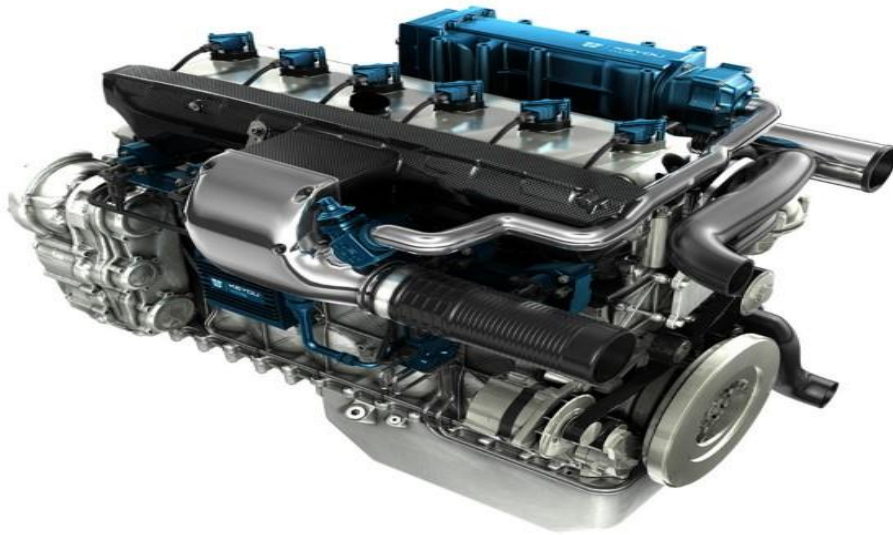


Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τμήμα Μηχανολογίας
Τομέας Ενέργειας

Πτυχιακή εργασία:

**ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ
ΚΑΥΣΗΣ**



Κυριάκος Μαργαρίτης AM: 7493

Νίκος Σουλίρας AM: 7096

Επιβλέπων Καθηγητής: Κωνσταντίνος Μαυρίδης

Πάτρα 2020-2021

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτή τη πτυχιακή θα δοθεί έμφαση στο στοιχείο του υδρογόνου μέσω των φυσικών ιδιοτήτων καθώς και των χημικών ιδιοτήτων και θα επεξηγηθούν οι μέθοδοι παρασκευής του, οι τρόποι αποθήκευσής του καθώς και οι χρήσεις του.

Επί του πρακτέου θα γίνει ανάλυση των μηχανών εσωτερικής καύσης, με αναφορά στα σπουδαιότερα είδη κινητήρων. Κάποιοι από τους κινητήρες αυτούς πήραν το όνομά τους από τους ιδρυτές τους και κάποιοι από την διαδρομή της στροφαλοφόρου ατράκτου. Ωστόσο όλοι τους αποτελούν μια από τις μεγαλύτερες ανακαλύψεις του 20^{ου} αιώνα. Για αυτό άλλωστε θα παρατεθεί και σύντομη αναδρομή στην ιστορία και στην εξέλιξη των αυτοκινούμενων οχημάτων.

Στην πορεία θα μελετηθεί η χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο στις μηχανές εσωτερικής καύσης με βάση τα χαρακτηριστικά του αλλά και τα μειονεκτήματα-πλεονεκτήματα που θα φέρει. Παράλληλα θα γίνει σύγκριση ρύπων μεταξύ λειτουργίας με υδρογόνο και με βενζίνη, θα αναφερθούν οι τρόποι τροφοδοσίας καυσίμου και ο σχηματισμός του μίγματος. Ερευνάται το φαινόμενο της ανώμαλης καύσης στις ΜΕΚ υδρογόνου και τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού και λειτουργίας τους.

Μετέπειτα θα γίνει σύγκριση του υδρογόνου με άλλα καύσιμα καθώς θα αναφερθούν οι συνδυασμοί του υδρογόνου και οι εφαρμογές με χρήση δύο καυσίμων.

Στο τέλος καταδεικνύονται λεπτομέρειες σχετικά με τα πρότυπα οχήματα που χρησιμοποιούν τις ΜΕΚ υδρογόνου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

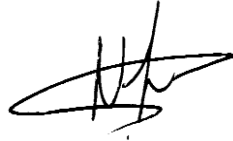
Αρχικά θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή και μέντορά μας, κ. Κωνσταντίνο Μαυρίδη για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε και την καθοδήγησή του. Η άρτια προσέγγισή του μας έδωσε την απαραίτητη ώθηση ώστε να διευρύνουμε τις γνώσεις μας σχετικά με τις μηχανές εσωτερικής καύσης και να εντρυφήσουμε πάνω στο θέμα.

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

Οι Φοιτητές

(Μαργαρίτης Κυριάκος)

(Νίκος Σουλίρας)



.....
(Υπογραφή)

.....
(Υπογραφή)

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

- PEM = Polymer electrocute membrane electrolyzes (Ηλεκτρολύτης μεμβράνης πολυμερούς ηλεκτρολύτη)
- MECs = Microbial electrolysis cells (Μικροβιακά κύτταρα ηλεκτρόλυσης)
- PEC = Photoelectrochemical hydrogen production (Φωτοηλεκτροχημικός διαχωρισμός νερού)
- STP = Standard temperature and pressure (Κανονικές συνθήκες)
- CNT = Carbon nanotubes (Νανοσωλήνες άνθρακα)
- SWCNT = Single-wall carbon nanotubes (Νανοσωλήνες άνθρακα μονού τοιχώματος)
- MWCNT = Multi-wall carbon nanotubes (Νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων)
- ΑΝΣ = Άνω νεκρό σημείο
- ΚΝΣ = Κάτω νεκρό σημείο
- EGR = Exhaust gas recirculation (Τεχνική ανακυκλοφορίας των καυσαερίων)
- PFI = Port fuel injection (Έγχυση καυσίμου δια θυρίδας)
- DI ή FPI = Direct Injection ή Fuel Stratified Injection (Απευθείας έγχυση)
- ASTM= American Society for Testing and Materials (Αμερικάνικος Οργανισμός για τις Δοκιμές και τα Υλικά)
- CFD = Computational fluid dynamics (Υπολογιστική δυναμική ρευστού)
- CNG = Compressed natural gas (Συμπιεσμένο φυσικό αέριο)
- LNG = Liquefied natural gas (Υγροποιημένο φυσικό αέριο)
- THC = Τετραϋδροκανναβινόλη
- OEM = Original Equipment Manufacturer (Κατασκευαστής πρωτότυπου εξοπλισμού)
- ULEV = Ultra Low Emissions Vehicles (Οχήματα με εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα εκπομπών)
- MEK = Μηχανές εσωτερικής καύσης
- STCH Reactor = Solar Thermochemical Hydrogen Production Research Reactor=Ηλιακός θερμοχημικός ερευνητικός αντιδραστήρας παραγωγής υδρογόνου
- Άνγκστρεμ = 10^{-10} m
- $\varphi=1/\lambda \Rightarrow$ Λόγος ισοδυναμίας καυσίμου
- λ = Λόγος ισοδυναμίας αέρα
- FSR = λόγος των ταχυτήτων φλόγας σε ένα προβλεπτικό μοντέλο προσομοίωσης
- Re = αριθμός Reynolds

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
2. ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟ.....	11
2.1 Γενικά Στοιχεία Του Υδρογόνου.....	11
2.2 Μέθοδοι Παρασκευής Υδρογόνου.....	11
2.2.1 Παραγωγή υδρογόνου: Ηλεκτρόλυση.....	11
2.2.2 Παραγωγή υδρογόνου: Αναμόρφωση υγρού που προέρχεται από βιομάζα.....	13
2.2.3 Παραγωγή υδρογόνου: Αναμόρφωση του φυσικού αερίου.....	14
2.2.4 Παραγωγή υδρογόνου: Μετατροπή μικροβιακής βιομάζας.....	15
2.2.5 Παραγωγή υδρογόνου: Αεριοποίηση άνθρακα.....	16
2.2.6. Παραγωγή υδρογόνου: Θερμοχημικός διαχωρισμός του νερού.....	17
2.2.7. Παραγωγή υδρογόνου: Φωτοβιολογικό.....	18
2.2.8. Παραγωγή υδρογόνου: Φωτοηλεκτροχημικός διαχωρισμός νερού.....	18
2.3 Φυσικές Ιδιότητες Υδρογόνου.....	21
2.4 Χημικές Ιδιότητες Υδρογόνου.....	22
2.5 Τρόποι Αποθήκευσης Υδρογόνου.....	23
2.5.1 Αποθήκευση ως συμπιεσμένο αέριο.....	23
2.5.2 Αποθήκευση ως κρυογενικό υγρό.....	24
2.5.3 Αποθήκευση σε υδρίδια μετάλλων.....	25
2.5.4 Αποθήκευση σε νανοσωλήνες άνθρακα.....	26
2.6 Χρήσεις του Υδρογόνου.....	28
3 ΜΗΧΑΝΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ.....	29
3.1 Εισαγωγή.....	29
3.2 Δίχρονος Κινητήρας.....	29
3.3 Τετράχρονος Κινητήρας.....	30
3.4 Κινητήρας Otto (Βενζίνης).....	31
3.5 Κινητήρας Diesel (Πετρελαίου).....	34
4 ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΤΙΣ ΜΕΚ.....	37
4.1 Γενικά Στοιχεία του Υδρογόνου ως Καύσιμο.....	37
4.2 Θετικά και Αρνητικά του Υδρογόνου ως Μελλοντικός Φορέας Ενέργειας.....	38
4.3 Χαρακτηριστικά του Υδρογόνου ως Καύσιμο στις ΜΕΚ.....	40
4.3.1 Ευρύ Φάσμα Αναφλεξιμότητας.....	41
4.3.2 Χαμηλή Ενέργεια Ανάφλεξης.....	41
4.3.3 Υψηλή Θερμοκρασία Ανάφλεξης.....	41
4.3.4 Μεγάλη Ταχύτητα Καύσης.....	42

4.3.5 Χαμηλή Πυκνότητα και Υψηλή Κατά Μάζα Ενέργεια Καύσης	42
4.3.6 Υψηλός Συντελεστής Διάχυσης	42
4.3.7 Μικρή Απόσταση Σβησίματος-Εξάλειψη της Φλόγας.....	43
4.4 Παράγωγα Καύσης των MEK Υδρογόνου και Σύγκριση με Ρύπους των MEK Βενζίνης	43
4.4.1 MEK Υδρογόνου Και Οξειδία Του Αζώτου (NO _x).....	44
4.4.2 Παράμετροι που Αποτρέπουν τον Σχηματισμό NO _x	45
4.4.3 Μηχανισμοί Μείωσης Εκπεμπόμενων NO _x	46
4.4.4 Υπεροξείδιο του Υδρογόνου στις MEK Υδρογόνου	46
4.5 Φαινόμενα Ανώμαλης Καύσης στις MEK Υδρογόνου.....	47
4.5.1 Ανάφλεξη Εισαγωγής	47
4.5.2 Λόγοι Πρόκλησης Ανάφλεξης Στην Εισαγωγή	47
4.5.4 Προανάφλεξη.....	50
4.5.5 Αυτανάφλεξη	51
4.5.6 Κρουστική Καύση	51
4.5.7 Μοντελοποίηση Μη Φυσιολογικών Φαινομένων Καύσης	52
4.5.8 Αποφυγή Μη Φυσιολογικής Καύσης.....	53
4.6 Τρόποι Τροφοδοσίας Καυσίμου και Σχηματισμός του Μίγματος	54
4.6.1 Εξαερωτής.....	54
4.6.2 Έγχυση στην Πολλαπλή Εισαγωγή.....	54
4.6.3 Άμεση Έγχυση.....	55
4.6.4 Έγχυση στην Θυρίδα Εισαγωγής	56
4.7 Χαρακτηριστικά Σχεδιασμού και Λειτουργίας των MEK Υδρογόνου.....	56
4.7.1 Σύστημα Τροφοδοσίας Καυσίμου	56
4.7.2 Σύστημα Ανάφλεξης και Σπινθηριστές.....	57
4.7.3 Λίπανση των MEK Υδρογόνου.....	57
4.7.4 Τεχνικές Ψύξης Θαλάμου Καύσης.....	58
4.7.5 Σχεδιασμός Θαλάμου Καύσης	58
4.7.6 Βαθμός Συμπύεσης.....	58
4.7.7 Στρατηγική Ελέγχου του Φορτίου.....	58
5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕ ΑΛΛΑ ΚΑΥΣΙΜΑ	61
5.1 Επισκόπηση.....	61
5.2 Συνδυασμοί Υδρογόνου.....	63
5.2.1 Μείγματα που Κυριαρχούνται από Φυσικό Αέριο	63

5.2.2 Μείγματα που Κυριαρχούνται από Υδρογόνο.....	64
5.2.3 Πολλαπλά Μείγματα Αερίου	64
Τα πολλαπλά μίγματα δημιουργούνται με τέσσερις μεθόδους:	64
5.3 Εφαρμογές Διπλού Καυσίμου	65
5.3.1 Diesel και Biodiesel	65
5.3.2 Βενζίνη και Καύσιμα Αλκοόλης.....	65
6 ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕ ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	67
6.1.1 Ιστορία	67
6.1.2 Χαρακτηρισμός Οχημάτων Υδρογόνου	67
6.1.3 Οχήματα Μετατροπής	68
6.1.4 Οχήματα Κατανάλωσης Βιοκαυσίμων	68
6.1.5 Επισκόπηση των Οχημάτων Υδρογόνου.....	69
7. ΕΠΙΛΟΓΟΣ	71
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	72

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως είναι ευρέως γνωστό, τα τελευταία χρόνια, οι αλλαγές στο παγκόσμιο κλίμα και η ρύπανση του περιβάλλοντος έχουν σηματοδοτήσει την αφύπνιση της παγκόσμιας επιστημονικής κοινότητας. Οι καταστροφές που έχουν προκληθεί από μεγάλης έντασης καιρικά φαινόμενα, η άνοδος της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη, φαινόμενα όπως η διαβρωτική όξινη βροχή, η ερημοποίηση των εδαφών λόγω παρατεταμένης ανομβρίας και ξηρασίας και το ταχύτερο απ' ό,τι είχε προβλεφθεί λιώσιμο των πάγων στους πόλους αποτελούν τις αποδείξεις του περιβαλλοντικού εγκλήματος που συντελείται σήμερα. Αιτία αποτελεί η παράλογη χρήση των ορυκτών καυσίμων ως η ευχερής και οικονομικότερη λύση για την κάλυψη των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών.

Τρόποι απαλλαγής από την επερχόμενη καταστροφή υπάρχουν αλλά έχουν πολύ υψηλό κόστος. Κάποιοι εναλλακτικοί τρόποι βρίσκονται υπό έρευνα στα πανεπιστήμια και στα ερευνητικά κέντρα με σκοπό την αποφυγή των ορυκτών καυσίμων.

Από όσο φαίνεται το υδρογόνο αποτελεί την βάση του σύμπαντος και υπάρχει σε περίσσεια πάνω στην Γη, βέβαια τις περισσότερες φορές σε ενώσεις με άλλα στοιχεία (μέταλλα), αποτελεί μία από τις σημαντικότερες λύσεις για την κάλυψη των αναγκών όσον αφορά τα μέσα μεταφοράς. Ειδικοί προβλέπουν ότι στα επόμενα τριάντα με σαράντα χρόνια το υδρογόνο θα χρησιμοποιείται ως κύριο καύσιμο στις μηχανές εσωτερικής καύσης προτού χρησιμοποιηθεί έμμεσα για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος ούτως ώστε να τροφοδοτήσουν τους ηλεκτρικούς κινητήρες των αυτοκινήτων.

Σε αυτήν την πτυχιακή εργασία παρουσιάζεται η χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο στις μηχανές εσωτερικής καύσης όπως επίσης και στις κυψέλες καυσίμου. Αντικατοπτρίζονται όλες οι τελευταίες εξελίξεις σχετικά με την μορφή του υδρογόνου ως καύσιμο στις μηχανές εσωτερικής καύσης, τα κύρια εξαρτήματα του κινητήρα υδρογόνου, οι διαφορές του από τον κινητήρα βενζίνης καθώς και τα πλεονεκτήματα της καύσης υδρογόνου. Επιπρόσθετα θα γίνει εμβάθυνση στα προβλήματα που φέρει η καύση του υδρογόνου σε σχέση με την παραγωγή μηχανικού έργου, στην δημιουργία μιγμάτων και τέλος στην παρουσίαση οχημάτων τα οποία χρησιμοποιούν κινητήρες υδρογόνου.

2. ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟ

2.1 Γενικά Στοιχεία Του Υδρογόνου

Το υδρογόνο είναι ένα αμέταλλο με ατομικό αριθμό 1 και ατομικό βάρος 1,008. Είναι το πρώτο στοιχείο του περιοδικού πίνακα, συμβολίζεται με H και ανήκει στην ομάδα των αλκαλίων. Σε φυσιολογικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας βρίσκεται σε αέρια κατάσταση. Κατά την καύση του υδρογόνου (με το οξυγόνο) σχηματίζεται νερό. Το όνομα του στοιχείου το έδωσε ο Γάλλος χημικός Λαβουαζιέ (Antoine Lavoisier). Βρίσκεται σε περίσσεια όχι μόνο στην Γη αλλά ακόμα και στον Γαλαξία σε δεκαπλάσια αναλογία από ότι στον Ήλιο. Η μεγάλη αναλογία του ανέρχεται στο 75% της μάζας του (στο Σύμπαν), παρόλα ταύτα στον στερεό φλοιό της Γης βρίσκεται μόνο σε ποσοστό 0,14%.

Βρίσκεται σε εξίσου μεγάλο ποσοστό ως συστατικό του νερού σε αναλογία 11% σε θάλασσες, λίμνες, ποτάμια ,στους πάγους αλλά και στην ατμόσφαιρα. Όμως η αναλογία του ως ελεύθερο αέριο είναι μικρή λόγω των μορίων του, τα οποία κατευθύνονται προς το διάστημα. Το υδρογόνο συναντάται ακόμα και σε φυτικούς και ζωικούς ιστούς αλλά και στο πετρέλαιο.

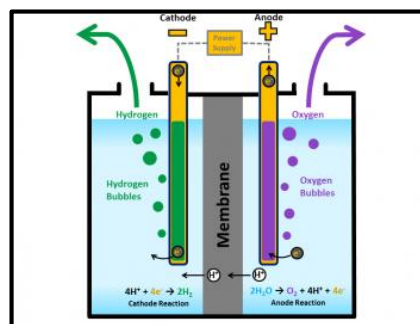
Ο Παρακέλσος (γιατρός του 16^ο αιώνα) ήταν ο πρώτος άνθρωπος που εξέτασε το υδρογόνο και παρατήρησε την έκλυση ενός εύφλεκτου αερίου σε διάφορα πειράματα μεταξύ μετάλλων και οξέων, όπου πίστευαν ότι είτε ήταν το υδρογόνο είτε άλλα καύσιμα αέρια όπως το μονοξείδιο του άνθρακα και αέριοι υδρογονάνθρακες. Το 1766 ο Κάβεντις (Henry Cavendish) παρουσίασε ότι το υδρογόνο, γνωστό τότε ως εύφλεκτος αέρας ή εύφλεκτο στοιχείο, διαφέρει από τα άλλα αέρια λόγω της χαμηλής πυκνότητάς του αλλά και από την συγκεκριμένη συγκέντρωσή του που παράγεται από αντιδράσεις οξέων και μετάλλων. Το 1781 ο Κάβεντις επαλήθευσε ότι το προϊόν που παίρνουμε από την καύση αυτού του αερίου είναι το νερό. Ο Γάλλος χημικός Λαβουαζιέ στηρίχτηκε σε αυτήν την επαλήθευση και του έδωσε το όνομα <<υδρογόνο>> η οποία ισχύει ακόμα και σήμερα. Το 1929 ο Γερμανός Μπόνχεφερ (Karl Friedrich Bonhoeffer) μαζί με τον Αυστριακό Χάρτεκ (Paul Harteck) ανακάλυψαν από παλαιότερες θεωρίες ότι το υδρογόνο είναι μίγμα δύο μορίων, του ορθό- και του παρά-υδρογόνου. Γενικώς το υδρογόνο λόγω της απλής μορφής του, χρησιμοποιείται ως πρότυπο σε πολυπλοκότερα άτομα, αφού τα αποτελέσματα που προκύπτουν για αυτό είναι πολύ πιθανό να αντιστοιχήσουν , ποιοτικά, και σε περιπτώσεις άλλων ατόμων [1].

2.2 Μέθοδοι Παρασκευής Υδρογόνου

2.2.1 Παραγωγή υδρογόνου:

Ηλεκτρόλυση

Η ηλεκτρόλυση είναι μια πολλά υποσχόμενη επιλογή για παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η ηλεκτρόλυση είναι η διαδικασία χρήσης ηλεκτρισμού για τη διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο. Αυτή η αντίδραση λαμβάνει χώρα σε μια μονάδα που ονομάζεται ηλεκτρολύτης. Οι ηλεκτρολύτες μπορούν να κυμαίνονται σε μέγεθος από μικρό εξοπλισμό μεγέθους συσκευών



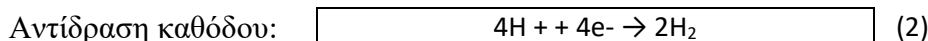
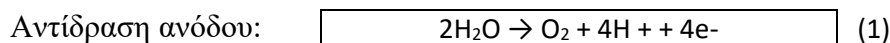
Εικόνα 1

που είναι κατάλληλο για μικρής κλίμακας κατανεμημένη παραγωγή υδρογόνου έως κεντρικές εγκαταστάσεις παραγωγής μεγάλης κλίμακας που θα μπορούσαν να συνδεθούν απευθείας με ανανεώσιμες ή άλλες μορφές ενέργειας μη εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου.

Λειτουργεί όπως τα στοιχεία καυσίμου, οι ηλεκτρολύτες αποτελούνται από μια άνοδο και μια κάθοδο που διαχωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη. Διαφορετικοί ηλεκτρολύτες λειτουργούν με ελαφρώς διαφορετικούς τρόπους, κυρίως λόγω του διαφορετικού τύπου υλικού ηλεκτρολύτη.

Ηλεκτρολύτης Μembrάνης Πολυμερούς Ηλεκτρολύτη (POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE ELECTROLYZERS)

Σε έναν ηλεκτρολύτη μεμβράνης πολυμερούς ηλεκτρολύτη (PEM), ο ηλεκτρολύτης είναι ένα στερεό ειδικό πλαστικό υλικό. Το νερό αντιδρά στην άνοδο για να σχηματίσει οξυγόνο και θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου (πρωτόνια). Τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος και τα ιόντα υδρογόνου κινούνται επιλεκτικά κατά μήκος του PEM στην κάθοδο. Στην κάθοδο, τα ιόντα υδρογόνου συνδυάζονται με ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα για να σχηματίσουν αέριο υδρογόνο.



Αλκαλικοί Ηλεκτρολύτες

Οι αλκαλικοί ηλεκτρολύτες έχουν ως αρχή λειτουργίας την μεταφορά ιόντων υδροξειδίου (OH^-) μέσω του ηλεκτρολύτη από την κάθοδο στην άνοδο με το υδρογόνο να παράγεται στην πλευρά της καθόδου. Οι ηλεκτρολύτες που χρησιμοποιούν ένα υγρό αλκαλικό διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου ή του καλίου ως ηλεκτρολύτη.

Ηλεκτρολύτες Στερεού Οξειδίου

Οι ηλεκτρολύτες στερεού οξειδίου, που χρησιμοποιούν το στερεό κεραμικό υλικό ως δότη αρνητικά φορτισμένων ιόντων οξυγόνου (O^{2-}) σε αυξημένες θερμοκρασίες, παράγουν υδρογόνο με ελαφρώς διαφορετικό τρόπο.

- Το νερό στην κάθοδο συνδυάζεται με ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα για να σχηματίσει αέριο υδρογόνο και αρνητικά φορτισμένα ιόντα οξυγόνου.
- Τα ιόντα οξυγόνου περνούν μέσω της στερεάς κεραμικής μεμβράνης και αντιδρούν στην άνοδο για να σχηματίσουν αέριο οξυγόνο και παράγουν ηλεκτρόνια για το εξωτερικό κύκλωμα.

Τα ηλεκτρολυτικά στερεού οξειδίου πρέπει να λειτουργούν σε θερμοκρασίες αρκετά υψηλές ώστε οι στερεές μεμβράνες οξειδίου να λειτουργούν σωστά (περίπου $700^\circ\text{--}800^\circ\text{C}$, σε σύγκριση με τα ηλεκτρολυτικά PEM, τα οποία λειτουργούν στους

70°–90°C, και τα εμπορικά αλκαλικά ηλεκτρολυτικά, τα οποία λειτουργούν στους 100°–150°C). Τα ηλεκτρολυτικά στερεού οξειδίου μπορούν να χρησιμοποιήσουν αποτελεσματικά τη διαθέσιμη θερμότητα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας τους (από τις διάφορες πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της πυρηνικής) για να μειώσουν το ποσό ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για να παραχθεί το υδρογόνο από το νερό. Το υδρογόνο που παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης μπορεί να οδηγήσει σε μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ανάλογα με την πηγή της χρησιμοποιούμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Η πηγή της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας—συμπεριλαμβανομένου του κόστους και της αποδοτικότητάς της, καθώς και των εκπομπών που προκύπτουν από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας—πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την αξιολόγηση των οφελών και της οικονομικής βιωσιμότητας της παραγωγής υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης [2].

2.2.2 Παραγωγή υδρογόνου: Αναμόρφωση υγρού που προέρχεται από βιομάζα

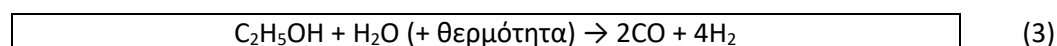
Τα υγρά που προέρχονται από βιομάζα - συμπεριλαμβανομένης της αιθανόλης και των βιο-ελαίων - μπορούν να αναμορφωθούν ώστε να παράγουν υδρογόνο σε μια διαδικασία παρόμοια με την αναμόρφωση του φυσικού αερίου. Τα υγρά που προέρχονται από βιομάζα μπορούν να μεταφερθούν ευκολότερα από τις πρώτες ύλες βιομάζας τους, επιτρέποντας την ημι-κεντρική παραγωγή ή πιθανώς κατανεμημένη παραγωγή υδρογόνου σε σταθμούς τροφοδοσίας. Η υγρή αναμόρφωση που προέρχεται από βιομάζα είναι μια μεσοπρόθεσμη τεχνολογική πορεία.

Οι πόροι βιομάζας μπορούν να μετατραπούν σε κυτταρινική αιθανόλη, βιοέλαια ή άλλα υγρά βιοκαύσιμα. Ορισμένα από αυτά τα υγρά μπορούν να μεταφερθούν με σχετικά χαμηλό κόστος σε σταθμό ανεφοδιασμού ή άλλο σημείο χρήσης και να αναμορφωθούν για την παραγωγή υδρογόνου. Άλλα (για παράδειγμα, βιο-έλαια) μπορούν να αναμορφωθούν επιτόπου.

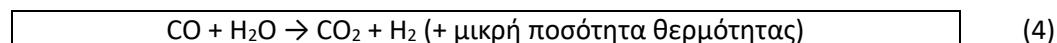
Η διαδικασία αναμόρφωσης υγρών, που προέρχονται από βιομάζα, σε υδρογόνο είναι αρκετά όμοια με την αναμόρφωση του φυσικού αερίου και περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- I. Το υγρό καύσιμο αντιδρά με ατμό σε υψηλές θερμοκρασίες παρουσία ενός καταλύτη για την παραγωγή ενός αναμορφωμένου αερίου που αποτελείται κυρίως από υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα και διοξείδιο του άνθρακα.
- II. Επιπλέον υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα παράγονται με αντίδραση του μονοξειδίου του άνθρακα (που δημιουργήθηκε στο πρώτο βήμα) με ατμό υψηλής θερμοκρασίας στην αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου.
- III. Τέλος, το υδρογόνο διαχωρίζεται και καθαρίζεται.

-Αντίδραση αναμόρφωσης ατμού (αιθανόλη)



-Αντίδραση αλλαγής νερού-αερίου



Τα υγρά που προέρχονται από βιομάζα, όπως η αιθανόλη και τα βιο-έλαια, μπορούν να παραχθούν σε μεγάλες, κεντρικές εγκαταστάσεις που βρίσκονται κοντά στην πηγή της βιομάζας για να επωφεληθούν από οικονομίες κλίμακας και να μειώσουν το κόστος μεταφοράς της στερεής πρώτης ύλης βιομάζας. Τα υγρά έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και με κάποια αναβάθμιση μπορεί να μεταφερθεί με ελάχιστη νέα υποδομή παράδοσης και με σχετικά χαμηλό κόστος σε καταναμημένους σταθμούς ανεφοδιασμού, ημι-κεντρικές εγκαταστάσεις παραγωγής ή σταθερούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας για αναμόρφωση σε υδρογόνο [3].

2.2.3 Παραγωγή υδρογόνου: Αναμόρφωση του φυσικού αερίου

Το φυσικό αέριο περιέχει μεθάνιο (CH₄) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υδρογόνου με θερμικές διεργασίες, όπως η αναμόρφωση του ατμού-μεθανίου και η μερική οξείδωση.



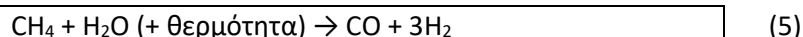
Εικόνα 2

ΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΤΜΟΥ-ΜΕΘΑΝΙΟΥ

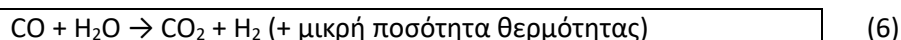
Το μεγαλύτερο μέρος της αναμόρφωση του ατμού-μεθανίου, είναι η διαδικασία παραγωγής στην οποία ο ατμός υψηλής θερμοκρασίας (700°C–1.000°C) χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου από μια πηγή μεθανίου, όπως το φυσικό αέριο. Στη αναμόρφωση του μεθανίου ατμού, το μεθάνιο αντιδρά με ατμό υπό πίεση 3-25 bar παρουσία καταλύτη για την παραγωγή υδρογόνου, μονοξειδίου του άνθρακα και σχετικά μικρής ποσότητας διοξειδίου του άνθρακα. Η αναμόρφωση ατμού είναι ενδόθερμη, δηλαδή η θερμότητα πρέπει να παρασχεθεί στη διαδικασία για την αντίδραση για να προχωρήσει.

Στη συνέχεια, σε αυτό που ονομάζεται «αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου» (water-gas shift reaction), το μονοξείδιο του άνθρακα και ο ατμός αντιδρούν χρησιμοποιώντας έναν καταλύτη για την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνο. Σε ένα από τα τελικά βήματα διαδικασίας που ονομάζεται «προσρόφιση πίεσης-ταλάντευσης», το διοξείδιο του άνθρακα και άλλες προσμίξεις απομακρύνονται από το ρεύμα αερίου, αφήνοντας ουσιαστικά καθαρό υδρογόνο. Η αναμόρφωση ατμού μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να παραχθεί υδρογόνο και από άλλα καύσιμα, όπως η αιθανόλη, το προπάνιο, ή ακόμα και η βενζίνη.

-Αντίδραση αναμόρφωσης ατμού-μεθανίου



-Αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου

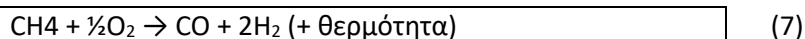


Μερική Οξείδωση

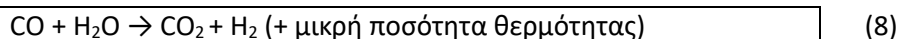
Το μεθάνιο και οι άλλοι υδρογονάνθρακες που απαρτίζουν το φυσικό αέριο αντιδρούν με περιορισμένη ποσότητα οξυγόνου (συνήθως από αέρα) που δεν επαρκεί για να οξειδώσει πλήρως τους υδρογονάνθρακες σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Με λιγότερη από τη στοιχειομετρική ποσότητα οξυγόνου, τα προϊόντα της αντίδρασης περιέχουν κυρίως υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα (και άζωτο, εάν η αντίδραση πραγματοποιείται με αέρα αντί καθαρού οξυγόνου), και σχετικά μικρή ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ενώσεων. Στη συνέχεια, μέσω μιας αντίδρασης μετατόπισης νερού-αερίου, το μονοξείδιο του άνθρακα αντιδρά με το νερό για να σχηματίσει διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο.

Η μερική οξείδωση είναι μια εξώθερμη διαδικασία - εκπέμπει θερμότητα. Η διαδικασία είναι, συνήθως, πολύ ταχύτερη από την αναμόρφωση του ατμού και απαιτεί μικρότερο δοχείο-αντιδραστήρα. Όπως μπορεί να φανεί στις χημικές αντιδράσεις μερικής οξείδωσης, αυτή η διαδικασία αρχικά παράγει λιγότερο υδρογόνο ανά μονάδα του καυσίμου εισόδου από αυτό που λαμβάνεται με αναμόρφωση του ατμού του ίδιου καυσίμου [4].

Μερική οξείδωση της αντίδρασης μεθανίου



Αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου



2.2.4 Παραγωγή υδρογόνου: Μετατροπή μικροβιακής βιομάζας

Οι διαδικασίες μετατροπής μικροβιακής βιομάζας εκμεταλλεύονται την ικανότητα των μικροοργανισμών να καταναλώνουν και να αποδομούν βιομάζα απελευθερώνοντας υδρογόνο. Ανάλογα με την διαδικασία, η έρευνα αυτή θα μπορούσε να οδηγήσει σε συστήματα εμπορικής κλίμακας στο μεσοπρόθεσμο έως μακροπρόθεσμο χρονικό πλαίσιο. Αυτά τα συστήματα θα μπορούσαν να είναι κατάλληλα για κατανεμημένες, ημι-κεντρικές ή κεντρικές κλίμακες παραγωγής υδρογόνου, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη. Σε συστήματα με βάση τη ζύμωση, μικροοργανισμοί, όπως βακτήρια, διασπών οργανικές ύλες για την παραγωγή υδρογόνου. Η οργανική ύλη μπορεί να είναι εκλεπτυσμένα σάκχαρα, ακατέργαστες πηγές βιομάζας, όπως καλαμπόκι ή ακόμη και λύματα. Επειδή δεν απαιτείται φως, αυτές οι μέθοδοι μερικές φορές ονομάζονται μέθοδοι «σκοτεινής ζύμωσης».

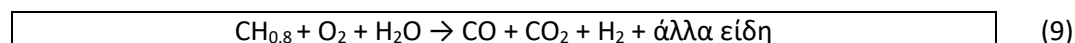
Στην άμεση ζύμωση υδρογόνου, τα μικρόβια είναι που παράγουν το υδρογόνο. Αυτά τα μικρόβια μπορούν να διασπάσουν σύνθετα μόρια μέσω πολλών διαφορετικών οδών και τα υποπροϊόντα ορισμένων από τις οδούς μπορούν να συνδυαστούν με ένζυμα για την παραγωγή υδρογόνου. Οι ερευνητές μελετούν πώς θα βελτιστοποιήσουν τα συστήματα ζύμωσης να παράγουν υδρογόνο σε μικρότερο χρόνο (βελτιώνοντας τον ρυθμό) όπως επίσης και σε μεγαλύτερες ποσότητες από την ίδια ποσότητα οργανικής ύλης (αυξάνοντας την απόδοση).

Τα μικροβιακά κύτταρα ηλεκτρόλυσης (Microbial Electrolysis Cells-MECs) είναι διατάξεις που αξιοποιούν την ενέργεια και τα πρωτόνια που παράγονται από μικρόβια, τα οποία με την σειρά τους αποδομούν την οργανική ύλη, κάνοντας χρήση επιπροσθέτως ηλεκτρικού ρεύματος, για την παραγωγή υδρογόνου. Αυτή η τεχνολογία είναι πολύ νέα, και οι ερευνητές εργάζονται για τη βελτίωση πολλών πτυχών του συστήματος, από την εύρεση υλικών χαμηλότερου κόστους μέχρι και τον εντοπισμό του πιο αποτελεσματικού τύπου των μικροβίων στη χρήση [5].

2.2.5 Παραγωγή υδρογόνου: Αεριοποίηση άνθρακα

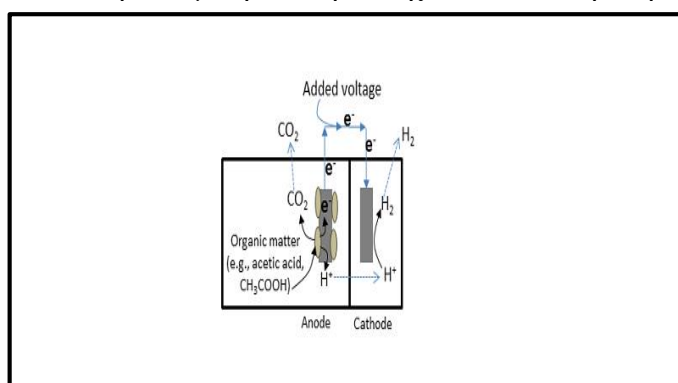
Χημικά, ο άνθρακας είναι μια πολύπλοκη και εξαιρετικά μεταβλητή ουσία που μπορεί να μετατραπεί σε ποικιλία προϊόντων. Η αεριοποίηση του άνθρακα είναι μια μέθοδος από την οποία μπορεί να παραχθεί ενέργεια, υγρά καύσιμα, χημικά και υδρογόνο. Συγκεκριμένα, το υδρογόνο παράγεται με πρώτη αντίδραση άνθρακα με οξυγόνο και ατμό υπό υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες για να σχηματίσει αέριο σύνθεσης, ένα μείγμα που αποτελείται κυρίως από μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο.

Αντίδραση αεριοποίησης άνθρακα (μη ισορροπημένη):



Μετά την απομάκρυνση των προσμίξεων από το αέριο σύνθεσης, το μονοξείδιο του άνθρακα στο μείγμα αερίου αντιδρά με ατμό μέσω της αντίδρασης μετατόπισης νερού-αερίου για την παραγωγή επιπλέον υδρογόνου και διοξειδίου του άνθρακα. Το υδρογόνο απομακρύνεται με ένα σύστημα διαχωρισμού, ενώ το πολύ συμπυκνωμένο ρεύμα διοξειδίου του άνθρακα μπορεί στη συνέχεια να κατακρατηθεί και να αποθηκευτεί.

Η παραγωγή υδρογόνου από άνθρακα προσφέρει επίσης περιβαλλοντικά οφέλη όταν ενσωματώνεται με προηγμένες τεχνολογίες για την παραγωγή ενέργειας, την αεριοποίηση, τη δέσμευση, χρήση και αποθήκευση του άνθρακα. Η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών διευκολύνει τη



Εικόνα 3

δέσμευση πολλών ρύπων όπως οξείδια του θείου, οξείδια του αζώτου, υδράργυρο και σωματίδια, καθώς και αέρια του θερμοκηπίου όπως το διοξείδιο του άνθρακα. Όταν το

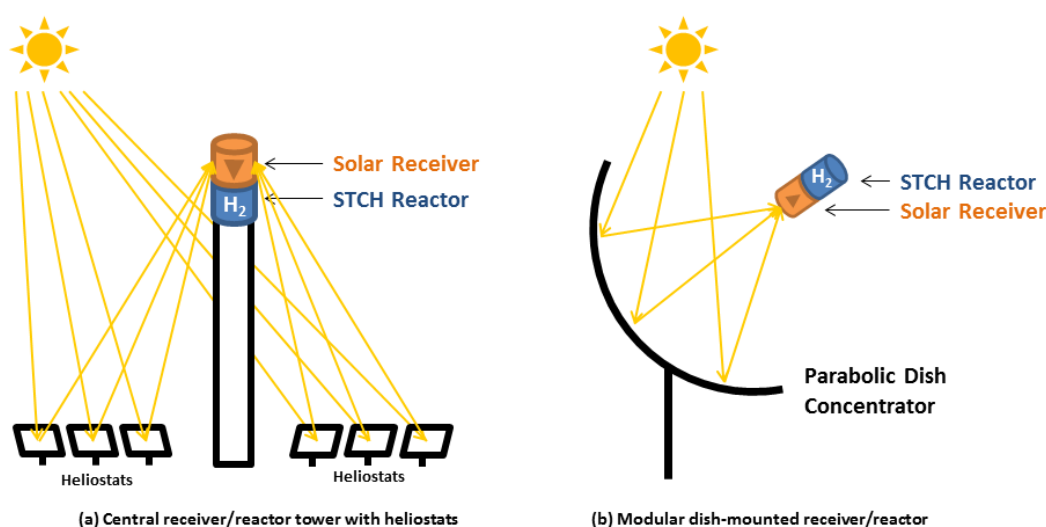
υδρογόνο χρησιμοποιείται σε αποδοτικά οχήματα με κυψέλες καυσίμου, οι εκπομπές από τον τομέα των μεταφορών μπορούν σχεδόν να εξαλειφθούν [6].

2.2.6. Παραγωγή υδρογόνου: Θερμοχημικός διαχωρισμός του νερού

Ο θερμοχημικός διαχωρισμός του νερού χρησιμοποιεί υψηλές θερμοκρασίες από συμπυκνωμένη ηλιακή ενέργεια ή από την απορριπτόμενη θερμότητα από πυρηνικές αντιδράσεις για την παραγωγή ενέργειας ή χημικές αντιδράσεις για την παραγωγή υδρογόνου και οξυγόνου από νερό.

Οι διεργασίες θερμοχημικού διαχωρισμού του νερού χρησιμοποιούν θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας (500 ° έως 2000 ° C) για να οδηγήσουν μια σειρά χημικών αντιδράσεων που παράγουν υδρογόνο. Οι χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία επαναχρησιμοποιούνται σε κάθε κύκλο, δημιουργώντας έναν κλειστό βρόχο που καταναλώνει μόνο νερό και παράγει υδρογόνο και οξυγόνο. Οι απαραίτητες υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να παραχθούν με τους ακόλουθους τρόπους:

- Συγκέντρωση του ηλιακού φωτός σε έναν πύργο αντιδραστήρα χρησιμοποιώντας ένα πεδίο από κάτοπτρα (ή «ηλιοστάτες»), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.
- Χρήση απορριπτόμενης θερμότητας από προηγμένους πυρηνικούς αντιδραστήρες.



Εικόνα 4

Δύο παραδείγματα κύκλων θερμοχημικού διαχωρισμού νερού είναι: **α.** ο «άμεσος» θερμικός κύκλος οξειδίου δημητρίου (cerium oxygen) δύο βημάτων και **β.** ο «υβριδικός» κύκλος χλωριούχου χαλκού, απεικονίζονται στο Σχήμα b. Συνήθως οι άμεσοι κύκλοι είναι λιγότερο περίπλοκοι με λιγότερα βήματα, αλλά απαιτούν υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας σε σύγκριση με τους πιο περίπλοκους υβριδικούς κύκλους.

Οι ηλιακοί και πυρηνικοί θερμοχημικοί κύκλοι διαχωρισμού του νερού υψηλής θερμοκρασίας παράγουν υδρογόνο με σχεδόν μηδενικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου

χρησιμοποιώντας νερό και ηλιακό φως ή πυρηνική ενέργεια ως πηγή θερμότητας [7],[8].

2.2.7. Παραγωγή υδρογόνου: Φωτοβιολογικό

Η διαδικασία παραγωγής φωτοβιολογικού υδρογόνου χρησιμοποιεί μικροοργανισμούς και το φως του ήλιου για να μετατρέψει το νερό ή μερικές φορές οργανική ύλη σε υδρογόνο. Πρόκειται για μια τεχνολογική οδό, που βρίσκεται στα πρώτα στάδια της έρευνας και έχει δυνατότητες για βιώσιμη παραγωγή υδρογόνου με χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις στο μέλλον.



Εικόνα 5

Στα φωτολυτικά βιολογικά συστήματα, μικροοργανισμοί—όπως τα πράσινα μικροφύκια ή τα κυανοβακτήρια—χρησιμοποιούν το φως του ήλιου για να χωρίσουν το νερό σε ιόντα οξυγόνου και υδρογόνου. Τα ιόντα υδρογόνου μπορούν να διοχετευτούν μέσω άμεσων ή έμμεσων οδών και να απελευθερωθούν ως αέριο υδρογόνο. Οι προκλήσεις που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι επιστήμονες για τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι τα χαμηλά ποσοστά παραγωγής υδρογόνου και το γεγονός ότι ο διαχωρισμός του νερού παράγει επίσης οξυγόνο, το οποίο με τη σειρά του αναστέλλει γρήγορα την αντίδραση παραγωγής υδρογόνου και μπορεί να αποτελέσει ζήτημα ασφάλειας όταν αναμιγνύεται με υδρογόνο σε συγκεκριμένες συγκεντρώσεις. Οι ερευνητές εργάζονται για να αναπτύξουν μεθόδους που θα επιτρέψουν στα μικρόβια να παράγουν υδρογόνο για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα και με μεγαλύτερο ρυθμό παραγωγής.

Ορισμένα φωτοσυνθετικά μικρόβια χρησιμοποιούν το φως του ήλιου ως μέσο για τη διάσπαση της οργανικής ύλης, απελευθερώνοντας υδρογόνο. Αυτό είναι γνωστό ως παραγωγή φωτο-ζυμωτικού υδρογόνου. Περιλαμβάνουν έναν πολύ χαμηλό ρυθμό παραγωγής υδρογόνου και χαμηλή απόδοση ηλιακού-υδρογόνου, καθιστώντας το εμπορικά μη βιώσιμο μονοπάτι για την παραγωγή υδρογόνου αυτή τη στιγμή.

Μακροπρόθεσμα, οι τεχνολογίες φωτοβιολογικής παραγωγής μπορούν να παρέχουν οικονομική παραγωγή υδρογόνου από το φως του ήλιου με εκπομπές άνθρακα χαμηλού έως και μηδενικού επιπέδου. Τα φύκια και τα βακτήρια θα μπορούσαν να αναπτυχθούν σε νερό που δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πόσιμο ή για γεωργία, και θα μπορούσε ενδεχομένως ακόμη και να χρησιμοποιηθούν λύματα [9].

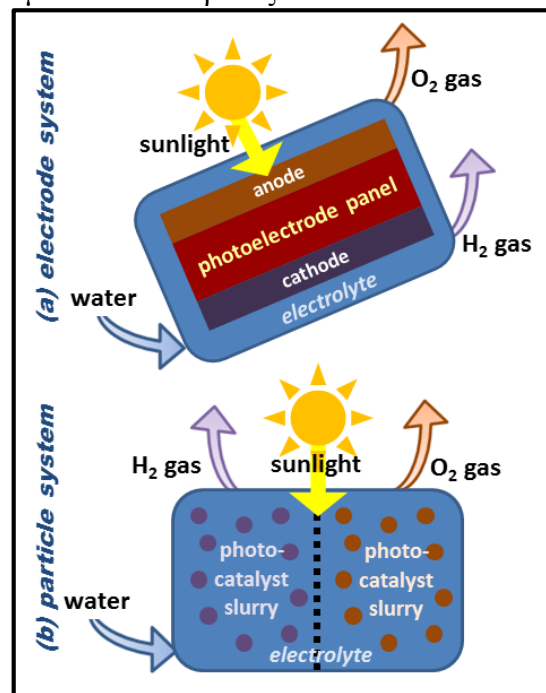
2.2.8. Παραγωγή υδρογόνου: Φωτοηλεκτροχημικός διαχωρισμός νερού

Στο διαχωρισμό του νερού φωτοηλεκτροχημικά (Photoelectrochemical Hydrogen Production-PEC), το υδρογόνο παράγεται από το νερό χρησιμοποιώντας το φως του ήλιου και εξειδικευμένους ημιαγωγούς που ονομάζονται φωτοηλεκτροχημικά υλικά. Τα υλικά αυτά απαιτούν μικρά ποσά ενέργειας για να διαχωρίσουν άμεσα τα μόρια του

νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο. Πρόκειται για μια μακροπρόθεσμη τεχνολογική οδό, με δυνατότητα χαμηλών ή καθόλου εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Η διαδικασία διαχωρισμού νερού PEC χρησιμοποιεί υλικά ημιαγωγών για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας απευθείας σε χημική ενέργεια με τη μορφή υδρογόνου. Τα υλικά ημιαγωγών που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία PEC είναι παρόμοια με εκείνα που χρησιμοποιούνται στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό μέσω φωτοβολταϊκών στοιχείων, αλλά στις εφαρμογές PEC ο ημιαγωγός βυθίζεται σε έναν ηλεκτρολύτη με βάση το νερό, όπου το φως του ήλιου ενεργοποιεί τη διαδικασία διαχωρισμού του νερού. Οι αντιδραστήρες PEC μπορούν να κατασκευαστούν σε μορφή <<πάνελς>> (παρόμοια με τα φωτοβολταϊκά) ως συστήματα ηλεκτροδίων ή ως συστήματα σωματιδίων που βασίζονται σε πολτό. Κάθε μία προσέγγιση έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και προκλήσεις. Μέχρι σήμερα, τα συστήματα <<πάνελς>> έχουν μελετηθεί ευρύτερα, λόγω των ομοιοτήτων με τις καθιερωμένες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών <<πάνελς>>.

Η Εικόνα 6 παρουσιάζει δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για τους αντιδραστήρες παραγωγής ηλιακού υδρογόνου PEC: α) συστήματα ηλεκτροδίων παρόμοια με φωτοβολταϊκά πάνελ επίπεδης πλάκας· και β) συστήματα σωματιδίων που αποτελούνται από πολτό σωματιδίων ημιαγωγών PEC.



Εικόνα 6

Το σχήμα 2 παρουσιάζει διαφορετικούς σχεδιασμούς αντιδραστήρων PEC για:

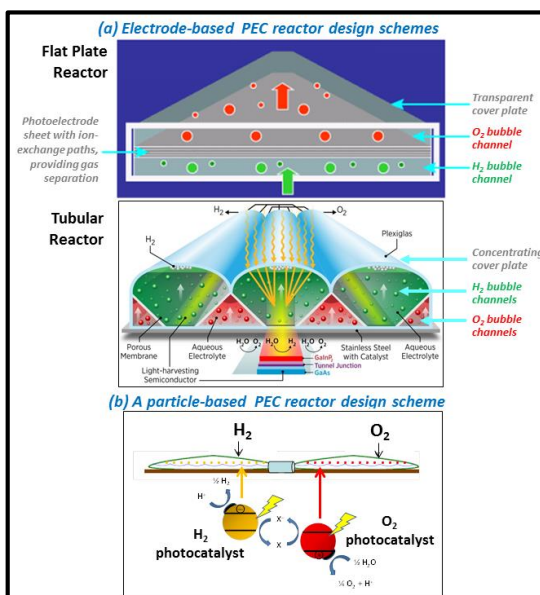
α) συστήματα ηλεκτροδίων, συμπεριλαμβανομένης μιας επίπεδης πλάκας και ενός σωληνωτού αντιδραστήρα (παρέχοντας μέτρια ηλιακή συγκέντρωση σε μία λωρίδα ηλεκτροδίου) και

β) ένας πλαστικός αντιδραστήρας σωματιδίων διπλής κλίνης καλυμμένος με πολτούς φωτοκαταλύτες.

Ο διαχωρισμός του νερού PEC είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος παραγωγής υδρογόνου εκμεταλλευόμενη την ηλιακή ενέργεια σε ημικεντρικές και κεντρικές κλίμακες, προσφέροντας τη δυνατότητα για υψηλή απόδοση μετατροπής και σε χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας χρησιμοποιώντας οικονομικά αποδοτικά υλικά ημιαγωγών λεπτής μεμβράνης ή / και σωματιδίων.

Απαιτούνται συνεχείς βελτιώσεις στην αποδοτικότητα, την ανθεκτικότητα και το κόστος για τη βιωσιμότητα της αγοράς. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη υλικών, συσκευών και συστημάτων PEC κάνει σημαντικά βήματα, επωφελούμενων από ισχυρές συνέργειες με σύγχρονες ερευνητικές προσπάθειες στον τομέα των σε φωτοβολταϊκών, της νανοτεχνολογίας και της τεχνολογίας των υλικών.

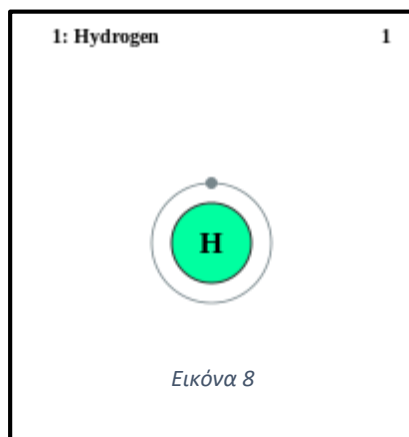
- Η αποτελεσματικότητα βελτιώνεται μέσω της ενισχυμένης απορρόφησης του ηλιακού φωτός και της καλύτερης επιφανειακής κατάλυσης.
- Η ανθεκτικότητα και η διάρκεια ζωής βελτιώνονται με πιο ανθεκτικά υλικά και προστατευτικά επιχρίσματα.
- Το κόστος παραγωγής υδρογόνου μειώνεται μέσω μειωμένων δαπανών υλικών και επεξεργασίας υλικών [10].



Εικόνα 7

2.3 Φυσικές Ιδιότητες Υδρογόνου

Το υδρογόνο σε κανονικές συνθήκες (STP) πίεσης και θερμοκρασίας είναι αέριο, άχρωμο, άγευστο και εύφλεκτο. Κάθε άτομο του αποτελείται από τον πυρήνα όπου γύρω του περιφέρεται ένα ηλεκτρόνιο.



Το υδρογόνο βρίσκεται στην φύση υπό την μορφή τριών ισοτόπων με μαζικούς αριθμούς 1,2 και 3. Το υδρογόνο H, είναι γνωστό ως ελαφρύ υδρογόνο ή υδρογόνο ή πρώτιο και οι πυρήνες των ατόμων του αποτελούνται από ένα μόνο πρωτόνιο. Το υδρογόνο D γνωστό και ως βαρύ υδρογόνο ή δευτέριο εμπεριέχεται στο υδρογόνο σε ποσοστό 0,0156% και οι πυρήνες των ατόμων του αποτελούνται από ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο. Τέλος το υδρογόνο T γνωστό και ως υπέρβαρο υδρογόνο εμπεριέχεται στο υδρογόνο σε ποσοστό

$10^{-16} - 10^{-15} \%$ και οι πυρήνες των ατόμων του αποτελούνται από ένα πρωτόνιο και δύο νετρόνια. Το τρίτο είναι ραδιενεργό με χρόνο ζωής τα 12,4 χρόνια και μπορεί να σχηματιστεί κατά την επίδραση των νετρονίων της κοσμικής ακτινοβολίας στο ατμοσφαιρικό άζωτο.

Συγκριτικά οι φυσικές ιδιότητες του πρώτιου και του δευτέρου:

Ατομικό Υδρογόνο	Πρώτιο	Δευτέριο
Ιδιότητα		
Σύμβολο	H	D
Ατομικός αριθμός	1	1
Ατομικό βάρος	1,008	2,02
Ενέργεια ιοντισμού (eV)	13,595	13,6
Ηλεκτροσυγγένεια (eV)	0,754	-
Πυρηνικό σπιν	1/2	1
Πυρηνικά μαγνητόνια	2,7927	0,8574
Ηλεκτραρνητικότητα (Pauling)	2,1	2,1
Σθένος	-1,+1	-1,+1
Ηλεκτρονική δομή	1S ¹	1S ¹
Μοριακό υδρογόνο		
Μήκος χημικού δεσμού (ώγκστρεμ)	0,7416	0,7416
Ενέργεια διάστασης (25°C)(kcal/mol)	104,19	105,97
Ενέργεια ιοντισμού (eV)	15,427	15,457
Σημείο τήξης (°C)	-259,20	-254,43
Σημείο ζέσης (°C)	-252,77	-249,49
Κρίσιμη θερμοκρασία (°C)	-240	-234,8
Κρίσιμη πίεση (atm)	13	16,4

Κρίσιμη (g/cm ³)	πυκνότητα	0,0310	0,0668
---------------------------------	-----------	--------	--------

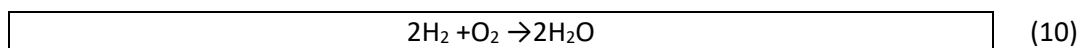
Παρατηρείται ότι το μοριακό υδρογόνο χαρακτηρίζεται από χαμηλά σημεία τήξης και ζέσης, και αυτό οφείλεται στις πολύ ασθενείς ελκτικές δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των μορίων του.

Το υδρογόνο είναι διαφανές στις υπέρυθρες, ορατές και υπεριώδεις φωτεινές ακτινοβολίες με μήκη κύματος μικρότερα των 1800Å (Ångström). Το αέριο υδρογόνο ακόμα, διαχέεται ταχύτερα από οποιοδήποτε άλλο αέριο ,λόγω του μικρού μοριακού βάρους αλλά και του ταχύτερου ρυθμού μετάδοσης της κινητικής ενέργειας μεταξύ των μορίων σε δεδομένη θερμοκρασία. Τέλος τα μόρια του υδρογόνου συνδέονται μεταξύ τους με ομοιοπολικούς δεσμούς δια μέσω ενός κοινού ζεύγους ηλεκτρονίων, και για αυτόν τον λόγο έχουμε και πολλές επιτρεπόμενες ενεργειακές στάθμες [11].

2.4 Χημικές Ιδιότητες Υδρογόνου

Το υδρογόνο ως αέριο είναι πολύ εύφλεκτο και καίγεται σε μεγάλο εύρος συγκέντρωσης στον αέρα, από 4% έως 75% κατ 'όγκο. Αυτό που επηρεάζει το εύρος είναι η θερμότητα ή το ηλιακό φως. Το υδρογόνο επίσης αναφλέγεται αυτόματα στον αέρα σε θερμοκρασίες άνω των 500°C καθώς και όταν απελευθερώνεται σε υψηλές πιέσεις. Οι καθαρές φλόγες υδρογόνου-οξυγόνου εκπέμπουν υπεριώδες φως και είναι σχεδόν αόρατες με γυμνό μάτι.

Το υδρογόνο ως αέριο τις περισσότερες φορές δεν αλληλοεπιδρά με άλλα χημικά στοιχεία σε θερμοκρασία δωματίου. Αυτό γίνεται επειδή ο δεσμός μεταξύ των ατόμων του υδρογόνου είναι πολύ δυνατός και πρέπει να μεταφερθούν τεράστια ποσά ενέργειας για να διασπαστεί. Έτσι, τα ξεχωριστά άτομα αντιδρούν με άλλα στοιχεία ή ενώσεις. Παρ' όλα αυτά αν θερμανθεί με φλόγα αυτό αντιδρά πολύ επιθετικά με το οξυγόνο για την παραγωγή νερού σύμφωνα με την παρακάτω χημική αντίδραση, εκλύοντας ταυτόχρονα ενέργεια.



Τα άτομα του υδρογόνου δημιουργούν ομοιοπολικούς δεσμούς όχι μόνο μεταξύ τους αλλά και με διαφορετικά στοιχεία, όπως τις ενώσεις του μεθανίου και του νερού. Οι δεσμοί αυτοί δεν είναι δυνατοί συνέχεια αλλά αποκολλούνται εύκολα από την επίδραση των οξέων, παράδειγμα που μας δείχνει την αποκόλληση είναι το αιθανικό οξύ (CH₃COOH). Διαλυόμενο σε νερό, ο χαλαρός δεσμός του υδρογόνου διασπάται, με το υδρογόνο να ελευθερώνει το ηλεκτρόνιο του και έτσι μετατρέπεται σε ιόν υδρογόνου (H⁺).

Το υδρογόνο επιπλέον σχηματίζει ιοντικούς δεσμούς, πχ το υδροχλώριο(HCl). Ο δεσμός πραγματοποιείται μεταξύ δυο μερικών ηλεκτρικών φορτίων υδρογόνου,

αντίθετης πολικότητας. Κάποια από τα στοιχεία που μπορεί να σχηματίσει δεσμό είναι : οξυγόνο, θείο, αζώτο, φθορίο ή χλωρίο(O, S, N, F ή Cl) . Η ενέργεια του δεσμού αυτού είναι μικρή και ένα παράδειγμα είναι το νερό στον πάγο, όπου τα άτομα του υδρογόνου ενός μορίου νερού βρίσκονται εκατέρωθεν εκείνου του οξυγόνου και έλκονται από άτομα οξυγόνου δύο γειτονικών μορίων που οδηγούν στην δημιουργία τρισδιάστατης μοριακής ένωσης. Ο δεσμός υδρογόνου οφείλεται σε μικρό ποσοστό στις δυνάμεις Van Der Waals ενώ έχουμε επιπρόσθετη δύναμη καθαρού χημικού δεσμού [11].

2.5 Τρόποι Αποθήκευσης Υδρογόνου

Το υδρογόνο έχει εξαιρετικά χαμηλή πυκνότητα ως αποτέλεσμα κατά την αποθήκευση του ως ασυμπιεστο ρευστό να καταλαμβάνει μεγάλο μέρος όγκου (σε 20°C και 1atm το 1kg H₂→11m³). Αυτό είναι και μία από τις ιδιότητες του που λειτουργεί ως ανασταλτικός παράγοντας στην άμεση ανάπτυξη και εδραίωση της οικονομίας του υδρογόνου. Για να χρησιμοποιηθεί το υδρογόνο ως καύσιμο και για να πετύχουμε απόδοση ενέργειας όσο εκείνη των συμβατικών καυσίμων θα πρέπει να αυξηθεί η πυκνότητα του έτσι ώστε η δεξαμενή καυσίμου να καταλαμβάνει λογικές διαστάσεις. Έτσι το υδρογόνο θα μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα όχημα με τους εξής τρόπους:

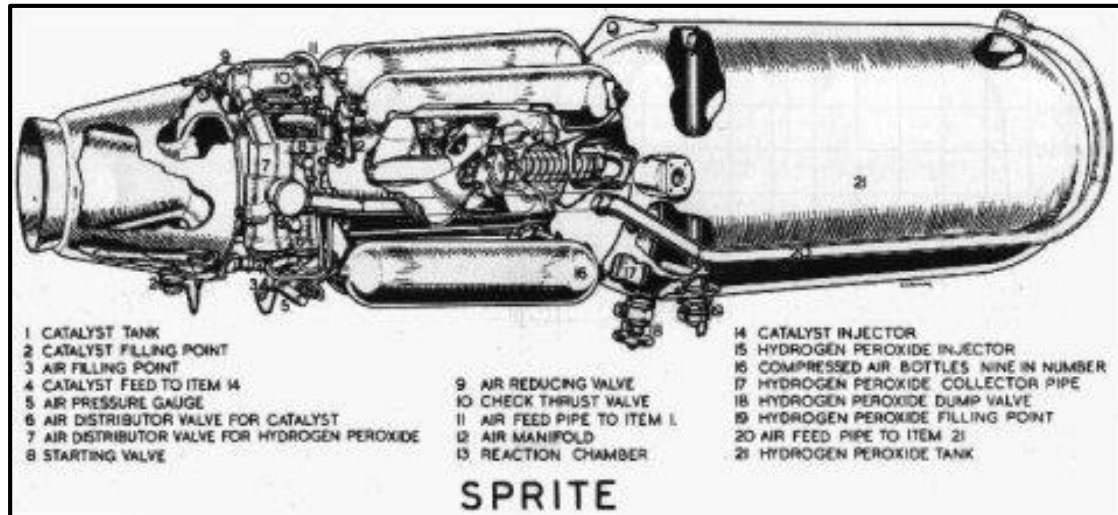
- Ως συμπιεσμένο αέριο σε υψηλές πιέσεις
- Ως κρυογενικό υγρό σε χαμηλές θερμοκρασίες
- Ως μεταλλικό υδρίδιο (το υδρογόνο σχηματίζει άλλες ενώσεις με συγκεκριμένα μέταλλα ή μεταλλικά κράματα)
- Ως αέριο υδρογόνο προσροφημένο από νανοσωλήνες άνθρακα (carbon nanotubes).

Συχνότερα χρησιμοποιείται η μέθοδος όπου το υδρογόνο είναι συμπιεσμένο ενώ πλέον υποσχόμενη είναι και η μορφή του ως μεταλλικό υδρίδιο. Όμως στις μέρες μας, ασχέτως του υψηλού κόστους και της πολυπλοκότητάς τους, τα συστήματα αποθήκευσης κρυογενικού υδρογόνου αποτελούν την χρυσή τομή μεταξύ βάρους και αυτονομίας [1].

2.5.1 Αποθήκευση ως συμπιεσμένο αέριο

Μία από τις συχνότερες μεθόδους αποθήκευσης του υδρογόνου είναι αυτή της συμπίεσης σε φιάλες αερίου όπου εκεί έχουμε πιέσεις από 345bar έως 690bar. Αυτή η μέθοδος αυξάνει την πυκνότητα του υδρογόνου αλλά ταυτόχρονα μειώνει τον όγκο με αποτέλεσμα να μπορεί να μεταφερθεί σε διαθέσιμο χώρο μέσα στο αυτοκίνητο. Για να πετύχει η συμπίεση του υδρογόνου θα πρέπει όμως να καταναλωθούν σημαντικά ποσά ενέργειας, κάτι το οποίο μειώνει την συνολική απόδοση του συστήματος και συγχρόνως αυξάνει το κόστος λειτουργίας. Οι φιάλες συνήθως είναι κατασκευασμένες από κράματα αλουμινίου ενισχυμένες με σύνθετα υλικά. Για παράδειγμα η αεροδιαστημική βιομηχανία κατασκευάζει κυλίνδρους, από ειδικό κράμα αλουμινίου και άνθρακα, οι οποίοι μπορούν να αποθηκεύσουν υδρογόνο σε πιέσεις έως και 700bar

[1],[12].



Εικόνα 9

1. Δεξαμενή Καταλύτη
2. Σημείο πλήρωσης καταλύτη
3. Σημείο πλήρωσης αέρα
4. Τροφοδοσία καταλύτη στον εγχυτήρα
5. Μετρητής πίεσης αέρα
6. Βαλβίδα διανομής αέρα για καταλύτη
7. Βαλβίδα διανομής αέρα για υπεροξείδιο του υδρογόνου
8. Βαλβίδα εκκίνησης
9. Βαλβίδα μείωσης αέρα
10. Βαλβίδα ελέγχου εμπιστοσύνης
11. Σωλήνας τροφοδοσίας αέρα προς την του δεξαμενή καταλύτη
12. Συσκευή πολλαπλού αέρα
13. Θάλαμος αντίδρασης
14. Εγχυτήρας καταλύτη
15. Εγχυτήρας υπεροξειδίου του υδρογόνου
16. Μπουκάλια πεπιεσμένου αέρα
17. Σωλήνας συλλογής υπεροξειδίου του υδρογόνου
18. Βαλβίδα απόρριψης υπεροξειδίου του υδρογόνου
19. Σημείο πλήρωσης υπεροξειδίου του υδρογόνου
20. Σωλήνας τροφοδοσίας αέρα προς δεξαμενή υπεροξειδίου υδρογόνου
21. Δεξαμενή υπεροξειδίου του υδρογόνου

2.5.2 Αποθήκευση ως κρυογενικό υγρό

Η μέθοδος αποθήκευσης του υδρογόνου ως κρυογενικό υγρό έχει το πλεονέκτημα ακόμα και σήμερα ότι μας παρέχει βελτιστοποίηση του βάρους των δεξαμενών (ρεζερβουάρ) αλλά και στην αυτονομία του οχήματος. Η θερμοκρασία του είναι 20K ή -253°C και με αυτή την μέθοδο η ειδική ενέργεια του υδρογόνου αυξάνεται κατά επτά φορές συγκριτικά με το υδρογόνο που έχει αποθηκευτεί κάτω από πίεση 700bar.

Το ειδικό βάρος της δεξαμενής είναι περίπου 7kg ανά 1kg υδρογόνου και ο ειδικός όγκος της 36lt ανά 1kg υγροποιημένου υδρογόνου. Η μέθοδος υγροποίησης του υδρογόνου απαιτεί μεγάλα ποσά ενέργειας της τάξης του 40% της ενέργειας του υδρογόνου που αποθηκεύεται. Επίσης άλλο μειονέκτημα είναι η ατμοποίηση του περιεχόμενου υδρογόνου που από την μια πλευρά προσδίδει τέλεια θερμική μόνωση από την άλλη πλευρά όμως απαγορεύει την αποθήκευση του καυσίμου για μεγάλο χρονικό διάστημα [1].

2.5.3 Αποθήκευση σε υδρίδια μετάλλων

Τα μόρια του υδρογόνου απωθούνται έντονα το ένα με το άλλο, οπότε χρειαζόμαστε είτε υψηλή πίεση (δηλαδή 700bar) είτε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (-253°C) για να τα αποδεσμεύσουν. Η αποθήκευση του υδρογόνου σε μεταλλικά υδρίδια μας βοηθά σε αυτό. Η μεταλλική σκόνη υδριδίου διασπά τα μόρια υδρογόνου κάνοντας τα να έχουν λιγότερη ορμή, μπορούν να σταματήσουν να κινούνται σε πολύ μικρότερο χώρο, γιατί ως ένα άτομο το υδρογόνο ταιριάζει στον διάμεσο χώρο του μετάλλου.

Η αποθήκευση υδρογόνου σε στερεή μορφή είναι δυνατή με μεταλλικά υδρίδια. Τα μεταλλικά υδρίδια είναι χημικές ενώσεις του υδρογόνου και άλλων υλικών όπως το μαγνήσιο, νικέλιο, χαλκός, σίδηρος ή τιτάνιο. Βασικά, το υδρογόνο συνδέεται εύκολα με περισσότερες από 80 μεταλλικές ενώσεις, σχηματίζοντας μια αδύναμη έλξη που αποθηκεύει το υδρογόνο μέχρι να θερμανθεί. Αυτά είναι τα λεγόμενα μεταλλικά υδρίδια. Τα συστήματα αυτά μπορούν να είναι είτε χαμηλής (<150°C) είτε υψηλής θερμοκρασίας (300°C).

Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί με τη μορφή των υδριδίων σε υψηλότερες πυκνότητες από ό, τι με απλή συμπίεση. Ωστόσο, εξακολουθούν να αποθηκεύουν λίγη ενέργεια ανά μονάδα βάρους. Από την άλλη πλευρά, δεδομένου ότι απαιτείται θερμότητα για την απελευθέρωση του υδρογόνου, αυτή η μέθοδος μειώνει τις ανησυχίες ασφάλειας σχετικά με τη διαρροή που μπορεί να είναι ένα πρόβλημα με το συμπιεσμένο υδρογόνο και την υγρή κατάσταση του στοιχείου υδρογόνου (LH2). Ωστόσο, καθώς το μεταλλικό υδρίδιο μπορεί να αντιδρά αυθόρμητα όταν εκτίθεται σε αέρα ή νερό, πρέπει να αντιμετωπιστούν και άλλα ειδικά θέματα ασφάλειας.

Τα υδρίδια μετάλλων αρχίζουν ως διαμεταλλικές ενώσεις που παράγονται με τον ίδιο τρόπο όπως, οποιοδήποτε άλλο κράμα μετάλλων. Παρουσιάζουν όμως μια σημαντική διαφορά. Όταν τα υδρίδια μετάλλων εκτίθενται στο υδρογόνο σε συγκεκριμένες πιέσεις, και οι θερμοκρασίες απορροφούν μεγάλες ποσότητες του αερίου σχηματίζοντας μεταλλικές υδριδικές ενώσεις (Palcen Metal Hydrides).

Όταν το μοριακό υδρογόνο από το αέριο υδρογόνο έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια ενός υλικού υδριδίου μετάλλου αποθήκευσης υδρογόνου, διαχωρίζεται σε ατομικό υδρογόνο και κατανέμεται σε όλο το μεταλλικό πλέγμα. Τα μεταλλικά υδρίδια παγιδεύουν κυριολεκτικά υδρογόνο μέσα στο κράμα, σαν ένα σφουγγάρι να απορροφά νερό. Όταν εφαρμόζεται θερμότητα, το αέριο απελευθερώνεται.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα του ρυθμού απορρόφησης του υδρογόνου από το μέταλλο είναι οι εξής :

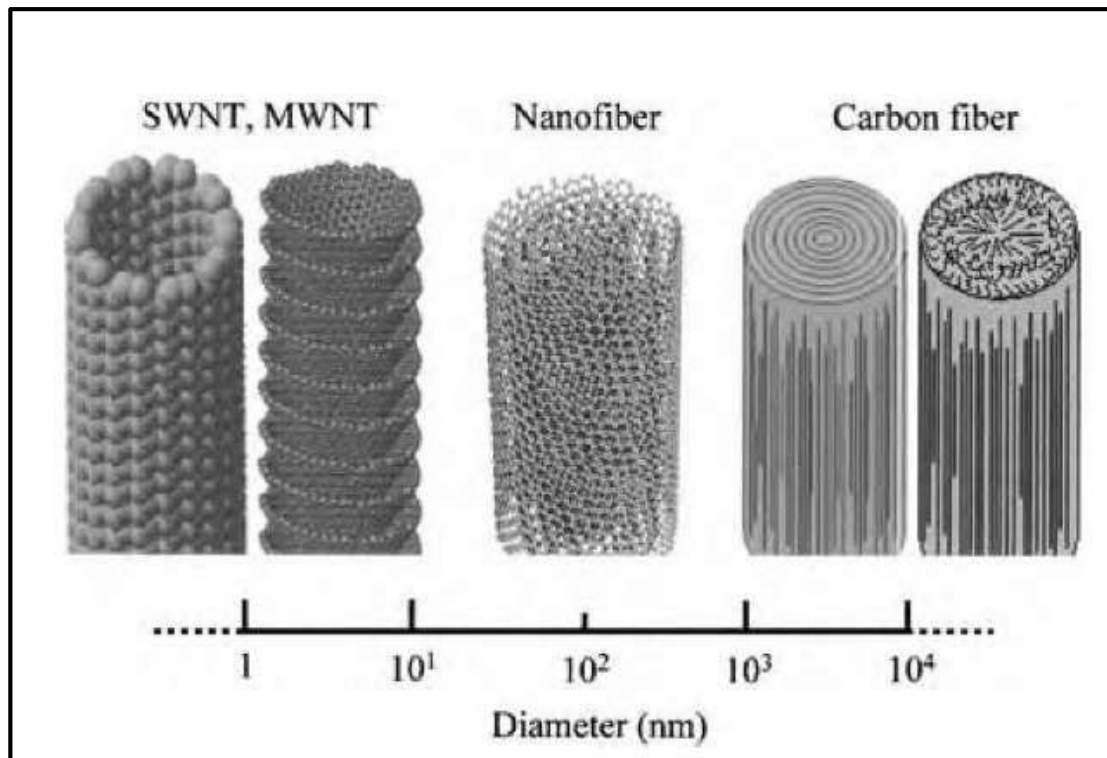
- Εξέλιξη της ατομικής- κρυσταλλικής - μικροδομής και μακροσκοπικής δομής, έτσι ώστε να έχουμε την δημιουργία νανοκρυστάλλικών υδριδίων σε κλίμακα νανόμετρου.
- Η πλευρά του μετάλλου πρέπει να είναι λεία-καθαρή για να γίνεται η απορρόφηση έτσι ώστε να μην έχουμε δημιουργία οξειδίων ή άλλες ενώσεις.
- Το υδρογόνο προμηθεύει το αρνητικό ηλεκτρόδιο (στην άνοδο της κυψέλης), και περνώντας από τον καταλύτη διακρίνεται σε θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια. Οι αντιδράσεις του υδρογόνου και του καταλύτη είναι αρκετά ευαίσθητες με αποτέλεσμα να αυξάνεται η κινητική των αντιδράσεων
- Ένας ακόμη παράγοντας είναι η μετάδοση θερμότητας από το υδρίδιο προς στο περιβάλλον.

Για να θεωρήσουμε ότι έχουμε σωστή διαδικασία για την δημιουργία υδριδίου μετάλλου, πρέπει να ξέρουμε τα εξής:

1. Πολύ μεγάλη αποθήκευση υδρογόνου σε πολλές εφαρμογές
2. Υψηλή ταχύτητα απορρόφησης και αφαίρεσης του υδρογόνου.
3. Καθαρότητα σύστασης του υδρογόνου, αλλιώς μειώνεται η χωρητικότητα του υδρογόνου
4. Για να λειτουργήσει η απορρόφηση αλλά και η απελευθέρωση του υδρογόνου θα πρέπει να έχουμε ικανοποιητικές συνθήκες πίεσης αλλά και θερμοκρασίας για την μέγιστη ενεργοποίηση των μηχανισμών
5. Και τέλος θέλουμε μικρή αλλαγή της σύστασης του μετάλλου μετά από τις πολλές χρήσεις του για την υδρογόνωση και την αφυδρογόνωση του [1], [13], [14], [15].

2.5.4 Αποθήκευση σε νανοσωλήνες άνθρακα

Οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNT) αποτελούνται ουσιαστικά από φύλλα γραφίτη που τυλίγονται σε σωλήνες χωρίς συγκόλληση και καλύπτονται στα άκρα. Υπάρχουν δύο μορφές που διατίθενται οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNT): μονότοποι και πολλαπλοί τοίχοι. Όπως υποδηλώνει το όνομα, οι νανοσωλήνες με μονό τοίχο (Single-Wall Carbon Nanotubes-SWCNT) αποτελούνται από ένα μόνο φύλλο γραφίτη. Το εύρος διαμέτρων είναι από 0,4 έως > 3nm. Οι νανοσωλήνες πολλαπλών τοιχωμάτων (Multi-Wall Carbon Nanotubes-MWNT) αποτελούνται από πολλά φύλλα, διατεταγμένα ομόκεντρα σε ολόένα και μεγαλύτερες διαμέτρους, με διαμέτρους από 1,4 έως 100 nm. Λόγω των μειούμενων διαστάσεων τους, οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNT) έχουν μοναδικές φυσικές και ηλεκτρικές ιδιότητες. Μερικές από αυτές είναι: η εξαιρετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα (> 3000 W / m K), ο συντελεστή Young ≈0,64 TPa και η ελαστική τους ικανότητα με χαρακτηριστικό το ότι μπορούν να εκταθούν περίπου 5,8% του αρχικού του μήκους πριν σπάσουν. Περισσότερο ελκυστικό είναι το δυσανάλογα μεγάλο εμβαδόν επιφανείας ανά όγκο που διαθέτουν αυτά τα υλικά, καθώς αυτό επιτρέπει μεγαλύτερο δυναμικό αλληλεπιδράσεων, είτε είναι φυσικής είτε χημικής φύσης. Επίσης, θεωρείται ότι οι διαστάσεις τους είναι συγκρίσιμες με εκείνες



Εικόνα 10

των ατόμων και των μορίων. Αυτό αυξάνει τη δύναμη που έχουν αυτές οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους, ιδιαίτερα από τις δυνάμεις του Van der Waals.

Η αποθήκευση υδρογόνου σε νανοσωλήνες άνθρακα πραγματοποιείται από δύο μηχανισμούς: τη φυσική απορρόφηση και τη χημική απορρόφηση. Το πρώτο χαρακτηρίζεται από συμπύκνωση μορίων του υδρογόνου (H₂) εντός ή μεταξύ νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs). Η χημική απορρόφηση, σε αντίθεση, χρησιμοποιεί έναν καταλύτη για να διαχωρίσει το μοριακό υδρογόνο ώστε να του επιτρέψει να συνδεθεί με μερικούς από τους ακόρεστους δεσμούς άνθρακα κατά μήκος του σωλήνα.

Οι μονοί νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν να συγκρατήσουν το ποσοστό υδρογόνου(σε μορφή ατομικού και μοριακού επιπέδου) κατά βάρος από 5 έως 10% ,αλλά βάση μελετών που πραγματοποιήθηκαν έχουν δείξει ότι μπορεί να φτάσει έως το 14% κατά βάρος η χωρητικότητα των νανοσωλήνων άνθρακα.

Οι τρόποι που συγκρατούν το υδρογόνο οι μονοί νανοσωλήνες άνθρακα είναι οι εξής :

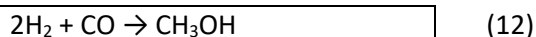
1. Μέθοδος υπό πίεση που κυμαίνεται από 71 έως 82.4 bar(πολύ μικρότερη πίεση από την μέθοδο αποθήκευσης του αερίου H₂ (περίπου 700bar).
2. Μέθοδος κυκλικής φόρτισης και εκφόρτισης. Η αποθήκευση γίνεται μέσα και έξω από την επιφάνεια των νανοσωλήνων άνθρακα αλλά και ανάμεσα από το κενό στο εσωτερικό τους και η ικανότητα τους αυξάνεται ή μειώνεται ανάλογα με την διάμετρο τους [1],[16],[17].

2.6 Χρήσεις του Υδρογόνου

Μία από τις κυριότερες χρήσεις του υδρογόνου είναι για την παρασκευή της αμμωνίας (NH_3) η οποία μπορεί να επιτευχθεί με την μέθοδο Haber η οποία βασίζεται στην αντίδραση μεταξύ αζώτου και υδρογόνου, παρουσία καταλυτών, υπό πίεση 1000atm και θερμοκρασίας 500°C. Η αντίδραση είναι η εξής:



Αρκετά ποσά υδρογόνου χρησιμοποιούνται εξίσου για την παρασκευή μεθυλικής αλκοόλης σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση παρουσία μικτών καταλυτών (περιέχουν οξειδία ψευδαργύρου και χρωμίου) σε πιέσεις 275 έως 350atm και θερμοκρασίες 300 έως 375°C ως εξής :



Άλλη εφαρμογή του υδρογόνου έχει να κάνει με την καταλυτική υδρογόνωση οργανικών ενώσεων όπως για παράδειγμα τα ακόρεστα φυτικά και ζωικά λίπη και έλαια τα οποία μέσω της υδρογόνωσης μπορούν να παράγουν μαργαρίνη. Επιπλέον, άλλη εφαρμογή του υδρογόνου είναι η αναγωγή των αλδεϋδων και των κετονών αλλά ακόμα και των λιπαρών οξέων και των εστέρων τους στις αντίστοιχες αλκοόλες.

Μια εξίσου ενδιαφέρουσα χρήση του υδρογόνου αφορά την άμεση αναγωγή των σιδηρομεταλλευμάτων σε μεταλλικό σίδηρο, των οξειδίων, του βολφραμίου και του μολυβδαινίου αντιστοίχως σε μέταλλα. Εδώ χρησιμοποιούνται ατμόσφαιρες πλούσιες σε υδρογόνο (αναγωγικές) ούτως ώστε να παραχθεί μαγνήσιο, για την διαδικασία ανόπτησης των μετάλλων καθώς και για την ψύξη των μεγάλων ηλεκτροκινητήρων.

Το υδρογόνο έχει χρησιμοποιηθεί και σαν καύσιμο πυραύλων αναμειγμένο με κατάλληλο οξειδωτικό μέσο (οξυγόνο ή φθόριο) και ως προωθητικό πυρηνοκίνητων πυραύλων και διαστημικών σκαφών. Σε παλαιότερες εποχές χρησιμοποιούσαν το υδρογόνο για την πλήρωση των αερόστατων, ωστόσο σήμερα το χρησιμοποιούν ακόμα και στα εργαστήρια για την παραγωγή χαμηλών θερμοκρασιών [1].

3 ΜΗΧΑΝΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Οι Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ), όπως ξέρουμε, είναι θερμικές μηχανές που παράγουν ωφέλιμο μηχανικό έργο καταναλώνοντας θερμική ενέργεια η οποία προέρχεται από υγρά ή αέρια καύσιμα . Οι πιο συνήθεις εφαρμογές Μ.Ε.Κ. είναι οι κινητήρες των οχημάτων. Η εσωτερική καύση λαμβάνει χώρα στον ίδιο τον κινητήρα όπου γίνεται και η ακόλουθη μετατροπή ενέργειας: η χημική ενέργεια του καυσίμου απελευθερώνεται στο εσωτερικό του κινητήρα και μετατρέπεται απευθείας σε μηχανική ενέργεια του ίδιου του κινητήρα, σε αντίθεση με τους κινητήρες εξωτερικής καύσης, όπου χρησιμοποιείται χωριστός χώρος καύσης για την καύση του καυσίμου και χωριστή διάταξη για την παραγωγή μηχανικού έργου. Τα πιο γνωστά συμβατικά καύσιμα είναι το πετρέλαιο για τους πετρελαιοκινητήρες (Diesel) και η βενζίνη για τους βενζινοκινητήρες. Για να πραγματοποιηθεί η ανάφλεξη χρειαζόμαστε αέρα ,σπινθήρα και καύσιμη ύλη. Εκτός από βενζίνη και πετρέλαιο που χρησιμοποιούμε έχουμε και άλλα δύο καύσιμα που είναι το υγραέριο και το φυσικό αέριο, έτσι έχουμε υγραεριοκινητήρες και κινητήρες φυσικού αερίου. Τέλος έχουμε και μηχανές εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούν για την καύση τους υδρογόνο αλλά θα μιλήσουμε σε άλλο κεφάλαιο πιο αναλυτικά [18].

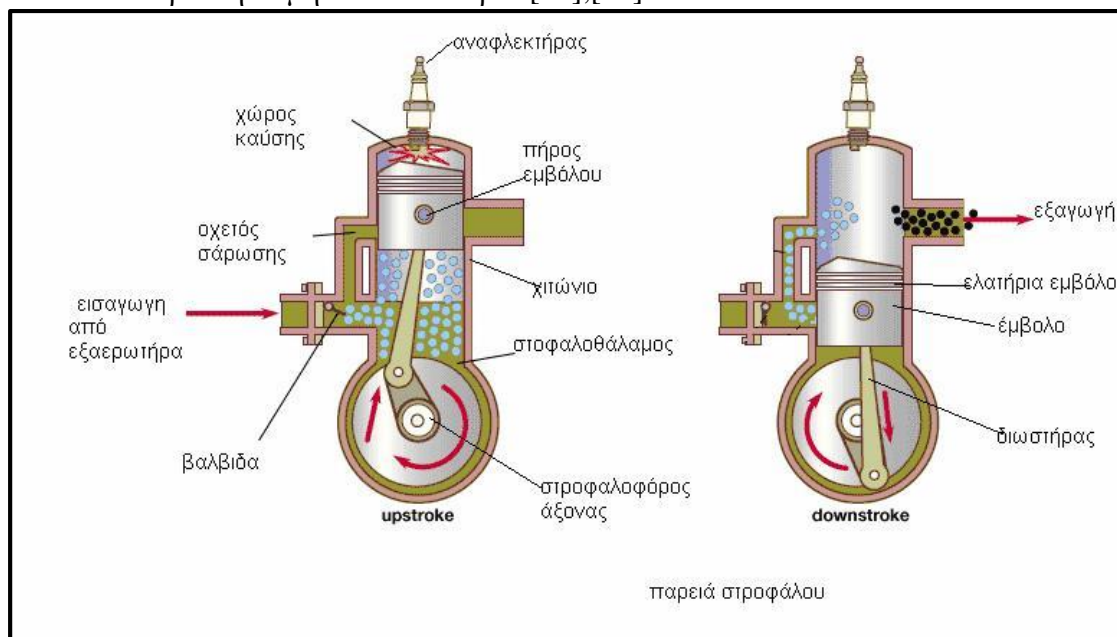
3.2 Δίχρονος Κινητήρας

Γενικά για την συγκρότηση των εμβολοφόρων παλινδρομικών κινήτρων είναι απαραίτητος ο μηχανισμός Εμβόλου-Διωστήρα-Στροφάλου. Το έμβολο παλινδρομεί στο εσωτερικό του κυλίνδρου, μεταφέροντας ισχύ στην στροφαλοφόρο άτρακτο διαμέσου του διωστήρα. Το έμβολο παραμένει στάσιμο σε δυο θέσεις, το άνω νεκρό σημείο (ΑΝΣ) και το κάτω νεκρό σημείο (ΚΝΣ). Η απόσταση που διανύει το έμβολο για να φτάσει από το ένα νεκρό σημείο στο άλλο ονομάζεται διαδρομή ή <<χρόνος>> και αντιστοιχεί σε μισή στροφή (180°) της στροφαλοφόρου ατράκτου. Στον δίχρονο κινητήρα, μια περίοδος λειτουργίας του αντιστοιχεί σε δυο διαδρομές του εμβόλου ή δυο <<χρόνους>>, όπου από αυτή μόνο το μισό της χρησιμοποιείται για την εναλλαγή των αερίων. Α) Ο χρόνος σάρωσης-συμπίεσης όπου το έμβολο κινείται από το Κάτω Νεκρό Σημείο προς το Άνω Νεκρό Σημείο και πριν αυτό καλύψει τις θυρίδες εισαγωγής και εξαγωγής, το εισερχόμενο μίγμα καυσίμου αέρα εκδιώκει τα καυσάερια από τον κύλινδρο. Όταν κλείσουν οι θυρίδες από το έμβολο επέρχεται η συμπίεση. Και Β) ο χρόνος παραγωγής έργου όπου αρχίζει η καύση όταν το έμβολο είναι λίγο πριν το Άνω Νεκρό Σημείο (σημείο χρονισμού). Η άνω ακμή του εμβόλου είναι εκείνη που ρυθμίζει την πλήρωση και την εκκένωση του κυλίνδρου αλλά ακόμα, κατά την παλινδρομική κίνηση καλύπτει ή αποκαλύπτει τις σχετικές θυρίδες οι οποίες βρίσκονται στην παράπλευρη επιφάνεια του κυλίνδρου. Για τον λόγο αυτό η εναλλαγή των αερίων υφίσταται πάντα κάτω από δυσμενείς συνθήκες με απαραίτητη προϋπόθεση την βίαιη πλήρωση του κυλίνδρου μέσω μιας ειδικής αντλίας αποπλύσεως ή σαρώσεως η οποία απορροφά έργο από τη στροφαλοφόρο άτρακτο. Εάν οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής απουσιάζουν, ο εκκεντροφόρος άξονας εξυπηρετεί μόνο τον χρονισμό και την έναρξη του ψεκασμού και της καύσης, ενώ ταυτόχρονα περιστρέφεται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα με εκείνη της στροφαλοφόρου ατράκτου. Οι δίχρονοι βενζινοκινητήρες χρησιμοποιούνται σε μοτοσυκλέτες, κουρευτικές μηχανές γκαζόν,

εξωλέμβιες μηχανές αλλά και σε μικρές βιομηχανικές εφαρμογές. Όλα αυτά βέβαια σε συνδυασμό με την εύκολη κατασκευή του, την μεγάλη απόδοση, το μικρό του βάρος και το χαμηλό κόστος του.

Μερικά μειονεκτήματα των δίχρονων βενζινοκινητήρων :

- Είναι σχετικά θορυβώδεις
- Έχουμε υψηλή κατανάλωση καυσίμου το οποίο συνεπάγεται και υψηλές εκπομπές καυσαερίων
- Λόγο ανάμειξης του ελαίου λίπανσης με το καύσιμο, μας παρέχει μια δυσάρεστη οσμή στα καυσαέρια [19],[20].



Εικόνα 11

3.3 Τετράχρονος Κινητήρας

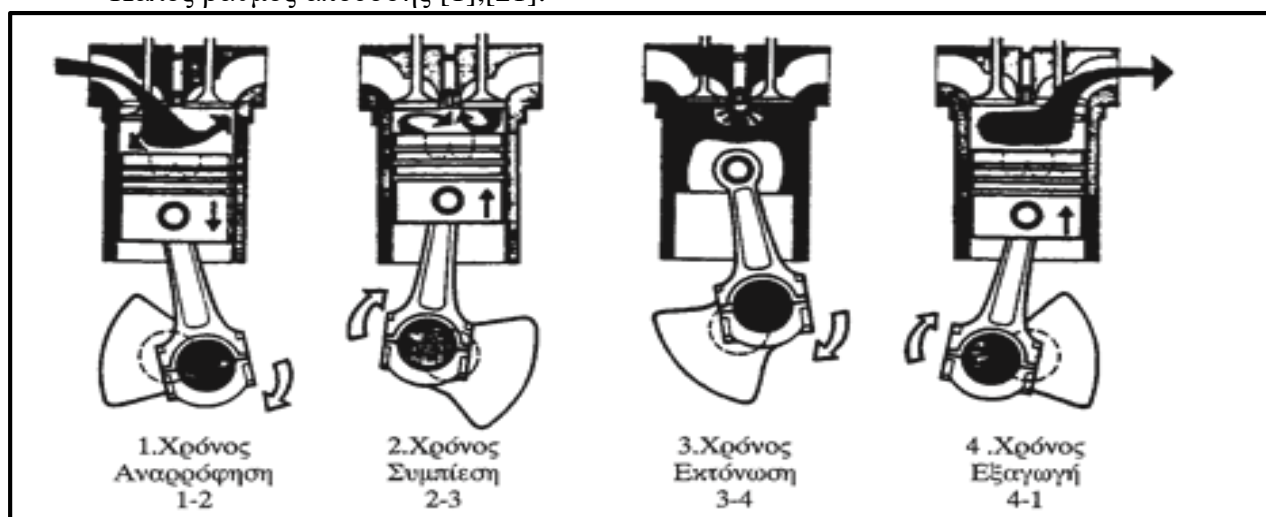
Στον τετράχρονο κινητήρα ένας κύκλος λειτουργίας του αντιστοιχεί σε δυο πλήρεις περιστροφές της στροφαλοφόρου ατράκτου (720°) κάτι το οποίο συνεπάγεται σε τέσσερις πλήρεις διαδρομές εμβόλου ή τέσσερις <<χρόνους>>. Αυτοί οι χρόνοι είναι Α) ο χρόνος αναρρόφησης στον οποίο ο κύλινδρος πληρώνεται με νέο καύσιμο μίγμα Β) ο χρόνος συμπίεσης στον οποίο το μίγμα συμπιέζεται μέχρι το άνω νεκρό σημείο. Στην βενζινομηχανή, επικρατεί πίεση μέχρι 15bar και θερμοκρασία περίπου 400°C και στην πετρελαιομηχανή περίπου 40bar και θερμοκρασία περίπου 600°C . Γ) ο χρόνος έργου ή εκτόνωσης όπου το έμβολο οδηγείται στο Κάτω Νεκρό Σημείο, με την καύση να αρχίζει στο σημείο χρονισμού, λίγο πριν το Άνω Νεκρό Σημείο. Στην βενζινομηχανή μπορεί να φτάσει η θερμοκρασία τους 2500°C και η πίεση τα 60bar και στην πετρελαιομηχανή η πίεση περίπου 90bar και θερμοκρασία τους 2000°C . Τέλος Δ) ο χρόνος εξαγωγής όπου έχουμε εκκένωση του κυλίνδρου από τα προϊόντα καύσης με ανοικτή την βαλβίδα εξαγωγής και κλειστή την βαλβίδα εισαγωγής. Στους τετράχρονους κινητήρες Diesel κατά την φάση της συμπίεσης, υφίσταται συμπίεση μόνο ο ατμοσφαιρικός αέρας ενώ έχουμε έγχυση καυσίμου λίγο πριν το άνω νεκρό σημείο. Ακόμα χρησιμοποιούνται ειδικά όργανα για την πλήρωση και την κένωση του

θαλάμου καύσης, τα οποία τίθενται σε κίνηση από τον εκκεντροφόρο άξονα, ο οποίος κινείται από την στροφαλοφόρο άτρακτο μέσω ιμάντα ή αλυσίδας, έχοντας την μισή της ταχύτητα.

Σ' έναν πετρελαιοκινητήρα στις 3000 στροφές το λεπτό, ο διαθέσιμος χρόνος ψεκασμού, ανάφλεξης και καύσης του καυσίμου μίγματος είναι δύο χιλιοστά του δευτερολέπτου, και η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα είναι 1000°C περίπου. Στον βενζινοκινητήρα που μπορεί να περιστρέφεται με τριπλάσιες στροφές έχουμε διαθέσιμο χρόνο λιγότερο του ενός χιλιοστού του δευτερολέπτου για ολόκληρη την διαδικασία καύσης. Το καύσιμο καίγεται στον κινητήρα για έναν και μόνον λόγο, για να αυξηθεί η θερμοκρασία του αέρα. Στον βενζινοκινητήρα συμπιέζουμε τον αέρα πλήρωσης από 9 ατμόσφαιρες στην μικρή αερόψυκτη μηχανή, μέχρι 25 ατμόσφαιρες, στην σύγχρονη μηχανή αυτοκινήτου και φτάνουμε σε 35 ατμόσφαιρες στα αγωνιστικά αυτοκίνητα, που αντιστοιχούν σε λόγους συμπίεσης 5:1, 10:1 και 14:1, με αντίστοιχες θερμοκρασίες αέρα περίπου 300, 450 και 550°C.

Μερικά πλεονεκτήματα του τετράχρονου κινητήρα:

- Απλότητα λειτουργίας
- Αξιοπιστία
- Καλός βαθμός απόδοσης [1],[21].



Εικόνα 12

3.4 Κινητήρας Otto (Βενζίνης)

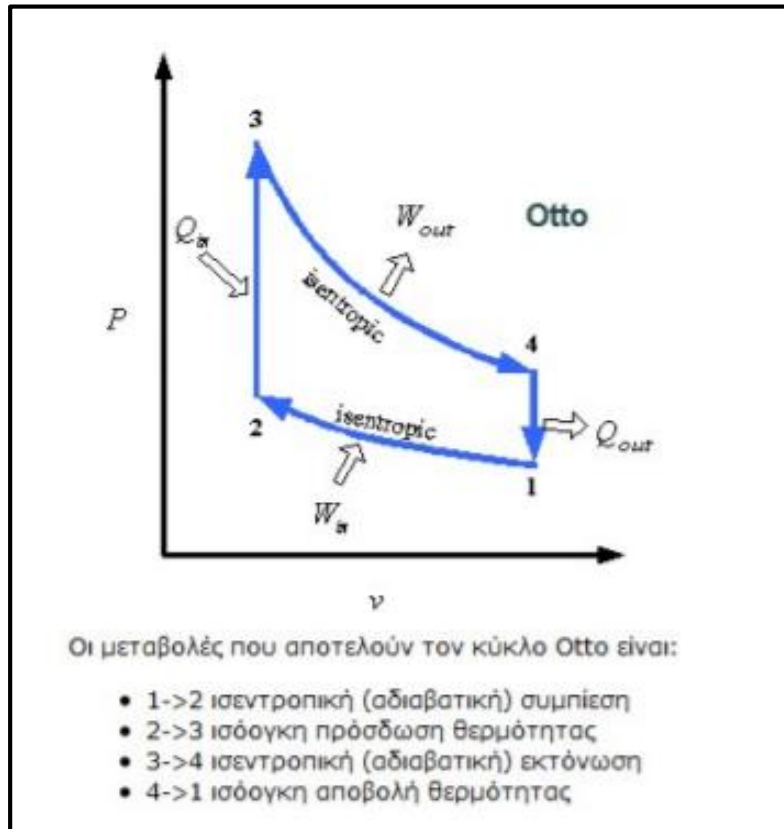
Στην εισαγωγή του 3 κεφαλαίου, υπάρχει μία περιγραφή που μας εξηγεί ότι οι μηχανές εσωτερικής καύσης κατατάσσονται σε κινητήρες Otto και σε κινητήρες Diesel, λόγω της εσωτερικής τους λειτουργίας και του πως δημιουργείται η ανάφλεξη (έναυση) του καυσίμου το οποίο μπορεί να είναι υγρό ή αέριο. Οι κινητήρες Diesel θα αναφερθούν στην επόμενη παράγραφο. Ο κινητήρας Otto ήταν ένας μεγάλος σταθερός μονοκύλινδρος τετράχρονος κινητήρας εσωτερικής καύσης που σχεδιάστηκε από τον Γερμανό Nicolaus Otto. Οι κινητήρες Otto με εύναση από σπινθήρα (spark ignition) χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, σε αεριομηχανές και βενζινομηχανές. Οι

αεριομηχανές έχουν την εξής ιδιαιτερότητα, χρησιμοποιούν ως καύσιμο τα φυσικά ή τεχνητά αέρια, όπως είναι το φυσικό αέριο, το υγραέριο και το φωταέριο. Ενώ οι βενζινομηχανές χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο βενζίνη και ποιο συγκεκριμένα υγρά καύσιμα που προέρχονται από μεθανόλη, αιθανόλη κ.λπ. .

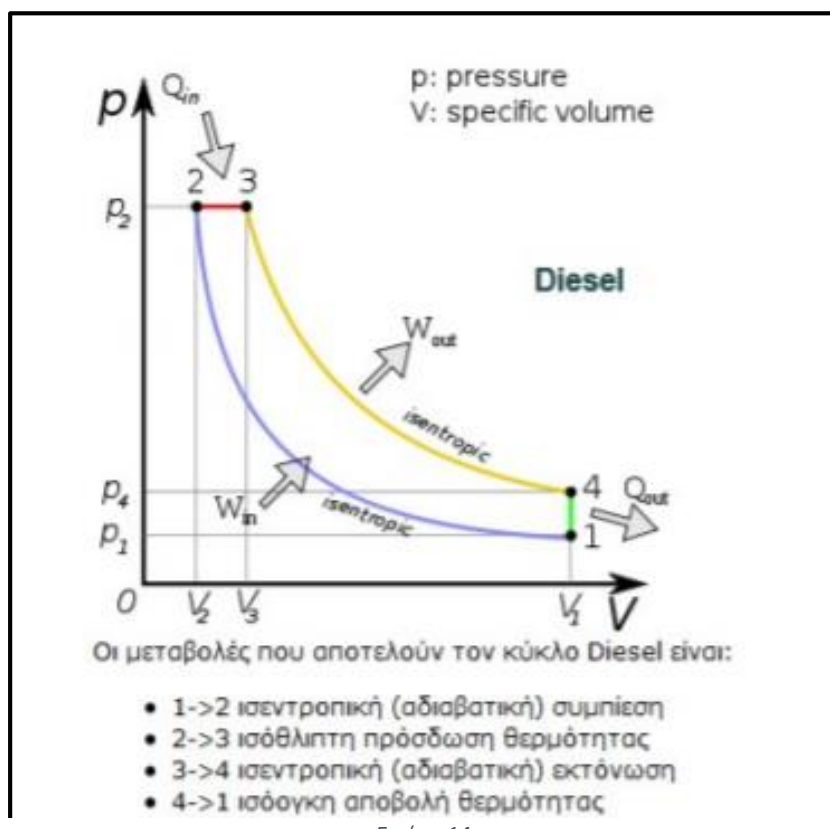
Οι μέθοδοι δημιουργίας μίγματος αέρα – καυσίμου είναι δύο. Η πρώτη και πιο παλιά μέθοδος είναι η άμεση έγχυση η οποία διοχετεύει συνεχώς βενζίνη στον θάλαμο καύσης με αποτέλεσμα να έχουμε παραπάνω βενζίνη από όσο χρειάζεται το μίγμα αέρα- καυσίμου με αποτέλεσμα να μην γίνεται σωστή καύση. Ο δεύτερος και πιο αποδοτικός τρόπος είναι της έμμεσης έγχυσης στα σύγχρονα συστήματα. Η αρχή λειτουργίας στο θάλαμο καύσης στα σύγχρονα συστήματα, συμπεριλαμβάνει δύο τρόπους έγχυσης , την ηλεκτρονική έγχυση μονού σημείου ή πολλαπλών σημείων. Αυτά τα συστήματα ονομάζονται συστήματα διακοπτόμενης λειτουργίας και διοχετεύουν καύσιμο μέσα στους κυλίνδρους από την στραγγαλιστική δικλείδα που γίνεται η καύση όταν αυτό χρειάζεται για να έχουμε όσο γίνεται σωστή και μη ατελής καύση. Ο ρυθμιστής για την ποσότητα που θα αφήσει να μπει στο θάλαμο καύσης είναι η στραγγαλιστική βαλβίδα (πεταλούδα) όπως αναφέραμε και εκτός από αυτό ρυθμίζει την υποπίεση κατά την αναρρόφηση του κυλίνδρου.

Στο θάλαμο καύσης η στοιχειομετρική αναλογία καυσίμου είναι περίπου είναι 14,7:1, με λίγα λόγια σε 14,7 μέρη αέρα αντιστοιχεί 1 μέρος καυσίμου για την στοιχειομετρική καύση. Σε μία άλλη περίπτωση που έχουμε καύση πτωχών μιγμάτων, και είναι η καύση όπου ο αέρας έχει μεγαλύτερο ποσοστό από την προηγούμενη περίπτωση, μεγαλώνει ο βαθμός απόδοσης και ελαττώνεται το ποσοστό απελευθέρωσης εκπομπών αέριων ρύπων. Οι κινητήρες Otto πτωχού μείγματος (ο κινητήρας του May) θέλουν την καύση πολύ πτωχών μειγμάτων, με λόγο αέρα-καυσίμου έως και 50:1. Αυτό επιτυγχάνεται με την άνοδο του επιπέδου της τύρβης (swirl) της γομώσεως και ιδιαίτερα στον θάλαμο γύρω από τη βαλβίδα εξαγωγής. Με αυτό τον τρόπο, ανάλογα πάντα με τις δύο σχεδιαστικές παραμέτρους ελαττώνουμε τον κίνδυνο εμφάνισης κρουστικής καύσης και έτσι μπορεί να γίνει χρήση υψηλών βαθμών συμπίεσης. Όλα αυτά βέβαια γίνονται για την αύξηση της απόδοσης και την οικονομία του καυσίμου της μηχανής [18].

Σύγκριση κύκλος Otto με κύκλο Diesel :



Εικόνα 13



Εικόνα 14

3.5 Κινητήρας Diesel (Πετρελαίου)

Ο κινητήρας Diesel, που πήρε το όνομά του από τον Rudolf Diesel, είναι ένας κινητήρας εσωτερικής καύσης στον οποίο η ανάφλεξη του καυσίμου προκαλείται από την αυξημένη θερμοκρασία του αέρα στον κύλινδρο λόγω της μηχανικής συμπίεσης (αδιαβατική συμπίεση). Έτσι, ο κινητήρας Diesel είναι ένας κινητήρας ανάφλεξης με συμπίεση (κινητήρας CI). Αυτό έρχεται σε αντίθεση με κινητήρες όπως οι Otto που χρησιμοποιούν ανάφλεξη του μείγματος αέρα-καυσίμου με τη βοήθεια σπινθηριστή (κινητήρας βενζίνης-βενζινοκινητήρας ή ένας κινητήρας αερίου χρησιμοποιώντας αέριο καύσιμο όπως φυσικό αέριο ή υγραέριο). Οι κινητήρες Diesel λειτουργούν με συμπίεση μόνο του αέρα. Αυτό αυξάνει τη θερμοκρασία του αέρα μέσα στον κύλινδρο σε τόσο υψηλό επίπεδο που το καύσιμο ντίζελ όταν εγχέεται στον θάλαμο καύσης αυτοαναφλέγεται.

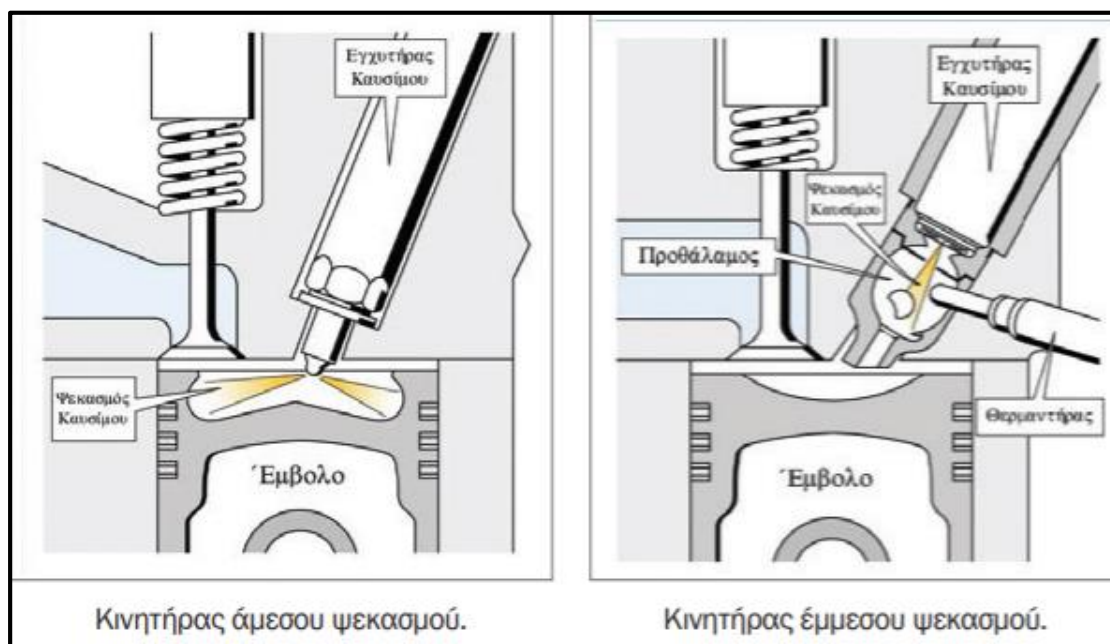
Οι κινητήρες Diesel μπορούν να σχεδιαστούν είτε δίχρονοι είτε τετράχρονοι. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν ως πιο αποτελεσματική αντικατάσταση για τις ατμομηχανές. Από το 1910, έχουν χρησιμοποιηθεί σε υποβρύχια και πλοία. Ακολούθησε αργότερα η χρήση σε φορτηγά, σε βαριά οχήματα και στην ηλεκτροπαραγωγή. Τη δεκαετία του 1930, άρχισαν αργά να χρησιμοποιούνται σε μερικά αυτοκίνητα. Από τη δεκαετία του 1970, η χρήση κινητήρων Diesel σε μεγαλύτερα οχήματα εντός και εκτός δρόμου έχει αυξηθεί κατά πολύ στην Αμερική. Σύμφωνα με τον Konrad Reif, ο μέσος όρος της Ευρώπης για αυτοκίνητα ντίζελ αντιπροσωπεύει το ήμισυ των πρόσφατα ταξινομημένων αυτοκινήτων.

Με το καύσιμο να εγχέεται στον αέρα λίγο πριν από την καύση, η διασπορά του καυσίμου είναι ανομοιογενής. Αυτό ονομάζεται ετερογενές μείγμα αέρα-καυσίμου. Η ροπή που παράγει ένας πετρελαιοκινητήρας ελέγχεται με το χειρισμό της αναλογίας αέρα-καυσίμου (λ). Αντί να περιορίζει τον αέρα εισαγωγής, ο κινητήρας Diesel βασίζεται στην τροποποίηση της ποσότητας καυσίμου που εγχέεται, και η αναλογία αέρα-καυσίμου είναι συνήθως υψηλή. Ο κινητήρας Diesel έχει τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης από οποιονδήποτε πραγματικό κινητήρα εσωτερικής ή εξωτερικής καύσης. Αυτό συμβαίνει λόγω του πολύ υψηλού λόγου εκτόνωσης και της φτωχής καύσης, που επιτρέπει την απορρόφηση θερμότητας από την περίσσεια ποσότητα αέρα. Επιπλέον, αποφεύγεται και μια μικρή απώλεια ενέργειας σε σύγκριση με τους βενζινοκινητήρες μη άμεσου ψεκασμού. Αυτό συμβαίνει επειδή το καύσιμο δεν είναι παρόν κατά την φάση επικάλυψης των βαλβίδων και συνεπώς δεν διαφεύγει καθόλου καύσιμο από την εισαγωγή προς στην εξαγωγή. Οι αργόστροφες μηχανές Diesel (που χρησιμοποιούνται σε πλοία ή άλλες μεγάλες εγκαταστάσεις όπως μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, όπου το συνολικό βάρος του κινητήρα είναι σχετικά ασήμαντο) μπορούν να επιτύχουν βαθμούς απόδοσης έως και 55%.

Στον κινητήρα Diesel, αρχικά εισάγεται μόνο αέρας στο θάλαμο καύσης. Ο αέρας στη συνέχεια συμπιέζεται με λόγο συμπίεσης τυπικά μεταξύ 16: 1 και 25: 1. Αυτή η υψηλή συμπίεση προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα. Στην κορυφή

της διαδρομής συμπίεσης, το καύσιμο εγχέεται απευθείας στον πεπιεσμένο αέρα στο θάλαμο καύσης. Η έναρξη της εξάτμισης προκαλεί καθυστέρηση πριν από την ανάφλεξη και τον χαρακτηριστικό ήχο χτυπήματος (κροτάλισμα) του κινητήρα Diesel καθώς ο ατμός φτάνει τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης και προκαλεί απότομη αύξηση της πίεσης πάνω από το έμβολο (δεν φαίνεται στο διάγραμμα δείκτη P-V). Όταν ολοκληρωθεί η καύση, τα αέρια καύσης εκτονώνονται καθώς το έμβολο κατεβαίνει περαιτέρω. Η υψηλή πίεση στον κύλινδρο οδηγεί το έμβολο προς τα κάτω, παρέχοντας ισχύ στον στροφαλοφόρο άξονα. Λόγω του υψηλού λόγου συμπίεσης, ο κινητήρας Diesel έχει υψηλή απόδοση και η έλλειψη στραγγαλιστικής βαλβίδας (πεταλούδας) σημαίνει ότι οι απώλειες αλλαγής φορτίου είναι αρκετά χαμηλές, με αποτέλεσμα χαμηλή ειδική κατανάλωση καυσίμου, ειδικά σε καταστάσεις μεσαίου και χαμηλού φορτίου. Αυτό καθιστά τον πετρελαιοκινητήρα πολύ οικονομικό. Παρόλο που οι κινητήρες Diesel έχουν θεωρητική απόδοση 75%, η σωστή λειτουργία τους καθορίζεται από τον καλό έλεγχο της έγχυσης του καυσίμου και της κίνησης του αέρα στον θάλαμο καύσης, έτσι ώστε να έχουμε την καλύτερη ανάμιξη των ατμών του καυσίμου με τον αέρα για να ομογενοποιηθούν όσο το δυνατόν πιο γρήγορα στο διαθέσιμο χρόνο για την καύση.

Για να πραγματοποιηθούν τα παραπάνω χρειαζόμαστε δύο παράγοντες σχεδιασμού του θαλάμου καύσης. Η πρώτη επιλογή σχεδιασμού και λύση για την σωστή λειτουργία του θαλάμου καύσης είναι εάν χρειαζόμαστε την έμμεση έγχυση καυσίμου είτε την άμεση έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης. Η Εικόνα 15 μας δείχνει πως εισάγεται το καύσιμο σε μορφή σταγονιδίων από το ακροφύσιο και στις



Εικόνα 15

δύο διατάξεις.

Στους πετρελαιοκινητήρες άμεσου ψεκασμού το καύσιμο εγχέεται απευθείας στο πάνω μέρος του εμβόλου του ενιαίου θαλάμου καύσεως και μέχρι το κάτω μέρος της κεφαλής του κυλίνδρου. Ενώ στους πετρελαιοκινητήρες έμμεσου ψεκασμού η έγχυση του καυσίμου γίνεται σε έναν προθάλαμο για να αναμιχθεί το πετρέλαιο με τον

αέρα και μετά προχωρά προς το θάλαμο καύσης μέσω πολύ μικρών οπών οι οποίες συνδέουν τους δύο θαλάμους. Με την διάταξη άμεσου ψεκασμού επιτυγχάνεται χαμηλή κατανάλωση καυσίμου ,υψηλές πιέσεις και μειωμένες εκπομπές ρύπων. Οι πιέσεις στους καινούργιους πολύστροφους κινητήρες και με ηλεκτρονικά ελεγχόμενο ψεκασμό μπορούν να φτάσουν έως και τα 1000- 1800bar. Εν αντιθέσει στους κινητήρες έμμεσου ψεκασμού, έχουμε μικρό βαθμό απόδοσης και κατά την εκκίνηση κάνουν περισσότερο θόρυβο από τους κινητήρες άμεσου ψεκασμού αλλά δημιουργούν λιγότερους ρύπους ενώ μπορούν να ανταπεξέλθουν σε υψηλό αριθμό στροφών. Το δεύτερο είναι ότι χρησιμοποιούν εγχυτήρες υψηλής πίεσης με ακροφύσιο πολλαπλών οπών για την βέλτιστη μεταφορά καυσίμου στον κύλινδρο ανάλογα βέβαια με τον κινητήρα και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του [1],[22].

4 ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΤΙΣ ΜΕΚ

4.1 Γενικά Στοιχεία του Υδρογόνου ως Καύσιμο

Το υδρογόνο φαίνεται να είναι εκείνο το στοιχείο το οποίο θα αντικαταστήσει τα καύσιμα τα οποία στηρίζονται σε ορυκτούς υδρογονάνθρακες (πχ βενζίνη, Diesel, μεθάνιο κλπ). Μπορεί να παρασκευαστεί είτε από πυρηνική ενέργεια, μέσω θερμικής αποσύνθεσης του νερού, είτε από ηλιακή ενέργεια μέσω ηλεκτρόλυσης του νερού. Ακόμα λόγω του ότι είναι άοσμο, άγευστο, άχρωμο και μη τοξικό, μπορεί παράγει καθαρή ενέργεια και υδρατμούς (μέσω της καύσης του με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα) και να επιστρέφει στο περιβάλλον σαν νερό, από το οποίο και παράχθηκε. Στηριζόμενοι σε αυτή τη διαδικασία δεν υπάρχει εξάντληση αποθεμάτων από την χρήση του ως καύσιμο.

Το υδρογόνο είναι ένα εξαιρετικά καλό καύσιμο, λόγω των ιδιοτήτων της καύσης που προσδίδει όπως: i) τον υψηλό βαθμό απόδοσης καθώς και ii) την απρόσκοπη λειτουργία. Κανονικά οι ρύποι που θα έπρεπε να εκπέμπονται από μια ΜΕΚ υδρογόνου θα ήταν μηδενικοί, όμως στην πραγματικότητα είναι απειροελάχιστοι συγκριτικά με τους κινητήρες βενζίνης. Επιπλέον κατά την διαδικασία της καύσης υδρογόνου με αέρα (που περιέχει 79% άζωτο), δημιουργούνται οξειδία του αζώτου (NO_x). Οι απαραίτητες συνθήκες (που χρειάζονται για την παραγωγή οξειδίων του αζώτου στα παράγωγα της καύσης) δημιουργούνται λόγω της ύπαρξης του αζώτου και του οξυγόνου σε υψηλές θερμοκρασίες μέσα στον θάλαμο καύσης. Ακόμα το υδρογόνο επειδή αντιδρά εύκολα με τον αέρα, το μίγμα που δημιουργείται θα είναι σταθερό σε κανονικές θερμοκρασίες (25°C), έχοντας βέβαια χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης. Τα όρια αναφλεξιμότητας του υδρογόνου κυμαίνονται από 4 έως 75% κατ' όγκο περιεκτικότητας στον αέρα, σε κανονικές θερμοκρασίες και πιέσεις. Μέσω της καύσης των μιγμάτων (αέρα-υδρογόνου) στον θάλαμο καύσης, επιτυγχάνεται ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων καύσης και μεγίστων θερμοκρασιών.

Οι κινητήρες βενζίνης λειτουργούν με προκαθορισμένη-στοιχειομετρική αναλογία αέρα-καύσιμο, δημιουργώντας τις απαραίτητες συνθήκες για τον σχηματισμό i) οξειδίων του αζώτου ii) άκαυστων υδρογονανθράκων και iii) μονοξειδίου του άνθρακα στα προϊόντα της καύσης. Το υδρογόνο μπορεί να καίγεται σε πτωχά μίγματα ως αποτέλεσμα την ελάττωση των μονοξειδίων του αζώτου, χωρίς την χρήση του καταλυτικού μετατροπέα, λόγω των μειωμένων θερμοκρασιών στον θάλαμο καύσης. Η μεγάλη ταχύτητα καύσης οδηγεί στους μεγάλους ρυθμούς αύξησης της πίεσης αλλά και στην μη ομαλή λειτουργία του κινητήρα. Άλλο πρόβλημα που συναντάμε είναι η ελάχιστη κατ' όγκο περιεκτικότητα ενέργεια του καυσίμου, λόγω της μικρής πυκνότητας. Τέλος τα μίγματα αέρα-υδρογόνου λόγω i) της χαμηλότερης ενέργειας ανάφλεξης (συγκριτικά με τα μίγματα αέρα-βενζίνης) αλλά και ii) των υπέρθερμων σημείων στον θάλαμο καύσης, είναι πιο ευαίσθητα στην πυρανάφλεξη.

Τα υπέρθερμα σημεία μπορεί να είναι i) εναποθέσεις άνθρακα στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης ii) σπινθηριστές, οι οποίοι (λόγω της μη επαρκούς θερμικής αγωγιμότητας) υπερθερμαίνονται και αναφλέγουν το μίγμα πριν την προγραμματισμένη ηλεκτρική τους εκκένωση, ή ακόμα και iii) βαλβίδες (στην περίπτωση απαγωγής θερμότητας από βαλβίδες εξαγωγής που είναι προβληματικές) οι οποίες αναπτύσσουν υψηλές θερμοκρασίες και προκαλούν πυρανάφλεξη. Η πυρανάφλεξη μας οδηγεί στο

φαινόμενο της προανάφλεξης, δηλαδή στην ανάφλεξη του μίγματος κατά την συμπίεση πριν την άφιξη του εβόλου στο ΑΝΣ καθώς και τον προγραμματισμένο σπινθηρισμό του σπινθηριστή. Πρέπει να αναφερθεί ότι οι θερμοκρασίες στις ΜΕΚ υδρογόνου θα είναι υψηλότερες σε σχέση με εκείνες των ΜΕΚ βενζίνης και για αυτό το λόγο αναμένονται υψηλότερες εκπομπές οξειδίων του αζώτου από την καύση του υδρογόνου [1].

4.2 Θετικά και Αρνητικά του Υδρογόνου ως Μελλοντικός Φορέας Ενέργειας

Τα αυτοκίνητα υδρογόνου (ή τα αυτοκίνητα κυψελών καυσίμου) λειτουργούν πολύ διαφορετικά από τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Ενώ τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια που έχει ήδη δημιουργηθεί κάπου αλλού (μακριά και αποθηκεύεται στην μπαταρία του αυτοκινήτου), τα αυτοκίνητα υδρογόνου παράγουν τη δική τους ηλεκτρική ενέργεια από ένα σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου (μέσω κυψελών καυσίμου). Ως εκ τούτου, τα αυτοκίνητα κυψελών καυσίμου υδρογόνου είναι στην ουσία ένα υβριδικό αυτοκίνητο, αλλά με κυψέλες καυσίμου (μετατροπή υδρογόνου) αντί για κινητήρα εσωτερικής καύσης (μετατροπή βενζίνης).

Τα θετικά του υδρογόνου είναι τα ακόλουθα:

1. Η διαδικασία της υδρογόνο-κίνησης που μετατρέπει το υδρογόνο σε ηλεκτρική ενέργεια (μέσω των κυψελών καυσίμου) παράγει μηδενικές επιβλαβείς εκπομπές του οχήματος, με την προϋπόθεση ότι το χρησιμοποιούμενο καύσιμο είναι νερό. Όταν καταναλώνουμε την ενέργεια που βρίσκεται σε μια κυψέλη καυσίμου υδρογόνου, τότε η συντριπτική πλειονότητα των εκπομπών που δημιουργούμε από αυτήν τη διαδικασία περιλαμβάνει υδρατμούς και ζεστό αέρα. Λόγω αυτής της έλλειψης εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά την οδήγηση ενός αυτοκινήτου υδρογόνου, θα μπορούσε να επιτευχθεί σημαντική μείωση των εκπομπών άνθρακα. Το 2016, τα αμερικανικά οχήματα παρήγαγαν 1,9 δισεκατομμύρια τόνους διοξειδίου του άνθρακα με αποτέλεσμα να έχουμε περισσότερες εκπομπές CO₂ από τις αντίστοιχες των εργοστασίων της Αμερικής για την ίδια περίοδο. Έτσι, τα αυτοκίνητα υδρογόνου θα μπορούσαν να είναι ευεργετικά για να βοηθήσουν στην μείωση των εκπομπών. Αλλά αυτό για να επιτευχθεί πρέπει η ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται για να διασπαστεί το υδρογόνο από το οξυγόνο να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
2. Το υδρογόνο μπορεί να είναι έως και δύο φορές πιο αποδοτικό από τη βενζίνη: με άλλα λόγια, θα μπορούσε να φτάσει μέχρι και το διπλάσιο της εμβέλειας μιλίων / χιλιομέτρων από ό, τι σε ένα συμβατικό αυτοκίνητο. Αυτό ενισχύεται από το γεγονός ότι ο βαθμός απόδοσης των κυψελών καυσίμου κυμαίνεται από 40% έως 60% για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίστοιχα ο βαθμός απόδοσης των κινητήρων εσωτερικής καύσης κυμαίνεται από 30% έως 35%.
3. Ο ανεφοδιασμός ενός αυτοκινήτου υδρογόνου σε μια αντλία διαρκεί 5 λεπτά ή λιγότερο, όσο δηλαδή και σε ένα συμβατικό αυτοκίνητο. Αντίθετα στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα η φόρτιση που μπορεί να διαρκέσει από 2 έως 5 ώρες.
4. Οι κυψέλες καυσίμου - το ισοδύναμο του κινητήρα εσωτερικής καύσης βενζινοκίνητων αυτοκινήτων - φαίνονται αρκετά ανθεκτικές με βάση εκτεταμένες δοκιμές με το Toyota Mirai.

5. Η ποσότητα του νερού που παράγεται κατά τη καύση είναι τέτοια που σε σχέση με άλλα καύσιμα είναι αμελητέα και μη ικανή να δημιουργήσει κάποια κλιματολογική αλλαγή δεδομένης ακόμα και της μαζικής χρήσης του.

Το υδρογόνο έχει την υψηλότερη ενεργειακή περιεκτικότητα ανά μονάδα βάρους από οποιοδήποτε γνωστό καύσιμο, 120,7 kJ / kg (θερμογόνος ικανότητα), περίπου τρεις φορές μεγαλύτερη από της συμβατικής βενζίνης. Όταν το υδρογόνο καίγεται με οξυγόνο, παράγει μόνο νερό και θερμότητα. Όταν το υδρογόνο καίγεται με αέρα του περιβάλλοντος, ο οποίος αποτελείται από περίπου 68% άζωτο, παράγονται επίσης αμελητέες ποσότητες οξειδίων του αζώτου. Λόγω της καθαρής καύσης υδρογόνου, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι αυτό το καύσιμο δεν συμβάλλει στη ρύπανση του περιβάλλοντος.

Το υδρογόνο με τις κατάλληλες συνθήκες αποθήκευσης και χειρισμού είναι τόσο ασφαλές όσο η βενζίνη, το ντίζελ ή το φυσικό αέριο. Ο μεγαλύτερος κίνδυνος μειώνεται όταν παράγουμε υδρογόνο, και όταν γίνεται η κατανάλωση με την απλή διαδικασία της ηλεκτρόλυσης, δηλαδή σε αυτή την περίπτωση η αποθήκη καυσίμου είναι απλά μια δεξαμενή νερού. Έτσι το υδρογόνο είναι το λιγότερο εύφλεκτο λόγω έλλειψης αέρα με θερμοκρασία ανάφλεξης 585°C (έναντι 480°C της βενζίνης). Το υδρογόνο μπορεί να βοηθήσει στη μείωση του ποσοστού της κατανάλωσης των συμβατικών καυσίμων. Το υδρογόνο μπορεί να παρασκευαστεί με πολλές μεθόδους σε όλες στις χώρες και σε οποιοδήποτε μέρος με αποτέλεσμα να μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη απομακρυσμένων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό θα βοηθήσει τις φτωχότερες και λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες που εξαρτώνται πλέον από την ενέργεια από άλλες ισχυρότερες.

Τα μειονεκτήματα του υδρογόνου σε αντίθεση με τις υπόλοιπες συμβατικές πηγές ενέργειας είναι τα ακόλουθα:

1. Η τιμή αγοράς ενός αυτοκίνητο που έχει ως καύσιμο το υδρογόνο είναι αρκετά υψηλότερη, ακόμη και από τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα αλλά και τα βενζινοκίνητα αυτοκίνητα . Για παράδειγμα, το Toyota Mirai κοστίζει 57.500 \$ για αγορά, ενώ ένα παρόμοιο αυτοκίνητο σε μέγεθος sedan μπορεί να κοστίζει περίπου 25.000 \$ με βενζίνη και από 35.000\$ με 45.000\$ για ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Το ίδιο περίπου συμβαίνει και με την τιμή στο ανάλογο κατάσταση ανεφοδιασμού για κάθε τύπο καυσίμου.
2. Η αποθήκευση του υδρογόνου είναι πολύ δαπανηρή διότι χρειάζεται συγκεκριμένες συνθήκες για να αποθηκευτεί ώστε να μην υπάρχει πρόβλημα και κατά την μεταφορά του. Σε μορφή αερίου είναι πολύ ελαφρύ και η συμπίεση δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί εύκολα σε μικρή δεξαμενή, λόγω της αυξημένης πίεσης που δημιουργείται στη δεξαμενή για να αλλάξει φάση το υδρογόνο από αέριο σε υγρό.
3. Δεν υπάρχουν υποδομές για καταστήματα ανεφοδιασμού υδρογόνου
4. Η τιμή του υδρογόνου σαν καύσιμο σε σχέση με τα υπόλοιπα καύσιμα είναι πολύ πιο ακριβή. Έρευνες έχουν δείξει ότι το 2015 η τιμή του υδρογόνου ήταν

13,99\$/kg και υποθέσεις έχουν γίνει ότι στο διάστημα μεταξύ 2020-2025 η τιμή του θα μειωθεί στα 8-10\$/kg.

5. Σε σχέση με άλλα καύσιμα είναι πιο ακίνδυνο αλλά σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να γίνει πολύ επικίνδυνο λόγω του ότι μπορεί να δημιουργηθεί έκρηξη από το ίδιο το υδρογόνο.
6. Επίσης πολύ ακριβή είναι η τιμή των κυψελών καυσίμου που υπάρχουν για την όσο δυνατόν καλύτερη χρησιμοποίηση του υδρογόνου ως καύσιμο. Επειδή όμως ακόμα δεν είναι πολύ αξιόπιστες, πρέπει να αναπτυχθεί η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου και να βρεθούν λύσεις στα τεχνικά θέματα.

Ένα από τα μεγαλύτερα θέματα που έχουμε αναφέρει πιο πριν είναι η αποθηκευτική ικανότητα του υδρογόνου και πιο συγκεκριμένα στις τρεις φάσεις έχουμε τα εξής προβλήματα: Στην αέρια φάση χρειαζόμαστε δοχείο αποθήκευσης που αντέχει 350 έως 700 bar πίεση λόγω του υδρογόνου που έχει μεγάλη χωρητικότητα. Στην υγρή πάλι μορφή θέλουμε να είναι στους -253°C και κάτω από 700 bar πίεση με αποτέλεσμα να ατμοποιείτε μετά από λίγο διάστημα σε ποσοστό έως 2%. Τέλος στην στερεή μορφή του υδρογόνου, που τα βρίσκουμε ενσωματωμένα μέσα στα ειδικά μέταλλα. Η διαδικασία για την δημιουργία του υδρογόνου χρειάζεται ενέργεια [1],[23].

4.3 Χαρακτηριστικά του Υδρογόνου ως Καύσιμο στις ΜΕΚ

1. Το ευρύ φάσμα αναφλεξιμότητας
2. Η χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης
3. Η μεγάλη ταχύτητα καύσης και η υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης
4. Η μεγάλη ταχύτητα διάχυσης και η αρκετά χαμηλή πυκνότητα
5. Η μικρή απόσταση σβησίματος φλόγας, μαζί με την μεγάλη ενέργεια καύσης κατά μάζα [1].

Ιδιότητα	Υδρογόνο	Μεθάνιο	Βενζίνη
Όρια Καύσης(Περιεκτικότητα % κ.ο στον αέρα)	4-75	5,3-15	1,2-6
Όρια Αναφλεξιμότητας	0,1-7,1	-	~0,7-4
Ελάχιστη Ενέργεια Ανάφλεξης (mJ)	0,02	0,28	0,25
Ταχύτητα Ομαλής Καύσης (m/s)	1,9	0,38	0,37-0,43
Αδιαβατική Θερμοκρασία Καύσης (K)	2318	2190	~2470
Θερμοκρασία Αυτανάφλεξης (K)	858	813	~501-744
Στοιχειομετρικός λόγος Αέρα-Καυσίμου κατά μάζα	34,3	-	15,1
Στοιχειομετρικός λόγος Αέρα-Καυσίμου κατ' όγκο	2,38	-	59,5
Ταχύτητα Καύσης (m/s)	2,65-3,25	0,37-0,45	0,37-0,43
Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη (MJ/kg)	119,7	46,72	44,79

Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (MJ/kg)	141,7	52,68	48,29
Συντελεστής Διάχυσης στον Αέρα (cm ² /s)	0,61	0,189	0,05
Πυκνότητα Αερίου (kg/m ³)	0,083764	0,65119	4,4
Απόσταση σβησίματος φλόγας (mm)	0,64	2,03	~2,0
Θερμογόνος Δύναμη ανά kg Μάζας Αέρα (MJ/kgair)	3,37	2,56	2,79

Πίνακας 1

4.3.1 Ευρύ Φάσμα Αναφλεξιμότητας

Η χαρακτηριστική αυτή ιδιότητα εξασφαλίζει ότι η καύση του αέρα μπορεί να γίνει με ένα ευρύ φάσμα λόγων αέρα-καυσίμου. Για τον λόγο αυτό ακόμα και πτωχά μίγματα αέρα-καυσίμου μπορούν να αναφλεχθούν σχετικά εύκολα. Η δυνατότητα αυτή των πτωχών μιγμάτων είναι ιδανική και προσφέρει αρκετά θετικά αποτελέσματα όσον αφορά θέματα θερμικής απόδοσης, οικονομίας καυσίμου αλλά ακόμα και θέματα μείωσης των ρύπων της καύσης. Αν ένας κινητήρας χρησιμοποιήσει πτωχότερα μίγματα (σχετικά με την στοιχειομετρική αναλογία) θα προκαλέσει σημαντική οικονομία καυσίμου καθώς και ακόμα πιο τέλεια καύση. Ακόμα παρατηρείται μείωση των οξειδίων του αζώτου κατά την εξαγωγή, πράγμα το οποίο οφείλεται στις μέγιστες θερμοκρασίες καύσης που αναπτύσσονται. Βέβαια η χρήση των πτωχότερων μιγμάτων έχει και ένα όριο, το οποίο εάν το ξεπεράσουμε θα παρατηρήσουμε σημαντική μείωση της ισχύος του κινητήρα. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μείωσης της ογκομετρικής «θερμογόνου ικανότητας» του μίγματος [1].

4.3.2 Χαμηλή Ενέργεια Ανάφλεξης

Αυτό συνεπάγεται στο ότι το ποσό ενέργειας που απαιτείται για να γίνει ανάφλεξη είναι μικρότερο σχετικά με την βενζίνη ή το Diesel. Αυτή η ιδιότητα δίνει στο υδρογόνο την δυνατότητα καύσης του σε πτωχά μίγματα, επιτυγχάνοντας ανάφλεξη και πλήρη καύση ακόμα και με κρύο κινητήρα. Το μειονέκτημα της ιδιότητας αυτής είναι η πρόκληση του φαινομένου της προανάφλεξης, λόγω υπέρθερμων σημείων ή πολύ θερμών αερίων μαζών στον θάλαμο καύσης, τα οποία αποτελούν πηγές ανάφλεξης [1].

4.3.3 Υψηλή Θερμοκρασία Ανάφλεξης

Η υψηλή θερμοκρασία ανάφλεξης (858 K) του υδρογόνου μπορεί να έχει μεγαλύτερους βαθμούς συμπίεσης σε αντίθεση με τους βενζινοκινητήρες. Για να έχουμε μεγάλο βαθμό συμπίεσης, μία από τις προϋποθέσεις είναι η μεγάλη σχέση συμπίεσης, διότι βοηθά στην αύξηση της θερμικής απόδοσης του συστήματος και οδηγεί σε μεγαλύτερες ιπποδυνάμεις. Οι φάσεις της συμπίεσης είναι 2, η πρώτη φάση είναι όταν εισέρχεται στον θάλαμο καύσης το μίγμα αέρα καυσίμου, σε θερμοκρασία T1, και η δεύτερη όταν φεύγει από τον θάλαμο καύσης, σε T2 (T1<T2). Η σχέση της

συμπίεσης είναι η εξής: $T_2 = T_1 (V_1/V_2)^{\gamma-1}$, όπου σε αυτή την σχέση ο λόγος, του όγκου στην είσοδο και του όγκου στην έξοδο, είναι ανάλογος με την θερμοκρασία T_2 . Έτσι η θερμοκρασία στην έξοδο είναι αυτή που μας δείχνει τι εύρος έχουμε στον βαθμό συμπίεσης. Μία από τις διαφορές που υπάρχει στο υδρογόνο σε σχέση με τη βενζίνη είναι ότι η θερμοκρασία ανάφλεξης είναι πιο υψηλή. Εάν ξεπεράσει αυτή την υψηλή τιμή ανάφλεξης τότε το μίγμα καυσίμου, πριν φτάσει στο άνω νεκρό σημείο (ΑΝΣ) αναφλέγεται από μόνο του [1].

4.3.4 Μεγάλη Ταχύτητα Καύσης

Ακόμα μια πολύ καλή ιδιότητα του υδρογόνου είναι η ταχύτητα καύσης που είναι σημαντική όταν πραγματοποιείται καύση. Δείχνει την αναλογία σχετικής ταχύτητας του μετώπου της φλόγας σε σχέση με το μίγμα καυσίμου και αέρα στο οποίο δεν έχει γίνει η καύση. Εάν πρέπει να ελαττώσουμε τον ρυθμό καύσης μπορούμε στην καύση να χρησιμοποιούμε φτωχό μίγμα καυσίμου αέρα. Όμως, ακόμη αν και χρησιμοποιήσουμε φτωχό μίγμα καυσίμου η ταχύτητα της καύσης υδρογόνου παραμένει πολύ απότομη. Έτσι η απαγωγή θερμότητας από το θάλαμο καύσης είναι πάρα πολύ γρήγορη και η καύση κρατά πολύ λίγο σε διάρκεια, με αποτέλεσμα η ταχύτητα καύσης του υδρογόνου να ξεπερνά την ταχύτητα καύσης της βενζίνης και να βρίσκεται πιο κοντά στον ιδανικό θερμοδυναμικό κύκλο. Αυτό μας προσφέρει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης. Η καύση φτωχών μιγμάτων όπως αναφέραμε, μας παρέχει λιγότερη κατανάλωση, καθώς και την σταθερή θερμοκρασία εξόδου του στο θάλαμο καύσης και τις ελάχιστες εκπομπές ρύπων. Αλλά υπάρχουν και κάποια αρνητικά στην μεγάλη ταχύτητα καύσης, όπως η μικρότερη ιπποδύναμη κινητήρα σε σχέση με κινητήρες βενζίνης, για τον ίδιο όγκο εμβολισμού. Επιπλέον όταν έχουμε ακαριαία απαγωγής της ενέργειας και πολύ γρήγορο χρόνο καύσης, δημιουργείται καταπόνηση στον κινητήρα λόγω της στιγμιαίας αύξησης της πίεσης και των υψηλών θερμοκρασιών στον θάλαμο καύσης. Το τελευταίο θετικό που αξιοποιούμε από την μεγάλη ταχύτητα καύσης, είναι η ορθή λειτουργία του κινητήρα ακόμη και σε υψηλές στροφές περιστροφής [1].

4.3.5 Χαμηλή Πυκνότητα και Υψηλή Κατά Μάζα Ενέργεια Καύσης

Σύμφωνα με τον πίνακα (Πίνακας 1) που αναφέραμε προηγουμένως, παρατηρούμε ότι το υδρογόνο, συγκριτικά με την βενζίνη, έχει αρκετά χαμηλή πυκνότητα. Ανεξαρτήτως της μεγαλύτερης κατά μάζας ενεργειακής καύσης του, πάλι θα χρειαστεί μια δεξαμενή με σχετικά μεγάλο όγκο, ούτως ώστε η ενέργεια που θα παράγει να είναι αντίστοιχη με εκείνη της βενζίνης. Βέβαια η ιδιότητα αυτή (χαμηλή πυκνότητα) μας οδηγεί σε δυσκολίες όσον αφορά τους τρόπους αποθήκευσής του γιατί είναι αρκετά δαπανηροί και ενεργοβόροι. Για αυτό εναλλακτικοί τρόποι αποθήκευσης είναι 1] με συμπίεση 2] ως κρυογενικό υγρό και 3] ως υδρίδιο μετάλλου [1].

4.3.6 Υψηλός Συντελεστής Διάχυσης

Ο υψηλός συντελεστής διάχυσης είναι μια ικανότητα περιγραφής της διάχυσης του καυσίμου στον αέρα, αποτελεσματικότερα από την βενζίνη. Το γεγονός αυτό έχει ως

αποτέλεσμα το μίγμα το οποίο δημιουργείται να επηρεάζει θετικά την λειτουργία της μηχανής όταν έχουμε καύση πτωχών ή πολύ πτωχών μιγμάτων. Ακόμα, μειώνεται η πιθανότητα πρόκλησης εκρήξεως, στην περίπτωση που έχουμε διαρροή, λόγω της μεγάλης ταχύτητας κατά την διάχυση και την διαφυγή του υδρογόνου στο περιβάλλον [1].

4.3.7 Μικρή Απόσταση Σβησίματος-Εξάλειψη της Φλόγας

Το χαρακτηριστικό αυτό της καύσης, αναλύει το διάστημα από τα τοιχώματα του κυλίνδρου στο οποίο μειώνεται το μέτρο του μετώπου της φλόγας του καυσίμου από θερμικές απώλειες. Είναι ωφέλιμο για την απόδοση των μηχανών εσωτερικής καύσης του υδρογόνου, επειδή αφήνει το μέτωπο της καύσης να διανύσει την περισσότερη διαδρομή προς τα τοιχώματα του κυλίνδρου πριν σβήσει η φλόγα. Με αυτό τον τρόπο πραγματοποιείται σωστή και ομοιογενής καύση του υδρογόνου, αντίθετη με την καύση της βενζίνης, και αυτό γίνεται πριν ολοκληρωθεί η εκτόνωση στην καύση λόγω των θερμικών απωλειών. Παρόλα αυτά όμως δημιουργούν συνθήκες οι οποίες παρουσιάζουν το φαινόμενο της ανάφλεξης του μείγματος, μέσα στην πολλαπλή εισαγωγή κατά τον χρόνο που εισέρχεται στον κύλινδρο (backfire) [1].

4.4 Παράγωγα Καύσης των MEK Υδρογόνου και Σύγκριση με Ρύπους των MEK Βενζίνης

Οι ορυκτοί υδρογονάνθρακες προσφέρουν πάνω από το 90% της ενέργειας που χρειάζεται ο πλανήτης τα τελευταία χρόνια. Ως γνώμονα την επιπλέον αύξηση των ενεργειακών αναγκών, στο σύντομο μέλλον για τις αναπτυσσόμενες χώρες αλλά και για τις αναπτυσσόμενες χώρες ξέρουμε ότι τα αποθέματα του ορυκτού πλούτου έχουν ημερομηνία λήξης δηλαδή σε μερικές δεκαετίες δεν θα μπορούσαμε να καλύψουμε την ενεργειακή ζήτηση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί στο περιβάλλον το ποσοστό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, και συνεπώς το ποσοστό των εκπομπών που θα έχουμε δημιουργήσει θα έχει πιο μεγάλη επίπτωση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Το διοξείδιο του άνθρακα παράγεται από τα οχήματα που χρησιμοποιούν κατά κόρον οι άνθρωποι στις μέρες μας για τις μετακινήσεις τους. Αλλά εκεί που πρέπει να σταθούμε είναι ότι οι μηχανές εσωτερικής καύσης δεν αποβάλλουν μόνο διοξείδιο του άνθρακα κατά την καύση. Οι ρύποι που επίσης εκπέμπουν είναι οι πρωτογενείς ή δευτερογενείς ρύποι, οι οποίοι είναι το μονοξείδιο του άνθρακα, άκαυστοι υδρογονάνθρακες, αλδεΐδες, κετόνες, οξείδια του θείου, οξείδια του αζώτου, βενζόλιο και άλλα. Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι τοξικό αέριο και δημιουργεί σοβαρές βλάβες στο κεντρικό νευρικό σύστημα του ανθρώπου όταν βρίσκεται σε μικρές συγκεντρώσεις. Αντίθετα σε μεγάλες συγκεντρώσεις μπορεί να επιφέρει μέχρι και τον θάνατο.

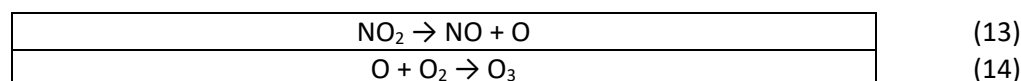
Συμπληρωματικά το αίτιο για την όξινη βροχή είναι το διοξείδιο του θείου και τα οξείδια του αζώτου. Επιπλέον από μόνο του το διοξείδιο του αζώτου με την βοήθεια της υπεριώδους ακτινοβολίας προκαλεί αύξηση του όζοντος στις μεγάλες πόλεις και έχει ως αποτέλεσμα κακές συνέπειες για αυτούς που ζουν σε πόλεις. Κλείνοντας το θέμα των επιπτώσεων από τα ορυκτά καύσιμα έχουμε και την δημιουργία των καρκινογενέσεων που το αίτιο για αυτό το πρόβλημα είναι οι αρωματικοί

υδρογονάνθρακες, όπως το βενζόλιο, το οποίο όπως προαναφέρθηκε προέρχονται από τα αυτοκίνητα.

Έχοντας ως γνώση τις επιπτώσεις που αναφέραμε πιο πάνω η εύρεση νέου καυσίμου το οποίο θα είναι καθαρό και άρα φιλικό προς το περιβάλλον είναι μονόδρομος και έτσι φτάσαμε να μιλάμε για το υδρογόνο. Το υδρογόνο παρουσιάζει μια ιδιαιτερότητα, γιατί δεν χρειάζεται, κατά την καύση του, την παρουσία των μορίων του άνθρακα. Ως αποτέλεσμα από την καύση του υδρογόνου είναι να δημιουργούνται μόνο υδρατμοί και οξείδια του αζώτου. Ένα από τα κοινά που έχουν τα δύο καύσιμα κατά την καύση, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, είναι η δημιουργία μονοξειδίου του αζώτου (NO) από τα στοιχεία του αέρα, το οξυγόνο και το άζωτο, και στην συνέχεια όταν φτάνει το μονοξείδιο του αζώτου στην έξοδο της μηχανής ή στην ατμόσφαιρα, γίνεται αντίδραση ενός ποσοστού μονοξειδίου του αζώτου και δημιουργείται το διοξείδιο του αζώτου (NO₂). Όλες οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) προέρχονται μόνο από τις συγκεντρώσεις μονοξειδίου και διοξειδίου του αζώτου και η μονάδα μέτρησής τους είναι ppm ή gr/KWh. Στα οχήματα που έχουν ως καύσιμο το υδρογόνο βρίσκουμε πιο πολλά οξείδια του αζώτου σε σχέση με οχήματα που έχουν ως καύσιμο τη βενζίνη. Αυτό οφείλεται στις πιο υψηλές θερμοκρασίες που έχουμε κατά την καύση στις μηχανές υδρογόνου. Ακόμα κατά την καύση του υδρογόνου παράγονται άκαυστοι υδρογονάνθρακες και παράγονται μικρές ποσότητες μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα. Αυτό γίνεται σε κάθε μηχανή εσωτερικής καύσης διότι υπάρχει το λιπαντικό που βοηθά στην ψύξη, την μείωση της τριβής, στην στεγανοποίηση και στη μη οξείδωση της μηχανής. Κατά την καύση του υδρογόνου μια πολύ μικρή ποσότητα λιπαντικού φτάνει στον θάλαμο καύσης και καίγεται αλλά επειδή δεν είναι μεγάλη η ποσότητα δεν το θεωρούμε σημαντικό πρόβλημα [1].

4.4.1 MEK Υδρογόνου Και Οξείδια Του Αζώτου (NO_x)

Σύμφωνα με νεότερες έρευνες, έχουμε παρατηρήσει ότι το κύριο συστατικό του φωτοχημικού νέφους είναι το όζον (O₃), το οποίο δημιουργείται στα κατώτερα τμήματα της ατμόσφαιρας λόγω των φωτοχημικών αντιδράσεων οι οποίες δρουν υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτή η διαδικασία εξηγείται μέσω των παρακάτω αντιδράσεων:



Το διοξείδιο του αζώτου διασπάται σε μονοξείδιο του αζώτου και σε μονοατομικό οξυγόνο. Στην πορεία το μονοατομικό οξυγόνο ενώνεται με το δυατομικό οξυγόνο παράγοντας το αέριο όζον. Μια από τις πιο σημαντικές πηγές παραγωγής οξειδίων του αζώτου είναι οι εξατμίσεις των οχημάτων.

Το όζον, στην στρατόσφαιρα, αποσκοπεί στην προστασία του ανθρώπου, της φύσης καθώς και των ζώων από την υπερύβη ακτινοβολία του ήλιου. Στην τροπόσφαιρα όμως, δημιουργεί αρκετά προβλήματα υγείας στον άνθρωπο όπως για

παράδειγμα βήχα, άσθμα, φλεγμονή στους πνεύμονες και μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε μολύνσεις στο αναπνευστικό σύστημα.

Όσον αφορά τα οξείδια του αζώτου, εάν βρίσκονται σε υψηλές συγκεντρώσεις, προκαλούν βλάβες στους ανθρώπους καθώς και στο οικοσύστημα. Μπορούν να γίνουν διακριτά, στις μεγαλουπόλεις, ιδίως στον ουρανό μέσω της δυσάρεστης καφέ απόχρωσης στην ατμόσφαιρα. Εδώ οφείλεται και το φαινόμενο της όξινης βροχής η οποία πήρε το όνομά της λόγω του χαμηλού PH (όξινου χαρακτήρα), δηλαδή υψηλή περιεκτικότητα σε θειικό οξύ (H_2SO_4) και σε νιτρικό οξύ (HNO_3) [1].

4.4.2 Παράμετροι που Αποτρέπουν τον Σχηματισμό NOx

Για να μπορέσουμε να εισάγουμε το υδρογόνο στον παγκόσμιο ενεργειακό χάρτη, πρέπει να αναγνωριστούν οι συνθήκες (παράμετροι) λειτουργίας της μηχανής ως προς την αποφυγή ή την ευκολία σχηματισμού οξειδίων του αζώτου. Τέτοιες παράμετροι μπορεί να είναι:

1. Οι υψηλές θερμοκρασίες στον θάλαμο καύσης, που σε συνδυασμό με το διαθέσιμο οξυγόνο ευθύνονται για την μεγάλη παραγωγή των οξειδίων του αζώτου.
2. Ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου – αέρα (Φ), ο οποίος αποσκοπεί στην ομαλή και απρόβλεπτη λειτουργία του κινητήρα μειώνοντας τη δημιουργία των οξειδίων του αζώτου. Υπολογίζεται ότι ο Φ παίρνει τιμές από 0,5 έως 1,1 ($0,5 < \Phi < 1,1$)
3. Ο χρόνος έγχυσης, ο οποίο ρυθμίζεται με βάση την καλύτερη απόδοση και την μικρότερη ρύπανση.
4. Η προπορεία της ανάφλεξης, όπου στις MEK υδρογόνου έχουμε μικρότερη προπορεία από ότι στις MEK βενζίνης, κάτι το οποίο οφείλεται στην γρηγορότερη ικανότητα του υδρογόνου να καίγεται.
5. Ο βαθμός συμπίεσης, ο οποίος εξαρτάται από την συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου κατά την έξοδο. Μεγάλος βαθμός συμπίεσης οδηγεί και σε μεγαλύτερες πιέσεις και θερμοκρασίες στον θάλαμο καύσης, άρα και σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις οξειδίων του αζώτου.
6. Η ‘πεταλούδα’, η οποία χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του φορτίου αυξάνοντας τις εκπομπές του οξειδίου του αζώτου. Όμως λόγω των μεγάλων ορίων καύσης του υδρογόνου, οι κινητήρες μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς αυτήν με αποτέλεσμα την μείωση των εκπομπών του οξειδίου του αζώτου καθώς και μικρότερες θερμοκρασίες στον θάλαμο.
7. Η μεγάλη ταχύτητας διάχυσης, η οποία βοηθά στην ομογενοποίηση του μίγματος αέρα – υδρογόνου, χωρίς τον απαραίτητο σχεδιασμό των θαλάμων καύσης όπως γίνονται στους κινητήρες βενζίνης το οποίο συνεισφέρει στην ενδυνάμωση της τυρβώδους ροής. Η μεγάλη ταχύτητα διάχυσης έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη των μικρότερων θερμοκρασιών και την μείωση των εκπομπών του οξειδίου του αζώτου.
8. Τελευταία παράμετρος είναι η επιλογή του υδρογόνου ως καύσιμο, το οποίο οδηγεί σε χαμηλές μέγιστες θερμοκρασίες καύσης μέσα στην μηχανή [1].

4.4.3 Μηχανισμοί Μείωσης Εκπεμπόμενων NO_x

Σε έρευνα που έχει ως ζητούμενο την ελάττωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου, σε πειραματικό πάντα επίπεδο, σε μηχανές εσωτερικής καύσης που έχουν ως καύσιμο το υδρογόνο βρέθηκαν αρκετές λύσεις ή τεχνικές που μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές NO_x. Κάποιες από αυτές τις μεθόδους είναι η ανακύκλωση καυσαερίων (EGR) και η τεχνολογία επίλεκτης κατάλυσης για την μείωση οξειδίων του αζώτου στις βενζινομηχανές αλλά και ρίψη νερού στο μείγμα αέρα-υδρογόνου. Σύμφωνα με την επεξήγηση που έγινε παραπάνω λόγω των μεγάλων θερμοκρασιών που δημιουργούνται στον κύλινδρο και στον θάλαμο καύσης, αυξάνεται ο ρυθμός παραγωγής των οξειδίων του αζώτου. Ο ψεκασμός ατμού στην πολλαπλή εισαγωγή του κινητήρα αποτελεί έναν τρόπο μείωσης των NO_x. Μάλιστα ο ψεκασμός νερού σε υγρή φάση έχει αποδειχθεί πως έχει την δυνατότητα να ελαττώσει κατά πολύ τις θερμοκρασίες στο θάλαμο καύσης, όταν η απαραίτητη θερμότητα για την ατμοποίηση του νερού αφαιρείται από την θερμογόνο ικανότητα του μείγματος. Η εξήγηση είναι ότι το νερό δρα ως ένας διαλύτης για να αλλάξει τα υψηλά επίπεδα της θερμοκρασίας που υπάρχουν στο θάλαμο καύσης, έτσι ώστε το νερό να πάρει τον ρόλο ενός ελεγκτή θερμοκρασίας και με αυτόν τρόπο η ατμοποίηση του νερού ελαττώνει την θερμοκρασία καύσης. Έτσι καταφέρνουμε ελάττωση της συγκέντρωσης του οξυγόνου και του αζώτου από τον ατμό, άρα και μεταβολή στις ειδικές θερμότητες του καυσίμου. Η έγχυση νερού σε υγρή μορφή στην εισαγωγή του κινητήρα, όπως αναφέραμε, είναι ένας πολύ καλός μηχανισμός ελάττωσης των εκπομπών ρύπων αζώτου αλλά το αρνητικό σε αυτή την εφαρμογή είναι, ότι δημιουργεί οξείδωση στις μεταλλικές επιφάνειες που διοχετεύεται στην μηχανή και δεύτερον η χειροτέρευση της σύνθεσης του λιπαντικού της μηχανής.

Η ανακύκλωση των καυσαερίων χρησιμοποιείται κατά κόρον, σε πτωχά μείγματα υδρογόνου και αέρα, για την ελάττωση των εκπομπών NO_x. Ενώ σε πλούσια μείγματα ο μηχανισμός αυτός δεν είναι αποδοτικός. Έτσι χάρις στα πειράματα γνωρίζουμε λόγω της υψηλής ταχύτητας καύσης υδρογόνου και αέρα διευκολύνει την ανακύκλωση των καυσαερίων κατά 50%, χωρίς βέβαια να υπάρχουν ελάχιστες εκπομπές οξειδίων του αζώτου και δημιουργούνται προϋποθέσεις ομαλής λειτουργίας της μηχανής. Εν αντίθεση με τους κινητήρες βενζίνης, όπου χρησιμοποιούμε τον ίδιο μηχανισμό για τη αποφυγή εκπομπών NO_x, έχουμε ποσοστό ανακύκλωσης των καυσαερίων σε ένα εύρος μεταξύ 15 έως 30% [1].

4.4.4 Υπεροξείδιο του Υδρογόνου στις MEK Υδρογόνου

Εκτός από τα οξείδια του αζώτου ένας άλλος ρύπος των μηχανών εσωτερικής καύσης είναι η χημική ένωση το υπεροξείδιο του υδρογόνου (H₂O₂) και βρίσκεται στην έξοδο του κινητήρα. Ενώ το υπεροξείδιο δεν συμπεριλαμβάνεται πάντα ως ένα ρύπος των μηχανών υδρογόνου στην βιβλιογραφία δεν πρέπει να τον υποτιμούμε. Ο ρύπος αποσυντίθεται και δημιουργεί ρίζες υδροξυλίου (OH) που είναι η κύρια η αιτία που οδηγεί στον σχηματισμό της φωτοχημικής ομίχλης. Από πειραματικές μετρήσεις γνωρίζουμε ότι ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου αέρα είναι φ>0,5 ενώ στην έξοδο η συγκέντρωση του υπεροξειδίου του υδρογόνου είναι πρακτικά μηδέν. Αντίθετα για φ>0,5 ο ρύπος αυτός ήταν ανιχνεύσιμος, με τα επίπεδα συγκέντρωσης να είναι αντίστροφος ανάλογα με τον λόγο ισοδυναμίας. Οι υψηλές συγκεντρώσεις

υπεροξειδίου στην έξοδο, μπορούν να παράγονται από τις αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στον θάλαμο καύσης. Το συμπέρασμα που πρέπει να ξέρουμε για το μέλλον είναι, ότι οι συγκεντρώσεις υπεροξειδίου του υδρογόνου είναι δυνατόν να θέσουν σε μεγάλο κίνδυνο το περιβάλλον. Αν αποδειχθεί πως υπάρχει κίνδυνος για το περιβάλλον θα πρέπει αναγκαστικά να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο καταλυτικού ή θερμικού μετατροπέα για την αποσύνθεση του υπεροξειδίου του υδρογόνου (H_2O_2) σε υδρογόνο (H_2) και οξυγόνο (O_2) [1].

4.5 Φαινόμενα Ανώμαλης Καύσης στις MEK Υδρογόνου

Οι ιδιότητες της καύσης του υδρογόνου όπως προαναφέραμε, είναι αρκετά σημαντικές για να δούμε τι μπορεί να προσφέρει ως καύσιμο στις μηχανές εσωτερικής καύσης. Στις MEK βενζίνης έχουμε κάποια φαινόμενα ανώμαλης καύσης, όπως 1] την προανάφλεξη 2] την κρουστική καύση και 3] την ανάφλεξη του μίγματος στην πολλαπλή εισαγωγή (backfire), τα οποία οδηγούν στην αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας, στην μείωση της απόδοσης καθώς και στην απώλεια ισχύος στην μηχανή. Παρακάτω θα αναλύσουμε τα φαινόμενα ένα προς ένα [1].

4.5.1 Ανάφλεξη Εισαγωγής

Η ανάφλεξη υφίσταται σε οποιαδήποτε μηχανή εσωτερικής καύσης στην οποία η ανάμιξη του καυσίμου γίνεται πριν την τοποθέτησή του στον θάλαμο καύσης. Αυτή οφείλεται στην ανάφλεξη του μίγματος αέρα-καυσίμου, λόγω μιας πηγής με υψηλό θερμικό φορτίο, στον χρόνο εισαγωγής όταν η βαλβίδα εισαγωγής είναι ανοιχτή με αποτέλεσμα το μίγμα να εκρήγνυται. Όσον αφορά τις MEK υδρογόνου, όπου η ανάμιξη γίνεται με την βοήθεια ενός εξαεριωτή (καρμπυρατέρ), το φαινόμενο της ανάφλεξης αποτέλεσε ένα φράγμα στην διαδικασία διερεύνησής τους επειδή εμφανιζόταν πολλές φορές μέσα στην διάρκεια των δοκιμών, πράγμα το οποίο ήταν δύσκολο να επιλυθεί, επειδή η ανίχνευση της αιτίας που το προκάλεσαν ήταν αρκετά δύσκολη [1].

4.5.2 Λόγοι Πρόκλησης Ανάφλεξης Στην Εισαγωγή

Κάποιες αιτίες για τις οποίες προκαλείται ανάφλεξη είναι οι εξής:

1. Τα υπέρθερμα σημεία στον θάλαμο καύσης. Αυτά μπορεί να είναι επικαθήσεις στα τοιχώματα του κυλίνδρου και σωματίδια από την πυρόλυση του λιπαντικού τα οποία έχουν εισαχθεί στον θάλαμο καύσης λόγω κάποιων κατασκευαστικών ανοχών. Μπορεί ακόμα να είναι και αδρανή σωματίδια σκόνης. Η θερμοκρασία των σωματιδίων αυτών, ύστερα από την εκτόνωση, θα είναι μεγαλύτερη από εκείνη των επιφανειών του θαλάμου καύσης λόγω της μικρής θερμικής μάζας τους και της ιδιότητας ανεπαρκούς μεταφοράς της θερμότητας. Υπέρθερμες πηγές μπορεί να είναι ακόμα και ο σπινθηριστής (μπουζί) ή και οι ποσότητες των υπέρθερμων αερίων μαζών που έχουν απομείνει από προηγούμενους κύκλους.
2. Η ενέργεια που έχει απομείνει στο ηλεκτρικό κύκλωμα της ανάφλεξης. Εδώ λόγω της αρκετά χαμηλής συγκέντρωσης των ιόντων κατά την καύση του μίγματος, υπάρχει πιθανότητα η ενέργεια ανάφλεξης του μίγματος να μην

εκλύεται πλήρως ως προς την ανάφλεξη του και έτσι κάποια ποσότητά της να παραμένει στο κύκλωμα, μέχρι να υπάρξουν συνθήκες χαμηλότερης πίεσης, ούτως ώστε κατά την εκτόνωση ή την εισαγωγή να προκύψει κάποια ανάφλεξη την οποία δεν την περιμέναμε.

3. Η επαγωγή στα καλώδια του ηλεκτρικού συστήματος ανάφλεξης, κάτι το οποίο υφίσταται σε περίπτωση πολυκύλινδρου κινητήρα όπου τα καλώδια του ενός κυλίνδρου μπορούν να δημιουργήσουν επαγωγική ανάφλεξη με τα καλώδια ενός γειτονικού εάν βρίσκονται σχετικά κοντά.
4. Οι διαδοχικές προαναφλέξεις. Η προανάφλεξη είναι μια από τις κύριες ιδιότητες των MEK υδρογόνου, σε μεγαλύτερο ποσοστό από ότι στις MEK βενζίνης. Αυτό συμβαίνει λόγω της χαμηλής ενέργειας ανάφλεξης αλλά και του μεγάλου εύρους αναφλεξιμότητας του υδρογόνου. Αυτή ενεργοποιείται μέσω των υπέρθερμων σημείων του θαλάμου καύσης, οδηγώντας σε πρόωρη καύση του μίγματος κατά την φάση της συμπίεσης καθώς και στις υψηλές θερμοκρασίες στις επιφάνειες του θαλάμου. Εφόσον αυξάνεται η θερμοκρασία θα έχουμε συχνότερες προαναφλέξεις και το έμβολο, κατά την διάρκεια της προανάφλεξης, θα τείνει στο Κάτω Νεκρό Σημείο. Στην μηχανή, εάν υπάρξει υπέρθερμο σημείο στην διάρκεια της εισαγωγής, τότε το μίγμα θα αναφλεχθεί πριν να κλείσει η βαλβίδα εισαγωγής με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν εκρήξεις στην πολλαπλή εισαγωγής. Αυτός ο μηχανισμός της έκρηξης προκαλείται από κρουστικές καύσεις, και οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας στον θάλαμο και στην δημιουργία υπέρθερμων σημείων.
5. Τέλος έχουμε την καταλυτική επίδραση των μετάλλων του θαλάμου καύσης. Εδώ η επαφή του μίγματος με τις μεταλλικές επιφάνειες του θαλάμου και σε συνδυασμό με τις μεγάλες θερμοκρασίες που υπάρχουν μέσα στον θάλαμο, δημιουργούν έναν μηχανισμό ανάφλεξης του μίγματος με τα μέταλλα, μέσω των καταλυτικών αντιδράσεων των μετάλλων. Όμως για να αποφύγουμε τις υψηλές θερμοκρασίες, μπορούμε να καλύψουμε τις μεταλλικές επιφάνειες με αλουμίνιο έτσι ώστε να μειώσουμε τις θερμοκρασίες και επομένως να μειώσουμε τις δυνατότητες ανάφλεξης [1].

4.5.3 Τρόποι Αντιμετώπισης

Γνωρίζοντας από την αναφορά που έγινε πιο πάνω για όποια μέθοδο ανάμιξης του μίγματος του καυσίμου πριν τον θάλαμο καύσης δημιουργείται καλύτερη αντιμετώπιση ως προς την ανάφλεξη του μίγματος στην πολλαπλή εισαγωγής. Η πιο αξιόπιστη μέθοδος είναι η έγχυση του καυσίμου στον αυλό της εισαγωγής, αλλεπάλληλα σε κάθε κύλινδρο κατά το άνοιγμα της βαλβίδας εισαγωγής και αυτή ονομάζεται PFI (Port fuel injection). Με αυτόν τον τρόπο καταφέρνουμε να μειώσουμε κατά πολύ την πιθανότητα ανάφλεξης, αλλά ανεξάρτητα από τη σωστή εκτέλεση της μεθόδου υπάρχει πάντα μία μικρή πιθανότητα ανάφλεξης. Αντίθετα στους Diesel κινητήρες αυτή η μέθοδος, του άμεσου ψεκασμού του καυσίμου απευθείας στο θάλαμο καύσης και σε υψηλές πιέσεις έγχυσης καυσίμου, καταφέρνει να μην δημιουργεί ανάφλεξη στην εισαγωγή, δεδομένου όμως ότι θα έχουμε μίγμα καυσίμου-αέρα που να φτιάχνεται απευθείας στον κύλινδρο. Τα συστήματα έγχυσης καυσίμου είναι μέσα στο

θάλαμο καύσης και αυτή η μέθοδος του ηλεκτρονικού ελέγχου της έγχυσης του καυσίμου ονομάζεται DI ή FSI (Direct Injection ή Fuel Stratified Injection). Ένα αρνητικό που έχουν αυτά τα συστήματα του άμεσου ψεκασμού, είναι η πολυπλοκότητα και ότι είναι δαπανηρά. Αυτός είναι και ο λόγος που όταν πραγματοποιήθηκε στους υπάρχοντες κινητήρες αυτή η μέθοδος ήταν δύσκολη έως και ακατόρθωτη. Έτσι δεν έγινε εφικτή η εκμετάλλευσή της στην έρευνα των μηχανών εσωτερικής καύσης του υδρογόνου παρόλο που ήταν πιο αναπτυγμένη τεχνολογικά σε σχέση με άλλα συστήματα ανάφλεξης. Βέβαια, η εκμετάλλευση της δίχως προβλήματα αξιοπιστίας και ρύπων πραγματοποιήθηκε την δεκαετία που διανύουμε και μάλιστα ακόμη και για τους κινητήρες βενζίνης. Η ανάγκη για μείωση του κόστους αλλά και για τον πιο εύκολο έλεγχο των ρυθμίσεων του κινητήρα, προέτρεψε στην επιλογή των συστημάτων έγχυσης του μίγματος στην πολλαπλή εισαγωγή (PFI), σε μεγαλύτερο ποσοστό εφαρμογών από κάθε άλλη μέθοδο. Ο ψεκασμός του μίγματος καυσίμου σε μικρή απόσταση από την θυρίδα εισαγωγής, στα στάδια που υπάρχουν προς το τέλος της φάσης της συμπίεσης, και βέβαια η καλή ρύθμιση της προπορείας, είναι οι δύο παράγοντες που ρυθμίζουν τους περιορισμούς στην ανάφλεξη της εισαγωγής. Η μέθοδος αυτή μπορεί να καταφέρει με κάποιες αναβαθμίσεις και σε πολύ περιορισμένες συνθήκες λειτουργίας, η λειτουργία του κινητήρα να είναι σταθερή, δίχως προβλήματα και χωρίς να δημιουργείται πρόβλημα στην ανάφλεξη.

Κάποιες ακόμη μέθοδοι της ελάττωσης του φαινομένου ανάφλεξης στην εισαγωγή είναι η συγκράτηση των θερμοκρασιών σε επίπεδα που δεν επιτρέπουν την ανάφλεξη του καυσίμου από υπέρθερμες εναπομείνουσες μάζες καυσαερίων αλλά και επικαθίσεις. Συνεπώς γίνεται η ανακύκλωση των καυσαερίων, η καύση πτωχών μιγμάτων καυσίμου, η διέλευση του νερού στην εισαγωγή, η αποδοτικότερη ψύξη των βαλβίδων και των σπινθήρων (μπουζί) και τέλος βάζουμε στις επιφάνειες του κινητήρα που γίνεται η καύση, μη αγώγιμα υλικά όπως είναι το αλουμίνιο. Αυτοί οι μέθοδοι βοηθούν στην μείωση της ταχύτητας καύσης έτσι ώστε να αυξήσουν το συγκεκριμένο ποσό ενέργειας ανάφλεξης. Οποιαδήποτε άλλη τροποποίηση που μπορεί να δημιουργήσει συνθήκες μικρότερης ταχύτητας καύσης και μεγαλύτερης ενέργειας ανάφλεξης θα έχει ως αποτέλεσμα την αποφυγή της πυρανάφλεξης στον κινητήρα.

Ακόμα, ο σχεδιασμός των επιμέρους τμημάτων της μηχανής μπορεί να χειροτερέψει ή να επιλύσει το πρόβλημα της ανάφλεξης στην πολλαπλή εισαγωγής. Για αυτό το λόγο χρειάζεται προσοχή στην κατασκευή του κινητήρα ώστε να μην έχουμε ανεπιθύμητη ανάφλεξη, αποφεύγοντας τις γωνίες, τις εσοχές και τις ακμές μεγάλης κλίσης στον κινητήρα αλλά και λειαίνοντας τις επιφάνειες στο θάλαμο καύσης. Ακόμα κάτι το οποίο δεν πρέπει να γίνεται είναι η εισχώρηση του λιπαντικού στον θάλαμο καύσης, γιατί δεν πραγματοποιείται ομαλά η καύση και έχουμε αύξηση ρύπων. Για να καταφέρουμε την αποφυγή αυτών των προβλημάτων προσπαθούμε να επιτύχουμε όσο το δυνατόν μικρότερη ανοχή μεταξύ ελατηρίων και τοιχωμάτων του θαλάμου καύσης. Τέλος μία διαφορά που υπάρχει μεταξύ των MEK υδρογόνου και βενζίνης είναι οι σπινθηριστές. Για την ακρίβεια, οι σπινθηριστές που χρησιμοποιούνται στους κινητήρες βενζίνης είναι απαγορευτικοί για τους κινητήρες υδρογόνου γιατί αποτελούν βασική θερμική πηγή πυρανάφλεξης. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι δεν είναι κατασκευασμένοι να αποβάλλουν το υψηλό θερμικό φορτίο

στις συνθήκες μεγάλων θερμοκρασιών που υπάρχουν στο θάλαμο καύσης της μηχανής υδρογόνου [1].

4.5.4 Προανάφλεξη

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό που έχει τη δική του βαρύτητα στην ανώμαλη καύση στους κινητήρες του υδρογόνου, προσδιορίζοντας σε αρκετά μεγάλο βαθμό τις συνθήκες λειτουργίας τους και τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού τους, είναι η προανάφλεξη. Η προανάφλεξη υπάρχει και στους κινητήρες βενζίνης και ονομάζεται η πρωθύστερη ανάφλεξη του μίγματος στη φάση της συμπίεσης, πριν την ηλεκτρική εκκένωση του σπινθηριστή. Η πυρανόφλεξη, που προκύπτει από τις εστίες υψηλού θερμικού φορτίου, είναι υπεύθυνη για το φαινόμενο της προανάφλεξης. Έτσι συμπεραίνουμε ότι οι αιτίες που δημιουργούν την προανάφλεξη, δημιουργούν και την ανάφλεξη στην εισαγωγή. Άρα τα αιωρούμενα σωματίδια και οι επικαθίσεις στα τοιχώματα του κυλίνδρου, που προκαλούνται από την πυρόλυση του λιπαντικού καθώς και άλλα υπέρθερμα σημεία που προέρχονται από τα ηλεκτρόδια των μπουζί συμβάλουν στην εμφάνιση του φαινομένου. Ακόμα υπάρχει η ψυχόμενη βαλβίδα εξαγωγής ή καυσαέρια που έχουν παραμείνει από τον προηγούμενο κύκλο στον θάλαμο καύσης, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν ανάφλεξη του μίγματος ακόμα και με αυτή την ελάχιστη ενέργεια.

Η προανάφλεξη γίνεται αντιληπτή όταν ακούγεται ένας συγκεκριμένος ήχος στον κινητήρα σαν κρότος κατά την λειτουργία του και πειραματικά μπορούμε να το δούμε με ειδικούς αισθητήρες στον θάλαμο που πραγματοποιείται η καύση. Οι αισθητήρες αυτοί ανιχνεύουν την μεταβολή της θερμοκρασίας. Η πολύ γρήγορη αύξηση του θερμικού φορτίου του καυσίμου, όταν πραγματοποιείται η συμπίεση, έχει την κατάληξη της απότομης αύξησης της πίεσης στον κύλινδρο άρα και μεγάλη μεταβολή των πιέσεων και των θερμοκρασιών. Οι επιπτώσεις της προανάφλεξης στην μηχανή ισούνται με μείωση της απόδοσης ή την απώλεια της ισχύος και την κακή λειτουργία του κινητήρα, και στη δυσμενέστερη περίπτωση προξενεί πολύ σημαντικές φθορές στα έμβολα και σε όλο τον κορμό του κινητήρα. Έτσι μετά από αλλεπάλληλες προαναφλέξεις οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις είναι τόσο υψηλές που καταφέρνουν να δημιουργήσουν τρύπα στο έμβολο. Κάτι ακόμα που πρέπει να καταλάβουμε είναι ότι, η ανάφλεξη στην εισαγωγή είναι στην ουσία μία πρώιμη μορφή προανάφλεξης, και καταλαβαίνουμε ότι οι μέθοδοι που δεν αφήνουν να προκύψει ανάφλεξη στην εισαγωγή αποτρέπουν και την προανάφλεξη.

Ως εκ τούτου, η βελτιστοποίηση της ψύξης των επιφανειών στον κινητήρα να μπορεί να προκαλέσει πυρανόφλεξη. Για τον λόγο αυτό, προσπαθούμε να αποφύγουμε αυτό το φαινόμενο στον κινητήρα. Οι λύσεις που βοηθούν την προανάφλεξη του κινητήρα είναι οι ακόλουθες: η επιλογή σωστών σπινθηριστών στο κινητήρα έτσι ώστε να αποβάλουν το θερμικό τους φορτίο, και ο καλός σχεδιασμός των θαλάμων καύσης που αυτό θα επιτευχθεί με την σωστή λείανση, απουσία απότομων ακμών αλλά και την όσο τον δυνατόν καλύτερη απομόνωση του λιπαντικού από τον θάλαμο καύσης. Με αυτό τον τρόπο θα μειώσουμε τα ποσοστά ανάφλεξης του μίγματος του υδρογόνου από υπέρθερμα σημεία. Κάποιες ακόμη νέες μέθοδοι που μειώνουν την πιθανότητα προανάφλεξη είναι ο υδατοψεκασμός, στην εισαγωγή για την μείωση της

θερμοκρασίας του καυσίμου, ο μεταβλητός χρονισμός των βαλβίδων που γίνεται για την σωστή κένωση του θαλάμου καύσης από τυχόν καυσαέρια αλλά και ο άμεσος ψεκασμός του μίγματος απευθείας στον θάλαμο καύσης [1].

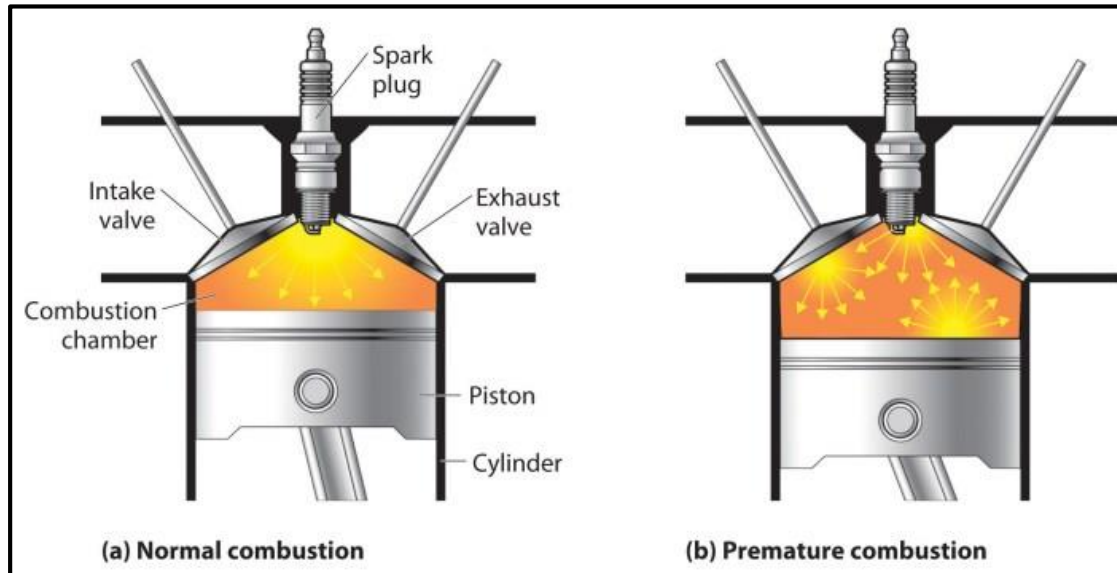
4.5.5 Αυτανάφλεξη

Η αυτανάφλεξη είναι μια ειδική περίπτωση απότομης ανάφλεξης καύσιμου υλικού δίχως κάποιο εξωτερικό αίτιο, όπως για παράδειγμα φλόγα ή σπινθήρας. Η θερμοκρασία σε αυτήν την περίπτωση έχει μια τιμή που ορίζεται ως θερμοκρασία αυτανάφλεξης, όπου για θερμοκρασίες πάνω από αυτή το μίγμα αρχίζει και αναφλέγεται αυτόματα. Όταν οι συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης είναι τέτοιες ώστε το αέριο να αυτανφλέγεται, τότε αποβάλλεται κάθε μορφή ενέργειας, παράγοντας κύματα πίεσης με μεγάλο πλάτος τα οποία ονομάζονται "κτυπήματα" του κινητήρα. Σε μηχανές βαρέων επαγγελματικών οχημάτων, τα κτυπήματα αυτά μπορεί να δημιουργήσουν ζημιά στον κινητήρα λόγω υψηλών θερμικών και μηχανικών καταπονήσεων. Η τάση που έχει ο κινητήρας για να κτυπά εξαρτάται από τον σχεδιασμό του καθώς και από τις ιδιότητες του μείγματός μας. Τα κτυπήματα μετριούνται συνήθως μέσω του αριθμού των οκτανίων. Έχουν χρησιμοποιηθεί ειδικές μηχανές για πειράματα και έρευνες (CFR= Cooperative Fuel Research) στις οποίες κατέστη δυνατή η σύγκριση των συμπεριφορών που αφορούν την αντίσταση στα κτυπήματα μεταξύ ενός συγκεκριμένου καυσίμου και ενός μίγματος από επτάνιο και ισο-οκτάνιο. Αυτή η συμπεριφορά ανακαλύφθηκε μέσω των μεθόδων που οδηγούσαν στην έρευνα του αριθμού οκτανίων. Οι αναφερόμενες τιμές είναι από 88 έως 130 και μπορεί να φτάσει πάνω από 130 για φτωχά μείγματα. Αυτές οι τιμές έχουν καταγραφεί ή υπολογιστεί με μεθόδους οι οποίες δεν είναι σύμφωνες με εκείνες του Αμερικανικού Οργανισμού για τις Δοκιμές και τα Υλικά (ASTM= American Society for Testing and Materials). Οι αποκλίσεις της ονομαστικής αντίστασης του υδρογόνου εξαρτώνται από τις υψηλές ταχύτητες της φλόγας καθώς και από την αναλογία αέρα-καυσίμου. Λόγω της υψηλής αντοχής του μεθανίου στα κτυπήματα, έχει οριστεί ο αριθμός του μεθανίου (από 115 έως 130) ως προς τον καθορισμό των χαρακτηριστικών των κτυπημάτων και χρησιμοποιεί ως πρότυπο μείγμα καυσίμου το μεθάνιο με αριθμό 100 και το υδρογόνο αντίστοιχα 0, γιατί έχει πολύ χαμηλή αντοχή στην κρούση. Πολλές έρευνες έχουν γίνει σχετικά με την συμπεριφορά των μηχανών εσωτερικής καύσης με υδρογόνο, μέσω πειραμάτων που καταδεικνύουν μια αποδεκτή αναλογία μεταξύ τριών μεγεθών: 1] της μεταβολής του λόγου συμπίεσης, 2] του λόγου αέρα-καυσίμου και 3] της θερμοκρασίας του αέρα στην εισαγωγή. Τα αποτελέσματα αυτά μας δείχνουν ότι η λειτουργία ενός κινητήρα με υδρογόνο εξαρτάται από την παρατήρηση κτυπημάτων κατά την καύση. Δηλαδή ενώ σε βενζινοκινητήρες καταγράφηκαν κτυπήματα σε λόγους συμπίεσης 15,3:1, στους κινητήρες με υδρογόνο δεν παρατηρήθηκαν [1],[24],[25].

4.5.6 Κρουστική Καύση

Η κρουστική καύση είναι ένα φαινόμενο καθορισμού των κινητήρων Otto και περιγράφεται ως η αυτανάφλεξη περιοχών του μίγματος, αέρα-καυσίμου, μπροστά από την φλόγα του μίγματος το οποίο αναφλέγεται μέσω σπινθήρα. Παρατηρούμε δηλαδή περιοχές του μίγματος που αναφλέγονται πριν φτάσει το μέτωπο της φλόγας, γεγονός

που οδηγεί σε απότομη αύξηση της πίεσης μέσα στον θάλαμο. Το φαινόμενο αυτό υφίσταται λόγω των υψηλών τιμών θερμοκρασίας και πίεσης, οι οποίες αυξάνονται στο εσωτερικό του θαλάμου στην φάση της συμπίεσης, δημιουργώντας τέτοιες συνθήκες αμέσως μετά αφού υπάρξει σπινθήρας στον σπινθηριστή. Εφόσον η θερμοκρασία αυτανάφλεξης του υδρογόνου είναι 855K, η καύση του παρέχει την δυνατότητα στον κινητήρα ώστε να λειτουργεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες, από εκείνες του βενζινοκινητήρα δίχως παρουσία κρουστικής ανάφλεξης [1],[26].



Εικόνα 16

4.5.7 Μοντελοποίηση Μη Φυσιολογικών Φαινομένων Καύσης

Για την προσομοίωση μη φυσιολογικών φαινομένων καύσης σε έναν κινητήρα υδρογόνου είναι αρκετά περιορισμένη η βιβλιογραφία. Οι Fagelson et al., ξέροντας ότι η τυρβώδης ταχύτητα καύσης είναι ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, χρησιμοποίησαν την ακόλουθη συσχέτιση γιατί οι ταχύτητες φλόγας βρίσκονται σε ένα προβλεπόμενο μοντέλο προσομοίωσης:

$$FSR = A \cdot Re^B \quad (15)$$

Τα A και B βρίσκονται εμπειρικά από σταθερές βαθμονόμησης και Re είναι ένας αριθμός Reynolds που στηρίζεται στη διάμετρο του κυλίνδρου, τη μέση ταχύτητα του εμβόλου και τις ιδιότητες του καμένου αερίου. Όμως η προηγούμενη συσχέτιση δε συμπεριλαμβάνει άμεσα την εξέταση της συνήθους αργής ανάφλεξης. Εκφράστηκε ότι αυτό το μοντέλο τείνει να δημιουργεί, στην πραγματικότητα, τον τρόπο για παρατηρούμενες αργοπορίες στην ανάφλεξης, διότι κατά την χρονική στιγμή του αρχικού σταδίου της καύσης, στη θεωρητικά υπολογισμένη τυρβώδης ταχύτητας καύσης δημιουργήθηκε η ελάχιστη τιμή.

Οι Li και Karim χρησιμοποιούν ένα μοντέλο δύο διαστάσεων, δηλαδή διαστάσεις με έναν νόμο τριγωνικής ταχύτητας καύσης προσαρμοσμένο σε πειραματικά δεδομένα σε συνδυασμό με ένα σχήμα χημικής κινητικής. Προτείνουν ένα κριτήριο χτυπήματος,

συγκρίνοντας την ενέργεια που απελευθερώνεται από τις αντιδράσεις του τελικού αερίου με την ενέργεια που απελευθερώνεται από την κανονική διάδοση της φλόγας. Όταν αυτό υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή προκύπτει αυτανάφλεξη του τελικού αερίου. Το μοντέλο χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της αναλογίας και της ισοδυναμίας περιορισμένης απόκρουσης ως συνάρτηση του λόγου συμπίεσης. Σε παρόμοια πειραματικά αποτελέσματα που ανέφεραν αυτοί οι συγγραφείς οι περιοχές που χτυπούν (knock) είναι πολύ εκτεταμένες. Σύμφωνα με τα στοιχεία που αναφέρουν τα αποτελέσματα για λόγους συμπίεσης μεταξύ 6: 1 και 14: 1, η λειτουργία με στοιχειομετρική αναλογία είναι αδύνατη χωρίς την εμφάνιση χτυπήματος.

Οι Liu et al. χρησιμοποίησαν έναν υπολογισμό CFD της δυναμικής του αερίου σε μία θυρίδα για να εξηγήσει την εξάρτηση της εμφάνισης ανάφλεξης στον χρόνο έγχυσης. Αν η έγχυση γίνει πολύ νωρίς θα πραγματοποιηθεί αναρροή υδρογόνου (αναρροή είναι η διάσπαση χημικών στοιχείων) από τον κύλινδρο στην εισαγωγή, στο τέλος της διαδρομής. Αν η έγχυση του διαλύματος γίνει πολύ αργά θα έχουμε ως αποτέλεσμα το υδρογόνο να παραμένει στην εισαγωγή λόγω ανεπαρκούς χρόνου έως ότου φθάσει στον κύλινδρο. Έτσι και στις δύο περιπτώσεις το υδρογόνο υπάρχει στην εισαγωγή από τη στιγμή που η βαλβίδα εισαγωγής ανοίγει για τον επόμενο κύκλο. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ανάφλεξη μέσω επαφής με θερμά σημεία (υπολείμματα αερίων, βαλβίδες εξαγωγής κ.λπ.). Ο βέλτιστος χρόνος έγχυσης, είναι αυτός στον οποίο έχουμε μια αρχική περίοδο ψύξης με αναρρόφηση αέρα και ταυτόχρονα επιτρέπει σε όλο το εγχέομενο υδρογόνο να ταξιδέψει στον κύλινδρο πριν από το κλείσιμο της βαλβίδας εισαγωγής (το οποίο έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά) [1],[27].

4.5.8 Αποφυγή Μη Φυσιολογικής Καύσης

Ο περιορισμός της μέγιστης αναλογίας του ισοδύναμου καυσίμου προς τον αέρα είναι ένα αποτελεσματικό μέτρο για την αποφυγή ανώμαλης καύσης στη λειτουργία του υδρογόνου. Λόγω των μεγάλων ορίων ευφλεκτότητας και των γρήγορων ταχυτήτων φλόγας, οι κινητήρες εσωτερικής καύσης υδρογόνου λειτουργούν συνήθως χρησιμοποιώντας μια στρατηγική άκαμπτης καύσης και έτσι αποφεύγουν τις απώλειες με την χρήση της πεταλούδας του αερίου. Η περίσσεια αέρα, σε κακή λειτουργία του κινητήρα, δρα ως αδρανές αέριο και μειώνει αποτελεσματικά τις θερμοκρασίες καύσης και κατά συνέπεια τις θερμοκρασίες των συστατικών. Αυτό μειώνει σημαντικά την εμφάνιση ανώμαλης καύσης στη φτωχή καύση που δημιουργείται. Αν Βέβαια και η απλή λειτουργία είναι επίσης πολύ αποτελεσματική, διότι περιορίζει την ισχύ της παραγωγής των κινητήρων του υδρογόνου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο μέγιστος λόγος ισοδυναμίας καυσίμου προς τον αέρα περιορίστηκε στα 0,63 ($\lambda=1,6$) στις 1500 RPM και μειώθηκε περισσότερο ως συνάρτηση των στροφών του κινητήρα με ελάχιστο 0,48 ($\lambda=2.1$) στις 6000 RPM. Παρόλο που αποφεύγουμε αποτελεσματικά την ανώμαλη καύση, αυτό το μέτρο μειώνει σημαντικά την παραγόμενη ισχύ από περίπου 120 kW (σε λειτουργία βενζίνης) έως περίπου 70 kW (σε λειτουργία υδρογόνου) [27].

4.6 Τρόποι Τροφοδοσίας Καυσίμου και Σχηματισμός του Μίγματος

Σε έρευνες πάνω στις MEK υδρογόνου χρησιμοποιήθηκαν αρκετές μέθοδοι δημιουργίας μίγματος αέρα-καυσίμου, με σκοπό την βελτιστοποίηση της απόδοσης τους. Αυτές αποσκοπούν σε απαιτήσεις όπως:

1. Αύξηση της ισχύος.
2. Βελτίωση της απόδοσης.
3. Περιορισμός των ρύπων.
4. Ομαλή λειτουργία.
5. Αυξημένη αξιοπιστία.
6. Ελάχιστο κόστος.

Εκείνη η απαίτηση όμως που είναι πιο σημαντική γενικώς για όλους τους κινητήρες είναι αυτή της ομαλής λειτουργίας, η οποία επιτυγχάνεται εάν δεν πραγματοποιηθεί ανάφλεξη στην εισαγωγή. Φυσικά δεν υπάρχει κάποια μέθοδος, για την ώρα, η οποία θα ικανοποιεί όλες τις απαιτήσεις, όπως για παράδειγμα η μέθοδος της άμεσης έγχυσης. Η μέθοδος αυτή μπορεί να μην επιτρέπει την εμφάνιση του φαινομένου της ανάφλεξης αλλά σύμφωνα με το ποσοστό βελτιστοποίησης που θέλουμε να πετύχουμε αυξάνεται και το κόστος της. Άλλες μέθοδοι είναι:

- Με χρήση εξαερωτή.
- Με έγχυση στην πολλαπλή εισαγωγή.
- Με έγχυση σε αυλούς εισαγωγής.
- Με άμεση έγχυση στον θάλαμο.

Η μοναδική μέθοδος εσωτερικής δημιουργίας μίγματος είναι εκείνη της άμεσης έγχυσης [1].

4.6.1 Εξαερωτής

Ο εξαερωτής (καρμπυρατέρ) είναι η συσκευή που επιτυγχάνει την αυτόματη ανάμιξη του αέρα και των ατμών υδρογονανθράκων σε κατάλληλη αναλογία στις μηχανές βενζίνης. Αυτό το μίγμα εισάγεται στην μηχανή με στόχο την παραγωγή ισχύος. Ο εξαερωτής θα μας βοηθήσει σε κάποιες συνθήκες λειτουργίας όπως ψυχρό ξεκίνημα κατά την διάρκεια του χειμώνα. Επιπλέον έχει ρυθμιστή παροχής καυσίμου για την ρύθμιση περιεκτικότητας του μίγματος.

Ο εξαερωτής χρησιμοποιήθηκε στα πρώτα στάδια της έρευνας ως πιο παλαιά μέθοδος, αλλά λόγω της επικάλυψης των βαλβίδων εισαγωγής και εξαγωγής (με τον χρόνο), το νέο μίγμα ερχόταν σε επαφή με ποσότητες μίγματος που είχαν μείνει από προηγούμενους κύκλους καύσης. Έτσι ο έλεγχος της ανάφλεξης γινόταν δυσκολότερος. Για αυτό το λόγο βρέθηκε μια άλλη μέθοδος, η έγχυση στην πολλαπλή εισαγωγή [1],[21].

4.6.2 Έγχυση στην Πολλαπλή Εισαγωγή

Η μέθοδος αυτή εκτός του ότι περιορίζει το φαινόμενο της ανώμαλης καύσης, εξισορροπεί και την απώλεια ισχύος. Με την έγχυση του καυσίμου στην εισαγωγή

έγινε εφικτή και η αναρρόφηση αέρα ο οποίος κατάφερε 1] να εξαλείψει πιθανά σημεία προανάφλεξης και 2] να πετύχει την αραίωση υπέρθερμων αερίων, που είχαν μείνει από προηγούμενες καύσεις, τα οποία αποτελούν και αιτία προανάφλεξης. Βέβαια υπάρχει πιθανότητα ανάφλεξης στην εισαγωγή όμως η ζημιά που θα προκληθεί θα είναι μικρότερη από την περίπτωση χρήσης καρμπυρατέρ [1].

4.6.3 Άμεση Έγχυση

Μία μέθοδος που έχει θεσπιστεί τα τελευταία χρόνια είναι η μέθοδος άμεσης έγχυσης για την τροφοδοσία και την δημιουργία μίγματος (DI ή Direct Injection). Το φαινόμενο της ανάφλεξης του καυσίμου που δημιουργείται στην εισαγωγή του θαλάμου καύσης εκμηδενίζεται με την επιλογή της άμεσης έγχυσης του καυσίμου στον θάλαμο καύσης. Η μέθοδος είναι η πιο υποσχόμενη για το μέλλον λόγω της ικανότητας της ως προς την έγχυση του καυσίμου αλλά και λόγω των υψηλών πιέσεων που δημιουργούνται στον θάλαμο καύσης καθιστώντας την πιο δαπανηρή. Το σημαντικό αυτής της μεθόδου είναι η επίτευξη της μεγαλύτερης μέγιστης ισχύος από τον κινητήρα αλλά για να πραγματοποιηθεί αυτό θα πρέπει ο κινητήρας να τροφοδοτείται μόνο με πλουσιότερα μίγματα για την αποφυγή ανάφλεξης του μίγματος στην εισαγωγή. Άρα η αποφυγή προανάφλεξης είναι ένα πρόβλημα που δεν αποτρέπεται, εκτός εάν το καύσιμο ψεκάζεται στα τελευταία στάδια της φάσης συμπίεσης. Η μέθοδος θεωρείται ακόμη μη εφικτή διότι το κόστος είναι υψηλό λόγω των συστημάτων υψηλής πίεσης. Κάποια από τα πιο σημαντικά προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν για την αντιμετώπιση των τεχνικών δυσκολιών της εφαρμογής της άμεσης έγχυσης είναι τα εξής:

- Το καύσιμο που εγχέεται στον κινητήρα θα πρέπει να ξεπερνά την πίεση των 110 bar. Αυτό έχει τεράστια διαφορά από την αντίστοιχη μέθοδο PFI, όπου η πίεση του καυσίμου στον κινητήρα είναι έως και 30 φορές μικρότερη, με αποτέλεσμα η αποθήκευση του υδρογόνου να είναι υπό μορφή κρυογενικού υγρού ή σε υδρίδια μετάλλων.
- Η αποφυγή της προανάφλεξης μπορεί να γίνει μόνο στην περίπτωση που το υδρογόνο δεν εγχέεται στα τελευταία στάδια του χρόνου συμπίεσης, έτσι ώστε να υπάρξει αρκετός χρόνος για γίνει η ανάμειξη του μίγματος μέσα στον θάλαμο καύσης στα αρχικά στάδια του χρόνου της συμπίεσης.
- Ακόμα θα πρέπει ο εγχυτήρας να βρίσκεται μετά της βαλβίδας εισαγωγής και μέσα στον θάλαμο καύσης, αλλά για να πραγματοποιηθεί θα πρέπει ο κινητήρας να είναι κατασκευασμένος έτσι ώστε να αντέχει σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες που δημιουργούνται στον θάλαμο καύσης από το υδρογόνο.

Πέρα των δυσκολιών που αναφέραμε για την εφαρμογή αυτών των κοστοβόρων λύσεων, είναι ευρέως κατανοητό ότι η έγχυση του υδρογόνου μέσα στο θάλαμο καύσης σε υψηλές πιέσεις, είναι μονόδρομος για την επίτευξη της μέγιστης απόδοσης αλλά και της όσο το δυνατόν ομαλότερης λειτουργίας της μηχανής χωρίς να υπάρχει ανώμαλη καύση. Με λίγα λόγια με την άμεση έγχυση μπορούμε να πετύχουμε την μέγιστη ισχύ της μηχανής χωρίς να δίνουμε βάση στο κόστος και στο πόσο πολύπλοκη είναι στην κατασκευή της. Όταν έχουμε μέγιστο φορτίο η άμεση έγχυση (DI) είναι ιδανική επιλογή. Τέλος η μέγιστη ισχύς στις μηχανές υδρογόνου, στις οποίες

παρατηρείται η δημιουργία μίγματος εκτός του θαλάμου καύσης, έχουμε μείωση της ισχύος κατά 17% συγκριτικά με τις αντίστοιχες μηχανές βενζίνης [1].

4.6.4 Έγχυση στην Θυρίδα Εισαγωγής

Ένα ακόμη σύστημα που βρίσκουμε για την τροφοδοσία καυσίμου αλλά και τον σχηματισμό μίγματος είναι η μέθοδος έγχυσης του καυσίμου στη θυρίδα εισαγωγής (PFI ή Port Fuel Injection). Η αποφυγή της ανάφλεξης στην εισαγωγή του θαλάμου με την μέθοδο έγχυσης του καυσίμου στην θυρίδα εισαγωγής καταφέρνει να αποτρέπει κατά μεγάλο βαθμό και την δημιουργία ανάφλεξη του καυσίμου. Επίσης είναι πιο εύκολη στην εφαρμογή αυτή η μέθοδος, διότι χρειάζεται μικρότερες πιέσεις έγχυσης στην θυρίδα εισαγωγής με αποτέλεσμα να είναι και λιγότερο κοστοβόρα. Ακόμα η μέθοδος PFI επωφελείται από την καύση πιο φτωχών μιγμάτων ούτως ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη ομογενοποίηση λόγω της αύξησης του χρόνου ανάμιξης. Έτσι καταφέρνει μεγαλύτερες αποδόσεις λειτουργίας και μείωση των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου. Η έγχυση στην θυρίδα εισαγωγής είναι ιδανική σε εφαρμογές για μηχανή υπό φορτίο (μέγιστη απόδοση) αλλά και για την επιλογή οποιοδήποτε τρόπου αποθήκευσης του καυσίμου στον κινητήρα, με την προϋπόθεση όμως ότι έχουμε πολύ χαμηλότερες πιέσεις σε σχέση με την αντίστοιχη μέθοδο της άμεσης έγχυσης (DI). Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να έχει μία μηχανή εσωτερικής καύσης υδρογόνου, κατά την οποία το μείγμα δημιουργείται πριν εισέλθει στην εισαγωγή του θαλάμου καύσης, είναι μειωμένη κατά 18% σε σχέση με την αντίστοιχη μηχανή βενζίνης [1].

4.7 Χαρακτηριστικά Σχεδιασμού και Λειτουργίας των MEK Υδρογόνου

Οι MEK υδρογόνου, για να λειτουργούν με υψηλή απόδοση και με ομαλή καύση έχουν μερικά χαρακτηριστικά λειτουργίας αλλά και σχεδιασμού τα οποία διαφέρουν από εκείνα των MEK βενζίνης. Αυτές οι αλλαγές οφείλονται στις διαφορετικές ιδιότητες καύσης που έχει το υδρογόνο σε σχέση με την βενζίνη. Μερικές από αυτές αναφέρονται παρακάτω [1].

4.7.1 Σύστημα Τροφοδοσίας Καυσίμου

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, οι μέθοδοι του εξαερωτή και της έγχυσης στην πολλαπλή εισαγωγή δημιουργούν αρκετά προβλήματα κατά την τροφοδοσία. Όμως οι μέθοδοι άμεσης έγχυσης (DI) και της έγχυσης στην θυρίδα εισαγωγής (PFI), με τις απαραίτητες ρυθμίσεις, βοηθούν ως προς την καλύτερη λειτουργία του κινητήρα και της αποφυγής των φαινομένων ανάφλεξης και προανάφλεξης στην εισαγωγή. Αν χρησιμοποιηθεί η δεύτερη μέθοδος, υπάρχει ένας χρόνος ο οποίος επιτρέπει 1] την ιδανική ψύξη του κυλίνδρου κατά την εισαγωγή και 2] την εξολοκλήρου έγχυση της ποσότητας του υδρογόνου, πριν να κλείσει η βαλβίδα εισαγωγής με αποτέλεσμα να μην εισέρχεται καύσιμο στην πολλαπλή εισαγωγής. Με αυτή τη μέθοδο δίνεται η δυνατότητα της καύσης φτωχού μίγματος αλλά και της αύξησης των θερμικών αποδόσεων, λόγω των μεγάλων χρονικών διαστημάτων που υπάρχουν ως προς τον σχηματισμό του μίγματος. Με την καύση των φτωχών μιγμάτων αποδεικνύεται η

μέθοδος ανακύκλωσης των καυσαερίων (EGR) αποτελεσματικότερη όσον αφορά την μείωση των εκπομπών NO_x.

Η απευθείας έγχυση, έτσι ώστε να επιτευχθεί η απόλυτη πίεση, είναι η μοναδική μέθοδος αποφυγής ανάφλεξης στην εισαγωγή. Επειδή όμως το φαινόμενο της προανάφλεξης δεν παύει να υπάρχει, θα πρέπει να έχουμε έγχυση καυσίμου στο τέλος της φάσης της συμπίεσης. Οι απαιτήσεις αυτής της μεθόδου είναι:

1. Συστήματα έγχυσης με μεγάλη πίεση
2. Οι εγχυτήρες να έχουν συντεθεί από ειδικά κράματα
3. Το υδρογόνο να αποθηκεύεται υπό την μορφή κρυογενικού υγρού [1].

4.7.2 Σύστημα Ανάφλεξης και Σπινθηριστές

Το σύστημα ανάφλεξης και οι σπινθηριστές, κάτω από ορισμένες συνθήκες μπορούν να προκαλέσουν ανάφλεξη πριν από τον ορθό χρόνο ανάφλεξης από τον σπινθηριστή. Για αυτό τα καλώδια ανάφλεξης θα πρέπει να τοποθετηθούν σε σημεία έτσι ώστε να αποφύγουμε την τυχόν ανάφλεξη λόγω επαγωγής των καλωδίων με γειτονικό κύλινδρο. Επίσης πρέπει να γίνει και σωστή γείωση του συστήματος ανάφλεξης για να μην έχουμε ανάφλεξη λόγω ενέργειας που έχει μείνει από προηγούμενη ανάφλεξη στο καλώδιο.

Οι σπινθηριστές που θα χρησιμοποιηθούν στις MEK υδρογόνου δεν θα είναι ίδιοι με εκείνους που έχουμε στις MEK βενζίνης, γιατί η θερμοκρασία των ηλεκτροδίων μπορεί με μεγάλη ευκολία να ξεπεράσει την θερμοκρασία ανάφλεξης του υδρογόνου. Για αυτό τον λόγο θα τοποθετηθούν σπινθηριστές ψυχρότεροι από εκείνους των MEK βενζίνης. Το διάκενο των ηλεκτροδίων τους στις MEK βενζίνης είναι από 0,7 έως 1,1 χιλιοστά, ενώ στις MEK υδρογόνου το ιδανικό διάκενο είναι κοντά στο μισό χιλιοστό. Σε περίπτωση που η απόσταση είναι πάνω από το μισό χιλιοστό θα έχουμε δυσκολίες σχετικά με την κρύα εκκίνηση, επειδή θα έχουν συσσωρευτεί ατμοί στην ακίδα του σπινθηριστή κατά την ανάφλεξη με κρύο κινητήρα. Εάν η απόσταση είναι μικρότερη από μισό χιλιοστό αυτό συνεπάγεται ότι το σύστημα ανάφλεξης θα παρέχει μικρότερη τάση για την δημιουργία σπινθήρα από τον σπινθηριστή [1].

4.7.3 Λίπανση των MEK Υδρογόνου

Για την λίπανση των MEK υδρογόνου θα πρέπει να σημειώσουμε τα εξής:

- Τα λιπαντικά έλαια που χρησιμοποιούνται στις MEK βενζίνης δεν θα χρησιμοποιηθούν στις MEK υδρογόνου λόγω της υψηλής συγκέντρωσης υδρατμών (νερό) που εμπεριέχεται στον στροφαλοθάλαμό τους.
- Επειδή το υδρογόνο σε μορφή αερίου προσφέρει ελάχιστες λιπαντικές ικανότητες και επειδή θέλουμε λειτουργία σε μεγάλες στροφές θα χρησιμοποιήσουμε είτε 1] λιπαντικό υψηλής συγκέντρωσης σε απογαλακτωματοποιητές, δηλαδή ταχύτερη αποβολή του νερού από το λάδι, είτε 2] συνθετικό λάδι το οποίο παρουσία νερού και υδρατμών δημιουργεί μίγμα με εξίσου καλές λιπαντικές ιδιότητες.
- Σημαντικό ρόλο παίζουν ο μεγάλος δείκτης ιξώδους καθώς και η θερμοκρασία. Για αυτό θέλουμε ένα λάδι το οποίο θα αντιστέκεται στις υψηλές θερμοκρασίες,

δηλαδή δεν θα διασπάται, και συγχρόνως θα ανθίστανται στις μεταβολές του ιξώδους.

- Τέλος είναι επιθυμητό να μην σχηματιστεί τέφρα (δημιουργείται από μεταλλικά στοιχεία του λιπαντικού) διότι θα δημιουργηθούν επικαθήσεις που δρουν ως υπέρθερμα σημεία, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν στο φαινόμενο της πυρανάφλεξης [1].

4.7.4 Τεχνικές Ψύξης Θαλάμου Καύσης

Γενικώς πρέπει να αποφευχθεί η παραγωγή υπέρθερμων σημείων, γιατί μπορούν να είναι αιτίες για προανάφλεξη. Με την επαρκή ψύξη του χώρου καύσης, δηλαδή με την χρήση βαλβίδων εξαγωγής ψυχόμενων από νάτριο και με την χρήση ψυκτικού σε περιοχές με υψηλά θερμικά φορτία, κατορθώνεται η απόκλιση των υπέρθερμων σημείων. Πέρα των υπέρθερμων σημείων πρέπει να αποτραπούν και τα υπέρθερμα καυσαέρια ούτως ώστε να έχουμε πτώση των μέγιστων θερμοκρασιών. Η τεχνολογία μεταβλητού χρονισμού, η οποία χρησιμοποιείται στις MEK βενζίνης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις MEK υδρογόνου αφού είναι ανεξάρτητη των υψηλών τιμών πίεσης και ροπών [1].

4.7.5 Σχεδιασμός Θαλάμου Καύσης

Λόγω των ιδιοτήτων του υδρογόνου, όπως ο συντελεστής διάχυσης και η ταχύτητα καύσης οι οποίες οδηγούν σε αποτελεσματικότερη καύση, ο θάλαμος καύσης μπορεί να έχει την μορφή ημισφαιρίου με τις βαλβίδες συμμετρικά τοποθετημένες. Το έμβολο να έχει επίπεδο σχήμα και ο σπινθηριστής να βρίσκεται στον άξονα του θεωρητικού ημισφαιρίου. Πρέπει όμως να αποφευχθούν απότομες εσοχές και ακμές καθώς επίσης και περιοχές όπου δημιουργούνται υπέρθερμα σημεία και περιοχές που καθιζάνει το λιπαντικό, γιατί αποτελούν αιτίες προανάφλεξης. Τέλος λόγω την μεγάλης ταχύτητας καύσης, είναι αναγκαία η τεχνική δημιουργίας τυρβώδους ροής στον θάλαμο, για την επίτευξη καλύτερης ομογενοποίησης και ανάμιξης του καυσίμου [1].

4.7.6 Βαθμός Συμπίεσης

Λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας στην οποία το υδρογόνο μπορεί να αυταναφλέγεται, οι MEK υδρογόνου μπορούν να λειτουργήσουν με υψηλούς λόγους συμπίεσης, οι οποίοι είναι μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους των MEK βενζίνης. Ο βαθμός συμπίεσης παίρνει τιμές μέχρι να παρατηρηθεί φαινόμενο προανάφλεξης ή κρουστικής καύσης. Στην φάση καύσης φτωχού μίγματος (υδρογόνου-αέρα) και για μεγάλες τιμές βαθμού συμπίεσης επιτυγχάνεται 1] μεγαλύτερη απόδοση και 2] μεγαλύτερη ισχύς, και διαφέρουν οι τιμές συμπίεσης από εκείνον τον βαθμό συμπίεσης που έχει μεγαλύτερη ισχύ [1].

4.7.7 Στρατηγική Ελέγχου του Φορτίου

Όπως και στις μηχανές Diesel έτσι και στις μηχανές υδρογόνου ο έλεγχος του φορτίου γίνεται με μεταβολή του λόγου αέρα-καυσίμου, το οποίο επιτυγχάνεται λόγω των μεγάλων ορίων αναφλεξιμότητας του υδρογόνου, χωρίς στραγγαλιστική βαλβίδα (πεταλούδα). Δηλαδή έχουμε ποιοτικό έλεγχο. Όσον αφορά τις MEK βενζίνης, έχουμε ποσοτικό έλεγχο, δηλαδή μεταβάλλεται η ποσότητα του μίγματος, το οποίο εισέρχεται στον θάλαμο καύσης, μέσω της πεταλούδας. Η έλλειψη στραγγαλιστικής βαλβίδας μας προσδίδει μεγάλη απόδοση και συγχρόνως λίγες τριβές και απώλειες. Εάν το μίγμα

είναι φτωχό, χρησιμοποιούμε την πεταλούδα για να πετύχουμε ομαλή λειτουργία και έχουμε ένα όριο στην αναλογία του μίγματος που εάν ξεπεραστεί, θα πρέπει να γίνει και κατάλυση στην εξαγωγή ούτως ώστε να μειωθεί η ποσότητα των οξειδίων του αζώτου που θα παραχθούν. Ακόμα για τον σχηματισμό των οξειδίων του αζώτου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο ο λόγος αέρα-καυσίμου, διότι καθορίζει την μέγιστη θερμοκρασία στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης. Εάν το μίγμα είναι πλουσιότερο, τότε μεγαλώνει η μέγιστη θερμοκρασία με αποτέλεσμα να μεγαλώνει και η ποσότητα των οξειδίων του αζώτου που παράγονται [1].

5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕ ΑΛΛΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

5.1 Επισκόπηση

- **Ορυκτά καύσιμα**

Το φαινόμενο της υπερθέρμανσης του πλανήτη είναι ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα που υπάρχουν στις μέρες μας. Η παραγωγή του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) είναι αυτή που οφείλεται σε μεγάλο ποσοστό για το φαινόμενο του θερμοκηπίου λόγω της ανεξέλεγκτης καύσης των ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούμε για την παραγωγή ενέργειας. Η σωστή επιλογή που πρέπει να κάνουμε για να βρούμε λύση στο πρόβλημα αυτό είναι να χρησιμοποιήσουμε εναλλακτικές τεχνολογίες για την όσο δυνατόν καλύτερη, σε ποσοστό απόδοση της ενέργειας αλλά και τον περιορισμό παραγωγής και εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα. Γνωρίζουμε ότι τα ορυκτά καύσιμα δεν είναι ανανεώσιμα, αλλά είναι αναλώσιμα, άρα θα πρέπει να βρούμε σύντομα έως το 2050 άλλες μορφές ενέργειας για να αντικαταστήσουμε περίπου το 1/3 της παγκόσμιας ενέργειας. Μερικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή, η αιολική και άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι η βιομάζα, γεωθερμική, υδροηλεκτρική ενέργεια, το φυσικό αέριο και το υδρογόνο) θα μπορούσαν να βοηθήσουν προς αυτή την κατεύθυνση. Η ικανότητα απορρόφησης διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα της γης είναι πολύ συγκεκριμένη. Με κάθε έτος που περνά να απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα κάτι παραπάνω από 25 δις τόνους CO₂ κάποια στιγμή θα επέλθει κορεσμός. Τα αποθέματα σε άνθρακα που υπάρχουν είναι ικανά να μας δώσουν καύσιμα περίπου για μερικές εκατοντάδες χρόνια, έτσι πρέπει μην γίνεται ανεξέλεγκτη καύση και βέβαια να δώσουμε προσοχή στην εκμετάλλευση της ενέργειας σε ένα επιθυμητό εύρος. Για αυτό τον λόγο πρέπει να σταματήσουμε την παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα και να είναι μόνο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η αρχή πρέπει να γίνει από τις πιο αναπτυγμένες χώρες για να μην εξαρτάται η οικονομική ανάπτυξη από τα ορυκτά καύσιμα. Αυτή η ριζική αλλαγή θα επιτευχθεί εάν οι επιστήμονες και οι φορείς της πολιτικής αξιολογήσουν τις εναλλακτικές πηγές ενέργειας έτσι ώστε να αποφασίσουν τι είναι τεχνολογικά εφικτό και τι όχι με γνώμονα πάντα το περιβάλλον.

- **Αιθανόλη**

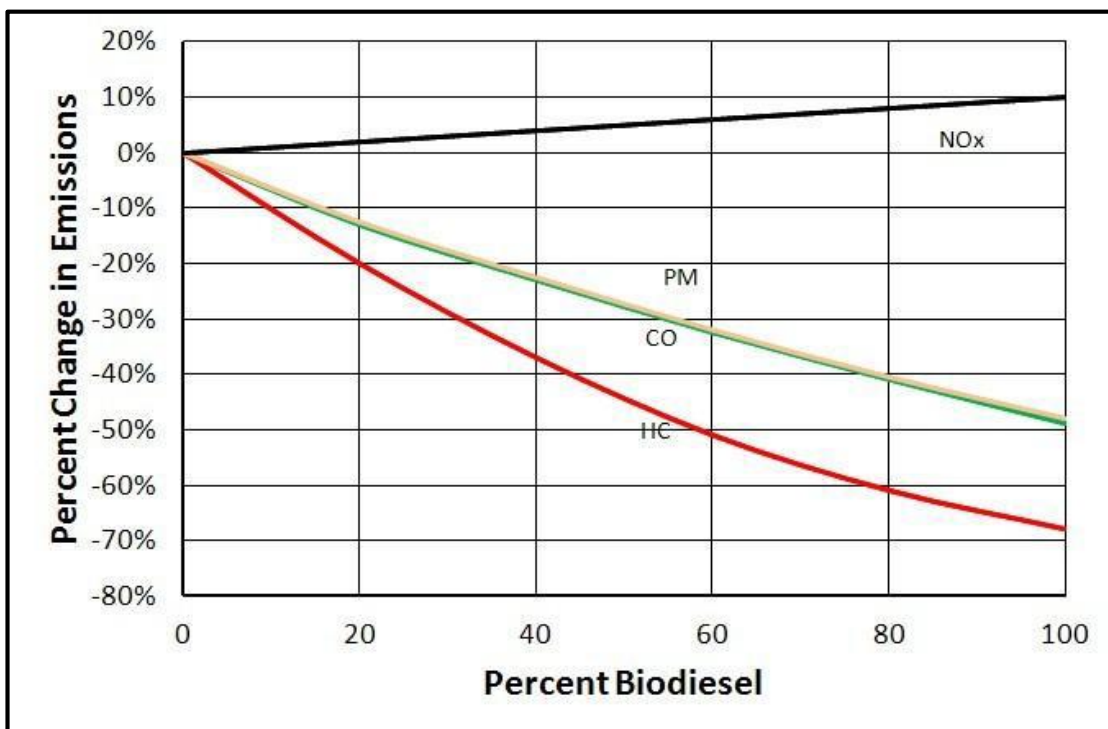
Η αιθανόλη κατατάσσεται στα ανανεώσιμα καύσιμα καθώς δημιουργείται από το καλαμπόκι ή και άλλα φυτικά έλαια. Οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής χρησιμοποιούν σχεδόν σε όλη την βενζίνη αρκετή ποσότητα αιθανόλης. Το ποσοστό της αιθανόλης που βρίσκεται στην βενζίνη αλλάζει ανάλογα με την γεωγραφική θέση αλλά και την εποχή, έτσι για ένα μείγμα υψηλής ποιότητας μπορεί να περιέχει από 51 έως 83% αιθανόλη και ονομάζεται E85. Ενώ το E15 όπως καθορίζεται από τον οργανισμό προστασίας του περιβάλλοντος αντιστοιχεί σε μίγμα βενζίνης αιθανόλης με περιεκτικότητα από 10% έως 15% αιθανόλη. Έτσι καταφέρνουμε να μειώσουμε τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου έως και 52% σε σύγκριση με την παραγωγή και καύση της βενζίνης, με βάση πάντα την ανάλυση του κύκλου ζωής.



Εικόνα 17

- **Βιοντίζελ**

Το βιοντίζελ (biodiesel) είναι ανανεώσιμο καύσιμο που παράγεται από φυτικά έλαια, ζωικά λίπη και ανακυκλωμένα λίπη καταστημάτων εστίασης. Το biodiesel χρησιμοποιείται για κινητήρες diesel επειδή οι φυσικές του ιδιότητες είναι παρόμοιες με του diesel δύο καυσίμων και έτσι καταφέρνουμε την μείωση των εκπομπών ρύπων λόγω της καθαρότερης καύσης.



Εικόνα 18

Στην εικόνα βλέπουμε τα ποσοστά αύξησης και μείωσης των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NOx), υδρογονανθράκων (HC), αιωρούμενων σωματιδίων (PM) και μονοξειδίου του άνθρακα (CO), από την καύση βιοντίζελ-biodiesel σε μηχανές οχημάτων βαρέως τύπου.

- **Φυσικό Αέριο**

Το φυσικό αέριο κατατάσσεται ως ορυκτό καύσιμο και οι περισσότεροι επιστήμονες το θεωρούν ένα από τα πιο καθαρά και ασφαλέστερα καύσιμα στις μέρες μας. Το φυσικό αέριο στο μεγαλύτερο ποσοστό αποτελείται από το μεθάνιο (CH₄). Το μεθάνιο δεν έχει οσμή και γεύση για αυτό προσθέτουν мерκαπτάνη, η οποία έχει μια έντονη δυσάρεστη οσμή, έτσι ώστε να γίνεται αντιληπτή η οποιαδήποτε διαρροή. Επίσης το φυσικό αέριο που χρησιμοποιείται σε οχήματα καταφέρει να αυξήσει την ενεργειακή ασφάλεια, παράγει χαμηλές εκπομπές υδρογονανθράκων (HC) και μειώνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στο περιβάλλον. Ακόμα κατατάσσεται ως ένα εναλλακτικό καύσιμο, και μπορεί να συμπιεστεί (Compressed Natural Gas – CNG) ή να υγροποιηθεί (Liquefied Natural Gas – LNG) για την χρησιμοποίησή του σε μηχανές εσωτερικής καύσης ή σε



Εικόνα 19

αεροστροβίλους. Ακόμα γνωρίζουμε ότι υπάρχουν κάποιες ανανεώσιμες πηγές μεθανίου όπως οι χωματερές. Το μεθάνιο χρησιμοποιείται για παραγωγή ενέργειας, παραγωγή υδρογόνου, χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε οχήματα και ακόμη σε πολλές άλλες εφαρμογές.

- **Υδρογόνο**

Το υδρογόνο κατατάσσεται ως ένα καύσιμο του μέλλοντος, το οποίο ακόμα βρίσκεται σε πειραματικά στάδια και πιλοτικές χρήσεις λόγω του μεγάλου κόστους παραγωγής του και πολλών ακόμη προβλημάτων που δεν έχουν επιλυθεί. Το υδρογόνο παράγεται από την ηλεκτρόλυση του νερού ή την αποσύνθεση των υδρογονανθράκων. Το βρίσκουμε σε μηχανές καύσης ή σε κυψέλες καυσίμου. Οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Το υδρογόνο ως καύσιμο έχει χαμηλή έως και μηδενική παραγωγή εκπομπών ρύπων για αυτό και υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση του [29].

5.2 Συνδυασμοί Υδρογόνου

Οι ιδιότητες του υδρογόνου, ιδίως των ευρέων ορίων ευφλεκτότητάς του, το καθιστούν ιδανικό καύσιμο για συνδυασμό με άλλα καύσιμα βελτιώνοντας έτσι τις ιδιότητες καύσης τους. Με βάση τη στρατηγική σχηματισμού μείγματος, μπορεί κανείς να κάνει διάκριση μεταξύ συνδυασμένης λειτουργίας (ανάμειξης) και λειτουργίας διπλού καυσίμου. Η συνδυασμένη λειτουργία αναφέρεται σε συνδυασμούς υδρογόνου με ένα ή περισσότερα άλλα αέρια καύσιμα. Συνήθως, το καύσιμο είναι ήδη υποθηκευμένο και παραδίδεται στον κινητήρα σε αναμεμιγμένη μορφή χρησιμοποιώντας ένα μόνο καρμπυρατέρ ή σύστημα ψεκασμού καυσίμου. Από την άποψη αυτή, το υδρογόνο χρησιμοποιείται συχνά για να βελτιώσει τη συμπεριφορά του φυσικού αερίου χωρίς καύση. Από την άλλη πλευρά, η λειτουργία διπλού καυσίμου περιγράφει οποιονδήποτε συνδυασμό, υδρογόνου και υγρού καυσίμου, στον οποίο χρησιμοποιούνται διάφορες συσκευές παρασκευής μίγματος. Αυτά τα συστήματα είτε χρησιμοποιούν ξεχωριστά συστήματα αποθήκευσης καυσίμου για τα διαφορετικά καύσιμα είτε σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να παράγουν υδρογόνο στη μηχανή [27].

5.2.1 Μείγματα που Κυριαρχούνται από Φυσικό Αέριο

Το υδρογόνο έχει ταχύτητα καύσης που είναι αρκετές φορές υψηλότερη από εκείνη του μεθανίου. Μια συνολικά καλύτερη καύση με την προσθήκη το υδρογόνο στο φυσικό αέριο έχει επαληθευτεί, ακόμη και σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας που παρουσιάζουν γενικά οφέλη, υψηλότερη απόδοση, χαμηλότερη παραγωγή CO₂ και εκπομπές. Επιπλέον το υδρογόνο στο φυσικό αέριο επιτρέπει την επέκταση του ορίου καύσης του φυσικού αερίου, επιτυγχάνοντας έτσι εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα εκπομπών που πληρούν τις ισοδύναμες απαιτήσεις των μηδενικών εκπομπών ρύπων του οχήματος. Μελέτη σχετικά με έναν υπερ-τροφοδοτούμενο κινητήρα, χωρίς καύση, που λειτουργεί με φυσικό αέριο καθώς και μείγματα υδρογόνου και φυσικού αερίου (20/80 και 30/70 H₂ / φυσικό αέριο κατ' όγκο%) απέδειξε ότι ήταν δυνατόν να επιτευχθεί μείωση των εκπομπών NO_x και συνολικών υδρογονανθράκων (THC) χωρίς να θυσιάζεται η ροπή του κινητήρα ή η οικονομία του καυσίμου. Το υθάνιο (Hythane)

είναι ένα καταχωρημένο καύσιμο που αναφέρεται σε μείγματα H_2 και μεθανίου, με το εμπορικό σήμα να είναι ιδιοκτησία της Eden Innovations Ltd. Το Denver Hythane Project το 1991 παρουσίασε μείωση πάνω από 75% των εκπομπών CO και NOx κατά τη χρήση υθάνιου αντί για φυσικό αέριο [27].

5.2.2 Μείγματα που Κυριαρχούνται από Υδρογόνο

Η προσθήκη μεθανίου στο υδρογόνο βελτιώνει σημαντικά την πυκνότητα αποθήκευσης των συστημάτων αποθήκευσης υπό πίεση και συνεπώς αυξάνει την γκάμα των οχημάτων με αέρια καύσιμα. Η ανάμειξη υδρογόνου με 5% μεθάνιο αυξάνει την αποθηκευμένη ενεργειακή περιεκτικότητα κατά 11%, ενώ ένα μείγμα με 20% μεθανίου αυξάνει την αποθηκευμένη ενεργειακή περιεκτικότητα κατά 46% σε σύγκριση με το καθαρό υδρογόνο. Δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε έναν μονοκύλινδρο κινητήρα που λειτουργεί με υδρογόνο και με μείγμα 5 και 20% έδειξαν ελαφρά μείωση εκπομπών NOx για τα μίγματα αυξημένη περιεκτικότητα σε μεθάνιο, ενώ η απόδοση του κινητήρα μειώθηκε σε χαμηλά φορτία. Δοκιμές που έγιναν στο όχημα Mercedes Benz E 200 NGT, ένα όχημα φυσικού αερίου-βενζίνης, σε σχέση με ένα όχημα δύο καυσίμων που ήταν προσαρμοσμένο να λειτουργεί με βενζίνη και φυσικό αέριο, το υδρογόνο έδειξε έως και 3% βελτίωση στη θερμική απόδοση φρένων όταν λειτουργεί με υδρογόνο σε σύγκριση με την βενζίνη.

Τα μίγματα πολλαπλών αερίων μπορούν να προκύψουν από την πυρόλυση, την ενανθράκωση της βιομάζας, από χρήσιμα θερμικά απόβλητα ή από πολλά αέρια που περιέχουν H_2 και προκύπτουν από χημικές διεργασίες. Τα αέρια που περιέχουν H_2 βοηθούν στη μετατόπιση του ορίου καύσης προς μεγαλύτερες ποσότητες πλεονάζοντος αέρα από ότι με το φυσικό αέριο. Αυτό το αποτέλεσμα προκαλεί βύθιση της μέσης θερμοκρασίας του θαλάμου καύσης ενώ οι εκπομπές NOx μειώνονται σε πολύ χαμηλό επίπεδο. Ανάλογα με την ποσότητα υδρογόνου και άλλων συστατικών του, είναι δυνατόν να επιτευχθούν τιμές NOx κάτω των 5 ppm (περιεκτικότητα και αναλογίες της τάξης κυρίως του εκατομμυριστού, parts per million).

Τα μείγματα αερίων πλούσια σε H_2 έχουν επίσης ουδέτερη επίδραση στον βαθμό απόδοσης ακόμη και με εξαιρετικά υψηλές ποσότητες αέρα. Το υπόβαθρο αυτής της ιδιότητας βρίσκεται στην υψηλότερη ταχύτητα καύσης των στρωμάτων του υδρογόνου. Στην περίπτωση του αερίου οπτάνθρακα (60% H_2), η ταχύτητα καύσης σε $\lambda = 2 / \phi = 0,5$ είναι η ίδια με εκείνη για το φυσικό αέριο με $\lambda = 1,1 / \phi = 0,9$. Ειδικά το χαμηλότερο και μεσαίο εύρος φορτίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα σε αυτό το φαινόμενο με αποτέλεσμα αύξηση της απόδοσης του έως και 2% με τη χρήση καθαρού υδρογόνου σε σύγκριση με το φυσικό αέριο. Η ισχύς εξόδου περιορίζεται με υπερτροφοδοτούμενους κινητήρες αερίου πτωχού μίγματος που λειτουργούν με μίγμα αερίου πλούσιο σε H_2 , λόγω της μονάδας υπερφόρτισης [27].

5.2.3 Πολλαπλά Μείγματα Αερίου

Τα πολλαπλά μίγματα δημιουργούνται με τέσσερις μεθόδους:

1. Από πυρόλυση
2. Από ανθρακοποίηση της βιομάζας

3. Από θερμικά απόβλητα που έχουν χρησιμοποιηθεί
4. Από περίσσεια αερίων που περιέχουν υδρογόνο, το οποίο βρίσκεται μέσω των διαφόρων χημικών διεργασιών.

Η περίσσεια υδρογόνου βοηθάει κυρίως στην μετατόπιση του ορίου καύσης φτωχού μίγματος σε μεγαλύτερα ποσοστά με την χρήση αέρα από ότι με την χρήση φυσικού αερίου. Αυτή η περίσσεια οδηγεί στη μείωση της μέσης θερμοκρασίας, στην μείωση των εκπομπών οξειδίου του αζώτου ενώ παράλληλα δεν επηρεάζει τον βαθμό απόδοσης ακόμα και σε μεγάλες ποσότητες αέρα [27].

5.3 Εφαρμογές Διπλού Καυσίμου

Εφαρμογές με διπλό καύσιμο όπως Diesel-Biodiesel ή βενζίνη-αλκοόλη αποσκοπούν στην βελτιστοποίηση της καύσης, στην μείωση των εκπομπών και στην αύξηση της απόδοσης του καυσίμου [27].

5.3.1 Diesel και Biodiesel

Η χρήση του βιοντίζελ (biodiesel) έδειξε αποτελέσματα μείωσης θερμικής απόδοσης και αύξηση εκπομπών καπνού. Η έγχυση υδρογόνου στην εισαγωγή έδειξε μείωση της εκπομπής καπνού. Πειράματα έγιναν με σκοπό την παραγωγή αερίου πλούσιου σε υδρογόνο το οποίο έχει ως σκοπό την λειτουργία κινητήρων diesel με χαμηλή περιεκτικότητα θείου καθώς και με μεθυλεστέρα ελαιοκράμβης. Τα αποτελέσματα ήταν ότι το αέριο, που παράγεται από την αναμόρφωση καυσίμων καυσαερίων, δημιουργεί ανάφλεξη στην φάση της συμπίεσης βελτιώνοντας την απόδοση και μειώνοντας τις εκπομπές [27].

5.3.2 Βενζίνη και Καύσιμα Αλκοόλης

Τα αποτελέσματα από σειρά δοκιμών που έγιναν σε ένα ημιφορτηγό GMC 2500 Sierra 4WD έδειξαν μειωμένη κατανάλωση καυσίμου κατά 3% για οδήγηση στην πόλη και 4% για οδήγηση σε αυτοκινητόδρομο. Η μειωμένη κατανάλωση συγκρίθηκε με την αντίστοιχη κατανάλωση του ίδιου οχήματος όταν όμως αυτό χρησιμοποιούσε ως καύσιμο μόνο βενζίνη. Η διαδικασία δοκιμών για το συγκεκριμένο όχημα είχε ως χαρακτηριστικό τη μεταβλητή αναλογία προσθήκης υδρογόνου και βενζίνης. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών η αναλογία βενζίνης και υδρογόνου μεταβαλλόταν από 100% στα χαμηλά φορτία (idle από very light load) μέχρι 0% στο πλήρες φορτίο, ώστε να μην υπάρξει απώλεια ισχύος. Με μέσο ποσοστό προσθήκης 40 έως 50% επιτεύχθηκε αυτονομία 110 έως 180 km κάνοντας χρήση μίας μόνο δεξαμενής υδρογόνου 150 L και σε πίεση 350 bar [27].

6 ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕ ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

6.1.1 Ιστορία

Η ιδέα λειτουργίας ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης με υδρογόνο είναι σχεδόν τόσο παλιά όσο ο ίδιος ο κινητήρας εσωτερικής καύσης. Το 1807, ο Φρανσουά Ισαάκ ντε Ρίβαζ (Francois Isaac de Rivaz) της Ελβετίας εφηύρε έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης που χρησιμοποίησε ένα μείγμα υδρογόνου και οξυγόνου για καύσιμο. Ο πρώτος επιτυχημένος κινητήρας εσωτερικής καύσης (για καύση υδρογόνου) θεωρείται ότι είναι ένας δίχρονος κινητήρας αερίου οριζόντιας διάταξης, ο οποίος κατασκευάστηκε από τον Ζαν



Εικόνα 20

Τζόζεφ Ετιέν Λενουάρ (Jean Joseph Etienne Lenoir) και κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1860. Ο κινητήρας τροφοδοτείται από υδρογόνο που παράγεται μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού. Ήδη από το 1933, η Norsk Hydro (Νορβηγική εταιρία που ασχολείται και με Α.Π.Ε.)

λειτουργήσε ένα όχημα με κινητήρα εσωτερικής καύσης όπου το υδρογόνο παραγόταν από αμμωνία. Ο πρώτος κινητήρας άμεσης έγχυσης υδρογόνου χρονολογείται από το 1933 όταν η Erren Engineering Company όπου πρότεινε την έγχυση ελαφρώς πεπιεσμένου υδρογόνου στον αέρα ή το οξυγόνο μέσα στο θάλαμο καύσης αντί να τροφοδοτήσει το μείγμα αέρα-καυσίμου μέσω ενός καρμπυρατέρ στον κινητήρα, μια μέθοδος που συνήθως οδηγούσε σε πρόωρη ανάφλεξη.

Το κατοχυρωμένο με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας σύστημα απαιτούσε ειδικούς μηχανισμούς ψεκασμού και ελέγχου καυσίμου, αλλά άφησε τα άλλα εξαρτήματα του κινητήρα ανέπαφα. Με το υδρογόνο που χρησιμοποιείται ως ενισχυτικό καύσης, το σύστημα εξάλειψε την ανάφλεξη και πέτυχε πολύ καλύτερη καύση υδρογονανθράκων με υψηλότερη απόδοση και χαμηλότερη ειδική κατανάλωση καυσίμου. Το 1974, το Ινστιτούτο Τεχνολογίας Musashi παρουσίασε το πρώτο ιαπωνικό όχημα που είχε ως καύσιμο το υδρογόνο, το Musashi 1 χρησιμοποιώντας έναν τετράχρονο κινητήρα υδρογόνου και αποθήκευση υψηλής πίεσης. Το Musashi 2, που κυκλοφόρησε το 1975, εφοδιάστηκε με πολλαπλή έγχυση υδρογόνου σε έναν τετράχρονο κινητήρα σε συνδυασμό με αποθήκευση υγρού υδρογόνου. Το 1977, το Musashi 3 παρουσιάστηκε χρησιμοποιώντας έναν δίχρονο κινητήρα με σπινθήρα με άμεση έγχυση υδρογόνου. Η BMW σε συνεργασία με την DLR παρουσίασε το πρώτο της όχημα υδρογόνου το 1979 [27],[30].

6.1.2 Χαρακτηρισμός Οχημάτων Υδρογόνου

Τα οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου μπορούν να χαρακτηριστούν είτε ως οχήματα μετατροπής είτε ως ειδικά οχήματα. Με τον όρο οχήματα μετατροπής περιγράφονται τα οχήματα που είναι προσαρμοσμένα για λειτουργία υδρογόνου είτε από τον κατασκευαστή των οχημάτων είτε από τον

προμηθευτή μετά την αγορά. Τα ειδικά οχήματα υδρογόνου έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί για να λειτουργούν με υδρογόνο από έναν αρχικό κατασκευαστή εξοπλισμού (OEM= Original Equipment Manufacturer). Τα αυτοκίνητα υδρογόνου έχουν επίσης κατασκευαστεί για τη λειτουργία μονού καυσίμου, με το υδρογόνο ως το μόνο καύσιμο. Έτσι έχουμε ως επιλογές καυσίμου την λειτουργία με υδρογόνο καθώς και με βενζίνη. Με βάση το σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου, τα αυτοκίνητα υδρογόνου μπορούν να ομαδοποιηθούν ως οχήματα συμπιεσμένου υδρογόνου και οχήματα κρυογενικού υγρού υδρογόνου. Το υδρογόνο ως καύσιμο έχει εφαρμοστεί σε παλινδρομικούς κινητήρες εσωτερικής καύσης καθώς και σε περιστροφικούς κινητήρες [27].

6.1.3 Οχήματα Μετατροπής

Ένα παράδειγμα για ένα φορτηγό μετατροπής με αποθήκευση πεπιεσμένου υδρογόνου είναι το ETEC H2ICE Truck Conversion με βάση ένα Chevrolet / GMC Truck Silverado / Sierra 1500HD Crew Cab 2WD LS που μετατράπηκε για να λειτουργεί με υδρογόνο από την Electric Transportation Engineering Corporation. Το 6θέσιο ελαφρύ φορτηγάκι εξοπλίζεται με έναν κινητήρα τύπου V-8 και όγκου 6,0 L. Χρησιμοποιεί έναν υπερπληρωτή με κινητήρα που κινείται με ιμάντα σε συνδυασμό με ένα intercooler (ενδιάμεση ψύξη) που χρησιμοποιείται για την αύξηση της ισχύος του κινητήρα. Το υδρογόνο αποθηκεύεται σε τρεις δεξαμενές των 150 λίτρων, Type 3 (επενδυμένες με αλουμίνιο, ενισχυμένες με ανθρακονήματα) με πίεση έως 350bar, με αποτέλεσμα να έχουμε περίπου 10,5 kg χρησιμοποιήσιμου καυσίμου. Το όχημα έχει εκτιμώμενο βάρος συγκράτησης 3000 kg. Για τα επίπεδα εκπομπών NOx στο όχημα έχουμε δύο κατηγορίες, τα οχήματα που παρουσιάζουν εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα εκπομπών CO₂ (ULEV, Ultra Low Emissions Vehicles), είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει οποιοδήποτε όχημα χρησιμοποιεί τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα και εκπέμπει 50% λιγότερο από άλλα οχήματα, και τα Super Ultra Low Emission Vehicle (SULEV) οχήματα εξαιρετικά χαμηλών εκπομπών που εκπέμπουν 90% λιγότερα από άλλα οχήματα. Μια μελέτη απόδοσης, εκπομπών και οικονομίας καυσίμου αυτού του οχήματος σε διαφορετικές αναλογίες καυσίμου αέρα ($2 < \lambda < 2,85 / 0,35 < \phi < 0,50$) έδειξε αριθμούς κατανάλωσης καυσίμου μεταξύ 4,1 και 4,5 kg υδρογόνου ανά 100 km που ισοδυναμεί με ενέργεια 15,5 και 17 λίτρα βενζίνης ανά 100 km (13,8 έως 15,2 mpg=miles per gallon) [27].

6.1.4 Οχήματα Κατανάλωσης Βιοκαυσίμων

Η BMW ήταν από τις πρώτες εταιρίες που παρουσίασαν οχήματα με κινητήρες καύσης υδρογόνου. Η τελευταία γενιά οχημάτων είναι η σειρά BMW Hydrogen 7 Bi-fuel, ένα πολυτελές sedan δύο καυσίμων που εξοπλίζεται με έναν κινητήρα V-12 6000 κ.εκ. (ή 6,0 L). Τα μοντέλα αυτά είναι πανομοιότυπα με εκείνα της σειράς 6 και 5 (6 and 5 series) και κατασκευάζονται στο Μόναχο της Γερμανίας. Ο κινητήρας είναι εφοδιασμένος με δύο ξεχωριστά συστήματα καύσης, βενζίνης και υδρογόνου όπου η βενζίνη εγχέεται απευθείας στον θάλαμο καύσης ενώ το υδρογόνο εγχέεται στην πολλαπλή εισαγωγή. Αντίστοιχα υπάρχουν και η δεξαμενή υδρογόνου (κρυογενική μορφή έως οχτώ κιλά), την οποία μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για περίπου διακόσια χιλιόμετρα, καθώς και η δεξαμενή βενζίνης την οποία μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για τετρακόσια ογδόντα χιλιόμετρα.

Εκτός από την BMW έχει αρχίσει και η εταιρία Mazda να παράγει τέτοιου είδους οχήματα. Ένα από τα οχήματα που παρουσίασε το 2003 ήταν το Mazda RX-8 Hydrogen RE. Η έκδοση υδρογόνου της μηχανής Renesis εξοπλίζεται με έναν στροβίλο-υπερπληρωτή υποβοηθούμενο από ηλεκτρικό κινητήρα ώστε να αυξήσει την αποτελεσματικότητα της υπερπλήρωσης σε όλο το φάσμα στροφών λειτουργίας της μηχανής. Η πιο πρόσφατη "γενιά" οχημάτων εξοπλίζεται με δύο δεξαμενές πεπιεσμένου υδρογόνου με πίεση λειτουργίας έως 350 bar. Αυτές δίνουν στο όχημα αυτονομία περίπου 100 km για λειτουργία με υδρογόνο, ενώ έχει επιπλέον αυτονομία 550 km για λειτουργία με βενζίνη. Ο συνδυασμός λειτουργίας με φτωχή και στοιχειομετρική καύση του υδρογόνου έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 23% συγκρινόμενη με την αντίστοιχη λειτουργία βενζίνης. Η απόδοση (ή καλύτερα η ισχύς) του οχήματος σύμφωνα με τα Ιαπωνικά πρότυπα SULEV μειώνεται από 154 kW κατά τη λειτουργία βενζίνης σε 80 kW κατά την λειτουργία με υδρογόνο [27].

6.1.5 Επισκόπηση των Οχημάτων Υδρογόνου

Σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα βλέπουμε λεπτομέρειες σχετικά με διάφορα οχήματα υδρογόνου, όπως για παράδειγμα τον τύπο κινητήρα που χρησιμοποιεί κάθε εταιρία, την μορφή του υδρογόνου στις δεξαμενές, την χωρητικότητα των δεξαμενών αυτών, την απόσταση που μπορεί να διανύσει κάθε όχημα καθώς και τον αριθμό των οχημάτων που παράγονται [27]

Όνομα	Έτος	Κινητήρας	Δεξαμενή	Χωρητικότητα	Απόσταση	Παραγόμενα Οχήματα
Rivaz	1807	Μονοκύλ.	Συμπίεση	-	-	-
Lenoir	1860	Μονοκύλ.	Ηλεκτρόλυση Νερού	-	-	-
Norsk Hydro	1933		Αμμωνία	-	-	-
Musashi 1	1974	Τετράχρονος	Συμπίεση	7Nm ³	-	-
Musashi 2	1975	Τετράχρονος	Κρυογενικό	230L	-	-
Musashi 3	1977	Δίχρονος	Κρυογενικό	65L	-	-
BMW	1979	3,5L	Κρυογενικό		300km	-
Ford P2000	2001	2L I4	Συμπίεση	1.5kg	100km	-
BMW H7	2003	6L V12	Κρυογενικό	8kg	200+480km	100
Mazda RX-8 H RE	2003	2 x 654cc	Συμπίεση	2.4kg	100+550km	>30
Quantum Prius	2005	1.5L I4	Συμπίεση	1.6-2.4kg	100-130km	>30

7. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η επιλογή του υδρογόνου για το άμεσο μέλλον δείχνει ότι θα μας απασχολήσει και αξίζει την προσοχή μας. Είναι ένα καθαρό καύσιμο χωρίς εκπομπές ρύπων προς το περιβάλλον και προς τον άνθρωπο. Επίσης είναι αποδοτικότερο σε σχέση με άλλα καύσιμα και μη ξεχνάμε ότι δεν είναι επιβλαβές για το περιβάλλον. Εάν παραχθεί το υδρογόνο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας τότε είναι μία πολύ καλή λύση για την παραγωγή του. Ακόμα με την σειρά του συνιστάται και ο τρόπος αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και η σωστή εκμετάλλευση του υδρογόνου κυρίως όταν προέρχεται από ήπιες μορφές ενέργειας. Το υδρογόνο μας δίνει την δυνατότητα μέσω των κυψελών καυσίμου να επιλέξουμε πως θα ανακτήσουμε την ενέργεια που ήταν αποθηκευμένη. Έτσι μπορούμε να ανακτήσουμε αυτή την ενέργεια είτε σε ηλεκτρική, είτε σε θερμότητα είτε σε κίνηση. Για αυτό το λόγο το σύστημα υδρογόνου– κυψελών καυσίμου παρομοιάζεται με ένα είδος μπαταρίας με πολλές δυνατότητες και αρκετά μεγάλη απόδοση.

Η παραγωγή υδρογόνου από Α.Π.Ε. είναι ακόμη σε πειραματικό και ερευνητικό επίπεδο λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για την παραγωγή του υδρογόνου. Στην Ελλάδα αυτή η λύση του υδρογόνου από Α.Π.Ε. μπορεί να επιφέρει την απεξάρτηση από τα συμβατικά καύσιμα που εισάγουμε στην Ελλάδα με αποτέλεσμα να καταφέρουμε να προστατέψουμε το περιβάλλον, και επίσης την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μικρών αυτόνομων κοινοτήτων που υπάρχουν στην Ελλάδα. Για αυτό πρέπει να δοθούν κίνητρα για επενδύσεις στις εταιρίες ενέργειας για την ανάπτυξη της τεχνολογίας παραγωγής υδρογόνου από Α.Π.Ε., ώστε να εισαχθούν και να αξιοποιηθούν μετέπειτα δίνοντας κίνητρα στο κράτος. Το ορυκτό καύσιμο δημιούργησε ανυπολόγιστη ζημιά για το περιβάλλον. Έτσι πρέπει να καταφύγουμε σε άλλες μορφές ενέργειας όπως είναι τα συνθετικά καύσιμα εάν θέλουμε βέβαια να σταματήσουμε την μόλυνση του πλανήτη. Ξέρουμε ότι τα ορυκτά καύσιμα θα εξαντληθούν και μέχρι τότε θα πρέπει να μπορούμε να τα αντικαταστήσουμε με την βοήθεια του υδρογόνου αλλά και άλλων συνθετικών καυσίμων που να παράγονται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Β. Αβδελίδης “Καύση Υδρογόνου σε Εμβολοφόρες ΜΕΚ”, Διπλωματική εργασία, Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Θερμότητας, 2008
https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/1719/avdelidis_viston.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- 2) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>
- 3) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-biomass-derived-liquid-reforming>
- 4) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>
- 5) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-microbial-biomass-conversion>
- 6) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-coal-gasification>
- 7) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-thermochemical-water-splitting>
- 8) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-thermochemical-water-splitting>
- 9) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-photobiological>
- 10) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-photoelectrochemical-water-splitting>
- 11) <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF>
- 12) http://195.134.76.37/chemicals/chem_H2O2.htm
- 13) https://hgz.de/science/materialien_verfahren/wasserstoffspeicherung/index.php.en
- 14) <http://www.hysafe.net/wiki/BRHS/StorageMetalHydrides>
- 15) https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%85%CF%88%CE%AD%CE%BB%CE%B7_%CE%BA%CE%B1%CF%85%CF%83%CE%AF%CE%BC%CE%BF%CF%85
- 16) <http://me1065.wikidot.com/hydrogen-storage-in-carbon-nanotubes>
- 17) <http://what-when-how.com/nanoscience-and-nanotechnology/carbon-nanotubes-and-other-carbon-materials-part-2-nanotechnology/>
- 18) Ν. Σουλτισιώτης “Μηχανές Εσωτερικής Καύσης”, Πτυχιακή Εργασία, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Φυσικής, 2011
<http://ikee.lib.auth.gr/record/125686/files/%CE%A0%CE%A4%CE%A5%CE%A7%CE%99%CE%91%CE%9A%CE%97%20%CE%95%CE%A1%CE%93%CE%91%CE%A3%CE%99%CE%91%20%CE%A3%CE%9F%CE%A5%CE%9B%CE%99%CE%A4%CE%A3%CE%99%CE%A9%CE%A4%CE%97%20%CE%9D%CE%99%CE%9A%CE%9F%CE%A5.pdf>
- 19) <https://www.caroto.gr/2012/01/08/2-stroke-engines/>
- 20) <https://www.caroto.gr/static/media/2012/01/dixronos.jpg>
- 21) Κ. Μαυρίδη, “Εφαρμογές Μηχανών Εσωτερικής Καύσης Θεωρία Εργαστήριο Ασκήσεις”, Πάτρα, Εκδόσεις GOTSIS, 2018
- 22) https://en.wikipedia.org/wiki/Diesel_engine
- 23) Τ. Perry, “21 Hydrogen Fuel Cell Car Advantages And Disadvantages”, 2018, έχει δημοσιευθεί στο Green Car Future (https://www.greencarfuture.com/hydrogen/advantages-and-disadvantages#7_Hydrogen_fuel_cells_are_durable)

- 24) https://www.researchgate.net/publication/222702191_Hydrogen-Fueled_internal_combustion_engines
- 25) <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%85%CF%84%CE%B1%CE%BD%CE%AC%CF%86%CE%BB%CE%B5%CE%BE%CE%B7>
- 26) <https://www.autoblog.gr/2019/10/19/des-ti-einai-h-kroustikh-kaysh-peirakia-kai-ti-shmasia-paizoun-ta-oktania/>
- 27) S. Verhelst, T. Wallner, "Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines", 2009
<https://core.ac.uk/download/pdf/55886219.pdf>
- 28) <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CE%BE%CE%B1%CE%B5%CF%81%CF%89%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B1%CF%82>
- 29) Γ. Δρυμωνίτης "Μελέτη του Χρόνου Καθυστέρησης Ανάφλεξης των Βασικών Συστατικών του Φυσικού Αερίου", Διπλωματική Εργασία, Μετσόβιο πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Θερμότητας, 2015
<https://core.ac.uk/download/pdf/38468125.pdf>
- 30) <http://inijapan.no/wp-content/uploads/2017/02/12-YARA-Carbon-free-ammonia.pdf>

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εξώφυλλο	Internal Combustion Engine EU Funds Hydrogen Combustion Engine Project springerprofessional.de
Εικόνα 1	https://www.energy.gov/sites/prod/files/styles/borealis_photo_gallery_large_respondsmall/public/pem_electrolyzer.png?itok=tbiqAZoP
Εικόνα 2	https://www.energy.gov/sites/prod/files/styles/borealis_photo_gallery_large_respondsmall/public/2017/07/f35/05048.JPG?itok=5heg55k3
Εικόνα 3	https://www.energy.gov/sites/prod/files/mec_schematic_0.png
Εικόνα 4	https://www.energy.gov/sites/prod/files/pec_mirror-based_approaches_0.png
Εικόνα 5	https://www.energy.gov/sites/prod/files/styles/media_energy_gov_320/public/15277.JPG?itok=ZSG5-ME1
Εικόνα 6	https://www.energy.gov/sites/prod/files/styles/borealis_photo_gallery_large_respondlarge/public/pec_reactor_approaches_0.png?itok=wefRRvnY
Εικόνα 7	https://www.energy.gov/sites/prod/files/styles/borealis_photo_gallery_large_respondlarge/public/pec_reactor_design_schemes.png?itok=sDInbl-G
Εικόνα 8	https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1a/Electron_shell_001_Hydrogen.svg

Εικόνα 9	http://195.134.76.37/chemicals/images/H2O2/H2O2_rocket1.jpg
Εικόνα 10	http://what-when-how.com/wp-content/uploads/2011/03/tmp124138_thumb.jpg
Εικόνα 11	https://www.caroto.gr/static/media/2012/01/dixronos.jpg
Εικόνα 12	Βιβλίο Μαυρίδη
Εικόνα 13	http://8ermikoi-kukloi.weebly.com/uploads/1/8/3/3/18336781/8813058_orig.png
Εικόνα 14	http://8ermikoi-kukloi.weebly.com/uploads/1/8/3/3/18336781/8813058_orig.png
Εικόνα 15	https://oebemessinias.gr/pdf/systimata_petrelaiokinesis.pdf
Εικόνα 16	https://i0.wp.com/www.autoblog.gr/wp-content/uploads/2019/10/averillfwk-fiQ02_024.jpg?resize=823%2C420&ssl=1
Εικόνα 17	http://3.bp.blogspot.com/-JfRq30zCB8w/U9Gavb5qHPI/AAAAAAAAAGqY/7d6JtsolpNs/s1600/FUEL+1.jpg
Εικόνα 18	https://core.ac.uk/download/pdf/38468125.pdf
Εικόνα 19	https://yt3.ggpht.com/ytc/AAUvwnivNTz7Smn5MBsBa50NNes-DHI50bk1kntalbzms176-c-k-c0x00ffffff-no-rj
Εικόνα 20	https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Flive.staticflickr.com%2F8331%2F8136698514_8350967199_z.jpg&imgrefurl=https%3A%2F%2Fwww.flickr.com%2Fphotos%2Fhydrogencarsnow%2F8136698514&tbnid=POGfHa4VgtGOOM&vet=12ahUKEwi2zuWRspvAhXE4YUKHdudAecOMygAegQIARA6..i&docid=VRhnuhP-7k_OEM&w=627&h=330&q=1933%20norsk%20hydro&ved=2ahUKEwi2zuWRspvAhXE4YUKHdudAecOMygAegQIARA6