλλά και την ανάκτηση της θερμικής ισχύος που συνήθως σπαταλάτε στην εξάτμιση, για παράδειγμα, μέσω τεχνολογίας υπερσυμπίεσης, οργανικών κύκλων Rankine και θερμοηλεκτρικών γεννητριών. Επιπλέον, για αρκετές εφαρμογές, όπως ο τομέας των μεταφορών, η ελάφρυνση του κινητήρα καθώς και η μείωση του μεγέθους οδηγούν στη μείωση του συνολικού βάρους του φορέα μεταφοράς. Στην πρώτη περίπτωση, η μείωση του βάρους του κινητήρα επιτυγχάνεται με ελαφρύτερα υλικά, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, ο στόχος είναι να μειωθεί ο κυβισμός του κινητήρα διατηρώντας αμετάβλητη την απόδοση του κινητήρα. Οι υβριδικοί κινητήρες όπου υπάρχουν πολλαπλές μορφές κινητήριας ισχύος οδηγούν επίσης στη μείωση των επιπέδων CO_2 , επειδή επιτρέπουν τη λειτουργία των θερμικών κινητήρων στις περιοχές του χαρακτηριστικού χάρτη με τις υψηλότερες τιμές απόδοσης της μετατροπής του καυσίμου. Εάν ένα σύστημα αποθήκευσης είναι ενσωματωμένο στον κινητήρα, τότε μπορούν να εφαρμοστούν και άλλες τεχνολογίες που οδηγούν σε μείωση του CO_2 , όπως τα συστήματα ανάκτησης της κινητικής ενέργειας.

Όπως προαναφέρθηκε, όλες οι παραπάνω τεχνολογίες δε μπορούν να θεωρηθούν ως μεμονωμένες, αλλά όλες θα συμβάλουν στη μείωση του CO_2 . Για να επιτευχθεί αυτό το αποτέλεσμα, θα χρειαστεί ένα συνεχώς αυξανόμενο επίπεδο ολοκλήρωσης στο μέλλον. Η ανάπτυξη του ICE θα οριστικοποιηθεί στη συνέχεια παρέχοντας ένα μηχάνημα κατάλληλο για να εκμεταλλευτεί όλες τις ευκαιρίες για τη μείωση των εκπομπών CO_2 , ενώ θα ικανοποιήσει την ενεργειακή ζήτηση. Στα επόμενα υποκεφάλαια γίνεται μια πιο λεπτομερής και εξειδικευμένη ανάλυση των νέων τεχνολογιών και μελετών των ICE.

2.2 ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΜΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΠΙΔΑΚΑ

Η διαρκής επιθυμία για εξοικονόμηση των καυσίμων συνδυάζεται με μια αυξανόμενη σύγχρονη επίγνωση των επιβλαβών περιβαλλοντικών επιπτώσεων των εκπομπών των ρύπων από τον τομέα των μεταφορών. Σε απάντηση, η όλο και πιο αυστηρή παγκόσμια νομοθεσία για τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου θα απαιτήσει μια σταδιακή αλλαγή στην απόδοση της μηχανής εσωτερικής καύσης (ICE). Ταυτόχρονα, η μείωση της δημοτικότητας των κινητήρων ντίζελ στην αγορά των επιβατικών αυτοκινήτων ασκεί πίεση στην ικανότητα των κατασκευαστών να τηρούν τη νομοθεσία για τη μέση οικονομία καυσίμου του συνολικού στόλου. Είναι επομένως επιτακτικό να αναπτυχθούν και να εφαρμοστούν τεχνολογίες που μειώνουν σημαντικά την κατανάλωση καυσίμου των κινητήρων ανάφλεξης με σπινθήρα βενζίνης (SI).

Μια μέθοδος που διερευνάται όλο και περισσότερο για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι η καύση αραιής βενζίνης [13]. Ο κύριος περιορισμός στην ανάπτυξη αραιών συστημάτων καύσης είναι η λιγότερο ευνοϊκή ποιότητα ανάφλεξης του μείγματος. Αυτό επέβαλε την ανάπτυξη υψηλότερων πηγών ανάφλεξης ενέργειας [14]. Μια εφαρμογή καύσης πριν από τον θάλαμο είναι μια τέτοια τεχνολογία, αφού έχει ερευνηθεί εκτενώς. Οι έννοιες της καύσης πριν

από το θάλαμο έχουν αποδείξει τη δυνατότητα σταθερής καύσης του κύριου θαλάμου σε υψηλότερα επίπεδα αραίωσης από αυτά που επιτρέπονται στους τυπικούς κινητήρες SI [15].

Παρά την εκτεταμένη ιστορία έρευνας και εφαρμογής των προ-θαλάμων, παραμένουν πρακτικά εμπόδια στη σύγχρονη εφαρμογή αυτών των συστημάτων στους κινητήρες των επιβατικών αυτοκινήτων. Μια ιστορική βασική πρόκληση για τους προ-θαλάμους ήταν η εξασφάλιση αποδεκτών επιδόσεων χαμηλού φορτίου, αδράνειας και ψυχρής εκκίνησης [16]. Η αυστηρότητα των προτύπων των εκπομπών των καυσαερίων από την τελευταία σημαντική εμπορική εφαρμογή ενός προθαλάμου σε κινητήρα επιβατικών αυτοκινήτων έχει καταστήσει τις αποδεκτές επιδόσεις ιδιαίτερα κρίσιμες. Προηγούμενη έρευνα είχε προτείνει ότι η γεωμετρία πριν από τον θάλαμο πρέπει να είναι προσαρμοσμένη ώστε να περιλαμβάνει αποδεκτές επιδόσεις χαμηλού φορτίου και να διατηρεί το αναμενόμενο όφελος της απόδοσης σε μερικό φορτίο και ότι ο προσδιορισμός μιας κοινής γεωμετρίας προ-θαλάμου που μπορεί να επιτύχει και τα δύο είναι δύσκολος [17].

Το «MAHLE Jet Ignition» (MJI) είναι μια έννοια προ-θαλάμου με βοηθητικό καύσιμο που έχει αναπτυχθεί εδώ και αρκετά χρόνια [18]. Η ιδέα ενσωματώνει στοιχεία που μελετήθηκαν σε προηγούμενες έρευνες πριν τον θάλαμο, όπως: μικρός όγκος προθαλάμου (<5% του όγκου του κεντρικού χώρου καύσης) για ελαχιστοποίηση του όγκου της ρωγμής και της απώλειας θερμότητας, μικρή διάμετρος στομίου για την προώθηση υψηλού βαθμού απόσβεσης της φλόγας και βοηθητική τροφοδοσία στον προθάλαμο για να επιτρέψουν ξεχωριστές στρατηγικές τροφοδοσίας για τον προθάλαμο και τον κύριο θάλαμο.

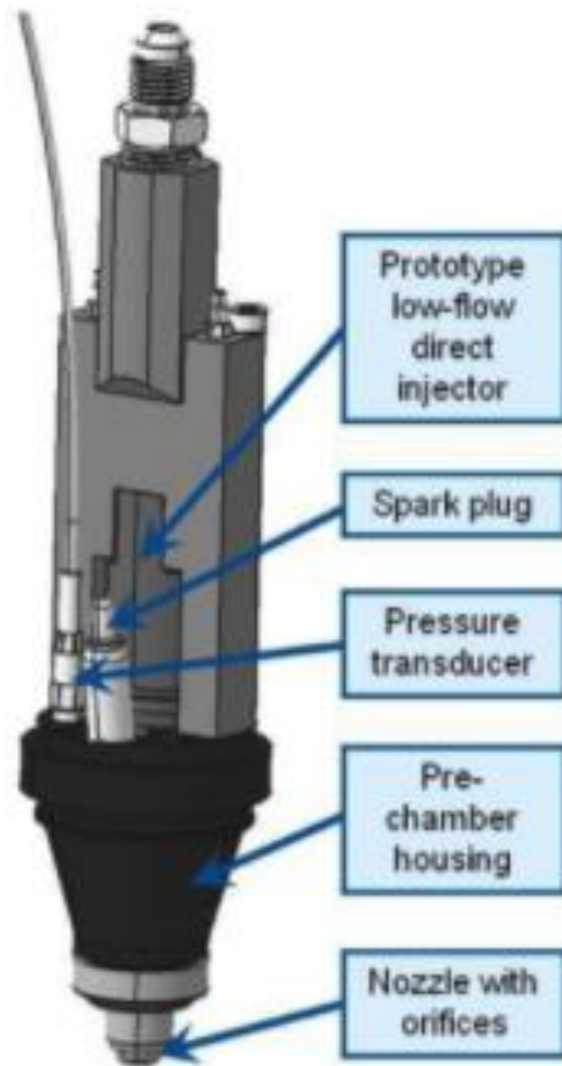
Ένα πρωτότυπο μπεκ ψεκασμού (άμεσου ψεκασμού) χαμηλής ροής (DI) παρέχει ένα ξεχωριστό γεγονός καύσης στον προθάλαμο. Αυτό επιτρέπει τον ακριβή, αποτελεσματικά αποσυνδεδεμένο έλεγχο του μείγματος και στους δύο θαλάμους. Αυτός ο εγχυτήρας χαμηλής ροής DI επιτρέπει επίσης τη χρήση μιας κοινής υγρής βενζίνης τόσο για την έγχυση του προ-θαλάμου, όσο και για τον κύριο θάλαμο. Ιστορικά, το βοηθητικό καύσιμο που εγχέεται στον προθάλαμο είναι αέριο λόγω της εύκολης μέτρησης και της επαναληψιμότητας, αλλά και των προβλημάτων πρόσκρουσης της υγρής βενζίνης. Και τα δύο αυτά ζητήματα έχουν μετριαστεί μέσω της ανάπτυξης του προ-θαλάμου εγχυτή. Έως και το 3% περίπου του συνολικού καυσίμου του συστήματος εγχέεται μέσω βοηθητικού προ-θαλάμου ψεκασμού. Το υπόλοιπο παραδίδεται στον κύριο θάλαμο καύσης συμβατικά με ψεκασμό καυσίμου θύρας (PFI), ή καύσιμο DI χρησιμοποιώντας προσαρμόσιμους εγχυτήρες καυσίμου.

Η καύση πριν από το θάλαμο δημιουργεί μια ταχεία αύξηση της πίεσης στον προθάλαμο, αναγκάζοντας προς πίεση το περιεχόμενο στον κύριο θάλαμο μέσω των στομιών του ακροφυσίου. Ένας υψηλός βαθμός απόσβεσης της φλόγας επιτυγχάνεται με τον περιορισμό των διαμέτρων των στομιών στο ακροφύσιο. Αυτή η απόσβεση της ανάφλεξης με πίδακα είναι αυτό που τη διαφοροποιεί από ένα σύστημα ανάφλεξης [19]. Οι πίδακες που προκύπτουν ξεκινούν την καύση του κύριου θαλάμου μέσω χημικών, θερμικών και παραγμένων επιδράσεων.

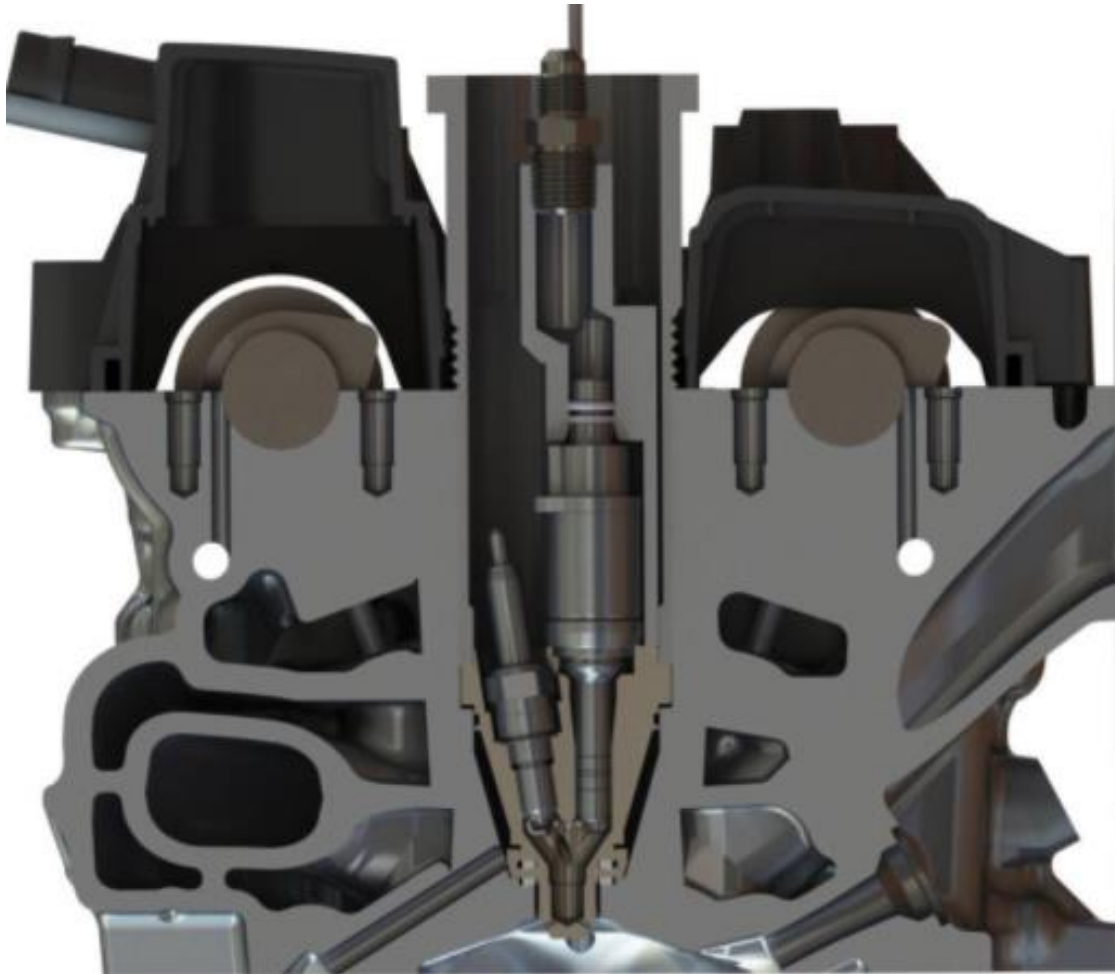
Η χημική επίδραση είναι προϊόν των ριζικών ειδών που παρουσιάζονται στους πίδακες. Αυτά τα είδη είναι εξαιρετικά αντιδραστικά και αναφλέγουν εύκολα το μείγμα αέρα-καυσίμου που υπάρχει στον κύριο θάλαμο. Περιέχοντας εν μέρει ή πλήρως καμένα προϊόντα καύσης, αυτοί οι πίδακες βρίσκονται σε αυξημένη θερμοκρασία όταν εισέρχονται στον κύριο θάλαμο, πάνω από τη θερμοκρασία αυτόματης ανάφλεξης της βενζίνης, παρέχοντας έτσι μια θερμική κατάσταση για την καύση του κύριου θαλάμου. Τέλος, οι πίδακες αναδύονται με ταχύτητα ανάλογη της πίεσης που προκύπτει από την καύση πριν το θάλαμο. Η ταχύτητα επιτρέπει στους πίδακες να διεισδύσουν στον κύριο θάλαμο, παρασύροντας το μείγμα αέρα-καυσίμου στον κύριο θάλαμο καθώς προχωρούν. Αυτό το ταραχώδες αποτέλεσμα εξασφαλίζει την αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγμένων πιδάκων και του φορτίου, παράγοντας κατάλληλες τοπικές συνθήκες μείγματος για ανάφλεξη και επακόλουθη διάδοση της φλόγας.

Το ακροφύσιο πολλαπλών οπών παράγει πολλαπλές, κατανεμημένες θέσεις ανάφλεξης σε όλο τον κύριο θάλαμο, με αποτέλεσμα σύντομες διάρκειες καύσης. Το σύστημα ανάφλεξης με πίδακα έχει σχεδιαστεί για να είναι μια χαμηλού κόστους, πρακτική τεχνολογία καύσης που επιτρέπει την εξαιρετικά λιτή καύση. Μια απόδοση της τοποθέτησης του προ θαλάμου σε μια τυπική κυλινδροκεφαλή φαίνεται στο Σχήμα 2.1: Μοντέλο που δείχνει μερικώς το συγκρότημα προθαλάμου σε κυλινδροκεφαλή και στο Σχήμα 2.2: Μοντέλο που δείχνει μερικώς το συγκρότημα προθαλάμου σε κυλινδροκεφαλή [20].

Ο στόχος της μελέτης των Brunce M. P. et al. (2019) είναι να ποσοτικοποιήσουν τις προκλήσεις που σχετίζονται με τη λειτουργία του χαμηλού φορτίου σταθερής κατάστασης, την αδράνεια και τη λειτουργία καθυστέρησης του σπινθήρα στην ψυχρή εκκίνηση (CSSR) για θέρμανση του καταλύτη με MJI. Προτείνονται και διερευνώνται διάφορες ελαφρύνσεις. Αντιμετώπισαν γενικότερα τα προβλήματα πριν από τον θάλαμο τα οποία αποτελούσαν ιστορικές προκλήσεις υπό λειτουργία χαμηλού φορτίου. Αυτές στην ουσία οι προκλήσεις εκδηλώνονται με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος είναι η κακή σταθερότητα της καύσης σε χαμηλά φορτία με μεγάλη πίεση (λιγότερο από 2 bar BMEP) και ο δεύτερος η κακή ικανότητα επιβράδυνσης του σπινθήρα σε φορτία συμβατά με τη λειτουργία της αδράνειας και του CSSR. Τα καλά τεκμηριωμένα οφέλη της απόδοσης της ανάφλεξης με πίδακα σε μερικό φορτίο και υψηλό φορτίο δε μπορούν πρακτικά να μεταφραστούν σε μη ήπιες υβριδικές εφαρμογές κινητήρα, εκτός εάν βρεθεί λύση στον περιορισμό του χαμηλού φορτίου πριν το θάλαμο.



Σχήμα 2.1: Μοντέλο που δείχνει μερικώς το συγκρότημα προθαλάμου σε κυλινδροκεφαλή [20]



Σχήμα 2.2: Μοντέλο που δείχνει μερικώς το συγκρότημα προθάλαμου σε κλινδροκεφαλή [20]

Το Active MJI προσφέρει την ευελιξία να λειτουργεί ο κύριος θάλαμος σε χαμηλές τιμές λάμδα και να προσθέτει ανεξάρτητα καύσιμο απευθείας στον προθάλαμο. Αυτή η ευελιξία αξιοποιείται για να αμβλύνει τις επιβλαβείς επιδράσεις στην ανταλλαγή των αερίων που προκαλούνται από τη χρήση της πεταλούδας και να συμπληρώσει την περιορισμένη ικανότητα της επιβράδυνσης του σπινθήρα στο ρελαντί για να παρέχει επαρκές απόθεμα ροπής. Υπό συνθήκες CSSR, η προσθήκη του καυσίμου πριν από τον θάλαμο παρέχει πιο άμεσο έλεγχο της προετοιμασίας του μείγματος με αποτέλεσμα τη μειωμένη αστάθεια στην καύση πριν τον θάλαμο. Η απλή λειτουργία, σε συνδυασμό με άλλες δραστηριότητες βελτιστοποίησης, έχει ως αποτέλεσμα το MJI να επιτύχει αποτελέσματα CSSR συγκρίσιμα με αυτά των σύγχρονων κινητήρων SI. Γενικότερα, το MAHLE Jet Ignition® θα συνεχίσει να αναπτύσσεται σε διάφορες πλατφόρμες κινητήρα

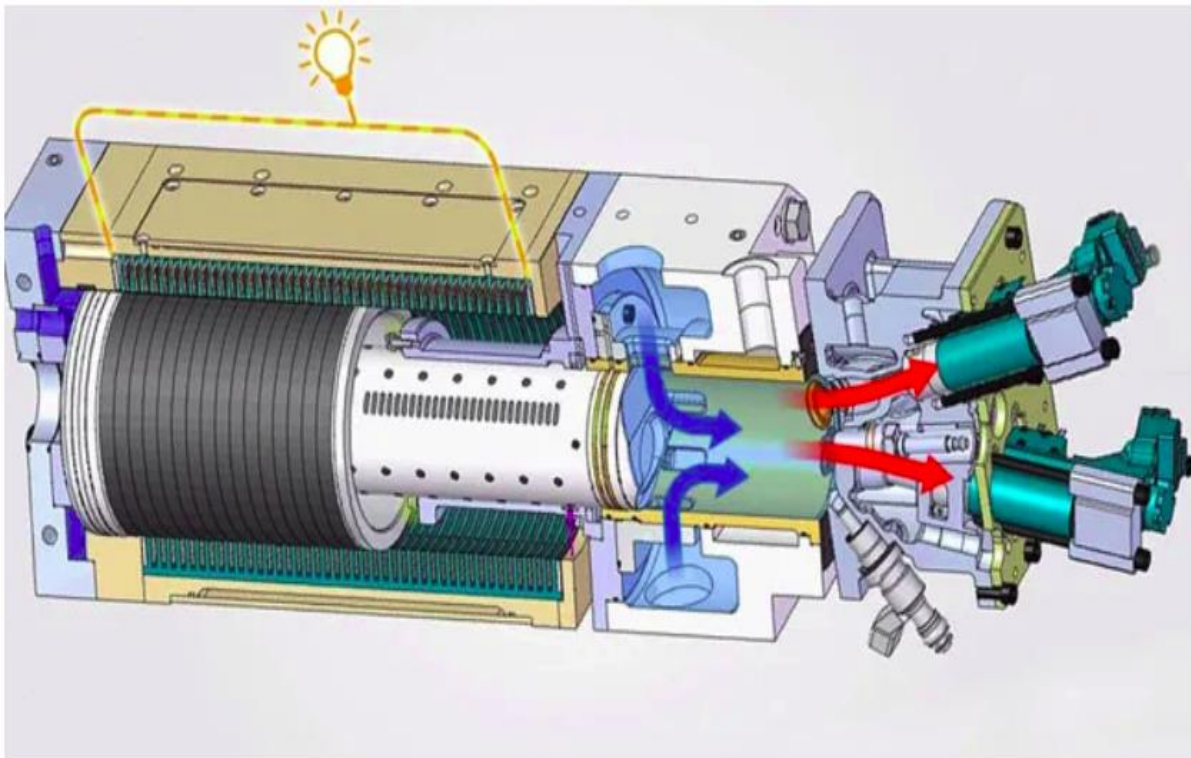
2.3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΕΜΒΟΛΟΥ ΓΙΑ ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Η σημερινή παγκόσμια παραγωγή ενέργειας στοχεύει στην καθαρότερη παραγωγή για τη διατήρηση και την προστασία των περιβαλλοντικών πόρων. Τις τελευταίες δεκαετίες, ο κόσμος έχει αρχίσει να αντιμετωπίζει τις περιβαλλοντικές αλλαγές που προκαλούνται από τις εκπομπές των οχημάτων με καύσιμο υδρογονάνθρακα και υποκινεί λύσεις για τη μείωση αυτών των ρύπων. Επίσης, η ταχύτερη εξάντληση των ορυκτών καυσίμων οδήγησε σε έρευνα για

κινητήρες εναλλακτικών καυσίμων με σκοπό την αντικατάσταση των υφιστάμενων συμβατικών καυσίμων με μια καθαρή, οικονομική και αποδοτική πηγή ενέργειας. Για το σκοπό αυτό, η τρέχουσα αντίληψη είναι ότι οι συμβατικοί κινητήρες θα αντικατασταθούν από πιο ηλεκτρικούς κινητήρες οχημάτων.

Η κύρια πρόκληση για τους σχεδιαστές των ηλεκτρικών οχημάτων (EV) είναι το περιορισμένο εύρος οδήγησης. Μια επιλογή είναι να υπάρχει μια μικρή εγκατάσταση ηλεκτρικής γεννήτριας επί του σκάφους, έτσι ώστε το εύρος οδήγησης να μπορεί να αυξηθεί. Αυτό έχει οδηγήσει σε ανασταλτικές προόδους στην ανάπτυξη τέτοιων κινητήρων. Μια τέτοια τεχνολογία είναι η χρήση ενός κινητήρα ελεύθερης γεννήτριας εμβόλου (FPEG).

Το FPEG έχει τη δυνατότητα να είναι ένας αποτελεσματικός ολοκληρωμένος κινητήρας και γεννήτρια ηλεκτρικής ενέργειας ταυτόχρονα. Το έμβολο κινείται κατά μήκος του κυλίνδρου του κινητήρα που κινείται από αέρια καύσης και η κινητική ενέργεια της κίνησης του εμβόλου μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια από μια γραμμική ηλεκτρική μηχανή. Όταν χρησιμοποιείται το FPEG, η χρήση του άξονα του στροφάλου και της ράβδου σύνδεσης εξαλείφεται με αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα. Αυτά είναι η υψηλότερη απόδοση, ο συμπαγής σχεδιασμός και η κίνηση του εμβόλου να μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική ισχύ, λόγω της απλότητας του συστήματος. Μαζί με αυτά, ο λόγος συμπίεσης μπορεί να μεταβληθεί εύκολα και το μήκος της διαδρομής να είναι ανεξάρτητο, καθώς δεν υπάρχει στροφαλοφόρος άξονας. Σε ένα FPEG, η ηλεκτρική ενέργεια επιτυγχάνεται από τη χημική ενέργεια μέσω μιας διαδικασίας καύσης.



Σχήμα 2.3:Κινητήρας FPEG [21]

Το 1928, ένας μηχανικός και εφευρέτης ο Pescara R.P από την Αργεντινή παρουσίασε τον κινητήρα ελεύθερου εμβόλου (FPE). Σε όλα αυτά τα σχέδια, το έμβολο είναι ελεύθερο να κινείται μεταξύ των τελικών σημείων του, γεγονός που καθιστά τον κινητήρα ελεύθερου εμβόλου να λειτουργεί με μεταβλητό μήκος διαδρομής και υψηλές απαιτήσεις ελέγχου [22].

Οι Zhang C. και Sun Z. (2017) δήλωσαν ότι όταν επτά ανανεώσιμα καύσιμα όπως η αιθανόλη, το βιοντίζελ, το υδρογόνο κ.λπ. λαμβάνονται υπόψη για τον έλεγχο της καύσης με

βάση την τροχιά που ενεργοποιείται από το FPEG, αυτό έχει την υψηλότερη ευελιξία καυσίμου σε σύγκριση με άλλα [23]. Το έργο του Virsik R. (2013) συνέκρινε το FPEG με άλλες διαθέσιμες τεχνολογίες επέκτασης εύρους και στη συνέχεια κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα FPEG με τη χρήση ICE (κινητήρες εσωτερικής καύσης) είναι εφικτά και έχουν υψηλότερες αποδόσεις με χαμηλότερες εκπομπές και τιμές NVH [24]. Αυτό μπορεί να εφαρμοστεί σε οχήματα.

Οι Heron A. και Rinderknecht F. (2013) στη μελέτη τους συνέκριναν αρκετές τεχνολογίες επέκτασης της εμβέλειας για τα ηλεκτρικά οχήματα [25]. Έκαναν σύγκριση των FPEG, των κυψελών καυσίμου πολυμερών ηλεκτρολυτών, των TRE (παραδοσιακός παλινδρομικός κινητήρας) και ICE. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα FPEG έχουν υψηλότερη απόδοση σε σύγκριση με τα TRE και τα ICE. Στη δεκαετία του 1940, το γερμανικό ναυτικό χρησιμοποίησε τους αεροσυμπιεστές ελεύθερου εμβόλου για την παροχή πεπιεσμένου αέρα για την εκτόξευση τορπιλών. Οι ελεύθεροι εμβολοφόροι κινητήρες χρησιμοποιήθηκαν για την τροφοδοσία θερμού αερίου σε στρόβιλο ισχύος. Χρησιμοποιήθηκε σε σταθμούς γενικότερα αλλά και σε θαλάσσιους σταθμούς παραγωγής ενέργειας, με το πιο επιτυχημένο μοντέλο που αναπτύχθηκε το SIGMA στη Γαλλία.

Ερευνητές στο κεντρικό εργαστήριο της Toyota στην Ιαπωνία, ανέπτυξαν το πρωτότυπο FPEG που αποτελείται από μια γραμμική γεννήτρια, ένα θάλαμο ελατηρίου αερίου και ένα δίχρονο θάλαμο καύσης με κοίλο κυκλικό έμβολο. Σε αυτή τη μελέτη, τα χαρακτηριστικά της κίνησης FPEG μελετήθηκαν αριθμητικά και πειραματικά για να καταστεί δυνατή η σταθερή συνεχής λειτουργία. Στην προσομοίωση, οι ερευνητές αξιολόγησαν το FPEG με SI και προαναμειγμένους τρόπους ανάφλεξης με συμπίεση με καύση. Η ισχύς εξόδου 10kW αποκτήθηκε και με τους δύο τρόπους καύσης, ενώ ο προαναμειγμένος τρόπος ανάφλεξης με συμπίεση καύσης απέδωσε υψηλότερη θερμική απόδοση 42% σε σύγκριση με τον τρόπο καύσης SI. Τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαίωσαν ότι το πρωτότυπο FPEG λειτουργήσει σταθερά για μεγάλο χρονικό διάστημα, παρά την ανώμαλη καύση κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Οι ερευνητές έχουν διερευνήσει τη μοναδική κίνηση του εμβόλου, η οποία προκαλεί τις επιπτώσεις της στην καύση και την παραγωγή ενέργειας στο FPEG [26]. Η λεπτομερής ανασκόπηση του κινητήρα ελεύθερου εμβόλου για την ιστορία και την ανάπτυξη του παρουσιάστηκε από τους Hanirah P. R. et al. (2015) [27].

Οι κινητήρες ελεύθερου εμβόλου ταξινομούνται σε τρεις τύπους με βάση τη διάταξη του εμβόλου ως μονό έμβολο, αντίθετο έμβολο και διπλό έμβολο. Η αρχή λειτουργίας είναι πανομοιότυπη για κάθε τύπο, αλλά οι αποκλίσεις μεταξύ τους είναι ο σχεδιασμός της πραγματοποίησης της διαδρομής συμπίεσης και ο σχεδιασμός των θαλάμων καύσης. Τα FPEG αποτελούνται από διαφορετικές μονάδες. Είναι η κεντρική μονάδα καύσης, η κεντρική μονάδα ελατηρίου του αερίου, η κεντρική καύση με ενσωματωμένη μονάδα ελατηρίου αερίου, η κεντρική καύση με διακλαδισμένη μονάδα γραμμικών γεννητριών και σύστημα διπλής μονάδας. Αυτές οι μονάδες επιλέγονται ανάλογα με βάση τη συμπεριφορά του NVH. Ωστόσο, με την εφαρμογή του FPEG το NVH παρατηρείται ότι είναι χαμηλό. Ο θόρυβος και οι κραδασμοί του κινητήρα εμφανίζονται λόγω των μηχανικών δυνάμεων και η διαδικασία καύσης μπορεί να ελεγχθεί με το συγχρονισμό αυτών των μονάδων. Λόγω της παρουσίας υψηλότερων βαθμών ελευθερίας για το σύστημα FPEG, μπορεί επίσης να εφαρμοστεί καύση ομογενούς συμπίεσης (HCCI).

Οι Smallbone A. J. et al. (2019) παρουσίασαν τις πειραματικές εξόδους στο πρωτότυπο σύστημα FPEG βασισμένες στο σχεδιασμό ενός κινητήρα διπλού εμβόλου με ελεύθερο έμβολο [28]. Αυτός ο σχεδιασμός και η λειτουργία του βασίζεται σε μια σειρά ισχυρών αριθμητικών μελετών μοντελοποίησης που πραγματοποιήθηκαν όλα αυτά τα χρόνια από τους ερευνητές.

2.4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΙΑ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΒΕΝΖΙΝΗΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ

Ο αριθμός των υβριδικών τοπολογιών σε πιθανές μελλοντικές εφαρμογές των οχημάτων είναι ένα γεγονός που καθιστά τον προσδιορισμό της πορείας της ανάπτυξης της τεχνολογίας του κινητήρα πρόκληση. Για να βοηθήσει στην ενημέρωση αυτής της απόφασης, ο Ricardo έχει αναπτύξει μια προσέγγιση «Architecture Independent Modeling» (AIM) για την αξιολόγηση και την κατάταξη ενός μεγάλου αριθμού διαμορφώσεων HEV και την επιλογή των πιο υποσχόμενων υποψηφίων. Αυτή η προσέγγιση φέρνει μια σειρά από οφέλη, συμπεριλαμβανομένης της ταχύτητας και της ποιότητας της αρχικής διαδικασίας λήψης των αποφάσεων για υβριδικές αμαξοστοιχίες οχημάτων. Αυτό είναι κρίσιμο λαμβάνοντας υπόψη τη συνεχή πίεση στις προδιαγραφές υλικού για πρώτη φορά και την επίτευξη της μείωσης των φυσικών δοκιμών κατά τη φάση της ιδέας.

Αυτή η αυξημένη ευελιξία για την αποτελεσματική ανάπτυξη της τελευταίας τεχνολογίας μπορεί να βοηθήσει στη διατήρηση ενός ανταγωνιστικού προϊόντος σε μια εξελισσόμενη αγορά, καθώς και στην εργασία προς τις απαιτήσεις για τη μείωση της κατανάλωσης του καυσίμου. Τα μέχρι τώρα αποτελέσματα των μελετών του AIM υποδεικνύουν τις μεγάλες δυνατότητες στην ανάπτυξη αποκλειστικών υβριδικών κινητήρων (DHE) σε συνδυασμό με ένα ειδικό υβριδικό κιβώτιο ταχυτήτων (DHT) για τη μεγιστοποίηση των συνεργιών σε ένα υβριδικό όχημα.



Σχήμα 2.4: Υβριδικό κιβώτιο ταχυτήτων (DHT) [29]

Η ηλεκτροκίνηση δημιουργεί νέες ευκαιρίες για την ενσωμάτωση του συστήματος των κινητήρων και η δραματική αύξηση των επενδύσεων και η εστίαση στα Ηλεκτρικά αυτοκίνητα μπαταρίας (BEVs) φέρνει επίσης την τεχνολογική ανάπτυξη για τις μπαταρίες, τις ηλεκτρικές μηχανές και τα ηλεκτρονικά ισχύος με πολύ ταχύτερο ρυθμό από τον τυπικό κύκλο ζωής του κινητήρα.

Η πρόκληση, επομένως, είναι να εξεταστούν νέοι τρόποι αξιολόγησης αυτών των αλληλεπιδράσεων και των ευκαιριών, όπως:

1. Επιλογή των κατάλληλων αρχιτεκτονικών έναντι των στόχων
2. Να βρεθούν νέες ευκαιρίες για ενσωμάτωση και βελτιστοποίηση
3. Η επιλογή της κάθε τεχνολογίας να γίνεται γρήγορα χωρίς υπερβολικές επενδύσεις
4. Τα συμπεράσματα από τα παραπάνω μπορούν να υποστηρίξουν το επόμενο βήμα στην ανάλυση ή τη βαθμονόμηση του συστήματος για τη μείωση του χρόνου και του κόστους ανάπτυξης

Στο πλαίσιο της εργαλειοθήκης Virtual Product Development (VPD) των Seabrook J. et al. (2019), αναπτύχθηκε μια νέα προσέγγιση για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων [30]. Αυτό το εργαλείο της αρχιτεκτονικής ανεξάρτητης μοντελοποίησης (AIM) επιτρέπει να αναθεωρηθεί ένα ευρύ φάσμα επιλογών των HEV χωρίς να αναπτυχθεί μια σύνθετη στρατηγική ελέγχου για κάθε περίπτωση. Αυτό όχι μόνο επιτρέπει πολλές επιλογές να ληφθούν υπόψη, αλλά μπορεί να εκτελεστεί γρήγορα και με ατομικό συντονισμό των εισόδων και των μεταβλητών που είναι προσαρμοσμένες σε ένα συγκεκριμένο σενάριο. Το AIM προορίζεται κυρίως για την αρχική φάση ενός προγράμματος ανάπτυξης εντός του ορισμού της αρχιτεκτονικής.

Ο σκοπός του AIM είναι η αξιολόγηση των συστημάτων HEV για τον καθορισμό του τρόπου με τον οποίο το σύστημα κίνησης μπορεί να συνεργαστεί, επιτρέποντας τη σύγκριση των αρχιτεκτονικών και των εξαρτημάτων, αλλά και τον εντοπισμό των ευκαιριών για περαιτέρω βελτιστοποίηση.

Η βάση του AIM είναι ένας ελεγκτής ενέργειας που μπορεί να καθορίσει την πιο αποτελεσματική χρήση του υβριδικού συστήματος σε έναν κύκλο κίνησης, διατηρώντας παράλληλα την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (SoC). Αυτός ο ελεγκτής χρησιμοποιεί τεχνικές DoE για γρήγορη σύγκριση των διαφορετικών προφίλ λειτουργίας για τον κινητήρα, το κιβώτιο ταχυτήτων και την Ηλεκτρομηχανή για να βρει το βέλτιστο για κάθε υποψήφιο για σύγκριση. Για να επιτευχθεί αυτό, απαιτείται μια σειρά εισόδων για το χαρακτηρισμό του συστήματος και τον καθορισμό των κατάλληλων ορίων για την αξιολόγηση, συμπεριλαμβανομένων των προδιαγραφών του οχήματος, της βαθμολογίας του κινητήρα και των χαρτών BSFC, των χαρακτηριστικών του κινητήρα και του εύρους μεγέθους της μπαταρίας που έχει τεθεί ως στόχος. Χρησιμοποιώντας αυτές τις πληροφορίες, το AIM μπορεί στη συνέχεια να αξιολογήσει πότε θα χρησιμοποιήσει τη λειτουργία υποβοήθησης ροπής, τη δημιουργία ή τη λειτουργία του ηλεκτρικού οχήματος (EV) του υβριδικού συστήματος και επίσης ποια σχέση θα χρησιμοποιήσει, καθώς και τον αντίκτυπο που προκύπτει στις στροφές και το φορτίο του κινητήρα.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης του κύκλου μπορεί να λάβει υπόψη την καταλληλότερη επιλογή σχέσης μετάδοσης, το μέγεθος της μπαταρίας και τα μεγέθη του ηλεκτρονικού μηχανήματος ως μέρος της αξιολόγησης, μαζί με τον καθορισμό ενός ελάχιστου εύρους EV (εάν υπάρχει) μαζί με την ουδετερότητα του SoC. Η έξοδος από το μοντέλο παρέχει την ανάλυση της απόδοσης των εξαρτημάτων του κινητήρα στην καθορισμένη διαδρομή

οδήγησης, όπως κατανάλωση καυσίμου, μέσο όρο του BSFC του κινητήρα, χρήση ηλεκτρονικών μηχανών, μαζί με τις βελτιστοποιημένες προδιαγραφές για το σύστημα κ.λπ.

2.5 ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΤΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Η καύση της βενζίνης έχει παραδοσιακά μετρηθεί χρησιμοποιώντας τον αριθμό Octane Research (RON) δηλαδή τον αριθμό των οκτανίων και τον αριθμό Octane Motor (MON) που περιγράφουν την αντίστροφη απόδοση κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Όλα τα ευρωπαϊκά βενζινοκίνητα αυτοκίνητα πρέπει να μπορούν να λειτουργούν με την κατηγορία βενζίνης 95 RON, ωστόσο ορισμένα οχήματα έχουν βαθμονομηθεί για να μπορούν να επωφεληθούν από τα καύσιμα υψηλότερων οκτανίων που διατίθενται στην αγορά, τυπικά προωθώντας το χρόνο του σπινθήρα, ή αυξάνοντας την πίεση ώθησης που επιτρέπει περισσότερη ισχύ και ίσως και καλύτερη κατανάλωση του καυσίμου. Στο μέλλον ενδέχεται να διατίθενται οχήματα με αυξημένη ή μεταβλητή αναλογία συμπίεσης που να μπορούν να επωφεληθούν πλήρως από υψηλότερα οκτάνια, αλλά αυτά δεν είναι εμπορικά διαθέσιμα προς το παρόν.

Ιστορικά, η αύξηση τόσο του RON όσο και του MON έχει θεωρηθεί επωφελής, ωστόσο ένα μεγάλο μέρος της πιο πρόσφατης βιβλιογραφίας υποδηλώνει ότι ενώ η αύξηση του RON εξακολουθεί να προσφέρει οφέλη στα σύγχρονα αυτοκίνητα παραγωγής, το MON είναι λιγότερο σημαντικό και στην πραγματικότητα η μείωση του MON στο ίδιο επίπεδο με το RON θα μπορούσε να βελτιώσει την απόδοση του οχήματος.

Είναι πλέον γενικά αναγνωρισμένο ότι η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης της ενέργειας και των εκπομπών CO₂ στις μεταφορές πρέπει να λαμβάνει υπόψη τόσο για την παραγωγή του καυσίμου όσο και για την αποδοτικότητα του οχήματος, συνδυάζοντας αυτούς τους παράγοντες. Για το μέλλον, τα καύσιμα υψηλότερου οκτανίου θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν από τους σχεδιαστές των κινητήρων για τη βελτίωση της απόδοσης του καυσίμου, χρησιμοποιώντας υψηλότερες αναλογίες συμπίεσης, αυξημένες πιέσεις και άλλες τεχνικές. Αυτό, πρέπει να εξισορροπηθεί έναντι της πρόσθετης ενέργειας που απαιτείται στο διυλιστήριο για την παραγωγή του υψηλότερου οκτανίου. Για το λόγο αυτό, ο βέλτιστος αριθμός των οκτανίων για μελλοντικά καύσιμα θα τεθεί υπό συζήτηση και η σωστή ισορροπία μεταξύ RON και MON είναι σαφώς μέρος αυτής της διαδικασίας. Ωστόσο, αυτή η εξέταση των μελλοντικών δυνατοτήτων των οχημάτων δε μπορεί να αντιμετωπιστεί με κανονική δοκιμή των οχημάτων στην αγορά.

Η Concawe πραγματοποίησε μια μελέτη, η πρώτη φάση της οποίας αναφέρθηκε κατά τη διάρκεια του 2016 και αποτελεί το υποκείμενο αρκετών εργασιών [31] και μιας έκθεσης που δημοσιεύθηκε το 2016 [32]. Η πρώτη φάση αυτής της μελέτης ήταν η διερεύνηση της επίδρασης των RON και MON στην απόδοση και την επιτάχυνση δύο βενζινοκίνητων οχημάτων Euro 4 υπό συνθήκες επιτάχυνσης πλήρους γκαζιού. Δεκαπέντε καύσιμα που καλύπτουν τα επίπεδα RON 95 έως 103 και ευαισθησίες (RON μείον MON) έως 15 αναμείχθηκαν και δοκιμάστηκαν. Τόσο ο καθαρός υδρογονάνθρακας όσο και τα μείγματα που περιέχουν αιθανόλη ή ETBE συμπεριλήφθηκαν έτσι ώστε να εντοπιστούν τυχόν συγκεκριμένες επιδράσεις. Τρία επιπλέον καύσιμα, που καλύπτουν το RON έως και 86, αναμείχθηκαν χρησιμοποιώντας βασικά καύσιμα αναφοράς.

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τα ευρήματα προηγούμενων μελετών σε παλαιότερα οχήματα ότι το MON δεν είναι καλός προγνωστικός παράγοντας της απόδοσης της επιτάχυνσης του οχήματος και μάλιστα τα υψηλά επίπεδα MON αυξάνουν το χρόνο επιτάχυνσης σε συνθήκες πλήρους γκαζιού. Και τα δύο οχήματα ήταν ανεκτικά στα καύσιμα της γκάμας μεταξύ των 95-98 RON, αλλά παρουσίασαν μειώσεις στην απόδοση σε καύσιμα χαμηλότερου οκτανίου. Διαπιστώθηκε ότι το οκτάνιο του καυσίμου δεν είχε καμία επίδραση στην απόδοση του οχήματος στον κύκλο NEDC, υποδηλώνοντας ότι είτε το χτύπημα δεν

συμβαίνει υπό αυτές τις ελαφρύτερες συνθήκες φορτίου, είτε ότι οι προσαρμογές στο χτύπημα δεν είναι αρκετά σοβαρές για να επηρεάσουν την απόδοση του κινητήρα. Υπό πιο ακραίες συνθήκες πλήρους επιτάχυνσης του γκαζιού, η απόδοση επιδεινώθηκε στα καύσιμα χαμηλότερου οκτανίου που δοκιμάστηκαν όπως ήταν αναμενόμενο, καθώς ο κινητήρας προσαρμόζεται στο χτύπημα. Παρατηρήθηκε επίσης ότι η απόδοση αυξήθηκε σε υψηλότερα επίπεδα οκτανίων από ό, τι αναμενόταν και για τα δύο οχήματα.

Μια επόμενη παρόμοια μελέτη εξέτασε μια ευρύτερη γκάμα πιο σύγχρονων οχημάτων Euro 5 και Euro 6 [33]. Δύο οχήματα επιλέχθηκαν για περαιτέρω αξιολόγηση στο σύνολο των 22 καυσίμων, μετρώντας και πάλι την απόδοση της επιτάχυνσης σε πλήρες φορτίο σε μια τροποποιημένη έκδοση του κύκλου δοκιμής που χρησιμοποιήθηκε από την προηγούμενη μελέτη. Τόσο το πρώτο όσο και το δεύτερο όχημα έδειξαν έντονη ανάγκη για οκτάνια στην κλίμακα 86 <RON <95, με ένα όχημα επίσης να παρουσιάζει κάποιο επιπλέον όφελος πέραν του 95. Αυτό το όχημα δοκιμάστηκε για αποδοτικότητα και ρύθμιζε τις εκπομπές των ρύπων στους νομοθετικούς κύκλους δοκιμών WLTP και US06. Αυτό το όχημα δοκιμάστηκε στους δύο νομοθετικούς κύκλους κίνησης σε τρία καύσιμα, για να κατανοηθούν τα οφέλη και που αποδίδονται στο οκτάνιο. Στην ουσία η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σε πλήρες φορτίο και το αποτέλεσμα θα μεταφράζονταν στην απόδοση του οχήματος σε έναν αντιπροσωπευτικό κύκλο κίνησης. Γενικότερα, διάφορες βελτιώσεις διαπιστώθηκαν πέρα από το οκτάνιο. Στον κύκλο δοκιμών WLTP, φάνηκε να υπάρχουν οφέλη έως και για 99 οκτάνια. Για το US06 παρατηρήθηκε επίσης κάποιο όφελος έως 98 οκτάνια.

Μια κριτική σε αυτές τις προηγούμενες μελέτες ήταν ότι καθώς τα οχήματα της αγοράς βαθμονομούνται συνήθως για καύσιμα 95 RON ή περιστασιακά για 98 RON, τα οφέλη των καυσίμων με υψηλότερες τιμές RON δεν αναμένεται να αυξηθούν περαιτέρω από άποψη ισχύος ή απόδοσης (αν και όπως περιγράφηκε παραπάνω τουλάχιστον ένα όχημα κάτω από έναν κύκλο δοκιμών φάνηκε να παρουσιάζει βελτίωση). Στη μελέτη τους οι Hamje H. et al. (2019), για να δοκιμαστεί το μέγιστο όφελος απόδοσης που προσφέρει η αύξηση του οκτανίου, δοκίμασαν ένα μικρό κινητήρα σε μια σειρά 4 δοκιμαστικών καυσίμων αφού βαθμονομήθηκε ειδικά σε κάθε καύσιμο [34].

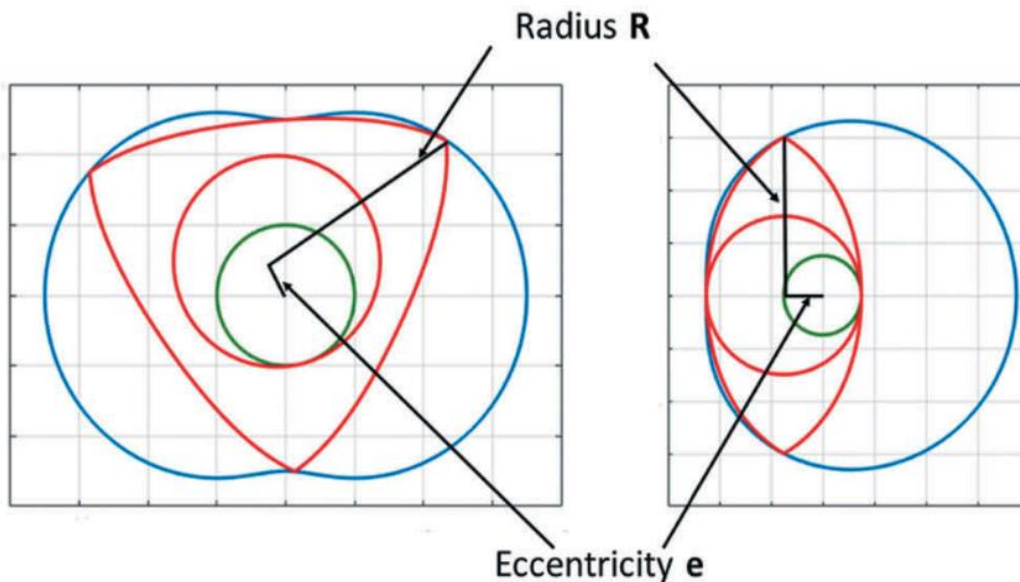
2.6 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΔΙΑΣΤΟΛΕΑ ΩΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΕΝΑ ΣΥΓΧΡΟΝΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ WANKEL

Ο περιστροφικός κινητήρας Wankel τα τελευταία χρόνια έχει γίνει το επίκεντρο των μηχανικών για άλλη μια φορά ως πιθανός διευρυντής της εμβέλειας. Η Mazda, ο μόνος OEM οχημάτων (κατασκευαστής αρχικού εξοπλισμού) που επέμεινε με τον περιστροφικό κινητήρα Wankel μέχρι το 2012, ανακοίνωσε την επανεισαγωγή του κινητήρα Wankel ως επέκτασης εμβέλειας στο πλαίσιο του προγράμματος ανάπτυξης Sustainable Zoom-Zoom 2030'.

Οι κινητήρες Wankel θεωρητικά προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των παλινδρομικών εμβολοφόρων ως επέκταση της εμβέλειας, ακόμη και αν είναι περίφημα γνωστοί για την κακή οικονομία του καυσίμου. Προσφέρουν συνήθως εξαιρετικά χαρακτηριστικά NVH και ως άμεσο αποτέλεσμα αυτού είναι το γεγονός της καύσης κάθε 360 μοίρες (για ρότορα 3 πλευρών). Επιδεικνύουν επίσης καλή ειδική ισχύ. Στη συνέχεια, λόγω της χαμηλής μάζας τους λόγω της έλλειψης παλινδρομικών εξαρτημάτων, έχει αποδειχθεί ότι οι κινητήρες Wankel είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι ως παράγοντες επέκτασης της εμβέλειας για υβριδικά οχήματα. Υπάρχει επίσης ένα επιπλέον πλεονέκτημα έναντι των παλινδρομικών κινητήρων στη χαμηλή αδράνειά τους, γεγονός που καθιστά τα περιστατικά ενεργοποίησης και απενεργοποίησης του κινητήρα δυναμικά λιγότερο παρεμβατικά σε μια υβριδική σειρά.

Ενώ η ασυνήθιστη γεωμετρία του περιστροφικού Wankel είναι η βασική αιτία των ευεργετικών χαρακτηριστικών του χαμηλού NVH και της υψηλής ειδικής ισχύος, δυστυχώς παρουσιάζει επίσης μερικές μοναδικές προκλήσεις.

Σε έναν περιστροφικό κινητήρα ο λόγος συμπίεσης υπαγορεύεται από το λόγο μεταξύ της ακτίνας δημιουργίας R και της εκκεντρικότητας e όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5: Σχήματα των τροχοειδών διαμορφώσεων 3:2 και 2:1 που δείχνουν την ακτίνα R και την εκκεντρικότητα του άξονα e , που συχνά αναφέρεται ως παράγοντας K . Οι κινητήρες με υψηλούς συντελεστές K είναι ικανοί για πολύ υψηλές αναλογίες συμπίεσης. Αντιστρόφως, ένας χαμηλός παράγοντας K έχει ως αποτέλεσμα μια χαμηλή συμπίεση και δυσκολίες στην αποτελεσματική σφράγιση του ρότορα. Στην πράξη, οι κινητήρες Wankel συχνά σχεδιάζονται με υψηλότερους συντελεστές K και προκειμένου να περιοριστεί η αναλογία της συμπίεσης σε επίπεδα κατάλληλα για το προγραμματισμένο καύσιμο, προστίθεται συχνά μια εσοχή στην επιφάνεια του ρότορα που παίζει σημαντικό ρόλο στη διαδικασία της καύσης. αυτή η εσοχή είναι επίσης απαραίτητη για τη μεταφορά φορτίου στο θάλαμο της καύσης στο μικρότερο άξονα του περιβλήματος, όταν ο ρότορας περάσει τον ελάχιστο όγκο (TDC).



Σχήμα 2.5: Σχήματα των τροχοειδών διαμορφώσεων 3:2 και 2:1 που δείχνουν την ακτίνα R και την εκκεντρικότητα του άξονα e [35]

Οι θάλαμοι καύσης του κινητήρα Wankel, από τη φύση τους έχουν συνεχώς μεταβαλλόμενη γεωμετρία, με το διαθέσιμο σχήμα να κινείται με την πλευρά του ρότορα καθώς ταξιδεύει γύρω από το περίβλημα. Ως αποτέλεσμα, η τοποθέτηση του μπουζί είναι κρίσιμη για τη διάδοση της φλόγας. Καθώς η ταχύτητα του κινητήρα αυξάνεται σε πολλές περιπτώσεις, η μπροστινή φλόγα δεν μπορεί να συμβαδίσει με την κορυφαία σφραγίδα και ένα άκαυστο τμήμα συχνά διαφεύγει όταν ολοκληρωθεί η φάση της διαστολής. Επιπλέον, η προωθητική σφραγίδα δημιουργεί μια περιοχή τοπικής υψηλής πίεσης η οποία ωθείται προς τα εμπρός στο μέτωπο της φλόγας δημιουργώντας μια δεύτερη περιοχή άκαυστου φορτίου.

Για να καταπολεμήσει αυτό το Mazda χρησιμοποίησε δύο διαδοχικά μπουζί που χρησιμοποιούσαν διαφορετικό χρόνο στο περίβλημα των κινητήρων παραγωγής τους σε μια προσπάθεια να βελτιώσουν τα χαρακτηριστικά καύσης, φτάνοντας μέχρι και την εισαγωγή ενός τρίτου πίσω μπουζί στον αγωνιστικό κινητήρα R26B.

Η γεωμετρία και ο όγκος της εσοχής του ρότορα παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στη διαδικασία της καύσης και αυτό σε συνδυασμό με το μεταβλητό σχήμα και όγκο θαλάμου μπορεί να οδηγήσει σε υψηλές εκπομπές NOx, αλλά και υδρογονανθράκων.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τις εκπομπές των υδρογονανθράκων είναι και πάλι η γεωμετρία του Wankel, συγκεκριμένα η θέση των θυρών εισαγωγής και εξάτμισης. Σε έναν τυπικό κινητήρα Wankel που λειτουργεί με βενζίνη, ένας συχνός στόχος συμπίεσης βρίσκεται στην περιοχή 8 ή 10: 1. Ως αποτέλεσμα, συχνά συναντάται σημαντική επικάλυψη των θυρών λόγω της φυσικής θέσης της θυρίδας εισαγωγής και εξάτμισης για να επιτευχθεί ο επιθυμητός λόγος συμπίεσης μαζί με έναν αποδεκτό λόγο διαστολής. Αυτή η αλληλοεπικάλυψη είναι πιο σημαντική όταν και η θύρα εισαγωγής και εξάτμισης βρίσκονται περιφερειακά στο περίβλημα, αν και αυτή η επικάλυψη μπορεί να μετριαστεί μέσω της μεταφοράς και των δύο θυρών στο πλαϊνό περίβλημα, όπως έκανε η Mazda με τον κινητήρα RENESIS.

Με τη μετεγκατάσταση των θυρών με αυτόν τον τρόπο, η Mazda μπόρεσε να μειώσει τις εκπομπές HC κατά περίπου 30-50% σε σύγκριση με τον κινητήρα Wankel της προηγούμενης γενιάς που είχε πλευρική θύρα εισαγωγής και περιφερειακή θύρα εξαγωγής.

Ως συνέπεια του ασυνήθιστου σχήματος του θαλάμου καύσης, της επικάλυψης των θυρών και των σχετικά χαμηλών αναλογιών συμπίεσης, οι κινητήρες Wankel υποφέρουν από υψηλές εκπομπές υδρογονανθράκων, οι οποίες μπορούν να γίνουν πιο σημαντικές ως αποτέλεσμα της διατήρησης επαρκούς λίπανσης στις στεγανοποιήσεις. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αυτή η πρόκληση έγινε αρκετά σημαντική ώστε από το 2012 κανένας κατασκευαστής αυτοκινήτων δεν πούλησε όχημα εξοπλισμένο με περιστροφικό κινητήρα. Ο μετριασμός των εκπομπών HC μπροστά σε αυτές τις προκλήσεις παραμένει ο πυρήνας της ανάπτυξης του κινητήρα Wankel. Συνεχίζονται περαιτέρω εργασίες στο πλαίσιο της ερευνητικής ομάδας για τη βελτίωση των εκπομπών των περιστροφικών κινητήρων Wankel με επίκεντρο τη βελτιστοποίηση του ελέγχου της σχέσης αέρα-καυσίμου.

Ένα άλλο υποπροϊόν της ασυνήθιστης γεωμετρίας του Wankel είναι η σχετικά χαμηλή θερμική απόδοση, σε σύγκριση με ένα παλινδρομικό τετράχρονο έμβολο που λειτουργεί με βενζίνη. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας χάνεται στην ενέργεια των καυσαερίων και έτσι υπάρχει σημαντικό δυναμικό για την εφαρμογή συστημάτων ανάκτησης ενέργειας καυσαερίων.

Επίσης, τα περισσότερα τυπικά συστήματα ανάκτησης ενέργειας της εξάτμισης περιστρέφονται γύρω από την εφαρμογή κάποιου είδους στροβιλομηχανών, οι οποίες χρησιμοποιούν στρόβιλο που κινείται από τα καυσαέρια για τη συμπίεση του αέρα εισαγωγής. Είναι ευρέως γνωστό από την τεχνική βιβλιογραφία ότι η αντιστοίχιση μεταξύ του κινητήρα και του υπερσυμπιεστή υπάρχει μια λεπτή γραμμή προκειμένου να διασφαλιστεί η επαρκής απόδοση του κινητήρα και να αποφευχθεί η επικίνδυνη κατάσταση λειτουργίας. Ένα από τα καλύτερα παραδείγματα αυτής της εφαρμογής με κινητήρα Wankel ήταν ο κινητήρας 20B της Mazda που χρησιμοποιούσε συνδυασμό της θυρίδας εισαγωγής που βρίσκεται στο πλαϊνό περίβλημα και περιφερειακής θύρας εξάτμισης συμπληρωμένου με ένα διαδοχικό σύστημα twin-turbo.

Η Rolls-Royce είχε διερευνήσει προηγουμένως τη λειτουργία του περιστροφικού κινητήρα στον κύκλο ντίζελ που απαιτούσε λόγο συμπίεσης που συνήθως ο περιστροφικός κινητήρας δυσκολευόταν να υποστηρίξει. Η προσέγγισή τους ήταν να συνδυάσουν δύο περιστροφικούς κινητήρες με διαφορετικές γεωμετρίες. Ένας μικρότερος ρότορας χειριζόταν τη συμπίεση και τη διαστολή της υψηλής πίεσης, ενώ ένας μεγαλύτερος ρότορας παρείχε αρχική συμπίεση χαμηλής πίεσης και δευτερεύουσα διαστολή των καυσαερίων. Αξίζει να τονιστεί ότι οι δύο ρότορες συνδέθηκαν μηχανικά σε αναλογία 1: 1 με τον ίδιο άξονα εξόδου. Λόγω της γενικής διαμόρφωσής του, ο κινητήρας ήταν γνωστός ως «Cottage Loaf». Ενώ ήταν σε θέση να παρέχει επαρκή συμπίεση για αποτελεσματική καύση ντίζελ, όπως αναφέρθηκε

προηγούμενος, αντιμετώπισε ορισμένες προκλήσεις ως αποτέλεσμα της ασυνήθιστης γεωμετρίας του θαλάμου καύσης.

Ο κινητήρας Rolls-Royce Cottage Loaf ήταν ασυνήθιστος στο ότι χρησιμοποίησε ένα ζεύγος ρότορων 3 πλευρών για τη βελτίωση του λόγου διαστολής και συμπίεσης, με τον πρώτο μεγαλύτερο ρότορα να υποστηρίζει τόσο την αρχική φάση συμπίεσης όσο και τη δευτερεύουσα φάση διαστολής. Ως εκ τούτου, ο κινητήρας ήταν ένας διπλός κινητήρας συμπίεσης-διαστολής (DCEE). Πρόσφατα ειδικοί περιστροφικών κινητήρων έχουν διερευνήσει το συνδυασμό ενός ρότορα 3 πλευρών σε συνδυασμό με ένα δεύτερο ρότορα 2 πλευρών για να αυξήσει σημαντικά τον λόγο διαστολής της μονάδας. Η Advanced Innovative Engineering (AIE UK Ltd) είναι ένας τέτοιος κατασκευαστής περιστροφικών κινητήρων που έχει λάβει άδεια για αυτήν την τεχνολογία και αναπτύσσει αυτήν την περίοδο την τεχνολογία του προς πώληση.

2.7 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΗΣ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΓΕΝΙΑΣ ΤΗΣ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑΣ «ΝΕΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ»

Η Changan ανταποκρίθηκε στις ανάγκες της αγοράς και της νομοθεσίας για το σχεδιασμό και την ανάπτυξη μιας νέας σειράς βενζινοκινητήρων για τη δεκαετία του 2020. Αυτός ο κινητήρας θα αντικαταστήσει την πλειοψηφία των υπαρχόντων κινητήρων της Changan² σε 5 υπάρχουσες οικογένειες κινητήρων που καλύπτουν το εύρος απόδοσης 70 έως 140kW. Αυτό θα μειώσει δραματικά την πολυπλοκότητα των τύπων των κινητήρων και των εγκαταστάσεων των οχημάτων, αυξάνοντας παράλληλα τον όγκο παραγωγής βασικών εξαρτημάτων, τα οποία μειώνουν και τα δύο έξοδα παραγωγής και ανάπτυξης.

Βασικοί τομείς εστίασης για την οικογένεια των κινητήρων ήταν η οικονομία καυσίμου, οι εκπομπές ρύπων PN, η αποτελεσματική θέρμανση του καταλύτη, οι ανταγωνιστικές επιδόσεις, τα καλά χαρακτηριστικά NVH καθώς και ο συμπαγής και ελαφρύς σχεδιασμός. Για να πραγματοποιηθούν αυτά, ένας έχει σχεδιαστεί ένας κινητήρας για να προσφέρει ένα ευρύ φάσμα παραλλαγών από μια κοινή αρχιτεκτονική χρησιμοποιώντας εναλλακτικές μονάδες τεχνολογίας.

Όλες οι παραλλαγές χρησιμοποιούν ένα σύνολο βασικών τεχνολογιών που υποστηρίζουν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του κινητήρα (μεγάλη διαδρομή/μικρή διάμετρος, μετατόπιση στροφάλου 8 mm, 4 βαλβίδες ανά κύλινδρο, ενσωματωμένη πολλαπλή εξαγωγή, μπλοκ και κεφαλή αλουμινίου, βαλβίδα κυλινδρικού δακτύλου, RVF, διπλό VVT, διπλό εκκεντροφόρο άξονα κ.λπ.

Με βάση αυτές τις παραλλαγές του κινητήρα, αναπτύχθηκαν στρατηγικές επαναχρησιμοποίησης εξαρτημάτων χρησιμοποιώντας έναν πίνακα πολυπλοκότητας για να εξασφαλιστεί η υψηλή χρήση των κοινών εξαρτημάτων. Τα κοινά επίπεδα έως και 93% επιτυγχάνονται μεταξύ των παραλλαγών της ίδιας τεχνολογίας με εναλλακτική μετατόπιση, αλλά εξακολουθούν να υπερβαίνουν το 60% μεταξύ παραλλαγών 3 και 4 κυλίνδρων. Επιπλέον, με την τυποποίηση των διεπαφών τόσο εντός του κινητήρα όσο και για τις συνδέσεις με το όχημα, η προσπάθεια σχεδιασμού εναλλακτικών μοντέλων μειώνεται δραματικά. Γενικότερα, υπάρχει μεγάλη συχνή χρήση υποσυστημάτων και εξαρτημάτων σε όλο το φάσμα των παραλλαγών.

Ένα ευρύ φάσμα προαιρετικών μονάδων τεχνολογίας εξετάστηκε κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του κινητήρα για να επιτρέψει όλες τις απαιτούμενες μελλοντικές παραλλαγές

² Η Chang'an Automobile (Group) Co., Ltd. είναι ένας κινεζικός κρατικός κατασκευαστής αυτοκινήτων με έδρα το Chongqing της Κίνας. Η κύρια δραστηριότητά του είναι η παραγωγή επιβατικών αυτοκινήτων, μικροβανών, εμπορικών φορτηγών και ελαφρών φορτηγών.

στην περιοχή 1.0l 3cyl έως 1.6l 4cyl. Ορισμένες από αυτές τις ενότητες είναι για εφαρμογές της καύσης Miller, αλλά και εφαρμογές υβριδικών οχημάτων.

Η κύρια δομή του μπλοκ κυλίνδρων και της κυλινδροκεφαλής είναι ολόκληρη κατασκευασμένη από αλουμίνιο, χυτοπρεσαριστή και χυτή υπό υψηλή πίεση στην περίπτωση του μπλοκ και με χαμηλή πίεση για την κυλινδροκεφαλή.

Το μπλοκ του κυλίνδρου είναι σχεδιασμένο με την αντλία του νερού τοποθετημένη στην πλευρά εισόδου και την αντλία λαδιού τοποθετημένη κάτω από το στροφαλοφόρο άξονα. Η κίνηση της αντλίας λαδιού γίνεται με υγρό ιμάντα για παραλλαγές χωρίς άξονα ζυγοστάθμισης και με γρανάζι για παραλλαγές 3 κυλίνδρων με ενσωματωμένο συγκρότημα αντλίας λαδιού/ζυγοστάθμισης. Η κίνηση του εκκεντροφόρου άξονα είναι από μία μόνο αλυσίδα κοινή σε όλες τις παραλλαγές. Ο δίσκος στον 4ο κύλινδρο είναι επίσης δομικός, με σκλήρυνση για τα καπάκια του ρουλεμάν. Ο στροφαλοφόρος άξονας μετατοπίζεται 8mm από τις κυλινδρικές οπές (το ποσό αυτό επιλέγεται ως ισορροπία μεταξύ μείωσης τριβής και ύψους μπλοκ).

Ο στροφαλοφόρος άξονας είναι χυτοσίδηρος σε όλες τις εφαρμογές με 4 σχέσεις αντίβαρου στους 4 κυλίνδρους. Οι 3κύλινδροι στροφαλοφόροι άξονες έχουν διαφορετικές στρατηγικές εξισορρόπησης ανάλογα με το αν χρησιμοποιείται άξονας ζυγοστάθμισης ή όχι. Οι ράβδοι σύνδεσης είναι σφυρήλατοι χάλυβες και κράματα εμβόλων. Οι δακτύλιοι του εμβόλου είναι σχετικά λεπτοί στα 1,2/1,0/2,0mm και με χαμηλό επαπτόμενο φορτίο για χαμηλή τριβή και ενεργοποιούνται από το καλό σχήμα των οπών.

Η κυλινδροκεφαλή έχει κοινές κύριες διαστάσεις σε όλες τις παραλλαγές και οι βαλβίδες είναι κοινές σε όλες τις παραλλαγές. Η διάταξη της κυλινδροκεφαλής είναι μια κλασική διάταξη 4 βαλβίδων ανά κύλινδρο, ενσωματωμένους τους μοχλούς των εκκεντροφόρων εισόδου και των καυσαερίων για λόγους συσκευασίας. Η συμπεριλαμβανόμενη γωνία βαλβίδας είναι σχετικά στενή στους 33° υποστηρίζοντας έναν συμπαγή θάλαμο καύσης και υψηλούς λόγους συμπίεσης. Όλες οι κυλινδροκεφαλές διαθέτουν ενσωματωμένη πολλαπλή εξαγωγή (IEM), στην περίπτωση των 3 κυλίνδρων με διάταξη 3-1 και στην περίπτωση των 4 κυλίνδρων με διάταξη 4-2. Κάθε ένα έχει επιλεγεί για βέλτιστη δυναμική αντιστοίχιση του αερίου με τον υπερσυμπιεστή και στην περίπτωση του 4κύλινδρου υποστηρίζεται η χρήση ενός υπερτροφοδότη σε ορισμένες παραλλαγές.

Το σύστημα ψύξης είναι μια υβριδική διάταξη διαμήκους/εγκάρσιας ροής, όπου οι διατάξεις είναι εντελώς ίδιες στους 3 και 4 κυλίνδρους, αν και η λεπτομέρεια ποικίλλει λόγω των διαφορετικών δομών IEM. Το σύστημα χωρίζεται μεταξύ μπλοκ κυλίνδρου και κυλινδροκεφαλής. Αναπτύχθηκαν στην ουσία δύο μονάδες ελέγχου ροής (FCM). Στην ουσία είναι μια παθητική διάταξη με δύο θερμοστάτες (μπλοκ & κεφαλή) με διαφορετικά χαρακτηριστικά θερμοκρασίας και ενεργή διάταξη με περιστροφική βαλβίδα ελέγχου που τροφοδοτείται από κινητήρα DC υπό τον έλεγχο της μονάδας ελέγχου κινητήρα (ECM). Οι μονάδες ελέγχου της ροής ταιριάζουν στο πίσω μέρος της κυλινδροκεφαλής και είναι κοινές μεταξύ των κινητήρων 3 & 4 κυλίνδρων. Η αντλία νερού τοποθετείται στο μπλοκ των κυλίνδρων. Δύο μονάδες έχουν αναπτυχθεί, μια μηχανική αντλία με ιμάντα με 2 εναλλασσόμενους ρυθμούς ροής και μια ηλεκτρική αντλία. Η χρήση των FCM είναι επωφελής για γρήγορο ζέσταμα του κινητήρα, τόσο για βελτιωμένη οικονομία καυσίμου όσο και για μείωση των εκπομπών PN. Η επιλογή του FCM και της αντλίας νερού βασίζεται στην εφαρμογή του κινητήρα και του οχήματος. Ο συνδυασμός ενός IEM, χαμηλής μάζας κινητήρα και FCM έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της θερμοκρασίας του κινητήρα κατά 35% από 25 °C σε 90 °C στον κύκλο NEDC σε σύγκριση με τους τρέχοντες κινητήρες της Changan.

Το σύστημα λίπανσης είναι πλήρως ενσωματωμένο με το μπλοκ των κυλίνδρων και την κυλινδροκεφαλή. Μια πλήρως μεταβλητή αντλία λαδιού (FVOP) (τύπου περυγίων) αντλεί λάδι από το δοχείο και παραδίδεται στους πολλαπλούς καταναλωτές λαδιού του κινητήρα μέσω τρυπημένων θυρών. Ένα ψυγείο λαδιού μπορεί να τοποθετηθεί στην πλευρά εισόδου του μπλοκ για εφαρμογές όπου αυτό απαιτείται.

Οι υπερτροφοδοτούμενες παραλλαγές του κινητήρα διαθέτουν μια δεύτερη συλλογή στην πλευρά εξάτμισης του μπλοκ για τους ψεκαστές εμβόλου (PCJ), οι οποίοι ενεργοποιούνται/απενεργοποιούνται από μια ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα. Η χρήση του FVOP, βελτιστοποιημένου για λάδι 0W20 και εναλλασσόμενων PCJ προσφέρει επίσης μια χρήσιμη βελτίωση τόσο στην οικονομία καυσίμου όσο και στις εκπομπές PN λόγω της μειωμένης εργασίας από την αντλία λαδιού και των υψηλότερων θερμοκρασιών εμβόλου όταν τα PCJ είναι απενεργοποιημένα [36]. Η οικονομία καυσίμου βελτιώνεται κατά 2 ~ 3% στον κύκλο NEDC σε σύγκριση με τους τρέχοντες κινητήρες Changan με συμβατική αντλία λαδιού, PCJ με πίεση και λάδι 5W30.

Το σύστημα εξαερισμού του στροφαλοθαλάμου είναι εξαιρετικά ενσωματωμένο στη δομή του κινητήρα. Υπάρχουν δύο διαχωριστικά, ένα τοποθετημένο στο μπλοκ των κυλίνδρων με τη ροή που ρυθμίζεται από έναν PCV ενσωματωμένο στο διαχωριστικό και ένα πλήρες φορτίο τοποθετημένο στην πλευρά της εξάτμισης του καλύμματος του έκκεντρου. Σε μερικό φορτίο, ο καθαρός αέρας ρέει μέσω του κινητήρα από το διαχωριστή πλήρους φορτίου για να μειώσει την τάση για παραγωγή ιλύος. Κατά τη διάρκεια της ενισχυμένης λειτουργίας, η ροή αντιστρέφεται στην πλήρη εισαγωγή του αέρα, η οποία στη συνέχεια εξαερίζεται στην εισαγωγή αέρα προς τα άνω του συμπιεστή και η ροή στην πλήρη αναπνοή μειώνεται στο μηδέν. Οι δίοδοι του αερίου από το διαχωριστή μερικού φορτίου στο σύστημα εισαγωγής είναι πλήρως ενσωματωμένοι στο μπλοκ, την κυλινδροκεφαλή και την πολλαπλή εισαγωγή χωρίς εξωτερική σωλήνωση.

Η διαδρομή του αέρα του κινητήρα αποτελείται από την πολλαπλή εισαγωγή, το ψυγείο, το σωλήνα μεταφοράς και τον υπερσυμπιεστή. Το intercooler είναι τύπου ψυκτικού-αέρα που εξυπηρετείται με ειδική ηλεκτρική αντλία ψυκτικού και καλοριφέρ χαμηλής θερμοκρασίας. Ο σωλήνας μεταφοράς περιλαμβάνει αντηχείο για μείωση του θορύβου. Η διαδρομή του αέρα που προκύπτει είναι σχετικά συμπαγής χάρη στο ψυγείο που είναι τοποθετημένο στον κινητήρα και ενισχύει την παροδική απόκριση του κινητήρα. Διάφορες τεχνολογίες υπερσυμπιεστή χρησιμοποιούνται σε διαφορετικές παραλλαγές: μονό κύλιση, διπλή κύλιση και τουρμπίνα μεταβλητής γεωμετρίας (VGT). Όλα διαθέτουν ηλεκτρικό ενεργοποιητή αποβλήτων για οικονομία καυσίμου και βελτιώσεις της παροδικής απόκρισης.

Κεντρικό σε κάθε κινητήρα εσωτερικής καύσης είναι το σύστημα καύσης του. Μερικές από τις βασικές απαιτήσεις του συστήματος καύσης για τους νέους και μελλοντικούς κινητήρες είναι:

- Αποδοχή της επίτευξης όλων των στόχων της απόδοσης
- Ισχυρή απόδοση της θέρμανσης του καταλύτη
- Χαμηλές εκπομπές των σωματιδίων της τροφοδοσίας-αερίου για ελαχιστοποίηση της απαίτησης για διήθηση των σωματιδίων

Προκειμένου να επιτευχθούν αυτές οι απαιτήσεις, η ανάπτυξη του συστήματος καύσης επικεντρώθηκε στην κίνηση του φορτίου αέρα σε συνδυασμό με βελτιστοποιημένο άμεσο ψεκασμό του καυσίμου χρησιμοποιώντας σύστημα πίεσης 350 bar.

Η θύρα εισαγωγής που σχεδιάστηκε επικεντρώθηκε στην υψηλή παραγωγή ανατροπής προκειμένου να βελτιώσει τη φόρτιση, την ανάμειξη καυσίμου/αέρα και την καύση γενικότερα. Το μπεκ ψεκασμού καυσίμου είναι τοποθετημένο στο πλάι (πλευρά εισαγωγής) και χρησιμοποιείται μοτίβο ψεκασμού 6 λοφίων. Ένα βασικό χαρακτηριστικό του συστήματος καύσης είναι να επιτρέψει την αποτελεσματική λειτουργία θέρμανσης του καταλύτη που απαιτεί καλή καύση υπό συνθήκες μεγάλης καθυστέρησης. Το μοτίβο ψεκασμού καυσίμου αναπτύχθηκε για να επιτρέψει την εξαιρετική απόδοση θέρμανσης του καταλύτη και

ενσωματώνει δύο ράβδους ψεκασμού στον κεντρικό άξονα των μπουζί του θαλάμου καύσης. Αυτά τα δοχεία ψεκασμού επιτρέπουν καλή τοπική διαστρωμάτωση της φόρτισης κοντά στο άκρο του μπουζί για τη βελτίωση της σταθερότητας της καύσης κατά τη λειτουργία της θέρμανσης του καταλύτη.

Το επιλεγμένο μοτίβο ψεκασμού βελτιστοποιήθηκε επίσης για να εξισορροπήσει άλλα βασικά χαρακτηριστικά όπως τις εκπομπές των σωματιδίων και την αραιώση του λαδιού με βενζίνη. Οι συνθήκες λειτουργίας χαμηλής θερμοκρασίας έδειξαν ότι τα αυτού του είδους κινητήρες είναι κορυφαίοι στην κατηγορία όσον αφορά την αραιώση του λαδιού.

Ο σχεδιασμός της στεφάνης του εμβόλου αναπτύχθηκε σε συνδυασμό με τη θύρα εισαγωγής και το μοτίβο ψεκασμού του μπεκ ψεκασμού καυσίμου για να επιτρέψει την καύση. Ο συνδυασμός του συστήματος καυσίμου 350 bar, η βελτιστοποιημένη σχεδίαση ψεκασμού και η κίνηση υψηλής φόρτισης έχουν ως αποτέλεσμα εξαιρετικά χαμηλές εκπομπές σωματιδίων από τον κινητήρα.

Η δεύτερη γενιά αυτών των κινητήρων έχει αναπτυχθεί για να βελτιώσει την κατανάλωση του καυσίμου της πρώτης σειράς κινητήρων. Η πλατφόρμα του κινητήρα που χρησιμοποιείται για τον κινητήρα δεύτερης γενιάς είναι μια μονάδα 1,5 λίτρων. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε ένας κύκλος Miller ως βασικός παράγοντας για τις βελτιώσεις στην κατανάλωση του καυσίμου.

Πολυάριθμες προηγούμενες μελέτες έχουν επισημάνει οφέλη είτε από στρατηγικές πρόωρου κλεισίματος των βαλβίδων εισόδου (EIVC), είτε από το κλείσιμο των βαλβίδων εισόδου (LIVC) σε συνδυασμό με υψηλούς γεωμετρικούς λόγους συμπίεσης για τη βελτίωση της απόδοσης του καυσίμου [37].

Οι βασικοί μηχανισμοί που επιτρέπουν τη βελτιωμένη απόδοση του καυσίμου είναι:

- Αύξηση της γεωμετρικής συμπίεσης που έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο λόγο διαστολής.
- Μείωση στο τέλος της θερμοκρασίας συμπίεσης σε υψηλό φορτίο/χτυπήματα με περιορισμένες θέσεις μέσω πρόσθετης εξωτερικής ενίσχυσης και αυξημένης ψύξης σε συνδυασμό με τις στρατηγικές χρονισμού EIVC/LIVC. Αυτός ο μηχανισμός είναι ο βασικός ενεργοποιητής της υψηλής γεωμετρικής αναλογίας συμπίεσης.
- Μείωση των απωλειών της πεταλούδας σε θέσεις χαμηλού φορτίου μέσω χρονισμού του εκκεντροφόρου με EIVC/LIVC στρατηγικές

Η επιλογή των στρατηγικών χρονισμού LIVC ή EIVC ήταν ένα βασικό στοιχείο που πρέπει να οριστεί για το προϊόν δεύτερης γενιάς της Changan. Τα βασικά στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον καθορισμό της στρατηγικής χρονισμού περιλαμβάνουν:

- Ο κινητήρας πρέπει να λειτουργεί τόσο σε υβριδικά όσο και σε συμβατικά συστήματα κίνησης και ως εκ τούτου πρέπει να πληροί τις συγκεκριμένες απαιτήσεις εξόδου (BM 18 bar BMEP) ταυτόχρονα με καλή απόδοση ροπής χαμηλής ταχύτητας, όπως απαιτείται από την κινεζική αγορά.
- Ο κινητήρας πρέπει να αποδίδει καλά σε βασικούς τομείς δοκιμών που σχετίζονται με εκπομπές, οι οποίοι περιλαμβάνουν θέρμανση του καταλύτη και συνθήκες χαμηλών στροφών υψηλού φορτίου.

2.8 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΥΚΑΙΡΙΕΣ ΤΗΣ ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗΣ ΑΛΥΣΙΔΑΣ

Οι προμηθευτές, τόσο σε επίπεδο Βαθμίδας 1 όσο και κάτω, πρέπει να κάνουν αλλαγές στη δομή της εταιρείας καθώς και στην τεχνολογία που αναπτύσσουν για την αντιμετώπιση των παγκόσμιων αλλαγών στην τεχνολογία των εκπομπών.

Μία από τις βασικές προκλήσεις, σίγουρα για τους μεγαλύτερους προμηθευτές της κατηγορίας 1, είναι οι διαφοροποιήσεις στους παγκόσμιους κανονισμούς για τις εκπομπές των ρύπων. Από την άποψη της έρευνας και της ανάπτυξης, σημαίνει ότι οι προμηθευτές πρέπει να αναπτύξουν διαφορετικές λύσεις, προσθέτοντας κόστος και πολυπλοκότητα. Επιπλέον, με τους κανονισμούς να αλλάζουν με ταχείς ρυθμούς, οι προμηθευτές αντιμετωπίζουν μεγάλα έξοδα κατασκευής για να αντιμετωπίσουν την απορρόφηση της τεχνολογίας. Αυτό ισχύει σίγουρα στην Κίνα, όπου πολλοί OEM στοχεύουν απλώς στο CN6b και παρακάμπτουν το CN6a.

Οι απαιτήσεις για συνεχώς αυξανόμενη απόδοση σε φίλτρα και καταλύτες, καθώς και η πολυπλοκότητα σε βασικές τεχνολογίες κινητήρων όπως το GDI και το HCCI, επιφέρουν υψηλό κόστος στην αλυσίδα του εφοδιασμού. Η πρόκληση είναι πόσο από αυτό το κόστος μπορεί να απορροφηθεί από τον τελικό πελάτη έναντι του ποσού που θα χρειαστεί να προέλθει από τους OEM και την αλυσίδα του εφοδιασμού.

Η τοποθέτηση όλης της απαιτούμενης τεχνολογίας στο όχημα καθίσταται δυσκολότερη όσον αφορά την μετεπεξεργασία των καυσαερίων. Η αυξανόμενη ώθηση των OEM να έχουν πιο στενά συνδεδεμένες συσκευές εκπομπών ανάγκασε τους προμηθευτές να γίνουν δημιουργικοί με τα σχέδιά τους. Ένα παράδειγμα αυτού είναι ο υπερσυμπιεστής δακτυλίου καταλύτη που αναπτύχθηκε από την Continental.

Μια άλλη πρόκληση για την αυτοκινητοβιομηχανία είναι η πιθανή διακοπή του εμπορίου. Οι συνεχιζόμενες διαμάχες μεταξύ Κίνας και ΗΠΑ, ή ΗΠΑ και Ευρωπαϊκής Ένωσης, καθώς και η αβεβαιότητα σχετικά με το τι θα συνεπάγεται το Brexit έπειτα από χρόνια, προκαλεί πολλούς προμηθευτές της κατηγορίας 1 να επανεξετάσουν τις τοποθεσίες παραγωγής και προμήθειας. Οι επιπτώσεις του κλεισίματος των εργοστασίων όπως το Bridgend για τη Ford και το Swindon για τη Honda θα γίνουν αισθητές σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού τα επόμενα χρόνια.

Τελικά, η μεγαλύτερη απειλή για τη βιομηχανία είναι η απομάκρυνση από το ντιζελ, το οποίο αποτελεί πρόκληση για την αντιμετώπιση των εκπομπών CO₂ του στόλου. Η ώθηση προς τα ηλεκτρικά οχήματα συμβαίνει με μεγάλο κόστος για τους προμηθευτές. Με το σημείο καμπής για δημόσια αποδοχή να εμφανίζεται σε απόσταση, οι προμηθευτές πρέπει να βρουν τρόπους για να διατηρήσουν το κέρδος τους, ενώ παράλληλα να επενδύουν στο μέλλον.

Ωστόσο, υπάρχουν ευκαιρίες όχι μόνο για τους καθιερωμένους προμηθευτές αλλά και για τις μικρότερες εταιρείες της κατηγορίας 1 και 2, καθώς η ηλεκτροκίνηση παρατείνει τη ζωή των υφιστάμενων, καλά ανεπτυγμένων τεχνολογιών. Συστατικά όπως ηλεκτρικά θερμαινόμενοι καταλύτες, ηλεκτρονικοί συμπιεστές και ηλεκτρονικές αντλίες νερού είναι παραδείγματα προμηθευτών που χρησιμοποιούν την ηλεκτροκίνηση για να παρατείνουν τη ζωή της υπάρχουσας τεχνολογίας και να εισέλθουν σε νέες σειρές προϊόντων. Από την άποψη του e-cat, η Continental Emitec, η Faurecia και η ElringKlinger έχουν αποκαλύψει όλα τα σχέδια για να εισέλθουν σε αυτήν την αγορά. Γενικότερα, φαίνεται ήδη την πράξη της αλυσίδας εφοδιασμού να μειώνεται το κόστος και να καθυστερούνται οι επενδυτές.

Γενικότερα, υπάρχουν τρεις στρατηγικές που πρέπει να υιοθετήσουν οι προμηθευτές της κατηγορίας 1:

- Επένδυση
- Συγχώνευση τμημάτων
- Απόσπαση τμημάτων

Τα τελευταία χρόνια, αρκετοί προμηθευτές της κατηγορίας 1 άνοιξαν ή επέκτειναν τις εγκαταστάσεις παραγωγής τους σε αναδυόμενες αγορές. Συγχωνεύσεις όπως η Calsonic Kansei και η Magneti Marelli για την αύξηση των εσόδων και τη διασφάλιση της ανταγωνιστικότητας σε βασικούς τομείς γίνονται κοινός τρόπος λειτουργίας. Τέλος, αρκετές μεγάλες εταιρείες της κατηγορίας 1, όπως οι Delphi (Artiv και Delphi Technologies) και η Continental (Vitesco Technologies) έχουν αρχίσει να αποσυνδέουν τα υπάρχοντα τμήματα των κινητήρων τους. Αυτό επιτρέπει να διαχωριστούν οι επενδύσεις σε νέες τεχνολογίες αλλά και στην υπάρχουσα τεχνολογία των κινητήρων.

3. ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Οι κυβερνήσεις σε όλο τον κόσμο ξεκινούν μια ουσιαστική ώθηση προς μια καθαρή κοινωνία μηδενικών ρύπων. Ενώ, υπάρχουν αδιαμφισβήτητα προκλήσεις και εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν για να συμβεί αυτό. Η αυτοκινητοβιομηχανία δείχνει ήδη τη δέσμευσή της να παίξει το ρόλο της.

Η παγκόσμια νομοθεσία για τον εξαγωγέα βρίσκεται σε σαφή πορεία προς μηδενικές εκπομπές, με τους μεγάλους κυβερνητικούς φορείς, όπως η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, επίσης να αρχίζουν τώρα να κοιτάζουν πέρα από τη συμβατική ρύθμιση της εξάτμισης.

Οι κατασκευαστές γνήσιου εξοπλισμού (ΟΕΜ) και οι προμηθευτές Tier 1 δείχνουν ήδη τη δέσμευσή τους σε αυτό. Όχι μόνο εφαρμόζονται και αναπτύσσονται υπάρχουσες τεχνολογικές λύσεις ελάχιστων ρύπων, αλλά έρχονται στην αγορά νέες εναλλακτικές λύσεις μηδενικών εκπομπών, όπως ηλεκτρικά οχήματα και κυψέλες καυσίμου.

Όπως αναφέρθηκε, παρά τις νέες λύσεις των μηδενικών ρύπων που παρουσιάζονται, πολλά εμπόδια πρέπει να ξεπεραστούν προτού γίνουν η κυρίαρχη μορφή της προώθησης για το καθημερινό αυτοκίνητο. Ως αποτέλεσμα, ο κινητήρας καύσης και η υποκείμενη τεχνολογία σε αυτό θα συνεχίσουν να παίζουν σημαντικό ρόλο βραχυπρόθεσμα έως και μεσοπρόθεσμα.

3.1 ΚΑΤΑΛΥΤΗΣ ΓΙΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΒΑΡΕΩΣ ΤΥΠΟΥ CNG

Δεδομένης της ανάγκης επίτευξης μηδενικών, ή σχεδόν μηδενικών εκπομπών στον τομέα των μεταφορών και της βιώσιμης κινητικότητας, το ενδιαφέρον για κινητήρες βαρέως τύπου που κινούνται με CNG αυξάνεται συνεχώς.

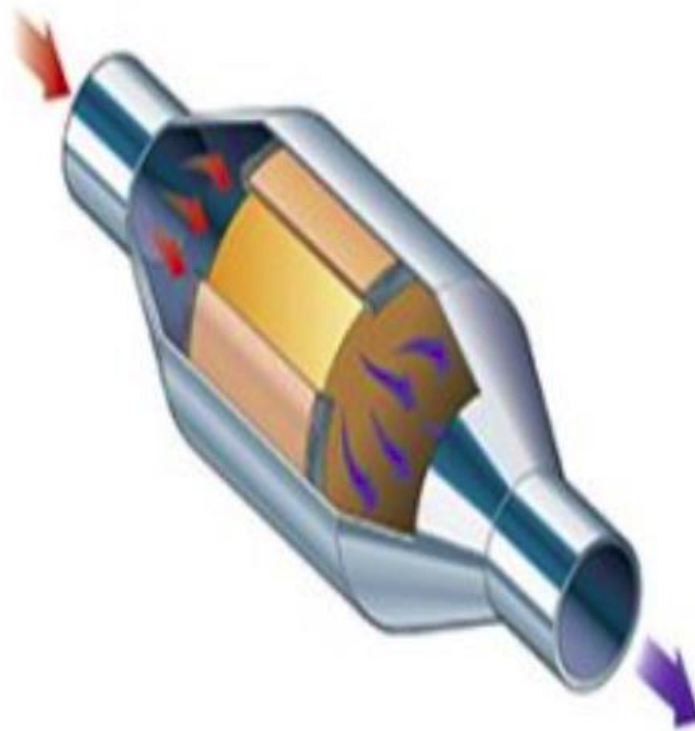
Ως αποτέλεσμα, η ανάπτυξη αξιόπιστων και προγνωστικών αριθμητικών μοντέλων για τον εικονικό σχεδιασμό αυτών των οχημάτων κατέστη αναγκαία, προσφέροντας θεμελιώδη συμβολή έγκαιρα στη μείωση της αγοράς. Αυτός ο τύπος δραστηριότητας τοποθετείται σε ένα βιομηχανικό πλαίσιο που προβλέπει τη χρήση ολοένα ταχύτερων και πιο αξιόπιστων εργαλείων εν αναμονή πολλαπλών συνθηκών λειτουργίας μέσω προσομοιώσεων ολόκληρης της διάταξης των μελλοντικών κινητήρων. Οι αυτοκινητοβιομηχανίες αντιμετωπίζουν σημαντικές προόδους όσον αφορά τις στρατηγικές ελέγχου των ρύπων ώστε να συμμορφώνονται με τα συνεχώς αυστηρότερα πρότυπα εκπομπών. Ειδικά στους κινητήρες βαρέων φορτηγών και λεωφορείων, το NG έγινε όλο και πιο ελκυστικό ως εναλλακτικό καύσιμο, όσον αφορά τις εκπομπές και την απόδοση σε σύγκριση με τα παραδοσιακά καύσιμα, μειώνοντας τις δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία και το κοινωνικό κόστος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.



Σχήμα 3.1: Κινητήρας Scania G340 με χρήση αερίου [38]

Για τους στοιχειομετρικούς κινητήρες CNG SI, το καταλληλότερο σύστημα μείωσης των ρύπων είναι ο καταλυτικός μετατροπέας τριών οδών (TWC). Ομοίως με τους κινητήρες βενζίνης SI, αυτή η συσκευή επιτρέπει τον έλεγχο των NO_x, του άκαυστου μεθανίου (CH₄) και άλλων εκπομπών ρύπων (CO, NMHC). Η ταυτόχρονη μετατροπή αυτών των ειδών είναι δυνατή αποκλειστικά σε ένα πολύ μικρό εύρος σύνθεσης εισόδου γύρω από μία στοιχειομετρική κατάσταση [39]. Σε σύγκριση με τον κινητήρα βενζίνης, αυτό το βέλτιστο σημείο λειτουργίας μειώνεται περαιτέρω, λόγω της απότομης πτώσης της αποδοτικότητας της μετατροπής NO_x μόλις επιτευχθεί μια ελαφρώς πτωχή τιμή λ και σε μια μη πλήρη μετατροπή THC_s τόσο σε αδύνατες όσο και σε πλούσιες συνθήκες [40].

Προηγούμενες μελέτες έχουν αποδείξει ευρέως τις διαφορές στην απόδοση της μετατροπής μεταξύ της δοκιμής σταθερής κατάστασης και της δυναμικής κατάστασης. Μέσα στο μηχανισμό υπάρχουν ορισμένα είδη που έχουν την ικανότητα να οξειδώνονται ή να μειώνονται σύμφωνα με τη σύνθεση των καυσαερίων. Το πιο σημαντικό από αυτά τα συστατικά είναι το δημήτριο (ατομικός αριθμός 58), το οποίο προστίθεται ως σταθεροποιητής και ως συστατικό για την αποθήκευση του οξυγόνου. Αυτές οι επιδράσεις έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην τιμή λάμδα στο εσωτερικό του καταλύτη, η οποία πρέπει να διερευνηθεί κατάλληλα για την καλύτερη διαχείριση της συμπεριφοράς του TWC. Υπό πραγματικές συνθήκες οδήγησης, γίνονται αρκετές αποκλίσεις του AFR από τη στοιχειομετρική τιμή, λόγω των φάσεων διακοπής του καυσίμου, της κακής λειτουργίας του κινητήρα και της καθυστέρησης της απόκρισης του συστήματος ελέγχου του καυσίμου [41].



Σχήμα 3.2: Καταλυτικός μετατροπέας τριών οδών (TWC) [42]

Σε αυτό το σενάριο, τα πολυάριθμα καθήκοντα και τα αναφερόμενα εργασιακά τυπικά ζητήματα αυτής της συσκευής μετεπεξεργασίας απαιτούν, από την εισαγωγή της, μια ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων ικανών να αναλύουν συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας.

Οι προσεγγίσεις μοντελοποίησης κατηγοριοποιούνται γενικά ως 0D, 1D και 3D, με αυξανόμενα επίπεδα ακρίβειας και πολυπλοκότητας. Μια προσέγγιση μηδενικών διαστάσεων χρησιμοποιείται μόνο για συνθήκες σταθερής κατάστασης, καθώς λαμβάνεται υπόψη μόνο η μέση ροή της μάζας των καυσαερίων, μειώνοντας έτσι τη συσκευή αντίδρασης σε ένα στοιχείο που εκτελεί τη χημική μετατροπή σύμφωνα με τις κινητικές παραμέτρους που δίδονται ως είσοδος. Πιο πολύπλοκη είναι η τρισδιάστατη προσέγγιση, που χρησιμοποιείται όταν απαιτείται ο χαρακτηρισμός της κατανομής της ροής στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι σίγουρα βελτιωμένη επειδή επιτρέπει τον προσδιορισμό των ακτινωτών επιπτώσεων της ροής μέσα στον καταλύτη. Ο πραγματικός περιορισμός αντιπροσωπεύεται από υψηλές υπολογιστικές προσπάθειες, οι οποίες δεν επιτρέπουν τη διερεύνηση σε πολύ μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας, όπως οι μεταβλητές ενός δυναμικού κύκλου. Ένας καλός συμβιβασμός αντιπροσωπεύεται από μοντέλα 1D που επιτρέπουν την προσομοίωση μιας θερμικής ρευστότητας δυναμικής συμπεριφοράς ολόκληρου του συστήματος εξάτμισης κατά τη διάρκεια μιας σταθερής κατάστασης και παροδικής κατάστασης με μειωμένη υπολογιστική προσπάθεια [43].

Η βαθμονόμηση του κινητικού μοντέλου αντιδράσεων μέσα στον καταλύτη είναι σίγουρα ένα από τα πιο απαιτητικά θέματα. Υπάρχουν αρκετές μελέτες στη βιβλιογραφία, κυρίως για τους παραδοσιακούς κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα βενζίνης (SI).

Μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση μοντελοποίησης, βασισμένη σε 104 στάδια αντίδρασης, ενός κινητικού σχήματος TWC με μίγμα καυσαερίων από κινητήρες με φυσικό αέριο προτάθηκε από τους Zeng et al (2016) [44]. Ωστόσο, σε αυτή τη μελέτη αναλύθηκαν μόνο οι συνθήκες SS, οπότε τα φαινόμενα αποθήκευσης οξυγόνου και οι διαταραχές στο AFR δεν εξετάστηκαν. Πολύ λίγες πληροφορίες είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία σχετικά με τα ειδικά

χαρακτηριστικά των συστημάτων TWC που εφαρμόζονται στα οχήματα φυσικού αερίου. Από αυτή την άποψη, μια σημαντική συμβολή παρέχεται από τους Tsinoğlu D. N. et al. (2009) μέσω της σύγκρισης μεταξύ χημικών στοιχείων και καταλυτών κεραμικού αφρού [45].

Με μια ευνοϊκή αναλογία μεταξύ της ακρίβειας και του χρόνου υπολογισμού, στην παρούσα εργασία ένα «σταθερό» μοντέλο, εξοπλισμένο με πλήρη υπο-μοντέλα αποθήκευσης και απελευθέρωσης οξυγόνου, έχει στηθεί για να αναλύσει την επίδραση των κυκλικών διαταραχών στα καυσαέρια ενός NG βαρέως τύπου. Επίσης, διερευνώνται οι επιδόσεις του καταλύτη υπό γρήγορες παροδικές δυναμικές AFR.

Οι Maio D. M. (2019) ανέπτυξαν ένα προγνωστικό μοντέλο της συμπεριφοράς του καταλύτη με αποθήκευση οξυγόνου και απελευθέρωση ενός βαρέως τύπου κινητήρα που τροφοδοτείται με NG [46]. Έχει αποδειχθεί η ανάγκη αναπροσαρμογής του υφιστάμενου συστήματος αντιδράσεων για TWC κινητήρες με βενζίνη, ώστε να καταστούν κατάλληλοι για χρήση NG. Ένα πρωτόκολλο για τη βαθμονόμηση των κύριων αντιδράσεων προσδιορίστηκε μέσω μιας επαναληπτικής προσέγγισης δοκιμής και σφάλματος. Η βαθμονόμηση του κινητικού σχήματος των αντιδράσεων πραγματοποιήθηκε ξεκινώντας από τις εκπομπές σε πλήρες φορτίο, τόσο σε σταθερή κατάσταση όσο και σε παροδικές συνθήκες. Αντιπροσωπεύει ένα καλό σημείο εκκίνησης και έναν πρώτο στόχο στη χρήση ενός απλουστευμένου σχήματος για τη διαχείριση των πολύπλοκων φαινομένων που συμβαίνουν σε ένα TWC για την μετέπειτα αντιμετώπιση των εκπομπών από κινητήρες NG.

Η ανταπόκριση του μοντέλου όσον αφορά τις εκπομπές είναι επαρκής σε συνθήκες υψηλού φορτίου και εξακολουθεί να είναι αποδεκτή υπό συνθήκες μεσαίου-χαμηλού φορτίου, λαμβάνοντας επίσης υπόψη τις υψηλότερες αβεβαιότητες της μέτρησης από τις συσκευές αναλυτή, που υπάρχουν σε αυτές τις συνθήκες. Η οξείδωση του CH₄ αντιπροσωπεύει το κύριο ανοιχτό σημείο του τρέχοντος σχήματος σε συνθήκες απλής καύσης και κατά τη διάρκεια της δυναμικής σάρωσης λάμδα, που χαρακτηρίζεται από διαφορετικά φαινόμενα σε σχέση με παρόμοιες στάσιμες συνθήκες.

Σε γενικές γραμμές, επιτυγχάνεται μια λογική πρόβλεψη του μοντέλου, με αποτέλεσμα μια επαρκή αναπαράσταση της δραστηριότητας του καταλύτη σε δυναμικές συνθήκες. Οι φάσεις ψυχρής εκκίνησης πριν από τη θερμοκρασία του σβησίματος και η ανάλυση στους κύκλους οδήγησης (αντιπροσωπευτικούς των πραγματικών παροδικών συνθηκών εργασίας) χρειάζονται περαιτέρω διερεύνηση του ATS, όπως το WHTC, καθώς απαιτείται και η επικύρωση του μοντέλου με διαφορετικούς κινητήρες NG.

3.2 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΟΥ EURO 7 ΣΤΗΝ ΑΛΥΣΙΔΑ ΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Τα παγκόσμια πρότυπα εκπομπών εισάγονται σε σημαντικές περιοχές παραγωγής των αυτοκινήτων με γρήγορο ρυθμό. Η Ευρώπη, η Βραζιλία, η Κίνα και η Ινδία έχουν ήδη, ή θα εισαγάγουν αυστηρότερα πρότυπα εκπομπών ρύπων από το 2022 και μετά.

Οι βραχυχρόνιες προβλέψεις του IHS Markit φτάνουν προς το παρόν έως το 2025 και ως εκ τούτου θα αποτυπώσουν την επίδραση αυτών των προτύπων, αντικατοπτρίζοντας τους βασικούς προμηθευτές στις αγορές, καθώς και τους τεχνολογικούς προμηθευτές OEM και Tier 1 που θα υιοθετήσουν για να παραμείνουν συμμορφωμένοι.

Κατά τα έτη 2018–2019, φαίνεται η σημασία της κινεζικής κυβέρνησης για παράδειγμα να εφαρμόζει το CN6a, με περίπου 20 εκατομμύρια οχήματα. Η σημασία του Euro 7 και η διασφάλιση ότι η νομοθεσία είναι σαφής και εκτεταμένη φαίνεται περίπου με 12 εκατομμύρια οχήματα που αναμένεται να συμμορφωθούν με το Euro 7 έως το 2025. Πάνω από το 13% των οχημάτων με κινητήρα καύσης που θα πωληθούν έως το 2025 θα είναι σύμφωνα με το πρότυπο εκπομπών Euro 7.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, τα πρότυπα των εκπομπών αναμένεται να παραμείνουν σταθερά έως το 2025, με περισσότερο από το 14% της παραγωγής των οχημάτων να εμπίπτει σε αυτό το πρότυπο το 2025 [47].

3.2.1 Κανονισμοί παγκόσμιων εκπομπών

Κίνα

Με την εισαγωγή των CN6a και CN6b τόσο κοντά, είναι όλο και πιο πιθανό ότι πολλοί κατασκευαστές θα στοχεύουν απλώς τα πρότυπα εκπομπών CN6b και θα παρακάμπτουν εντελώς το CN6a.

Η κινεζική κυβέρνηση έχει κάνει ένα μεγάλο βήμα προς τις μηδενικές εκπομπές ρύπων NOx, θέτοντας το όριο για CN6b στα 35mg/km για τον τύπο I και για τον τύπο III όπου κυμαίνεται από 35-50 mg/km στην προτεινόμενη νομοθεσία στα 35μ/χλμ (αυτό είναι πάνω από το μισό επίπεδο που έχει οριστεί για το Euro 6d).

Η απόφαση για την τυποποίηση των εκπομπών βενζίνης και ντίζελ συζητήθηκε ευρέως ως πρόταση για το Euro 6, αλλά η Κίνα έχει πλέον πρωτοστατήσει με το CN6b, να υιοθετεί ένα κοινό πρότυπο εκπομπών.

Παρ' όλα αυτά, η χώρα εξακολουθεί να υστερεί σε σχέση με την Ευρώπη σε ένα βασικό τομέα. Αυτός είναι οι RDE. Υπάρχουν σχέδια για την εισαγωγή δοκιμών RDE στην Κίνα. Ωστόσο, αναμένεται να συμμορφωθεί αρχικά με συντελεστή 2,1 τόσο για τα NOx όσο και για τα PN βάσει της πράξης EU6d RDE 2 με προσθήκη ορίων για το N2O.

Ευρώπη

Παρόλο που η νομοθεσία δεν έχει ακόμη εκπονηθεί, ο δρόμος της Ευρώπης για την επιβολή των προτύπων εκπομπών Euro 7 γίνεται πολύ πιο ξεκάθαρος.

Ο τελικός στόχος NOx είναι πιθανό να επηρεαστεί από το CN6b, που πέφτει στην περιοχή των 30–35 mg/km. Υπάρχει δυνατότητα περαιτέρω μείωσης, αλλά αυτό φαίνεται απίθανο λόγω της δυσκολίας στη μείωση των συντελεστών συμμόρφωσης. Ένας στόχος 35 mg/km NOx θα είναι επίσης ουδέτερος, αντιπροσωπεύοντας μείωση περίπου 42% για τη βενζίνη και περίπου 56% για τα οχήματα ντίζελ.

Εκτός από τη μείωση των NOx, υπάρχουν πολλά άλλα βασικά χαρακτηριστικά που πιθανόν να εμφανίζονται στο πρότυπο Euro 7. Ένα από αυτά σίγουρα από την άποψη της βενζίνης θα είναι ένα μειωμένο μέγεθος μέτρησης των σωματιδίων από 23 σε 10 nm. Υπάρχει επίσης δυνατότητα της μέτρησης των ρύπων, όπως η σκόνη των φρένων.

Η IHS Markit αναμένει ότι άλλοι ρύποι όπως η αμμωνία θα συμπεριληφθούν στη νομοθεσία, ενώ η αυξημένη έμφαση στην κρύα εκκίνηση και τα κρύα τμήματα του WLTP και RDE θα επηρεάσουν τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούν τα OEM στην μετεπεξεργασία τους με καυσαέρια. Το προσδόκιμο εδώ είναι να επεκταθούν τα νόμιμα όρια για τις δοκιμές στους -7 °

C, μειώνοντας παράλληλα το συντελεστή συμμόρφωσης για τις εκπομπές όπως το CO σε δοκιμές RDE. Αναμένεται επίσης επέκταση των απαιτήσεων αντοχής από 160.000 χλμ. σε 200.000 χλμ. και αυστηρότερη παρακολούθηση κατά τη λειτουργία.

Ινδία

Το Bharat VI εισήχθηκε το 2020. Η ινδική κυβέρνηση πήρε την απόφαση να μεταβεί κατευθείαν από το Bharat IV στο Bharat VI, ευθυγραμμίζοντας τη διαδικασία με τα πρότυπα Euro 6b.

Παρ' όλα αυτά, άλλα κίνητρα, οι πρωτοβουλίες και η αντίληψη του κοινού κατέληξαν στο να είναι ο κινητήριος σημαντικός παράγοντας στις αποφάσεις μετεπεξεργασίας των καυσαερίων στην Ινδία.

Το κόστος ήταν πάντα ο βασικός οδηγός, το οποίο είναι απίθανο να αλλάξει. Αρκετοί OEM κάνουν ήδη την επιλογή να απομακρυνθούν από τους μικρούς κινητήρες ντίζελ λόγω του πρόσθετου κόστους της μεταγενέστερης αντιμετώπισης της νομοθεσίας.

Τα κυβερνητικά κίνητρα, όπως χαμηλοί ειδικοί φόροι κατανάλωσης σε επιλεγμένα οχήματα μήκους κάτω των 4 μέτρων, είναι ένα παράδειγμα που μπορεί να επηρεάσει επίσης την αγορά ντίζελ των μικρών αυτοκινήτων. Με την προσθήκη ενός μεγάλου φίλτρου σωματιδίων που προκαλεί προβλήματα στη συσκευασία, μπορεί να ωθήσει ορισμένους OEM πάνω από το όριο των 4 μέτρων και να τους αναγκάσει να επανεξετάσουν τη στρατηγική τους για τον κινητήρα.

Η αγορά στην Ινδία προβλέπεται να κυριαρχείται από οχήματα με κινητήρα βενζίνης. Με τα πρότυπα εκπομπών από το 2020 να πλησιάζουν στενά με το Euro 6b, η IHS Markit αναμένει ότι ο όγκος του TWC στη χώρα θα συνεχίσει να αυξάνεται.

Ηνωμένες Πολιτείες

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, η βαθμίδα 3 έχει πλέον καθιερωθεί και προβλέπεται ότι θα παραμείνει για το άμεσο μέλλον στην επόμενη δεκαετία. Υπάρχει κοινή συμφωνία εντός του κλάδου ότι η σύνδεση μεταξύ της πραγματικής οδήγησης και των δοκιμασμένων αποτελεσμάτων στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι πολύ μπροστά από οπουδήποτε αλλού.

Παρ' όλα αυτά, υπάρχει κάποια συζήτηση σχετικά με την αλλαγή των προτύπων εκπομπών των σωματιδίων σε όλη τη χώρα, με 1 mg/μίλι υπό συζήτηση, τόσο στην Καλιφόρνια όσο και ενδεχομένως σε ομοσπονδιακά πρότυπα εκπομπών επίσης.

Παρόλο που δεν αναμένονται συγκεκριμένες αλλαγές στη νομοθεσία στη Βόρεια Αμερική, η IHS Markit πιστεύει ότι οι τεχνολογικές τάσεις στην περιοχή θα παραμείνουν συνεπείς, με το TWC να είναι η κύρια επιλογή της μετεπεξεργασίας βενζίνης.

Εάν οι ΗΠΑ θεσπίσουν αυστηρότερη νομοθεσία σχετικά με τον αριθμό των σωματιδίων και τη συγκεκριμένη μάζα, θα συμβεί πολύ μεγαλύτερη στροφή στην τεχνολογία GPF.

3.2.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

Βενζίνη

Με τα πρότυπα Euro 7, τα συστήματα μετεπεξεργασίας της βενζίνης επηρεάζονται από μερικές βασικές λεπτομέρειες. Η μεγαλύτερη από αυτές για τους OEM είναι πιθανόν να είναι η απόφαση να ενσωματωθούν σωματίδια έως 10 nm στις δοκιμές. Προς το παρόν, η αγορά φίλτρων των σωματιδίων βενζίνης είναι κυρίως μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται σε κινητήρες άμεσου ψεκασμού. Με σωματίδια 10 nm σε συνδυασμό με τη δυνατότητα μέτρησης άλλων εκπομπών, όπως σωματίδια σκόνης των φρένων, τα GPF θα γίνουν υποχρεωτικά στη βιομηχανία της βενζίνης.

Καθώς η αγορά βενζίνης οδηγεί την απορρόφηση των υβριδικών συστημάτων 48V+, η δυνατότητα για τεχνολογία ηλεκτρικά θερμαινόμενων καταλυτών βενζίνης είναι υψηλή, αν και το μέγεθος της αγοράς είναι προς το παρόν ασαφές. Ο βαθμός στον οποίο η ψυχρή εκκίνηση και η προθέρμανση λαμβάνονται υπόψη στους αριθμούς του συνολικού κύκλου θα τον καθορίσουν τελικά.

Με το όριο των NO_x να μειώνεται στα 35mg/km, είναι πιθανό ότι ο αριθμός των οχημάτων και των OEM που χρησιμοποιούν περισσότερους από έναν καταλύτες τριών κατευθύνσεων θα αυξηθεί. Όπως συμβαίνει με όλα τα τρέχοντα συστήματα μετεπεξεργασίας, η συσκευασία του απαραίτητου εξοπλισμού σε ένα όχημα παραμένει η μεγαλύτερη πρόκληση. Ως εκ τούτου, η αγορά των επικαλυμμένων GPF θα αυξηθεί όταν εισαχθεί το Euro 7.

Οι προοπτικές για την τεχνολογία εξάτμισης των βενζινοκίνητων οχημάτων είναι σε μεγάλο βαθμό μια εξέλιξη αυτού που υπάρχει ήδη, χρησιμοποιώντας καλύτερη αρχιτεκτονική και χώρο στο όχημα.

Μια βασική πρόκληση για κάθε σχεδιασμό οχήματος πρόκειται να είναι η συσκευασία, με μειώσεις στο στόχο εκπομπών και έμφαση στην ψυχρή λειτουργία. Ένα παραδοσιακό ενιαίο TWC δεν θα είναι αρκετό για την επίτευξη των προτύπων εκπομπών Euro 7.

Η πρόσληψη ηλεκτρικά θερμαινόμενων καταλυτών και η γενική χρήση GPF είναι οι δύο βασικές τεχνολογικές προκλήσεις που προβλέπει η IHS Markit ως άμεση συνέπεια της αυστηρότητας των προτύπων εκπομπών.

Η παγκόσμια αγορά του GPF θα αυξηθεί σε περισσότερες από 30 εκατομμύρια μονάδες το 2025, με το CN6b και το Euro 7 να είναι δύο από τους βασικούς συντελεστές στους όγκους των συστατικών που εμφανίζονται. Μια ακόμη βασική τεχνολογία, ενώ δε βρίσκεται απευθείας στο σύστημα εξάτμισης, είναι η πρόσληψη του ψυγμένου EGR σε βενζινοκίνητες.

Πετρέλαιο

Οι σημαντικές μειώσεις που επέρχονται στις εκπομπές NO_x, CO και HC θα έχουν περαιτέρω αντίκτυπο κόστους στις ήδη ακριβές λύσεις μετεπεξεργασίας ντίζελ. Για να πληρούν τα πρότυπα των εκπομπών Euro 6d, οι OEM υιοθετούν ήδη πολιτικές για την προσαρμογή της μετέπειτα επεξεργασίας όσο το δυνατόν πιο κοντά και η αναμενόμενη νομοθεσία που στοχεύει σε εκπομπές ψυχρού περιβάλλοντος και προθέρμανσης που πιθανόν να απαιτεί περαιτέρω στενή σύζευξη, πρόσθετα εξαρτήματα ή πηγές θέρμανσης.

Αρκετοί προμηθευτές του Tier 1 διερευνούν επίσης τη δυνατότητα μείωσης των επιθυμητών θερμοκρασιών απενεργοποίησης των καταλυτών, καθώς και το χρόνο που απαιτείται για την επίτευξη της λειτουργίας τους.

Όπως και με τα βενζινοκίνητα οχήματα, η εισαγωγή της αρχιτεκτονικής του συστήματος 48V+ δίνει στους OEM τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν ηλεκτρικά

θερμαινόμενο καταλύτη, επιτρέποντας πολύ ταχύτερους χρόνους σβησίματος. Αυτό μειώνει την ανάγκη για εκτεταμένη στενή σύνδεση της μετεπεξεργασίας. Η IHS Markit προβλέπει ότι τα οχήματα ντίζελ με αρχιτεκτονική 48V+ θα είναι εξοπλισμένα με τεχνολογία e-cat.

Παρά τα οφέλη, η αρχιτεκτονική 48V+ με τεχνολογία e-cat θα προσθέσει μεγάλο κόστος σε μια ακριβή διάταξη εξάτμισης. Για τους OEM που δεν υιοθετούν 48V+, μια πιθανή επιλογή θα είναι για ένα πολύ μικρότερο σύστημα SCR, εξοπλισμένο με στενή σύνδεση και με μειωμένη θερμοκρασία απενεργοποίησης λόγω του μεγέθους του. Αυτό το σύστημα θα δει αποτελεσματικά τρεις καταλύτες SCR, συμπεριλαμβανομένου του SCR στο φίλτρο.

Όπως συμβαίνει με όλες τις επιλογές μετεπεξεργασίας, το κόστος έναντι του χώρου της συσκευασίας θα είναι μια λεπτή ισορροπία που πρέπει να ξεπεράσουν όλοι οι OEM, ειδικά για τα μικρότερα οχήματα της κατηγορίας A και B.

Η συνολική παραγωγή των οχημάτων ντίζελ παγκοσμίως και στην Ευρώπη προβλέπεται να μειωθεί σημαντικά έως το 2028. Παρά το γεγονός αυτό, η πολυπλοκότητα και το κόστος της μετεπεξεργασίας που εφαρμόζεται στα οχήματα ντίζελ θα συνεχίσει να αυξάνεται.

Η αγορά των καταλυτών, κυριαρχείται παραδοσιακά από τον καταλύτη οξειδωσης ντίζελ. Για το Euro 6, παρατηρήθηκε στενή σύζευξη του καταλύτη. Ωστόσο, με τη μείωση των εκπομπών που προβλέπεται για το Euro 7, η IHS Markit αναμένει αύξηση των ηλεκτρικά θερμαινόμενων καταλυτών και καταλυτών αποθήκευσης NOx, με την παραγωγή NSC να κορυφώνεται πάνω από 2 εκατομμύρια μονάδες για το 2025 για οχήματα συμβατά με Euro 6 και 7.

Με την αυξανόμενη πρόκληση της μείωσης των εκπομπών και του χώρου που αποτελεί πρωτοδότηση, η εισαγωγή του Euro 7 θα οδηγήσει επίσης την επένδυση SCR στην τεχνολογία φίλτρων να αυξάνει την παραγωγή σε μόλις περισσότερες από 4 εκατομμύρια μονάδες για οχήματα συμβατά με Euro 6 και 7.

Η αγορά των συστημάτων SCR θα παραμείνει. Για οχήματα χωρίς αρχιτεκτονική 48V+, παραμένει δυνατό να τεθεί σε εφαρμογή ένα ακόμη σύστημα SCR, πράγμα που σημαίνει ότι ένα μικρότερο «κονσερβοποιημένο» SCR τοποθετείται παράλληλα με ένα ενδοδαπέδιο SCR. Η πρόθεση να είναι η μικρότερη η συσκευή στενής σύνδεσης θα έχει μειωμένο χρόνο σβησίματος και θα αντιμετωπίζει τα καυσαέρια χαμηλής θερμοκρασίας, ενώ το μεγαλύτερο «υπόγειο» σύστημα θα χρησιμοποιείται για καυσαέρια υψηλότερης θερμοκρασίας, όπως στην οδήγηση στον αυτοκινητόδρομο.

Τα οχήματα ντίζελ θα είναι όλο και περισσότερο εξοπλισμένα με συνδυασμό όλων των παραπάνω. Για άλλη μια φορά, αυτό θα προσφέρει στους προμηθευτές και τους OEM την πρόκληση να εξασφαλίσουν το σωστό μέγεθος ψυγείου για απόδοση, αλλά αυτό θα ανταλλάσσεται με το κόστος και τη συσκευασία της τεχνολογίας.

3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΕ ΒΑΡΕΩΣ ΤΥΠΟΥ ΝΤΙΖΕΛ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΙ ΈΛΕΓΧΟ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

Λόγω των ανώτερων ιδιοτήτων πρόσφυσης με υψηλή ροπή και χαμηλή κατανάλωση καυσίμου, οι κινητήρες ντίζελ ήταν ο κυρίαρχος κινητήρας για τα βαρέως τύπου οχήματα (HD) και πολλές άλλες εφαρμογές. Η ύπαρξη ζωνών θερμοκρασίας πλούσιων σε καύσιμα και καύση προέκυψε από τη μη αναμεμιγμένη καύση με ελεγχόμενη διάχυση στη συμβατική καύση ντίζελ, ωστόσο, οδήγησε στην εκπομπή σωματιδίων (PM) και οξειδίων του αζώτου (NOx). Καθώς παράγονται και χρησιμοποιούνται περισσότερα οχήματα με την αυξημένη οικονομική ανάπτυξη και ευημερία τόσο στις ανεπτυγμένες όσο και στις αναπτυσσόμενες χώρες, είναι απαραίτητο να μειωθούν οι εκπομπές CO₂ και οι εκπομπές ρύπων, όπως αντικατοπτρίζεται με την εισαγωγή αυστηρότερων κανονισμών των εκπομπών. Συγκεκριμένα, η αμερικανική EPA

ολοκλήρωσε πρόσφατα τη ρύθμιση της Φάσης 2 HD αερίων του θερμοκηπίου (GHG), η οποία απαιτεί περίπου μείωση στο 5% του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε σύγκριση με τη Φάση 1. Επιπλέον, το Συμβούλιο Αεροπορικών Πόρων της Καλιφόρνιας συνεχίζει να προχωρά με τη μείωση των εκπομπών HD NOx έως και 90% σε 0,02 g/bhp-hr από νέα φορτηγά έως το 2024 περίπου, το οποίο είναι σημαντικά χαμηλότερο από το τρέχον όριο των 0,2 g/bhp-hr.

Αυτές οι νομοθετικές τάσεις που περιγράφονται παραπάνω θέτουν υψηλότερες απαιτήσεις για την ανάπτυξη κινητήρων ντίζελ και απαιτούν περαιτέρω ερευνητικές εργασίες σε τεχνολογίες κινητήρων και μετεπεξεργασίας προκειμένου να μειωθούν ταυτόχρονα οι εκπομπές NOx και να βελτιωθεί η καθαρή αναφερόμενη απόδοση (NIE). Επιπλέον, συστήματα μετεπεξεργασίας, όπως το σύστημα εκλεκτικής καταλυτικής αναγωγής NOx (SCR), το φίλτρο σωματιδίων ντίζελ (DPF) και ο καταλύτης οξειδωσης ντίζελ (DOC) εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία των καυσαερίων (EGT). Απαιτείται ελάχιστη EGT περίπου 200 °C για την απενεργοποίηση του καταλύτη και την έναρξη του ελέγχου των εκπομπών [48]. Αυτό είναι εξαιρετικά δύσκολο σε συνθήκες χαμηλού φορτίου καθώς το EGT είναι πολύ χαμηλό για να παρέχει επαρκή μείωση των εκπομπών. Προηγμένες τεχνολογίες καύσης, όπως η πολλαπλή στρατηγική ψεκασμού του καυσίμου, η υψηλότερη πίεση ψεκασμού του καυσίμου και η υψηλότερη πίεση ώθησης έχουν χρησιμοποιηθεί για να βελτιωθούν στο NIE, ωστόσο, αυτές οι τεχνολογίες συνήθως συνοδεύονται με χαμηλότερο EGT [49].

Ο κύκλος Miller υιοθετήθηκε πρόσφατα για τη μείωση των NOx στους κυλίνδρους και τη διαχείριση της θερμοκρασίας των καυσαερίων των κινητήρων ντίζελ, (αν και αρχικά ο κύκλος του Miller κατοχυρώθηκε για τον κινητήρα βενζίνης με αναζωπυρωτή σπινθήρα από τον Ralph Miller το 1957) [50]. Σε σύγκριση με τις άλλες πιο συμβατικές τεχνικές όπως ο χρόνος καθυστέρησης της έγχυσης, μετά την έγχυση και το γκάζι εισαγωγής, ο κύκλος Miller είναι μια αποτελεσματική τεχνολογία για τις εκπομπές NOx και τον έλεγχο του EGT, ιδιαίτερα στον κινητήρα λειτουργίας με χαμηλό φορτίο (στον κινητήρα ντίζελ HD) [51]. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο κύκλος Miller που εφαρμόζεται μέσω χρονισμών πρώιμου ή όψιμου κλεισίματος των βαλβίδων εισαγωγής (IVC) μειώνει τον πραγματικό λόγο συμπίεσης και το φορτίο εισαγωγής, με αποτέλεσμα τη μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας καύσης στον κύλινδρο και του λόγου αέρα-καυσίμου.

Προηγούμενες μελέτες έχουν αποδείξει την ικανότητα του κύκλου Miller να μειώνει τις εκπομπές NOx από τον κινητήρα. Το επίπεδο μείωσης των NOx που επιτυγχάνεται μόνο με τον κύκλο Miller είναι περιορισμένο και μικρότερο από το EGR, ιδιαίτερα σε κινητήρα με χαμηλά φορτία. Επιπρόσθετα, η προκύπτουσα χαμηλότερη πίεση και θερμοκρασία στον κύλινδρο στην αρχή της καύσης οδηγούν σε κακή σταθερότητα της καύσης και υψηλότερες εκπομπές CO, αλλά και άκαυστο HC. Το iEGR μέσω 2ου IVO κατά τη διάρκεια της διαδρομής εξάτμισης ή/και το άνοιγμα της βαλβίδας εξαγωγής (2EVO) κατά τη διαδρομή εισαγωγής μπορεί να συγκρατήσει θερμά υπολείμματα από τον προηγούμενο κύκλο. Η συνδυασμένη χρήση του κύκλου iEGR και του Miller επέτρεψε τη θερμική διαχείριση των καυσαερίων με χαμηλά επίπεδα άκαυστων εκπομπών HC και CO, αλλά με ανεπαρκή μείωση των εκπομπών NOx.

Το ψυγμένο εξωτερικό EGR είναι μια αποδεδειγμένη τεχνολογία για τη μείωση του σχηματισμού των NOx στον κύλινδρο, λόγω των θερμικών, χημικών και αραιωτικών επιπτώσεων. Μελέτες έχουν διερευνήσει τη συνδυασμένη χρήση του κύκλου Miller και του EGR και έχουν αποδείξει ότι αυτή η στρατηγική είναι αποτελεσματική στον περιορισμό των εκπομπών NOx από τον κινητήρα [52]. Η συνδυασμένη χρήση του κύκλου Miller με EGR θα μπορούσε να μειώσει τις εκπομπές NOx από 10 g/kWh σε περίπου 1 g/kWh σε λειτουργία χαμηλού φορτίου.

Για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που αντιμετωπίζουν οι τρέχοντες κινητήρες ντίζελ HD σε λειτουργία χαμηλού φορτίου, απαιτούνται ερευνητικές και αναπτυξιακές

εργασίες για την περαιτέρω βελτιστοποίηση της διαδικασίας καύσης για την επίτευξη ταυτόχρονης μείωσης της κατανάλωσης του καυσίμου.

Οι Ban Z. et al. (2019) ανέδειξαν τα αποτελέσματα με τις διαφορετικές προηγμένες στρατηγικές ελέγχου καύσης και ανέλυσαν την αποτελεσματικότητά τους για τη βελτίωση των θερμοκρασιών των καυσαερίων και τη μείωση των εκπομπών, καθώς και για αύξηση του NIE και τη μείωση της συνολικής κατανάλωσης του ρευστού σε λειτουργία χαμηλού φορτίου [53]. Η πειραματική τους μελέτη πραγματοποιήθηκε σε μονοκύλινδρο κινητήρα ντίζελ HD με ταχύτητα κινητήρα 1150 σ.α.λ. και το φορτίο του κινητήρα 2,2 bar αντίστοιχα με τη μέση αποτελεσματική πίεση (IMEP). Οι συμβατικές στρατηγικές όπως ο καθυστερημένος χρόνος έγχυσης και το γκάζι εισαγωγής για τη διαχείριση του EGT διερευνήθηκαν και συγκρίθηκαν με τον κύκλο Miller και το iEGR. Επιπλέον, διερευνήθηκε η επίδραση του κύκλου Miller που λειτουργεί με εσωτερικό και εξωτερικό EGR στην καύση, την απόδοση και τις εκπομπές του κινητήρα. Τέλος, ανέλυσαν τη συνολική απόδοση του κινητήρα, αλλά και τις εκπομπές των καυσαερίων των διαφόρων στρατηγικών ελέγχου καύσης και εντοπίστηκαν οι βελτιστοποιημένες στρατηγικές ελέγχου καύσης του κινητήρα. Γενικότερα κατέληξαν στα εξής:

- Στρατηγικές όπως η καθυστερημένη SOI, το γκάζι εισαγωγής και το iEGR μπόρεσαν να αυξήσουν το EGT για να φθάσουν στην ελάχιστη απαίτηση των 200 °C, αλλά αυτές οι στρατηγικές μείωσαν την καθαρή αναγραφόμενη απόδοση (NIE) λόγω της σημαντικά καθυστερημένης διαδικασίας καύσης και της υψηλότερης άντλησης αναλόγως.
- Η λειτουργία του κύκλου Miller επέτρεψε υψηλότερο EGT με μικρό αντίκτυπο στο NIE, αλλά η χαμηλότερη θερμοκρασία του αερίου καύσης στον κύλινδρο είχε ως αποτέλεσμα υψηλότερα επίπεδα άκαυστων εκπομπών HC και CO. Ο κύκλος Miller με iEGR μπόρεσε να βελτιώσει τη διαδικασία καύσης και έτσι να μειώσει τις εκπομπές HC και CO, αλλά η ικανότητά του να ελαχιστοποιεί τις εκπομπές NOx ήταν πολύ περιορισμένη, ειδικά όταν το SOI βελτιστοποιήθηκε για να επιτύχει το μέγιστο NIE.
- Η εισαγωγή ενός μέτριου eEGR 26% στον κύκλο Miller με λειτουργία iEGR επέφερε ασήμαντο αντίκτυπο στην καύση, την απόδοση και τις εκπομπές των καυσαερίων του κινητήρα (εκτός από τις εκπομπές NOx). Ωστόσο, όταν αυξήθηκε το eEGR στο 44%, το EGT αυξήθηκε σημαντικά με υψηλότερο NIE και σημαντικά χαμηλότερες εκπομπές NOx. Αυτά επιτεύχθηκαν με αύξηση των εκπομπών αιθάλης, άκαυτου HC και εκπομπών CO.
- Κατά τη σύγκριση στο βελτιστοποιημένο SOI διαφόρων στρατηγικών ελέγχου καύσης, ο κύκλος Miller που λειτουργούσε με iEGR και eEGR πέτυχε υψηλότερες εκπομπές NIE και χαμηλότερες εκπομπές NOx από τον κινητήρα, γεγονός που συνέβαλε στη μείωση της συνολικής κατανάλωσης των υγρών (καύσιμα και ουρία). Εν τω μεταξύ, το EGT αυξήθηκε αισθητά και οι εκπομπές αιθάλης μειώθηκαν σημαντικά σε σύγκριση με τη βασική λειτουργία του κινητήρα.
- Μεταξύ αυτών των στρατηγικών που ερευνήθηκαν, ο κύκλος Miller που λειτουργούσε με eEGR 44% και iEGR πέτυχε το υψηλότερο EGT των 225 °C και τις χαμηλότερες εκπομπές NOx 0,5 g/kWh. Εναλλακτικά, ο κύκλος Miller που λειτουργούσε με eEGR 44% και χωρίς iEGR πέτυχε το υψηλότερο NIE του

43,7% και τη χαμηλότερη συνολική κατανάλωση των υγρών 0,83 kg/h αυξάνοντας το EGT στους 216 ° C και μειώνοντας τις εκπομπές αιθάλης κάτω από το 0,01 g/kWh Το Ωστόσο, αυτές οι στρατηγικές παράγαν υψηλότερα επίπεδα άκαυστων εκπομπών HC και CO σε σχέση με άλλους τρόπους λειτουργίας του κινητήρα.

- Συνολικά, στρατηγικές όπως ο κύκλος Miller που λειτουργούν με eEGR και iEGR προσδιορίστηκαν ως αποτελεσματικά μέσα για τη διαχείριση του EGT και τον έλεγχο των εκπομπών, καθώς και τη βελτίωση της απόδοσης σε λειτουργία χαμηλού φορτίου, ελαχιστοποιώντας ουσιαστικά τη συνολική κατανάλωση των υγρών και ενδεχομένως συμμορφώνοντας με τη μελλοντική αποδοτικότητα του καυσίμου σε συνδυασμό με τους εξαιρετικά χαμηλούς κανονισμούς εκπομπών NOx.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τις προβλέψεις, ο παλινδρομικός κινητήρας εσωτερικής καύσης (ICE) θα συνεχίσει να χρησιμοποιείται ευρέως σε όλους τους τομείς: μεταφορές (ξηρά, θάλασσα και ουρανός), βιομηχανία και παραγωγή ενέργειας. Για παράδειγμα, παρά τη σημαντική ηλεκτροκίνηση των κινητήρων με βάση το ελαφρύ και βαρέως τύπου ICE για χερσαίες μεταφορές, ο τομέας με τη μεγαλύτερη διείσδυση του ηλεκτρισμού, ο θερμικός κινητήρας δηλαδή θα παραμείνει ο κύριος κινητήρας. Στην πραγματικότητα, η πλειοψηφία των σεναρίων που ερευνήθηκαν θεωρούν ότι διάφοροι τύποι κινητήρων που χρησιμοποιούν υγρά ή αέρια καύσιμα με βάση τον άνθρακα θα εξακολουθούν να καλύπτουν έως και το 80% του παγκόσμιου στόλου το 2050 (ακόμη και αν το μεγαλύτερο μέρος αυτών των κινητήρων σίγουρα θα υβριδοποιηθεί μερικώς). Επομένως, η ανάπτυξη του ICE, που οριστικοποιήθηκε με βάση το πεδίο εφαρμογής στη συμμόρφωση με τους περιορισμούς των ρύπων καθώς και τα επίπεδα εκπομπών CO_2 διατηρώντας ή αυξάνοντας την απόδοση, θα συνεχιστεί σίγουρα για τις επόμενες δεκαετίες.

Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, έχει καταβληθεί μια σημαντική προσπάθεια για τη μείωση των επιπέδων των εκπομπών των ρύπων που εκπέμπονται από τους ICE. Αυτή η ερευνητική και αναπτυξιακή δραστηριότητα οδήγησε σε ένα ευρύ φάσμα τεχνολογικών λύσεων όπως βελτιωμένα συστήματα ψεκασμού και διαχείριση του αέρα, ακριβέστερο σχεδιασμό του συνόλου του συστήματος καύσης, συσκευές μετεπεξεργασίας και ούτω καθεξής.

Πιο πρόσφατα, δόθηκε προσοχή και στα επίπεδα εκπομπών CO_2 , λόγω των γνωστών προβλημάτων που σχετίζονται με την υπερθέρμανση του πλανήτη και την εξάντληση του πετρελαίου. Η αντιμετώπιση της μείωσης του CO_2 απαιτεί μια συστημική προσέγγιση για τον ακόλουθο λόγο. Στις μέρες μας, η έννοια του καυσίμου για παλινδρομικούς κινητήρες εσωτερικής καύσης πρέπει να επεκταθεί, δεδομένου ότι η ηλεκτροκίνηση του κινητήρα οδηγεί τους κινητήρες να χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια, εκτός από συμβατικά (απολιθώματα, βιολογικά και εναλλακτικά), ως καύσιμα. Επομένως, το CO_2 εκπέμπεται όχι μόνο κατά τη λειτουργία του κινητήρα αλλά και όταν παράγεται το καύσιμο (συμπεριλαμβανομένου του ηλεκτρικού ρεύματος). Κατά συνέπεια, η μείωση του CO_2 επιδιώκεται σήμερα όχι μόνο κατά τη λειτουργία του κινητήρα, αλλά και σε επίπεδα παραγωγής του καυσίμου και της ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, το συνολικό αποτέλεσμα της μείωσης του CO_2 αναμένεται να επιτευχθεί σε ένα διαγωνισμό όπου η ζήτηση της ενέργειας αυξάνεται σημαντικά.

Είναι ευρέως αναγνωρισμένο ότι μία μόνο τεχνολογία δε θα λύσει πλήρως το πρόβλημα των εκπομπών CO_2 στην ατμόσφαιρα. Μάλλον, οι διάφορες διαθέσιμες τεχνολογίες θα πρέπει να ενσωματωθούν προκειμένου να λυθεί αυτό το παγκόσμιο πρόβλημα.

Η ταχεία αύξηση της ηλεκτροκίνησης του κινητήρα και οι ολοένα και πιο σύνθετες επιλογές αρχιτεκτονικής παρέχουν τόσο προκλήσεις όσο και ευκαιρίες. Παραμένει κρίσιμο ότι η επιλογή και η βελτιστοποίηση του συστήματος θεωρεί την πιο οικονομικά αποδοτική διαδρομή για την επίτευξη των μέγιστων οφελών. Αυτό απαιτεί μια φάση επιλογής ιδεών που μπορεί να εξετάσει γρήγορα ένα ευρύ φάσμα επιλογών, πριν πραγματοποιηθεί η λεπτομερής βελτιστοποίηση του σχεδιασμού. Γενικότερα έχουν εξεταστεί διαφορετικές προσεγγίσεις ανεξάρτητης αρχιτεκτονικής για την υποστήριξη αυτών των βημάτων. Αυτό μπορεί να εξεταστεί μέσα από μια σειρά από βελτιώσεις που αφορούν τον κινητήρα με τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Διαφορετικές αρχιτεκτονικές HEV επηρεάζουν το προφίλ λειτουργίας του κινητήρα με διαφορετικούς τρόπους
- Η κατανόηση της συνολικής αλληλεπίδρασης του συστήματος είναι σημαντική για την αρχική φάση του ορισμού των συστημάτων και των προδιαγραφών του κινητήρα
- Ο καθορισμός ενός κινητήρα που συμπληρώνει το προφίλ λειτουργίας ενός HEV επιτρέπει βελτιωμένα οφέλη κατανάλωσης καυσίμου με χαμηλότερο κόστος
- Όσον αφορά την αρχιτεκτονική, η ανεξάρτητη μοντελοποίηση επιτρέπει σε αυτές τις αντισταθμίσεις να αξιολογούνται γρήγορα και αποτελεσματικά για να υποστηρίξουν τη λήψη των αποφάσεων.

Υπάρχουν πολλά χαρακτηριστικά που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα, αλλά η ευκαιρία να ενισχυθεί ο κινητήρας μέσω ηλεκτροδότησης δε μπορεί να χαθεί στο δρόμο προς τη μελλοντική μείωση του CO_2 .

Ενώ, υπάρχουν οι βασικές τεχνολογίες, οι διαφορετικές προσεγγίσεις σε συνδυασμούς και μεγέθη στις παγκόσμιες αγορές δημιουργούν προκλήσεις για τη βιομηχανία. Για τους προμηθευτές και τους OEM, η ικανοποίηση των παγκόσμιων απαιτήσεων αποτελεί εμπόδιο αλλά και κόστος από τεχνική άποψη και γίνεται γρήγορα σαφές ότι ένα παγκόσμιο πρότυπο εκπομπών θα ήταν επωφελές, αλλά η πρακτικότητα αυτού είναι αβέβαιη.

Καθώς η νομοθεσία σε όλο τον κόσμο καθίσταται ουδέτερη ως προς τα καύσιμα και καθώς η τεχνολογία των κινητήρων στρέφεται προς την ηλεκτροκίνηση, το μεγάλο ερώτημα που παραμένει είναι εάν χρειάζεται τεχνολογικά ουδέτερη νομοθεσία στο μέλλον για να εξισορροπηθεί η εξίσωση για κινητήρες καύσης έναντι των ηλεκτρικών οχημάτων. Ενώ, η ηλεκτροκίνηση είναι αναπόφευκτη, το αν είναι η καλύτερη λύση στο εγγύς μέλλον πρέπει να ληφθεί υπόψη, επειδή τα καύσιμα χαμηλών εκπομπών άνθρακα και ο κινητήρας εσωτερικής καύσης έχουν ακόμα σημαντικό ρόλο να παίζουν τις επόμενες δεκαετίες.

Η νομοθεσία για το Euro 7 αναμένεται να εισαχθεί περί το 2024-2025, μετά την εισαγωγή νέων προτύπων στη Βραζιλία, την Κίνα και την Ινδία. Ενώ βρίσκεται ακόμη υπό συζήτηση, ο τελικός στόχος NOx θα είναι περίπου στην περιοχή των 35mg/km ή κάτω, με αυστηρότερους παράγοντες συμμόρφωσης και την εισαγωγή νέων εκπομπών που θα αποτελέσουν τις μεγαλύτερες προκλήσεις για τους κατασκευαστές OEM και την κατηγορία 1.

Το κόστος και η συσκευασία είναι πιθανώς δύο από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για τον κατασκευαστή του οχήματος όταν εφαρμοστεί το Euro 7, με την αρχιτεκτονική 48V να παρέχει ευκαιρίες στην υπάρχουσα τεχνολογία, αυξάνοντας τη χρήση, αν και με κόστος. Ο τρόπος με τον οποίο θα ξεπεραστούν αυτές οι προκλήσεις θα δημιουργήσει ένα πρόσθετο βάρος στην αλυσίδα εφοδιασμού των αυτοκινήτων.

Εκτός από τη νομοθεσία για τις εκπομπές, υπάρχουν πολλές προκλήσεις για τη βιομηχανία που πρέπει να ξεπεραστούν. Ωστόσο, φαίνονται ήδη αρκετοί προμηθευτές της κατηγορίας 1 να αρχίζουν να αντιδρούν και να εφαρμόζουν στρατηγικές αποφάσεις. Η καινοτομία στην αλυσίδα εφοδιασμού των αυτοκινήτων θα είναι ζωτικής σημασίας τα επόμενα χρόνια για να διασφαλιστεί ότι η αυτοκινητοβιομηχανία θα παραμένει επιτυχής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Arcoumanis, C., *Internal Combustion Engines*, London, England: Academic Press, 1988.
- [2] mototriti, «www.mototriti.gr,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.mototriti.gr/data/news/preview_news/Ola-osa-prepei-na-ksereis-gia-ta-pistoniasoy_119479.asp. [Πρόσβαση 9 10 2021].
- [3] Benson R. & Whitehouse N., *Internal Combustion Engines*, New York: Pergamon Press, 1979.
- [4] indiamart, "www.indiamart.com," [Online]. Available: <https://www.indiamart.com/proddetail/automobile-car-engine-14834724791.html>. [Accessed 9 10 2021].
- [5] indiamart, "www.indiamart.com," [Online]. Available: <https://www.indiamart.com/proddetail/marine-engine-2190615430.html>. [Accessed 9 10 2021].
- [6] Heywood J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, New York: McGraw-Hill, 2018.
- [7] Shi Y. H. Ge & Reitz R. , *Computational Optimization of Internal Combustion Engines*, London, England: Springer-Verlag, 2011.
- [8] Obert E., *Internal Combustion Engines*, Scranton, PA.: International Textbook Co., 1950.
- [9] Stone R., *Introduction to Internal Combustion Engines*, Warrendale, PA: SAE International, 2012.
- [10] Schwitzer T., "“Introduction To Turbochargers”,” *Schwitzer Turbochargers*, 1991.
- [11] dieselgeneratortech, "www.dieselgeneratortech.com," [Online]. Available: <https://www.dieselgeneratortech.com/diesel-engines/how-does-engine-cooling-system-work.html>. [Accessed 9 10 2021].

- [12] modelengineneews, "modelengineneews.org," [Online]. Available: <http://modelengineneews.org/rsch/classic.html>. [Accessed 9 10 2021].
- [13] Bunce M. & Blaxill H., "Sub-200 g/kWh BSFC on a Light Duty Gasoline Engine," *SAE Technical Paper*, 2016.
- [14] Qiao A. & Wu, X., "Research on the New Ignition Control System of Lean- and Fast-Burn SI Engines," *SAE Technical Paper*, 2008.
- [15] Attard W., Toulson E., Fraser E., Parsons, P., " A Turbulent Jet Ignition Pre-Chamber Combustion System for Large Fuel Economy Improvements in a Modern Vehicle Powertrain," *SAE Technical Paper*, Vols. 2010-01-1457, pp. doi:10.4271/2010-01-1457, 2010.
- [16] Cao Y. & Li L., "A novel closed loop control based on ionization current in combustion cycle at cold start in a gdi engine," *SAE Technical Paper*, Vols. 2012-01-1339, pp. doi:10.4271/2012-01-1339., 2012.
- [17] Sens M., Binder E., Reinicke P.B., Riess M., Stappenbeck T., Wobke, M., "Pre-Chamber Ignition and Promising Complementary Technologies," *27th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology*, 2018.
- [18] Attard W., Kohn J., Parsons P., "Ignition Energy Development for a Spark Initiated Combustion System Capable of High Load, High Efficiency and Near Zero NOx Emissions," *SAE Journal Paper JSAE 20109088*, 2010.
- [19] Attard W., Blaxill H., "A Gasoline Fueled Pre-Chamber Jet Ignition Combustion System at Unthrottled Conditions," *SAE Technical Paper 2012-01-0386*, pp. doi:10.4271/2012-01-0386., 2012.
- [20] Chinnathambi P., "RANS Based Multidimensional Modeling of an Ultra-Lean Burn Pre-Chamber Combustion System with Auxiliary Liquid Gasoline Injection," Vols. 10.4271/2015-01-0386., 2015.
- [21] carscoops, "www.carscoops.com," [Online]. Available: <https://www.carscoops.com/2014/05/toyota-shows-new-gasoline-engine/>. [Accessed 19 10 2021].
- [22] Toutant W.T., "The Worthington–Junkers free-piston air compressor," *Journal of the American Society of Naval Engineers*, vol. 64, no. 3, p. 583–594, 1952.
- [23] Zhang C. & Sun Z., "Trajectory-based combustion control for renewable fuels in free piston engines," *Applied Energy*, vol. 187, pp. 72-83, 2017.

- [24] Virsik R., "Free piston linear generator in comparison to other range-extender technologies," *World Electric Vehicle Journal*, 2013.
- [25] Heron A. and Rinderknecht F., "Comparison of Range Extender technologies for Battery Electric Vehicles," in *Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte Carlo, Monaco, 2013.
- [26] Kosaka H., Akita T., Moriya K., Goto S., Hotta Y., Umeno, T., Nakakita K. , "Development of Free Piston Engine Linear Generator System Part 1," - *Investigation of Fundamental Characteristics*, pp. <https://doi.org/10.4271/2014-01-1203>, 2014.
- [27] Hanipah M. R., Mikalsen R., Roskilly A. P., « Recent commercial free-piston engine developments for automotive applications.,» *Appl Therm Eng*, τόμ. 75, pp. 493-503 <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.039>, 2015.
- [28] Smallbone A. J., Roy S., Shivaprasad K. V., Jia B., Roskilly A. P., "The development and testing of a free-piston engine generator for hybrid electric vehicle applications," *Institute of Mechanical Engineers*, 2019.
- [29] schaeffler-events, "schaeffler-events.com," [Online]. Available: <https://schaeffler-events.com/symposium/lecture/h6/index.html>. [Accessed 19 10 2021].
- [30] Seabrook J., Dalby J., Shoji K., Inoue A., , "Virtual Calibration to Improve the Design of a Low Emissions Gasoline Engine," *International Conference on Calibration Methods and Automotive Data Analytics*, 2019.
- [31] Stradling R. , "Effect of Octane on Performance, Energy Consumptions and emissions of two Euro 4 passenger cars," *Transportation Research Procedia*, 2016.
- [32] Concawe Report , "Phase 1: Effect of fuel octane on the performance of two Euro 4 Gasoline Passenger Cars," *Concawe Report* , 2016.
- [33] Williams J. , "Effect of Octane on the performance of Euro 5 and Euro 6 gasoline passenger cars," *SAE paper no. 2017-01-0811*, 2017.
- [34] Hamje H. , Williams J., Kollbeck A., Mirabella W., "Improvements in drive-cycle fuel consumption by co-optimisation of engine and fuel," *Institute of Mechanical Engineers*, 2019.
- [35] Vorraro G., Islam R., Turner M., Turner J.W.G, "Application of a rotary expander as an energy recovery system for a modern Wankel engine," *Institute of Mechanical Engineers*.

- [36] Whitaker P., Kapus P., Ogris M., Hollerer P., "Measures to Reduce Particulate Emissions from Gasoline DI engines," *SAE Technical Paper 2011-01-1219*, pp. doi: 10.4271/2011-01-1219, 2011.
- [37] Kim J., Cho Y., Park S., "The Next Generation 1.6L Naturally Aspirated Gasoline Engine from Hyundai-Kia," *26th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2017*, 2017.
- [38] gazeo, "gazeo.com," [Online]. Available: <https://gazeo.com/up-to-date/reportages-interviews-road-tests/road-tests/Scania-G340-LNG-boosted-range,report,9854.html>. [Accessed 19 10 2021].
- [39] Wahbi, A., Tsolakis, A., Herreros, J., "Emissions Control Technologies for Natural Gas Engines," *Natural Gas Engines*, , pp. 359–379, doi:10.1007/978-981-13-3307-1_13., 2018.
- [40] Raj B. A., "A review of mobile and stationary source emissions abatement technologies for natural gas engines," *Johnson Matthey Tech*, vol. 60, pp. 228-235, doi:10.1595/205651316x692554, 2016.
- [41] Tsinoglou D. N., Koltsakis G. C., Peyton Jones, J. C., "Oxygen storage modeling in three-way catalytic converters," *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 41, no. 5, pp. 1152–1165, doi:10.1021/ie010576c, 2002,.
- [42] environmental, "www.environmental," [Online]. Available: <https://www.environmental-expert.com/products/johnson-matthey-model-twc-three-way-catalysts-182807>. [Accessed 19 10 2021].
- [43] Montenegro G. & Onorati A., "1D Thermo-Fluid Dynamic Modeling of Reacting Flows inside Three-Way Catalytic Converters," *SAE Int. J. Engines* , vol. 2, no. 1, pp. 1444–1459,, doi:10.4271/2009-01-1510., 2009.
- [44] Zeng F. & Hohn, K. L., "Modeling of three-way catalytic converter performance with exhaust mixture from natural gas-fueled engines," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 182, pp. 570-579, doi: 10.1016/j.apcatb.2015.10.004, 2016.
- [45] Tsinoglou D. N., Eggenschwiler P. D., Thurnheer T., Hofer P. , "A simplified model for natural-gas vehicle catalysts with honeycomb and foam substrates," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 223, no. 6, p. 819–834 doi:10.1243/09544070JAUTO1095, 2009.

- [46] Maio D. M., Beatrice C., Fraioli V., Golini S., Rutigliano F. G., Riccardi M. , "Modeling of three-way catalyst dynamics during fast transient operation for a CNG heavy-duty engine," *Institute of Mechanical Engineers*, 2019.
- [47] Southcott M. & Evans G., "Forecasting the implications of Euro 7 on the powertrain supply chain," *Institute of Mechanical Engineers*, 2019.
- [48] Buckendale L.R., Stanton D.W., Stanton D.W., "Systematic Development of Highly Efficient and Clean Engines to Meet Future Commercial Vehicle Greenhouse Gas Regulations," *SAE Int. 2013-01-2421*, pp. doi:10.4271/2013-01- 2421., 2013.
- [49] Johnson T., "Vehicular Emissions in Review," *SAE Int. J. Engines*, vol. 9, no. 2, pp. doi:10.4271/2016-01-0919., 2016.
- [50] M. R., "Supercharged Engine". United States Patents Patent (US 2 817 322), 1957.
- [51] Guan W., Pedrozo V., Zhao H., Ban Z. Lin T., "Investigation of EGR and Miller Cycle for NOx Emissions and Exhaust Temperature Control of a Heavy-Duty Diesel Engine," *SAE Tech. Pap.*, pp. doi:10.4271/2017-01-2227, 2017.
- [52] Zhao C., Yu G., Yang J., Bai M., Shang, F., "Achievement of Diesel Low Temperature Combustion through Higher Boost and EGR Control Coupled with Miller Cycle," pp. doi:10.4271/2015-01-0383, 2015.
- [53] Ban Z. , Guan. W., Wang X., Zhao H., Lin T., Zheng Z., "Effective engine technologies for optimum efficiency and emission control of the heavy-duty diesel engine," *Institute of Mechanical Engineers*,, 2019.
- [54] P. R.P., "Motor compressor apparatus". Patent US Patent 1,657,641, 1928.