

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ  
ΚΑΥΣΗΣ ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ  
ΚΙΝΗΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ  
ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ (Α.Μ. 6774)  
ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δρ. ΜΑΥΡΙΔΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ (ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

ΠΑΤΡΑ 2021



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται την ανάλυση των συγχρόνων μηχανώνεσωτερικής καύσης δίνοντας έμφαση στις εφαρμογές τους στην κίνηση και την βιομηχανία με τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας. Η εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μας στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών (πρώην Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε.) του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου (πρώην Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας (Πάτρα)).

Η επιλογή του παρόντος θέματος έγινε με γνώμονα το μεγάλο ενδιαφέρον που παρουσιάζεται στις μέρες μας για την εξοικονόμηση ενέργειας καθώς επίσης δίνεται η δυνατότητα μείωση των παραγόμενων ρύπων. Τα οφέλη αυτά παρουσιάζουν από την εξέλιξη της τεχνολογίας καθώς επίσης και την χρήση βιοκαυσίμων.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επόπτη της Πτυχιακής μου Εργασίας, κ. Μαυρίδη Κωνσταντίνο, Καθηγητή, για την δυνατότητα που μου έδωσε να υλοποιήσω τον παρόν θέμα καθώς επίσης και για την καθοδήγηση του, με στόχο την καλύτερη δυνατή κάλυψη του. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου και τους φίλους μου που ήταν δίπλα καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου, όπου πίστεψαν σε εμένα και με εμπύχωναν σε κάθε μου βήμα.



**Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή:** Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Φοιτητής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο Φοιτητής

Αντωνόπουλος Χαράλαμπος

(Υπογραφή)



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται τις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ) στην κίνηση και στην βιομηχανία με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας με ταυτόχρονη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων. Μέσα από μια ιστορική αναδρομή δίνεται η εξέλιξη της πορείας των θερμικών μηχανών με έμφαση στις ΜΕΚ και αναλύεται η αρχή λειτουργία τους. Ωστόσο, η θερμοδυναμική ανάλυση δίνει πληροφορίες για την λειτουργία τους και τις μεταβολές που πραγματοποιούνται κατά την ολοκλήρωση ενός κύκλου (Otto, Diesel, Carnot και Brayton). Με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας δίνονται οι τεχνολογίες που προσφέρουν όχι μόνο την μείωση της αλλά και τον ταυτόχρονο περιορισμό των εκπεμπόμενων ρύπων που επιτυγχάνεται με την χρήση εναλλακτικών καυσίμων. Επιπλέον, η σύγκριση των εναλλακτικών και των συμβατικών καυσίμων δίνεται ξεκάθαρη εικόνα για τις μελλοντικές εξελίξεις και της δυνατότητες που προσφέρει η χρήσης τους

Λέξεις κλειδιά: ΜΕΚ, εναλλακτικά καύσιμα, εξοικονόμηση ενέργειας.



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1. ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ.....	3
1.1. ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ .....	3
1.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ.....	5
1.2.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΕΜΒΟΛΟΦΟΡΩΝ – ΠΑΛΙΔΡΟΜΙΚΩΝ ΜΕΚ.....	6
1.2.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΜΕΚ.....	10
1.2.3. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.....	11
1.3. ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ (ΜΕΚ).....	14
1.3.1. ΒΑΣΙΚΗ ΑΡΧΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕΚ .....	14
1.3.2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΚ .....	14
2. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ .....	18
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	18
2.2. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΜΒΟΛΟΦΟΡΩΝ - ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΙΚΩΝ ΜΕΚ.....	18
2.3. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΜΕΚ .....	22
2.4. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ .....	23
3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝ ΜΕΚ .....	24
3.1. ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΑΕΡΙΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΑΕΡΙΩΝ ..	24
3.2. ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ.....	28
3.2.1. ΚΥΚΛΟΣ CARNOT .....	28
3.2.2. ΚΥΚΛΟΣ ΟΤΤΟ .....	30
3.2.3. ΚΥΚΛΟΣ DIESEL .....	33
3.2.4. ΚΥΚΛΟΣ BRAYTON .....	36
4. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ .....	40
4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ .....	40
4.2. ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ.....	40
4.2.1. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ.....	41
4.2.2. ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ .....	42
4.2.3. ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΟΧΗΜΑ.....	44
4.2.4. ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΟΧΗΜΑ .....	49
4.2.5. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΥΒΡΙΔΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ.....	51



4.3.	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	52
4.3.1.	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	56
4.4.	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ .....	57
4.4.1.	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ .....	63
4.5.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ.....	64
4.5.1.	ΚΥΚΛΟΣ ΑΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΟΥ BRAYTON ΓΙΑ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΣΕ ΜΕΚ.....	64
4.6.	ΕΞΕΛΙΞΗ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΜΕΚ .....	65
5.	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ .....	67
5.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	67
5.2.	ΟΡΙΖΟΝΤΑΣ ΤΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ.....	68
5.3.	ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ.....	69
5.4.	ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ.....	70
5.5.	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΜΕ ΣΠΙΝΘΗΡΑ.....	73
5.5.1.	ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ .....	73
5.5.2.	ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ .....	75
5.5.3.	ΥΔΡΟΓΟΝΟ.....	76
5.5.4.	ΥΓΡΑΕΡΙΟ .....	77
5.5.5.	ΑΛΚΟΟΛΟΥΧΑ ΚΑΥΣΙΜΑ - ΜΕΘΑΝΟΛΗ ΚΑΙ ΑΙΘΑΝΟΛΗ.....	78
5.5.6.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΓΙΑ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΜΕ ΣΠΙΝΘΗΡΑ (SI) .....	79
5.6.	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΜΕ ΣΥΜΠΙΕΣΗ .....	80
5.6.1.	ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ .....	80
5.6.2.	ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ.....	82
5.6.3.	ΔΙΜΕΘΥΛΛΑΙΘΕΡΑΣ.....	84
5.6.4.	ΝΕΦΤΙ.....	85
5.6.5.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΓΙΑ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ (CI) .....	87
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	88
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	91



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Αεροστρόβιλος του Frank Whittle [14].....	12
Εικόνα 2: Αεροπορικός αεροστρόβιλος του Frank Whittle: W1[16]. .....	13
Εικόνα 3: Αεροστρόβιλος Jumo 004 B4 [15].....	13
Εικόνα 4: Υβριδικό όχημα [31] .....	41
Εικόνα 5: Εξαρτήματα υβριδικού οχήματος [32] .....	42
Εικόνα 6: Εξέλιξη και βασικές απαιτήσεις σχεδιασμού συστήματος ισχύος κυψελών καυσίμου από το HydroGen4 [37] .....	61
Εικόνα 7: Απεικόνιση συστήματος οχήματος κυψελών καυσίμου [37] .....	61
Εικόνα 8: Για την προστασία του πλανήτη είναι επιτακτική ανάγκη η χρήση εναλλακτικών καυσίμων.....	67
Εικόνα 9: Συγκριτική διαδικασία παραγωγής και χαρακτηριστικών συμβατικών και εναλλακτικών καυσίμων [42] .....	72



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Διάγραμμα λειτουργίας θερμικής μηχανής [2] .....	3
Σχήμα 2: Βασική κατάταξη θερμικών μηχανών [11].....	5
Σχήμα 3: Σχηματική απεικόνιση της Σφαίρας του Ήρωνος [2] .....	5
Σχήμα 4: Το πρώτο ατμοκίνητο όχημα [8].....	7
Σχήμα 5: Απεικόνιση του οχήματος του Lenoir [6].....	7
Σχήμα 6: Κινητήρας Otto [13].....	8
Σχήμα 7: Τρίτροχο αυτοκίνητο του Benz [8] .....	9
Σχήμα 8: Κινητήρας Wankel [13].....	10
Σχήμα 9: Σκίτσο από το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας του Barber [2].....	11
Σχήμα 10: Ταξινόμηση Εμβολοφόρων ΜΕΚ [10].....	15
Σχήμα 11: Παλινδρομικό και περιστρεφόμενο τμήμα διωστήρα [17].....	19
Σχήμα 12: Κινηματικός μηχανισμός διωστήρα στροφάλου [19] .....	20
Σχήμα 13: Διαδρομή εμβόλου κινητήρα ΜΕΚ [18] .....	20
Σχήμα 14: Λειτουργία ενός δίχρονου κινητήρα [18].....	21
Σχήμα 15: Λειτουργία ενός τετράχρονου κινητήρα [18]. .....	22
Σχήμα 16: Κύκλος λειτουργίας κινητήρα Wankel [20] .....	23
Σχήμα 17: Κύκλος λειτουργίας κινητήρα αεροστροβίλου[22].....	24
Σχήμα 18: Κίνηση εμβόλου μηχανής Carnot [23] .....	28
Σχήμα 19: Διαγραμματική απεικόνιση ιδανικού θερμοδυναμικού κύκλου Carnot α) P-V και β)T-S [24].....	29
Σχήμα 20: Κίνηση εμβόλου μηχανής ιδανικού κύκλου Otto [25].....	30
Σχήμα 21: Διαγραμματική απεικόνιση ιδανικού θερμοδυναμικού κύκλου Otto α) P-V και β)T-S [25] .....	31
Σχήμα 22: καμπύλη που απεικονίζεται η απόδοση του κύκλου Otto συναρτήσει του λόγου συμπίεσης $r$ [25].....	32
Σχήμα 23: Κίνηση εμβόλου μηχανής πραγματικού κύκλου Otto [25] .....	32
Σχήμα 24: Διαγραμματική απεικόνιση πραγματικού κύκλου Otto P-V .....	33
Σχήμα 25: Διαφοροποίηση ανάφλεξης σε Otto και Diesel [25] .....	33
Σχήμα 26: Διαγραμματική απεικόνιση ιδανικού θερμοδυναμικού κύκλου Otto α) P-V και β)T-S [25] .....	34
Σχήμα 27: Απόδοση του κύκλου Diesel συναρτήσει του λόγου συμπίεσης, $r$ , με παράμετρο τον λόγο ανακοπής $r_c$ [26]. .....	35
Σχήμα 28: Πραγματικός κύκλος Diesel [27] .....	35
Σχήμα 29: Διαγραμματική απεικόνιση μηχανής Brayton (α) ανοικτού τύπου και (β) κλειστού τύπου [25] .....	36
Σχήμα 30: Διαγραμματική απεικόνιση ιδανικού θερμοδυναμικού κύκλου Brayton α) P-V και β)T-S [25] .....	37





Σχήμα 31: Συντελεστής απόδοσης (nth) συναρτήσεις του λόγου συμπίεσης (Rc).....	38
Σχήμα 32: Διαγραμματική απεικόνιση πραγματικού θερμοδυναμικού κύκλου BraytonT-S [25].....	39
Σχήμα 33: Απεικόνιση βασικό συστημάτων υβριδικού οχήματος [33].....	43
Σχήμα 34: Τομή του υβριδικού κινητήρα και της μετάδοσης [34].....	44
Σχήμα 35: Υβριδικό όχημα με σειριακή συνδεσμολογία [35].....	45
Σχήμα 36: Υβριδικό όχημα με παράλληλη συνδεσμολογία [35].....	46
Σχήμα 37: Υβριδικό όχημα με μικτή συνδεσμολογία [35].....	47
Σχήμα 38: Ροή ισχύος σε υβριδικό όχημα α) κατά την εκκίνηση και χαμηλή ταχύτητα, β) κατά την διάρκεια ομαλών συνθηκών οδήγησης κατά την ακινησία οχήματος, γ) κατά την επιτάχυνση, δ) κατά την επιβράδυνση, ε) κατά την επαναφόρτιση της μπαταρίας (ακινησία οχήματος) [30].	51
Σχήμα 39: Ηλεκτρικό Όχημα (Electric Vehicle ή EV) [39].....	53
Σχήμα 40: Διάγραμμα των τμημάτων που αποτελούν ένα ηλεκτρικό όχημα [40].....	53
Σχήμα 41: Ημι-ενεργές διαμορφώσεις συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με βάση την μπαταρία: (α) μπαταρία- Supercapacitor, (β) Supercapacitor-μπαταρία και (γ) παράλληλες διαμορφώσεις [35].....	55
Σχήμα 42: . Πλήρως ενεργές διαμορφώσεις συστήματος αποθήκευσης ενέργειας που βασίζονται σε μπαταρίες: (α) μετατροπέας πολλαπλών θυρών, (b) διαδοχικά και (c) διαμορφώσεις μετατροπέα πολλαπλών εισόδων [35].....	56
Σχήμα 43: Διαφορετικές ρυθμίσεις κύκλωμα για τη διαμόρφωση μετατροπέα πολλαπλών εισόδων για μπαταρία που βασίζεται: (α) μέση τοπολογία, (b) συζευγμένη μαγνητική τοπολογία, (c) Z-πηγή, και (d) τοπολογία με επικάλυψη [35].....	56
Σχήμα 44: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου [36].....	58
Σχήμα 45: Η δομή μιας κυψέλης καυσίμου α) μια κυψέλη καυσίμου β) συστοιχία κυψελών καυσίμου [36].....	59
Σχήμα 46: Βασικά στοιχεία ενός υδρογονικού FCV (υβριδικού οχήματος κυψελών καυσίμου) [30].....	60
Σχήμα 47: Υβριδική τοπολογία κυψελών καυσίμου (α) μπαταρία β) Supercapacitor και γ) συνδυασμός μπαταρίας- Supercapacitor [35].....	62
Σχήμα 48: Βασική διάταξη ΜΕΚ με ανεστραμμένο Brayton [88].....	65
Σχήμα 49: Χρησιμοποίησης Μηχανών Εσωτερικής Καύσης κατά την χρονική διάρκεια 2014 έως 2025 [89].....	65
Σχήμα 50: Τομείς Τελική Χρήση ΜΕΚ [89].....	66
Σχήμα 50: Ζήτηση καυσίμων σε παγκόσμιο επίπεδο [42].....	70
Σχήμα 51: Παραγωγή φυσικού αερίου των ΗΠΑ ανά πηγή, 1990-2040 [42].....	76
Σχήμα 52: Συμβατική καύση πετρελαίου σε κινητήρα ανάφλεξης με συμπίεση [42].....	82
Σχήμα 53: Μέσες επιπτώσεις εκπομπών καυσίμων βιοντίζελ σε κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση [78].....	83
Σχήμα 54: Γενική επισκόπηση των στόχων διαχείρισης ενέργειας [35].....	88



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Κατάταξη θερμικών μηχανών [4] .....	4
Πίνακας 2: Κατηγοριοποίηση ΜΕΚ [12] .....	16
Πίνακας 3: Κατηγορίες Μεταβολών Αερίων [21]. .....	26
Πίνακας 4: Συγκεντρωτικός πίνακας πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων συνδεσμολογιών υβριδικών συστημάτων [35] .....	47
Πίνακας 5: Συγκεντρωτικός πίνακας λειτουργίας συνδεσμολογιών υβριδικών συστημάτων [35] .....	48
Πίνακας 6: Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων για κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα (SI) και συμβατικά καύσιμα [42]. .....	79
Πίνακας 7: Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων για κινητήρες ανάφλεξης συμπίεσης (CI) και εμπορικά καύσιμα ντίζελ [42]. .....	87



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η καύση είναι η βασική χημική διαδικασία απελευθέρωσης ενέργειας από μίγμα καυσίμου και αέρα. Σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ, ICE: Internal Combustion Engine), η ανάφλεξη και η καύση του καυσίμου συμβαίνει εντός του ίδιου του κινητήρα, ο οποίος στη συνέχεια μετατρέπει εν μέρει την ενέργεια από την καύση σε εργασία. Κατά την καύση απελευθερώνονται αέρια τα οποία αποτελούν τους αέριου ρύπους.

Ωστόσο, η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας έχει αυξηθεί 17 φορές τον περασμένο αιώνα και οι εκπομπές CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> και NO<sub>x</sub> από την καύση ορυκτών καυσίμων είναι οι κύριες αιτίες της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Τα παγκόσμια αποθέματα πετρελαίου αναμένεται να εξαντληθούν σε λιγότερο από 50 χρόνια με τον τρέχοντα ρυθμό κατανάλωσης. Σε αυτό το σενάριο, τα βιοκαύσιμα έχουν αναδειχθεί ως εναλλακτικές πηγές ενέργειας και προσφέρουν πολλά άλλα οφέλη όπως η αειφορία, η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η αγροτική ανάπτυξη και η ασφάλεια του εφοδιασμού.

Στόχος της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η ανάλυση και η περιγραφή των Μηχανών Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ) στην κίνηση και στην βιομηχανία με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας με ταυτόχρονη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων.

Στο Πρώτο Κεφάλαιο αναλύονται οι Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ). Αρχικά δίνεται μια περιγραφή για τις θερμικές μηχανές και των διαχωρισμό τους. Ακολουθεί μια σύντομη ιστορική αναδρομή για κάθε κατηγορία (εμβολοφόρες - παλιδρομικές, περιστροφικές και αεροστρόβιλοι). Στην συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή της βασικής αρχής λειτουργίας των ΜΕΚ και γίνεται μια περεταίρω κατηγοριοποίηση τους σύμφωνα με παραμέτρους όπως αριθμός κυλίνδρων, διάταξη, συνδεσμολογία, απόδοση, είδος καυσίμου, τρόπος έναυσης κ.ά.

Στο Δεύτερο Κεφάλαιο περιγράφεται και αναλύεται εκτενέστερα η αρχή λειτουργία των εμβολοφόρων - παλιδρομικών, των περιστροφικών και αεροστρόβιλων βασισόμενες όλες στην βασική αρχή των θερμικών μηχανών όπου πραγματοποιούν μετατροπή της ελκυόμενης θερμικής ενέργειας σε μηχανικό έργο.

Στο Τρίτο Κεφάλαιο πραγματοποιείται ανάλυση των θερμοδυναμικών κύκλων ΜΕΚ. Αρχικά γίνεται μια αναφορά στις μεταβολές αερίων και τους καταστατικές εξισώσεις. Στην συνέχεια ακολουθούν οι κυκλικές μεταβολές των θερμικών μηχανών Otto, Diesel, Carnot και Brayton και δίνεται περιγραφή των ιδανικών και πραγματικών κύκλων τους.

Στο Τέταρτο Κεφάλαιο περιγράφονται οι τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας στην κίνηση και την βιομηχανία. Πραγματοποιούνται αναλυτικές περιγραφές της υβριδικής τεχνολογίας που περιλαμβάνει την τεχνολογία υβριδικών οχημάτων και υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων καθώς αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα. Ακολουθεί η τεχνολογία των ηλεκτρικών οχημάτων και δίνονται τα αντίστοιχα θετικά και



## *Σύγχρονες ΜΕΚ και οι εφαρμογές τους στην κίνηση και την βιομηχανία με τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας*

αρνητικά της τεχνολογίας. Επιπλέον, δίνονται πληροφορίες για την τεχνολογία κυψελών καυσίμου και καταγράφονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της.

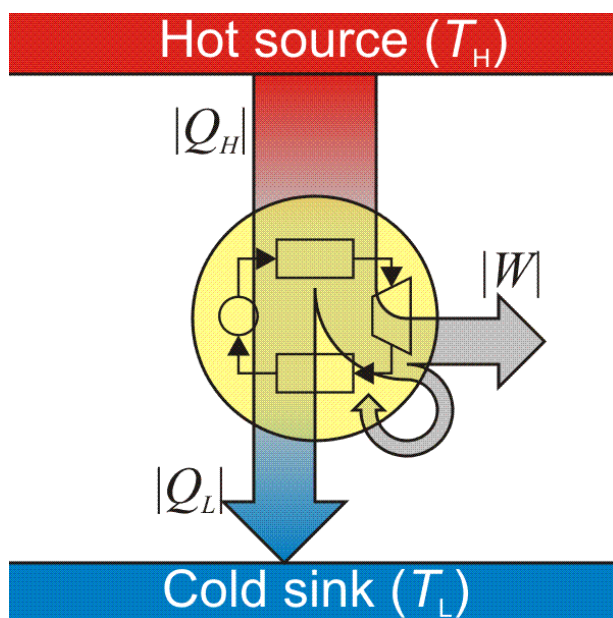
Στο Πέμπτο Κεφάλαιο αναλύονται τα εναλλακτικά καύσιμα. Δίνεται ο ορισμός των εναλλακτικών καυσίμων, η σημασία τους και οι ιδιότητες τους. Ακολουθεί η ανάλυση των εναλλακτικών καυσίμων για κινητήρες με ανάφλεξη με σπινθήρα και για κινητήρες με ανάφλεξη με συμπίεση. Σε κάθε περίπτωση δίνονται τα καύσιμα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και γίνεται μια σύγκριση με τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα.

Τέλος δίνονται τα συμπεράσματα της παρούσας πτυχιακής εργασίας και τα οφέλη της εξοικονόμησης ενέργειας καθώς και η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε με στόχο την υλοποίηση της.

## 1. ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

### 1.1. ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Θερμικές Μηχανές καλούνται, οι μηχανές που έχουν την δυνατότητα μετατροπής της ελκυσόμενης θερμότητας καύσης μέσα από την εκμετάλλευση της χημικής ενέργειας του εκάστοτε καυσίμου, σε μηχανικό έργο [1].



Σχήμα 1: Διάγραμμα λειτουργίας θερμικής μηχανής [2]

Η διαδικασία που πραγματοποιείται η καύση είναι και αυτή δίνει την ταξινόμηση των δύο μεγάλων κατηγοριών των θερμικών μηχανών και είναι οι ακόλουθες [1]:

- Μηχανές εξωτερικής καύσης: η παραγόμενη ενέργεια που προέρχεται από την καύση (θερμός αέρας και καύσιμο) μεταφέρεται μέσα από μια επιφάνεια συναλλαγής σε ένα άλλο ρευστό που είναι το εργαζόμενο μέσο.
- Μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ): η παραγόμενη ενέργεια προέρχεται από τα προϊόντα καύσης, δηλαδή είναι το παραγόμενο μέσο για την παραγωγή ισχύος. Αυτό επί της ουσίας είναι ότι το ωφέλιμο έργο λαμβάνει χώρα στον ίδιο χώρο όπου γίνεται η πρόσδοση θερμότητας μέσω της καύσης.



Σύμφωνα με τα ανωτέρω γίνεται κατανοητό ότι η διαφορά μεταξύ των μηχανών εξωτερικής και εσωτερικής καύσης είναι ότι στην πρώτη κατηγορία η καύση πραγματοποιείται εκτός από την μηχανή και το εργαζόμενο μέσο δεν προέρχεται από αυτή την καύση αλλά από ένα διαφορετικό ρευστό ενώ στην δεύτερη κατηγορία η καύση πραγματοποιείται εντός της μηχανής και το εργαζόμενο μέσο είναι το ίδιο το καυσαέριο [3]. Επιπλέον οι θερμικές μηχανές ταξινομούνται με βάση τον τρόπο κίνησης των μηχανικών μερών τους που παράγουν το ωφέλιμο έργο σε εμβολοφόρες και περιστροφικές [1].

Στην συνέχεια ακολουθεί ο Πίνακας 1 όπου πραγματοποιείται η κατάταξη των θερμικών μηχανών δίνοντας βασικά χαρακτηριστικά όπως όνομα, τύπος, χρήση και κατάσταση.

Πίνακας 1: Κατάταξη θερμικών μηχανών [4]

Κατηγορίες	Όνομα	Τύπος	Χρήση	Κατάσταση
Εξωτερικής καύσης	Ατμομηχανή	Εμβολοφόρος	Οχήματα	Εκτός λειτουργίας
	Ατμοστρόβιλος	Συνεχούς Ροής	Ηλεκτρική ενέργεια	Εν λειτουργία
			Πλοία	Εκτός λειτουργίας
	Αεριοστρόβιλος κλειστού τύπου	Συνεχούς Ροής	Ηλεκτρική ενέργεια	Εν λειτουργία
			Πλοία	Εν λειτουργία
	Εσωτερικής καύσης	Βενζινοκινητήρες	Εμβολοφόρος	Αυτοκίνητα
Μικρά πλοία				Εν λειτουργία
Μικρές βιομηχανίες				Εν λειτουργία
Πετρελαιοκινητήρες		Εμβολοφόρος	Αυτοκίνητα	Εν λειτουργία
			Μικρά πλοία	Εν λειτουργία
Αεριοστρόβιλοι		Συνεχούς Ροής	Ηλεκτρική ενέργεια	Εν λειτουργία
			Πρόωση	Εν λειτουργία
Μηχανές jet		Συνεχούς Ροής	Πρόωση	Εν λειτουργία
Πυραυλοκινητήρες	Συνεχούς Ροής	Πρόωση	Εν λειτουργία	

Ωστόσο, στην συνέχεια θα αναλυθούν εκτενέστερα οι Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ) διότι είναι το βασικό θέμα της παρούσας πτυχιακής εργασίας.



Σχήμα 2: Βασική κατάταξη θερμικών μηχανών [11]

## 1.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Μέσα από την βιβλιογραφική ανασκόπηση διαπιστώθηκε ότι η πρώτη θερμική μηχανή εφευρέθηκε από τον Έλληνα μαθηματικό με καταγωγή από την Αλεξάνδρεια Ήρων. Η θερμική μηχανή που κατασκεύασε, ήταν μια ατμομηχανή και το όνομα της δόθηκε από το σχήμα της και τον δημιουργό της και ήταν «Η Σφαίρα του Ήρωνος» (Σχήμα 3)[5].



Σχήμα 3: Σχηματική απεικόνιση της Σφαίρας του Ήρωνος [2]



Η Σφαίρα του Ήρωνα είναι μια σφαίρα η οποία περιστρέφεται γύρω από τον κεντροβαρικό οριζόντιο άξονα της. Στο κέντρο της σφαίρας υπάρχουν δύο αντιδιαμετρικοί ακτινικοί σωλήνες όπου το ελεύθερο άκρο τους είναι στραμμένο κατά ορθή γωνία, στο ίδιο επίπεδο, αλλά με αντίθετη φορά. Η λειτουργία της θερμικής μηχανής πραγματοποιείται ως εξής αρχικά γεμίζεται η σφαίρα με νερό και αυξάνεται η θερμοκρασία λόγω της πηγής θέρμανσης με συνέπεια να αυξάνεται η θερμοκρασία προκαλώντας εξάτμιση του νερού και κατ' επέκταση την μετατροπή του ατμού. Η προαναφερόμενη διαδικασία προκαλεί αύξηση της πίεσης στο εσωτερικό της σφαίρας με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται και εκτόνωση μέσω των σωλήνων οπότε ο ατμός εξέρχεται με κάποια ταχύτητα η οποία εξαναγκάζει και την σφαίρα να επιστραφεί [3], [5].

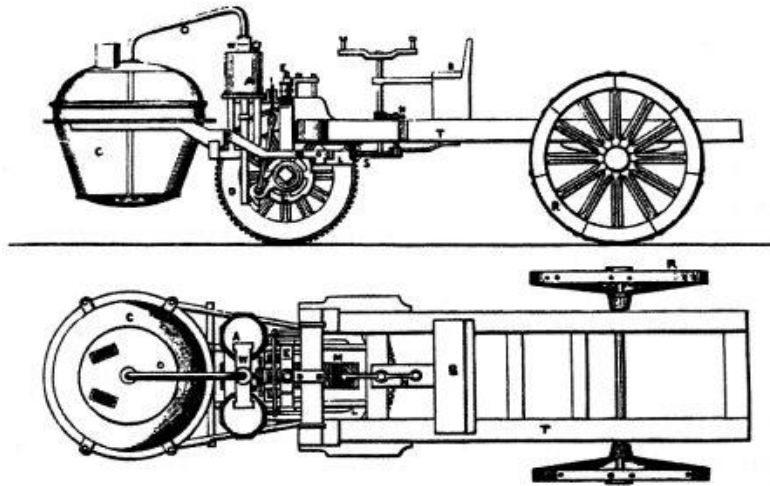
Η σφαίρα του Ήρωνα κατατάσσεται στις θερμικές μηχανές διότι η θερμική πηγή είναι καύσιμη ύλη, όπου η χημική της ενέργειας μετατρέπεται σε θερμική που προσδίδεται στο εργαζόμενο μέσο που είναι το νερό και βρίσκεται στο εσωτερικό της σφαίρας, η εκτόνωση του οποίου μέσω των σωλήνων εξαναγκάζει τη σφαίρα σε περιστροφή, παράγοντας μηχανικό έργο. Ο θάλαμος καύσης αυτής της θερμικής μηχανής είναι η σχάρα, πάνω στην οποία γίνεται καύση, και είναι εντελώς ανεξάρτητος από την ίδια τη θερμική μηχανή [5].

Η πρώτη θερμική μηχανή κατατάσσεται στις μηχανές εξωτερικής καύσης διότι ο θάλαμος καύσης είναι ανεξάρτητος από την διάταξη που παράγεται το μηχανικό έργο και απαιτείται και κάποιο εργαζόμενο μέσο διαφορετικό του καυσαερίου που παράγεται μέσω της καύσης για την μεταφορά της θερμικής ενέργειας [1]. Αυτό το είδος, δηλαδή μηχανές εξωτερικής καύσης, χρησιμοποιούνται ευρέως τα πρώτα χρόνια της βιομηχανικής εποχής. Ωστόσο με την πάροδο των χρόνων έρχονται σε σύγκριση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης όπου διαφοροποιούνται στην χωροταξία τους αφού ο θάλαμος καύσης αποτελεί ενιαία μονάδα με την διάταξη μετατροπής της θερμικής ενέργειας σε μηχανικό έργο και δεν απαιτούν εργαζόμενο μέσο αφού χρησιμοποιούνται τα παραγόμενα καυσαέρια [5].

### 1.2.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΕΜΒΟΛΟΦΟΡΩΝ – ΠΑΛΙΔΡΟΜΙΚΩΝ ΜΕΚ

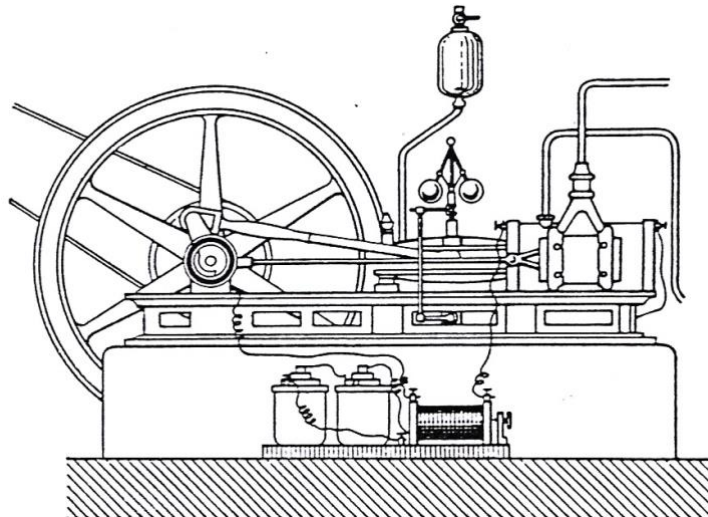
Ιστορικά η πρώτη μηχανή εσωτερικής καύσης κατασκευάζεται το 1678 από τον Christian Huygens όπου κάνει χρήση της πυρίτιδας ως καύσιμο, όμως η πρόταση αυτή ποτέ δεν υλοποιήθηκε. Αρχικά η κίνηση των οχημάτων γινόταν με την χρήση ατμομηχανών. Το πρώτο όχημα με ατμομηχανή κατασκευάστηκε το 1769 από τον Nicholas Cugnot όπου ήταν ένα τρίκυκλο με τεράστιο καζάνι στο μπροστινό μέρος του (Σχήμα 4). Σημειώνεται ότι ο Cugnot υποστήριζε ότι είχε κατασκευάσει το πρώτο αυτοπροωθούμενο μηχανικό όχημα, το οποίο είχε την δυνατότητα να μεταφέρει επιβάτες με ταχύτητα έως και 3,2 km/h [5]





Σχήμα 4: Το πρώτο ατμοκίνητο όχημα [8]

Η πρώτη μηχανή εσωτερικής καύσης με ικανοποιητικά αποτελέσματα λειτουργίας κατασκευάστηκε 1860 από τον Jean-Joseph-Etienne Lenoir. Στη μηχανή του Lenoir ως καύσιμο χρησιμοποιούνταν ένα μείγμα από κάρβουνο φωταέριο και αέρα. Η μηχανή αρχικά τοποθετήθηκε σε ένα όχημα που ήταν αποτέλεσμα της μετατροπής μιας άμαξας με άλογα σε ένα όχημα με μηχανή. Ωστόσο, σημειώνεται ότι εκείνη την εποχή υπήρχαν κάποια οχήματα τα οποία ήταν ατμοκίνητα. Αυτό οδήγησε αναπόφευκτα σε σύγκριση με συνέπεια το όχημα του Lenoir (Σχήμα 5) να διακρίνεται για την καλύτερη οδική συμπεριφορά αλλά την μειωμένη απόδοση [6].



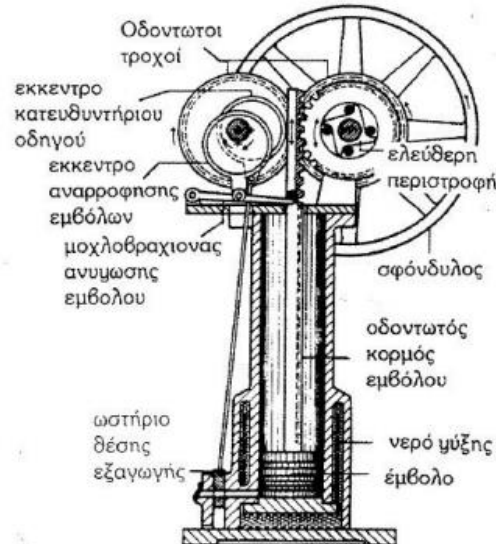
Σχήμα 5: Απεικόνιση του οχήματος του Lenoir [6]

Το 1862 παρουσιάζεται ιδιαίτερο ενδιαφέρον από τους ερευνητές με στόχο να βελτιώσουν την μηχανή του Lenoir. Έτσι ο Beau de Rochas (1815-1893) δημοσίευσε μια κριτική της μηχανής η οποία βασίζεται στο διαχωρισμό του κύκλου λειτουργίας σε

ανεξάρτητες φάσεις. Η αναφορά πραγματοποιήθηκε στην αρχή λειτουργίας του τετράχρονου κινητήρα. Η προαναφερόμενη δημοσίευση δίνει έμφαση στην κατανάλωση του καυσίμου που ήταν μεγάλη και την προσέδιδε στην απουσία συμπίεσης του μίγματος πριν από την καύση. Ακόμα προώθησε την ιδέα στην τροποποίηση του κυλίνδρου με μείωση της ψυχομένης επιφάνειας, σε μια προσπάθεια μείωσης των απωλειών θερμότητας του [7].

Ωστόσο, προσπαθώντας για την καλύτερη δυνατή βελτίωση των μηχανών εσωτερικής ακούσης ο Αυστριακός Siegfried Marcus πραγματοποιεί πειράματα αλλάζοντας το μίγμα καυσίμου σε βενζίνη, όπου το 1964 τοποθετεί την μηχανή πάνω σε μία χειράμαξα. Ουσιαστικά θεωρείται και το πρώτο βενζινοκίνητο όχημα [5]. Τα επόμενα χρόνια υλοποιούνται βασικές μετατροπές στοχεύοντας στην βελτίωση της απόδοσης της βενζινομηχανής με απώτερο στόχο να γίνει πιο ελκυστική για χρήση.

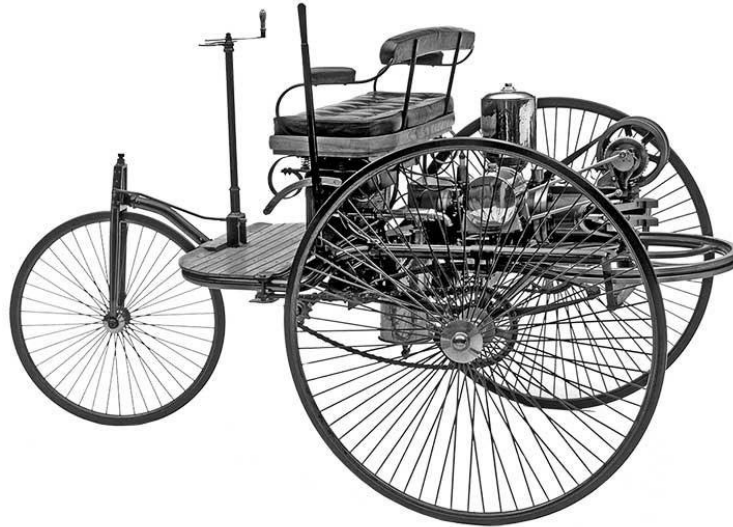
Την πρώτη αξιόλογη προσπάθεια τροποποιημένης μηχανής βενζίνης την κάνει ο Nikolaus August Otto (1832-1891) όπου κατασκευάζει μια μηχανή στην οποία το έμβολο προκαλεί την κίνηση (Σχήμα 6). Μια ολοκληρωμένη εικόνα της μηχανής δίνεται το 1876 όπου χαρακτηρίζεται από την τετράχρονη κίνηση της, τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά της αλλά την μη ικανοποιητική απόδοση της. Ωστόσο, συγκρινόμενη με την μηχανή του Lenoir σίγουρα παρουσιάζει περισσότερα πλεονεκτήματα με συνέπεια η διάδοση της βενζινομηχανής να πραγματοποιήθηκε με γοργούς ρυθμούς. Η χρήση της απομακρύνει τα μέχρι τότε οχήματα από την αγορά. Η ονομασία που της δόθηκε ήταν το όνομα του δημιουργού της, Otto και ακόμα και σήμερα οι μηχανές εσωτερικής καύσης ακολουθούν την φιλοσοφία σχεδίαση αυτής της μηχανής. [7].



Σχήμα 6: Κινητήρας Otto [13]

Ακολουθεί η κατασκευή του Γερμανού Carl Friedrich Benz (1844-1929), Μηχανολόγος Μηχανικός στην ιδιότητα του, ο οποίος κατασκευάζει τον πρώτο αποδοτικό βενζινοκινητήρα εσωτερικής καύσης, όπου τον τοποθέτησε σε ένα όχημα δικής του κατασκευής. Το όχημα του Benz ουσιαστικά ήταν το πρώτο εύχρηστο όχημα με μηχανή

εσωτερικής καύση και καύσιμο βενζίνης. Αποτελούνταν από τρεις τροχούς πανομοιότυπους με του ποδηλάτου, ενώ η ταχύτητα μπορούσε να φτάσει έως και 15 km/h (Σχήμα 7). Το όχημα του Benz αποτέλεσε την αρχή των εξελίξεων που ακολούθησαν[5].



Σχήμα 7: Τρίτροχο αυτοκίνητο του Benz [8]

Το 1892 πραγματοποιείται μια επανάσταση στις μηχανές υγρού καυσίμου όπου κατασκευάζεται, από τον Dr. Rudolf Diesel, ένας σύγχρονος πετρελαιοκινητήρας υψηλής απόδοσης, ο οποίος ουσιαστικά λειτουργεί μέχρι σήμερα. Ο κινητήρας είναι τετράχρονος, μοκοκύλινδρος και η κίνηση του είναι κατακόρυφη. Ο εξοπλισμός που τον αποτελούσε ήταν μία μικρή αντλία αέρα και αντλίες καυσίμου. Η πίεση αέρα ήταν της τάξης των 35-50 bar, γεγονός που οδηγούσε σε ικανοποιητικό διασκορπισμό του καυσίμου. Η ρύθμιση φορτίου του κινητήρα γίνονταν είτε με διαφοροποίηση της διάρκειας έγχυσης καυσίμου είτε με διαφοροποίηση της πίεσης αέρα. Ο κινητήρας αυτός κυριάρχησε γρήγορα στην αγορά της εποχής, ενώ αναπτύχθηκαν και διάφορες παραλλαγές του όπως είναι ο δίχρονος, ο υπερπληρούμενος και ο τετράχρονος διπλής δράσης [1].

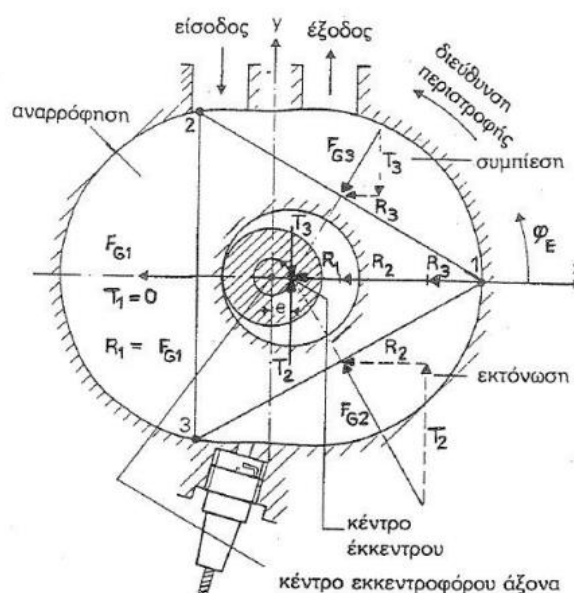
Με την πάροδο του χρόνου οι μηχανές εσωτερικής καύσης γίνονται αποδεκτές παγκοσμίως με συνέπεια να απαιτούνται πόροι για την ανάπτυξη τους. Ο τρόπος κατασκευής και σχεδίασης είχε στόχο την απαλλαγή των ατμομηχανών. Οι παρόντες που βοήθησαν στην ανάπτυξη τους είναι η ανάπτυξη της τεχνολογίας ωστόσο το βασικό μειονέκτημα του υψηλού κόστους τις κάνουν να είναι προνόμιο των λίγων (υψηλή οικονομικά τάξη). Την ανατροπή αυτού την κάνει ο Αμερικανός βιομήχανος Henry Ford (1863-1947), όπου το 1908 κατασκευάζεται το πρώτο «οικονομικό όχημα» και το 1919 ιδρύεται η εταιρία κατασκευής αυτοκινήτων τυποποιώντας την παραγωγή του. Τονίζεται ότι πραγματική αλλαγή και βελτίωση της αρχικής κατασκευής της μηχανής του Rudolf Diesel πραγματοποιήθηκε στο δεύτερο μισό της δεκαετίας του 1920 με την εισαγωγή των ηλεκτρικών και της ανάπτυξης των εξελιγμένων συστημάτων έγχυσης καυσίμου. Η μέχρι τότε διαφοροποιήσεις που είχαν γίνει

στη κατασκευή των μηχανών Diesel παρουσίαζαν μικρές βελτιώσεις που θεωρήθηκαν σε μικρής σχετικά έκτασης [7].

Με το πέρασμα των χρόνων και την εξέλιξη των πετρελαιοκινητήρων, το 1903 πραγματοποιείται εγκατάσταση πετρελαιοκινητήρα στο ρωσικό Wandal (πλοίο), το 1925 για πρώτη φορά τοποθετήθηκε πετρελαιοκινητήρας σε λεωφορείο και το 1929 τέθηκε σε κυκλοφορία το πρώτο πετρελαιοκίνητο φορτηγό αυτοκίνητο. Ωστόσο, το βασικό μειονέκτημα αυτών των κινητήρων ήταν το μεγάλο μέγεθος αλλά και το μεγάλο βάρος τους με συνέπεια να τους κάνει απαγορευτικούς για την χρήση τους σε επιβατικά οχήματα. Το 1922 η προσπάθησε να κατασκευάσει έναν μικρότερο κινητήρα για επιβατικά οχήματα μετά από πέντε έτη και φτάνοντας το 1927 η εταιρεία Bosch ξεκινά την μαζική παραγωγή εξαρτημάτων και μηχανισμών ψεκασμού πετρελαιοκινητήρων. Το 1936 η εταιρία Mercedes-Benz έβαλε σε παραγωγή ένα μικρό σχετικά, για τα δεδομένα εκείνης της εποχής, πετρελαιοκίνητο επιβατικό αυτοκίνητο [13].

### 1.2.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΜΕΚ

Η λειτουργία των εμβολοφόρων ΜΕΚ παρουσίαζαν σημαντικά προβλήματα ταλαντώσεων με συνέπεια να δημιουργηθούν και να αναπτυχθούν οι περιστροφικές ΜΕΚ. Το 1924, ο Γερμανός Felix Wankel μέσα από έρευνα δημιούργησε ένα κινητήρα που πραγματοποιούσε εισαγωγή, συμπίεση, καύση και εξάτμιση κατά την διάρκεια μιας περιστροφικής κίνησης. Ωστόσο η έρευνα του συνεχίστηκε σε συνεργασία με το Γερμανικό Αεροναυτικό Ερευνητικό Ίδρυμα (1939-1945) πάνω στις περιστροφικές βαλβίδες και ακολούθησε η συνεργασία του με την Γερμανική εταιρία NSU Motorenwerk AG το 1951. Μια ολοκληρωμένη εικόνα του περιστροφικού εμβολοφόρου κινητήρα δίνεται το 1954, ο οποίος ονομάζεται και κινητήρας Wankel (Σχήμα 8).



Σχήμα 8: Κινητήρας Wankel [13]

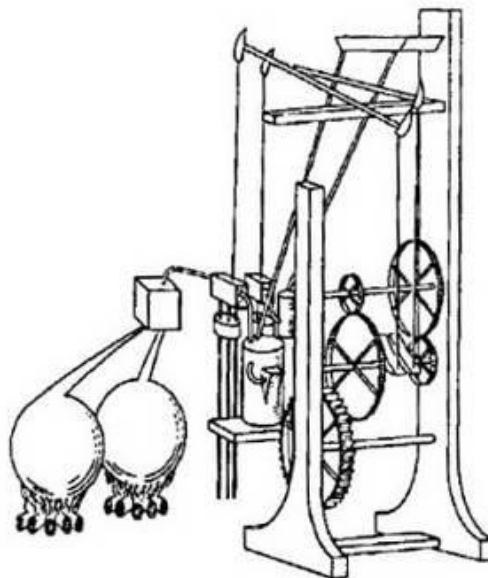
Ωστόσο, οι κινητήρες Wankel δεν συναντώνται εύκολα αφού παρουσιάζουν προβλήματα όπως μη στεγανοποίηση των θαλάμων, αποτυχία βελτιστοποίησης σχήματος θαλάμου καύσης, υψηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης, υψηλές καταναλώσεις και υψηλούς ρύπους. Επιπλέον, δίνεται ο περιορισμός του καυσίμου τους αφού λόγω των μικρών λόγων συμπίεσης δεν δίνεται η δυνατότητα χρήση πετρελαίου [13].

### 1.2.3. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Οι αεριοστρόβιλοι είναι η κατηγορία μηχανών εσωτερικής καύσης που αναπτύχθηκαν σε μεταγενέστερο χρόνο από τις παλινδρομικές - εμβολοφόρες και περιστροφικές μηχανές. Από τα τέλη του 18<sup>ου</sup> αιώνα πραγματοποιήθηκαν αρκετές προσπάθειες με στόχο την οριοθέτηση της αρχής λειτουργίας τους. Παράγοντες που επηρέασαν την καθυστέρηση της κατασκευής τους ήταν οι ελλιπείς γνώσεις των χαρακτηριστικών της ροής, οι χαμηλές αποδόσεις των συμπιεστών και η μη ύπαρξη κατάλληλων μετάλλων με αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και καταπονήσεις. Ωστόσο, η κατασκευή τους έλαβε χώρα τον 20<sup>ο</sup> αιώνα [13].

Το 1791 ο Barber, ήταν ο πρώτος που πήρε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας (UK patent no. 1833 – Obtaining and Applying Motive Power, &c. A Method of Raising Inflammable Air for the Purposes of Procuring Motion, and Facilitating Metallurgical Operations)

που περιείχε όλα τα σημαντικά χαρακτηριστικά ενός επιτυχή αεριοστρόβιλου. Σχεδιασμένο ως μέθοδος προώθησης, ο σχεδιασμός του Barber αποτελούνταν από έναν αλυσοπρίονο, παλινδρομικό συμπιεστή αέρα, έναν θάλαμο καύσης και έναν στρόβιλο Σχήμα 90 [2].

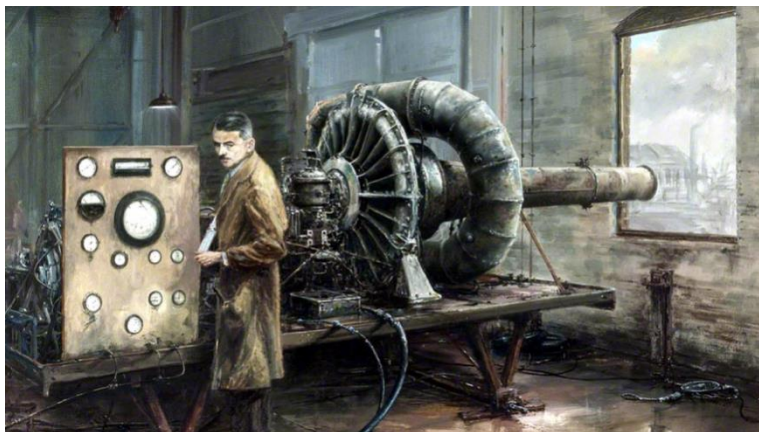


Σχήμα 9: Σκίτσο από το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας του Barber [2]

Ωστόσο, ακολουθεί ο Franz Stolze, το 1872, όπου αποκτά δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για αεριοστρόβιλο ο οποίος αποτελείται από αξονικό συμπιεστή και στρόβιλο πολλών σταδίων, εναλλάκτη θερμότητας και θάλαμο καύσεως. Από το 1900 έως και το 1904, ο Franz Stolze, πραγματοποίησε μεγάλο πλήθος δοκιμών αλλά χωρίς σημαντική επιτυχία αφού η απόδοση του συμπιεστή ήταν πολύ μικρή. Το 1899, ο Αμερικανός μηχανικός και εφευρέτης Charles Gordon Curtis απέκτησε το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στις ΗΠΑ για σχέδιο αεριοστρόβιλου που βασίστηκε στις αρχές λειτουργίας του στρόβιλου Laval και Parson, τα δικαιώματα του οποίου τα πούλησε το 1901 στην εταιρία General Electric [13]. Το 1903 ο Νορβηγός Aegidius Elling κατασκεύασε τον πρώτο αεριοστρόβιλο σταθερής πίεσεως και ισχύς 11 Hp, ενώ ο δεύτερος κινητήρας του έφτασε σε ισχύ 44 Hp [2].

Η εταιρία Brown-Boveri, Ελβετικής καταγωγής, πραγματοποίησε δοκιμές βασιζόμενη στρόβιλο που είχε κατασκευαστεί από τους Stodola και Schule το 1912. Ο αεριοστρόβιλος δημιουργήθηκε με στόχο την παροχή συμπιεσμένου αέρα σε λέβητες, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε το 1939 από σταθμό παραγωγής ισχύος, ιδιοκτησίας της ίδιας της εταιρίας. Ο σταθμός παρήγαγε ισχύ 4000kW και τοποθετήθηκε στο Neuchatel της Ελβετίας για ενίσχυση της ηλεκτρικής ισχύος σε περιόδους αιχμής. Τα χαρακτηριστικά του αεροστρόβιλου ήταν λόγο συμπίεσης αεροσυμπιεστή 4.2/1, θερμοκρασία εισόδου καυσαερίων στο στρόβιλο 550 °C, απόδοση συμπιεστή 88% και απόδοση στρόβιλου 89%, τιμές ιδιαίτερα υψηλές για εκείνη την εποχή [13].

Το 1930 ο Άγγλος μηχανικός Frank Whittle αποκτά δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για αεριοστρόβιλο πρόωσης αεροσκάφους και το 1936 ιδρύει την εταιρία Power Jets. Σε συνεργασία με την εταιρία British Thomson-Houston κατασκευάζει την ίδια χρονιά αεριοστρόβιλο μονοβάθμιου ακτινικού συμπιεστή κοινού άξονα με μονοβάθμιο στρόβιλο και απλό ενιαίο θάλαμο καύσης [14].

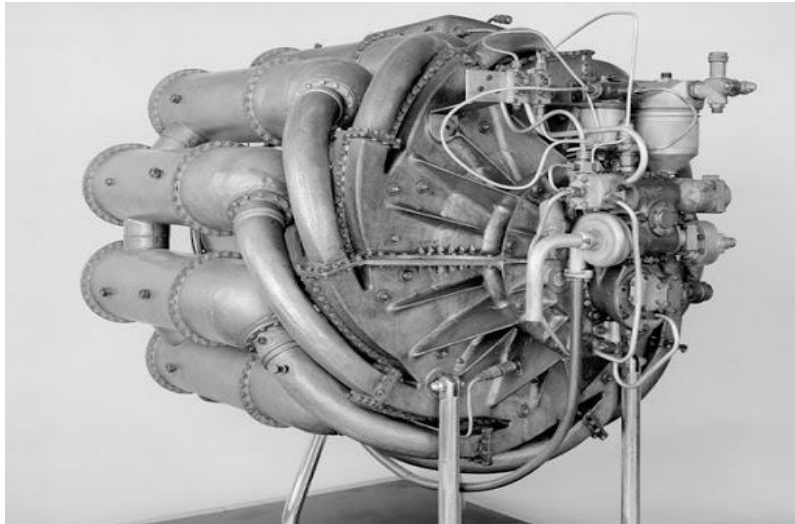


Εικόνα 1: Αεριοστρόβιλος του Frank Whittle [14]

Ωστόσο, παράλληλα (1930) οι Alan Arnold Griffith και Hayne Constant, βρετανοί στην καταγωγή, κατασκεύασαν αεροπορικό αεριοστρόβιλο αξονικού συμπιεστή. Στην συνέχεια και φτάνοντας στο 1935, ο Γερμανός Hans von Ohain αποκτά δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για αεροπορικό αεριοστρόβιλο ακτινικού συμπιεστή, το 1936 κατασκευάζει

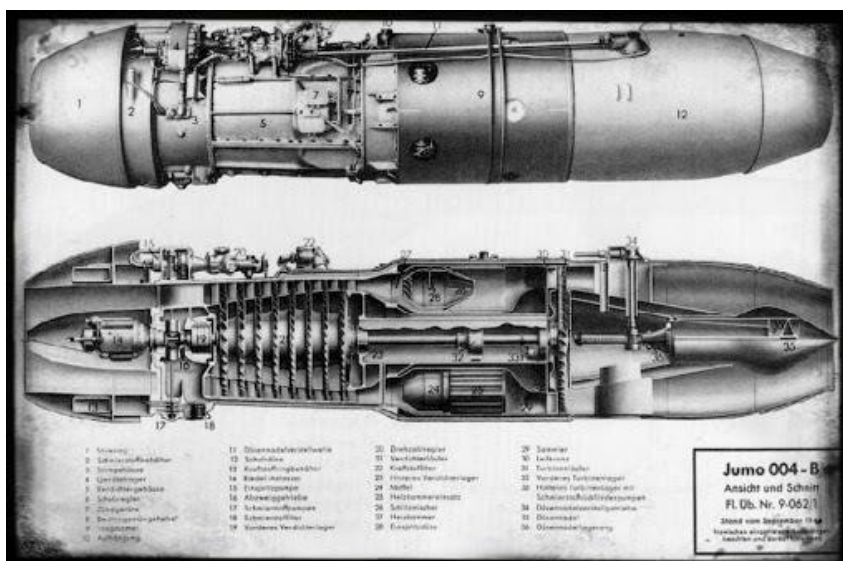
πρωτότυπο κινητήρα επιδείξεως τεχνολογίας και στις αρχές του 1937 ξεκινά τις δοκιμές. Ωστόσο, δεν σταματά εκεί και το 1389 πραγματοποιεί τις πρώτες δοκιμές και τοποθετεί τον κινητήρα στο αεροσκάφος He-178 και κάνει την πρώτη πτήση τον Αύγουστο 1939 [14].

Αξιοσημείωτο στις επιτυχημένες δοκιμές είναι ότι το 1941 πραγματοποιείται η πρώτη πτήση του κινητήρα που κατασκεύασε ο Whittle. Την σκυτάλη παίρνει η Rolls-Royce που βελτιώνει τον κινητήρα του Whittle και είναι ο μοναδικός αεροπορικό αεριοστρόβιλο παραγωγής στην Αγγλία μέχρι το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου (1945) [13].



Εικόνα 2: Αεροπορικός αεριοστρόβιλος του Frank Whittle: W1[16].

Ακόμα, οι εταιρίες Junkers και BMW προσπαθούν να αναπτύξουν κατάλληλους αεροστροβίλους αεροστροβίλους στην ίδια φιλοσοφία, δηλαδή με αξονικούς συμπίεστρες προσπαθώντας όμως της βελτίωση της απόδοσης. Αποτέλεσμα των προσπαθειών είναι η κατασκευή ενός και μόνο κινητήρα Jumo 004 B4 στα τέλη του 1945 (Εικόνα 3) [15].



Εικόνα 3: Αεριοστρόβιλος Jumo 004 B4 [15]



Η αλματώδη ανάπτυξη των αεροστροβίλων πραγματοποιείται μετά το 1950, όπου χρησιμοποιούνται σε πλήθος εφαρμογών όπως στην πρόωση αεροσκαφών και πλοίων καθώς και στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος [14].

### 1.3. ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ (ΜΕΚ)

#### 1.3.1. ΒΑΣΙΚΗ ΑΡΧΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕΚ

Οι Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ), όπως προαναφέρθηκε είναι θερμικές μηχανές που παράγουν μηχανικό έργο καταναλώνοντας τη θερμική ενέργεια η οποία προέρχεται από τα υγρά καύσιμα [3]. Η χρήση μιας θερμικής μηχανής για να παραχθεί έργο, βασίζεται στις συγκεκριμένες συνθήκες μεταφορά θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο (ρευστό), μεταβάλλοντας με αυτό τον τρόπο την ενεργειακή του κατάσταση. Τμήμα, της ενέργειας αυτής αποδίδεται ως μηχανικό έργο ενώ το υπολειπόμενο τμήμα επιστρέφει στο περιβάλλον υπό τη μορφή θερμότητας. Η αναγκαία παραγωγή και μεταφορά θερμότητας μπορεί να επιτευχθεί εντός του κύριου τμήματος της μηχανής όπου το εργαζόμενο μέσο είναι το καυσαέριο [13].

Ωστόσο, η προαναφερόμενη διαδικασία είναι η βασική αρχή λειτουργίας των ΜΕΚ περαιτέρω ανάλυση θα πραγματοποιηθεί στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας πτυχιακής εργασίας αναλύοντας περεταίρω την λειτουργία τους.

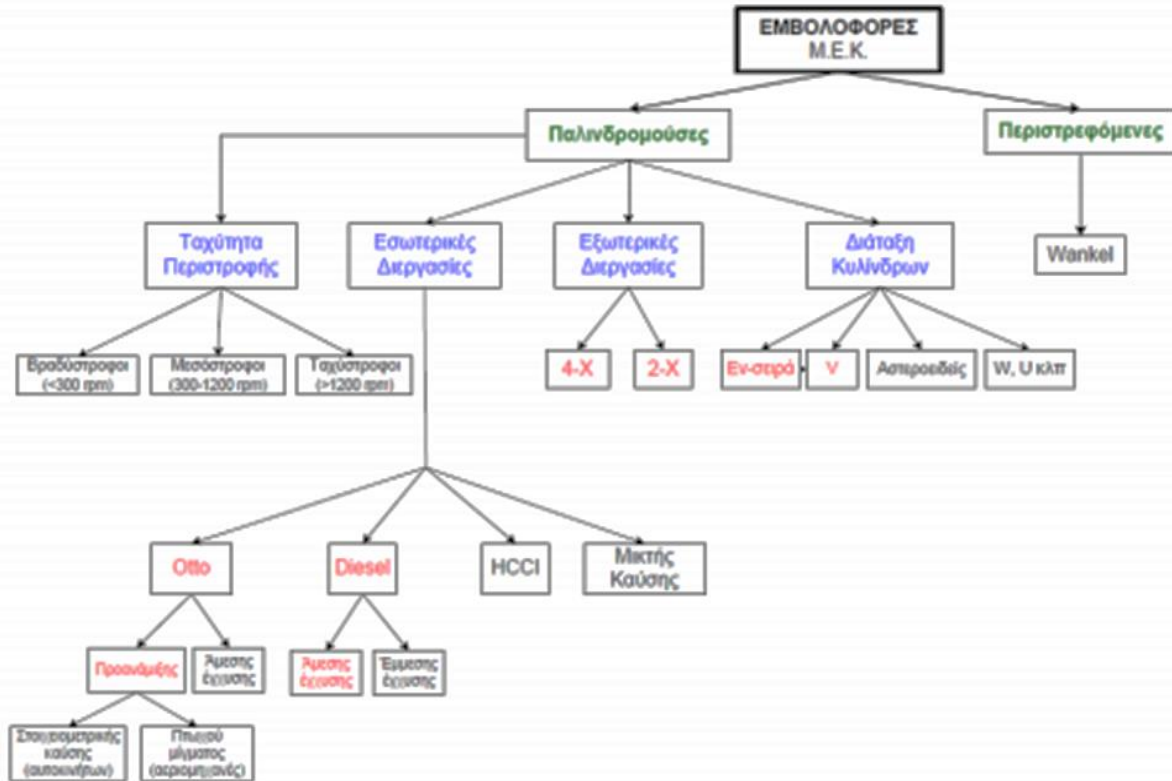
#### 1.3.2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΚ

Οι ΜΕΚόπως προαναφέρθηκε διαχωρίζονται στις εξής κατηγορίες εμβολοφόρες – παλινδρομικές, περιστροφικές και αεροστροβίλους [12]. Η διαφοροποίηση που παρουσιάζεται στις εμβολοφόρες και στις περιστροφικές ΜΕΚ είναι ότι στην κατηγορία των εμβολοφόρων μηχανών η ροή εντός του κυλίνδρου παρουσιάζει περιοδική μεταβολή, όμως ταυτόχρονα μεταβάλλονται και οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του ρευστού που εξαρτώνται άμεσα από την θέση του εμβόλου και της διεργασίας που εκτυλίσσεται κάθε χρονική στιγμή, ενώ στην περίπτωση των παλινδρομικών μηχανών η ροή του αέρα είναι συνεχής και σε κάθε θέση της μηχανής επικρατούν πάντοτε οι ίδιες συνθήκες [1]. Σύμφωνα με τα ανωτέρω γίνεται κατανοητό ότι στις εμβολοφόρες μηχανές διακρίνονται μικρότερες θερμοκρασίες κάτι που οφείλεται στο φαινόμενο της περιοδικής καύσης [5].

Ωστόσο, στις ΜΕΚ και όσο αφορά τους αεροστροβίλους παρουσιάζουν βασικό πλεονέκτημα της μεγαλύτερης συγκέντρωσης ισχύος έχοντας όμως μικρότερους βαθμούς απόδοσης συγκρινόμενοι με τις εμβολοφόρες ΜΕΚ. Ακολουθεί το Σχήμα 7 στο οποίο διαχωρίζονται οι βασικές μέθοδοι ταξινόμησης των εμβολοφόρων ΜΕΚ, χωρίς αυτό να



σημαίνει ότι δεν υπάρχουν και άλλοι τρόποι ταξινόμησης. Η ανάλυση που ακολουθεί επικεντρώνεται στις εσωτερικές και στις εξωτερικές λειτουργίες (διεργασίες) των ΜΕΚ [10].



Σχήμα 10: Ταξινόμηση Εμβολοφόρων ΜΕΚ [10]

Υπάρχουν πάρα πολλές υποκατηγορίες καθώς και τρόποι διαχωρισμού των κατηγοριών. Συγκριμένα οι κινητήρες των ΜΕΚ διαχωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες σύμφωνα με [3]:

- Καύσιμο: ανάλογα με το καύσιμο που είναι ρευστά είτε υγρά (όπως βενζίνη, πετρέλαιο) είτε αέρια (υγραέριο και φυσικό αέριο).
- Χρόνος: ανάλογα με τους χρόνους που υλοποιεί έναν κύκλο και είναι τετράχρονοι και δίχρονοι κινητήρες.
- Υπερπλήρωση καυσίμου ή όχι σε υπερπληρωμένους κινητήρες και φυσικής αναπνοής (ατμοσφαιρικούς).

Οι ΜΕΚ μπορεί επίσης να κατηγοριοποιηθεί επίσης, σύμφωνα με πλήθος παραγόντων όπως η εφαρμογή, η βασική μεθοδολογία σχεδιασμού, ο κύκλος λειτουργία, ο σχεδιασμός και η θέση βαλβίδων ή θυρίδων, το καύσιμο, οι μέθοδοι προπαρασκευής μίγματος, η μέθοδος έναυσης, ο σχεδιασμός θαλάμου καύσης, η μέθοδος ελέγχου ροπής, η μέθοδος ψύξης κ.ά. Στην συνέχεια παρατίθεται ο Πίνακας 2 με την κατηγοριοποίηση των ΜΕΚ [13].

Πίνακας 2: Κατηγοριοποίηση ΜΕΚ [12]

Κατηγορία	Υποκατηγορίες
Τρόπο εναύσεως (αναφλέξεως)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Μηχανές εναύσεως με σπινθήρα ή βενζινομηχανές ή κινητήρες Otto (spark ignition engines)</li> <li>Μηχανές εναύσεως με συμπίεση ή πετρελαιομηχανές ή κινητήρες Diesel (compression ignition engines)</li> <li>Μηχανές Semi-Diesel</li> </ul>
Αριθμό των διαδρομών του εμβόλου για την ολοκλήρωση του κύκλου λειτουργίας:	<ul style="list-style-type: none"> <li>2-χρονηςμηχανές (two-stroke engines)</li> <li>4-χρονηςμηχανές (four-stroke engines)</li> </ul>
Είδος του καυσίμου	<ul style="list-style-type: none"> <li>Μηχανές βαρέως πετρελαίου (μαζούτ)</li> <li>Μηχανές ελαφρών καυσίμων (Diesel, βενζίνη)</li> <li>Μηχανές αερίων καυσίμων</li> </ul>
Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα	<ul style="list-style-type: none"> <li>Αργόστροφες έως 350 rpm (μηχανές πλοίων)</li> <li>Μεσόστροφες έως 1500 rpm (μηχανές πλοίων, τρένων και ηλεκτροπαραγωγή ζεύγη)</li> <li>Πολύστροφες έως 5000 rpm (μηχανές τροχοφόρων)</li> <li>Ταχύστροφες με ταχύτητα περιστροφής άνω των 5000 rpm (αυτοκίνητα νέας τεχνολογίας, αγωνιστικά αυτοκίνητα, δίτροχα μεγάλου κυβισμού)</li> </ul>
Αριθμό των κυλίνδρων	<ul style="list-style-type: none"> <li>Μονοκύλινδρες</li> <li>Πολυκύλινδρες</li> </ul>
Διάταξη των κυλίνδρων	<ul style="list-style-type: none"> <li>Κατακόρυφες ή εν σειρά</li> <li>Τύπου V, W, H, Δ, X</li> <li>Οριζόντιες (boxer)</li> <li>Αστεροειδείς (κινητήρες ελικοφόρων αεροσκαφών)</li> <li>Σταυροειδείς, πολυγωνικές, διπλών εμβόλων κτλ</li> </ul>
Τρόπο ψύξεως των κυλίνδρων	<ul style="list-style-type: none"> <li>Αερόψυκτες</li> <li>Υδρόψυκτες</li> </ul>
Τρόπο σύνδεσης εμβόλου – διωστήρα	<ul style="list-style-type: none"> <li>Με βάκτρο και ζύγωμα</li> <li>Χωρίς βάκτρο και ζύγωμα</li> </ul>
Πίεση και ποσότητα αέρα που εισάγεται στον κύλινδρο	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ατμοσφαιρικές μηχανές ή μηχανές φυσικής αναπνοής (atmospheric-induction engines)</li> <li>Υπερπληρωμένες (supercharged)</li> </ul>
Τρόπο εγκατάστασης	<ul style="list-style-type: none"> <li>Μηχανές σταθερής ή μόνιμης βάσεως</li> <li>Μηχανές κινούμενου φορέα (κινητές ή φορητές)</li> </ul>
Χρήση τους Μηχανές οχημάτων	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ναυτικές μηχανές</li> <li>Βιομηχανικές μηχανές(σταθερές)</li> </ul>
Μέθοδο εισαγωγής του καυσίμου	<ul style="list-style-type: none"> <li>Με εξαεριωτήρα (carburetor)</li> <li>Με αντλία εγχύσεως και εγχυτήρα (injection)</li> </ul>
Φορά περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα:	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ορισμένης φοράς περιστροφής</li> <li>Αναστρέψιμες μηχανές</li> </ul>
Παραγόμενη ισχύ ανά κύλινδρο στις κανονικές στροφές λειτουργίας	<ul style="list-style-type: none"> <li>Μικρής ισχύος (μέχρι 20 PS)</li> <li>Μέσης ισχύος (μέχρι 200 PS)</li> <li>Μεγάλης ισχύος (άνω των 200 PS)</li> </ul>
Τρόπο αποδόσεως της ισχύος	<ul style="list-style-type: none"> <li>Σταθερών στροφών (και μεταβλητού φορτίου)</li> <li>Μεταβλητών στροφών</li> </ul>



*Σύγχρονες ΜΕΚ και οι εφαρμογές τους στην κίνηση και την βιομηχανία με τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας*

Είδος του θαλάμου καύσεως	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ενιαίος θάλαμος καύσεως</li><li>• Διαιρούμενος θάλαμος καύσεως</li></ul>
---------------------------	--



## 2. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

### 2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το σημείο της παρούσας πτυχιακής εργασίας θα δοθούν οι σημαντικές πληροφορίες για την αρχή λειτουργία των μηχανών εσωτερικής καύσης. Όπως έχει προαναφερθεί οι ΜΕΚ διαχωρίζονται στις σε τρεις κατηγορίες που είναι οι παλινδρομικές – εμβολοφόρες, οι περιστροφικές και οι αεριοστροβίλοι.

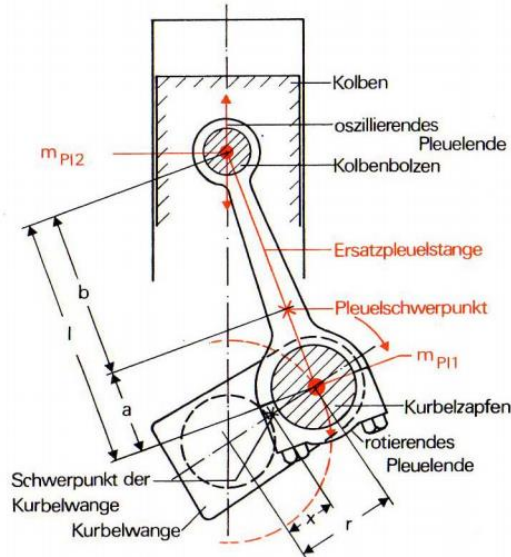
### 2.2. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΜΒΟΛΟΦΟΡΩΝ- ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΙΚΩΝ ΜΕΚ

Οι εμβολοφόρες – παλινδρομικές ΜΕΚ βασίζονται στην αρχή της μετατροπής της ελκυόμενης θερμικής ενέργειας σε μηχανικό έργο. Η παραγόμενη ενέργεια προκύπτει από την καύση του καυσίμου που πραγματοποιείται εντός του θαλάμου καύσης που είναι ειδικά διαμορφωμένος. Στην συνέχεια η ενέργεια αυτή μετατρέπεται σε μηχανικό έργο με την βοήθεια κατάλληλων εξαρτημάτων – μηχανισμών και διατάξεων. Λόγω ότι η θερμική ενέργεια ελκύεται στο θάλαμο καύσης, δηλαδή σε κλειστό χώρο, αναπτύσσεται υψηλή πίεση και θερμοκρασία στα καυσαέρια [13].

Η κίνηση του εμβόλου (piston) εντός του κυλίνδρου (cylinder) της μηχανής πραγματοποιείται λόγω των πιέσεων οι οποίες είναι υπεύθυνες για την ελεγχόμενη μεταβολή του θαλάμου καύσης. Σύμφωνα με τους Κλιάνης και συν., (2017) η διάταξη της άνω επιφανείας του εμβόλου, τα εσωτερικά τοιχώματα του κυλίνδρου και το πάμα (καπάκι – cylinder head) του κυλίνδρου, ορίζουν το θάλαμο καύσης μέσα στον οποίο καίγεται το καύσιμο. Αυτή η παλινδρομική κίνηση των εμβόλων, από την οποία έχουν πάρει και την χαρακτηριστική ονομασία τους οι κινητήρες, μετατρέπεται σε περιστροφική, μέσω κατάλληλων κινηματικών μηχανισμών. Η πιο απλή μορφή αυτών των μηχανισμών αποτελείται από τον διωστήρα (connecting rod) και τον στρόφαλο, όπου ο τελευταίος αποτελεί τμήμα του στροφαλοφόρου άξονα (crankshaft) [12].

Ο διωστήρας στο άνω άκρο του συνδέεται με το έμβολο μέσω του πείρου ενώ στο κάτω άκρο του συνδέεται στο κομβίο του στροφαλοφόρου άξονα μέσω εδράνου. Με την σειρά του ο στροφαλοφόρος άξονας είναι στερεωμένος και στα δύο άκρα στα έδρανα βάσης (Σχήμα 11). Η κίνηση του εμβόλου πραγματοποιείται σε δύο ακραίες θέσεις το Άνω Νεκρό Σημείο (ΑΝΣ, Bottom Dead Center) και το Κάτω Νεκρό Σημείο (ΚΝΣ, Top Dead Center).

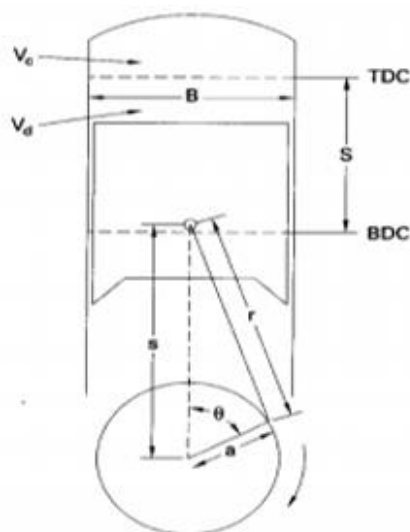
Δίνοντας έναν ορισμό των ακραίων σημείων είναι η θέση που λαμβάνει το έμβολο από την περιστροφική κίνηση και είναι το διπλάσιο της ακτίνας του στροφάλου. Η απόσταση αυτή καλείται διαδρομή stoke του εμβόλου [15].



Σχήμα 11: Παλινδρομικό και περιστρεφόμενο τμήμα διωστήρα [17]

Ωστόσο, πολύ σημαντικοί είναι οι όγκοι που δημιουργούνται κατά την κίνηση του εμβόλου και είναι οι ακόλουθοι [5]:

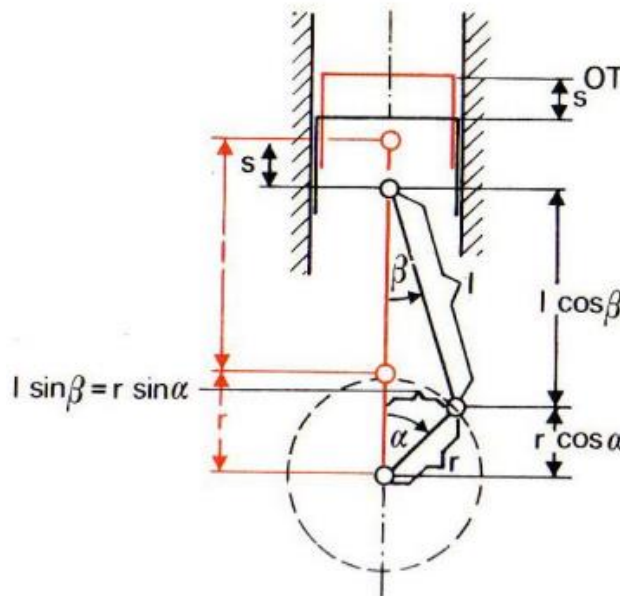
- Όγκος εμβολισμού ( $V_h$ ): είναι ο δημιουργούμενος όγκος του κυλίνδρου μεταξύ των δύο ακραίων θέσεων και ορίζεται ως το γινόμενο του εμβαδού της διατομής του κυλίνδρου επί τη διαδρομή του εμβόλου
- Επιζήμιος όγκος ή όγκος θαλάμου καύσης ( $V_c$ ): περιεχόμενος όγκος του κυλίνδρου μεταξύ της άνω επιφάνειας του εμβόλου στη θέση ΑΝΣ και της κάτω επιφάνειας πώματος.



Σχήμα 12: Κινηματικός μηχανισμός διωστήρα στροφάλου [19]

Στον κύλινδρο εισέρχεται το μείγμα αέρα καυσίμου μέσω σωληνώσεων (αγωγών) και εξέρχονται τα καυσαέρια που προκύπτουν από την καύση. Η ροή αυτών των αγωγών ρυθμίζεται με την βοήθεια κατάλληλων βαλβίδων (valves) που μπορούν να ανοιγοκλείνουν σύμφωνα με της ανάγκες λειτουργίας. Οι βαλβίδες διαχωρίζονται σε βαλβίδες εισαγωγής (intake valves) και βαλβίδες εξαγωγής (exhaust valves) [12]. Η εισαγωγή του καυσίμου εξαρτάται άμεσα από τον κινητήρα που μπορεί είτε να εισέρχεται ταυτόχρονα με τον αέρα εισαγωγής είτε να πραγματοποιείται με απευθείας ψεκασμό μέσω εγχυτήρα (injection valve) είτε να γίνεται με ψεκασμό σε προθάλαμο καύσης [13].

Η κίνηση του εμβόλου από το ΑΝΣ στο ΚΝΣ (Σχήμα 12) πραγματοποιείται μέσω του παραγόμενου έργου από την εκτόνωση των καυσαερίων. Κατά την διάρκεια όμως αυτής της εκτόνωσης οι μετακινήσεις μεταξύ των ακραίων σημείων απαιτούν επιπλέον έργο. Το απαιτούμενο αυτό έργο παρέχεται από τον σφόνδυλος (flywheel), ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το στροφαλοφόρο άξονα. Στην ουσία ο σφόνδυλος έχει την δυνατότητα να επιστρέφει την ενέργεια που έχει αποθηκεύσει κατά την εκτόνωση των καυσαερίων, μετακινώντας το έμβολο, επιτρέποντας έτσι την διατήρηση των μετακινήσεων μεταξύ των νεκρών σημείων [12].



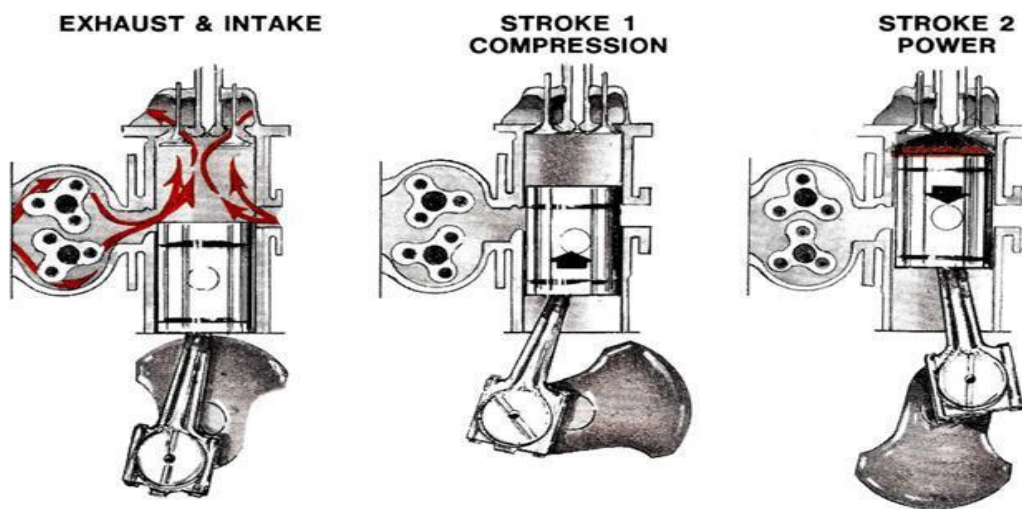
Σχήμα 13: Διαδρομή εμβόλου κινητήρα ΜΕΚ [18]

Ο κύκλος λειτουργίας των εμβολοφόρων μηχανών αποτελείται από τις εξής διαδικασίες [5]:

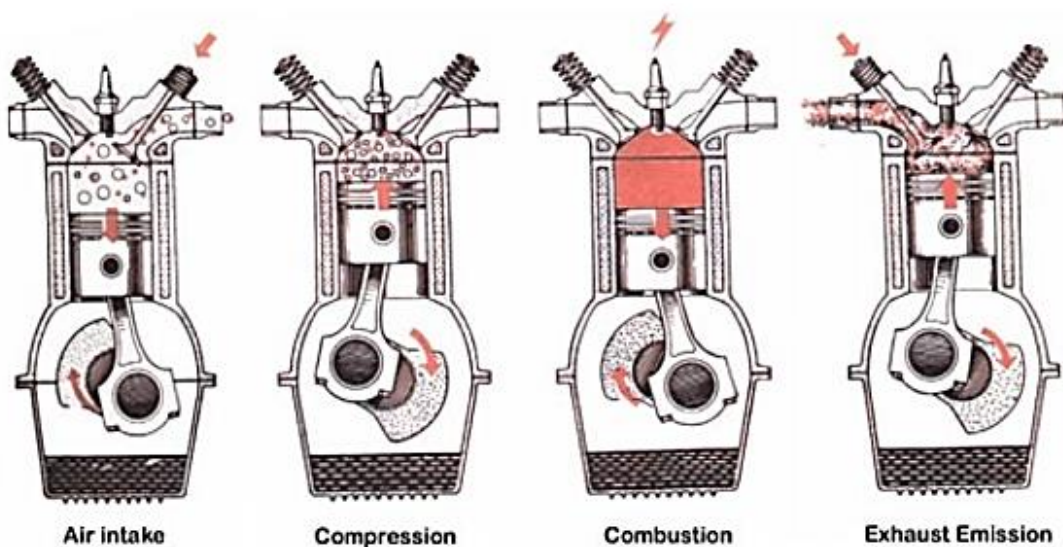
- εισαγωγή του μείγματος αέρα-καυσίμου ή του σκέτου αέρα στο κύλινδρο
- συμπίεση του αέρα-καυσίμου ή του σκέτου αέρα
- εισαγωγή του καυσίμου
- καύση του καυσίμου
- εκτόνωση των καυσαερίων της καύσης

- εξαγωγή καυσαερίωνεκτός κυλίνδρου.

Ωστόσο, τα παραπάνωστάδια μπορούν να πραγματοποιούνται σε δύο ή τέσσερις διαδρομές του εμβόλου (χρόνους), δηλαδή σε μία ή δύο ολοκληρωμένες περιστροφές του στροφαλοφόρου άξονα. Η ολοκλήρωση των σταδίων ενός κύκλου λειτουργίας σε δύο ή τέσσερις διαδρομές του εμβόλου, χαρακτηρίζουν τους κινητήρες σε δίχρονους (2X) (Σχήμα 14) και τετράχρονους (4X) (Σχήμα 15) [15]. Ακόμα, ισχύς και ο αριθμός στροφών ενός κινητήρα έχει άμεση σχέση με τη ρύθμιση της παροχής του καυσίμου. Έτσι όταν αυξάνεται η ποσότητα καυσίμου, αυξάνονται παράλληλα οι στροφές και η παραγόμενη ισχύς, ενώ το αντίθετο συμβαίνει όταν μειώνεται η ποσότητα [18].



Σχήμα 14: Λειτουργία ενός δίχρονου κινητήρα [18]





Σχήμα 15: Λειτουργία ενός τετράχρονου κινητήρα [18].

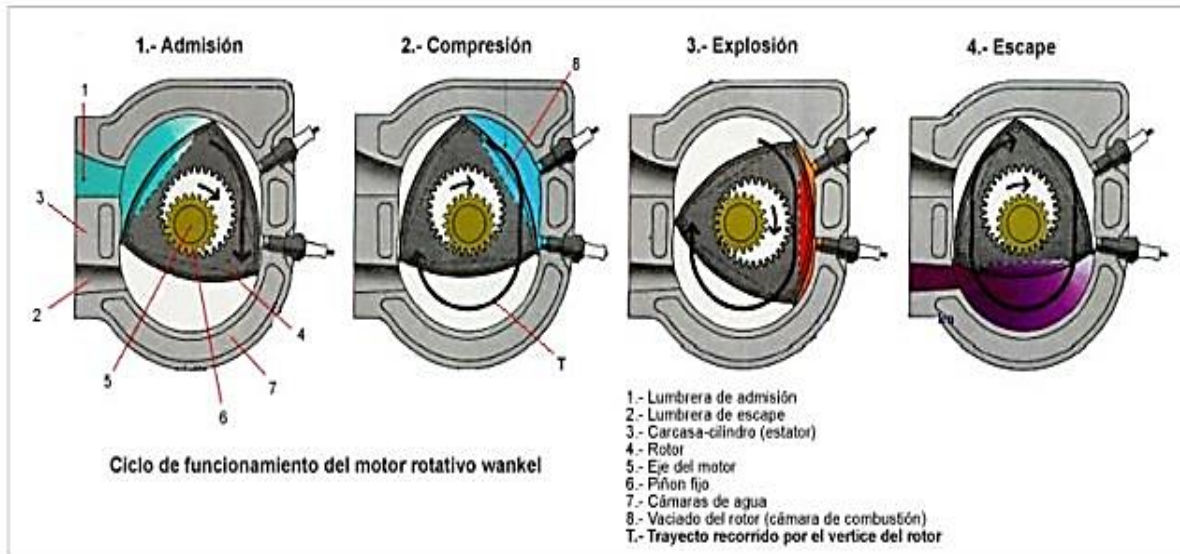
### 2.3. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΜΕΚ

Οι εμβολοφόρες περιστροφικές ΜΕΚ παρουσιάζουν ίδια αρχή λειτουργίας με τις εμβολοφόρες παλινδρομικές ΜΕΚ που βασίζονται στην αρχή της μετατροπής της ελκυσόμενης θερμικής ενέργειας σε μηχανικό έργο. Το μείγμα καυσίμου αέρα καίγεται σε ειδικά διαμορφωμένο θάλαμο και η παραγόμενη θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική μέσω κατάλληλων μηχανικών διατάξεων.

Για την κατανόηση της λειτουργίας των εμβολοφόρων περιστροφικών ΜΕΚ δίνεται περιγραφή της αρχής λειτουργίας του κινητήρα Wankel. Το έμβολο που είναι τοποθετημένο στο εσωτερικό του κινητήρα Wankel έχει ιδιόμορφο σχήμα αφού είναι καμπυλωμένου τριγωνικού πρίσματος με ενσωματωμένη εσωτερική οδόντωση εμπλεκόμενη έκκεντρα με μικρότερο οδοντωτό τροχό, που είναι σταθερά προσαρμοσμένος στον κινητήρα. Ο θάλαμος που βρίσκεται το έμβολο είναι ελλειψοειδής δημιουργώντας μεταξύ τους διάκενα και καθώς περιστρέφεται πραγματοποιούνται οι διαδοχικές φάσεις λειτουργίας των ΜΕΚ, δηλαδή εισαγωγή μείγματος καυσίμου-αέρα, συμπίεση, καύση-εκτόνωση και εξαγωγή (Σχήμα 16)[13].

Σύμφωνα με τον Αποστολόπουλο Χ., (2020) το μείγμα καυσίμου-αέρα, προερχόμενο από έναν εξαερωτήρα, εισέρχεται μέσω αυλού εισαγωγής στους θαλάμους καύσης σε μία από τις ακραίες πλάκες του κελύφους. Το καύσιμο μείγμα ωθούμενο από το τριγωνικό έμβολο ακολουθεί την περιστροφική κίνηση, ενώ τα ελατήρια του τοιχώματος του κυλίνδρου παρέχουν την απαιτούμενη στεγανότητα. Έτσι έπειτα από περιστροφή μερικών μοιρών το μείγμα έχει μεταφερθεί στο στάδιο της πλήρους συμπίεσης. Εκεί θα δεχτεί σπινθηρισμό από αναφλεκτήρα που βρίσκεται σε εσοχή που επικοινωνεί με τους θαλάμους μέσα από ένα στένωμα, στην απέναντι πλευρά του κελύφους. Έπειτα ακολουθεί η καύση του μείγματος και η εκτόνωση των δημιουργούμενων καυσαερίων, καθώς με την περιστροφή του εμβόλου ο όγκος μέσα στον οποίο βρίσκονται μεγαλώνει. Στη συνέχεια τα καυσαέρια αποβάλλονται από τον θάλαμο καύσης δια μέσω της αυλού εξαγωγής, ενώ η περιστροφή συνεχίζεται όσο διατηρείται η καύση [15].



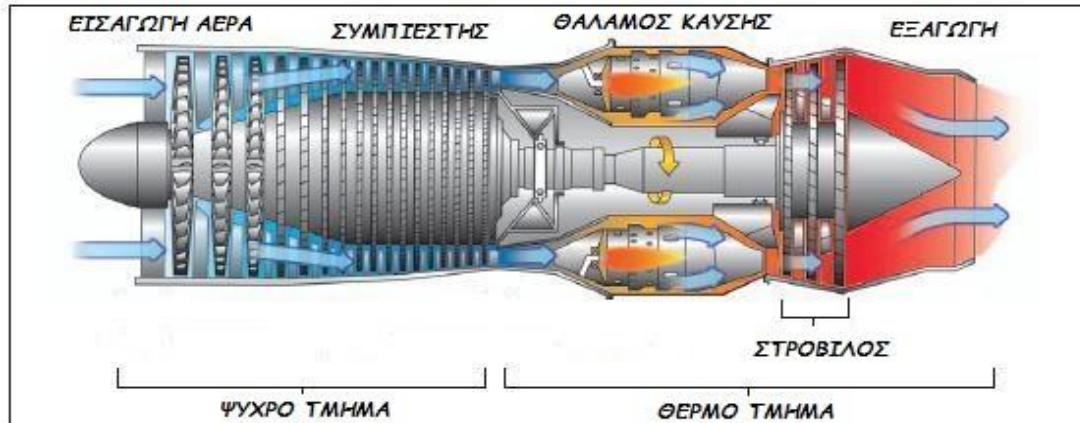


Σχήμα 16: Κύκλος λειτουργίας κινητήρα Wankel [20]

Από τα ανωτέρω γίνεται κατανοητό ότι στην ουσία εντός του κινητήρα πραγματοποιούνται τρεις ανεξάρτητοι κύκλοι λειτουργίας σε διαφορετική φάση ο καθένας. Συνέπεια αυτού είναι οι κινητήρες να χαρακτηρίζονται για την συμπαγή κατασκευή, το μικρό όγκο, το χαμηλό κέντρο βάρους, το μικρό κυβισμό και τη μεγάλη παραγωγή ισχύος. Ωστόσο, αυτό που είναι αξιοσημείωτο είναι ότι δεν υπάρχουν παλινδρομικές μάζες με συνέπεια να μην υπάρχουν προβλήματα ταλαντώσεων [5].

#### 2.4. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΩΝ

Οι αεροστρόβιλοι παρουσιάζουν λίγο διαφορετική αρχή λειτουργία από αυτή των εμβολοφόρο και παλινδρομικών μηχανών. Αρχικά ο αέρας εισέρχεται στην εισαγωγή (intake) και προωθείται στον συμπιεστή (compressor) όπου και συμπιέζεται σε υψηλή πίεση. Στην συνέχεια ο συμπιεσμένος αέρας εισέρχεται στο θάλαμο καύσης (combustion chamber) και ταυτόχρονα προστίθεται καύσιμο, το οποίο αναφλέγεται και εκρήγνυται. Μέρος του έργου της εκτόνωσης που ακολουθεί κινεί το στρόβιλο (compressor turbine) που με την σειρά του περιστρέφει τον συμπιεστή μέσω ενός άξονα – ατράκτου που υλοποιεί τη μηχανική σχέση. Το υπολειπόμενο της εκτόνωσης αποτελεί το ωφέλιμο έργο της εξόδου του κινητήρα. Το έργο αυτό στους αεροπορικούς κινητήρες παίρνει τη μορφή προωθητικής ενέργειας με την βοήθεια κατάλληλου ακουσίου εξαγωγής ενώ στους βιομηχανικούς αεροστρόβιλους μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια συνήθως με την βοήθεια πρόσθετου στρόβιλου ισχύος [21].



Σχήμα 17: Κύκλος λειτουργίας κινητήρα αεροστροβίλου[22]

Ωστόσο, αυτό που θα πρέπει να σημειωθεί είναι ότι στην περίπτωση που δεν υπάρχει περίσσεια έργου εκτόνωσης μετά το στρόβιλο που κινεί το συμπιεστή τότε το αποδιδόμενο έργο από το στρόβιλο θα ήταν ίσο προς τα καταναλισκόμενο έργο από τον συμπιεστή. Σε αυτή την ακραία περίπτωση δεν θα μπορούσε να παράξει ωφέλιμο έργο με συνέπεια η λειτουργία να είναι σαν ένα σύστημα στρόβιλου/ συμπιεστής. Άρα από τα προαναφερόμενα για να έχει νόημα η λειτουργία ενός αεροστροβίλου θα πρέπει η ενέργεια εκτόνωσης των καυσαερίων να υπερκαλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες του συμπιεστή και να περισσεύει ένα ικανό ποσό ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά περίπτωση [21].

### 3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝ ΜΕΚ

#### 3.1. ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΑΕΡΙΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΕΣ ΕΙΣΩΣΕΙΣ ΑΕΡΙΩΝ

Για την καλύτερη δυνατή κατανόηση της λειτουργίας των μηχανών απαιτείται να εξεταστούν τα αέρια και οι αλλαγές που πραγματοποιούνται κατά την διαδικασία λειτουργίας των ΜΕΚ. Η κατάσταση ενός αερίου χαρακτηρίζεται από την πίεση (P), τον όγκο (V) και τη θερμοκρασία (T). Ακολουθεί η περαιτέρω ανάλυση αυτών των χαρακτηριστικών [3]:

- Πίεση: είναι το πηλίκο της δύναμης που ενεργεί κάθετα και ομοιόμορφα σε μία επιφάνεια δια το εμβαδό της επιφάνειας αυτής και δίνεται από την σχέση:

$$P = \frac{F}{A} , (Pa) \quad [3.1]$$

- Ειδικό όγκος: είναι ο όγκος που καταλαμβάνει η μονάδα μάζας του αερίου και εκφράζεται με την σχέση:



$$v = \frac{V}{m} , \left( \frac{m^3}{kg} \right) \quad [3.2]$$

- Σχετική θερμοκρασία: καλείται η θερμοκρασία που μετράται από τους  $0^{\circ}\text{C}$  και χαρακτηρίζεται ως θετική αν είναι πάνω από το μηδέν και αρνητική αν είναι κάτω από το μηδέν.
- Απόλυτη θερμοκρασία: καλείται η θερμοκρασία που μπορεί να μετρηθεί από το απόλυτο μηδέν ( $0\text{ K}$ ), δηλαδή η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στους  $-273^{\circ}\text{C}$ . Στο απόλυτο μηδέν τα μόρια των σωμάτων είναι σε ακινησία. Η απόλυτη θερμοκρασία είναι πάντα θετική και μετράται σε Kelvin (K)

Η αλλαγή στην κατάσταση αερίου πραγματοποιείται ακόμα και στην περίπτωση που παρουσιαστεί αλλαγή σε ένα από τα στοιχεία (πίεση, ειδικός όγκος και θερμοκρασία). Η αλλαγή αυτή μπορεί να παρατηρηθεί και να επιγραφεί από το διάγραμμα P-v, όπου στον κάθετο άξονα μετράτε η πίεση του αερίου και στο οριζόντιο άξονα ο ειδικός όγκος. Στο διάγραμμα P-v δίνεται η γραφική παράσταση της κατάστασης του αερίου καθώς και η μεταβολή του από μια κατάσταση ένα σε μια κατάσταση δύο [3].

Οι μεταβολές της κατάστασης ενός αερίου είναι πέντε και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. [21]:



Πίνακας 3: Κατηγορίες Μεταβολών Αερίων [21].

Μεταβολή	Σχέσεις ιδανικών αερίων	Ενέργεια	Διαγράμματα P-V
<p><b>Ισόθερμη:</b> κάθε μεταβολή στην κατάσταση ενός θερμοδυναμικού συστήματος κατά την οποία η θερμοκρασία του συστήματος παραμένει σταθερή.</p>	$P \cdot V = C$ $\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}$ $T_1 = T_2$	$\Delta U = \Delta Q - \Delta W$ $\Delta U = 0$ $\Delta Q = \Delta W$ $\Delta S = n \cdot R \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$	
<p><b>Ισόχωρη:</b> κάθε μεταβολή στην κατάσταση ενός θερμοδυναμικού συστήματος κατά την οποία ο όγκος του συστήματος παραμένει σταθερός.</p>	$\frac{P}{T} = C$ $\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$ $V_1 = V_2$	$\Delta U = \Delta Q - \Delta W$ $\Delta W = 0$ $\Delta U = \Delta Q$ $\Delta S = n \cdot C_V \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$	



<p><b>Ισοβαρής:</b> κάθε μεταβολή στην κατάσταση ενός θερμοδυναμικού συστήματος κατά την οποία η πίεση του συστήματος παραμένει σταθερή.</p>	$\frac{V}{T} = C$ $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$ $P_1 = P_2$	$\Delta U = \Delta Q - \Delta W$ $\Delta S = n \cdot C_p \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$	
<p><b>Αδιαβατική:</b> κάθε μεταβολή η οποία συμβαίνει χωρίς το αέριο να ανταλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον</p>	$P \cdot V^\gamma = C$ $P_1 \cdot V_1^\gamma = P_2 \cdot V_2^\gamma$	$\Delta U = \Delta Q - \Delta W$ $\Delta Q = 0$ $\Delta U = - \Delta W$ $\Delta S = 0$	
<p><b>Πολυτροπική:</b> κάθε μεταβολή του αερίου που βρίσκεται ενδιάμεσα της αδιαβατικής και της ισόθερμης μεταβολής.</p>	$P \cdot V^n = C$ $P_1 \cdot V_1^n = P_2 \cdot V_2^n$	$\Delta U = \Delta Q - \Delta W$ $\Delta S = -n \cdot C_n \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$	

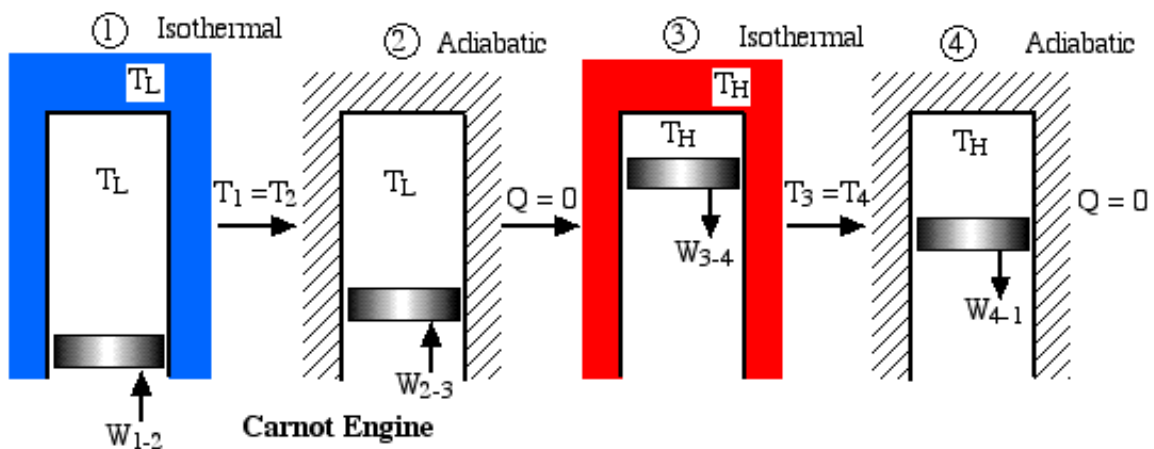
### 3.2. ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ

Οι ΜΕΚ λειτουργούν σύμφωνα με μια πραγματική κυκλική μεταβολή που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο ιδανικό θερμοδυναμικό κύκλο [21]. Σύμφωνα με τον Σουλιώτη Ν. (2011), στην περίπτωση που αναφέρεται ο ιδανικός κύκλος εννοείται ότι ένας κύκλος με πλήρως αντιστρεπτές διεργασίες σε αντίθεση με τους πραγματικούς κύκλους που αποτελούνται πλήρως από εσωτερικές διεργασίες. Οι αντιστρεπτοί κύκλοι παρουσιάζουν υψηλότερη θερμοδυναμική απόδοση συγκρινόμενοι με άλλες θερμικές μηχανές που λειτουργούν στις ίδιες θερμοκρασίες [3].

Στην ουσία η πραγματική κυκλική μεταβολή προσομοιάζεται από την ανάλυση του ιδανικού θερμοδυναμικού κύκλου και την προσθήκη σε αυτόν κατάλληλων δεικτών απόδοσης που σκοπό έχουν να λάβουν υπόψη την μη ιδανικών κύκλων είναι δυνατή γιατί σε αυτή την περίπτωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν της θερμοδυναμικής [21]. Στην συνέχεια δίνεται η θερμοδυναμική ανάλυση των βασικών θερμικών μηχανών Carnot, Otto, Diesel και Brayton.

#### 3.2.1. ΚΥΚΛΟΣ CARNOT

Μια μηχανή Carnot είναι μια ιδανική μηχανή που λειτουργεί σύμφωνα με τον ομώνυμο θερμοδυναμικό κύκλο Carnot, ο οποίος είναι ένας θεωρητικός ιδανικός κύκλος με τον οποίο συγκρίνονται οι πραγματικοί κύκλοι. Η μηχανή Carnot αποτελείται από έναν κύλινδρο στον οποίο κινείται το έμβολο χωρίς την παρουσία τριβών (Σχήμα 18). Η παράπλευρη επιφάνεια του κυλίνδρου και το έμβολο είναι φτιαγμένα από α διαβατικά τοιχώματα ενώ ο πυθμένας αποτελείται από ιδανικό αγωγό θερμότητας. Το αέριο μέσω του πυθμένα μπορεί να έρχεται σε επαφή είτε με θερμή είτε με ψυχρή δεξαμενή είτε να κρατιέται θερμικά μονωμένο [21].

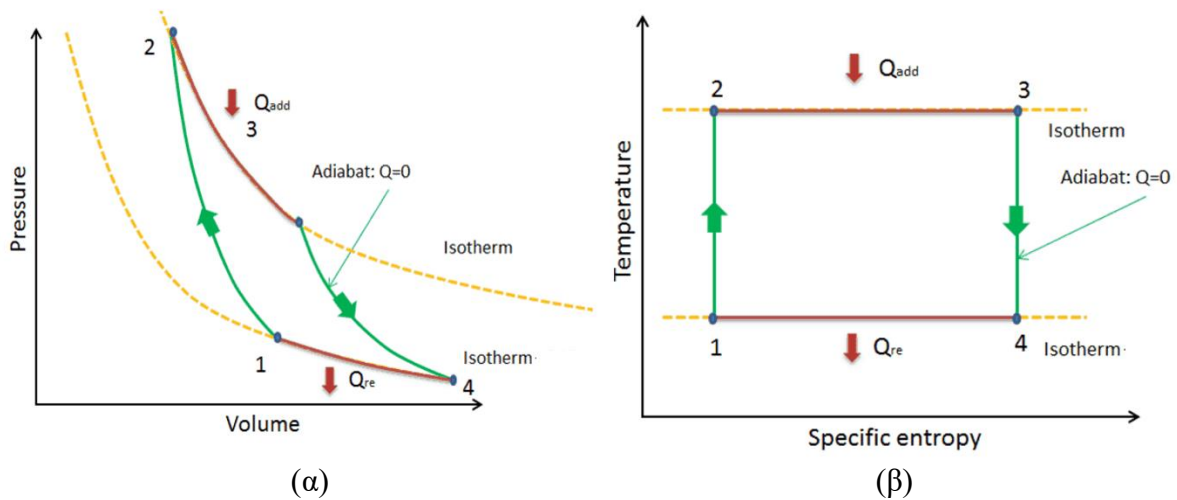


Σχήμα 18: Κίνηση εμβόλου μηχανής Carnot [23]

Ο κύκλος Carnot αποτελείται από τις εξής διεργασίες:

- 1-2: Αδιαβατική (ή ισεντροπική) συμπίεση
- 2-3: Ισόθερμη εκτόνωση
- 3-4: Αδιαβατική (ή ισεντροπική) εκτόνωση
- 4-1: Ισόθερμη συμπίεση

Στην συνέχεια ακολουθεί η γραφική παράσταση του θερμοδυναμικού κύκλου Carnot P-V και T-S.



Σχήμα 19: Διαγραμματική απεικόνιση ιδανικού θερμοδυναμικού κύκλου Carnot α) P-V και β) T-S [24].

Με τον κύκλο Carnot αποδεικνύεται ότι έστω και κάτω από ιδανικές συνθήκες μια θερμική μηχανή δεν έχει την δυνατότητα να μετατρέψει όλη την προδιδόμενη σε αυτή θερμική ενέργεια σε μηχανική. Στην ουσία μια μηχανή δέχεται θερμότητα από πηγή υψηλής θερμότητας και μετατρέπει ένα μέρος αυτής σε μηχανικό έργο και το υπόλοιπο απορρίπτεται σε μια δεξαμενής χαμηλής θερμοκρασίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιακών ορίων των δεξαμενών, τόσο μεγαλύτερη είναι η απόδοση της μηχανής [3].

Οι σχέσεις για τον υπολογισμό βασικών στοιχείων μιας μηχανής Carnot είναι:  
Ολικό έργο:

$$W_{carnot} = R(T_H - T_C) \ln \frac{V_3}{V_2}, \text{ joule} \quad [3.3]$$

Βαθμός απόδοσης:

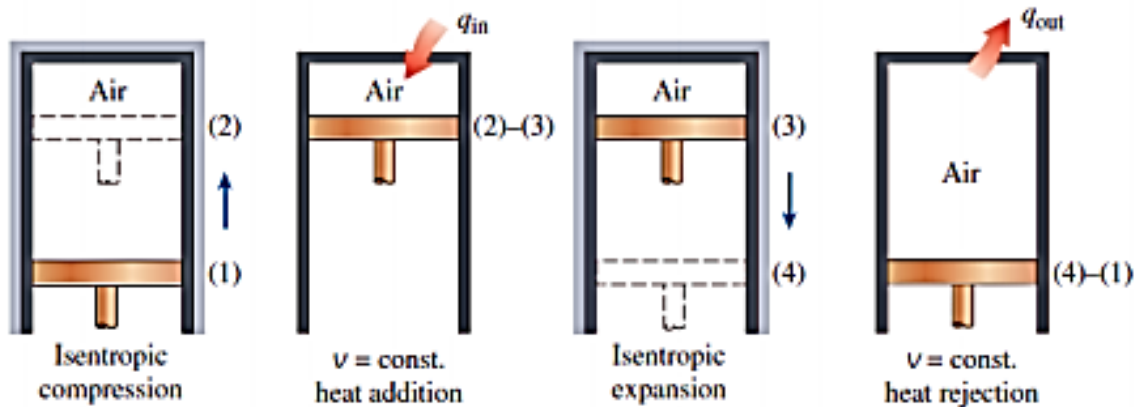
$$n_{th} = \frac{W_{carnot}}{q_{2 \rightarrow 3}} \quad [3.4]$$

ή

$$n_{th} = 1 - \frac{T_c}{T_H} \quad [3.5]$$

### 3.2.2. ΚΥΚΛΟΣ ΟΤΤΟ

Στον κύκλο Otto βασίζεται η λειτουργία των βενζινοκινητήρων. Ο κύκλος Ottoπραγματοποιείται από μια αδιαβατική διάταξη κυλίνδρου – εμβόλου που διαθέτει τουλάχιστον μια βαλβίδα εισαγωγής και μιας εξαγωγής καθώς και τουλάχιστον ένα αναφλεκτήρα (μπουζί) (Σχήμα 20) [21].

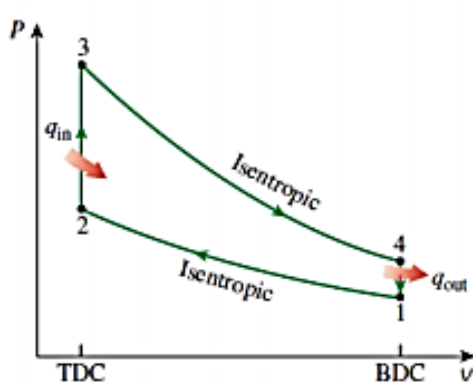


Σχήμα 20: Κίνηση εμβόλου μηχανής ιδανικού κύκλου Otto [25]

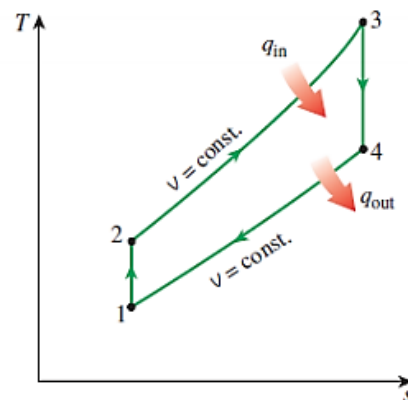
Ο ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος αποτελείται από 4 αντιστρεπτές διεργασίες [25]:

- 1-2: ισηντροπική συμπίεση
- 2-3 :ισόογκη πρόσδωση θερμότητας
- 3-4 :ισηντροπική εκτόνωση
- 4-1: ισόογκη απόρριψη θερμότητας

Στην συνέχεια ακολουθεί η γραφική παράσταση του θερμοδυναμικού κύκλου OttoP-V και T-S.



(α)



(β)





Σχήμα 21: Διαγραμματική απεικόνιση ιδανικού θερμοδυναμικού κύκλου Otto α) P-V και β) T-S [25]

Οι σχέσεις για τον υπολογισμό βασικών στοιχείων μιας μηχανής Otto είναι:

Ολικό έργο:

$$W_{Otto} = c_v(T_2 - T_1) - c_v(T_4 - T_3) , \text{joule} \quad [3.6]$$

Βαθμός απόδοσης:

$$n_{th} = \frac{W_{Otto}}{q_{2 \rightarrow 3}} \quad [3.7]$$

ή

$$n_{th} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad [3.8]$$

Λόγος συμπίεσης:

$$r = \frac{V_1}{V_2} \quad [3.9]$$

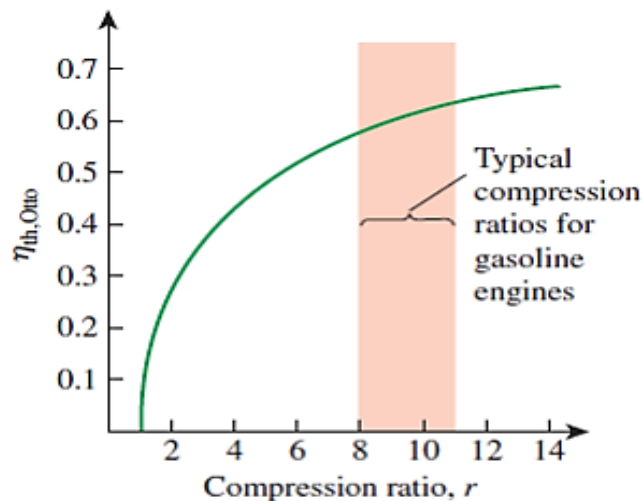
Από την σχέση 3.8 και 3.9 προκύπτει:

$$n_{th} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \quad [3.10]$$

Η απόδοση του ιδανικού κύκλου Otto εξαρτάται από τα ακόλουθα:

- Από τον λόγο συμπίεσης  $r$
- Από τον αδιαβατικό εκθέτη  $\gamma$

Ωστόσο, η απόδοση του ιδανικού κύκλου Otto αυξάνεται με την αύξηση των δύο ανωτέρων λόγων ( $r$  και  $\gamma$ ). Ωστόσο, η απόδοση εξαρτάται από τα δυο αυτά μεγέθη, αλλά είναι μικρότερη λόγω τριβών, μη αντιστρεπτοτήτων κ.ά. [25]. Για την κατανόηση των προαναφερόμενων δίνεται η καμπύλη που απεικονίζεται η απόδοση του κύκλου Otto συναρτήσει του λόγου συμπίεσης  $r$  [21]. Η καμπύλη έχει μεγάλη κλίση σε μικρούς λόγους συμπίεσης και η κλίση εξομαλύνεται σε μεγάλους λόγους [25].

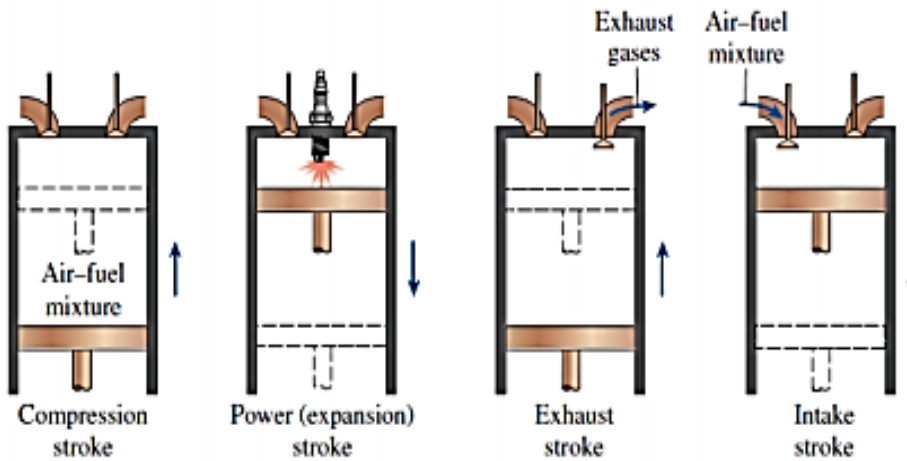


Σχήμα 22: καμπύλη που απεικονίζεται η απόδοση του κύκλου Otto συναρτήσει του λόγου συμπίεσης  $r$  [25]

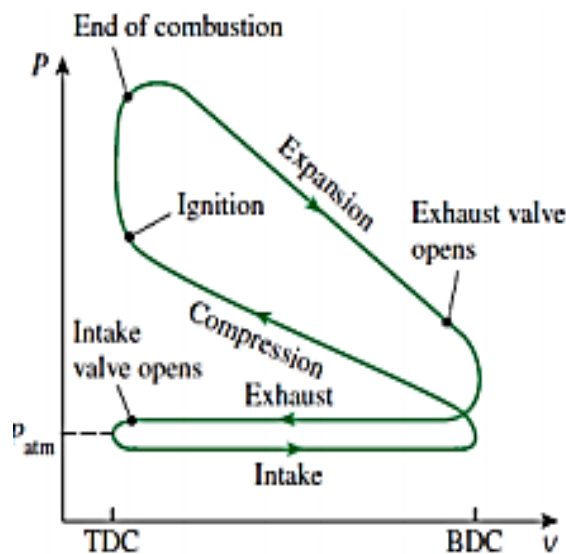
Ένα βασικό μέγεθος που χρησιμοποιείται για της βενζινομηχανές είναι η μέση ενεργός πίεση η οποία υποτίθεται ότι θαείναι σταθερή αν ενεργούσε πάνω στο έμβολο καθ' όλη την διάρκεια της διαδρομής θα παρήγαγε έργο σε αυτό που παράγεται κατά την διάρκεια του πραγματικού κύκλου και δίνεται από την σχέση:

$$MEP = \frac{W_{Otto}}{V_{max} - V_{min}} \quad [3.11]$$

Ωστόσο οι ΜΕΚ δεν λειτουργούν στον ιδανικό κύκλο Otto αλλά στον πραγματικό κύκλο, όπου μετράται στο δυναμοδεικτικό διάγραμμα πίεσης-όγκου. Στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται ο όγκος εμβολισμού, ενώ στον κατακόρυφο η ενδεικνύμενο πίεση εντός του κυλίνδρου [6].



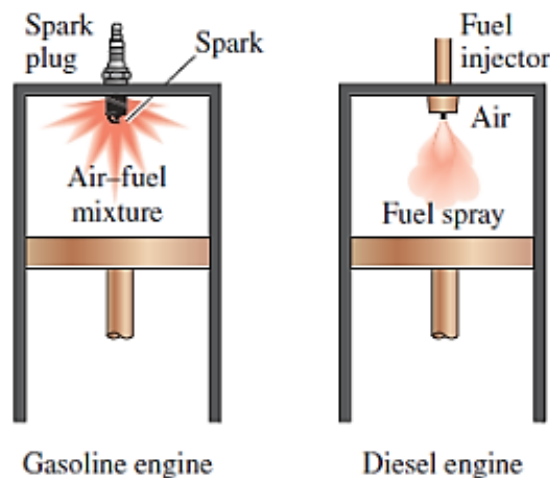
Σχήμα 23: Κίνηση εμβόλου μηχανής πραγματικού κύκλου Otto [25]



Σχήμα 24: Διαγραμματική απεικόνιση πραγματικού κύκλου OttoP-V

### 3.2.3. ΚΥΚΛΟΣ DIESEL

Η λειτουργία των πετρελαιοκινητήρων βασίζονται στον θερμοδυναμικό Diesel. Ο κύκλος Diesel πραγματοποιείται σε μια αδιαβατική διάταξη κυλίνδρου – εμβόλου που διαθέτει τουλάχιστον μια βαλβίδα εισαγωγής και μια εξαγωγής αλλά όχι και αναφλεκτήρα. Η ανάφλεξη είναι αυτοπυροδοτούμενη, δηλαδή ο αέρας συμπιέζεται σε σχετικά υψηλή πίεση και στην συνέχεια γίνεται έγχυση σε αυτόν πετρελαίου, το οποίο λόγω της πολύ υψηλής θερμοκρασίας του συμπιεσμένου αέρα και του σχετικά χαμηλού ορίου αυτανάφλεξης του πετρελαίου αναφλέγεται.



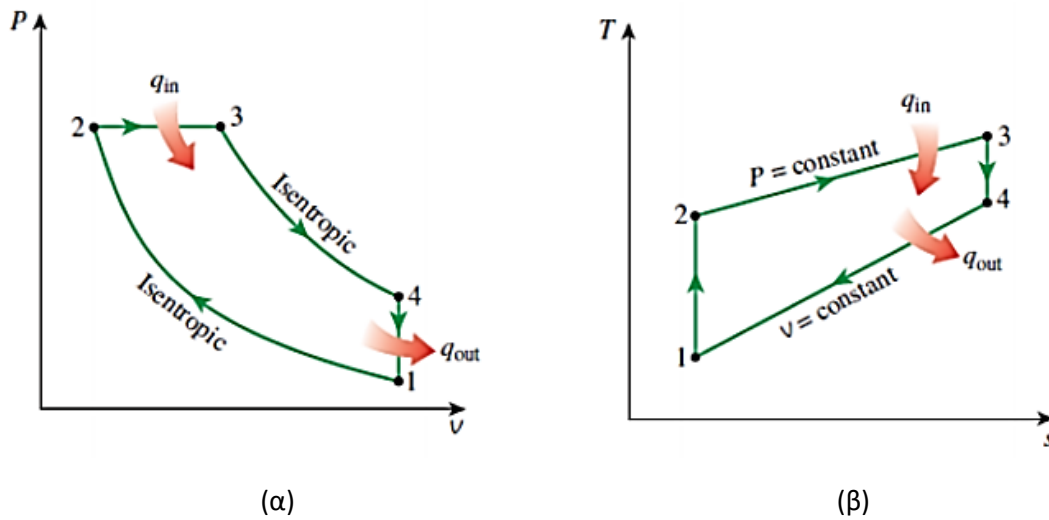
Σχήμα 25: Διαφοροποίηση ανάφλεξης σε Otto και Diesel [25]

Η έγχυση του καυσίμου στις μηχανές Diesel πραγματοποιείται όταν το έμβολο βρίσκεται λίγο πριν το ΑΝΣ και συνεχίζεται μέχρι το πρώτο στάδιο της φάσης παραγωγής ισχύος. Η διεργασία καύσης γίνεται σε μεγαλύτερο διάστημα. Για το λόγο αυτό η διεργασία μπορεί να θεωρηθεί ισοβαρής μεταβολή. Αυτή η μεταβολή αυτή αποτελεί και τη μόνη διαφορά μεταξύ του κύκλου Otto και του Diesel [25].

Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στις μηχανές Diesel είναι [21]:

- 1-2: Ισεντροπική συμπίεση
- 2-3: Ισοβαρής πρόσδοση θερμότητας
- 3-4: Ισεντροπική εκτόνωση
- 4-1: Ισόχωρη απόρριψη θερμότητας

Στην συνέχεια ακολουθεί η γραφική παράσταση του θερμοδυναμικού κύκλου Diesel P-V και T-S.



Σχήμα 26: Διαγραμματική απεικόνιση ιδανικού θερμοδυναμικού κύκλου Otto α) P-V και β) T-S [25]

Οι σχέσεις για τον υπολογισμό βασικών στοιχείων μιας μηχανής Dieseleίναι:

Ολικό έργο:

$$W_{Diesel} = -c_v(T_2 - T_1) + P(V_2 - V_1) - c_v(T_4 - T_3) , \text{joule} \quad [3.12]$$

Βαθμός απόδοσης:

$$n_{th} = \frac{W_{Diesel}}{q_{2 \rightarrow 3}} \quad [3.13]$$

ή

$$n_{th} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{\gamma(T_3 - T_2)} \quad [3.14]$$

Λόγος συμπίεσης:

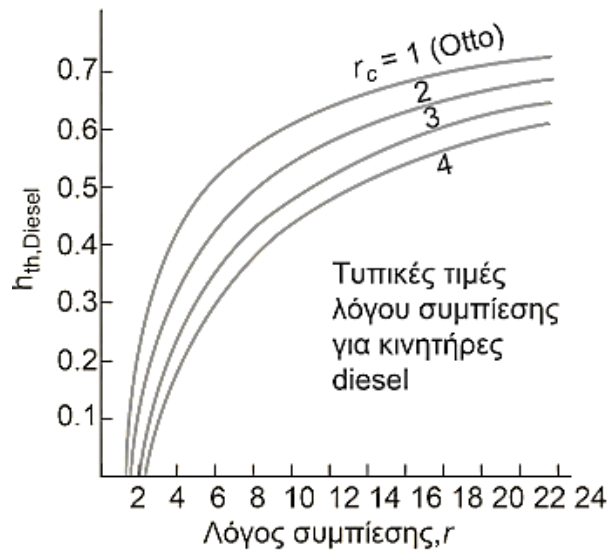
$$r = \frac{V_1}{V_2} \quad [3.15]$$

Λόγος ανακοπής:

$$r_c = \frac{V_3}{V_2} \quad \text{ή} \quad r_c = \frac{T_3}{T_2} \quad [3.16]$$

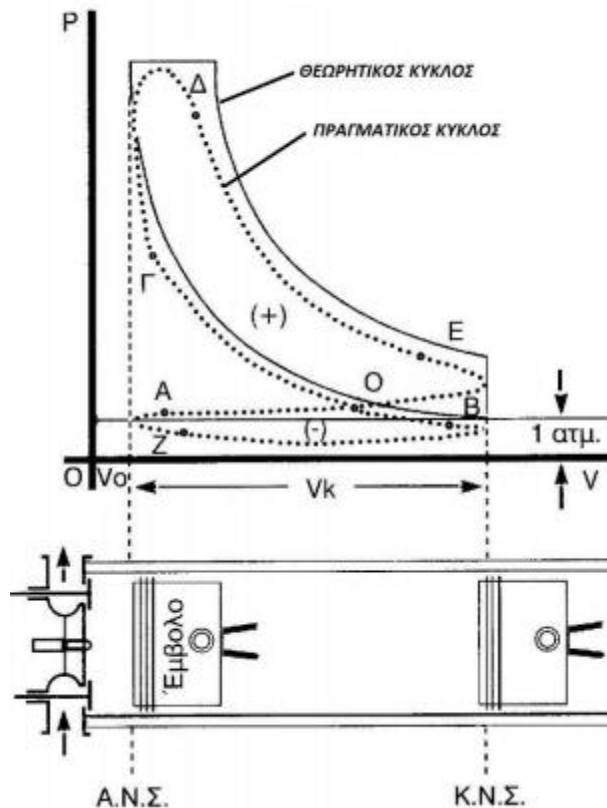
Από την σχέση 3.14 και 3.15 προκύπτει:

$$n_{th} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \left[ \frac{r_c^\gamma - 1}{\gamma(r_c - 1)} \right] \quad [3.17]$$



Σχήμα 27: Απόδοση του κύκλου Diesel συναρτήσει του λόγου συμπίεσης,  $r$ , με παράμετρο τον λόγο ανακοπής  $r_c$  [26].

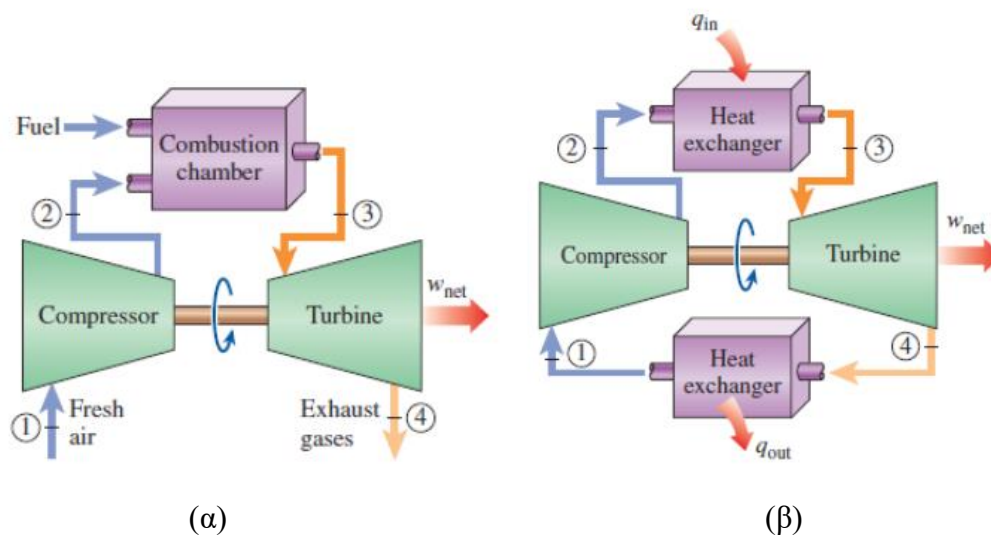
Στην συνέχεια ακολουθεί η απεικόνιση του πραγματικού κύκλου της μηχανής Diesel.



Σχήμα 28: Πραγματικός κύκλος Diesel [27]

### 3.2.4. ΚΥΚΛΟΣ BRAYTON

Η ισχύ που παράγουν οι αεριοστρόβιλοι οφείλεται στο καύσιμο που καίγεται, όπου τα ταχέως ρέοντα αέρια καύσης κινούν έναν στρόβιλο με πανομοιότυπο τρόπο που ο ατμός υψηλής πίεσης κινεί έναν ατμοστρόβιλο. Ένας αεριοστρόβιλος αποτελείται από συμπιεστή, καυστήρα και στρόβιλό ισχύος καθώς και τα απαραίτητα εξαρτήματα σύνδεσης αυτού (Σχήμα 29). Ένας αεριοστρόβιλος βασίζεται στον θερμοδυναμικό κύκλο Brayton όπου ο πεπιεσμένος αέρας αναμειγνύεται με καύσιμο και καίγεται υπό συνθήκες σταθερής πίεσης.

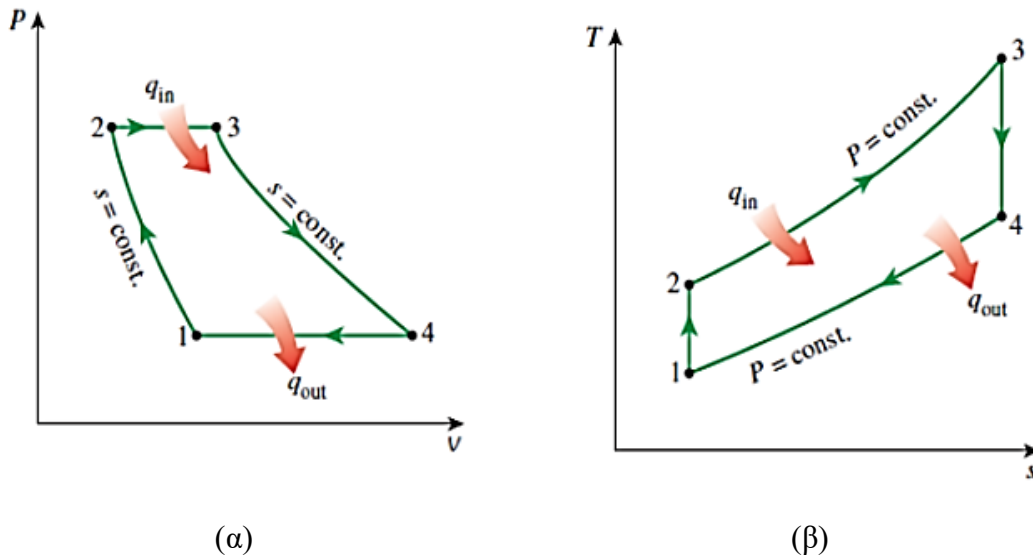


Σχήμα 29: Διαγραμματική απεικόνιση μηχανής Brayton (α) ανοικτού τύπου και (β) κλειστού τύπου [25]

Οι ισεντροπικές διαδικασίες του κύκλου Brayton είναι αντιστρεπτές. Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε έναν ιδανικό κύκλο Brayton είναι οι ακόλουθες [21]:

- 1-2 Ισεντροπική συμπίεση (σε έναν συμπιεστή)
- 2-3 Ισοβαρής θέρμανση
- 3-4 Ισεντροπική εκτόνωση (σε ένα στρόβιλο)
- 4-1 Ισοβαρής ψύξη

Στην συνέχεια ακολουθεί η γραφική παράσταση του θερμοδυναμικού κύκλου Brayton P-V και T-S.



Σχήμα 30: Διαγραμματική απεικόνιση ιδανικού θερμοδυναμικού κύκλου Brayton  
α) P-V και β) T-S [25]

Σημειώνεται ότι για την διεργασία 4-1 θα πρέπει να συμβολίζεται με διακεκομμένη γραμμή στην περίπτωση του ανοικτού κύκλου. Ο λόγος είναι ότι αφού οι αεριοστροβίλοι που λειτουργούν με κύκλο Brayton είναι συνεχούς ροής και η μάζα αέρα που επανεισέρχεται στον κύκλο από την εισαγωγή αλλά αυτό ισχύει μόνο για την περίπτωση του κλειστού κύκλου [21].

Οι σχέσεις για τον υπολογισμό βασικών στοιχείων μιας μηχανής Brayton είναι:

Ολικό έργο:

$$W_{BRAYTON} = c_p(T_3 - T_2) \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right), \text{joule} \quad [3.18]$$

ή

$$W_{BRAYTON} = c_p \left[ T_3 - T_1 R_C^{(\gamma-1/\gamma)} \right] \left[ 1 - R_C^{-(\gamma-1/\gamma)} \right], \text{joule} \quad [3.19]$$

Λόγος συμπίεσης:

$$R_C = \frac{P_2}{P_1} \quad [3.20]$$

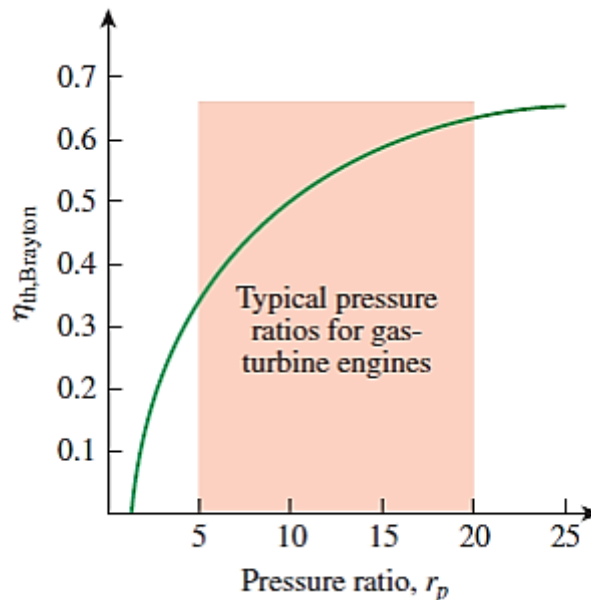
Συντελεστής θερμικής απόδοσης:

$$n_{th} = \frac{W_{BRAYTON}}{HI} \quad [3.21]$$

ή

$$n_{th} = 1 - \frac{1}{R_C^{(\gamma-1/\gamma)}} = 1 - \left(\frac{1}{R_C}\right)^{(\gamma-1/\gamma)} \quad [3.22]$$

Η σχέση 3.22 δείχνει την θερμική απόδοση του ιδανικού κύκλου Brayton και διακρίνεται ότι εξαρτάται από το λόγο πίεσης του αερίου στο στρόβιλο και το λόγο ειδικών θερμοτήτων του εργαζόμενου μέσου. Η θερμική απόδοση αυξάνεται με την αύξηση και των δυο αυτών παραμέτρων, που συμβαίνει και στους πραγματικούς αεριοστρόβιλους (Σχήμα 31).



Σχήμα 31: Συντελεστής απόδοσης ( $\eta_{th}$ ) συναρτήσεις του λόγου συμπίεσης ( $R_c$ )

Όπως έχουμε προαναφέρει και στους προαναφερόμενους κύκλους και σε αυτή την περίπτωση ο πραγματικός κύκλος Brayton διαφέρει από τον ιδανικό σε αρκετά σημεία. Μια πτώση πίεσης κατά την πρόσδοση και απόρριψη θερμότητας είναι αναπόφευκτη. Πιο σημαντικό όμως είναι ότι το έργο που απαιτείται στο συμπιεστή είναι μεγαλύτερο ενώ το έργο που παράγεται στο στρόβιλο είναι λιγότερο λόγω μη αντιστρεπτών μεταβολών. Οι αποκλίσεις αυτές μπορούν να αποτυπωθούν με την εισαγωγή του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης [25], για το συμπιεστή και το στρόβιλο, ως εξής:

$$n_c = \frac{W_s}{W_a} \cong \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad [3.23]$$

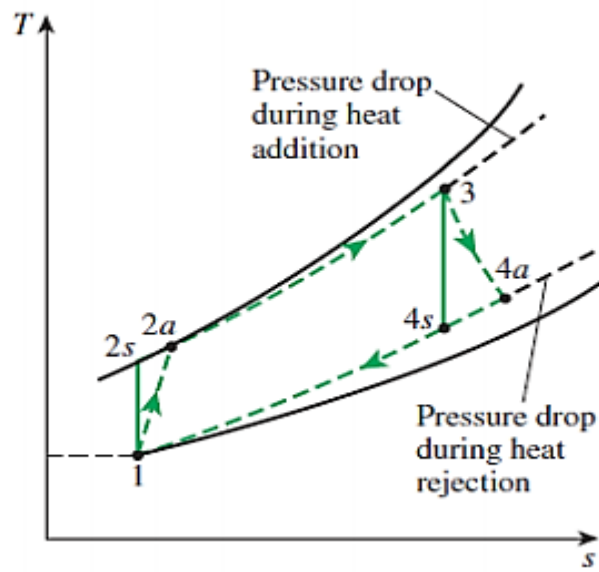
$$n_T = \frac{W_a}{W_s} \cong \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \quad [3.24]$$

Όπου οι καταστάσεις 2a και 4a είναι οι πραγματικές καταστάσεις εξόδου του συμπιεστή και του στρόβιλου αντίστοιχα, και 2s και 4s είναι οι αντίστοιχες ισεντροπικές (Σχήμα ) [25].





Σύγχρονες ΜΕΚ και οι εφαρμογές τους στην κίνηση και την βιομηχανία με τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας



Σχήμα 32: Διαγραμματική απεικόνιση πραγματικού θερμοδυναμικού κύκλου Brayton T-S [25]



## 4. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

### 4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ

Τα τελευταία χρόνια διακρίνονται ραγδαίες εξελίξεις στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ρύπανση και επιβάρυνση του περιβάλλοντος ολοένα και αυξάνεται. Ωστόσο σημαντικός παράγοντας στην εξέλιξη αυτή είναι η μείωση των ορυκτών καυσίμων που οδηγούν και στην αύξηση του κόστους τους [28]. Αυτό οδηγεί σε μια παγκόσμια μετατόπιση που οδηγεί σε πιο πράσινες και χαμηλές εκπομπές ρύπων προσπαθώντας να μειωθεί η συνεισφορά τους στις κλιματικές αλλαγές που προκαλούνται από τη ρύπανση, να ακολουθήσουν τους αυστηρότερους κανόνες για τις εκπομπές, να μειώσουν την χρήση ορυκτών καυσίμων (βενζίνη και πετρέλαιο) και να αντιμετωπίσουν και την αστάθεια στις τιμές τους για συστήματα μεταφοράς. Όλα αυτά οδηγούν στον αυτοσχεδιασμό της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται στα συμβατικά οχήματα [29].

Οι ΜΕΚ που χρησιμοποιούνται ως η κύρια πηγή ισχύος των συμβατικών οχημάτων έχουν σχετικά αποδεκτή μέγιστη απόδοση (30-40%). Όπως διακρίνονται δύο βασικά προβλήματα στις ΜΕΚ των συμβατικών οχημάτων με συνέπεια να τα καθιστούν αναποτελεσματικά. Αφενός λειτουργούν σε χαμηλό επίπεδο απόδοσης τις περισσότερες φορές και αφετέρου, ο θερμοδυναμικός κύκλος δεν μπορεί να αντιστραφεί και ως αποτέλεσμα, η κινητική ενέργεια του οχήματος δεν μπορεί να ανακτηθεί και να σπαταληθεί [29].

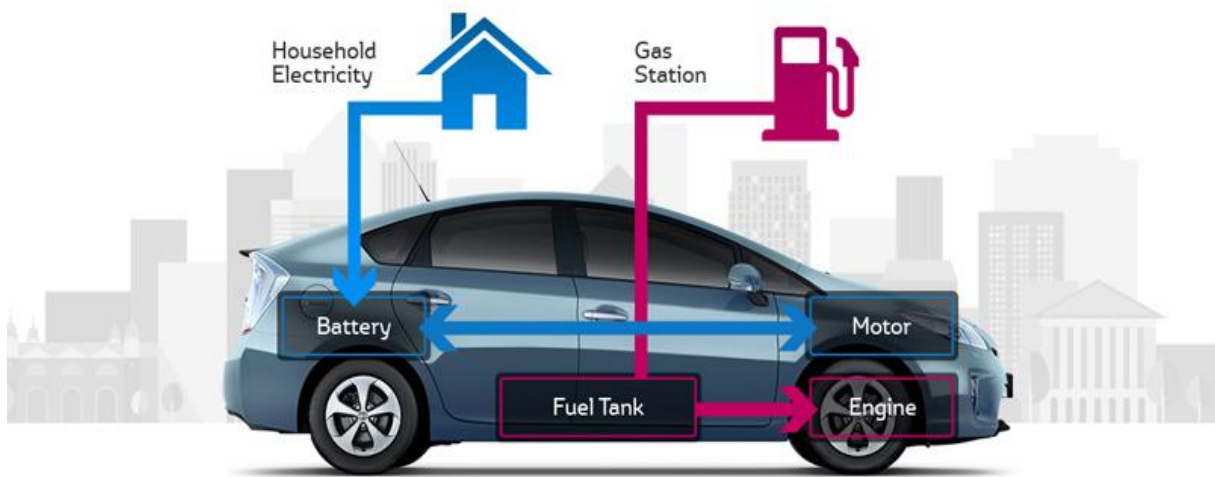
Τα «νέα» οχήματα ή οχήματα «νέας γενιάς» θα πρέπει να έχουν ως γνώμονα την μη επιβάρυνση του περιβάλλοντος με ταυτόχρονη βελτίωση της αποτελεσματικότητάς τους. Με στόχο την επίτευξη των ανωτέρων οι ερευνητές και οι επιστήμονες έχουν στραφεί στα εναλλακτικά καύσιμα όπως είναι συμπιεσμένο φυσικό αέριο (CNG), υγρό φυσικό αέριο (LNG), υδρογόνο κ.ά. Ωστόσο, έχουν πραγματοποιήσει μια σειρά καινοτόμων κινητήρων όπως είναι τα ηλεκτρικά οχήματα, υβριδικά οχήματα, οχήματα κυψελών καυσίμου κ.ά. [29]. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούν βασικά στοιχεία για την κίνηση οχημάτων με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας. Θεωρώντας ότι τα οχήματα «φιλικά» προς το περιβάλλον βρίσκονται στην κορυφή της λίστας των διαθέσιμων επιλογών για καθαρές τεχνολογίες οχημάτων θα δοθεί ανάλυση των τεχνολογιών με στόχο την κατανόηση της λειτουργίας τους [28].

### 4.2. ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

Η υβριδική τεχνολογία στα οχήματα καλείται ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων τεχνολογιών με στόχο να επιτευχθεί η κίνηση τους. Ως επί των πλείστων οι τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνουν κλασικό κινητήρα ΜΕΚ συνδυαζόμενη με μία πιο «φιλική» τεχνολογία προς το περιβάλλον. Τέτοιες τεχνολογίες είναι οι ηλεκτρικοί κινητήρες, οι πνευματικοί κινητήρες, κινητήρες βιοκαυσίμου ή φυσικού αερίου κ.ά. Τα υβριδικά οχήματα κατατάσσονται στην κατηγορία των φιλικών προς το περιβάλλον και ως χρησιμοποιούν και ορυκτά καύσιμα διότι σε κάθε περίπτωση οι εκπομπές ρύπων τους είναι μειωμένες [29].

#### 4.2.1. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

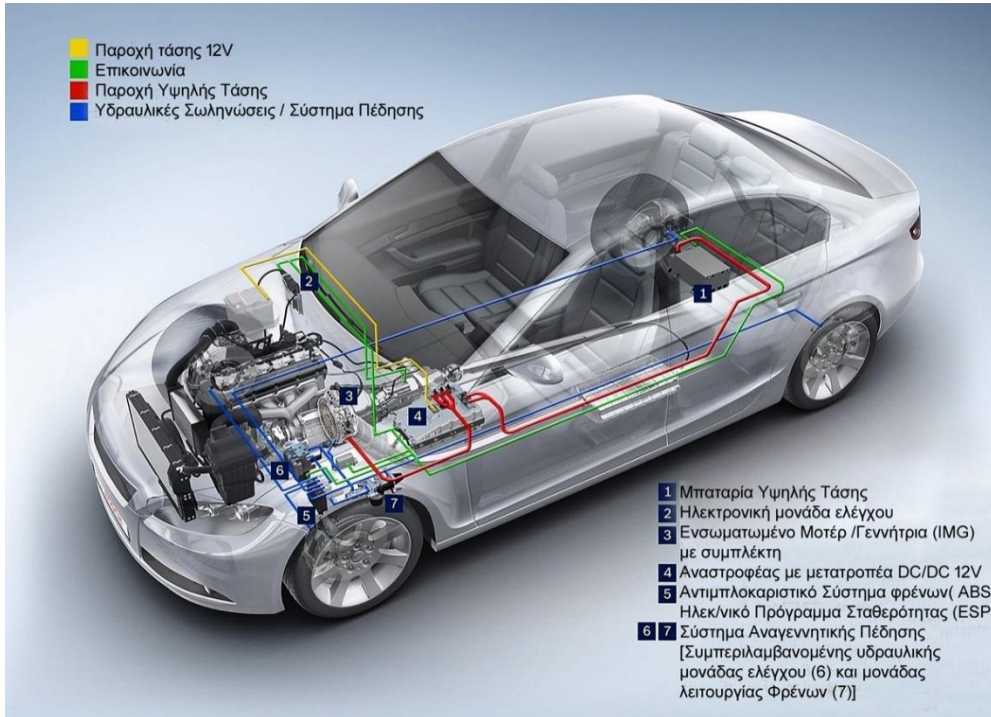
Η τεχνολογία υβριδικού οχήματος βασίζεται, όπως προαναφέρθηκε στον διπλό τρόπο κίνηση αφού χρησιμοποιεί έναν κινητήρα ΜΕΚ(βενζινοκινητήρα) και έναν ηλεκτροκινητήρα και χρησιμοποιούνται μεμονωμένα ή ταυτόχρονα [30]. Ένα από τα βασικότερα σημεία της υβριδικής τεχνολογίας των οχημάτων είναι ο ηλεκτροκινητήρας ο οποίος λειτουργεί με μπαταρίες. Ωστόσο, αυτές οι μπαταρίες δεν απαιτούν φόρτιση από τον ιδιοκτήτη αφού η φόρτισή του προέρχεται αυτόματα από το φρενάρισμα του οδηγού αφού χρησιμοποιεί την ενέργεια που απομακρύνεται κατά την διαδικασία αυτή. Η κατασκευή των υβριδικών οχημάτων δεν παρουσιάζει μεγάλες αλλαγές διαφοροποιήσεις από τα συμβατικά βενζινοκίνητα οχήματα.



Εικόνα 4: Υβριδικό όχημα [31]

Αυτό που θα πρέπει να σημειωθεί είναι ότι το όσον αφορά τη λειτουργία και την κίνηση του οχήματος το σημαντικότερο μηχανήμα είναι, ο κινητήρας ο οποίος εμφανίζεται διπλός σε ένα υβριδικό όχημα αφού ή είναι ηλεκτρικός κυρίως σε μικρές ταχύτητες ή είναι βενζινοκίνητος σε μεγαλύτερες [30].

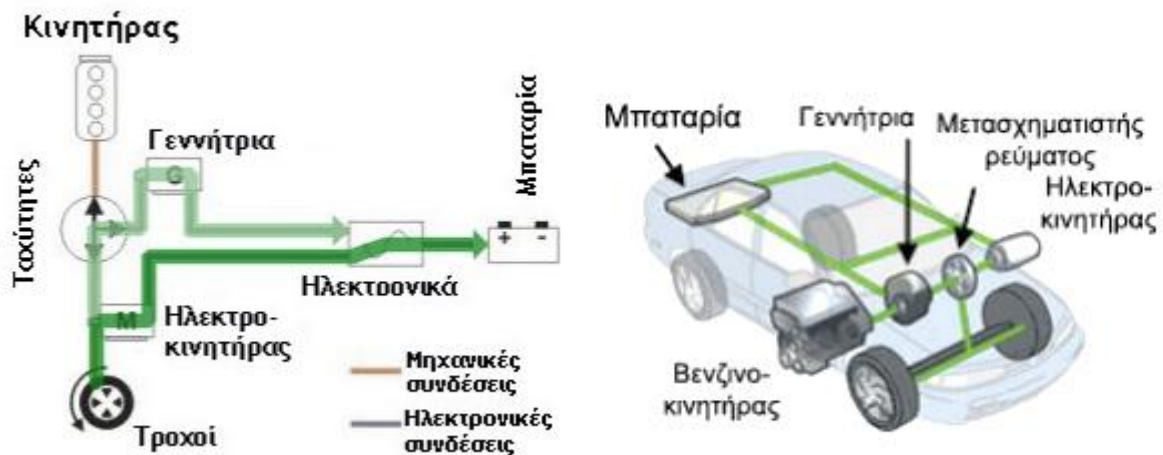
Στην συνέχεια ακολουθεί η Εικόνα 5 όπου απεικονίζονται ένα υβριδικό όχημα και τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του που αφορούν την παροχή τάσης χαμηλής και υψηλής, την επικοινωνία των εξαρτημάτων καθώς και τις υδραυλικές σωληνώσεις και σύστημα πέδησης.



Εικόνα 5: Εξαρτήματα υβριδικού οχήματος [32]

#### 4.2.2. ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Τα βασικά μέρη του υβριδικού συστήματος του αυτοκινήτου είναι ο ηλεκτροκινητήρας, ο κινητήρας εσωτερικής καύσεως, η γεννήτρια, η συστοιχία συσσωρευτών (μπαταρία) και ο μετασχηματιστής ρεύματος (Σχήμα 33) [33].

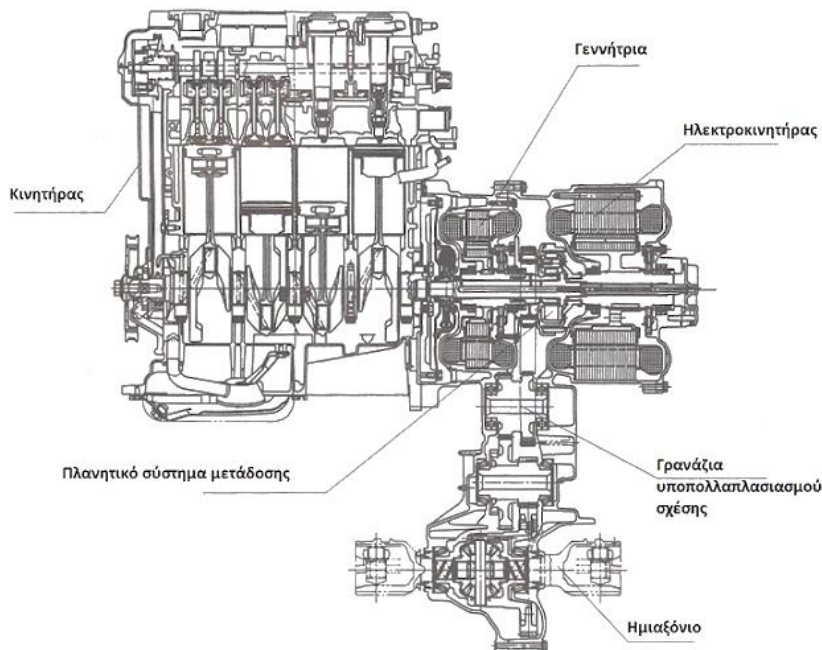


Σχήμα 33: Απεικόνιση βασικό συστημάτων υβριδικού οχήματος [33]

Ο ηλεκτροκινητήρας είναι υπεύθυνος για την κίνηση του οχήματος σε σταθερή και ομαλή πορεία, σε μη κεκλιμένο επίπεδο. Επιπλέον, παρέχει την απαραίτητη ισχύ στον βενζινοκινητήρα μόνο στις διαφορετικές περιπτώσεις από τις προαναφερόμενες, όπως κατά την επιτάχυνση καθώς και σε κεκλιμένο επίπεδο (ανηφόρα). Ο ηλεκτροκινητήρας είναι σε μόνιμη βάση συνδεδεμένος με το πλανητικό κιβώτιο ταχυτήτων τύπου CVT (Continuously Variable Transmission) όπου ρυθμίζεται η κατανομή ισχύος ανάμεσα στις δύο μονάδες, δηλαδή του ηλεκτροκινητήρα και του βενζινοκινητήρα με στόχο την άρτια μετάδοση της κίνησης στους τροχούς. Όσον αφορά την ενέργεια που πρέπει να δίνεται στον ηλεκτροκινητήρα οφείλεται από την σύνδεση του με την γεννήτρια και τις μπαταρίες. Τονίζεται ότι η μεγάλη καινοτομία στο συγκεκριμένο μέρος του οχήματος είναι ότι κατά το φρενάρισμα μετατρέπεται η ενέργεια με στόχο να παρέχεται για την επαναφορτίζει τις μπαταρίες (Σχήμα 33) [33].

Ο κινητήρας ΜΕΚ (βενζινοκινητήρας) χρησιμοποιεί ως καύσιμο βενζίνη και η λειτουργία του είναι πανομοιότυπη με τους συμβατικούς κινητήρες. Ωστόσο, υπάρχουν κατασκευαστικές διαφορές, αφού το μπλοκ (κυλινδροκεφαλή) είναι κατασκευασμένη από κράμα αλουμινίου και η εξαγωγή αποτελείται από ανοξείδωτο χάλυβα χαμηλής μάζας μειώνοντας το συνολικό βάρος κατασκευής. Η απόδοση που παρουσιάζει είναι μικρή αλλά αρκετή για να αντισταθμίσει το φορτίο, με στόχο να υπάρξει άρτια συνεργασία με τον ηλεκτροκινητήρα. Το γκάζι είναι ηλεκτρονικό με στόχο να δίνονται πιο ακριβής πληροφορία για το σύστημα ψεκασμού, ενώ η ποιότητα των καυσαερίων ελέγχονται ένα τριοδικός καταλυτικός μετατροπέας υψηλής πυκνότητας και ταχείας προθέρμανσης για μέγιστη απόδοση [30].

Η γεννήτρια λειτουργεί μέσω της μηχανής ΜΕΚ και χρησιμοποιείται και για την επαναφόρτιση της συστοιχίας των μπαταριών με στόχο την ενίσχυση του ηλεκτροκινητήρα. Ως δευτερεύουσες λειτουργίες εκκινεί τον βενζινοκινητήρα (αφού δεν υπάρχει μίζα), και λειτουργεί όπως και μια απλή γεννήτρια στους συμβατικούς κινητήρες [30].



Σχήμα 34: Τομή του υβριδικού κινητήρα και της μετάδοσης [34]

### 4.2.3. ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΟΧΗΜΑ

Η επιτακτική ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας λόγω της ραγδαίας μείωσης των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων καθώς επίσης και η μείωση των αρνητικών επιπτώσεων που προκαλούνται κατά την καύση τους (περιβαλλοντική ρύπανση) οδήγησαν σε έρευνα για ανάπτυξη εναλλακτικών συστημάτων μετάδοσης ισχύος. Ένα από τα δημοφιλέστερα συστήματα εναλλακτικής πρόωσης υβριδικό - ηλεκτρικό αυτοκίνητο (Hybrid Electric Vehicle) το οποίο θεωρείται και ως το πρώτο βήμα για την δημιουργία οχημάτων μηδενικών εκπομπών (Zero Emission Vehicle). Ωστόσο, η επίτευξη αυτού ίσως πραγματοποιηθεί με την χρήση είτε μόνο κυψελών καυσίμου είτε μόνο ηλεκτρικής ενέργειας (μπαταρίες) [30].

Τα συμβατικά οχήματα έχουν την δυνατότητα να συνδεθούν με ηλεκτρογεννήτριες, γεννήτριες, μετασχηματιστές, τάσεις και συσσωρευτές με στόχο να μετατραπούν σε υβριδικά οχήματα, δηλαδή προστίθεται στο συμβατικό όχημα ένα υβριδικό σύστημα μεταφοράς ισχύος. Ο συνδυασμός αυτός στην ουσία αλλάζει την διαδικασία μετατροπής ενέργειας από τον κύκλο λειτουργίας του συμβατικού οχήματος με αποτέλεσμα ο κινητήρας να μπορεί να λειτουργήσει στη μέγιστη απόδοση του για το μεγαλύτερο μέρος της διάρκειας ζωής της ΜΕΚ. Επιπλέον, τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα παρουσιάζουν μείωση της κατανάλωσης καυσίμου σε ποσοστό που φτάνει το 15 έως 20%. Ωστόσο τα υβριδικά οχήματα πρέπει να αντιμετωπίσουν δύο βασικά προβλήματα, το πρώτο είναι το κόστος του που μπορεί να είναι έως και 50% πιο υψηλό από ένα συμβατικό όχημα και δεύτερο το σύστημα ολοκλήρωσης και ελέγχου [33].

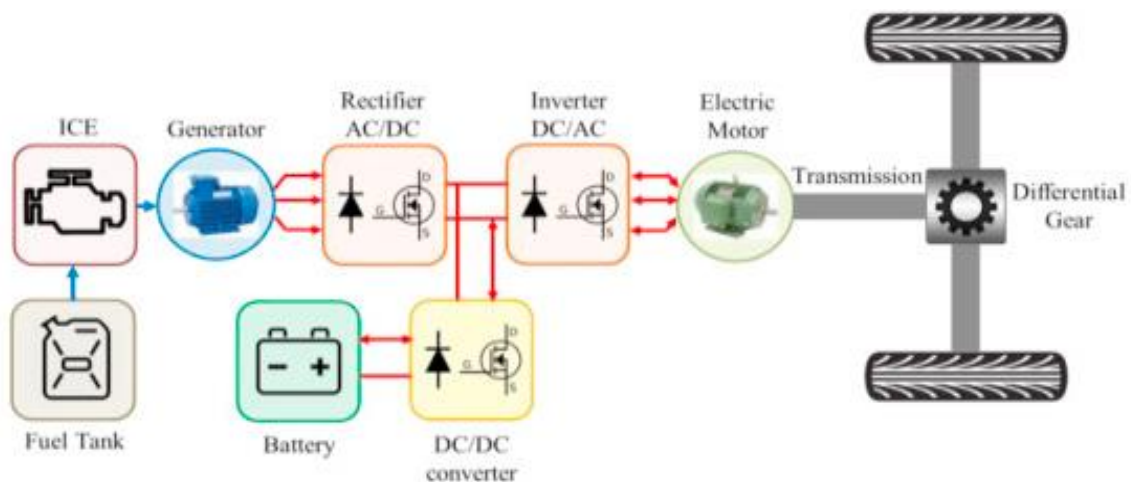
Το σύστημα μετάδοσης ισχύος απαιτεί την άρτια λειτουργία όλων των επιμέρους συστημάτων με στόχο την μέγιστη απόδοση αλλά και την μεγιστοποίηση των ωφελειών. Αξιοσημείωτο είναι ότι τα ηλεκτρονικά 42-Voltστα οχήματα κάνει την ολοκλήρωση των επιμέρους συστημάτων (ηλεκτροκινητήρων/γεννητριών, στροβιλοσυμπιεστών και υπολοίπων

συμπληρωματικών στοιχείων του κινητήρα) μια αξιόλογη πρόταση για μελλοντικά βελτιωμένα συστήματα μετάδοσης ισχύος. Οι βασικοί τύποι μετάδοσης ισχύος υβριδικών συστημάτων είναι τρεις και διαχωρίζονται από την συνδεσμολογία που παρουσιάζουν που μπορεί να είναι είτε σε σειρά, είτε παράλληλα, είτε μικρά δηλαδή ο συνδυασμός των δύο προαναφερόμενων [35]. Στην συνέχεια δίνονται βασικές πληροφορίες για κάθε τύπο υβριδικού συστήματος:

### ➤ Σειριακό Υβριδικό Σύστημα

Σε ένα υβριδικό σύστημα που λειτουργεί με σειριακή συνδεσμολογία μετάδοση ισχύος, η κίνηση προέρχεται αποκλειστικά από την ηλεκτροκινητήρα όπου η ενέργεια που λαμβάνει μπορεί να προέρχεται είτε από μια συστοιχία μπαταριών είτε από μια γεννήτρια η οποία με την σειρά της λαμβάνει ενέργεια από την ΜΕΚ. Το μέγεθος του κινητήρα είναι μικρότερο αφού οι οδηγικές απαιτήσεις που μπορεί να εξυπηρετήσει είναι μέτριες. Επιπλέον, ο κινητήρας δεν είναι συνδεδεμένος απευθείας στο κιβώτιο ταχυτήτων και λειτουργεί σε συγκεκριμένες στροφές (φορτίο πεδίου λειτουργίας) με υψηλή απόδοση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων (π.χ. βενζίνης) [30].

Όσον αφορά τις μπαταρίες που απαρτίζουν το σύστημα πρέπει να είναι υψηλής ισχύος με στόχο να παρέχουν την δυνατότητα να ικανοποιούν τις μεγάλες οδηγικές απαιτήσεις. Όμως έχουν βασικό μειονέκτημα το επιπρόσθετο βάρος και παράλληλα την αύξηση του κόστους του οχήματος. Οι απόδοση του οχήματος εξαρτάται άμεσα από την ισχύ του ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος πρέπει να διαθέτει μεγάλο μέγεθος προκειμένου να δώσει την απαιτούμενη ισχύ. Επιπλέον, ένας δυνατός κινητήρας απαιτεί με τη σειρά του μεγάλο μέγεθος μπαταριών που συνεπάγεται και μεγάλο βάρος όμως είναι απαραίτητο με στόχο να ικανοποιούνται οι ανάγκες του οχήματος σε ενέργεια. Ωστόσο, υπάρχει μια δευτερεύουσα γραμμή που να μεταφέρει το ρεύμα της γεννήτριας απευθείας στον ηλεκτροκινητήρα, παρακάμπτοντας τους συσσωρευτές [30].



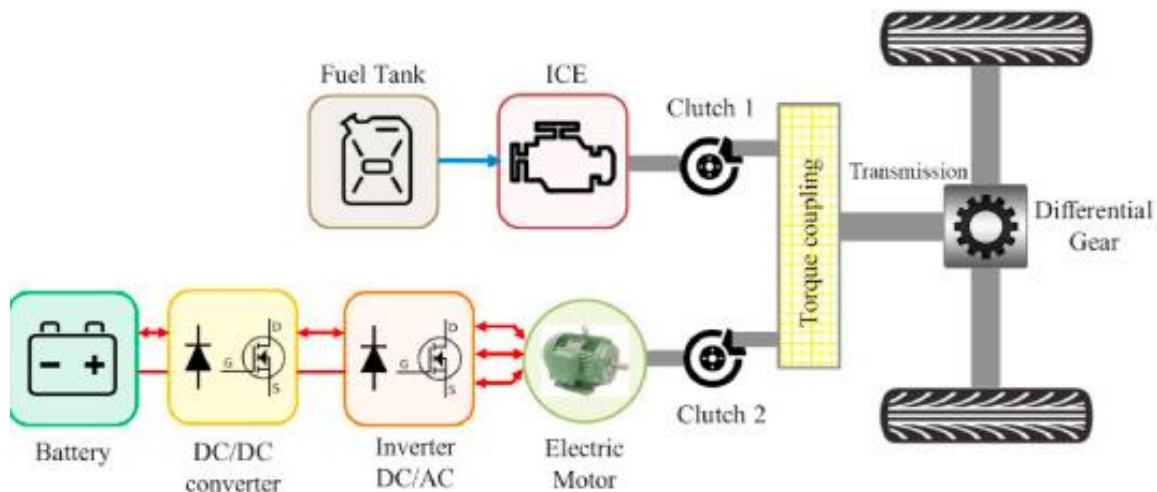
Σχήμα 35: Υβριδικό όχημα με σειριακή συνδεσμολογία [35]

### ➤ Παράλληλο Υβριδικό Σύστημα

Σε ένα υβριδικό σύστημα που λειτουργεί με παράλληλη συνδεσμολογία μετάδοση ισχύος, διακρίνεται ότι ο κινητήρας και ο ηλεκτροκινητήρας παράγουν ισχύ για την κίνηση των τροχών αναμάρτητα συνδεδεμένοι στο κιβώτιο ταχυτήτων. Αυτό συμβαίνει διότι ο κινητήρας είναι συνδεδεμένος απευθείας στους τροχούς με συνέπεια να μειώνεται ο αρνητικός επηρεασμός της απόδοσης κατά την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια, κάτι που ισχύει στα υβριδικά οχήματα με σειριακή συνδεσμολογία [35].

Το παράλληλο υβριδικό σύστημα θεωρείται κατάλληλο για οχήματα που κινούνται στον αυτοκινητόδρομο. Ο ηλεκτροκινητήρας έχει τον μικρότερο δυνατό όγκο που απαιτείται με στόχο την μετακίνηση του οχήματος με μικρή σχετικά ταχύτητα εντός της πόλης. Ωστόσο, η ΜΕΚ (εμβολοφόρος κινητήρας) έχει τον όγκο που απαιτείται με στόχο το όχημα να μπορεί να κινείται με την μέγιστη ταχύτητα σε οριζόντιο επίπεδο και άπνοια. Παράλληλα διαχειτεύει κάποιο μικρό ποσοστό της ισχύς του στη γεννήτρια με στόχο την επαναφόρτιση των μπαταριών του ηλεκτροκινητήρα [33].

Το πλεονέκτημα με την υβριδική παράλληλης συνδεσμολογίας με ΜΕΚ και ηλεκτροκινητήρα είναι ότι δίνεται η δυνατότητα «αλληλοβοήθειας» των δυο συστημάτων. Για παράδειγμα στη περίπτωση που χρειαστεί από τον κινητήρα να αποδοθεί περισσότερη ισχύ από αυτή που αντιστοιχεί στις συνθήκες ιδανικής απόδοσης, τότε ενεργοποιείται ο ηλεκτροκινητήρας και προσφέρει την επιπλέον ισχύ που χρειάζεται το όχημα, χωρίς όμως να λειτουργήσει η ΜΕΚ υπό συνθήκες που θα αύξαναν την κατανάλωση του και πιθανόν και τις εκπομπές καυσαερίου [30].



Σχήμα 36: Υβριδικό όχημα με παράλληλη συνδεσμολογία [35]

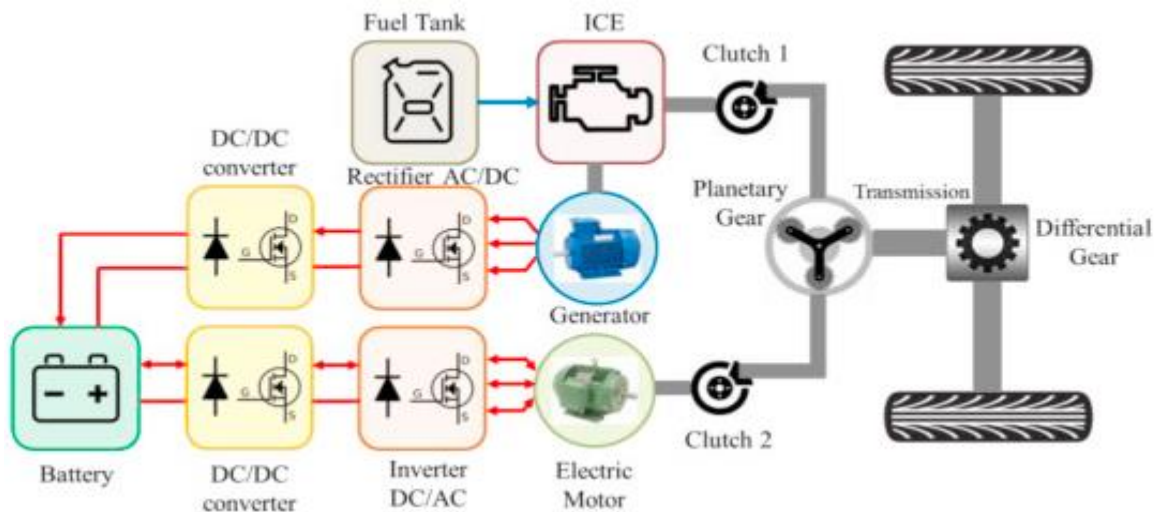
Κάποια βασικά παραδείγματα υβριδικών οχημάτων με παράλληλο σύστημα συνδεσμολογίας είναι [30]:



- Daimler Chrysler Dodge Ram: 5.9 lt όγκος εμβολισμού με 242.5 kW κινητήρα diesel, παραγωγή 2004.
- Toyota – Hino Dutro: 2,525 mm μεταξόνιο με 4 lt όγκο εμβολισμού, με σύστημα έγχυσης κοινού αυλού εισαγωγής, 4-κύλινδρος, σύστημα στροβίλο-υπερπλήρωσης με στρόβιλο μεταβλητής γεωμετρίας (VGT), 110 kW κινητήρα diesel σε σύνδεση με μια 23 kW, τριφασική AC σύγχρονη γεννήτρια/κινητήρα και μια 6.5 Ah NiMH συστοιχία μπαταριών,
- Isuzu Elf: 2,505 mm μεταξόνιο με 4.77 lt όγκο εμβολισμού, σύστημα έγχυσης κοινού αυλού εισαγωγής, 4-κύλινδρο, 96 kW κινητήρα diesel σε σύνδεση με μια 25.5 kW, τριφασική AC σύγχρονη γεννήτρια και 346V συστοιχία μπαταριών ιόντων λιθίου.

### ➤ Μικτό Υβριδικό Σύστημα

Σε ένα υβριδικό σύστημα που λειτουργεί με μικρή συνδεσμολογία μετάδοση ισχύος διακρίνονται τα εξής χαρακτηριστικά ο κινητήρας έχει την δυνατότητα να κινεί τους τροχούς απευθείας όμως υπάρχει περίπτωση να είναι αποσυνδεδεμένος από αυτούς, στόχο α κινούνται μόνο από τον ηλεκτροκινητήρα. Το μικτό υβριδικό σύστημα είναι το ακριβότερο σε σύγκριση με το σειριακό ή παράλληλο υβριδικό σύστημα αφού απαιτεί γεννήτρια, μεγαλύτερη συστοιχία μπαταριών και ένα πιο σύνθετο και ανεπτυγμένο σύστημα ελέγχου. Ωστόσο, ο μικτός σχηματισμός έχει τη δυνατότητα καλύτερης απόδοσης απ' ότι ο κάθε σχηματισμός ξεχωριστά [33].



Σχήμα 37: Υβριδικό όχημα με μικτή συνδεσμολογία [35]

Στην συνέχεια ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας μειονεκτημάτων και πλεονεκτημάτων των τριών τύπων υβριδικών συστημάτων.

Πίνακας 4: Συγκεντρωτικός πίνακας πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων συνδεσμολογιών υβριδικών συστημάτων [35]



Πλεονεκτήματα		Μειονεκτήματα	
<b>Σειρά</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Βελτιστοποιημένη μετάδοση της κίνησης αποτελεσματική έλξης (συρρίκνωση του κινητήρα)</li> <li>- Μεγάλη διάρκεια ζωής</li> <li>- Εξαιρετική ανταπόκριση παροδική η λειτουργία των εκπομπών</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Μεγαλύτερο σύστημα κίνησης έλξης</li> <li>- Πολλαπλές μετατροπές ενέργειας</li> </ul>	
<i>Εφαρμογή: Μεγαλύτερα οχήματα όπως βαρέα φορτηγά, φορτηγά και ατμομηχανές.</i>			
<b>Παράλληλο</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Οικονομικό κέρδος με υψηλό κόστος</li> <li>- Δυνατότητα λειτουργίας μηδενικών εκπομπών</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Απαιτούνται υψηλές τάσεις για αποδοτικότητα</li> <li>- Σύνθετη συσκευασία χώρου</li> </ul>	
<i>Εφαρμογή: αστικά επιβατικά αυτοκίνητα.</i>			
<b>Σειρά-παράλληλη</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Δυνατή λειτουργία μηδενικών εκπομπών</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Πολύ ακριβό σύστημα</li> <li>- Πολυπλοκότητα ελέγχου</li> <li>- Σύνθετη συσκευασία χώρου</li> </ul>	
<i>Εφαρμογή: επιβατικά αυτοκίνητα, ελαφρά οχήματα.</i>			

Στην συνέχεια ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας του τρόπου λειτουργίας των τριών τύπων υβριδικών συστημάτων.

Πίνακας 5: Συγκεντρωτικός πίνακας λειτουργίας συνδεσμολογιών υβριδικών συστημάτων [35]

α/α	Τρόποι λειτουργίας	Τοπολογίες εδάφους			
		Σειρά	Παράλληλο	Μικτή	Συνδέω
1	Λειτουργία μόνο μπαταρίας	✓	✓	✓	✓
2	Λειτουργία μόνο κινητήρα	✓	✓	✓	✓
3	Συνδυασμένη λειτουργία	✓	✓	✓	✓
4	Λειτουργία διαχωρισμού ισχύος	✓	✓	✓	✓
5	Λειτουργία σταθερής φόρτισης	✓	✓	✓	✓
6	Αναγεννητική λειτουργία πέδησης	✓	✓	✓	✓
7	Λειτουργία βαρύ κινητήρα	-	-	✓	-
8	Ηλεκτρική βαρύς τρόπος	-	-	✓	-
9	Λειτουργία φόρτισης μπαταρίας	-	-	-	✓
10	Εκτεταμένη λειτουργία οδήγησης	-	-	-	✓

Συνοψίζοντας από τα ανωτέρου προκύπτει ότι τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα [35]:



- Η ΜΕΚ έχουν μικρότερο όγκο
- Η ΜΕΚ παραμένει εκτός λειτουργίας με συνέπεια την μείωση της κατανάλωσης καυσίμου άρα επίτευξη της εξοικονόμησης ενέργειας.
- Η Μ.Ε.Κ. λειτουργεί σε σταθερή ταχύτητα/φορτίο του πεδίου λειτουργίας σε σχετικά υψηλή απόδοση.
- Πραγματοποιείται ανάκτηση της ισχύος και του φορτίου των μπαταριών κατά το φρενάρισμα.

#### 4.2.4. ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΟΧΗΜΑ

Η δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας από την χρήση υβριδικών οχημάτων έχει και περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα αφού τα υβριδικά οχήματα συμβάλουν σημαντικά στη μείωση της ρύπανσης. Ωστόσο για την επίτευξη αυτού απαιτείται κατάλληλο σύστημα ελέγχου. Η σύμπλεξη στο κιβώτιο ταχυτήτων (σταθερής σχέσης μετάδοσης) δεσμεύει ή αποδεσμεύει τον ηλεκτροκινητήρα ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του υβριδικού. Με αυτό τον τρόπο η ΜΕΚ και ο ηλεκτροκινητήρας συνδέονται με το σύστημα κίνησης, δηλαδή με τον άξονα κίνησης που με την σειρά του δίνει κίνησης στο διαφορικό και τα ημιαξόνια. Ο ηλεκτροκινητήρας φορτίζει τις μπαταρίες όταν λειτουργεί σαν γεννήτρια και αποφορτίζει τις μπαταρίες όταν λειτουργεί ως υποβοήθεια του κινητήρα για προώθηση του οχήματος [3].

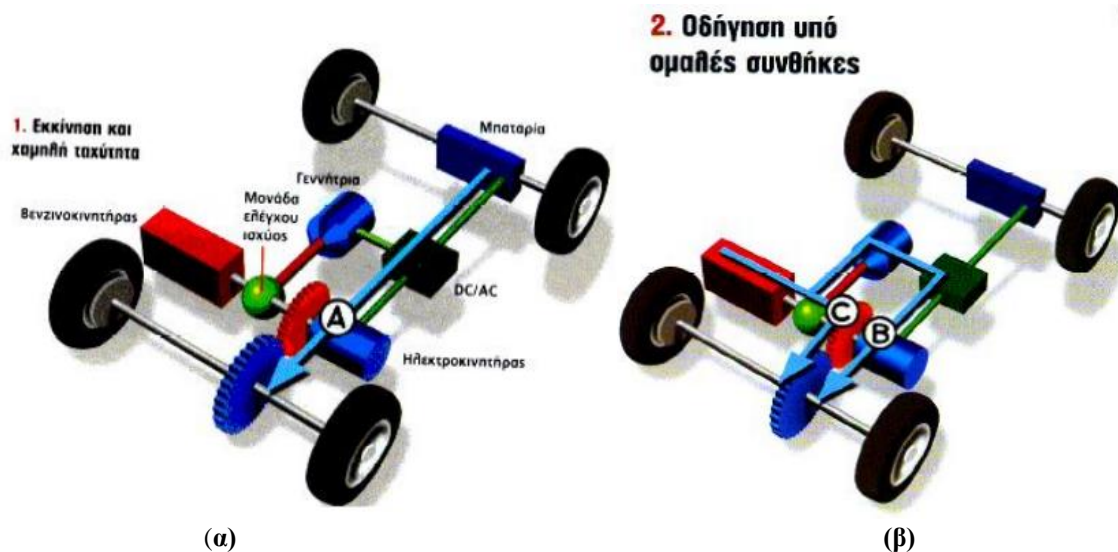
Όπως προαναφέρθηκε (Πίνακας 5) και σύμφωνα με τον Γεωργιάδη Π. (2014) σε ένα υβριδικό όχημα δίνεται η δυνατότητα οδήγησης με διαφορετικούς τρόπους και είναι οι κάτωθι:

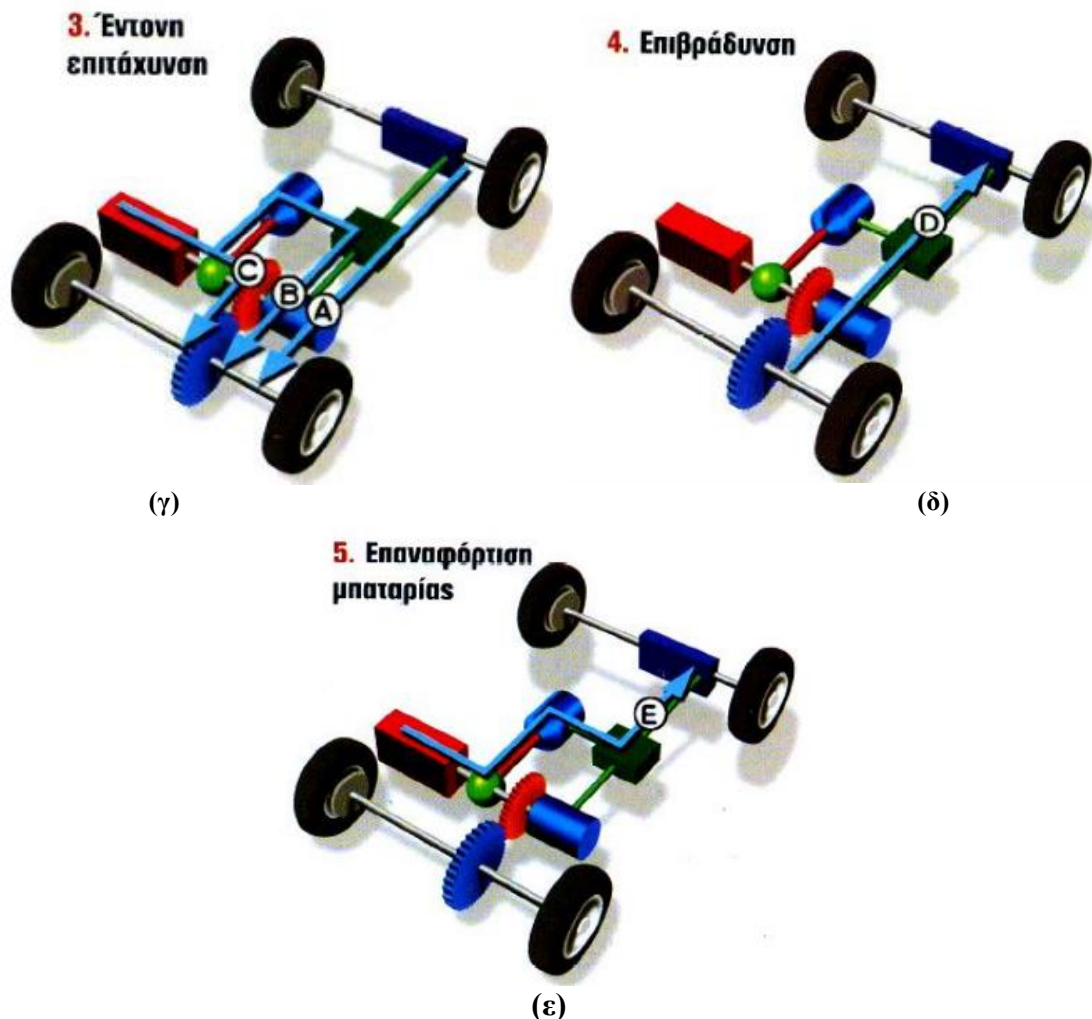
- a) Λειτουργία οχήματος μηδενικών εκπομπών (ZEV) (ο κινητήρας εκτός λειτουργίας, λειτουργεί ο ηλεκτροκινητήρας)
- b) Κανονική λειτουργία κινητήρα (όπως και στα συμβατικά οχήματα)
- c) Υβριδική λειτουργία κινητήρα και ηλεκτροκινητήρα.
- d) Υβριδική λειτουργία ηλεκτροκινητήρα ως γεννήτρια (ο κινητήρας παρέχει την ισχύ προώθησης του οχήματος και ταυτόχρονα φορτίζει τις μπαταρίες).
- e) Λειτουργία ανάκτησης ισχύος κατά το φρενάρισμα (regenerative braking)

Γίνεται κατανοητό αφού υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι λειτουργίας των υβριδικών οχημάτων θα υπάρχουν και διαφορετικοί τρόποι ροής της ισχύος. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση της μικτής συνδεσμολογία κινητήρας, γεννήτριας και ηλεκτροκινητήρας δίνεται η δυνατότητα αξιοποίησης των επιμέρους μελών του υβριδικού συστήματος με συνέπεια η συνεργασία τους να επιφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα με στόχο την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Στην περίπτωση που η μπαταρία είναι φορτισμένη και η κίνηση του οχήματος πραγματοποιείται σε χαμηλές στροφές ο κινητήρας μπαίνει εκτός λειτουργίας (σβήνει) με σκοπό να αποφευχθεί η λειτουργία τους σε συνθήκες χαμηλού βαθμός απόδοσης και το όχημα κινείται αποκλειστικά λειτουργία αποκλειστικά με τον ηλεκτροκινητήρα (σημείο Α, Σχήμα 38.α).

Στην περίπτωση που επικρατούν κανονικές οδηγικές συνθήκες, τότε η ισχύς του κινητήρα διαχωρίζεται και κατανέμεται μεταξύ των τροχών (σημείο C, Σχήμα 38.β) και της γεννήτριας. Ένα τμήμα της ενέργειας που παράγεται (ηλεκτρική) δίνεται από την γεννήτρια και διοχετεύεται στις μπαταρίες πραγματοποιώντας φόρτιση και ένατο υπόλοιπο προωθείται στον ηλεκτροκινητήρα (σημείο B, Σχήμα 38.β) που με την σειρά του συνεισφέρει στην κίνηση του οχήματος. Η επιλογή των επιμέρους κατανομών ισχύος και ρεύματος γίνεται με γνώμονα την επίτευξη της μεγιστοποίησης του βέλτιστου συνολικού βαθμού απόδοσης του συστήματος.

Στην περίπτωση που απαιτείται μεγάλη επιτάχυνση, η παραγωγή ισχύος γίνεται από τον κινητήρα και διοχετεύεται στους τροχούς όπως και η ισχύς του ηλεκτροκινητήρα (B+C) ο οποίος τροφοδοτείται από την μπαταρία (A) (Σχήμα 38, γ). το ποσοστό που θα φτάσει στους τροχούς από τον κινητήρα και τον ηλεκτροκινητήρα εξαρτάται από τα κριτήρια για την βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης. Στην περίπτωση που το όχημα επιβραδύνει, τότε ο ηλεκτροκινητήρας μετατρέπεται σε γεννήτρια παρουσιάζοντας την δυνατότητα να απορροφήσει τα ποσά κινητικής ενέργειας η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική (σημείο D, Σχήμα 38, δ). Η επενέργεια των υδραυλικών φρένων που είναι ηλεκτρικά ελεγχόμενα με στόχο να φτάνει η σωστή πληροφορία στο σύστημα, καθορίζεται από την ένταση της ζητούμενης επιβράδυνσης και από τις ανάγκες για την άρτια κατανομή των επιβραδυντικών φορτίων ανάμεσα στους εμπρός και τους πίσω τροχούς. Τέλος, στη περίπτωση που το όχημα ακινητοποιείται και η μπαταρία βρίσκεται σε χαμηλό επίπεδο φόρτισης, ο κινητήρας κινητήρας ενεργοποιείται και τη «γεμίζει», μέσω της γεννήτριας (Σχήμα 38.ε) [30].





Σχήμα 38: Ροή ισχύος σε υβριδικό όχημα α) κατά την εκκίνηση και χαμηλή ταχύτητα, β) κατά την διάρκεια ομαλών συνθηκών οδήγησης κατά την ακινησία οχήματος, γ) κατά την επιτάχυνση, δ) κατά την επιβράδυνση, ε) κατά την επαναφόρτιση της μπαταρίας (ακινησία οχήματος) [30].

#### 4.2.5. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΥΒΡΙΔΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Σε αυτό το σημείο αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που παρουσιάζονται στην υβριδική τεχνολογία [30]:

➤ **Πλεονεκτήματα:**

- Τα υβριδικά συστήματα παρουσιάζουν την δυνατότητα να κινούν ένα όχημα είτε μόνο με βενζινοκινητήρα είτε μόνο με ηλεκτροκινητήρα είτε και με τα δύο ταυτόχρονα.
- Μείωση στην κατανάλωση καυσίμου. Παρουσιάζουν την δυνατότητα μείωσης κατανάλωσης ορυκτού καυσίμου σε ποσοστό από 20%-40% συγκρινόμενο με ένα συμβατικό όχημα.
- Απαλλαγή από δασμούς και τέλη κυκλοφορίας για τα πέντε πρώτα έτη κυκλοφορίας καθώς επίσης έχουν μπάνιουν ελεύθερα στο δακτύλιο.

- Η χρήση φρένων σε ένα συμβατικό όχημα έχει ως συνέπεια να μετατρέπεται η κινητική ενέργεια σε θερμότητα σε αντίθεση με το υβριδικό όχημα που μετατρέπει ένα ποσοστό από την ενέργεια αυτή και αντί να χαθεί στοπεριβάλλον, χρησιμοποιώντας την ηλεκτρική μηχανή ως γεννήτρια την εναποθέτει πίσω στις μπαταρίες.
- Μεγάλα οφέλη εξοικονόμηση καυσίμων και μείωση εκπομπών ρύπων (CO<sub>2</sub>).
- Στα υβριδικά με κυψέλες καυσίμου, η κυψέλη καυσίμου παράγει ηλεκτρική ενέργεια επιτυγχάνοντας μία χημική αντίδραση υδρογόνου / οξυγόνου χωρίς να κάψει καθόλου υδρογόνο, αποτελώντας «καθαρή» και ιδιαίτερα αποτελεσματική λύση. Τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα του υδρογόνου αναμιγνύονται με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας και σχηματίζουν νερό. Επίσης η κυψέλη καυσίμου δεν εκπέμπει διοξείδιο του άνθρακα ή άλλους ρύπους. Το μόνο υποπροϊόν είναι το νερό

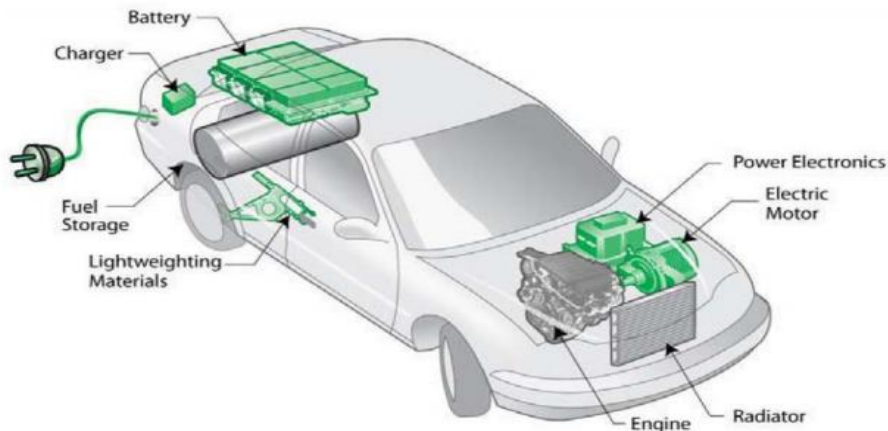
#### ➤ **Μειονεκτήματα**

- Μεγαλύτερο κόστος αγοράς υβριδικού οχήματος συγκρινόμενο με συμβατικά οχήματα.
- Αν και παρουσιάζουν καλύτερες επιδόσεις το αυξημένο βάρος λόγω των μπαταριών τους επηρεάζουν αρνητικά την οδηγική τους συμπεριφορά.
- Άγνωστο το κόστος αντικατάσταση μπαταριών (μετά από τα δέκα έτη) και βλαβών λόγω παλαιότητας.
- Μικρή χωρητικότητα αποθηκευτικού χώρου (πορτ-μπαγκάζ).
- Βασικό μειονέκτημα οι μπαταρίες που χρησιμοποιούν αφού δεν υπάρχουν εναλλακτικοί τρόποι φόρτισης δεν δίνουν την δυνατότητα γρήγορης φόρτισης ο ηλεκτροκινητήρας δεν μπορεί να λειτουργήσει για πολύ χρόνο με αποτέλεσμα σε μεγάλες αποστάσεις να χρησιμοποιείται και ο βενζινοκινητήρας. Την λύση του προβλήματος αναζητούν τεχνικοί και μηχανικοί με στόχο την βελτίωση του.
- Τα υβριδικά οχήματα μειονεκτούν πολύ στην κατηγορία 4x4. Αν και υπάρχουν κάποια μοντέλα δεν μπορούν καλύψουν τις απαιτήσεις με συνέπεια να παρουσιάζονται πολλά περιθώρια βελτίωσης.

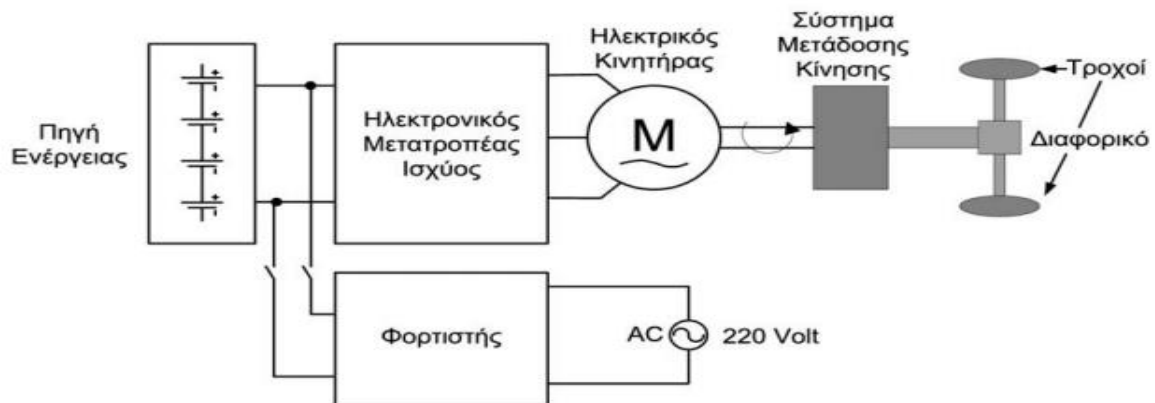
### **4.3. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ**

Τα ηλεκτρικά οχήματα (EV) θεωρούνται ευρέως ως λύση στα προβλήματα της αύξησης των εκπομπών άνθρακα και της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα. Με την χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων δίνεται η δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας. Όλα τα ηλεκτρικά οχήματα (AEV) λειτουργούν μόνο με ηλεκτρικό ρεύμα [38]. Συγκεκριμένα σύμφωνα με τους Σιγάλας και Μιγγίρης (2018), το Ηλεκτρικό Όχημα (Electric Vehicle ή EV ή HO) χρησιμοποιεί την ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται σε επαναφορτιζόμενες συστοιχίες συσσωρευτών (Σχήμα 39). Τα ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες αντί των μηχανών εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ). Αντιθέτως, τα οχήματα που χρησιμοποιούν και τα δύο (ηλεκτρικές μηχανές και ΜΕΚ) καλούνται υβριδικά οχήματα και συνήθως δεν θεωρούνται καθαρά HO. Τα οχήματα με τις μπαταρίες που μπορούν να φορτιστούν και να

χρησιμοποιηθούν χωρίς ΜΕΚ καλούνται «βυσματωτά» ηλεκτρικά οχήματα, και είναι καθαρά ηλεκτρικά οχήματα, ενώ δεν καταναλώνουν καύσιμα [39].



Σχήμα 39: Ηλεκτρικό Όχημα (Electric Vehicle ή EV) [39]



Σχήμα 40: Διάγραμμα των τμημάτων που αποτελούν ένα ηλεκτρικό όχημα [40]

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλεκτρικών οχημάτων και είναι οι ακόλουθοι [38]:

- Ηλεκτρικά οχήματα, τα οποία καλούνται και ηλεκτρικά οχήματα plugin, μπορούν να λάβουν την ισχύ είτε εξ ολοκλήρου είτε εν μέρει από τον ηλεκτρισμό που δίνεται από το ηλεκτρικό δίκτυο. Περιλαμβάνουν ηλεκτρικά οχήματα (AEV) και υβριδικό ηλεκτρικό όχημα.
- Ηλεκτρικά οχήματα (AEV) η άρτια λειτουργία τους βασίζεται από την τροφοδοσία που παρέχεται από ηλεκτρικούς κινητήρες (μπορεί να είναι ένας μπορεί και περισσότεροι). Το ηλεκτρικό ρεύμα που λαμβάνουν μπορεί να παρέχεται είτε όταν συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο είτε από τους φορτισμένους συσσωρευτές. Δεν γίνεται χρήση ορυκτών καυσίμων με συνέπεια να την εκμηδένιση των αέριων ρύπων

από το σύστημα εξαγωγής. Τα ηλεκτρικά οχήματα περιλαμβάνουν ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (BEV) και ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου (FCEV).

- Παράλληλα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (PHEVs), τα οποία καλούνται και plug-in υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα, χρησιμοποιούν μπαταρίες για την τροφοδοσία ενός ηλεκτρικού κινητήρα, συνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο για φόρτιση και χρησιμοποιούν πετρέλαιο με βάση ή εναλλακτικά καύσιμα για την τροφοδοσία του κινητήρα εσωτερικής καύσης. Ορισμένοι τύποι υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων (PHEV) ονομάζονται επίσης ηλεκτρικά οχήματα μεγάλης εμβέλειας (EREVs).

Τα περισσότερα έχουν ηλεκτρικό εύρος συγκεκριμένων χιλιομέτρων. Στην περίπτωση που η μπαταρία είναι αποφορτισμένη, δηλαδή έχει εξαντληθεί, μπορεί να απαιτηθούν από 30 min έως και 1 day για να επαναφορτιστεί. Αυτό εξαρτάται πλήρως από τον τύπο του φορτιστή της μπαταρίας. Σημειώνεται ότι ο λιγότερος χρόνος φόρτισης καλείται γρήγορη φόρτιση ενώ ο μεγαλύτερος φόρτιση επιπέδου ένα (1). Εάν αυτό το εύρος δεν είναι αρκετό, ένα ηλεκτρικό όχημα plug-in (PHEV) μπορεί να είναι μια καλύτερη επιλογή, διότι λειτουργούν με ηλεκτρικό ρεύμα για μικρότερες αποστάσεις και μετά μεταβείτε σε έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης που λειτουργεί με βενζίνη όταν η μπαταρία έχει εξαντληθεί. Η δυνατότητα που παρέχουν τα υβριδικά οχήματα να μπορούν οι οδηγοί να χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια όσο το δυνατόν συχνότερα ενώ παράλληλα να χρησιμοποιούν το συμβατικό κινητήρα (βενζίνη, πετρέλαιο) όποτε το θεωρήσουν αναγκαίο.

Η τροφοδοσία του οχήματος με ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο μειώνει το κόστος καυσίμου, μειώνει την κατανάλωση πετρελαίου ή βενζίνης και μειώνει τις εκπομπές σωλήνων εξαγωγής σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα. Ωστόσο, στην περίπτωση που οι αποστάσεις είναι μεγαλύτερες από τις δυνατότητες που παρέχουν τα ηλεκτρικά οχήματα, τότε τα οχήματα λειτουργούν ως υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα, μειώνοντας εν μέρει τις εκπομπές ρύπων και την χρήση των ορυκτών καυσίμων συγκρινόμενα με τα συμβατικά οχήματα. Σημαντικό ρόλο παίζει το μοντέλο αφού κινητήρας ΜΕΚ έχει την δυνατότητα να τροφοδοτεί το όχημα είτε κατά την μεγιστοποίηση της επιτάχυνση είτε κατά την χρήση του συστήματος θέρμανσης – ψύξης [38].

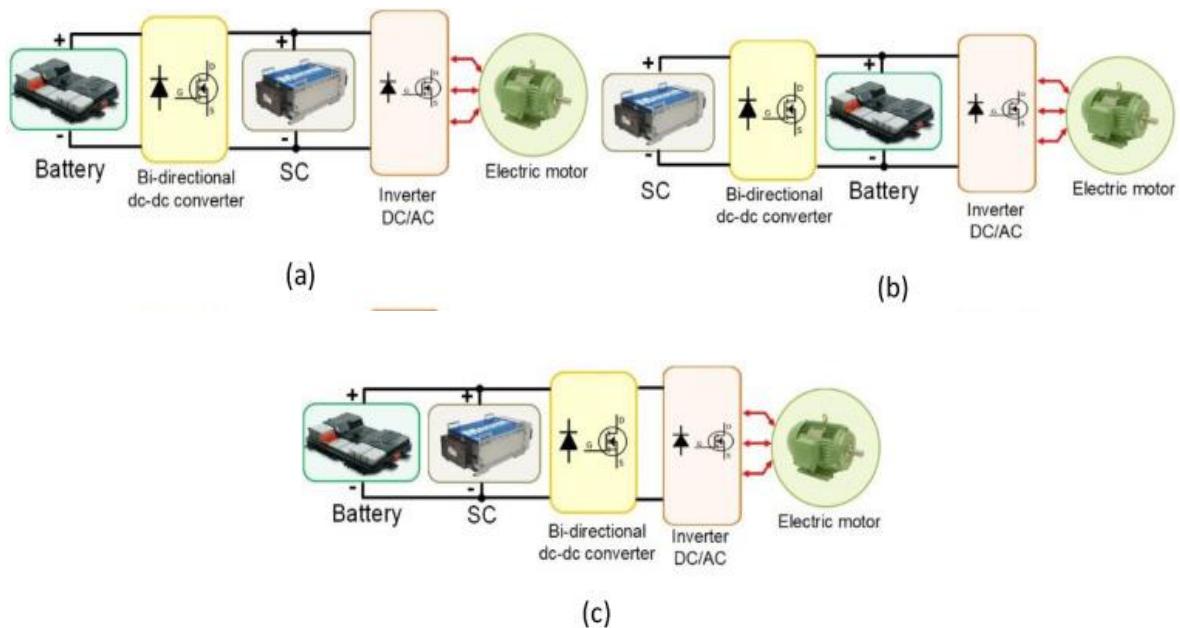
Στα ηλεκτρικά οχήματα, τα οποία λειτουργούν αποκλειστικά με ηλεκτρική ενέργεια, η διαμόρφωση τους πραγματοποιείται με γνώμονα τις μπαταρίες, οι οποίες είναι η βασική πηγή με υψηλό περιεχόμενο ενέργειας. Για τα προαναφερόμενα οι μπαταρίες μπορούν να συνδεθούν σε ένα σύστημα που θα αποτελείται από συσκευές όπως υπερσυμπιεστή (SC), υπερ-πυκνωτή (UC), ηλεκτρικό πυκνωτή διπλού στρώματος (EDLC)), μπαταρία υψηλής ισχύος, πυκνωτή λιθίου (LiC). Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να κατασκευαστεί ένα υβριδικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (HESS) [38].

Ωστόσο, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (HESS) παρέχουν την δυνατότητα αποθήκευσης επαρκούς ενέργειας, καλύπτοντας τις ανάγκες που μπορούν να παρουσιαστούν σε απαιτήσεις αύξησης ισχύος (απότομη επιτάχυνση). Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας πλεονεκτούν συγκρινόμενα με συστήματα που αποτελούνται μόνο από μπαταρίες αφού παρουσιάζουν υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας / ισχύος, βελτιωμένη διάρκεια ζωής, καλύτερη δυναμική απόκριση κατά την επιτάχυνση. Τα συστήματα που βασίζονται σε σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (HESS) μπορεί να διαφέρουν όταν εξετάζετε τον τύπο του

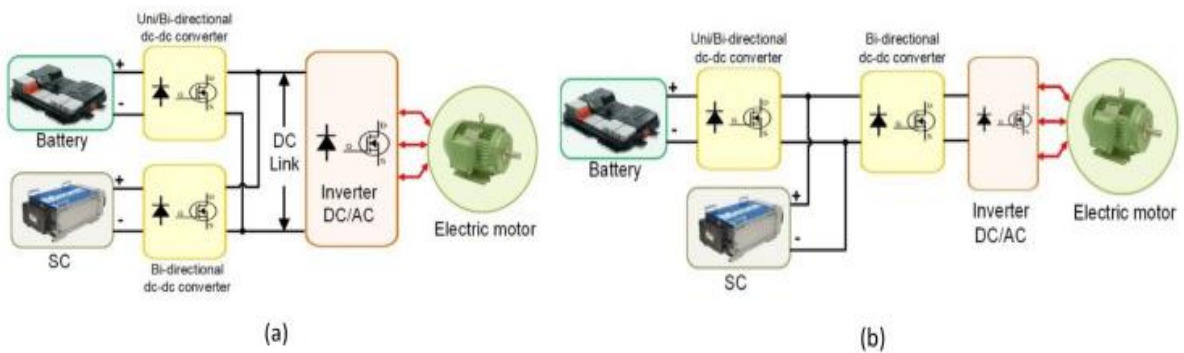


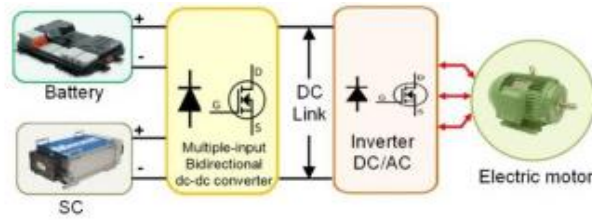
μετατροπέα και τις θέσεις τους μέσω ενός κινητήρα. Ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (HESS) μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο βασικούς τύπους: μια ημι-ενεργή διαμόρφωση (Σχήμα 41) και μια πλήρως ενεργή διαμόρφωση (Σχήμα 42).

Στην συνέχεια ακολουθούν και άλλες συνδεσμολογίες αποκλειστικά ηλεκτρικών οχημάτων. Συγκεκριμένα, η διαμόρφωση πολλαπλών εισόδων που φαίνεται στο μπορεί να πραγματοποιηθεί με διαφορετικές ρυθμίσεις κυκλωμάτων όπως μια μέση τοπολογία (Σχήμα 43, a), συζευγμένη μαγνητική τοπολογία (Σχήμα 43, b), τοπολογία πηγής Z (Σχήμα 43, c) και τοπολογία με επικάλυψη (Σχήμα 43,d).



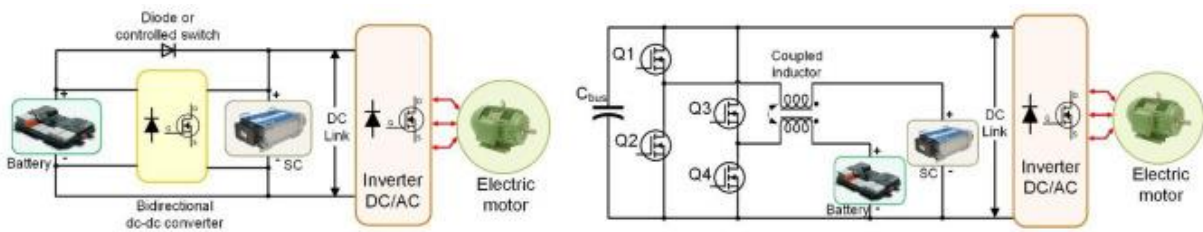
Σχήμα 41: Ημι-ενεργές διαμορφώσεις συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με βάση την μπαταρία: (α) μπαταρία- Supercapacitor, (β) Supercapacitor-μπαταρία και (γ) παράλληλες διαμορφώσεις [35].





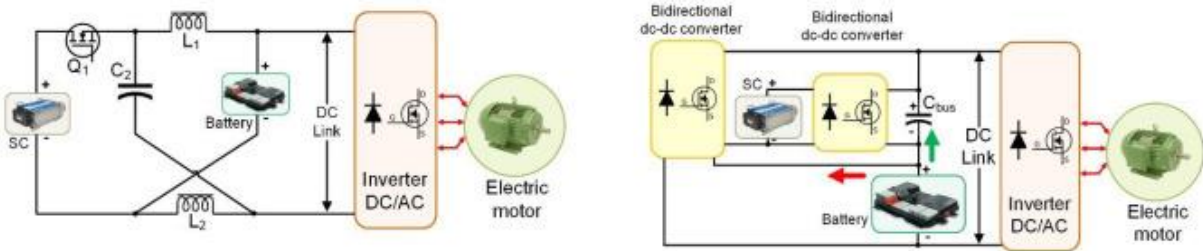
(c)

Σχήμα 42: . Πλήρως ενεργές διαμορφώσεις συστήματος αποθήκευσης ενέργειας που βασίζονται σε μπαταρίες: (a) μετατροπέας πολλαπλών θυρών, (b) διαδοχικά και (c) διαμορφώσεις μετατροπέα πολλαπλών εισόδων [35]



(a)

(b)



(c)

(d)

Σχήμα 43: Διαφορετικές ρυθμίσεις κύκλωμα για τη διαμόρφωση μετατροπέα πολλαπλών εισόδων για μπαταρία που βασίζεται: (a) μέση τοπολογία, (b) συζευγμένη μαγνητική τοπολογία, (c) Z-πηγή, και (d) τοπολογία με επικάλυψη [35]

### 4.3.1. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Σε αυτό το σημείο αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που παρουσιάζονται τα ηλεκτρικά οχήματα [39]:

➤ **Πλεονεκτήματα:**

- Μηδενική παραγωγή ρύπων



- Μικρό ποσοστό ρύπανσης σε μακροχρόνια πρόβλεψη, υπό την συνθήκη ότι η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιεί είναι από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ).
- Αθόρυβη λειτουργία σε σύγκριση με τα οχήματα με ΜΕΚ
- Σταθερή ροπή από ακινησία έως και μέγιστο αριθμό στροφών
- Δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλότερες στροφές από ΜΕΚ έως και 1400 RPM.
- Χαμηλό οικονομικό κόστος με την πάροδο του χρόνου αφού δεν επηρεάζονται από την αύξησης της τιμής του πετρελαίου και της βενζίνης.
- Μειωμένο κόστος συντήρησης λόγω του ότι δεν απαιτούν τακτικές αλλαγές λαδιών, δεν εκπέμπουν ρύπους, δεν έχουν σύστημα εξαγωγής καυσαερίων και διάταξη εξάτμισης, ούτε σιγαστήρα προ της εξάτμισης, ούτε καταλύτη ή φίλτρο καπνού, δεν απαιτούν αντικατάσταση ή έστω συντήρηση σε μηχανικά μέρη, όπως σύστημα ανάφλεξης, πιστόνια, βαλβίδες ή εκκεντροφόρους, διότι δεν υπάρχουν, ενώ οι μηχανές εσωτερικής καύσης έχουν πάνω από 100 κινούμενα μέρη και μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε να αυτο-φορτίζονται κατά τις επιβραδύνσεις του οχήματος (regenerative braking), βελτιώνοντας έτσι τον δείκτη κατανάλωσης.

➤ **Μειονεκτήματα:**

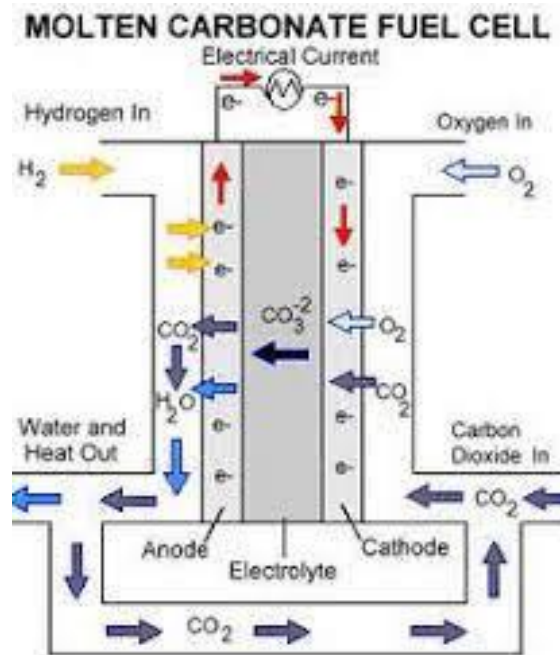
- Υψηλό κόστος αγοράς λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής.
- Περιορισμένη απόσταση μετακίνησης, απαιτούνται συχνοί σταθμοί επαναφόρτισης.
- Μεγάλο χρονικό διάστημα επαναφόρτισης, απαιτούν περίπου 6 ώρες για πλήρη φόρτιση. Ωστόσο, αρκετά σύγχρονα μοντέλα μπορούν να φορτιστούν κατά 80% σε χρόνο λιγότερο της 1 ώρας.
- Μικρός χρόνος ζωής συσσωρευτών, που αντιστοιχεί περίπου σε 3 έως 5 έτη. Όμως υπάρχουν εταιρίες που προσπαθούν να βελτιώσουν την διάρκεια ζωής.

#### 4.4. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Καθώς η υβριδική τεχνολογία κερδίζει έδαφος, η τεχνολογία των κυψελών καυσίμων (fuel cells) παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν σήμερα σημαντική διάταξη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του υδρογόνου. Οι εφαρμογές που έχουν πραγματοποιηθεί με κυψέλες καυσίμου είναι σε διαστημικές εφαρμογές, στη βιομηχανία ως βοηθητικές μονάδες παραγωγής ενέργειας σε ώρες αιχμής και στη αυτοκινητοβιομηχανία [33].

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από κυψέλες καυσίμου πραγματοποιείται μέσω της χημικής αντίδρασης υδρογόνου και οξυγόνου χωρίς την εκπομπή ρύπων. Στην ουσία οι κυψέλες καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές συσκευές που παρέχουν την δυνατότητα μετατροπής της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω μιας αντίδρασης [30]. Η δομή μιας κυψέλης καυσίμου (Σχήμα 44) αποτελείται από μια μεμβράνη ηλεκτρολύτη, μικρού πάχους, η οποία

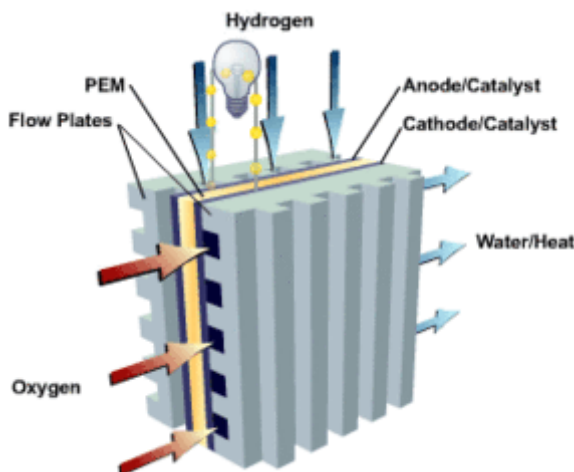
βρίσκεται ανάμεσα από πορώδες υλικό όπου από την μία πλευρά είναι η άνοδο και η άλλη η κάθοδο [36].



Σχήμα 44: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου [36].

Στο Σχήμα 44 διακρίνεται μια κυψέλη καυσίμου όπου απεικονίζονται τα αντιδρώντα και τα παράγωγα καθώς και την πορεία των ιόντων της κυψέλης.

Στην περίπτωση μια «βασικής» κυψέλης καυσίμου (Σχήμα 45) όπου το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι αέριας μορφής (π.χ. υδρογόνο), τροφοδοτείται διαρκώς προς την άνοδο (αρνητικό ηλεκτρόδιο) και ένα οξειδωτικό (π.χ. οξυγόνο), τροφοδοτείται προς την κάθοδο (θετικό ηλεκτρόδιο).

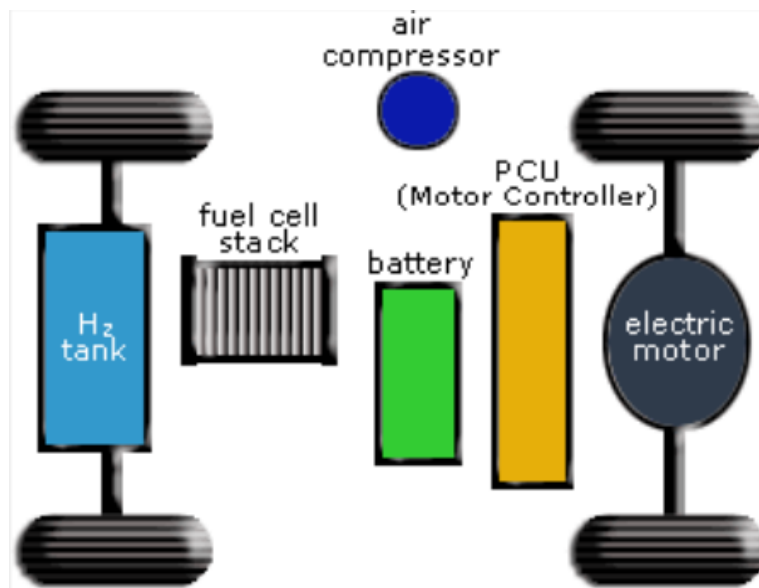


Σχήμα 45: Η δομή μιας κυψέλης καυσίμου α) μια κυψέλη καυσίμου β) συστοιχία κυψελών καυσίμου [36]

Μια κυψέλη καυσίμου παρουσιάζει χαρακτηριστικά και στοιχεία πανομοιότυπα με αυτά των συσσωρευτών, όμως επί τις ουσίας υπάρχουν σημαντικές διαφορές. Πραγματοποιώντας μια σύγκριση των συσσωρευτών με τις κυψέλες καυσίμου διακρίνεται ότι οι συσσωρευτές είναι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Η ποσότητα διαθέσιμης ενέργειας αντιστοιχεί στην ποσότητα χημικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στο συσσωρευτή. Ωστόσο, στην περίπτωση που καταναλωθεί η χημική ενέργεια τότε ο συσσωρευτής σταματά να παράγει ηλεκτρική ενέργεια και είναι σε κατάσταση αποφόρτισης. Η επαναφόρτιση του συσσωρευτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με την τροφοδοσία ενέργειας από εξωτερική πηγή. Στην περίπτωση της κυψέλης καυσίμου, είναι μια συσκευή που μπορεί να μετατρέπει την ενέργεια και να την παράγει σε ηλεκτρική καθ' όλη την διάρκεια, δηλαδή όσο το καύσιμο και το οξειδωτικό παρέχονται στα ηλεκτρόδια. Ωστόσο, αυτό δεν μπορεί να γίνει επ' άπειρο αφού με το πέρασμα του χρόνου δημιουργείται χημική διάβρωση με συνέπεια να υπάρχει δυσλειτουργία στη λειτουργία των κυψελών καυσίμου [36].

Αυτό που θα πρέπει να σημειωθεί είναι ότι το υδρογόνο ως αέριο είναι ένα καύσιμο για πλήθος εφαρμογών, εξαιτίας της υψηλής του αντιδραστικότητας, της δυνατότητας του να παράγεται από υδρογονάνθρακες και της υψηλής του ενεργειακής πυκνότητας όταν αποθηκεύεται κρυογενικά. Από την άλλη πλευρά όσο αφορά το οξυγόνο είναι το πιο κοινό οξειδωτικό αφού είναι ευρέως διαθέσιμο στην ατμόσφαιρα και εύκολα αποθηκεύεται [30].

Στην περίπτωση των οχημάτων που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου και κατατάσσονται στα υβριδικά, το υδρογόνο αποθηκεύεται σε δεξαμενές καυσίμου, οι οποίες βρίσκονται σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο του οχήματος, και η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από την κυψέλη καυσίμου η οποία με την σειρά της τροφοδοτεί τον συσσωρευτή ο οποίος ενεργοποιεί τον ηλεκτροκινητήρα που είναι υπεύθυνος για την κίνηση των τροχών (Σχήμα 46) [35].



Σχήμα 46: Βασικά στοιχεία ενός υδρογονικού FCV (υβριδικού οχήματος κυψελών καυσίμου) [30]

Για την διαρκεί κίνηση του οχήματος απαιτείται να υπάρχει επαρκεί ποσότητα στη δεξαμενή με στόχο να δίνεται η δυνατότητα να μπορεί να πραγματοποιηθεί η αντίδραση οξυγόνου και υδρογόνου μέσω της κυψέλης καυσίμου. Η διαρκεί τροφοδοσία από την δεξαμενή φορτίζει την μπαταρία με συνέπεια να μπορεί να κινείται το όχημα [30].

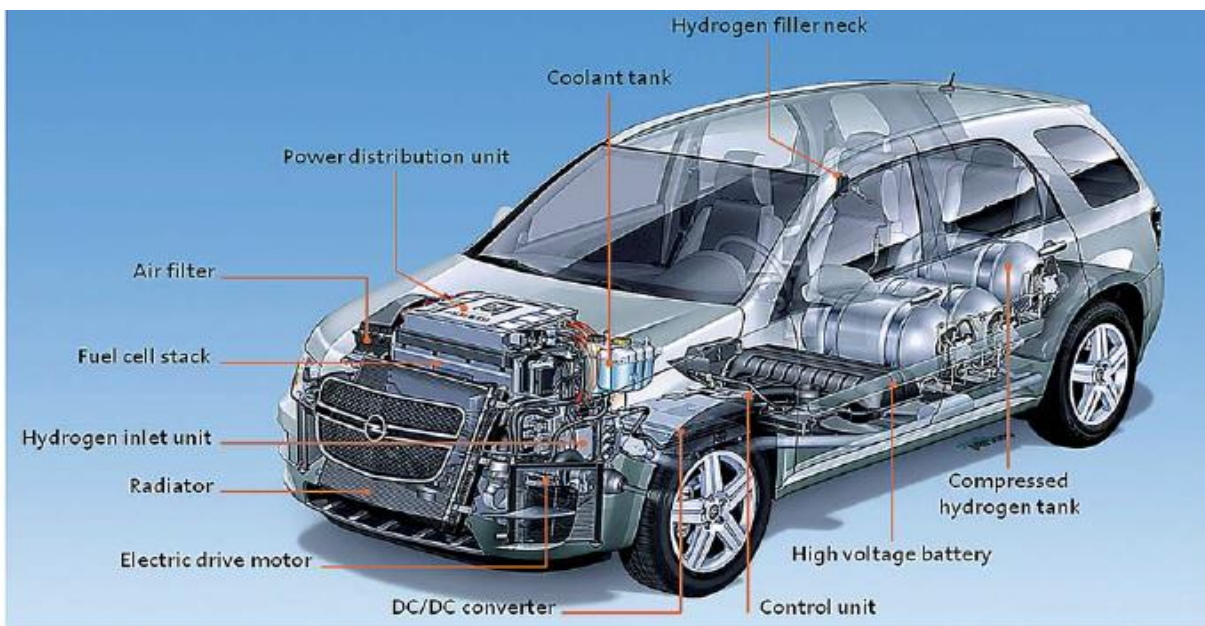
Τα υβριδικά οχήματα με κυψέλες καυσίμου (FCVs) παρουσιάζουν πολύ καλύτερη αποδοτικότητα από τα συμβατικά οχήματα. Αξιοσημείωτο είναι ότι παρέχουν την δυνατότητα να συνδυαστούν και με άλλε τεχνολογίες με σκοπό την αύξηση της απόδοσης. Τεχνολογίες – συστήματα που μπορούν να συνδυαστούν με συστήματα ανάκτησης ισχύος κατά το φρενάρισμα που παρέχουν την δυνατότητα «παγίδευσης» της ενέργειας που χάνεται κατά το φρενάρισμα και την αποθηκεύουν σε κατάλληλους συσσωρευτές [30].

Τα οχήματα κυψελών καυσίμου (FCVs) τροφοδοτούνται με αέριο υδρογόνου είτε που αποθηκεύεται σε διεξαγμένες είτε παράγεται μέσα από ένα δευτερεύον καύσιμο που εμπεριέχει οξυγόνο (μεθανόλη, αιθανόλη, φυσικό αέριο κ.ά.). Τα δευτερεύοντα αυτά καύσιμα μετατρέπονται σε αέριο υδρογόνου με την βοήθεια του αναμορφωτή καυσίμου, εξάρτημα που βρίσκεται επί του οχήματος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα οχήματα κυψελών καυσίμου (FCVs) που χρησιμοποιούν απευθείας υδρογόνο δεν εκπέμπουν ρύπους παρά μόνο κάποια ποσότητα υδρατμών και θερμότητα σε αντίθεση με τα οχήματα που χρησιμοποιούν κάποια από τα δευτερεύοντα καύσιμα που παράγουν μικρή ποσότητα αέριων ρύπων [36].

Ένα από τα πιο σπουδαία παραδείγματα αυτής της τεχνολογίας είναι το Toyota Fine-X, όπου αποτελείτο από συμβατική κυψέλη καυσίμου κάτω από το δάπεδο του οχήματος και τέσσερις ηλεκτροκινητήρες στους τροχούς. Άλλο ένα αξιόλογο παράδειγμα είναι το όχημα Honda FCX Concept όπου αποτελείται από μια πιο καινοτόμα τεχνολογία, όπου η κυψέλη μπορεί να λειτουργεί σε υπομηδενικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος (και συγκεκριμένα έως τους  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι παρά το γεγονός ότι οι εξωτερικές της διαστάσεις είναι αρκετά μικρές, είναι ταυτόχρονα και η ισχυρότερη αφού αποδίδει 100 kWatt [30]. Στην συνέχεια ακολουθεί η εξέλιξη των οχημάτων καυσίμου (HydroGen4) (Εικόνα 6) καθώς και μια περιγραφή ενός οχήματος με κυψέλες καυσίμου (Εικόνα 7).

	HydroGen4	HydroGen4 Technology Demonstration	Product intent 2015-2020 timeframe
Net power	93 kW	93 kW	87 kW
Efficiency	55%	60%	60%
Durability	1,500 h	3,500 h	5,500 h
Max. excursion temp.	86°C	86°C	95°C
Cold operation	> -25°C	> -25°C	> -40°C
Stack subsystem Plates	440 cells x 360 cm <sup>2</sup> active area Composite	440 cells x 360 cm <sup>2</sup> active area Composite	320 cells x 360 cm <sup>2</sup> active area Stamped stainless steel
Max. current density	1.1 A/cm <sup>2</sup>	1.1 A/cm <sup>2</sup>	1.5 A/cm <sup>2</sup>
Mass	240 kg	240 kg	< 132 kg
System complexity	146 level-1 components	146 level-1 components	50% reduction in part count

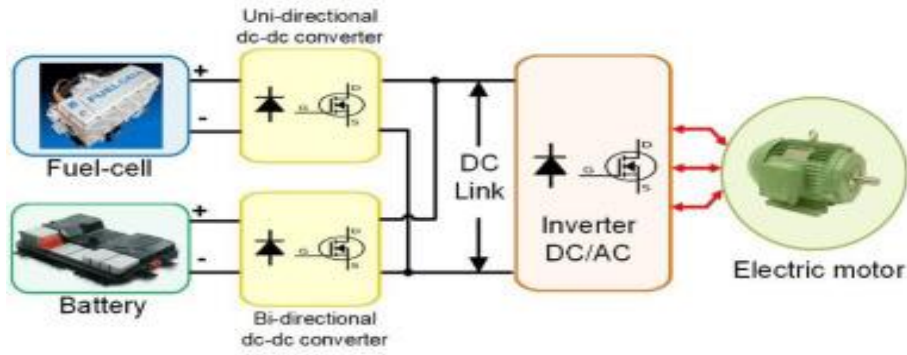
Εικόνα 6: Εξέλιξη και βασικές απαιτήσεις σχεδιασμού συστήματος ισχύος κυψελών καυσίμου από το HydroGen4 [37]



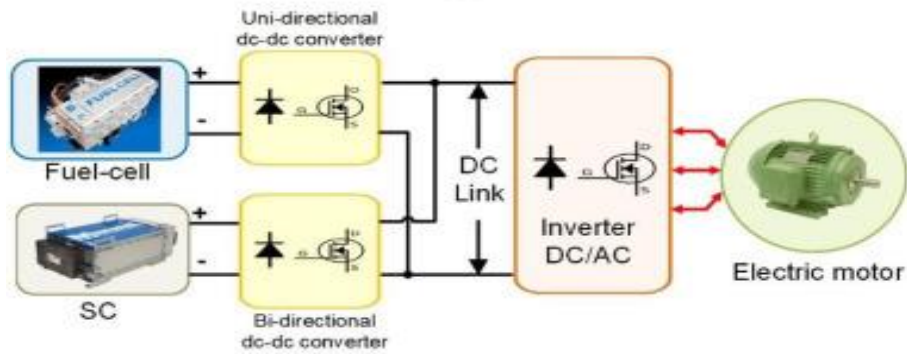
Εικόνα 7: Απεικόνιση συστήματος οχήματος κυψελών καυσίμου [37]

### Συνδεσμολογία οχημάτων με χρήση κυψελών καυσίμου

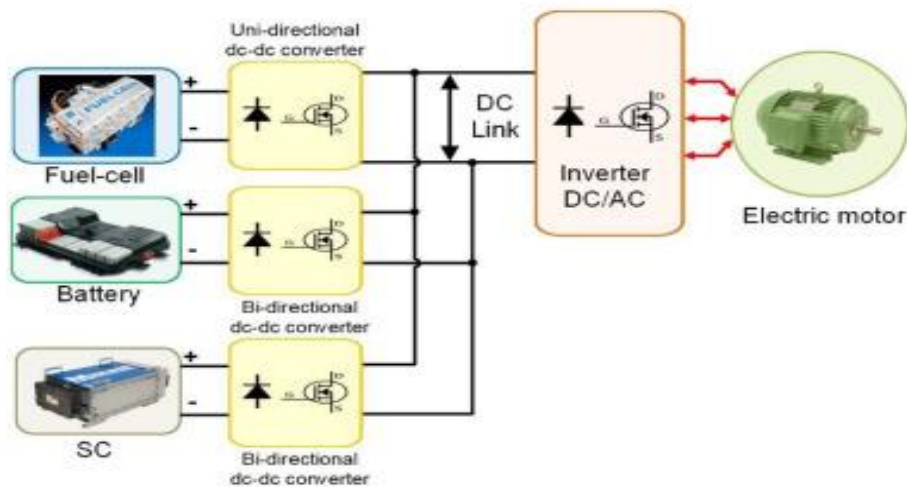
Τα οχήματα που βασίζονται πλήρως στις κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν το υδρογόνο και κάποια δευτερεύοντα καύσιμα ως κύρια πηγή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Λόγω ότι τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν αργή δυναμική χρησιμοποιούν μπαταρίες είτε πυκνωτές (Supercapacitor) είτε συνδυασμός αυτών (Σχήμα 47) με στόχο την βελτίωση της δυναμικότητάς τους [35].



(a)



(b)



(c)

Σχήμα 47: Υβριδική τοπολογία κυψελών καυσίμου (α) μπαταρία β) Supercapacitor και γ) συνδυασμός μπαταρίας- Supercapacitor[35]





#### 4.4.1. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Σε αυτό το σημείο αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που παρουσιάζονται στην τεχνολογία κυψελών καυσίμου [30]:

##### ➤ *Πλεονεκτήματα:*

- Ελάχιστες εκπομπές ρύπων παρουσιάζοντας φιλικό προφίλ προς το περιβάλλον.
- Οι κυψέλες δεν αποτελούνται από κινητά μέρη με συνέπεια να έχουν αθόρυβη λειτουργία.
- Χαμηλό κόστος συντήρησης.
- Μεγάλη απόδοση στην μετατροπή ηλεκτρισμού της τάξης του 40-65%.
- Εξοικονόμηση ενέργειας.
- Δυνατότητα φύλαξης του υδρογόνου είτε σε αέρια είτε σε υγρή μορφή και δυνατότητα χρήσης τους σε πλήθος εφαρμογών που γίνεται χρήση καυσίμου.
- Χαμηλό κόστος μετακινήσεων του υδρογόνου σε άλλες ηπείρους ως συμπιεσμένο αέριο με την βοήθεια σωληνώσεων. Το υγρό υδρογόνο είναι η ασφαλέστερη και πιο οικονομική επιλογή για την κίνηση της ενέργειας από τους ωκεανούς.
- Το υδρογόνο κατατάσσεται στην κατηγορία των πιο ασφαλών καυσίμων. Το βασικό του πλεονέκτημα είναι ότι το αέριο αυτό είναι δεκατέσσερις (14) φορές πιο ελαφρύ από τον αέρα με συνέπεια να διαχέεται στην ατμόσφαιρα με μεγάλη ταχύτητα στην περίπτωση ατυχήματος.
- Δυνατότητα χρήσης σε εφαρμογές μεγέθους από Watt μέχρι MegaWatt.

##### ➤ *Μειονεκτήματα*

- Το υδρογόνο χαρακτηρίζεται «πράσινος κίνδυνος», θεωρείται ότι τις επόμενες δεκαετίες ίσως δημιουργηθεί πρόβλημα στο στρώμα του όζοντος, διότι σύμφωνα με μελέτες το υδρογόνο διαρρέει το περιβάλλον ανεβαίνει πολύ γρήγορα στη στρατόσφαιρα - το υδρογόνο είναι το πιο ελαφρύ στοιχείο - όπου θα αντιδρά με το οξυγόνο για το σχηματισμό νερού.
- Άγνωστοι παράμετροι που μπορεί να υπάρξουν από τη διαρροή από τις μονάδες παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής του καυσίμου θα αντιστοιχεί στο 20% της ολικής ποσότητας υδρογόνου
- Υψηλό κόστος η χρήση των κυψελών καυσίμου.

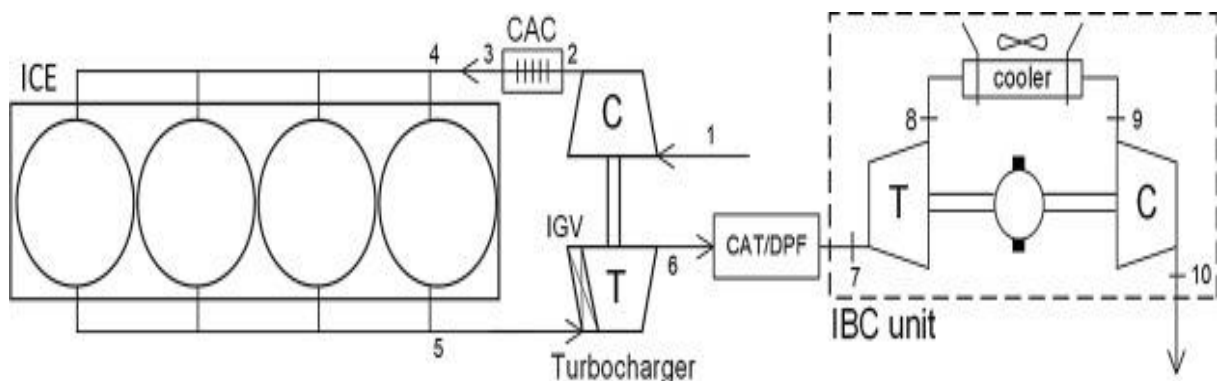
#### 4.5. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Η εξοικονόμηση ενέργειας είναι ένα από τα βασικά θέματα διερεύνησης της βιομηχανίας με σκοπό την μείωση κατανάλωσης καυσίμου αλλά και εκπεμπόμενων ρύπων. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην βιομηχανία δεν προτείνονται οι μηχανές εσωτερικής καύσης αλλά εξωτερικής.

##### 4.5.1. ΚΥΚΛΟΣ ΑΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΟΥ BRAYTON ΓΙΑ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΣΕ ΜΕΚ

Με στόχο την εξοικονόμησης ενέργειας δίνεται μέσα από την ευκαιρία ανάκτησης καυσαερίων από μια μονάδα ισχύος με αποκαλούμενο ανεστραμμένο κύκλο Brayton (IBC). Το αέριο χρησιμοποιείται ως υγρό λειτουργίας, το οποίο διαστέλλεται μέσα σε μια τουρμπίνα όταν πέφτει κάτω από την ατμοσφαιρική πίεση. Αφού κρυώσει από εξωτερική πηγή, συμπιέζεται ξανά στην ατμοσφαιρική τιμή. Πλήθος μελετών [88] προσπάθησαν να αξιολογήσουν την δυνατότητα εφαρμογής ισχύος του ανεστραμμένου κύκλου Brayton σε υπερτοφοδοτούμενο κινητήρα πετρελαίου και κατέληξαν ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν το εύρος ανάκτησης (απόδοση στροβίλου και συμπίεστή) ήταν ο λόγος πίεσης όπου και βελτιστοποιήθηκε.

Μια συμβατική διάταξη, που εκτελεί διαδικασία βαρέου τύπου και αποτελείται από πυθμένα δείχνει ανάκτηση περίπου 1,5% της μηχανικής ισχύος του κινητήρα. Μια βελτιωμένη ενσωμάτωση, στην οποία ο στροβίλος του ανεστραμμένου Brayton είναι τοποθετημένος πριν από τον υπερσυμπιεστή, καθιστά δυνατή την εν μέρει ανάκτηση των απωλειών ενέργειας που σχετίζονται με τη συσκευή ελέγχου του υπερσυμπιεστή, η οποία οδηγεί σε μέση ανακτήσιμη ισχύ περίπου 2% της ισχύος πέδησης του κινητήρα. Τα προβλήματα που μπορούν να δημιουργηθούν με την συμπύκνωση του νερού στα καυσαέρια διερευνούνται με στόχο την αντιμετώπισή τους. Στο Σχήμα 48 διακρίνεται η δοκιμαστική διάταξη όπου εισάγεται επίσης η βασική προτεινόμενη μονάδα του ανεστραμμένου Brayton. Η γνώση της πίεσης και της θερμοκρασίας κατά μήκος του στροβίλου (σημεία 5-6) και του συμπιεστή (σημεία 1-2) του υπερσυμπιεστή συναινέθηκαν για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των δύο ακτινικών μηχανών, για κάθε εξεταζόμενο σημείο λειτουργίας του κινητήρα. [88]

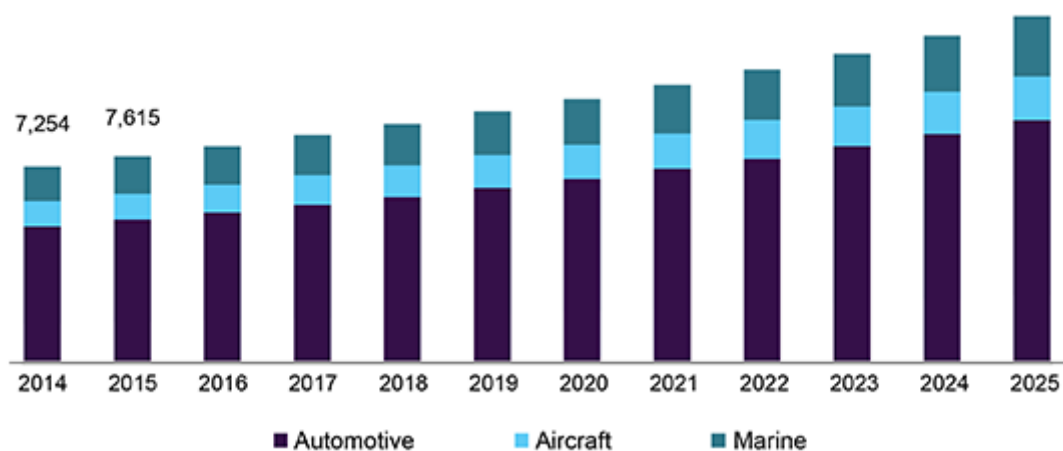


Σχήμα 48: Βασική διάταξη ΜΕΚ με ανεστραμμένο Brayton [88]

#### 4.6. ΕΞΕΛΙΞΗ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΜΕΚ

Η παγκόσμια ζήτηση για την αγορά κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICE) αυξήθηκε στις 157.105 χιλιάδες μονάδες το 2017 και αναμένεται να παρουσιάσει αύξηση 4,9% από το 2018 έως το 2025. Η αγορά, τα τελευταία χρόνια, αντιμετώπισε προκλήσεις λόγω της μεγάλης εξάρτησης από ήδη περιορισμένα αποθέματα ορυκτών καυσίμων και απαίτηση για βελτιώσεις στα επίπεδα εκπομπών. Ωστόσο, οι νέες τεχνολογίες λαμβάνοντας υπόψη τα υβριδικά συστήματα και τους κινητήρες χαμηλών θερμοκρασιών οδηγούν όχι μόνο στην εξέλιξη αλλά και την ελκυστικότητα αυτών των συστημάτων. Θεωρείται ότι τα επόμενα χρόνια η ζήτηση, η βελτίωση και η χρήση των προηγμένων τεχνολογιών θα είναι πέρα από κάθε προσδοκία και πρόβλεψη [89].

Η τεχνολογία των ηλεκτρικών οχημάτων και οι κινητήρες ΜΕΚ συγκεντρώνονται και δημιουργούν υβριδικούς ηλεκτρικούς κινητήρες με βασικό στόχο την μείωση της κατανάλωσης των ορυκτών καυσίμων. Οι προαναφερόμενοι κινητήρες συνδυάζονται ακόμα και με συστήματα plug-in υβριδικά ηλεκτρικά συστήματα με συνέπεια την βελτίωση και την αύξηση των τύπων των υβριδικών οχημάτων. Όλα αυτά παρέχουν νέες δυνατότητες για την ανάπτυξη της βιομηχανίας τα επόμενα χρόνια.



Σχήμα 49: Χρησιμοποίησης Μηχανών Εσωτερικής Καύσης κατά την χρονική διάρκεια 2014 έως 2025 [89]

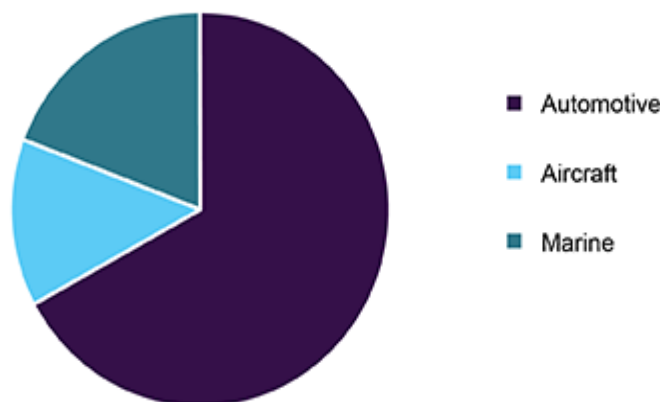
Αυτό που θα πρέπει να τονισθεί είναι ότι παρά την αυστηρή νομοθεσία που ολοένα και προσαρμόζεται στα νέα δεδομένα καθώς και η ανάγκη για οικονομία των ορυκτών καυσίμων με αντίκτυπο την μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ο κλάδος της βιομηχανίας προσπαθεί να αναπτύξει κινητήρες υψηλών ταχυτήτων και ισχύος προσαρμοσμένος στις προαναφερόμενες απαιτήσεις. Σε πλήθος χωρών όπως ΗΠΑ, Νορβηγία, Γαλλία, Ινδία και Κάτω Χώρες σχεδιάζεται να απαγορευτεί η πώληση των ΜΕΚ στα επόμενα δέκα έτη. Επιπλέον, η Γερμανία και η Κίνα προετοιμάζουν παρόμοια

απαγόρευση χωρίς όμως να έχουν προκαθορίσει τον χρονικό περιορισμό και να έχουν συντάξει το νομοθετικό πλαίσιο που θα στηρίζουν αυτή την ενέργεια.

Στην περίπτωση καταφέρουν οι επιστήμονες να βελτιώσουν τα ηλεκτρικά οχήματα και να επιτύχουν τις προσδοκίες που έχουν τεθεί από τις καταξιωμένες κατασκευαστικές εταιρίες οχημάτων, τότε τα χρονικά όρια και η απαγόρευση πώλησης των ΜΕΚ μπορεί να πραγματοποιηθεί σε συντομότερο χρονικό διάστημα από αυτό που μέχρι τώρα έχει συζητηθεί. Ωστόσο, από τώρα, φαίνεται πολύ απίθανο οι κινητήρες να βγουν εκτός λειτουργίας σύντομα. Η υιοθέτηση των υβριδικών και ηλεκτρικών συστημάτων θα απαιτήσει πολύ χρόνο για την υιοθέτηση μεγάλης κλίμακας, κυρίως λόγω της έλλειψης εξελιγμένων υποδομών φόρτισης σε πολλές χώρες και της υψηλής τιμής αυτών των οχημάτων.

Σύμφωνα με τα μέχρι τώρα δεδομένα η χρήση των ΜΕΚ έχει διαχωριστεί σε τρεις βασικές κατηγορίες που αφορά τα οχήματα στεριάς, οχήματα θάλασσας και οχήματα αέρα. Ωστόσο, ο τομέας της αυτοκινητοβιομηχανίας κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό (65%) του συνολικού όγκου των ΜΕΚ έως και το 2017. Αυτή η αύξηση αποδίδεται στην αύξηση του διαθέσιμου εισοδήματος των καταναλωτών, με αποτέλεσμα την αύξηση της υιοθέτησης οχημάτων παγκοσμίως. Οι νέες τεχνολογίες και η εξέλιξη τους στοχεύουν στην βελτίωση των κινητήρων μειώνοντας την χρήση ορυκτών καυσίμων, μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων, βελτίωση της αποδοτικότητας με συνέπεια την ενίσχυση της ζήτησης αυτών των προϊόντων τα επόμενα χρόνια.

Ο τομέας αεροσκαφών αναμένεται να επεκταθεί με μέτριο ρυθμό έως το 2025. Το τμήμα καθοδηγείται κυρίως από ευνοϊκή δυναμική της αγοράς που επηρεάζει την εμπορική αεροπορική βιομηχανία. Επιπροσθέτως, η εξέλιξη της τεχνολογίας που δίνει την δυνατότητα χρήση πλήθος καυσίμων οδηγίες στην μείωση των περιορισμών που δημιουργούνται και στην προώθηση των νέων τεχνολογιών. Ωστόσο, η Διεθνής Ένωση Αερομεταφορών θεωρεί ότι θα μπορεί να χρησιμοποιήσει με ασφάλεια νέες τεχνολογίες και εναλλακτικά καύσιμα μετά το 2030 [89].



Σχήμα 50: Τομείς Τελική Χρήση ΜΕΚ [89]

## 5. ΕΝΝΑΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

### 5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι κινητήρες ΜΕΚ, όπως έχει προαναφερθεί, είναι θερμικές μηχανές που μετατρέπουν την θερμότητα που παράγεται από την καύση του καυσίμου σε μηχανικό έργο. Τα βασικά θέματα είναι ότι οι κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση (compression-ignition, CI) και η κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα (spark-ignition, SI) χρησιμοποιούνται ευρέως στα οχήματα είτε επιβατικά είτε εμπορικά. Οι συγκεκριμένοι κινητήρες δεν χρησιμοποιούνται πλέον στην βιομηχανία αφού οι κινητήρες εξωτερικής καύσης θεωρούνται καταλληλότεροι. Οι κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση (compression-ignition, CI) και η κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα (spark-ignition, SI) έχουν υιοθετηθεί ως βασική πηγή ισχύος στα οχήματα καθώς και στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε πλήθος βιομηχανικών εφαρμογών, λόγω της υψηλής πυκνότητας ισχύος και της υψηλής απόδοσης.

Η καύση είναι μια από τις βασικές διαδικασίες μετατροπής ενέργειας όπου πραγματοποιείται η μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε θερμότητα. Αυτό δικαιολογεί και την αυξανόμενη χρήση των ορυκτών καυσίμων για την υλοποίηση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Ωστόσο, η αύξηση του πληθυσμού καθώς επίσης και των καθημερινών ενεργειακών αναγκών οδήγησε στην ραγδαία αύξηση ζήτησης των ορυκτών καυσίμων.



Εικόνα 8: Για την προστασία του πλανήτη είναι επιτακτική ανάγκη η χρήση εναλλακτικών καυσίμων



Με την πάροδο των χρόνων όμως και με την αλόγιστη κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων δημιουργήθηκε η ανάγκη για χρήση εναλλακτικών καυσίμων και καυσίμων από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η εξέλιξη της τεχνολογίας δίνει το προβάδισμα στην δημιουργία νέων τεχνολογιών με χρήση καυσίμων φιλικών προς το περιβάλλον και αναμένεται να παίξουν σημαντικό ρόλο στα επόμενα χρόνια στον τομέα της ενέργειας. Όμως για κάποιες δεκαετίες ακόμα τα ορυκτά καύσιμα θα έχουν πρωταρχικό ρόλο στον τομέα αυτό.

Τα δύο κύρια καύσιμα που είχαν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί ευρέως μαζί με την ανάπτυξη των ΜΕΚ και των αυτοκινητοβιομηχανιών τον περασμένο αιώνα είναι η βενζίνη και το πετρέλαιο. Στην περίπτωση που το καύσιμο είναι βενζίνη τότε η διάδοση της φλόγας πραγματοποιείται από έναν σπινθήρα που ανάβει το μείγμα αέρα – καυσίμου, η ανάφλεξη αυτού του τύπου γίνεται σε κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα. Στην περίπτωση που το καύσιμο είναι πετρέλαιο, η ανάφλεξη γίνεται αυτόματα και το καύσιμο εκτίθεται σε αέριο υψηλών θερμοκρασιών, η ανάφλεξη αυτού του τύπου πραγματοποιείται σε κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι χρήση των δύο βασικών ορυκτών καυσίμων είναι καθιερωμένη στην κίνηση και τη βιομηχανία, η αναζήτηση εναλλακτικών καυσίμων έχει αρχίσει να αναδύεται εδώ και τρεις δεκαετίες [41].

## 5.2. ΟΡΙΖΟΝΤΑΣ ΤΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

Σύμφωνα με τον Νόμο υπ' αριθμό 4439/2016, ΦΕΚ 222/Α/30-11-2016, Ενσωμάτωση στην ελληνική νομοθεσία της Οδηγίας 2014/94/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 22<sup>ας</sup> Οκτωβρίου 2014 για την ανάπτυξη υποδομών εναλλακτικών καυσίμων, απλοποίηση διαδικασίας αδειοδότησης και άλλες διατάξεις πρατηρίων παροχής καυσίμων και ενέργειας και λοιπές διατάξεις, ορίζονται ως εναλλακτικά καύσιμα τα καύσιμα ή οι πηγές ενέργειας που χρησιμεύουν, έστω και εν μέρει, ως υποκατάστατο για το ορυκτό πετρέλαιο στον ενεργειακό εφοδιασμό στις μεταφορές και που έχουν τη δυνατότητα να συμβάλουν στην απαλλαγή των μεταφορών από τις εκπομπές άνθρακα ενισχύοντας τις περιβαλλοντικές επιδόσεις του εν λόγω τομέα. Σε αυτά περιλαμβάνονται, μεταξύ άλλων:

- η ηλεκτρική ενέργεια,
- το υδρογόνο,
- τα βιοκαύσιμα, όπως ορίζονται στο άρθρο 2 σημείο θ' της Οδηγίας 2009/28/ΕΚ, που ενσωματώθηκε στο εθνικό δίκαιο με τη παρ. 1 του άρθρου 15 του Ν. 4062/2012(Α' 70), που αντικατέστησε την παρ. 16 του άρθρου 3 του Ν. 3054/2002 (Α' 230) και εξειδικεύονται στην παρ. 8 του άρθρου 2 του Ν. 3468/2006 (Α' 129),
- τα συνθετικά και παραφινικά καύσιμα,
- το φυσικό αέριο, συμπεριλαμβανομένου του βιομεθανίου, σε αέρια μορφή (συμπιεσμένο φυσικό αέριο - CNG) και σε υγροποιημένη μορφή (υγροποιημένο φυσικό αέριο - LNG) και



- το υγροποιημένο πετρελαϊκό αέριο (υγραέριο - LPG).

### 5.3. ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Η σπουδαιότητα την χρήση των εναλλακτικών καυσίμων προσδιορίζεται από τα ακόλουθα [42]:

- Ενεργειακή βιωσιμότητα με την χρήση εναλλακτικών καυσίμων και περιορισμός της χρήσης των ορυκτών καυσίμων.
- Βελτίωση της αποδοτικότητας των κινητήρων με ταυτόχρονη μείωση των εκπεμπόμενων αέριων ρύπων με την βοήθεια των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των εναλλακτικών καυσίμων συγκρινόμενα με τα συμβατικά καύσιμα.
- Ανακούφιση της μη ισορροπημένης χρήσης συμβατικών ορυκτών καυσίμων με βάση το πετρέλαιο.

Ο ενεργειακός εφοδιασμός απαιτεί να υπάρχει η κατάλληλη σταθερότητα από τους ενεργειακούς πόρους που χρησιμοποιούνται συνδυάζοντας κατάλληλα την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και εναλλακτικών καυσίμων. Απαιτείται ο περιορισμός των ορυκτών καυσίμων αφού η διαθεσιμότητα του ολοένα και μειώνεται. Ωστόσο, παρά την πρόβλεψη ότι τα συμβατικά υγρά καύσιμα με βάση το πετρέλαιο θα εξακολουθούν να κυριαρχούν στα καύσιμα μεταφοράς για τα επόμενα 50 χρόνια [43], η επιθυμία για ενεργειακή ασφάλεια (ενεργειακή βιωσιμότητα) και η ανησυχία για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) οδήγησαν επίσης στην αυξημένη χρήση ανανεώσιμων βιοκαυσίμων. Η χρήση ορυκτών καυσίμων συμβάλλει σημαντικά στις εκπομπές CO<sub>2</sub>, όπου οι ανθρώπινες δραστηριότητες παράγουν περίπου 25 δισεκατομμύρια τόνους CO<sub>2</sub> ετησίως [44].

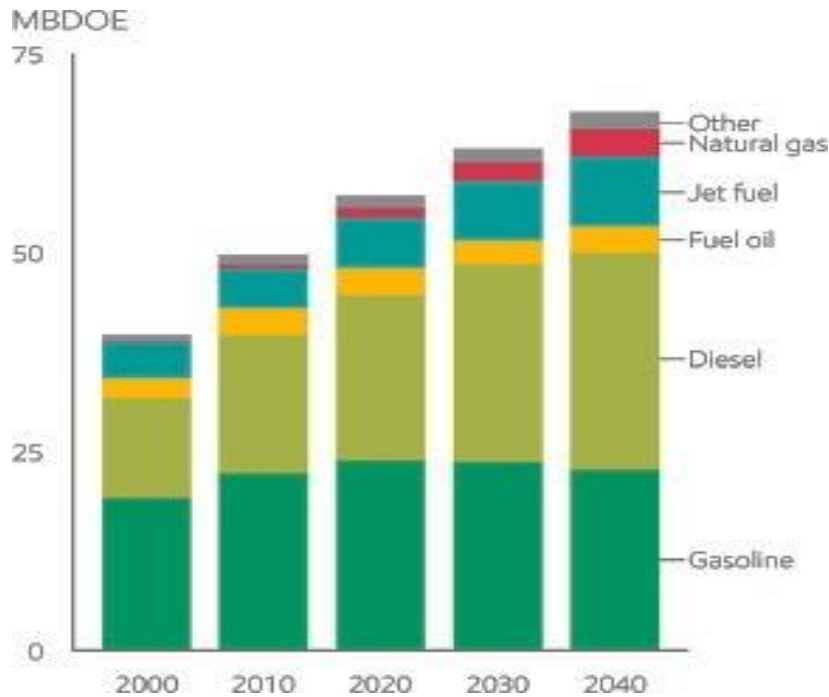
Η χρήση βιοκαυσίμων μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία ενός κύκλου ζωής του CO<sub>2</sub>, ο οποίος μπορεί να συμβάλει στη συνολική μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου παράγονται από την παραγωγή, τη μεταφορά και την αποθήκευσή τους, καθώς και τις εκπομπές που σχετίζονται με τη χρήση τους σε οχήματα, αφαιρούμενες από τις ποσότητες CO<sub>2</sub> που λαμβάνονται από την ατμόσφαιρα από τη βιομάζα στη φάση ανάπτυξης της [45].

Σύμφωνα με μελέτες [46] τα βιοκαύσιμα αποτελούν το 3% των συνολικών καυσίμων μεταφοράς έως και το 2012. Στο Σχήμα 48 απεικονίζεται η ζήτηση της ενέργειας στον τομέα της μεταφοράς και διακρίνεται ότι με την πάροδο του χρόνου τα βιοκαύσιμα λαμβάνουν μεγαλύτερες ποσότητες συγκρινόμενα με άλλα καύσιμα [47]. Η χρήση βιοκαυσίμων θα οδηγήσει σε μακροπρόθεσμο μετριασμό των εκπομπών αέριων ρύπων. Η εφαρμογή καυσίμων μεταφοράς χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, όπως τα βιοκαύσιμα δεύτερης γενιάς, εκτός από τη βελτίωση της απόδοσης των οχημάτων, αναμένεται να συμβάλει στη μείωση των μελλοντικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στο τρέχον επίπεδο στην καλύτερη περίπτωση[44].

Από τεχνική άποψη, η χρήση ανανεώσιμων βιοκαυσίμων ή εναλλακτικών καυσίμων μπορεί επίσης να συμβάλει άμεσα στη βελτίωση της απόδοσης του κινητήρα και των χαρακτηριστικών εκπομπών. Η ισορροπία μεταξύ αποδοτικότητας καυσίμου και επικίνδυνων



εκπομπών, όπως άκαυστος υδρογονάνθρακας (HC), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), οξείδια του αζώτου (NOx) και σωματιδιακή ύλη (PM), ήταν ανέκαθεν σημαντικό ζήτημα στον τομέα της έρευνας για τους κινητήρες. Δεδομένου ότι η καύση καυσίμου καθορίζεται από την αλληλεπίδραση αέρα-καυσίμου, οι μοναδικές ιδιότητες των εναλλακτικών καυσίμων μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλεονεκτικά και άμεσα κατά την καύση του κινητήρα επεξεργάζομαι, διαδικασία. Διεξάγεται έρευνα παγκοσμίως για την εφαρμογή εναλλακτικών καυσίμων στους ΜΕΚ για να αποκαλυφθούν οι δυνατότητές τους [42].



Σχήμα 51: Ζήτηση καυσίμων σε παγκόσμιο επίπεδο [42]

Όπως προαναφέρθηκε υπάρχει ετήσια αύξηση ζήτηση της ενέργειας που κυμαίνεται από 1,2% έως και 1,4%. Επιπλέον, η ανισόρροπη αύξηση ζήτησης των παραγώγων από ορυκτά καύσιμα προσθέτει επιπλέον ανησυχίες. Ο λόγος του μεσαίου αποστάγματος, όπως το ντίζελ, προς εκείνον των καυσίμων βενζίνης αναμένεται να αυξηθεί σε περίπου 2,4 έως το 2040 από την παρούσα αναλογία περίπου 1,5 [49]. Τονίζεται ότι η αυξημένη ζήτηση για πετρέλαιο μπορεί να οδηγήσει στην η ισορροπημένη διανομή ενέργειας. Τα εναλλακτικά καύσιμα μπορούν να συνεισφέρουν στην ισορροπία της ζήτησης των καυσίμων με συνέπεια την ανακούφιση αυτού του προβλήματος [48].

#### 5.4. ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Μερικές από τις κοινές κρίσιμες εκτιμήσεις για εναλλακτικά καύσιμα και για τους κινητήρες ΜΕΚ συνοψίζονται παρακάτω:





- Ιδιότητες του καυσίμου που συμπεριλαμβάνονται οι χημικές ιδιότητες όπως αριθμός οκτανίων.
- Φυσικές ιδιότητες καυσίμου ποσότητα και αναλογία μείγματος, που επηρεάζουν την λειτουργικότητα του κινητήρα στο εύρος θερμοκρασιών
- Lower heating value (LHV).
- Συμβατότητα, η οποία περιλαμβάνει την έγκριση από κατασκευαστικές εταιρίες κινητήρων και οχημάτων.
- Οικονομικό κόστος για την κατασκευή και την υποδομή των συστημάτων

Οι ιδιότητες των εναλλακτικών καυσίμων καθορίζουν την ποιότητα των καυσίμων καθώς και την δυνατότητα τους να χρησιμοποιηθούν για την λειτουργία των κινητήρων. Εξίσου σημαντικές είναι οι φυσικές ιδιότητες των καυσίμων αφού από αυτές επηρεάζεται ο σχηματισμός τους καυσίμου μείγματος. Επιπλέον, σημαντική παράμετρος είναι το LHV, από την οποία εξαρτάται η αποτελεσματικότητα του καυσίμου ως φορέα ενέργειας. Τονίζεται ότι είναι μια από τις βασικότερες παραμέτρους που ελέγχονται με στόχο την μη απόρριψη του καυσίμου.

Ωστόσο, στα εναλλακτικά καύσιμα θα πρέπει να ελέγχεται και η συμβατότητα τους με τους κινητήρες της αγοράς και συγκεκριμένα αν παρέχεται η κατάλληλη υποδομή ώστε να χρησιμοποιηθούν χωρίς να δημιουργηθούν προβλήματα και καταστροφή του κινητήρα. Αυτός ο τρόπος θα βοηθήσει στην καλύτερη και πιο αποτελεσματική διείσδυση των εναλλακτικών καυσίμων στην αγορά. Σε περίπτωση μη συμβατότητας θα προκύψει μεγάλο κόστος τροποποίησης των συστημάτων με συνέπεια να μην θεωρηθεί ως εφικτή λύση η χρήση των εναλλακτικών καυσίμων παρά το πλήθος πλεονεκτημάτων που προσφέρουν.

Όπως γίνεται κατανοητό το οικονομικό κόστος είναι ένα από τους βασικούς περιορισμούς για τους κατασκευαστές και τους καταναλωτές. Με την εξέλιξη και βελτίωση των τεχνολογιών τα τελευταία χρόνια διακρίνεται σημαντική βελτίωση των τεχνολογιών με περισσότερες δυνατότητες συμβατότητας. Ωστόσο, η τιμή των εναλλακτικών καυσίμων θεωρείται ακόμα υψηλή με συνέπεια να μην θεωρείται ελκυστική συγκρινόμενη με την τιμή των ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, βενζίνη). Οι τιμές των κύριων εναλλακτικών καυσίμων στις περιφερειακές αγορές δείχνουν ότι είναι πιο ακριβές όταν ομαλοποιούνται σε ισότιμη ενεργειακή βάση [50].

Σημειώνεται ότι ορισμένα γνωστά εναλλακτικά καύσιμα, όπως η αιθανόλη (βιοαιθανόλη) και το προηγμένο βιοντίζελ, τα οποία δείχνουν μέτρια συμβατότητα με τα υπάρχοντα οχήματα ΜΕΚ, βρίσκονται σε μέτρια κλίμακα παραγωγής και εκπληρώνουν μετρίως χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η πρόοδος της τεχνολογίας παραγωγής από συμβατικές μεθόδους (ή βιοκαύσιμα  $1^{ns}$  γενιάς) σε προηγμένες μεθόδους (βιοκαύσιμα  $2^{ns}$  γενιάς) ενίσχυσε την αποδοτικότητα της παραγωγής και προώθησε τη χρήση μη βρώσιμων βιολογικών πρώτων υλών. Η χρήση βρώσιμων πηγών μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της τιμής των τροφίμων και έχει επικριθεί ευρέως στο παρελθόν. Η αιθανόλη θεωρείται ως φιλικό προς το περιβάλλον καύσιμο, επειδή οι παραδοσιακές πρώτες ύλες, όπως η μελάσα, ο χυμός ζαχαροκάλαμου και το καλαμπόκι, μπορούν να λειτουργήσουν ως νεροχύτης  $CO_2$  [51].



Συγκεκριμένα, το καλαμπόκι και το ζαχαροκάλαμο είναι οι κύριες πρώτες ύλες των ΗΠΑ και της Βραζιλίας, που είναι οι μεγαλύτεροι παραγωγοί αιθανόλης στον κόσμο. Οι ΗΠΑ είναι επίσης ο μεγαλύτερος παραγωγός βιοντίζελ, παράγοντας 940 χιλιάδες βαρέλια την ημέρα το 2012 [52].

Στην συνέχεια δίνεται η εικόνα 9 όπου συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των διάφορων καυσίμων είτε αυτά ανήκουν στα συμβατικά είτε στα εναλλακτικά καύσιμα.

Fuel	Energy density	Production cost with oil at USD 100 / bbl	Distribution infrastructure	Current production and retail availability for vehicles	Compatibility with existing ICE vehicles	Typical GHG emissions	Feedstock	Process
Gasoline	H	Mod	Comp	Comp	Comp	High	Oil from both conventional sources and non-conventional sources, such as heavy crudes and tar sands	Refining
Distillate	H	Mod	Comp	Comp	Comp	High		
Jet fuel	H	Mod	Comp	Comp	Comp	High		
CTL diesel	H	HMod	Cpt	VL	Comp	VH	NG, coal	Gasification / FT
GTL diesel	H	HMod	Cpt	VL	Comp	H		
Grain ethanol	M	HMod	Par	LMod	Par	HMod	Grain crops	Saccharification and distillation
Cane ethanol	M	LMod	Pal	LMod	Par	Low	Sugar crops (cane)	Distillation
Advanced lingo-cellulosic ethanol	M	H	Par	None	Par	Low	-	-
Oil-seed biodiesel	H	HMod	Par	LMod	Par	Mod	Oil-seed crops	Esterification, hydrogenation
Advanced BTL diesel	H	H	Cpt	None	Comp	Low		
CNG	L	LMod	Par	VL	RC	HMod	Natural gas	Gasification / FT
LPG	L	LMod	Par	VL	RC	HMod		
Methanol from NG	L	Mod	VL	VL	RC	HMod	Natural gas	
DME from NG	M	Mod	VL	VL	RC	HMod		
H <sub>2</sub> from fossil sources	L	Mod	VL	VL	RC	HMod	Natural gas	Reforming, compression
H <sub>2</sub> from renewable sources	L	H	VL	None	RC	VL		

**Acronyms:**

H: high; M: medium; L: low; VH: very high; VL: very low;

Mod: moderate; LMod: low-moderate; HMod: moderate high;

Par: partial; WS: widespread; RC: requires conversion; Cpt: compatible with existing; Comp: complete

Notes: Table classifications are indicative, based on current characteristics and estimates, and apply only to near-term. There may be situations and regions in which these classifications do not apply.

Εικόνα 9: Συγκριτική διαδικασία παραγωγής και χαρακτηριστικών συμβατικών και εναλλακτικών καυσίμων [42]



Από τα δεδομένα της Εικόνα 9 προκύπτει ότι το συμπιεσμένο φυσικό αέριο και το υγραέριο παρουσιάζουν καλύτερη συμβατότητα με τις υπάρχουσες υποδομές διανομής συγκρινόμενα με άλλα εναλλακτικά καύσιμα που προέρχονται από συμπιεσμένο φυσικό αέριο (CNG) (όπως DME και H<sub>2</sub>). Τα προαναφερόμενα καύσιμα είναι κατάλληλα για εφαρμογές που θα πραγματοποιηθούν τροποποιήσεις στα συστήματα των οχημάτων [42].

## 5.5. ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΜΕ ΣΠΙΝΘΗΡΑ

### 5.5.1. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Στους συμβατικούς κινητήρες ανάφλεξης σπινθήρα, το μείγμα αέρα-καυσίμου εισάγεται στον κύλινδρο και συμπιέζεται κοντά στο άνω νεκρό κέντρο, έτοιμο για ανάφλεξη. Η καύση ξεκινά με ηλεκτρική εκκένωση στο μπουζί. Το βασικό χαρακτηριστικό της καύσης που πραγματοποιήσαν σε κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα είναι η διάδοση φλόγας ενός μείγματος αέρα – καυσίμου [53]. Η αυτόματη ανάφλεξη που μπορεί να συμβεί σε αυτού του τύπου κινητήρες καλείται ως χτύπημα (Knock), και μπορεί να είναι η ανάφλεξη πολλαπλών σημείων σε ολόκληρο το μείγμα αέρα – καυσίμου στη τελική καύση συνοδεύοντας την απελευθέρωση θερμότητας με συνέπεια και την ζημία του κινητήρα. Επιπροσθέτως, το χτύπημα μπορεί να προκληθεί από τις ιδιότητες που παρουσιάζει το καύσιμο καθώς επίσης και από τους σχεδιαστικούς περιορισμούς του κινητήρα.

Οι απαιτήσεις των κινητήρων ανάφλεξης με σπινθήρα σε ότι αφορά τα καύσιμα είναι πολλές συμπεριλαμβανομένου και του χτυπήματος. Στην συνέχεια ακολουθούν κάποιες βασικές απαιτήσεις κινητήρων ανάφλεξης με σπινθήρα που χρησιμοποιούν ως συμβατικό καύσιμο την βενζίνη και μπορούν να χρήση εναλλακτικών καυσίμων μόνο στην περίπτωση που μπορούν να καλύψουν τα εξής[54]:

- Αριθμός οκτανίων
- Ταχύτητα καύσης
- Αναφλεξιμότητα και σταθερή καύση
- LHV

Ο αριθμός οκτανίου είναι καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή του εναλλακτικού καυσίμου και καθορίζει την καύση των κινητήρων ανάφλεξη με σπινθήρα. Το ισο-οκτάνιο, το οποίο είναι εξαιρετικά ανθεκτικό στα χτυπήματα, έχει τον αριθμό οκτανίων 100, ενώ το N-επτάνιο, το οποίο είναι ευαίσθητο σε κρούση, εκχωρείται ως 0. Ο αριθμός οκτανίου μπορεί να εμφανιστεί είτε από τον αριθμό Research Octane Number (RON) είτε τον



Motor Octane Number(MON), σύμφωνα με τη μέθοδο μέτρησης. Η κανονική βενζίνη έχει τιμή RON 91 και MON 82,5 [54].

Η εμφάνιση χτυπήματος ή αυτόματης ανάφλεξης σε βενζινοκινητήρες μπορεί να ποσοτικοποιηθεί μέσω της ολοκληρωμένης εξίσωσης Livengood – Wu [42]. Ο αποφασιστικός παράγοντας για τέτοια ανεπιθύμητα φαινόμενα κρούσης μπορεί να αποδοθεί στον χρόνο καθυστέρησης αυτόματης ανάφλεξης του καυσίμου, όπου η ίδια η καθυστέρηση ανάφλεξης καθορίζεται επίσης από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και την αντιδραστικότητα καυσίμου. Ο αριθμός οκτανίων της βενζίνης εμποδίζει την αύξηση του λόγου συμπίεσης, περιορίζοντας έτσι την απόδοση του τρέχοντος κινητήρα. Ο αριθμός οκτανίων εναλλακτικών καυσίμων μπορεί να διαδραματίσει κυρίαρχο ρόλο στη μελλοντική ανάπτυξη βενζινοκινητήρων.

Έχουν διερευνηθεί οι έννοιες καύσης για να μετριάσει η απώλεια άντλησης των κινητήρων ανάφλεξης σπινθήρα σε συνθήκες μερικού φορτίου. Ωστόσο, οι εκπομπές NO<sub>x</sub> της εξαγωγής έχουν επισημανθεί ως ένα από τα κύρια μειονεκτήματα, λόγω της επιδεινούμενης αποτελεσματικότητας μετατροπής NO<sub>x</sub> του συστήματος μετεπεξεργασίας (καταλύτης τριών δρόμων (three-way catalyst, TWC)) υπό άπαχη λειτουργία. Η τυπική λύση για τον περιορισμό των υψηλών εκπομπών NO<sub>x</sub> είναι η εφαρμογή ανακυκλοφορίας καυσαερίων (exhaust gas recirculation, EGR) για την αντικατάσταση της υπερβολικής ποσότητας O<sub>2</sub>. Δεδομένου ότι το άπαχο όριο ενός μείγματος αέρα-καυσίμου καθορίζεται από την ευφλεκτότητα του ίδιου του καυσίμου, τα εναλλακτικά καύσιμα με ευρύτερα παράθυρα αναφλεξιμότητας μπορούν να βοηθήσουν στην αύξηση της ανοχής του, οδηγώντας σε περαιτέρω μειώσεις των εκπομπών NO<sub>x</sub>.

Αν και η διάρκεια καύσης του μείγματος διέπεται σε μεγάλο βαθμό από την ένταση του στροβιλισμού του μίγματος, η στρωτή ταχύτητα καύσης δρα ως σημαντική ιδιότητα του καυσίμου. Ένα εναλλακτικό καύσιμο που έχει το χαρακτηριστικό της ταχύτερης ταχύτητας καύσης μπορεί να μετριάσει την ανάγκη αύξησης της παραχώδους έντασης του μείγματος με περίπλοκο σχεδιασμό θύρας. Εκτός αυτού, μπορεί επίσης να αναμένεται η βελτίωση της εμφάνισης χτυπήματος, λόγω του ότι το αέριο τελικού αερίου συμμετέχει στη διάδοση της φλόγας πριν από την αυτόματη ανάφλεξη.

Τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν τα καύσιμα (πητικότητα και εξάτμιση) θεωρούνται από τα βασικότερα λόγω των εγγενών χαρακτηριστικών του συστήματος ψεκασμού καυσίμου (fuel injection equipment, FIE) και των συμβατικών κινητήρων ψεκασμού καυσίμου (port fuel injection, PFI). Λόγω πριν από την ανάφλεξη του καυσίμου με σπινθήρα πρέπει να υπάρχει προανάμιξη. Η καλή πητικότητα του καυσίμου παρέχει τη δυνατότητα αξιόπιστης εκκίνησης σε ψυχρή κατάσταση και ομοιογενή σχηματισμό μίγματος για σταθερότητα καύσης. Ωστόσο, ο χρόνος σχηματισμού μίγματος (ο χρόνος μεταξύ έγχυσης καυσίμου και ανάφλεξης) γίνεται μικρότερος με την άμεση έγχυση, η οποία εγχέει το καύσιμο αργά κατά τη διάρκεια της διαδρομής συμπίεσης. Αυτό μπορεί να δώσει ένα ανομοιογενές μείγμα που είναι επιρρεπές σε απόδοση καύσης. Η πητικότητα που παρουσιάζουν τα εναλλακτικά καύσιμα μπορεί να οδηγήσουν σε πλήθος σχηματισμών μείγματος συγκρινόμενα με τα συμβατικά καύσιμα [42].

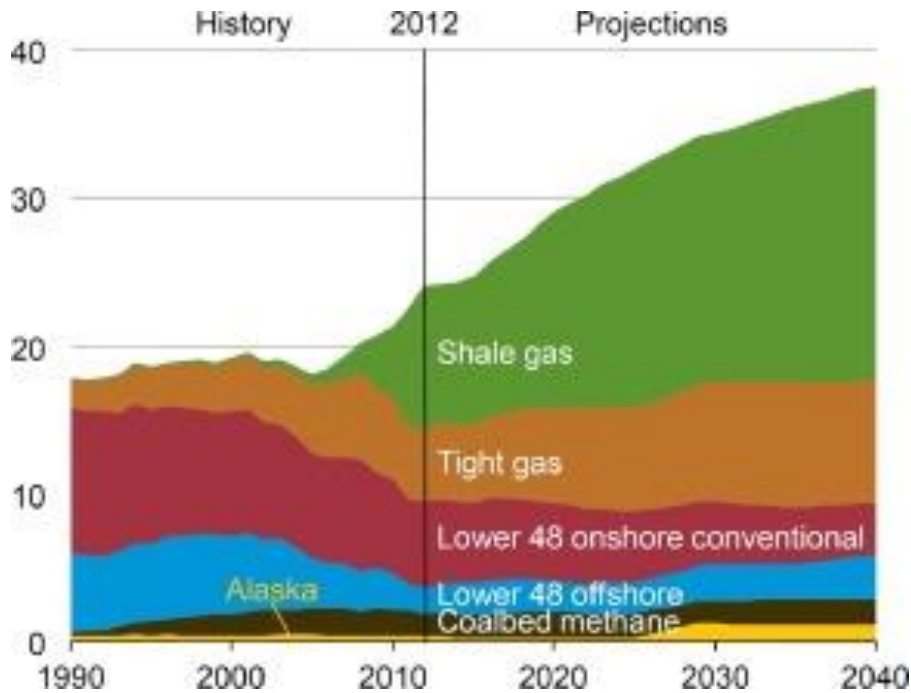
### 5.5.2. ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ

Το φυσικό αέριο λαμβάνεται ως υποπροϊόν κατά την διάρκεια της διύλισης του αργού πετρελαίου. Το αέριο που συλλέγεται μεταφέρεται με αγωγούς με στόχο την χρήση του για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή παραδίδεται σε τελικούς χρήστες με σκοπό την χρήση του σε πλήθος εφαρμογών. Σημειώνεται ότι για την χρήση του σε πλήθος εφαρμογών η εξαγωγή του γίνεται σε μορφή υγροποιημένου φυσικού αερίου (liquefied natural gas, LNG) είτε μέσω τεχνολογιών μετατρέπεται σε υγρό αέριο (gas to liquid, GTL). Το υγροποιημένο φυσικό αέριο γενικεύεται εκ νέου αεριοποιημένο, προτού τροφοδοτηθεί μέσω των αγωγών στο δίκτυο διανομής. Το αέριο χρησιμοποιείται επίσης άμεσα στον τομέα των μεταφορών, λόγω της χαμηλότερης τιμής του σε σύγκριση με άλλα συμβατικά καύσιμα.

Η αφθονία του φυσικού αερίου καθώς και η εξέλιξη της τεχνολογίας με στόχο τη ανάκτηση του, το καθιστά αρκετά ελκυστικό για την ευρύτερη χρήση του καυσίμου στους κινητήρες ΜΕΚ. Επιπλέον, η αφθονία μπορεί να εξασφαλίσει δύο βασικούς παράγοντες που είναι το σταθερό κόστος και η σταθερή παροχή ενέργειας. Όσον αφορά τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου για συμπιεσμένο φυσικό αέριο βρίσκονται μεταξύ βενζίνης και πετρελαίου. Από μια μακροπρόθεσμη προοπτική, των εκπομπών των οχημάτων με χρήση συμπιεσμένου φυσικού αερίου και από τις δύο συμβατικές πηγές και σχιστολιθικού φυσικού αερίου θα είναι χαμηλότερη από εκείνη της βενζίνης, που κυμαίνονται περίπου 220g CO<sub>2</sub> eq/km [42]

Το φυσικό αέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) έως και 94,4%, ακολουθούμενο από άλλες δευτερεύουσες ουσίες, όπως το αιθάνιο (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), το βουτάνιο (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) και το προπάνιο (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>). Το φυσικό αέριο χαρακτηρίζεται από τον υψηλό αριθμό LHV ανά μονάδα μάζας από οποιοδήποτε άλλο καύσιμο [53]. Επιπλέον, η χαμηλή αναλογία του μεταξύ άνθρακα και υδρογόνου εκπέμπει μικρά ποσοστά CO<sub>2</sub> εκπομπών σε σύγκριση με οποιαδήποτε άλλα καύσιμα υδρογονανθράκων, όταν καίγονται ίσες ποσότητες μάζας καυσίμων. Το καύσιμο χρησιμοποιείται με τη μορφή συμπιεσμένου φυσικού αερίου (CNG). Παρόλο που το φυσικό αέριο έχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα σε μάζα, η ενεργειακή πυκνότητα σε όγκο είναι χαμηλότερη από εκείνη της βενζίνης και του πετρελαίου. Ωστόσο, η χρήση του φυσικού αερίου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κίνηση των οχημάτων υιοθετείται σε πόλεις και σε προαστιακές περιοχές, με βασικό στοιχείο τις μικρές αποστάσεις και τις άρτιες υποδομές εφοδιασμού [55].

Στην συνέχεια ακολουθεί η σχηματική απεικόνιση για την παραγωγή του φυσικού αερίου των ΗΠΑ ανά πηγή κατά τα έτη 1990 έως και 2040 [42].



Σχήμα 52: Παραγωγή φυσικού αερίου των ΗΠΑ ανά πηγή, 1990-2040 [42]

### 5.5.3. ΥΔΡΟΓΟΝΟ

Το υδρογόνο ( $H_2$ ) κατατάσσεται στα πιο δημοφιλή καύσιμα αφού μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών όχι μόνο στην κίνηση αλλά και στη βιομηχανία. Το υδρογόνο χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε αεροδιαστημικές εφαρμογές λόγω των χαρακτηριστικών που παρουσιάζει, που είναι η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα σε μάζα, η υψηλή ταχύτητα της φλόγας καθώς και της καλής ευφλεκτότητας [59]. Ωστόσο, το υδρογόνο ( $H_2$ ) ενδείκνυται για την χρήση του και ως καύσιμο οχημάτων από συμβατική έως προηγμένη ιδέα καύσης [56-58]. Το υδρογόνο ( $H_2$ ) παράγεται είτε από ορυκτούς πόρους (φυσικό αέριο, άνθρακα) είτε από ανανεώσιμους πόρους (βιομάζα). Αξιοσημείωτη όμως είναι η παραγωγή του μέσω ηλεκτρόλυσης νερού με ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ηλιακή ενέργεια όσον αφορά τη μείωση των εκπομπών  $CO_2$ . Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα δεδομένα το μεγαλύτερο ποσοστό (90%) παράγεται από ορυκτούς πόρους και ειδικότερα από φυσικό αέριο, πετρέλαιο, άνθρακα κ.ά. [59]

Αξιοσημείωτο όμως είναι ο υψηλός αριθμός οκτανίου υδρογόνου ο οποίος δίνει την δυνατότητα της αύξηση του λόγου συμπίεσης με απώτερο στόχο την βελτίωση της απόδοσης του κινητήρα. Τα ευρύτατα όρια ευφλεκτότάς του επιτρέπουν επίσης τη μη πεταλούμενη λειτουργία με λιτή καύση. Η υψηλή φλόγα στρωτή ταχύτητα, μία τάξη μεγέθους από υψηλότερες υδρογονάνθρακες, είναι μια ξεχωριστή χαρακτηριστικό καύσεως του υδρογόνου ( $H_2$ ). Μια μηχανή ΜΕΚ που κάνει χρήση υδρογόνου παρουσιάζει μεγαλύτερη θερμική απόδοση συγκρινόμενη με μηχανή ΜΕΚ που κάνει χρήση βενζίνης, κάτι που οφείλεται σε παράγοντες όπως υψηλή ταχύτητα φλόγας και υψηλή αναλογία συμπίεσης.



Ωστόσο, προσοχή θα πρέπει να δοθεί στη δυνατότητα των απωλειών μεταφοράς μεγαλύτερης θερμότητας μέσω του κυλίνδρου-τοιχώματος με υδρογόνο ως καύσιμο κινητήρων. Το υδρογόνο ( $H_2$ ) κατά την διάρκεια καύση τους δεν παράγει CO και  $CO_2$ , γεγονός που οφείλεται στην απουσία ατόμων άνθρακα (C).

#### 5.5.4. ΥΓΡΑΕΡΙΟ

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι παραγωγής υγραερίου [60]. Η πρώτη περίπτωση είναι ως υποπροϊόν κατά τη διύλιση αργού πετρελαίου, όπου τα ελαφρά συστατικά καύσιμα όπως το προπάνιο και το βουτάνιο παράγονται μέσω απόσταξης, αναμόρφωσης, ρωγμών και άλλων διαδικασιών. Αυτά τα αέρια συλλέγονται και έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί ευρέως σε ορισμένες περιφερειακές αγορές ως εναλλακτικά καύσιμα στον τομέα των επιβατικών οχημάτων. Η δεύτερη περίπτωση είναι η εξαγωγή από την επεξεργασία κατά τη διάρκεια της εξαγωγής φυσικού αερίου (ή μη συνδεδεμένου αερίου). Το υγραέριο εξάγεται για να αποτρέψει τη συμπίκνωση του αερίου και προκαλεί προβλήματα με τη μεταφορά φυσικού αερίου. Η τελευταία περίπτωση προέρχεται από τη διαδικασία κατά την εξαγωγή λαδιού (πηγή στο σχετικό αέριο) [60]. Περίπου το 60% του υγραερίου παγκοσμίως παράγεται με τη διαδικασία ανάκτησης από την εξόρυξη καυσίμων, ενώ το υπόλοιπο 40% προέρχεται από τη διύλιση του αργού πετρελαίου [42], [60].

Λόγω της διακύμανσης των πηγών και των διαδικασιών επεξεργασίας, η σύνθεση του υγραερίου είναι πολύ μεταβλητή τόσο σε ολόκληρο τον κόσμο όσο και κατά τη διάρκεια του έτους [61]. Ενώ η περιεκτικότητα σε υγραέριο ποικίλλει σημαντικά σε ολόκληρο τον κόσμο, είναι κυρίως ένα μείγμα τεσσάρων ειδών: προπάνιο, προπυλένιο, ισο-βουτάνιο και ν-βουτάνιο [61]. Κάθε συστατικό των τεσσάρων ειδών έχει αριθμό οκτανίων άνω των RON 100, που είναι υψηλότερος από αυτόν της βενζίνης. Επομένως, η αύξηση του λόγου συμπίεσης του κινητήρα είναι επίσης δυνατή με καύσιμο υγραέριο (liquefied petroleum gas, LPG). Ο υψηλός αριθμός οκτανίων του υγραερίου είναι ευεργετικός στην αύξηση της θερμικής απόδοσης του φρένου, με βελτιστοποιημένο χρονισμό ανάφλεξης χωρίς εμφάνιση χτυπήματος και αύξηση του λόγου συμπίεσης [62].

Οι εκπομπές του υγραερίου ήταν χαμηλότερες από εκείνες της βενζίνης έως και 45%. Ο βελτιωμένος σχηματισμός μείγματος λόγω της ευρύτερης γωνίας ψεκασμού και του βρασμού του σε φλας έδωσε χώρο για μείωση των εκπομπών ρύπων, ανεξάρτητα από την έγχυση αερίου ή υγρής φάσης, σε σύγκριση με το καύσιμο βενζίνης. Επιπλέον, οι εκπομπές σωματιδίων (PN) με εφαρμογή έγχυσης κατεύθυνσης υγρού πετρελαίου (LPDI) μειώθηκαν κατά 94% σε σύγκριση με εκείνες της βενζίνης λόγω του καλύτερου σχηματισμού μείγματος [42].



### 5.5.5. ΑΛΚΟΟΛΟΥΧΑ ΚΑΥΣΙΜΑ - ΜΕΘΑΝΟΛΗ ΚΑΙ ΑΙΘΑΝΟΛΗ

Μέσα από τη βιομηχανική επανάσταση στον 19<sup>ο</sup> και στις αρχές του 20<sup>ο</sup> αιώνα, το αλκοόλ άρχισε να κερδίζει την προσοχή ως καύσιμο αυτοκινήτων. Η δυνατότητα επίτευξης υψηλότερης θερμικής απόδοσης και χαμηλότερων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων και της ανανεώσιμης παραγωγής της από τα εργοστάσια δημιούργησε ιδιαίτερο ενδιαφέρον για έρευνα και ανάπτυξη. Από τα βασικά καύσιμα αλκοόλης είναι η μεθανόλη ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), αιθανόλη ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ), προπανόλη ( $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ ) και βουτανόλη ( $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$ ) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμα αυτοκινήτων. Η εισαγωγή της μεθανόλης και της αιθανόλης ως εναλλακτικά καύσιμα θεωρείται επιτυχής διότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους συμβατικούς κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα με τη μορφή πρόσθετων καυσίμων, καυσίμων ανάμιξης και δι-καυσίμων, για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους.

Η μεθανόλη μπορεί να παρασκευαστεί από άνθρακα, φυσικό αέριο, αέριο οπτάνθρακα, υδρογόνο και βιομάζα. Ωστόσο, η περισσότερη μεθανόλη παράγεται από αέριο σύνθεσης, το οποίο αποτελείται από μονοξειδίο του άνθρακα και υδρογόνο [63]. Η παραγωγή αιθανόλης έχει δύο κύριους δρόμους βιομηχανικής παραγωγής. Ένα μονοπάτι είναι η αντίδραση του αιθανίου με ατμό, ενώ το άλλο μονοπάτι είναι η αλκοολική ζύμωση [64]. Ο λόγος για τον οποίο η αιθανόλη ονομάζεται συχνά βιοαιθανόλη είναι ότι η αιθανόλη παράγεται από ανανεώσιμες βιο-οργανικές ύλες και αυτά τα βιολογικά υλικά μπορούν να λειτουργήσουν ως νεροχύτες άνθρακα στη διάρκεια ζωής της. Η αιθανόλη μπορεί εύκολα να παραδοθεί και να παρασχεθεί με κάποιες μικρές τροποποιήσεις χρησιμοποιώντας την τρέχουσα υποδομή, επειδή βρίσκεται σε υγρή φάση και εύκολο στη χρήση, σε σύγκριση με τα αέρια εναλλακτικά καύσιμα.

Η μεθανόλη και η αιθανόλη έχουν παρόμοιες ιδιότητες με τα καύσιμα αλκοόλης. Και τα δύο είναι οξυγονωμένα υγρά υδρογονάνθρακα. Είναι γνωστό ότι τα διακριτικά χαρακτηριστικά αυτών των καυσίμων αλκοόλης προκύπτουν βασικά λόγω της ύπαρξης της ομάδας υδροξυλίου στην αλυσίδα άνθρακα. Αυτό το τμήμα υδροξυλίου καθιστά μεθανόλη και αιθανόλη υδρόφιλη, και έχει διπολική ροπή. Αυτή η πόλωση από τη διπολική ροπή επηρεάζει τις διαμοριακές αλληλεπιδράσεις και τις καθιστά υδρόφιλες και συμπεριφέρονται κοντά σε ένα αζεοτροπικότανα αναμιγνύεται με βενζίνη [42].

Η ζήτηση και η προσφορά αιθανόλης σχεδόν τριπλασιάστηκε την τελευταία δεκαετία [63]. Ωστόσο, το χαμηλό κόστος των συμβατικών καυσίμων που προέρχονται από πετρέλαιο μειώνει την κερδοφορία της παραγωγής καυσίμων αλκοόλης. Απαιτείται προσεκτική επιλογή εύλογης πρώτης ύλης, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος παραγωγής και την ενεργειακή απόδοση της παραγωγής. Πολλές μελέτες έδειξαν αρκετά αντιφατικά και συζητήσιμα αποτελέσματα μέσω της εκτίμησης κύκλου ζωής (life cycle assessment, LCA) της αιθανόλης σχετικά με το όφελος και το κόστος παραγωγής αιθανόλης, λαμβάνοντας υπόψη τη χρήση της σε κινητήρες εσωτερικής καύσης. Μία από τις μελέτες δείχνει ότι η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η ενεργειακή απόδοση και η περιβαλλοντική βιωσιμότητα ήταν χαμηλά, όταν εξετάζονταν θέματα ρύπανσης του αέρα, εδάφους και υπόγειων υδάτων [65].





### 5.5.6. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΓΙΑ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΜΕ ΣΠΙΝΘΗΡΑ (SI)

Πίνακας 6: Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων για κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα (SI) και συμβατικά καύσιμα [42].

Είδος	Βενζίνη	Ντιζέλ	Μεθάνιο	Υδρογόνο	Υγραέριο		Αλκοόλ	
					Προπάνιο	Βουτάνιο	Μεθανόλη	Αιθανόλη
Χημικός τύπος	$C_nH_{1,87n}(l)$	$C_nH_{1,8n}(l)$	$CH_4(g)$	$H_2(g)$	$C_3H_8$	$C_4H_{10}$	$CH_4O$	$C_2H_6O$
Πυκνότητα ( $kg/m^3$ )	0,72-0,78	0,84-0,88	0,72 α	0,09 α	0,51	0,58	0,792	0,785
Χαμηλή τιμή θέρμανσης (MJ/kg)	44.0	42.5	50.0	120.0	46.1	45.5	19.9	26.9
Αριθμός οκτανίου (RON)	92-98	-	120	$\geq 120$	111	103	109	107
Αριθμός κετανίου	-	52	-	-	-	-	-	-
Αναλογία στοιχειομετρικού αέρα-καυσίμου (A/F)	14.6	14.5	17.23	34.3	15.6	15.4	6.5	9.0
Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης ( $kJ/kg$ )	305	270	509	-	426	385	1168	840
Σημείο βρασμού ( $^{\circ}C$ )	27-225	-	-161.5	-	-42	-0.5	64.7	78
Ταχύτητα φλόγας (m/s)	0.37-0.43	-	0.38	1.85	0.38	0.37	-	0,39



## 5.6. ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΜΕ ΣΥΜΠΙΕΣΗ

### 5.6.1. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Τα καύσιμα ντίζελ είναι τα συμβατικά καύσιμα για κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση (CI). Η διακριτή διαφορά καύσης σεκινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση σε σύγκριση με τους κινητήρες ανάφλεξης σπινθήρα είναι ότι το καύσιμο εισάγεται απευθείας στον κύλινδρο και αναφλέγεται αυτόματα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος προς το τέλος της διαδρομής συμπίεσης. Επομένως, η ικανότητα αυτόματης ανάφλεξης του καυσίμου είναι ζωτικής σημασίας για τη χρήση του σε κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση. Υπάρχουν αρκετά σημαντικά κριτήρια για τη μέτρηση της ποιότητας των καυσίμων πετρελαίου, καθώς και εναλλακτικών καυσίμων που εφαρμόζονται σε κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση συγκεκριμένα[66]:

- Αριθμός κετανίου
- Σημείο βρασμού
- Συγκεκριμένη πυκνότητα και ιξώδες
- Χαμηλή περιεκτικότητα σε αρωματικές ενώσεις (ιδιαίτερα πολυαρωματικές ενώσεις)

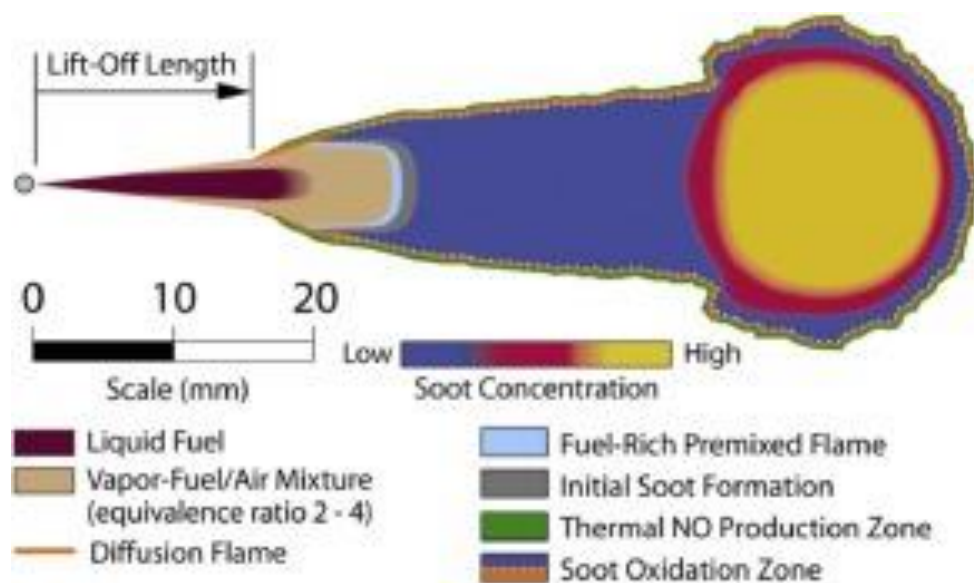
Ο αριθμός κετανίου (etane number, CN) καθορίζει έντονα την ποιότητα ανάφλεξης του καυσίμου. Είναι επίσης πρωταρχικός αποφασιστικός παράγοντας για το εάν ένα συγκεκριμένο εναλλακτικό καύσιμο ισχύει για την εφαρμογή κινητήρα ανάφλεξης με συμπίεση. Ένας αριθμός κετανίου 100 αντιστοιχεί στο n-εξαδεκάνιο, το οποίο αναφλέγεται εύκολα, ενώ ο αριθμός κετανίου 0 αντιστοιχεί στο μεθυλο ναφθαλίνιο, το οποίο διαθέτει αργή ανάφλεξη. Ο αριθμός κετανίου ενός άγνωστου καυσίμου μετριέται σε έναν μονοκύλινδρο δοκιμαστικό κινητήρα με στόχο τη συνεργατική έρευνα καυσίμων (CFR), μέσω μιας τυποποιημένης διαδικασίας American Society of Testing Materials (ASTM). Η αναλογία του n-εξαδεκανίου στο μείγμα ποικίλλει, μέχρι την ίδια καθυστέρηση ανάφλεξης καθώς λαμβάνεται το άγνωστο καύσιμο. Η αναλογία του N-εξαδεκανίου γίνεται εξ' ορισμού ο αριθμός κετανίου. Είναι αποδεκτό ότι ένας αριθμός κετανίου που υπερβαίνει τους 50 είναι επιθυμητός για βελτιστοποιημένη λειτουργία σε σύγχρονους κινητήρες ανάφλεξης συμπίεσης (CI) [66].

Ο αριθμός κετανίου είναι ένα μηχανικό μέτρο για την ταξινόμηση της ποιότητας ανάφλεξης του καυσίμου. Ο αριθμός κετανίου λαμβάνει υπόψη τόσο τις φυσικές ιδιότητες όσο και τις χημικές ιδιότητες των καυσίμων. Τη στιγμή που αναπτύχθηκε ο αριθμός κετανίου, η χημική σύνθεση του καυσίμου είχε μεγαλύτερη σημασία στην καθυστέρηση ανάφλεξης παρά στις τεχνολογίες κινητήρα ντίζελ. Η έλευση νέων τεχνολογιών, όπως το CRDI, απέδωσε ένα τεχνικό κενό έναντι του κινητήρα CFR. Έτσι, τα χαρακτηριστικά ανάφλεξης που

καθορίζονται από την παραδοσιακή μέθοδο δεν συσχετίζονται πάντα καλά με τις καθυστερήσεις ανάφλεξης στους κινητήρες παραγωγής, ιδιαίτερα για ορισμένα εναλλακτικά καύσιμα [67]. Ωστόσο, η κλίμακα εξακολουθεί να είναι ένα σημαντικό μέτρο κατά την αξιολόγηση εναλλακτικών καυσίμων για κινητήρες CI, καθώς μετρά άμεσα την ποιότητα της αυτόματης ανάφλεξης.

Το καύσιμο και ο αέρας αναμιγνύονται έντονα και σχηματίζουν ένα εύφλεκτο μείγμα κατά την περίοδο καθυστέρησης ανάφλεξης. Η φυσική καθυστέρηση περιλαμβάνει θέρμανση και εξάτμιση του υγρού καυσίμου, σχηματίζοντας ένα καύσιμο μείγμα. Η χημική καθυστέρηση περιλαμβάνει αντιδράσεις προανάφλεξης που διαλύουν το καύσιμο υδρογονάνθρακα και δημιουργούν ρίζες, ακολουθούμενη από εξαιρετικά εξώθερμη αντίδραση που οδηγεί στην προαναμεμιγμένη φάση καύσης ψεκασμού ντίζελ [68]. Η θερμότητα της εξάτμισης και η θερμοκρασία αυτόματης ανάφλεξης παίζουν βασικούς ρόλους σε αυτά τα στάδια.

Το Σχήμα 50 δείχνει ένα εννοιολογικό μοντέλο της συμβατικής καύσης ψεκασμού ντίζελ [69]. Η φλόγα διάχυσης παραμένει μακριά από το ακροφύσιο, όπου η απόσταση αναφέρεται ως μήκος ανύψωσης (lift-off length, LOL) [68]. Σε γενικές γραμμές, η εκπομπή καπνού που λαμβάνεται από την ουρά είναι τελικό αποτέλεσμα του ανταγωνισμού μεταξύ σχηματισμού αιθάλης και της διαδικασίας οξειδωσης. Η διαδικασία σχηματισμού αιθάλης μπορεί να χωριστεί σε σχηματισμό σωματιδίων και ανάπτυξη σωματιδίων. Τα προϊόντα μετά την οξειδωση ή / και πυρόλυσης από το μόριο καυσίμου αποτελούνται κυρίως από διάφορα ακόρεστους υδρογονάνθρακες, ιδιαίτερα ακετυλένιο και υψηλότερα τα ανάλογά της ( $C_2H_2$ ), και πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAH). Αυτοί οι δύο τύποι μορίων θεωρούνται οι πιο πιθανό πρόδρομοι αιθάλης στις φλόγες [42]. Το ύψος του αέρα, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για τη μείωση της τοπικά πλούσιας καύσης περιοχής και την καταστολή του σχηματισμού αιθάλης, αυξάνεται με την αύξηση την απόσταση του μήκους ανύψωσης [71], [72].



Σχήμα 53: Συμβατική καύση πετρελαίου σε κινητήρα ανάφλεξης με συμπίεση [42]

Τα εναλλακτικά καύσιμα με διαφορετικές φυσικοχημικές ιδιότητες οδηγούν σε κινητήρες με διαφορετικές επιδόσεις και δυνατότητες. Τα χαρακτηριστικά των εναλλακτικών καυσίμων διαμορφώνονται διαρκώς με στόχο να επιτευχθεί η καλύτερη και ασφαλή λειτουργία των κινητήρων [42].

### 5.6.2. BIONTIZEA

Το βιοντίζελ είναι ένα εναλλακτικό καύσιμο βασισμένο σε βιολογικές πρώτες ύλες. Μια ποικιλία πρώτων υλών λαδιού μπορεί να μετατραπεί σε καύσιμο. Αυτά περιλαμβάνουν φυτικό έλαιο, ζωικό λίπος και απόβλητα μαγειρικά έλαια. Τα κραμβέλαιο και τα σογιέλαια είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες για καύσιμα βιοντίζελ. Το σογιέλαιο αντιπροσώπευε μόνο το 65% της παραγωγής των ΗΠΑ το 2013 [42]. Η επαναχρησιμοποίηση των χρησιμοποιημένων μαγειρικών ελαίων έχει προσελκύσει την προσοχή, επειδή μπορεί να εξαλείψει τα προβλήματα διάθεσης [75]. Το βιοντίζελ που προέρχεται από μαγειρικό λάδι παρουσίασε τις χαμηλότερες εκπομπές WTW GHG, με περίπου 82% εκπομπές GHG σε σύγκριση με το συμβατικό ντίζελ [42]. Οι προτιμήσεις των πρώτων υλών διαφέρουν σε διαφορετικές χώρες, βάσει του περιφερειακού κόστους παραγωγής, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των γεωργικών στρατηγικών.

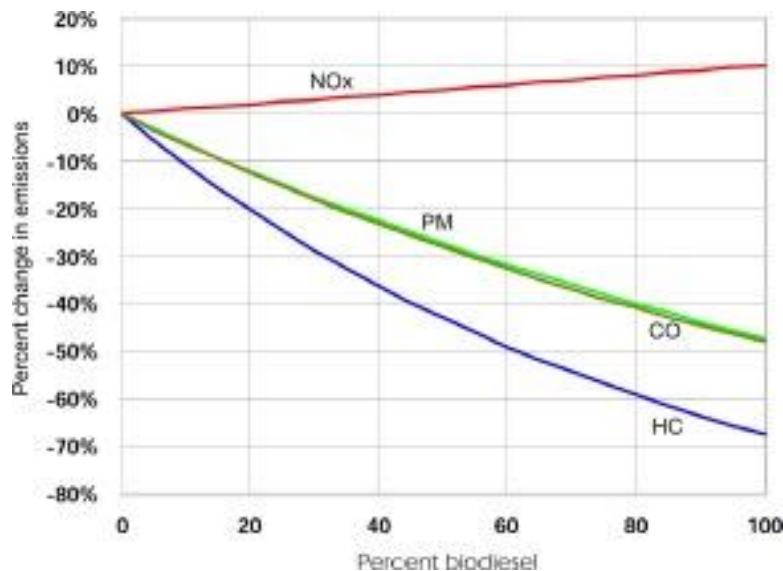
Στο επίκεντρο του βιοντίζελ δεύτερης γενιάς στο πρώτο στάδιο είναι η χρήση γεωργικών καταλοίπων. Επιτυχημένα παραδείγματα βιώσιμης εμπορικής παραγωγής βιοντίζελ από υπολείμματα υπάρχουν σήμερα σε ανεπτυγμένες χώρες όπως οι ΗΠΑ και η Ευρώπη [76]. Ορισμένες μελλοντικές πρώτες ύλες όπως τα φύκια δείχνουν τεχνικές υποσχέσεις, όσον αφορά την αποτελεσματική χρήση των πόρων και τον ελάχιστο ανταγωνισμό με τη βιομηχανία τροφίμων. Ωστόσο, τέτοιες μέθοδοι παραγωγής παραμένουν δαπανηρές και δεν εμπορεύονται ακόμη αποτελεσματικά [80]. Λόγω της πολυπλοκότητας των κύκλων παραγωγής βιοντίζελ, οι εκπεμπόμενοι ρύποι (well-to-wheel (WTW) and greenhouse gas (GHG)) εξαρτώνται από την πρώτη ύλη και την τεχνολογία παραγωγής.

Ωστόσο, οι τρέχουσες εκτιμήσεις δείχνουν ότι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (well-to-wheel, WTW) μπορεί να μειωθεί σε περίπου 50% σε σύγκριση με το συμβατικό ντίζελ [42]. Μόνο για το βιοντίζελ, ή για ανάμειξη με συμβατικό ντίζελ, έχει επιβληθεί κανονισμός σε ορισμένες χώρες [77]. Τα μείγματα με μικρά τμήματα βιοντίζελ δεν απαιτούν σημαντικές τροποποιήσεις στον κινητήρα, επειδή τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του βιοντίζελ είναι γενικά παρόμοια με αυτά του ντίζελ, ωστόσο, υπάρχουν κάποιες διαφορές.

Το LHV του βιοντίζελ είναι μικρότερο από αυτό του συμβατικού ντίζελ, ενώ γενικά έχει υψηλότερο αριθμό κετανίου. Το βιοντίζελ παρουσιάζει επίσης υψηλότερο σημείο ανάφλεξης σε σύγκριση με το συμβατικό ντίζελ, το οποίο είναι πλεονεκτικό για την

αποθήκευση καυσίμου και την ασφάλεια μεταφοράς. Το βιοντίζελ έχει υψηλότερα σημεία νέφους και ροής σε σύγκριση με το συμβατικό ντίζελ, λόγω του υψηλότερου ποσοστού κορεσμένων λιπαρών οξέων [42].

Σύμφωνα με μελέτες του EPA (2002) προέκυψαν οι εκπομπές ρύπων από βιοντίζελ, τα συνολικά αποτελέσματα για τις εκπομπές CO, HC, NO<sub>x</sub> και αιωρούμενα σωματίδια απεικονίζονται στο Σχήμα 51 [78]. Καθώς η συγκέντρωση βιοντίζελ αυξήθηκε σε σύγκριση με το ντίζελ, παρατηρήθηκε μια σαφής τάση μειωμένων εκπομπών CO, πράγμα που σημαίνει υψηλότερη απόδοση καύσης. Αυτά τα αποτελέσματα οφείλονται στην οξυγονωμένη φύση του βιοντίζελ, όπου υπήρχε περισσότερο οξυγόνο για καύση και για τη μείωση των εκπομπών στα καυσαέρια [79]. Βοήθησε επίσης στην προώθηση σταθερής και πλήρους καύσης παρέχοντας οξυγόνο στη ζώνη πυρόλυσης. Η περιεκτικότητα σε οξυγόνο μπορεί να μειώσει τις τοπικά υπερ-πλούσιες περιοχές και να περιορίσει τον σχηματισμό πρωτογενών σωματιδίων, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως σχετικά με τον ψεκασμό καυσίμου. Άλλες μελέτες οδήγησαν στο ότι ο ισχυρός δεσμός οξυγόνου και άνθρακα παρέμεινε άθικτος, εμποδίζοντας το να καταστεί διαθέσιμο για παραγωγή αιθάλης [80]. Τα άτομα άνθρακα (C) με συνδεδεμένα άτομα οξυγόνου (O) σε μόρια καυσίμου δεν μπορούσαν να συμβάλουν στην παραγωγή αιθάλης. Διεξήχθη έρευνα σχετικά με τα μορφολογικά και συνθετικά χαρακτηριστικά του βιοντίζελ (waste cooking oil, WCO) σε κινητήρα ανάφλεξης με συμπίεση μέσω ηλεκτρονικής μικροσκοπίας μετάδοσης (transmission electron microscopy, TEM), θερμοβαρυστρικής ανάλυσης (thermogravimetric analysis, TGA) και στοιχειακής ανάλυσης (elemental analysis, EA) [79].



Σχήμα 54: Μέσες επιπτώσεις εκπομπών καυσίμων βιοντίζελ σε κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση [78]



Τα σωματίδια αιθάλης από το βιοντίζελ αποτελούνται από μικρότερα πρωτογενή σωματίδια από αυτά του συμβατικού ντίζελ. Και τα αποτελέσματα θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης (thermogravimetric analysis, TGA) και στοιχειακής ανάλυσης (elemental analysis, EA) έδειξαν ότι η αιθάλη βιοντίζελ περιείχε περισσότερο διαλυτό οργανικό κλάσμα (SOF) από το ντίζελ, δείχνοντας μια ταχύτερη διαδικασία οξείδωσης, και λιγότερο ανθρακούχα είδη. Ενώ τα σωματίδια αιθάλης βιοντίζελ (waste cooking oil, WCO) περιείχαν μεγάλη ποσότητα περιεκτικότητας σε οξυγόνο έως και 9,44%, η αιθάλη ντίζελ έδειξε μόνο 3,09% της περιεκτικότητας σε οξυγόνο [42].

### 5.6.3. ΔΙΜΕΘΥΛΑΙΘΕΡΑΣ

Οδιμεθυλαιθέρας (Di-methyl ether, DME) χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες ως προωθητικό αερολύματος στη βιομηχανία προσωπικής φροντίδας. Έχει κερδίσει την προσοχή ως ένα καθαρό εναλλακτικό καύσιμο για το υγραέριο, το ντίζελ και τη βενζίνη, με φυσικές ιδιότητες πολύ παρόμοιες με εκείνες του υγραερίου. Προσφέρει αξιοσημείωτο δυναμικό όχι μόνο ως καύσιμο αυτοκινήτων, αλλά και για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και σε οικιακές εφαρμογές όπως η θέρμανση και το μαγείρεμα. Οδιμεθυλαιθέρας (DME), το οποίο αναμένεται επίσης να παραχθεί από πόρους βιομάζας στο μέλλον, είναι ελκυστικό ως λύση για την ενεργειακή βιωσιμότητα και περιβαλλοντικά προβλήματα [81].

Ο διμεθυλαιθέρας (DME) μπορεί να προέρχεται από πολλές πηγές, όπως ορυκτά καύσιμα (φυσικό αέριο και άνθρακας) και ανανεώσιμα υλικά (βιομάζα, απόβλητα και γεωργικά προϊόντα). Υπάρχουν δύο μέθοδοι για την παραγωγή DME ως καυσίμου σε μεγάλη ποσότητα με σχετικά χαμηλό κόστος. Οι μέθοδοι περιλαμβάνουν (1) μια διαδικασία δύο σταδίων (έμμεση μέθοδος) προσθήκης ενός σταδίου αφυδάτωσης στο τελευταίο μέρος της βιομηχανικής επεξεργασίας μεθανόλης και (2) μια διαδικασία ενός σταδίου (άμεση μέθοδος) σύνθεσης DME απευθείας από αέριο σύνθεσης ( $H_2, CO$ ). Ορισμένες πρόσφατες εξελίξεις στις μεθόδους σύνθεσης του διμεθυλαιθέρα (DME), τις συμβατικές διαδικασίες και τις καινοτόμες τεχνολογίες στο σχεδιασμό αντιδραστήρων, και οι χρησιμοποιούμενοι καταλύτες επέτρεψαν την αποτελεσματική παραγωγή του [82]. Συνολικά, το ποσό παραγωγής είναι μικρό, περίπου 150.000 τόνοι παγκοσμίως [81].

Παρόλο που η αποδοτικότητα της δεξαμενής (WTT) για διμεθυλαιθέρα (DME) είναι χαμηλή, λόγω των απομακρυσμένων τοποθεσιών αερίου και της σπατάλης θερμότητας από την παραγωγή καυσίμων, η συνολική απόδοση του WTW (well-to-wheel) είναι γενικά συγκρίσιμη με εκείνη των οχημάτων με καύσιμουγροποιημένο αέριο πετρελαίου (LPG) και συμπιεσμένο φυσικό αέριο (CNG), κυμαινόμενο περίπου 18% –19% (ενώ το καύσιμο ντίζελ είναι 25,7%) [82]. Οι εκπομπές WTW  $CO_2$  (συμπεριλαμβανομένων όλων των εκπομπών  $CO_2$  από την παραγωγή έως την καύση) για διμεθυλαιθέρα (DME) που προέρχονται από ορυκτά καύσιμα ήταν επίσης συγκρίσιμες με εκείνες των καυσίμων ντίζελ και συμπιεσμένο φυσικό αέριο (CNG), ενώ ο διμεθυλαιθέρας (DME) που προέρχεται από το βιολογικό υλικό ήταν σχεδόν το 1/5 του καυσίμου ντίζελ. Ωστόσο, οι ανησυχίες σχετικά με το κόστος υλοποίησης υλικού κινητήρα που προορίζονται για καύσιμα διμεθυλαιθέρα (DME) μπορεί να είναι ένα



ζήτημα λόγω ορισμένων ιδιοτήτων του, όπως χαμηλή λιπαντικότητα και υψηλός συντελεστής ελαστικότητας.

Όσον αφορά τις NOx κατά την καύση διμεθυλαιθέρα (DME) υπάρχουν ορισμένα αμφιλεγόμενα αποτελέσματα υπάρχουν για εκπομπές. Η συντομότερη καθυστέρηση ανάφλεξης του, η οποία συνέβαλε σε μικρότερη ποσότητα προ-αναμεμιγμένης φάσης καύσης, ήταν ένας από τους λόγους για τη μείωση των εκπομπών NOx, σε σύγκριση με εκείνη με το ντίζελ. Αν και ο διμεθυλαιθέρα (DME) είναι ένα οξυγονωμένο καύσιμο, η απελευθέρωση ελεύθερου οξυγόνου βρέθηκε περιορισμένη και ασήμαντη στον σχηματισμό NOx μέσω υπολογισμών χημικής κινητικής. Η υψηλότερη ειδική θερμική ικανότητα του διμεθυλαιθέρα (DME), εκτός από τον βραδύτερο ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας λόγω του χαμηλότερου LHV από αυτόν του ντίζελ, μπορεί να συμβάλει στη χαμηλότερη μέγιστη θερμοκρασία αδιαβατικής φλόγας και σε μικρότερη ποσότητα NOx σχηματισμός σε σύγκριση με αυτόν του ντίζελ. Υψηλότερη εκπομπή NOx μπορεί να σχηματιστεί όταν προχωρήσει ο χρόνος έγχυσης του διμεθυλαιθέρα (DME). Η γρηγορότερη έναρξη της απελευθέρωσης θερμότητας αποδίδει ταχύτερη διαδικασία συσσώρευσης θερμοκρασίας μέσα στον κύλινδρο, όπου το υπόλοιπο καύσιμο μπορεί να καεί σε υψηλότερες συνθήκες θερμοκρασίας, σε σύγκριση με τις καταστάσεις με το ντίζελ. Τέτοια περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας που προκαλείται από την ταχύτερη απελευθέρωση θερμότητας οδήγησε σε υψηλότερες NOx σχηματισμό [42].

#### 5.6.4. ΝΕΦΤΙ

Μελέτες σχετικά με την ανάφλεξη συμπίεσης (gasoline compression ignition, GCI) που χρησιμοποιούν καύσιμα τύπου βενζίνης με ανώτερη αντοχή στην αυτόματη ανάφλεξη και υψηλότερη πτητικότητα, ισχυρίζονται ότι η νάφθα είναι κατάλληλη για τη δημιουργία καλά προαναμεμιγμένου ή σωστά στρωματοποιημένου μίγματος πριν από την ανάφλεξη και για τη μείωση των εκπομπών NOx και αιωρούμενων σωματιδίων, διατηρώντας παράλληλα παρόμοια απόδοση [83]. Η έρευνα διεξαχθεί τόσο στους μετασκευασμένους εμπορικούς κινητήρες βενζίνης [84] όσο και στους μετασκευασμένους πετρελαιοκινητήρες για υψηλότερη αναλογία συμπίεσης [85]. Λόγω της υψηλής αντοχής στην ανάφλεξη της βενζίνης σε συνθήκες χαμηλού φορτίου, ορισμένοι ερευνητές πρότειναν ότι το βέλτιστο καύσιμο για κινητήρες ανάφλεξης συμπίεσης βενζίνης θα ήταν πολύ λιγότερο επεξεργασμένο καύσιμο, όπως η νάφθα.

Το ελαφρύ κλάσμα που προκύπτει από απόσταξη και βρασμό, σε ένα εύρος θερμοκρασιών που κυμαίνεται από 30°C έως και 200°C καλείται νάφθα. Η νάφθα αποτελείται από μείγμα μορίων υδρογονανθράκων που με την σειρά του αποτελούνται από 5 έως και 11 άτομα άνθρακα. Επιπλέον, η νάφθα είναι μέρος του αργού πετρελαίου και κατά βάρος κατέχει το ποσοστό από 15% έως και 30%. Ο αριθμός RON της νάφθας είναι περίπου 70. Βασικό χαρακτηριστικό της νάφθας είναι ότι κατατάσσεται στα προϊόντα με την μικρότερη μεταποίηση κατά την διάρκεια διύλιση της, άρα απαιτεί και την μικρότερη ενέργεια για την παραγωγή της. Επιπλέον παρουσιάζει την μικρότερη επίδραση της στο CO<sub>2</sub> σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα (βενζίνη και πετρέλαιο). Επίσης, το οικονομικό κόστος για την παραγωγή της είναι σε χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με την βενζίνη. Όπου η σύγκριση



*Σύγχρονες ΜΕΚ και οι εφαρμογές τους στην κίνηση και την βιομηχανία με τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας*

γίνεται λόγω ότι παρουσιάζουν πανομοιότυπες ιδιότητες. Επιπλέον, ελαφριά κλάσματα όπως η νάφθα θα είναι άμεσα διαθέσιμα και θα μπορούσαν να είναι πλεόνασμα, καθώς η ζήτηση μετατοπίζεται προς βαρύτερα καύσιμα για χρήση στις εμπορικές μεταφορές [86].





### 5.6.5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΓΙΑ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ (CI)

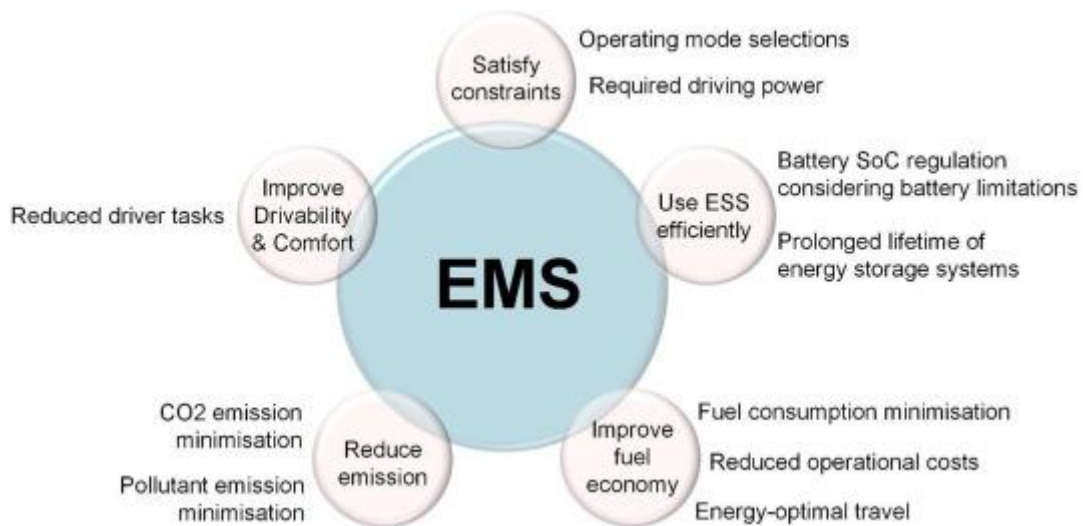
Πίνακας 7: Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων για κινητήρες ανάφλεξης συμπίεσης (CI) και εμπορικά καύσιμα ντίζελ [42].

Είδος	Καύσιμο πετρελαίου	JP-8	Βιοντίζελ	Διμεθυλαιθέρας (DME)	Νέφτι
Χημική δομή	-	-	-	CH <sub>3</sub> -O-CH <sub>3</sub>	
Αριθμός κετανίου	52,8	45	46-64	> 55	31-41
Αριθμός οκτανίου [RON]	-	-	-	-	65.6
Πυκνότητα υγρού (kg / m <sup>3</sup> )	0,82	0,79	0,70-0,89	0,667	0,758
Χαμηλή τιμή θέρμανσης (MJ / kg)	42.5	43.4	41-42	27.6	43,99
Κινητικό ιξώδες (στα 313 K) (cSt)	2.6	1.2	4.5	<0,1	-
Θερμοκρασία αυτόματης ανάφλεξης (K)	508	483	-	523	498

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία στόχευε στην ανάλυση και την περιγραφή των Μηχανών Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ) στην κίνηση και στην βιομηχανία με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας με ταυτόχρονη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων. Οι «νέες» τεχνολογίες βασίζονται όχι μόνο στην πιθανή βελτίωση και μείωση των καυσίμων αλλά και την μείωση των εκπομπών βασίζονται στην επιλογή της τοπολογίας και τις στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας.

Ωστόσο, οι στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας βασίζονται σε πλήθος παραγόντων όπως είναι η βελτίωση της οικονομίας καυσίμου, η μείωση των εκπεμπόμενων αερίων, η διασφάλιση άρτιας λειτουργίας, η αποθήκευση ενέργειας και η διατήρηση της κατάστασης φόρτισης λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που παρουσιάζονται στην εκάστοτε περίπτωση. Το σχήμα 52 δίνει μια γενική επισκόπηση των στόχων της στρατηγικής διαχείρισης ενέργειας για τις δύο βασικές κατηγορίες των υβριδικών και ηλεκτρικών οχημάτων



Σχήμα 55: Γενική επισκόπηση των στόχων διαχείρισης ενέργειας [35]

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν πραγματοποιηθεί πλήθος μελετών με στόχο να διασφαλίζονται οι στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας μέσω των νέων τεχνολογιών που αφορούν την κίνηση και την βιομηχανία. Οι στρατηγικές αυτές βασίζονται σε τρεις βασικούς παράγοντες που είναι η τήρηση των κανόνων, στην βελτιστοποίηση των συστημάτων και στην μάθηση και ενημέρωση των νέων συστημάτων.



Ωστόσο, ο βασικός παράγοντας εξοικονόμησης ενέργειας είναι η χρήση εναλλακτικών καυσίμων. Το μεγαλύτερο μέρος (έως και 90%) της πρόωσης για μεταφορά θα εξακολουθήσει να βασίζεται στον κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICE), ακόμη και έως το 2040. Σύμφωνα με τα δεδομένα που έχουν προκύψει, η παγκόσμια ζήτηση καυσίμων στον τομέα της μεταφοράς αναμένεται να παρουσιάσει αυξητική τάση που θα κυμαίνεται από 1,2% έως και 1,4% ετησίως. Με στόχο την αντιμετώπιση αυτής της ζήτησης, έχουν αναπτυχθεί πλήθος συζητήσεων όχι μόνο για την τρέχουσα κατάσταση αλλά και για την μελλοντική, δίνοντας έμφαση στη χρήση εναλλακτικών καυσίμων και καυσίμων φιλικών προς το περιβάλλον. Οι προσπάθειες για την αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων υλοποιείται με σκοπό όχι μόνο την ενεργειακή ασφάλεια και βιωσιμότητα αλλά και την αναζήτηση νέων ωφελειών όπως βελτίωση της απόδοσης των κινητήρων και εκμηδένιση των εκπεμπόμενων αέριων ρύπων.

Τα τελευταία χρόνια διακρίνεται μια σταδιακή εισχώρηση στην αγορά καυσίμων των βιοκαυσίμων και του φυσικού αερίου, καυσίμων δηλαδή με μειωμένες εκπομπές άνθρακα κατά την καύση τους. Αυτό θεωρείται ως μια θετική εξέλιξη για την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ιδιαίτερα σε μακροχρόνια βάση. Οι προηγμένες τεχνολογίες στη διαδικασία παραγωγής βιοκαυσίμων έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα. Ωστόσο, αν δεν υπάρξει μια ουσιαστική αλλαγή λόγω της αυξημένης ζήτησης για κατανάλωση ενέργειας αναμένεται ραγδαία αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας, η λύση μπορεί να δοθεί μόνο από την εντατική χρήση των εναλλακτικών καυσίμων με ταυτόχρονη όμως βελτίωση της απόδοσης των κινητήρων [42].

Η ανάπτυξη νέων κινητήρων με χρήση εναλλακτικών καυσίμων είναι επιτακτική ανάγκη και συνεπάγεται ότι και η βιομηχανία των καυσίμων θα πρέπει να ανταπεξέλθει στις νέες ανάγκες και στους περιορισμούς που τίθενται από το νομοθετικό πλαίσιο κάθε χώρας για τον καθορισμό και την μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Επιπροσθέτως, η βιομηχανία που είτε κατασκευάζει είτε κάνει χρήση ορυκτών καυσίμων για την λειτουργία της, πρέπει να δεχθεί την πρόκληση για την δημιουργία αποτελεσματικών και «καθαρών» κινητήρων. Σημειώνεται ότι η βελτίωση της απόδοσης των κινητήρων δεν μπορεί να διαχωριστεί από την ποιότητα του καυσίμου (δηλαδή των αριθμό οκτανίων) και κατ' επέκταση από την λειτουργία της βιομηχανίας των διωλιστηρίων. Η έλευση του εξελιγμένου άμεσου ψεκασμού υψηλής πίεσης (CRDI) στον κινητήρα ανάφλεξης με συμπίεση δεν θα είχε αναπτυχθεί χωρίς δραστικά βελτιωμένες ιδιότητες του πετρελαίου. Η αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση υγρών καυσίμων με βάση το πετρέλαιο και εναλλακτικών καυσίμων, καθώς και η ανισότητα της ζήτησης μεταξύ διαφόρων καυσίμων, θα επέφερε τελικά φιλική συνεργασία μεταξύ της αυτοκινητοβιομηχανίας και των βιομηχανιών με τις βιομηχανίες των διωλιστηρίων [42].



*Σύγχρονες ΜΕΚ και οι εφαρμογές τους στην κίνηση και την βιομηχανία με τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας*



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μακρής Γ., 2015, Προσομοίωση Σύνθετης Στρόβιλο – Υπερπλήρωσης σε Μόνιμη και Μεταβατική Λειτουργία με τη χρήση του Υπολογιστικού Πακέτου GT – Power, εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
2. Ηλεκτρονική Εγκυκλοπαίδεια <https://el.wikipedia.org/wiki/>
3. Σουλτισιώτης Ν., 2011, Μηχανές εσωτερικής Καύσης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη .
4. Μαυρίδης Κ., 2007, Μηχανές Εσωτερικής Καύσης, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα
5. Γιαννόπουλος Α. και Μεγαγιάννης Δ., 2016, Μελέτη Συστήματος Υπερτροφοδότησης Κινητήρων Μηχανών Εσωτερικής Καύσης, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας.
6. Φάτσης Α, 2020, ΜΕΚ, Διαλέξεις Μ4, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Χαλκίδας.
7. Καπετζώνης Ν., 2011, Συστήματα άμεσης έγχυσης καυσίμου βενζινοκινητήρων (F.S.I.), Έκδοση Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ηράκλειο
8. <http://www.catskillarchive.com/rrextra/apchpt05.html>
9. Αρχοντίσης Π., 2008, Εγκυκλοπαίδεια της βελτίωσης του αυτοκινήτου Power Pedia, Έκδοση Option Press, Αθήνα
10. Γιακουμής Ε.Γ., Παρουσιάσεις Μαθήματος "Μηχανές Εσωτερικής Καύσης Ι", ΕΜΠ, 2005-2015.
11. Κορώνη Ε., Θερμοδυναμική 1, Θερμικές Μηχανές, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, [http://users.ntua.gr/koronaki/THERMAL\\_ENGINES\\_FINAL.pdf](http://users.ntua.gr/koronaki/THERMAL_ENGINES_FINAL.pdf)
12. Κλιάνης Λ., Νικολός Ι., και Σιδέρης Ι., Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως. Εκδόσεις Ιδρύματος Ευγενίδου, Αθήνα, 2002
13. Αποστολόπουλος Χ., 2020, Παλινδρομικές και περιστροφικές ΜΕΚ, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό ίδρυμα Ελλάδας, Πάτρα.
14. <https://blog.klm.com/sir-frank-whittle/>
15. <http://hugojunkers.bplaced.net/junkers-jumo-004.html>
16. [http://www.aviation-history.com/airmen/frank\\_whittle.htm](http://www.aviation-history.com/airmen/frank_whittle.htm)
17. Heinz Grohe, 1990, Otto und Dieselmotoren. 9 Auflage, Vogel Buchverlag.
18. Βαϊκίδης Μ., 2014, Διερεύνηση της επίδρασης της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής στη διάρκεια του κύκλου στην εκτίμηση της ισχύος κινητήρων Ντήζελ, Εκδόσεις Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
19. Heywood J.B., 1988, Internal combustion engine fundamentals, McGraw-Hill Inc, New York
20. <https://savannarx7.wordpress.com/2016/01/14/>
21. Πολυζάκης Α., 2012, Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Παραγωγή Ενέργειας - Προώθηση, θεωρία, Ρ.Η.Σ Πτολεμαΐδα



22. <https://valadis-kotorlos.blogspot.com/2015/08/normal-0-false-false-false-el-x-none-x.html>
23. [https://www.ohio.edu/mechanical/thermo/Intro/Chapt.1\\_6/Chapter5.html](https://www.ohio.edu/mechanical/thermo/Intro/Chapt.1_6/Chapter5.html)
24. <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/thermodynamics/thermodynamic-cycles/carnot-cycle-carnot-heat-engine/example-of-carnot-efficiency-problem-with-solution/>
25. Μανωλάκος Δ., Σημειώσεις Μαθήματος Εφαρμοσμένη θερμοδυναμική, [https://mediasrv.uaa.gr/eclass/modules/document/file.php/612/L3\\_Otto\\_Diesel\\_Cycle%20%2831\\_slides%29.pdf](https://mediasrv.uaa.gr/eclass/modules/document/file.php/612/L3_Otto_Diesel_Cycle%20%2831_slides%29.pdf)
26. [https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/MECH261/Chapter\\_09.pdf](https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/MECH261/Chapter_09.pdf)
27. <http://3epal-esp-n-filad.att.sch.gr/download/Diesel1.pdf>
28. V. Krithika and C. Subramani, 2017, A comprehensive review on choice of hybrid vehicles and power converters, control strategies for hybrid electric vehicles, International journal of energy research.
29. Amir Fazeli, Amir Khajepour, Cecile Devaud, 2011, A novel compression strategy for air hybrid engines, Department of Mechanical and Mechatronic Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Canada
30. Γεωργιάδης Π., 2014, Τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας και σύγχρονες τάσεις για την κίνησης οχημάτων, ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας και Θράκης, Καβάλα
31. <https://blog.spotawheel.gr/hybridiko-autokinito-osa-prepei-na-ksereis/>
32. <http://www.futuremobility.gr/alternative-energy/emobility/hybrid-electric-vehicles/exartimata-ivridikwn-kai-ilektrikwn-oximatwn>
33. Μηνάς Γεώργιος, 2012, Μελέτη προσθηκών για μετατροπή Συμβατικού αυτοκίνητου σε υβριδικό, Τ.Ε.Ι Σερρών, Σέρρες
34. <http://iceal.wikidot.com/hybrid>
35. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119308044>
36. Μπομπολάκη Ε., 2015, Ανάλυση Λειτουργίας Κυψελών Καυσίμου και Μοντελοποίηση τους με τη Χρήση του Λογισμικού Simulink, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
37. [https://www.researchgate.net/figure/fig2\\_233987484](https://www.researchgate.net/figure/fig2_233987484)
38. <https://www.energy.gov/eere/electricvehicles/electric-vehicle-basics>
39. Σιγάλας Ν. και Μιγγίρης, 2018, Ηλεκτροκίνητα οχήματα και έξυπνο δίκτυο, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Αιγάλεω
40. Ρίκου Ε., 2005, Μέθοδοι εξοικονόμησης ενέργειας σε ηλεκτροκίνητα οχήματα, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα
41. J.B. Heywood, 1981, Prog. Energy Combust. Sci., 7, pp. 155-184
42. Choongsi kBae and Jaeheun Kim. 2016, Alternative fuels for internal combustion engines Proceedings of the Combustion Institute, Volume 36, Issue 3, 2017, Pages 3389-3413
43. U.S. Energy Information Administration, International Energy Outlook 2013, U.S. Department of Energy, Washington, DC (July 2013) DOE/EIA-0484
44. International Energy Agency (IEA), Energy Technology Perspective (ETP) 2014, 2014, ISBN 978-92-64-20800-1.



- 45.
46. International Energy Agency (IEA), Transport, Energy and CO<sub>2</sub>, 2009, ISBN 978-92-64-07316-6.
47. International Energy Agency (IEA), Energy Technology Perspective (ETP) 2012, ISBN 978-92-64-17488-7.
48. The Outlook for Energy: A View to 2040, Exxonmobil.
49. G.T. Kalghatgi, Int. J. Eng. Res., 15 (2014), pp. 1-17
50. J. Yu, C. Bae, Proc. Inst. Mech. Eng. Part D: J. Automobile Eng., 217 (2003), pp. 1135-1144
51. U.S. Department of Energy, Clean Cities Alternative Fuel Price Report, January 2014.
52. A.C. Hansen, Q. Zhang, P.W. Lyne, Bioresour. Technol., 2005, 96 pp. 277-285
53. U.S. Energy information administration (EIA), International Energy Statistics, 2012.
54. Heywood J. B., 2018, Internal combustion engine fundamentals. McGraw-Hill Education
55. Robert Bosch GmbH, 2006, Gasoline-Engine Management: System and Components, (third edition), John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, England.
56. Edwards, R., Larivé, J. F., Rickeard, D., Hass, H., Lonza, L., & Maas H., 2014, Well-to-Wheels report version 4a. JEC Well-to-Wheels analysis. Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. JRC technical reports, 1-98.
57. P. Mello, G. Pelliza, R. Cataluna, R. da Silva, 2006, Fuel, 85, pp. 2180-2186
58. J. Jeon, C. Bae, Int. J. Hydrogen Energy, 38 (2013), pp. 265-273
59. H. Guo, W.S. Neill, Int. J Hydrogen Energy, 38 (2013), pp. 11429-11437
60. S. Niaz, T. Manzoor, A.H. Pandith, Renewable Sustainable Energy Rev, 50 (2015), pp. 457-469
61. Raslavičius, L., Keršys, A., Mockus, S., Keršienė, N., & Starevičius, M. (2014). Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 32, 513-525.
62. Lawankar, S. M. (2013). Influence of compression ratio and ignition timing on the performance of LPG fuelled SI engine (No. 2013-01-2889). SAE Technical Paper.
63. L. Raslavičius, A. Keršys, S. Mockus, N. Keršienė, M. Starevičius, Renewable Sustainable Energy Rev, 32 (2014), pp. 513-525
64. X. Zhen, Y. Wang, Renewable Sustainable Energy Rev, 52 (2015), pp. 477-493
65. R.C. Costa, J.R. Sodre, 2010, Fuel, 89 pp. 287-293
66. R.K. Niven, 2005, Renewable Sustainable Energy Rev, 9, pp. 535-555
67. Robert Bosch GmbH, 2005, Diesel-Engine Management: System and Components, (fourth ed.), Bentley Publishers, Cambridge, MA, USA
68. P. Richards, 2014, (third ed.), Automotive Fuels Reference Book, 15096, SAE International, Warrendale, PA



69. M.P.B Musculus, P.C. Miles, L.M. Pickett, 2013, Prog. Energy Combust. Sci., 39, pp. 246-283
70. J.E. Dec, 1997, SAE Technical Paper 970873
71. C.A. Idicheria, L.M. Pickett, 2006, SAE Technical Paper 2006-01-3434.
72. L.M. Pickett, D.L. Siebers, 2004, Non-Sooting, SAE Technical Paper 2004-01-1399,
73. L.M. Pickett, J. Manin, C.L. Genzale, D.L. Siebers, M.P.B. Musculus, C.A. Idicheria, SAE Int. J. Engines, 4 (2011), pp. 764-799
74. J.E. Dec, R.E. Canaan, 1998, SAE Technical Paper, 980147.
75. S.L. Plee, T. Ahmad, J.P. Myers, 1982, 19th International Symposium on Combustion, pp. 1495-1502
76. M.G. Varanda, G. Pinto, F. Martins, 2011, Fuel Process. Technol., 92, pp. 1087-1094
77. R. Albrecht, J. Robinson, 2015, Bioenergy, N.B.B., USA/Academic Press, Boston, pp. 561-563
78. A. Eisentraut, 2010, Sustainable Production of Second-Generation Biofuels, International Energy Agency
79. United States Environmental Protection Agency (EPA), 2002, Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions, EPA420-02-001
80. J. Hwang, Y. Jung, C. Bae, 2015, SAE Int. J. Fuels Lubr., 8, pp. 290-297
81. C.K. Westbrook, W.J. Pitz, H.J. Curran, J. Phys. Chem. A, 110, 2006, pp. 6912-6922
82. DME Handbook, Japan DME Forum, 2001.
83. C. Arcoumanis, C. Bae, R. Crookes, E. Kinoshita, 2008, Fuel, 87, pp. 1014-1030
84. G.T. Kalghatgi, P. Risberg, H. Ångström, 2006, SAE Technical Paper 2006-01-3385
85. J. Chang, G.T. Kalghatgi, A. Amer, Y. Viollet, 2012, SAE Technical Paper 2012-01-0677.
86. K. Akihama, H. Kosaka, Y. Hotta, et al., 2008, SAE Int. J. Fuels Lubr., , pp. 920-932
87. J. Chang, G.T. Kalghatgi, A. Amer, P. Adomeit, H. Rohs, B. Heuser, 2013, SAE Int. J. Engines, 6, pp. 101-119
88. J. Rijpkema, K. Munch and S.B. Andersson, 2018, Thermodynamic potential of twelve working fluids in Rankine and flash cycles for waste heat recovery in heavy duty diesel engines, Department of Industrial and Information Engineering and Economics, University of L'Aquila, v. G. Gronchi, 18, 67100 L'Aquila, Italy
89. [https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/internal-combustion-engine-market?fbclid=IwAR1ae9jAyoZ\\_K9Tep9UoIxjGitQ3ifys2LIZrgHHPGeiB4POmKyyurcliw](https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/internal-combustion-engine-market?fbclid=IwAR1ae9jAyoZ_K9Tep9UoIxjGitQ3ifys2LIZrgHHPGeiB4POmKyyurcliw)