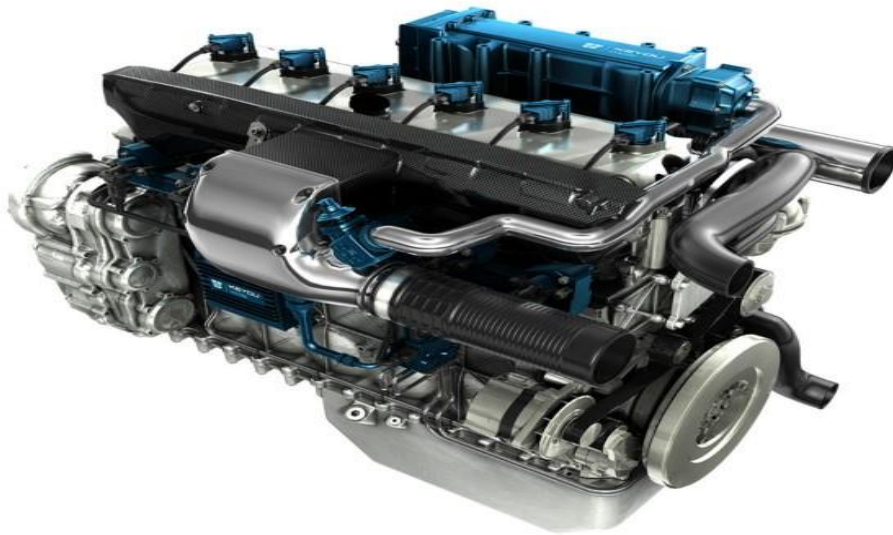


Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τμήμα Μηχανολογίας  
Τομέας Ενέργειας  
Διπλωματική εργασία:  
**ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΕΣ  
ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ**



Κυριάκος Μαργαρίτης ΑΜ: 7493

Επιβλέπων Καθηγητής: Κωνσταντίνος Μαυρίδης

Πάτρα 2022-2023

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο δεύτερο κεφάλαιο της πτυχιακής αυτής 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.

Το τρίτο κεφάλαιο αποσκοπεί στην μηχανή εσωτερικής καύσης, μια από τις μεγαλύτερες ανακαλύψεις του 20<sup>ου</sup> αιώνα όσον αφορά την ιστορία και την εξέλιξη των αυτοκινούμενων οχημάτων. Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται τα σπουδαιότερα είδη κινητήρων εσωτερικής καύσης, οι οποίοι είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι πήραν το όνομά τους από τους ιδρυτές τους.

Το τέταρτο κεφάλαιο στοχεύει στην χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο μέσω των χαρακτηριστικών του αλλά και των μειονεκτημάτων-πλεονεκτημάτων που θα φέρει. Ακόμα θα γίνει σύγκριση ρύπων μεταξύ λειτουργίας με υδρογόνο και με βενζίνη, θα αναφερθούν οι τρόποι τροφοδοσίας καυσίμου και ο σχηματισμός του μίγματος. Τέλος ερευνώνται το φαινόμενο της ανώμαλης καύσης στις MEK υδρογόνου και τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού και λειτουργίας τους.

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

Στο έκτο κεφάλαιο καταδεικνύονται λεπτομέρειες σχετικά με τα πρότυπα οχήματα που χρησιμοποιούν τις MEK υδρογόνου.

Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο θα γίνει αναφορά των MEK υδρογόνου στην ναυτιλία βάσει ερευνών που έχουν γίνει μέχρι σήμερα.

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

- PEM = Polymer electrolyte 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
- $\phi=1/\lambda \Rightarrow$  Λόγος ισοδυναμίας καυσίμου
- $\lambda$  = Λόγος ισοδυναμίας αέρα
- FSR = λόγος των ταχυτήτων φλόγας σε ένα προβλεπτικό μοντέλο προσομοίωσης
- Re = αριθμός Reynolds
- 

## Περιεχόμενα

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	6
<b>2. ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟ</b> .....	7
2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ .....	7
2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	7
2.2.1 Παραγωγή υδρογόνου: Ηλεκτρόλυση .....	7
2.2.2 Παραγωγή υδρογόνου: Μεταρρύθμιση υγρού που προέρχεται από βιομάζα....	9
2.2.3 Παραγωγή υδρογόνου: Αναμόρφωση του φυσικού αερίου .....	10
2.2.4 Παραγωγή υδρογόνου: Μετατροπή μικροβιακής βιομάζας .....	11
<b>2.2.5 Παραγωγή υδρογόνου: Αεριοποίηση άνθρακα</b> .....	11
<b>2.2.6. Παραγωγή υδρογόνου: Θερμοχημικός διαχωρισμός νερού</b> .....	12
<b>2.2.7. Παραγωγή υδρογόνου: Φωτοβιολογικό</b> .....	13
<b>2.2.8. Παραγωγή υδρογόνου: Φωτοηλεκτροχημικός διαχωρισμός νερού</b> .....	14
2.3 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ .....	16
2.4 ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	17
2.5 ΤΡΟΠΟΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ .....	18
<b>2.5.1 Αποθήκευση ως συμπιεσμένο αέριο</b> .....	<b>18</b>
<b>2.5.2 Αποθήκευση ως κρυογονικό υγρό</b> .....	<b>19</b>
<b>2.5.3 Αποθήκευση σε υδρίδια μετάλλων</b> .....	<b>20</b>
<b>2.5.4 Αποθήκευση σε νανοσωλήνες άνθρακα</b> .....	<b>21</b>
2.6 ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ .....	23

<b>3 ΜΗΧΑΝΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ.....</b>	<b>23</b>
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	23
3.2 ΔΙΧΡΟΝΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ .....	24
3.3 ΤΕΤΡΑΧΡΟΝΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ.....	25
3.4 ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΟΤΤΟ (ΒΕΝΖΙΝΗΣ) .....	26
3.5 ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ Diesel (ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ) .....	28
<b>4 ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΤΙΣ ΜΕΚ.....</b>	<b>30</b>
4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ .....	30
4.2 ΘΕΤΙΚΑ ΚΑΙ ΑΡΝΗΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΩΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΦΟΡΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	32
4.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΤΙΣ ΜΕΚ.....	34
<b>4.3.1 ΕΥΡΥ ΦΑΣΜΑ ΑΝΑΦΛΕΞΙΜΟΤΗΤΑΣ.....</b>	<b>34</b>
<b>4.3.2 ΧΑΜΗΛΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ.....</b>	<b>35</b>
<b>4.3.3 ΥΨΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ .....</b>	<b>35</b>
<b>4.3.4 ΜΕΓΑΛΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΑΥΣΗΣ .....</b>	<b>35</b>
<b>4.3.5 ΧΑΜΗΛΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΥΨΗΛΗ ΚΑΤΑ ΜΑΖΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ         ΚΑΥΣΗΣ .....</b>	<b>36</b>
<b>4.3.6 ΥΨΗΛΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ.....</b>	<b>36</b>
<b>4.3.7 ΜΙΚΡΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΣΒΗΣΙΜΑΤΟΣ-ΕΞΑΛΕΙΨΗ ΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ</b>	<b>36</b>
4.4 ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΚΑΥΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΡΥΠΟΥΣ ΤΩΝ ΜΕΚ ΒΕΝΖΙΝΗΣ .....	36
4.4.1 ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΘΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (NO <sub>x</sub> ).....	38
4.4.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΑΠΟΤΡΕΠΟΥΝ ΤΟΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ NO <sub>x</sub> .	38
4.4.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΙΩΣΗΣ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΩΝ NO <sub>x</sub> .....	39
4.4.4 ΥΠΕΡΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΙΣ ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ .....	40
4.5 ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΑΝΩΜΑΛΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΣΤΙΣ ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ .....	40
4.5.1 ΑΝΑΦΛΕΞΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ .....	40
4.5.2 ΛΟΓΟΙ ΠΡΟΚΛΗΣΗΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΣΤΗΝ ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	41
4.5.4 ΠΡΟΑΝΑΦΛΕΞΗ .....	43
4.5.5 ΑΥΤΟΑΝΑΦΛΕΞΗ .....	44
4.5.6 ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ ΚΑΥΣΗ .....	45
4.5.7 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΚΑΥΣΗΣ .....	45
4.5.8 ΑΠΟΦΥΓΗ ΜΗ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΥΣΗΣ .....	46
4.6 ΤΡΟΠΟΙ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΙΓΜΑΤΟΣ	47

4.6.1	ΕΞΑΕΡΩΤΗΣ.....	47
4.6.2	ΕΓΧΥΣΗ ΣΤΗΝ ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	48
4.6.3	ΑΜΕΣΗ ΕΓΧΥΣΗ .....	48
4.6.4	ΕΓΧΥΣΗ ΣΤΗΝ ΘΥΡΙΔΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ.....	49
4.7	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	49
4.7.1	ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ .....	50
4.7.2	ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΚΑΙ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΕΣ .....	50
4.7.3	ΔΙΠΛΑΝΣΗ ΤΩΝ ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	51
4.7.4	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΨΥΞΗΣ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ .....	51
4.7.5	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ.....	51
4.7.6	ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ.....	51
4.7.7	ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ .....	52
5	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕ ΑΛΛΑ ΚΑΥΣΙΜΑ .....	52
5.1	ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ .....	52
5.2	ΣΥΝΔΙΑΣΜΟΙ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	54
5.2.1	ΜΕΙΓΜΑΤΑ ΠΟΥ ΚΥΡΙΑΡΧΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ .....	55
5.2.2	ΜΕΙΓΜΑΤΑ ΠΟΥ ΚΥΡΙΑΡΧΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ .....	55
5.2.3	ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΜΕΙΓΜΑΤΑ ΑΕΡΙΟΥ .....	56
5.3	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΔΙΠΛΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ .....	56
5.3.1	DIESEL ΚΑΙ BIODIESEL.....	56
5.3.2	BENZINΗ ΚΑΙ ΚΑΥΣΙΜΑ ΑΛΚΟΟΛΗΣ.....	56
6	ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕ ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ .....	57
6.1.1	ΙΣΤΟΡΙΑ.....	57
6.1.2	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ .....	57
6.1.3	ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ .....	58
6.1.4	ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΑ ΟΧΗΜΑΤΑ .....	58
6.1.5	ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ .....	59
7	ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ .....	60
7.1	ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ.....	60
7.2	ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΕΥΘΑΡΣΤΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ .....	60
7.3	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ .....	61
7.4	ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΣΕ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΑΠΛΟΥ Ή ΔΙΠΛΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ .....	61
7.5	Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ.....	63

8	ΕΠΙΛΟΓΟΣ .....	64
9	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	65

## 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 ευχερή και οικονομικότερη λύση για την απόκρυψη των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών.

Τρόποι απαλλαγής από την επερχόμενη καταστροφή υπάρχουν αλλά είναι πάρα πολύ ακριβοί. Κάποιοι εναλλακτικοί τρόποι έχουν εισαχθεί στα πανεπιστήμια και στα ερευνητικά κέντρα με σκοπό την αποφυγή των ορυκτών καυσίμων.

Από όσο φαίνεται το υδρογόνο, που αποκαλείται και "μαύρος χρυσός", 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 καθώς και σε μορφή κυψελών. 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 στην παρουσίαση οχημάτων τα οποία χρησιμοποιούν κινητήρες υδρογόνου. Τέλος θα γίνει αναφορά του υδρογόνου ως καύσιμο στην ναυτιλία, συμπεριλαμβάνοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα βάσει πληθώρας ερευνών.

## 2. ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟ

### 2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Το χημικό στοιχείο του υδρογόνου 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, 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<sup>ο</sup> 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 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 Freidich Bonhoeffer) μαζί με τον Αυστριακό Χάρτεκ (Paul Hartek) 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 αντιστοιχίσουν , ποιοτικά, και σε περιπτώσεις άλλων ατόμων.

### 2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

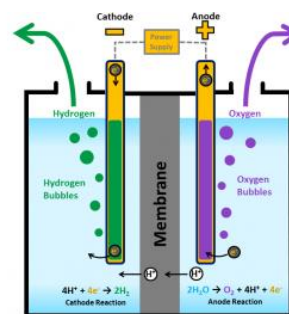
#### 2.2.1 Παραγωγή υδρογόνου:

##### Ηλεκτρόλυση

Η ηλεκτρόλυση είναι μια πολλά υποσχόμενη επιλογή για παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές. 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

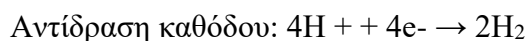
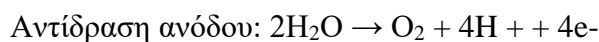
που είναι κατάλληλο για μικρής κλίμακας καταναεμημένη παραγωγή υδρογόνου έως



Εικόνα 1

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. (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.



Οι αλκαλικοί ηλεκτρολύτες λειτουργούν μέσω μεταφοράς ιόντων υδροξειδίου (OH<sup>-</sup>) 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.

Οι ηλεκτρολύτες στερεού οξειδίου, οι οποίοι χρησιμοποιούν ένα στερεό κεραμικό υλικό ως τον ηλεκτρολύτη που επιλεκτικά διεξάγει αρνητικά φορτισμένα ιόντα οξυγόνου (O<sup>2-</sup>) 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°–800°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 στερεά ηλεκτρολύματα οξειδίων μπορούν αποτελεσματικά να χρησιμοποιήσουν τη θερμότητα διαθέσιμη σε αυτές τις υψηλές θερμοκρασίες (από τις διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένης της πυρηνικής ενέργειας) για να μειώσουν το ποσό ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για να παραγάγει 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 Παραγωγή υδρογόνου: Μεταρρύθμιση υγρού που προέρχεται από βιομάζα

Τα υγρά που προέρχονται από πόρους βιομάζας - 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, βιοελαίδι 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 πολύ παρόμοια 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 κάποιο 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
- III. Τέλος, το υδρογόνο διαχωρίζεται και καθαρίζεται.

**-Αντίδραση αναμόρφωσης ατμού (αιθανόλη)**  $C_2H_5OH + H_2O (+ \text{θερμότητα}) \rightarrow 2CO + 4H_2$

**-Αντίδραση αλλαγής νερού-αερίου**  $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 (+ \text{μικρή ποσότητα θερμότητας})$

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 κατανεμημένους σταθμούς ανεφοδιασμού, ημι-κεντρικές εγκαταστάσεις παραγωγής ή σταθερούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας για αναμόρφωση σε υδρογόνο.

### 2.2.3 Παραγωγή υδρογόνου: Αναμόρφωση του φυσικού αερίου

Το φυσικό αέριο περιέχει μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υδρογόνου με θερμικές διεργασίες, όπως η αναμόρφωση του ατμού-μεθανίου και η μερική οξειδωση.



Εικόνα 2

#### ΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΤΜΟΥ-ΜΕΘΑΝΙΟΥ

Το μεγαλύτερο μέρος της αναμόρφωσης 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 μεταρρύθμιση του μεθανίου ατμού, το μεθάνιο αντιδρά με ατμό κάτω από πίεση 3-25 bar (1 bar = 14,5 psi) παρουσία καταλύτη για την παραγωγή υδρογόνου, μονοξειδίου του άνθρακα και σχετικά μικρής ποσότητας διοξειδίου του άνθρακα. Η μεταρρύθμιση ατμού είναι ενδοθερμική-δηλαδή, η θερμότητα πρέπει να παρασχεθεί στη διαδικασία για την αντίδραση για να προχωρήσει.

Στη συνέχεια, σε αυτό που ονομάζεται «αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου», το μονοξείδιο του άνθρακα και ο ατμός αντιδρούν χρησιμοποιώντας έναν καταλύτη για την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα και περισσότερο υδρογόνο. Σε ένα τελικό βήμα διαδικασίας που ονομάζεται «προσρόφιση πίεσης-ταλάντευσης», το διοξείδιο του άνθρακα και άλλες ακαθαρσίες απομακρύνονται από το ρεύμα αερίου, αφήνοντας ουσιαστικά καθαρό υδρογόνο. Η μεταρρύθμιση ατμού μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να παραγάγει το υδρογόνο από άλλα καύσιμα, όπως η αιθανόλη, το προπάνιο, ή ακόμα και η βενζίνη.

-Αντίδραση αναμόρφωσης ατμού-μεθανίου  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} (+ \text{θερμότητα}) \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$

-Αντίδραση αλλαγής νερού-αερίου  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2 (+ \text{μικρή ποσότητα θερμότητας})$

Η μερική οξειδωση, το μεθάνιο και άλλοι υδρογονάνθρακες στο 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 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, σε μια αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου, το μονοξείδιο του άνθρακα αντιδρά με νερό για να σχηματίσει διοξείδιο του άνθρακα και περισσότερο υδρογόνο.

Η μερική οξειδωση 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 σε χημικές αντιδράσεις μερικής οξειδωσης, αυτή η διαδικασία αρχικά παράγει λιγότερο υδρογόνο ανά μονάδα του

καυσίμου εισόδου από αυτό που λαμβάνεται με αναμόρφωση του ατμού του ίδιου καυσίμου.

Μερική οξείδωση της αντίδρασης μεθανίου  $\text{CH}_4 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$  (+ θερμότητα)

Αντίδραση αλλαγής νερού-αερίου  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$  (+ μικρή ποσότητα θερμότητας)

#### 2.2.4 Παραγωγή υδρογόνου: Μετατροπή μικροβιακής βιομάζας

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

Στην άμεση ζύμωση υδρογόνου, τα μικρόβια παράγουν το ίδιο 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 να κάνουν τα συστήματα ζύμωσης να παράγουν υδρογόνο γρηγορότερα (βελτιώνοντας τον ρυθμό) και να παράγουν περισσότερο υδρογόνο από την ίδια ποσότητα οργανικής ύλης (αυξάνοντας την απόδοση).

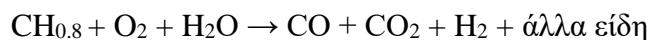
Τα μικροβιακά κύτταρα ηλεκτρόλυσης (MECs) είναι συσκευές που αξιοποιούν την ενέργεια και τα πρωτόνια που παράγονται από μικρόβια που διαλύουν την οργανική ύλη, σε συνδυασμό με ένα επιπλέον μικρό ηλεκτρικό ρεύμα, για την παραγωγή υδρογόνου. Αυτή η τεχνολογία είναι πολύ νέα, και οι ερευνητές εργάζονται για τη βελτίωση πολλών πτυχών του συστήματος, από την εύρεση υλικών χαμηλότερου κόστους για τον εντοπισμό του πιο αποτελεσματικού τύπου των μικροβίων στη χρήση.

#### 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 που μπορεί να παράγει ενέργεια, υγρά καύσιμα, χημικά και υδρογόνο. Συγκεκριμένα, το υδρογόνο παράγεται με πρώτη αντίδραση άνθρακα με οξυγόνο και ατμό υπό υψηλές

πίεσεις και θερμοκρασίες για να σχηματίσει αέριο σύνθεσης, ένα μείγμα που αποτελείται κυρίως από μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο.

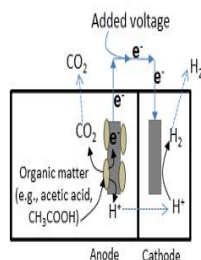
**Αντίδραση αεριοποίησης άνθρακα (μη ισορροπημένη):**



Μετά την απομάκρυνση των ακαθαρσιών 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, και το πολύ συμπυκνωμένο ρεύμα διοξειδίου του άνθρακα μπορεί στη συνέχεια να συλλαμβάνεται και να αποθηκεύεται.

Μάθετε περισσότερα σχετικά με τη δέσμευση άνθρακα, τη χρήση και την αποθήκευση.

Η παραγωγή υδρογόνου από άνθρακα προσφέρει επίσης περιβαλλοντικά οφέλη όταν ενσωματώνεται με προηγμένες τεχνολογίες στην αεριοποίηση άνθρακα, την παραγωγή



Εικόνα 3

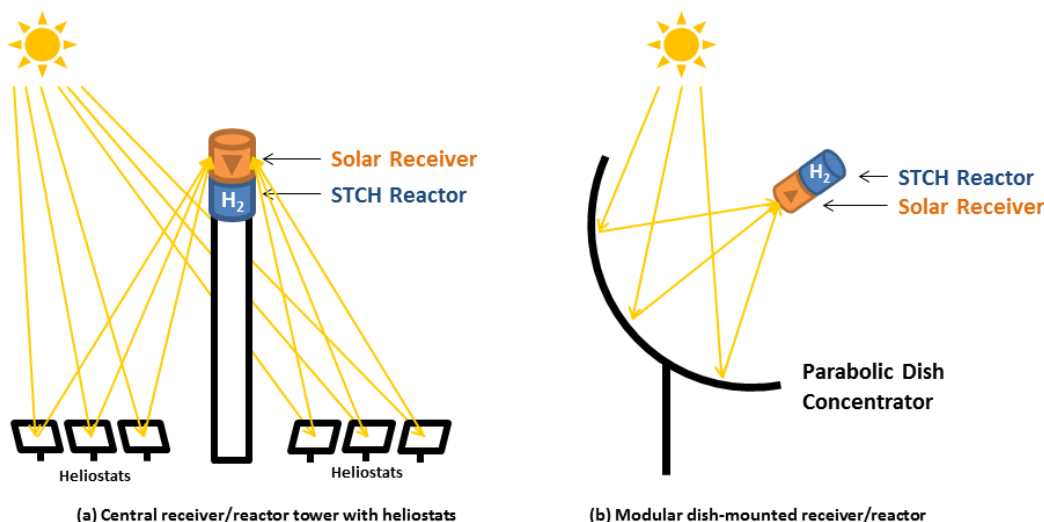
ενέργειας και τη δέσμευση, χρήση και αποθήκευση άνθρακα. Η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών διευκολύνει τη δέσμευση πολλών ρύπων όπως οξείδια του θείου, οξείδια του αζώτου, υδράργυρο και σωματίδια, καθώς και αέρια θερμοκηπίου όπως το διοξείδιο του άνθρακα. Όταν το υδρογόνο χρησιμοποιείται σε αποδοτικά οχήματα με κυψέλες καυσίμου, οι εκπομπές από τον τομέα των μεταφορών μπορούν σχεδόν να εξαλειφθούν.

### 2.2.6. Παραγωγή υδρογόνου: Θερμοχημικός διαχωρισμός νερού

Ο θερμοχημικός διαχωρισμός νερού χρησιμοποιεί υψηλές θερμοκρασίες από συμπυκνωμένη ηλιακή ενέργεια ή από την απορριπτόμενη θερμότητα από αντιδράσεις πυρηνικής ενέργειας - και χημικές αντιδράσεις για την παραγωγή υδρογόνου και οξυγόνου από νερό. Πρόκειται για μια μακροπρόθεσμη τεχνολογική πορεία, με δυνητικά χαμηλές ή καθόλου εκπομπές αερίων θερμοκηπίου.

Οι διεργασίες θερμοχημικού διαχωρισμού 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 καθρέφτη «ηλιοστάτες», όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.
- Χρήση απορριμμάτων θερμότητας από προηγμένους πυρηνικούς αντιδραστήρες.



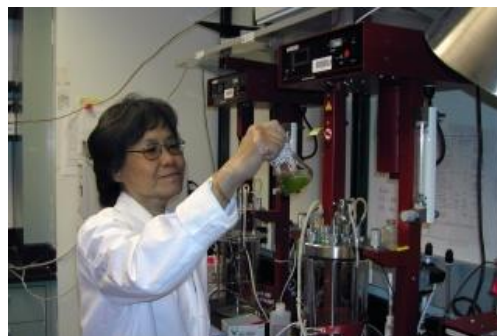
Εικόνα 4

Δύο παραδείγματα κύκλων θερμοχημικού διαχωρισμού νερού, ο «άμεσος» θερμικός κύκλος οξειδίου δημητρίου (cerium oxygen) δύο βημάτων και ο «υβριδικός» κύκλος χλωριούχου χαλκού, απεικονίζονται στο Σχήμα 2. 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 νερού υψηλής θερμοκρασίας παράγουν υδρογόνο με σχεδόν μηδενικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου χρησιμοποιώντας νερό και είτε ηλιακό φως είτε πυρηνική ενέργεια.

### 2.2.7. Παραγωγή υδρογόνου: Φωτοβιολογικό

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



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 συνδυαστούν μέσω άμεσων ή έμμεσων οδών και να απελευθερωθούν ως αέριο υδρογόνο. Οι προκλήσεις για αυτήν την οδό περιλαμβάνουν τα χαμηλά ποσοστά παραγωγής υδρογόνου και το γεγονός ότι ο διαχωρισμός του νερού παράγει επίσης οξυγόνο, το οποίο αναστέλλει γρήγορα την αντίδραση παραγωγής υδρογόνου και

μπορεί να αποτελέσει ζήτημα ασφάλειας όταν αναμιγνύεται με υδρογόνο σε ορισμένες συγκεντρώσεις. Οι ερευνητές εργάζονται για να αναπτύξουν μεθόδους που θα επιτρέψουν στα μικρόβια να παράγουν υδρογόνο για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα και να αυξήσουν το ρυθμό παραγωγής υδρογόνου.

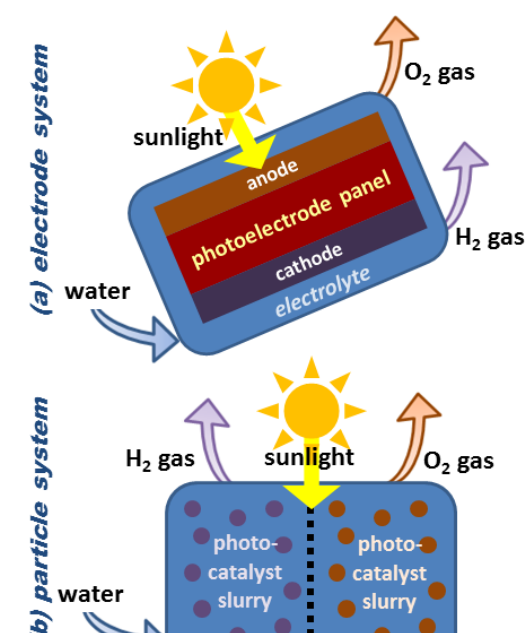
Ορισμένα φωτοσυνθετικά μικρόβια χρησιμοποιούν το φως του ήλιου ως οδηγό για τη διάσπαση της οργανικής ύλης, απελευθερώνοντας υδρογόνο. Αυτό είναι γνωστό ως παραγωγή φωτο-ζυμωτικού υδρογόνου. Περιλαμβάνουν έναν πολύ χαμηλό ρυθμό παραγωγής υδρογόνου και χαμηλή απόδοση από ηλιακό προς υδρογόνο, καθιστώντας 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 καθαρού μηδενικού. Τα φύκια και τα βακτήρια θα μπορούσαν να αναπτυχθούν σε νερό που δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πόση ή για γεωργία, και θα μπορούσε ενδεχομένως ακόμη και να χρησιμοποιηθούν λύματα.

### 2.2.8. Παραγωγή υδρογόνου: Φωτοηλεκτροχημικός διαχωρισμός νερού

Στο διαχωρισμό του νερού φωτοηλεκτροχημικά (PEC), το υδρογόνο παράγεται από το νερό χρησιμοποιώντας το φως του ήλιου και εξειδικευμένους ημιαγωγούς που ονομάζονται φωτοηλεκτροχημικά υλικά, τα οποία χρησιμοποιούν ελαφριά ενέργεια 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 στην φωτοβολταϊκή παραγωγή ηλιακής ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά για 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 πάνελ (παρόμοια με τα φωτοβολταϊκά πάνελ) ως συστήματα ηλεκτροδίων ή ως συστήματα σωματιδίων που βασίζονται σε υγρή κοπριά, κάθε προσέγγιση με τα δικά της πλεονεκτήματα και προκλήσεις. Μέχρι σήμερα, τα συστήματα πάνελ έχουν μελετηθεί ευρύτερα, λόγω των ομοιοτήτων με τις καθιερωμένες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών



Εικόνα 6

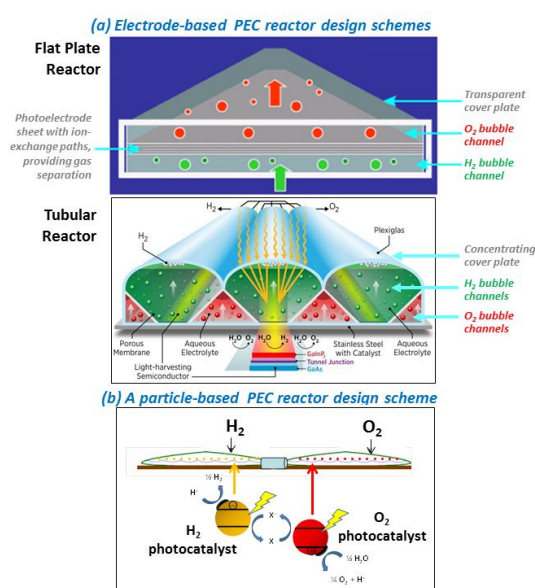
πάνελ. Κάντε κλικ σε κάθε τίτλο σχήμα για να δείτε μερικές διαφορετικές πιθανές υλοποιήσεις τόσο του πίνακα και πηλό έννοιες αντιδραστήρα.

Το σχήμα 1 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 πολλοί σωματιδίων ημιαγωγών PEC.

Το σχήμα 2 παρουσιάζει πιθανά σχέδια σχεδιασμού 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 κλίσης καλυμμένος με πλατύπλευρο φωτοκατάλυχο.



Εικόνα 7

Ο διαχωρισμός του νερού PEC είναι μια πολλά υποσχόμενη ηλιακή οδός προς υδρογόνο για την παραγωγή υδρογόνου σε ημικεντρικές και κεντρικές κλίμακες, προσφέροντας τη δυνατότητα για υψηλή απόδοση μετατροπής 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 σε φωτοβολταϊκά, νανοτεχνολογίες και υπολογιστικά υλικά.

- 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

### 2.3 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

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

#### 1: Hydrogen



Εικόνα 8

- 1 Το υδρογόνο βρίσκεται στην φύση ύπο 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 τους 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
<b>Ιδιότητα</b>		
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 <sup>1</sup>	1S <sup>1</sup>
<b>Μοριακό υδρογόνο</b>		
Μήκος χημικού δεσμού (ώγκοστρεμ)	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 πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	0,0310	0,0668

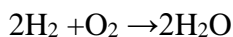
Παρατηρείται ότι το μοριακό υδρογόνο χαρακτηρίζεται από χαμηλά σημεία τήξης και ζέσης, και αυτό οφείλεται στις πολύ ασθενείς ελκτικές δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των μορίων του.

Το υδρογόνο είναι διαφανές στις υπέρυθρες, ορατές και υπεριώδεις φωτεινές ακτινοβολίες με μήκη κύματος μικρότερα των 1800  $\text{\AA}$ . 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.

## 2.4 ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Το υδρογόνο ως αέριο είναι πολύ εύφλεκτο και καίγεται σε μεγάλο εύρος συγκέντρωσης στον αέρα, ανάμεσα 4% και 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 (932 °F) 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 ανάμεσα των ατόμων του υδρογόνου είναι πολύ δυνατός και πρέπει να δημιουργηθούν τεράστιες ποσότητες ενέργειας για να διασπαστεί, έτσι τα ξεχωριστά άτομα αντιδρούν με άλλα στοιχεία ή ενώσεις. Παρ' όλα αυτά αν θερμαίνουμε με φλόγα αυτό αντιδρά πολύ επιθετικά με το οξυγόνο έτσι με αυτό τον τρόπο να μεταφέρει νερό σύμφωνα με την αντίδραση, εκλύοντας ταυτόχρονα ενέργεια.



Τα άτομα του υδρογόνου δημιουργούν ομοιοπολικούς δεσμούς αλλά όχι μόνο μεταξύ τους αλλά και με άλλα στοιχεία, όπως τις ενώσεις του μεθανίου ( $\text{CH}_4$ ) 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 ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ). Διαλυόμενα σε νερό, ο χαλαρός δεσμός του υδρογόνου διαχωρίζεται, με το υδρογόνο να ελευθερώνει το ηλεκτρόνιο του και έτσι αλλάζει σε ιόν υδρογόνου ( $\text{H}^+$ ).

Το υδρογόνο επιπλέον σχηματίζει ιοντικούς δεσμούς, πχ το υδροχλώριο ( $\text{HCl}$ ). Ο δεσμός πραγματοποιείται μεταξύ δυο μερικών ηλεκτρικών φορτίων υδρογόνου, αντίθετης πολικότητας. Κάποια από τα στοιχεία που μπορεί να σχηματίσει δεσμό είναι

: οξυγόνου, θείου, αζώτου, φθορίου ή χλωρίου(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 από τις δυνάμεις Van Der Waals ενώ έχουμε επιπρόσθετη δύναμη καθαρού χημικού δεσμού.

## 2.5 ΤΡΟΠΟΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

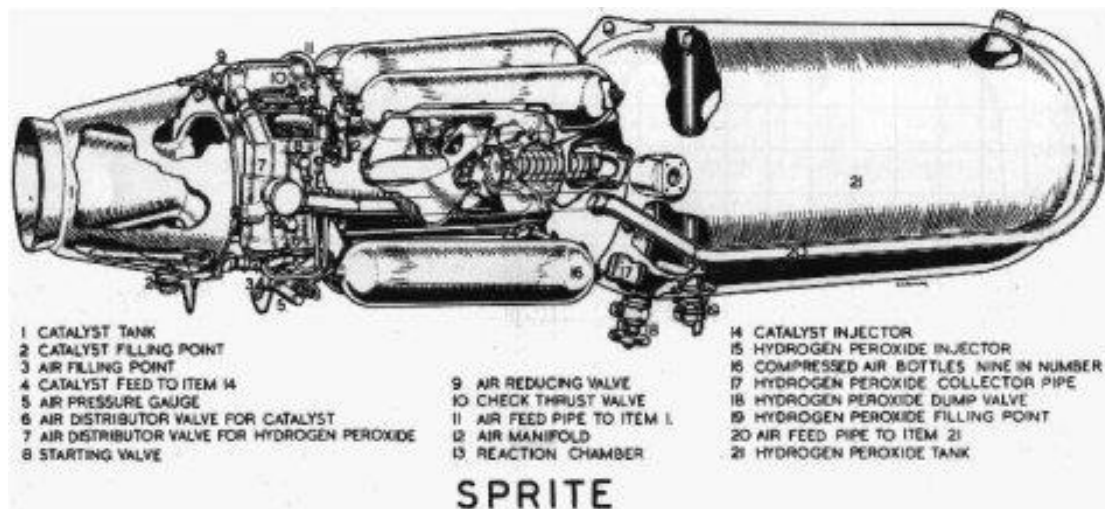
Το υδρογόνο έχει εξαιρετικά χαμηλή πυκνότητα ως αποτέλεσμα κατά την αποθήκευση ως ασυμπίεστο ρευστό να προκαταλαμβάνει μεγάλο μέρος όγκου [σε 20°C και 1atm→11m<sup>3</sup>]. Αυτό είναι και μία από τις ιδιότητες του που συγκροτείται ως ανασταλτικός παράγοντας στην άμεση ανάπτυξη και εδραίωση της οικονομίας 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 στο όχημα με τους εξής τρόπους:

- Ως συμπιεσμένο αέριο σε υψηλές πιέσεις
- Ως κρυογονικό 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, γνωστοί και ως 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 το υψηλό κόστος και τις πολυπλοκότητάς τους, τα συστήματα αποθήκευσης κρυογονικού υδρογόνου αποτελούν την χρυσή τομή μεταξύ βάρους και αυτονομίας.

### 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 (5000psi έως 10000psi). 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 και το κόστος λειτουργίας. Οι φιάλες συνήθως είναι κατασκευασμένες από κράματα αλουμινίου ενισχυμένες με σύνθετα υλικά. Για παράδειγμα οι αεροδιαστημική βιομηχανία κατασκευάζει κυλίνδρους, από ειδικό κράμα αλουμινίου και άνθρακα, οι οποίοι μπορούν να αποθηκεύσουν υδρογόνο σε πιέσεις έως και 700bar.



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 υπεροξειδίου 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 κρυογονικό υγρό

Η μέθοδος αποθήκευσης του υδρογόνου ως κρυογονικό υγρό έχει το πλεονέκτημα ακόμα και σήμερα ότι μας παρέχει βελτιστοποίηση του βάρους των δεξαμενών (ρεζερβουάρ) αλλά και στην αυτονομία. Η θερμοκρασία του είναι 20K ή -253°C και η 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 υδροποιημένου υδρογόνου. Αυτή η μέθοδος, υδροποίησης 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.

### 2.5.3 Αποθήκευση σε υδρίδια μετάλλων

Τα μόρια του υδρογόνου απωθούνται έντονα το ένα με το άλλο ,χρειαζόμαστε είτε υψηλή πίεση (δηλαδή 700 bar) είτε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ( $-253^{\circ}\text{C}$ ) για να τα εξημερώσουν. Το διάλυμα αποθήκευσης υδρογόνου σε μεταλλικά υδρίδια μας βοηθά σε αυτό .Η μεταλλική σκόνη υδριδίου διασπά τα μόρια υδρογόνου κάνοντας τα λιγότερα άγρια ,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 τα λεγόμενα μεταλλικά υδρίδια .Τα συστήματα αυτά μπορούν να είναι είτε χαμηλά ( $<150^{\circ}\text{C}$ ) είτε υψηλή θερμοκρασία ( $300^{\circ}\text{C}$ ).

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 μια σημαντική διαφορά. Όταν τα υδρίδια μετάλλων εκτίθενται στο υδρογόνο σε ορισμένες πιέσεις ,και οι θερμοκρασίες απορροφούν μεγάλες ποσότητες του αερίου σχηματίζουν μεταλλικές υδριδικές ενώσεις (PalcanMetalHydrides)

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 συμπαγής 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 :

- Να κάνουμε μελέτες για την εξέλιξη της ατομικής- κρυσταλλικής - μικροδομής και η μακροσκοπικής δομής ,έτσι ώστε έχουμε καλά νέα για την πορεία της ναυτοτεχνολογίας και για την δημιουργία ναοκρυστάλλικών υδριδίων στην κλίμακα ναομέτρου.

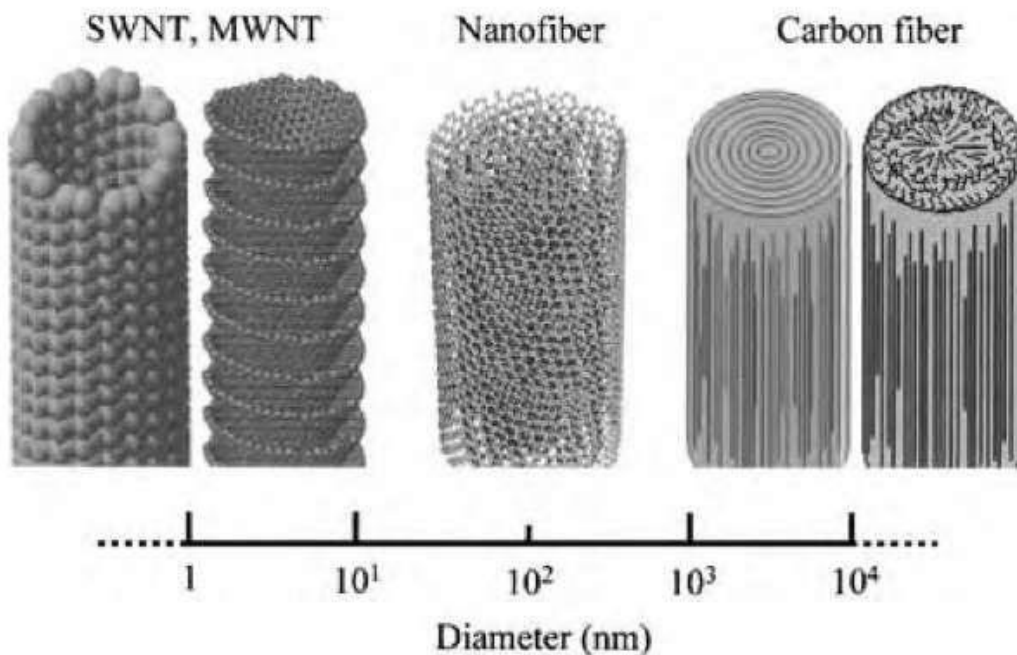
- Η πλευρά του μετάλλου πρέπει να είναι λεία-καθαρή για να γίνεται η απορρόφηση έτσι ώστε να μην έχουμε δημιουργία οξειδίων ή άλλους συνδυασμούς
- Το υδρογόνο προμηθεύει το αρνητικό ηλεκτρόδιο (στην άνοδο της κυψέλης), και περνώντας από τον καταλύτη διακρίνονται σε θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου και 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 που δημιουργείται 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.

#### 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 διαθέτουν οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNT): μονότοποι και πολλαπλοί τοίχοι. Όπως υποδηλώνει το όνομα, οι νανοσωλήνες με μονό τοίχο (SWCNT) αποτελούνται από ένα μόνο φύλλο γραφίτη. Ένα εύρος διαμέτρου είναι από 0,4 έως > 3nm. Οι νανοσωλήνες πολλαπλών τοιχωμάτων (MWNT) αποτελούνται από πολλά φύλλα, διατεταγμένα ομόκεντρα σε ολοένα και μεγαλύτερες διαμέτρους, με διαμέτρους από 1,4 έως 100 nm. Λόγω των μειωτικών διαστάσεων τους, οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNT) έχουν μοναδικές φυσικές και ηλεκτρικές ιδιότητες. Αυτά περιλαμβάνουν εξαιρετικά υψηλές θερμικές αγωγιμότητες (> 3000 W / m K), συντελεστή Young  $\approx 0,64$  TPa και την ελαστική ικανότητα να επεκτείνει περίπου 5,8% του αρχικού του μήκους πριν σπάσει. Περισσότερο ελκυστικό είναι το δυσανάλογο μεγάλο εμβαδόν επιφάνειας σε όγκο που διαθέτουν αυτά τα υλικά, γιατί αυτό επιτρέπει μεγαλύτερο δυναμικό αλληλεπιδράσεων, είτε είναι φυσικής είτε χημικής φύσης. Επίσης, θεωρείται ότι οι διαστάσεις τους είναι σχετικές με εκείνες των ατόμων και των



Εικόνα 10

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 (H<sub>2</sub>) εντός ή μεταξύ σε νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs). Η χημική απορρόφηση, σε αντίθεση, χρησιμοποιεί έναν καταλύτη για να διαχωρίσει το μοριακό υδρογόνο για να του επιτρέψει να συνδεθεί με μερικούς από τους ακόρεστους δεσμούς άνθρακα κατά μήκος του σωλήνα.

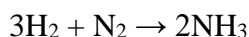
Οι μονοί νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν να συγκρατήσουν το ποσοστό υδρογόνου(σε μορφή ατομικού και μοριακού επιπέδου) κατά βάρος από 5 έως 10% ,αλλά βάση μελετών που πραγματοποιήθηκαν έχουν δείξει ότι μπορεί να φτάσει έως το 14% κατά βάρος η χωρητικότητα των νανοσωλήνων άνθρακα.

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

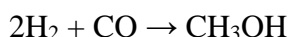
1. Μέθοδος υπό πίεση που κυμαίνεται από 71 έως 82.4 bar(πολύ μικρότερη πίεση από την μέθοδο αποθήκευσης του αερίου H<sub>2</sub>).
2. Μέθοδος κυκλικής φόρτισης και εκφόρτισης. Η αποθήκευση γίνεται μέσα και έξω από την επιφάνεια των νανοσωλήνων άνθρακα αλλά και ανάμεσα από το κενό στο εσωτερικό τους και η ικανότητα τους αυξάνεται ή μειώνεται ανάλογα με την διάμετρο τους.

## 2.6 ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Μία από τις κυριότερες χρήσεις του υδρογόνου είναι για την παρασκευή της αμμωνίας (NH<sub>3</sub>) 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 οξείδια ψευδαργύρου και του 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 εφαρμογή του υδρογόνου έχει συμβεί στην 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 και των οξειδίων και του βολφραμίου και του μολυβδαινίου αντιστοίχως σε μέταλλα. Εδώ χρησιμοποιούνται ατμόσφαιρες πλούσιες σε υδρογόνο (αναγωγικές) ούτως ώστε να βοηθήσουμε την παραγωγή μαγνησίου, την διαδικασία ανόπτησης των μετάλλων καθώς και την ψύξη των μεγάλων ηλεκτροκινητήρων.

Το υδρογόνο έχει χρησιμοποιηθεί και σαν καύσιμο πυραύλων αναμεμιγμένο με κατάλληλο οξειδωτικό μέσο (οξυγόνο ή φθόριο) και ως προωθητικό πυρηνοκίνητων πυραύλων και διαστημικών σκαφών. Στην παλαιότερη εποχή χρησιμοποιούσαν το υδρογόνο για την πλήρωση των αερόστατων, ωστόσο σήμερα το χρησιμοποιούν ακόμα και στα εργαστήρια για την παραγωγή χαμηλών θερμοκρασιών.

## 3 ΜΗΧΑΝΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ) όπως ξέρουμε είναι θερμικές μηχανές που βγάζουν μηχανικό έργο καταναλώνοντας θερμική ενέργεια η οποία έρχεται από τα υγρά καύσιμα ή αέρια καύσιμα. Το πιο σύνθετο σε εφαρμογή Μ.Ε.Κ. είναι εμβολοφόροι για οχήματα. Η εσωτερική καύση ορίζεται στον κινητήρα από τον οποίο η χημική ενέργεια του καυσίμου απελευθερώνεται στο εσωτερικό του κινητήρα και χρησιμοποιείται απευθείας για μηχανικές εργασίες, σε αντίθεση με κινητήρα εξωτερικής καύσης στον οποίο χρησιμοποιείται χωριστός, κινητήρας καύσης για την

καύση του καυσίμου. Τα πιο γνωστά συμβατικά καύσιμα είναι το πετρέλαιο για τους πετρελαιοκινητήρες (Diesel) και βενζίνη για τους βενζινοκινητήρες. Για να δημιουργηθεί 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.

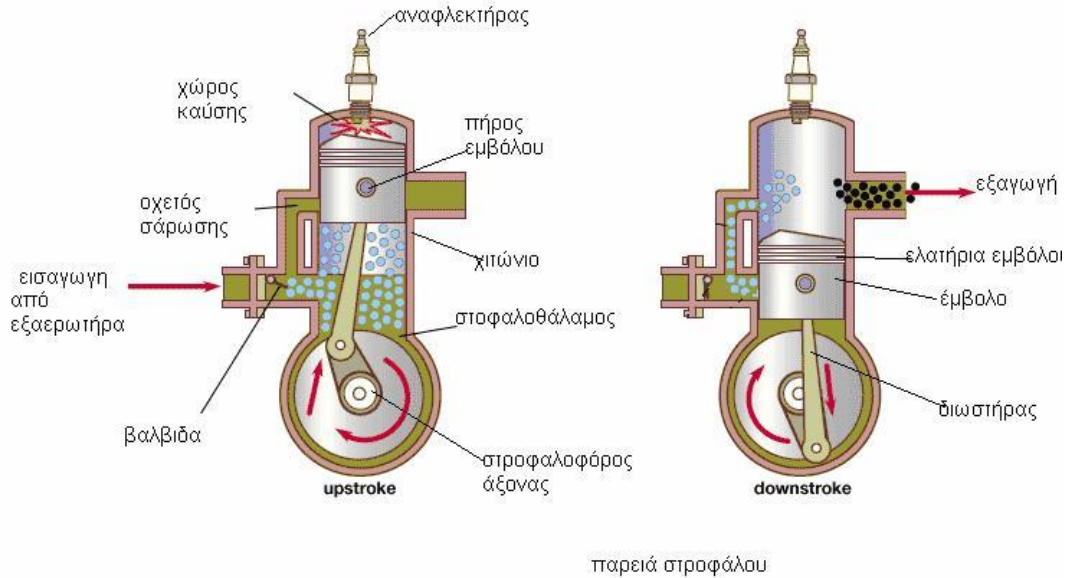
### 3.2 ΔΙΧΡΟΝΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ

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 καυσαέρια 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 έναυση του ψεκασμού και της καύσης, ενώ ταυτόχρονα περιστρέφεται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα με εκείνη της στροφαλοφόρου ατράκτου. Οι δίχρονοι κινητήρες 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.

Όσον αφορά μερικά μειονεκτήματα :

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





Εικόνα 11

### 3.3 ΤΕΤΡΑΧΡΟΝΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ

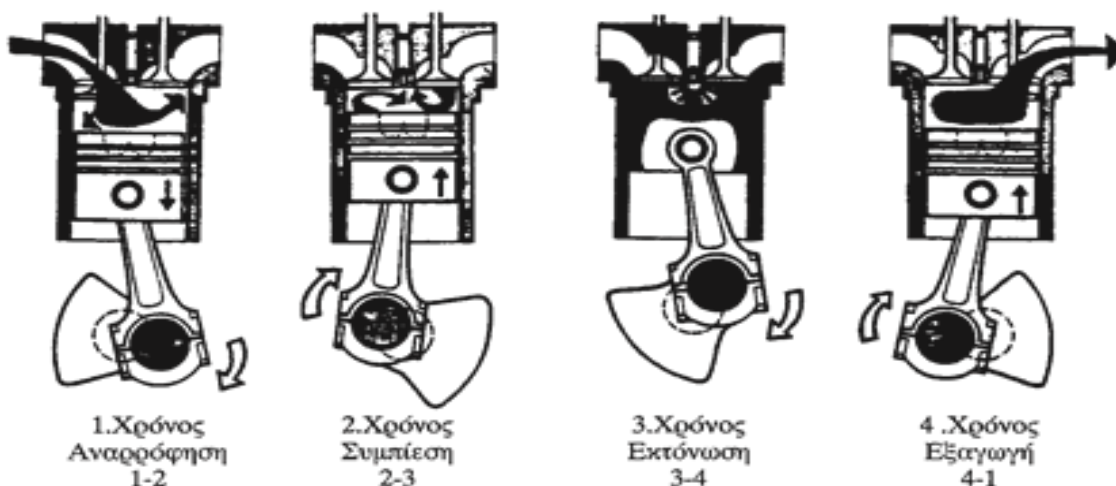
Στον τετράχρονο κινητήρα ένας κύκλος λειτουργίας του αντιστοιχεί σε δυο πλήρεις περιστροφές της στροφαλοφόρου ατράκτου ( $720^\circ$ ) κάτι το οποίο συνεπάγεται σε τέσσερις πλήρεις διαδρομές εμβόλου ή τέσσερις <<χρόνους>>. Αυτοί οι χρόνοι είναι Α) ο χρόνος αναρρόφησης στον οποίο ο κύλινδρος πληρώνεται 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  $400^\circ\text{C}$  και στην πετρελαιομηχανή περίπου 40bar και θερμοκρασία περίπου  $600^\circ\text{C}$ . Γ) ο χρόνος έργου 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  $2500^\circ\text{C}$  και η πίεση τα 60bar και στην πετρελαιομηχανή η πίεση περίπου 90bar και θερμοκρασία τους  $2000^\circ\text{C}$ . 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  $1000^\circ\text{C}$  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.

Όσον αφορά μερικά πλεονεκτήματα:

- Απλότητα λειτουργίας
- Αξιοπιστία
- Καλός βαθμός απόδοσης



Εικόνα 12

### 3.4 ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΟΤΤΟ (ΒΕΝΖΙΝΗΣ)

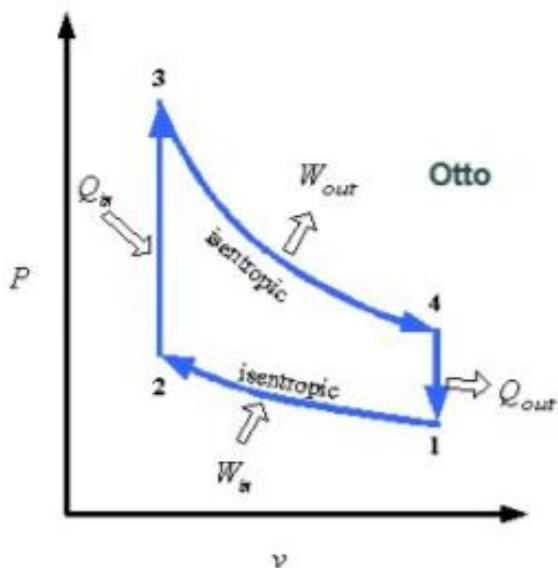
Στην εισαγωγή του 3 κεφαλαίου, υπάρχει μία περιγραφή που μας εξηγεί ότι οι μηχανές εσωτερικής καύσης κατατάσσονται σε κινητήρες Otto και σε κινητήρες Diesel, λόγω της εσωτερικής τους λειτουργίας και του πως δημιουργείται η ανάφλεξη (ένανση) του καυσίμου το οποίο μπορεί να είναι υγρό ή αέριο. Οι κινητήρες 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 ,παίρνουμε ως καύσιμο τα φυσικά ή τεχνητά αέρια, που αυτά είναι το φυσικό αέριο, το υγραέριο και το φωταέριο. Ενώ οι βενζινομηχανές χρησιμοποιούν κατά κόρον 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, έχουμε δύο τρόπους έγχυσης ,μονού σημείου ή πολλαπλών σημείων. Με αυτό τον τρόπο αυτά τα

συστήματα ονομάζονται 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 δικλείδα (πεταλούδα) όπως αναφέραμε και εκτός από αυτό ρυθμίζει την υποπίεση κατά την αναρρόφηση του κυλίνδρου.

Στο θάλαμο καύσης η στοιχειομετρική αναλογία αέρα –καύσιμου που πρέπει να έχει περίπου είναι 14,7:1, με λίγα λόγια για 14,7 μέρη αέρα αντιστοιχεί με 1 μέρους καύσιμου για την μη ατελής καύση. Σε μία άλλη περίπτωση που έχουμε καύση πτωχών μιγμάτων, η καύση όπου ο αέρας έχει μεγαλύτερο ποσοστό από την προηγούμενη περίπτωση, μεγαλώνει ο βαθμός απόδοσης και ελαττώνεται το ποσοστό απελευθέρωσης εκπομπών ρύπων αερίων. Οι κινητήρες Otto πτωχού μείγματος (ο κινητήρας του May), θέλουν την καύση πολύ πτωχών μιγμάτων, με λόγο αέρα-καυσίμου έως και 50:1, αυτό διαμορφώνεται με την άνοδο του επιπέδου της τύρβης (swirl) της γομώσεως και σαφέστερα στον θάλαμο γύρω από τη βαλβίδα εξαγωγής. Με αυτό τον τρόπο, ανάλογα πάντα με τους δύο σχεδιαστικούς παραμέτρους ελαττώνουμε τον κίνδυνο εμφάνισης κρουστικής καύσης και υποστηρίζουν έτσι τη χρήση υψηλών βαθμών συμπίεσης, όλα αυτά γίνονται για την αύξηση της απόδοσης και την οικονομία του καυσίμου της μηχανής.

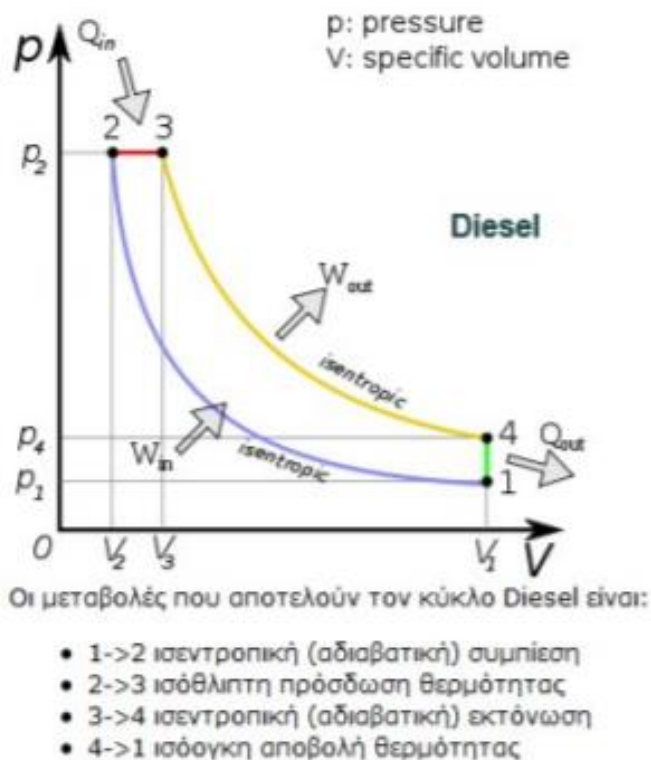
Σύγκριση κύκλος Otto με κύκλο Diesel :



Οι μεταβολές που αποτελούν τον κύκλο Otto είναι:

- 1->2 ισεντροπική (αδιαβατική) συμπίεση
- 2->3 ισόογκη πρόσδωση θερμότητας
- 3->4 ισεντροπική (αδιαβατική) εκτόνωση
- 4->1 ισόογκη αποβολή θερμότητας

Εικόνα 13



Εικόνα 14

### 3.5 ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ Diesel (ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ)

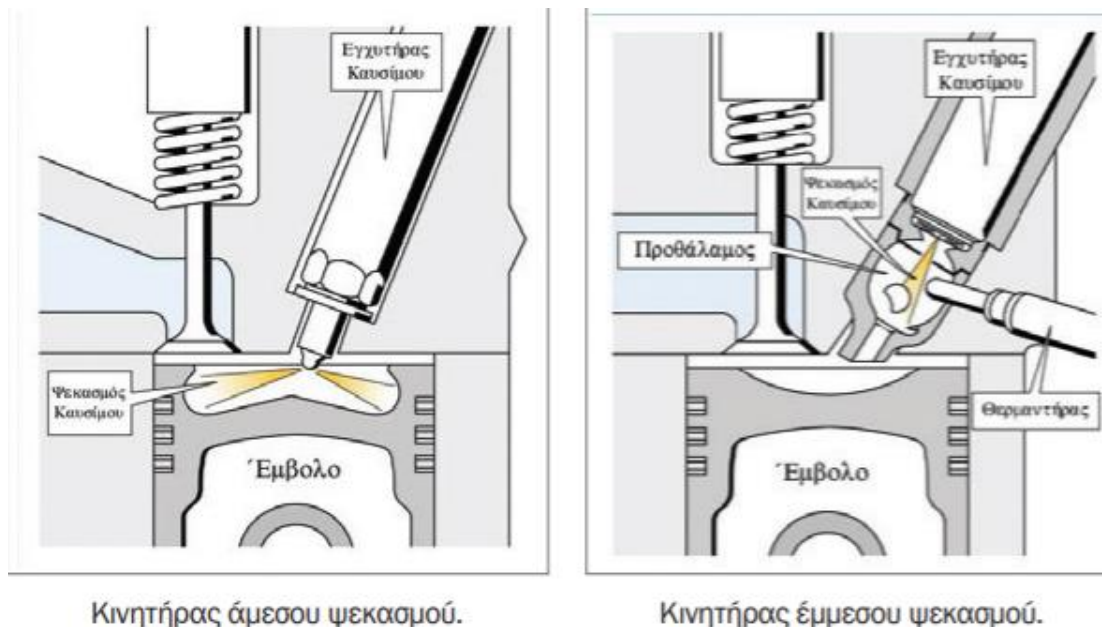
Ο κινητήρας Diesel, που πήρε το όνομά του από τον Rudolf Diesel, είναι ένας κινητήρας εσωτερικής καύσης στον οποίο η ανάφλεξη του καυσίμου προκαλείται από την αυξημένη θερμοκρασία του αέρα στον κύλινδρο λόγω της μηχανικής συμπίεσης (αδιαβατική συμπίεση). Έτσι, ο κινητήρας Diesel είναι ένας κινητήρας ανάφλεξης με συμπίεση (κινητήρας CI). Αυτό έρχεται σε αντίθεση με κινητήρες όπως οι Otto που χρησιμοποιούν ανάφλεξη με μπουζί του μείγματος αέρα-καυσίμου, (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 βαθμό που το ψεκασμένο καύσιμο ντίζελ που εγχέεται στον θάλαμο καύσης αναφλέγεται από μόνο του.

Οι κινητήρες Diesel μπορούν να σχεδιαστούν είτε δίχρονοι είτε τετράχρονοι. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν ως πιο αποτελεσματική αντικατάσταση για σταθερούς ατμούς. Από το 1910, έχουν χρησιμοποιηθεί σε υποβρύχια και πλοία. Ακολούθησε αργότερα η χρήση σε ατμομηχανές, φορτηγά, βαρύ εξοπλισμό και 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 άνηση. Αυτό ονομάζεται ετερογενές μείγμα αέρα-καυσίμου. Η ροπή που παράγει ένας πετρελαιοκινητήρας ελέγχεται με το χειρισμό της αναλογίας αέρα-καυσίμου ( $\lambda$ ). 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 την υψηλότερη θερμική απόδοση (απόδοση κινητήρα) από οποιονδήποτε πρακτικό κινητήρα εσωτερικής ή εξωτερικής καύσης, λόγω του πολύ υψηλού λόγου διαστολής και της καύσης που δημιουργείται από το καύσιμο απότομα επειδή έχουμε μεγάλη πίεση στον θάλαμο καύσης, επιτρέπει την απαγωγή θερμότητας από τον αέρα. Αποφεύγεται επίσης μια μικρή απώλεια απόδοσης σε σύγκριση με τους βενζινοκινητήρες χωρίς άμεσο ψεκασμό, καθώς δεν υπάρχει καύσιμο κατά την επικάλυψη της βαλβίδας και συνεπώς κανένα καύσιμο δεν πηγαίνει απευθείας από την εισαγωγή προς στην εξαγωγή της εξάτμισης. Οι κινητήρες Diesel χαμηλής ταχύτητας (όπως χρησιμοποιούνται σε πλοία και άλλες εφαρμογές όπου το συνολικό βάρος του κινητήρα είναι σχετικά ασήμαντο) μπορούν να επιτύχουν αποτελεσματικές αποδόσεις 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 Diesel καθώς ο ατμός φτάνει τη θερμοκρασία ανάφλεξης και προκαλεί απότομη αύξηση της πίεσης πάνω από το έμβολο (δεν φαίνεται στο διάγραμμα δείκτη P-V). Όταν ολοκληρωθεί η καύση, τα αέρια καύσης εκτείνονται 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 βαλβίδας πεταλούδας σημαίνει ότι οι απώλειες ανταλλαγής 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 υποστηρίζεται 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 χρόνο που χρειάζεται .

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 μα δείχνει πως εισάγεται το καύσιμο σε μορφή σταγονιδίων από το ακροφύσιο και στις δύο



Εικόνα 15

διατάξεις

Στους πετρελαιοκινητήρες άμεσου ψεκασμού το καύσιμο το ρίχνουμε απευθείας στην πάνω μεριά του εμβόλου του ενιαίου θαλάμου καύσεως και μέχρι το κάτω μέρος της κεφαλής του κυλίνδρου. Ενώ στους πετρελαιοκινητήρες έμμεσου ψεκασμού το καύσιμο ρίχνεται σε ένα θάλαμο για να αναμιχθεί το πετρέλαιο με τον αέρα και μετά προχωρά προς το θάλαμο καύσης μέσω πολύ μικρών οπών οι οποίοι 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 πιέσεις με εύρος 1000- 1800bar. Εν αντιθέσει του 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.

## 4 ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΤΙΣ ΜΕΚ

### 4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ

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 ότι είναι άοσμο, άγευστο, άχρωμο και μη τοξικό, μπορεί παράγει καθαρή ενέργεια και υδρατμούς (μέσω της καύσης του οξυγόνου του αέρα) ως αποτέλεσμα 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 άσκοπη λειτουργία. Κανονικά οι ρύποι που θα έπρεπε να εκπέμπονται από μια MEK 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 ( $\text{NO}_x$ ). Οι απαραίτητες συνθήκες (που χρειάζονται για την παραγωγή οξειδίων του αζώτου στα παράγωγα της καύσης) δημιουργούνται λόγω της ύπαρξης του αζώτου και του υδρογόνου 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 ( $25^\circ\text{C}$ ), 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-καύσιμου, 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 εκκένωσή του, 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 πιστονιού στο ΑΝΣ καθώς και στην προγραμματισμένη ανάφλεξη του σπινθηριστή, μας οδηγεί στο φαινόμενο της προανάφλεξης. Πρέπει να αναφερθεί ότι οι θερμοκρασίες στις MEK 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.

#### 4.2 ΘΕΤΙΚΑ ΚΑΙ ΑΡΝΗΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΩΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΦΟΡΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

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 αλλού (και αποθηκεύεται μακριά στην μπαταρία του αυτοκινήτου), τα αυτοκίνητα υδρογόνου παράγουν τη δική τους ηλεκτρική ενέργεια από ένα κατάστημα 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). Αυτή η προσέγγιση για το υβριδικό σύστημα επηρεάζει θετικά ή αρνητικά τα αυτοκίνητα υδρογόνου; Είναι η χρήση υδρογόνου ως πηγή καυσίμου (η οποία μπορεί να είναι εξαιρετικά εύφλεκτη) μια συμφέρουσα λύση;

Τα θετικά του υδρογόνου είναι τα ακόλουθα:

1. Η διαδικασία του υδρογόνο-κίνησης που μετατρέπει το υδρογόνο σε ηλεκτρική ενέργεια (μέσω των κυψελών καυσίμου)-παράγει μηδενικές επιβλαβείς εκπομπές του οχήματος, μόνο από το νερό ως καύσιμο. 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 εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα με αποτέλεσμα να έχουμε περισσότερες εκπομπές CO<sub>2</sub> που παρήγαγαν τότε τα εργοστάσια στην Αμερική. Έτσι, τα αυτοκίνητα υδρογόνου θα μπορούσαν να είναι ευεργετικά για να βοηθήσουν στην μείωση των εκπομπών. Αλλά αυτό για να επιτευχθεί πρέπει 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 παραδοσιακό αυτοκίνητο. Αυτό ενισχύεται από το γεγονός ότι οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου είναι 40% έως 60% αποδοτικές (κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας), σε σύγκριση με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης που είναι 30% έως 35% αποδοτικοί.
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 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 χρειάζεται κατά τη καύση είναι τέτοια που σε σχέση με άλλα καύσιμα είναι αμελητέα και μη ικανή να δημιουργήσει κάποια κλιματολογική αλλαγή δεδομένης ακόμα και με μαζική χρήση του.

Το υδρογόνο έχει την υψηλότερη ενεργειακή περιεκτικότητα ανά μονάδα βάρους από οποιοδήποτε γνωστό καύσιμο, 120,7 kJ / kg (θερμογόνος αξία), περίπου τρεις φορές από αυτό 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 καυσίμων μας είναι απλά μια δεξαμενή νερού. Έτσι το υδρογόνο είναι το λιγότερο εύφλεκτο λόγω έλλειψης αέρα με θερμοκρασία ανάφλεξης 585 ° C (230 ° 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 των υπόλοιπων συμβατικών πηγών ενέργειας είναι τα ακόλουθα:

1. Η τιμή αγοράς ενός αυτοκίνητο που έχει ως καύσιμο το υδρογόνο είναι αρκετά υψηλότερη η τιμή του 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 για την τιμή στο ανάλογο κατάστημα ανεφοδιασμού για κάθε τύπο καυσίμου.
2. Η αποθήκευση του υδρογόνου είναι πολύ δαπανηρή διότι χρειάζεται συγκεκριμένες συνθήκες για να αποθηκευτεί χωρίς να 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 αυξημένης πίεσης που δημιουργείτε στην 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. Οι δύο πιο διαδεδομένοι μέθοδοι είναι από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και από το φυσικό αέριο , σαν αποτέλεσμα ότι ακόμα γίνεται προσπάθεια για μείωση του κόστους της μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας, από

τις δύο μεθόδους που αναφέραμε, έτσι ώστε να έχουμε καλύτερη αντιμετώπιση του προβλήματος.

5. Σε σχέση με άλλα καύσιμα είναι πιο ακίνδυνο αλλά σε λίγες 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 εκατό τις εκατό αξιόπιστη, 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  $-253^{\circ}\text{C}$  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.

#### 4.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ 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.

##### 4.3.1 ΕΥΡΥ ΦΑΣΜΑ ΑΝΑΦΛΕΞΙΜΟΤΗΤΑΣ

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 όσων 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 ισχύς του κινητήρα. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μείωσης της ογκομετρικής <<θερμικής δύναμης>> του μίγματος.

#### 4.3.2 ΧΑΜΗΛΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ

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.

#### 4.3.3 ΥΨΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ

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  $T_1$ , και η δεύτερη όταν φεύγει από τον θάλαμο καύσης, σε  $T_2$  ( $T_1 < T_2$ ). 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) φλέγεται από μόνο του.

#### 4.3.4 ΜΕΓΑΛΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΑΥΣΗΣ

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 καύση 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 συντελεστή απόδοσης. Η καύση φτωχών μιγμάτων όπως αναφέραμε, μας παρέχει λιγότερη κατανάλωση, καθώς και την σταθερή θερμοκρασία εξόδου του στο θαλάμου 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, με την ίδια χωρητικότητα. Επιπλέον όταν έχουμε ακαριαία απαγωγή της ενέργειας και ο κενός πολύ γρήγορος χρόνος στην καύση στον κινητήρα, 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 επαρκής λειτουργία του κινητήρα ακόμη και σε υψηλές στροφές περιστροφής.

#### 4.3.5 ΧΑΜΗΛΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΥΨΗΛΗ ΚΑΤΑ ΜΑΖΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΥΣΗΣ

Σύμφωνα με τον πίνακα 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 κρυογονικό υγρό και 3] ως υδρίδιο μετάλλου.

#### 4.3.6 ΥΨΗΛΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ

Ο υψηλός συντελεστής διάχυσης είναι μια ικανότητα περιγραφής της διάχυσης του καυσίμου στον αέρα, αποτελεσματικότερα από την βενζίνη, 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 ,αν τυχόν έχουμε διαρροή, λόγω της μεγάλης ταχύτητας κατά την διάχυση και την διαφυγή του υδρογόνου στο περιβάλλον.

#### 4.3.7 ΜΙΚΡΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΣΒΗΣΙΜΑΤΟΣ-ΕΞΑΛΕΙΨΗ ΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ

Το χαρακτηριστικό αυτό της καύσης ,αναλύει το διάστημα από τα τοιχώματα του κυλίνδρου που 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 από πολλές εισαγωγές στον χρόνο που μπαίνει στον κύλινδρο (backfire).

#### 4.4 ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΚΑΥΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΡΥΠΟΥΣ ΤΩΝ ΜΕΚ BENZINΗΣ

Οι ορυκτοί υδρογονάνθρακες προσφέρουν πάνω από το 90% για όλη την ενέργεια 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 μπορέσουμε να καλύψουμε την ζήτηση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί στο περιβάλλον το

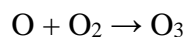
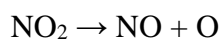
ποσοστό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ,άρα το ποσοστό των εκπομπών που θα έχουμε δημιουργήσει θα έχει πιο μεγάλη περιβαλλοντική διάσταση για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Το διοξείδιο του άνθρακα παράγεται από τα οχήματα που χρησιμοποιούν κατά κόρον οι άνθρωποι στις μέρες μας για τις μετακινήσεις 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. Εάν το μονοξείδιο του άνθρακα επειδή είναι τοξικό αέριο (προϋπόθεση μικρή συγκέντρωση) και δημιουργεί στο κεντρικό νευρικό σύστημα του κάθε ανθρώπου σοβαρές βλάβες, πραγματοποιηθεί σε πιο μεγάλη συγκέντρωση μπορεί να φτάσει και σε 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, που είναι το βενζόλιο ,το οποίο όπως είπαμε προέρχονται από τα αυτοκίνητα.

Έχοντας ως γνώση τις επιπτώσεις που αναφέραμε πιο πάνω η εύρεση νέου καυσίμου το οποίο θα είναι καθαρό 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, την παρουσία των μορίων του άνθρακα με αποτέλεσμα από την καύση του υδρογόνου να δημιουργείται μόνο υδρατμοί και οξείδια του αζώτου. Ένα από τα κοινά που έχουν τα δύο καύσιμα κατά την καύση, είναι 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 (NO<sub>2</sub>). Όλες οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) 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, και 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 για την ψύξη ,την μείωση της τριβής, την στεγανοποίηση και στην μη οξείδωση της μηχανής , στην οποία μια πολύ μικρή ποσότητα λιπαντικού φτάνει στον θάλαμο καύσης και καίγεται αλλά επειδή δεν είναι μεγάλη η ποσότητα δεν το θεωρούμε σημαντικό πρόβλημα.

#### 4.4.1 ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (NO<sub>x</sub>)

Σύμφωνα με νεότερες έρευνες, έχουμε παρατηρήσει ότι το κύριο συστατικό του φωτοχημικού νέφους είναι το όζον (O<sub>3</sub>), 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 εξής των 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 παρασκευής 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 υπερϊώδης 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, 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 (όξινο χαρακτήρα), δηλαδή υψηλή περιεκτικότητα σε θειικό οξύ (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) και σε νιτρικό οξύ (HNO<sub>3</sub>).

#### 4.4.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΑΠΟΤΡΕΠΟΥΝ ΤΟΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ NO<sub>x</sub>

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. Τέτοιοι 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 την δημιουργία των οξειδίων του αζώτου. Υπολογίζεται ότι ο Φ παίρνει τιμές από 0,5 έως 1,1 (0,5 < Φ < 1,1)
3. Ο χρόνος έγχυσης, ο οποίος ρυθμίζεται με βάση την καλύτερη απόδοση και την μικρότερη ρύπανση
4. Η προπορεία της ανάφλεξης, όπου στις ΜΕΚ υδρογόνου έχουμε μικρότερη προπορεία από ότι στις ΜΕΚ 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.

#### 4.4.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΙΩΣΗΣ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΩΝ NO<sub>x</sub>

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<sub>x</sub>. 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 μας δείχνει ένα τρόπο μείωσης των NO<sub>x</sub>, όμως ο ψεκασμός νερού σε υγρή φάση έχει αποδείξει πως έχει την δυνατότητα να ελαττώσει κατά πολύ τις θερμοκρασίες στο θάλαμο καύσης όταν η απαραίτητη θερμότητα για την ατμοποίηση του νερού βγαίνει από την θερμογόνο δύναμη του μίγματος. 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 το 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, για πτωχά μείγματα υδρογόνου και αέρα, για την ελάττωση των εκπομπών NO<sub>x</sub>. Ενώ σε πλούσια μείγματα ο μηχανισμός αυτό είναι μη κερδοφόρος. Έτσι χάρις στα πειράματα γνωρίζουμε λόγο

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 ,που χρησιμοποιούμε τον ίδιο μηχανισμό για τη αποφυγή εκπομπών  $\text{NO}_x$  ,έχουμε ποσοστό ανακύκλωσης των καυσαερίων σε ένα εύρος ανάμεσα από 15 έως 30%

#### 4.4.4 ΥΠΕΡΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΙΣ ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Εκτός από τα οξείδια του αζώτου ένας άλλος ρύπος των μηχανών εσωτερικής καύσης είναι η χημική ένωση το υπεροξείδιο του υδρογόνου ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) και βρίσκεται στην έξοδο του κινητήρα. Ενώ το υπεροξείδιο δεν συμπεριλαμβάνεται πάντα ως ένα ρύπος των μηχανών υδρογόνου στην βιβλιογραφία δεν πρέπει να των υποτιμούμε . Ο ρύπος αποσυντίθεται και δημιουργεί ρίζες υδροξυλίου που είναι η κύρια η αιτία που οδηγεί στον σχηματισμό της φωτοχημικής ομίχλης. Γνωρίζοντας από πειραματικές μετρήσεις ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου αέρα είναι  $\phi > 0,5$  ενώ στην έξοδο η συγκέντρωση του υπεροξειδίου του υδρογόνου είναι πρακτικά μηδέν αντίθετα για  $\phi > 0,5$  ο ρύπος αυτός ήταν ανιχνεύσιμος , με τα επίπεδα συγκέντρωσης να είναι αντίστροφος ανάλογα με τον λόγο ισοδυναμίας. Οι υψηλές συγκεντρώσεις υπεροξειδίου στην έξοδο, και σε προϋπόθεση με τα σε χαμηλό λόγο  $\phi$ , μπορούν να παράγονται από τις αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στον θάλαμο καύσης. Το συμπέρασμα που πρέπει να ξέρουμε στο μέλλον είναι, εάν οι συγκεντρώσεις υπεροξειδίου του υδρογόνου είναι δυνατόν να θέσουν σε μεγάλο κίνδυνο το περιβάλλον. Αν αποδειχθεί πως θα υπάρχει κίνδυνος για το περιβάλλον θα πρέπει αναγκαστικά να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο καταλυτικού ή θερμικού μετατροπέα για την αποσύνθεση του υπεροξειδίου του υδρογόνου ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) σε υδρογόνο ( $\text{H}_2$ ) και οξυγόνο ( $\text{O}_2$ ).

#### 4.5 ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΑΝΩΜΑΛΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΣΤΙΣ ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Οι ιδιότητες της καύσης του υδρογόνου όπως προαναφέραμε, είναι αρκετά σημαντικές για να δούμε τι μπορεί να οφείλει ως καύσιμο στις μηχανές εσωτερικής καύσης. Στις ΜΕΚ βενζίνης έχουμε κάποια φαινόμενα ανώμαλης καύσης, όπως 1] την προανάφλεξη 2]την κρουστική καύση και την 3] ανάφλεξη του μίγματος στην πολλαπλή εισαγωγή, 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.

##### 4.5.1 ΑΝΑΦΛΕΞΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ

Η ανάφλεξη υφίσταται σε οποιαδήποτε μηχανή εσωτερικής καύσης στην οποία η ανάμιξη του καυσίμου γίνεται πριν την τοποθέτησή του στον θάλαμο καύσης και οφείλεται στην ανάφλεξη του μίγματος αέρα-καυσίμου ,μέσω μιας πηγής με υψηλό θερμικό φορτίο, στον χρόνο εισαγωγής όταν η βαλβίδα εισαγωγής είναι ανοιχτή με αποτέλεσμα το μίγμα να εκρήγνυται. Όσον αφορά τις ΜΕΚ υδρογόνου, όπου η ανάμιξη γίνεται με την βοήθεια ενός εξαεριοτή (καρμπυρατέρ) , το φαινόμενο της ανάφλεξης αποτέλεσε ένα φράγμα στην διαδικασία εξερεύνησής τους επειδή εμφανιζόταν πολλές



φορές μέσα σε ένα χρονικό διάστημα ,πράγμα το οποίο ήταν δύσκολο να επιλυθεί, και επειδή η ανίχνευση της αιτίας που το προκάλεσαν ήταν αρκετά δύσκολη.

#### 4.5.2 ΛΟΓΟΙ ΠΡΟΚΛΗΣΗΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΣΤΗΝ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κάποιες αιτίες για τις οποίες προκαλείται ανάφλεξη είναι οι εξής:

1. Τα υπέρθερμα σημεία στον θάλαμο καύσης ,που 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, λόγω της χαμηλής ενέργειας ανάφλεξης αλλά και του μεγάλου εύρους αναφλεξιμότητας του υδρογόνου. Αυτή ενεργοποιείται μέσω των υπέρθερμων σημείων του θαλάμου καύσης και οδηγεί σε πρόωρη καύση του μίγματος στην συμπίεση 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 εισαγωγή. Αυτός ο μηχανισμός της έκρηξης προκαλείται από κρουστικές καύσεις ,οδηγώντας σε αύξηση της θερμοκρασίας στον θάλαμο και σε 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.

#### 4.5.3 ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ

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 εισαγωγή. Η πιο αξιόπιστη μέθοδος είναι η έγχυση του καυσίμου στον αυλό της εισαγωγής, αλλεπάλληλα σε κάθε κύλινδρο, στο άνοιγμα της βαλβίδας εισαγωγής και αυτή ονομάζεται PFI (Port fuel injection). Με αυτόν τον τρόπο καταφέρνουμε να μειώσουμε κατά πολύ την πιθανότητα ανάφλεξης ,αλλά παρόλο όμως την σωστή εκτέλεση της μεθόδου υπάρχει πάντα μία μικρή πιθανότητα ανάφλεξης. Ενώ στους Diesel κινητήρες αυτή η μέθοδος ,του άμεσου ψεκασμού του καυσίμου απευθείας στο θάλαμο καύσης και σε υψηλές πιέσεις έγχυσης καυσίμου, καταφέρει να μην δημιουργεί ανάφλεξη στην εισαγωγή, εφόσον όμως θα έχουμε μίγμα καυσίμου αέρα που να φτιάχεται 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 FPI (Direct Injection ή Fuel Stratified Injection). Ένα αρνητικό που έχουν αυτά τα συστήματα του άμεσου ψεκασμού, είναι η πολυπλοκότητα και ότι είναι δαπανηρά, και για αυτό τον λόγο όταν πραγματοποιήθηκε στους υπάρχων 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 αυτή η μέθοδος σε σχέση με άλλα συστήματα ανάφλεξης. Βέβαια, η εκμετάλλευση της δίχως προβλήματα αξιοπιστίας και ρύπων πραγματοποιήθηκε την δεκαετία που διανύουμε ακόμη και για τους κινητήρες βενζίνης. Με αποτέλεσμα η ανάγκη για μείωση του κόστους αλλά και για τον πιο άκοπο έλεγχο των ρυθμίσεων του κινητήρα, προέτρεψε στην επιλογή των συστημάτων έγχυσης του μίγματος στην πολλαπλή εισαγωγής (PFI), σε μεγαλύτερο ποσοστό 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 και δίχως προβλήματα, 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 αγωγίμα υλικά όπως είναι το αλουμίνιο. Αυτοί οι μέθοδοι βοηθούν στην μείωση της ταχύτητας καύσης έτσι ώστε να αυξήσουν το συγκεκριμένο ποσό

ενέργειας ανάφλεξης. Άλλη τροποποίηση που μπορεί να δημιουργήσει συνθήκες μικρότερης ταχύτητας καύσης και μεγαλύτερη ενέργεια ανάφλεξης καταφέρνει να εξασφαλίσει τρόπο αποφυγής της πυρανάφλεξης στον κινητήρα.

Ακόμα, ο σχεδιασμός των επιμέρους τμημάτων της μηχανής μπορεί να χειροτερέψει ή να επιλύσει το πρόβλημα της ανάφλεξης στην πολλαπλή εισαγωγή. Έτσι, κατά τ Για αυτό το λόγο χρειάζεται προσοχή στην κατασκευή του κινητήρα για να μην έχουμε ανεπιθύμητη ανάφλεξη, αποφεύγοντας τις γωνίες ,τις εσοχές και τις ακμές μεγάλης κλίσης στον κινητήρα αλλά και λειώνοντας 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 προβλημάτων προσπαθούμε να περιορίσουμε με όσο τον δυνατόν μικρότερη ανοχή μεταξύ ελατηρίων και τοιχωμάτων του θαλάμου καύσης. Τέλος μία διαφορά που υπάρχει μεταξύ των ΜΕΚ είναι ότι οι κινητήρες βενζίνης χρησιμοποιούν σπινθηριστές ενώ οι κινητήρες υδρογόνου ,αφού δεν είναι κατασκευασμένοι να αποβάλλουν το υψηλό θερμικό φορτίο στις συνθήκες μεγάλων θερμοκρασιών που υπάρχουν στο θάλαμο καύσης της μηχανής υδρογόνου, είναι μέρος ενός συνόλου της βασικής θερμικής πηγής πυρανάφλεξης.

#### 4.5.4 ΠΡΟΑΝΑΦΛΕΞΗ

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό που έχει την δικιά του βαρύτητα στην ανώμαλη καύση στους κινητήρες του υδρογόνου, και προσδιορίζει σε αρκετά μεγάλο βαθμό τις συνθήκες λειτουργίας τους και τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού τους, είναι η προανάφλεξη. Η προανάφλεξη υπάρχει και στους κινητήρες βενζίνης, ονομάζεται ως η πρωθύστερη ανάφλεξη του μίγματος στην φάση της συμπίεσης, πριν την ηλεκτρική εκκένωση του σπινθήρα. Ο οποίος προέρχεται από πυρανάφλεξη και η αιτία είναι οι εστίες υψηλού θερμικού φορτίου. 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 προκαλούνται από την πυρόλυση του λιπαντικού. Καθώς και από άλλα υπέρθερμα σημεία που προέρχονται από τα ηλεκτρόδια των μπουζί. 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 δημιουργία του θερμικού φορτίου του καυσίμου, όταν πραγματοποιείτε 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 ισούται 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.

Με αποτέλεσμα, η βελτιστοποίηση της ψύξης των επιφανειών στον κινητήρα να μπορεί να προκαλέσει πυρανάφλεξη. 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 σπινθήρων στο κινητήρα έτσι ώστε να αποβάλουν το θερμικό τους φορτίο, και ο σχεδιασμός 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. Έτσι ώστε να 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, το μεταβλητό χρονισμό 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

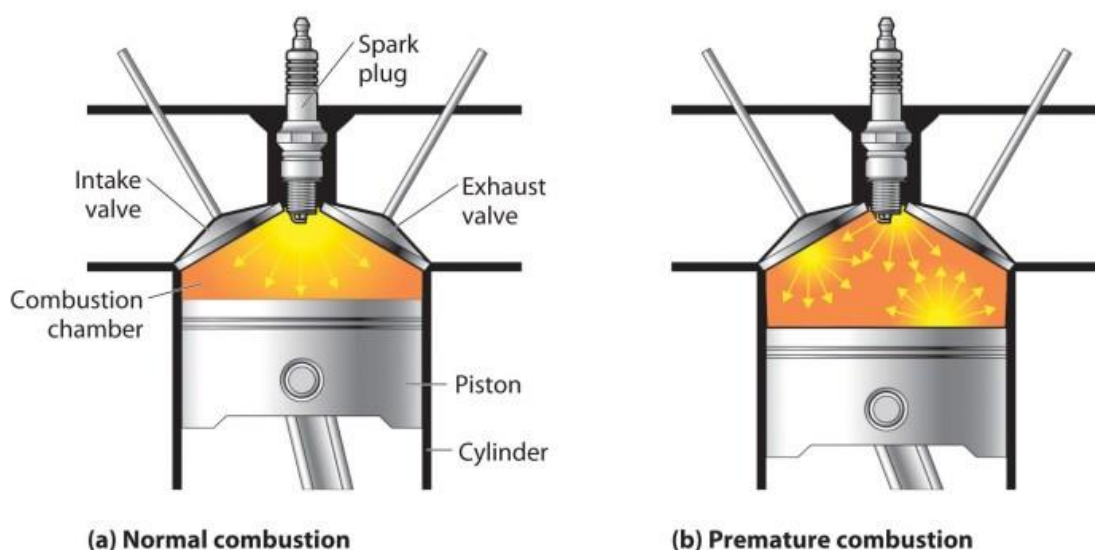
#### 4.5.5 ΑΥΤΟΑΝΑΦΛΕΞΗ

Η αυτανάφλεξη είναι μια ειδική περίπτωση απότομης ανάφλεξης καυσίμου 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 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 αναλογίες συμπίεσης 15,3:1, στους κινητήρες με υδρογόνο δεν παρατηρήθηκαν.

#### 4.5.6 ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ ΚΑΥΣΗ

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, πράγμα 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 έτσι ώστε να λειτουργεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες ,από εκείνες του βενζινοκινητήρα, δίχως παρουσία κρουστικής ανάφλεξης.



Εικόνα 16

#### 4.5.7 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΚΑΥΣΗΣ

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 προβλεπτικό μοντέλο προσομοίωσης:

$$FSR = A \cdot Re^B$$

Τα  $A$  και  $B$  βρίσκονται εμπειρικά από σταθερές βαθμονόμησης και  $Re$  ένας αριθμός Reynolds που στηρίζεται στη διάμετρο του κυλίνδρου, τη μέση ταχύτητα του εμβόλου και τις ιδιότητες του καμένου αερίου. Όμως κατά 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 αργοπορήσεις στην ανάφλεξη, διότι κατά την χρονική στιγμή του αρχικού σταδίου της καύσης, στην 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 χημικό κινητικό σχήμα. Προτείνουν ένα κριτήριο χτυπήματος, συγκρίνοντας την ενέργεια που απελευθερώνεται από 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 στοιχειομετρική λειτουργία είναι αδύνατη χωρίς την εμφάνιση χτυπήματος.

Οι Liu et al. χρησιμοποίησαν έναν υπολογισμό CFD της δυναμικής του αερίου σε ένα λιμένα για να εξηγήσει την εξάρτηση της εμφάνισης πυρκαγιάς στον χρόνο έγχυσης. Αν και το μοντέλο επικυρώνεται μόνο εν μέρει, ισχύ της παραγωγής των κινητήρων του υδρογόνου ενός βέλτιστου συγχρονισμού. Αν η έγχυση γίνει πολύ νωρίς θα πραγματοποιηθεί αναρροή υδρογόνου (αναρροή είναι η διάσπαση χημικών στοιχείων) από τον κύλινδρο στη θύρα εισαγωγής, στο τέλος της διαδρομής. Αν η έγχυση διαλύματος γίνει πολύ αργά, θα έχουμε ως αποτέλεσμα το υδρογόνο να παραμένει στη θύρα εισαγωγής λόγω ανεπαρκούς χρόνου έως ότου φθάσει στον κύλινδρο. Έτσι, και στις δύο περιπτώσεις, το υδρογόνο υπάρχει στη θύρα εισαγωγής από τη στιγμή που η βαλβίδα εισαγωγής ανοίγει για τον επόμενο κύκλο. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε πυρκαγιά 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 εγχυόμενο υδρογόνο να ταξιδέψει στον κύλινδρο πριν από το κλείσιμο της βαλβίδας εισαγωγής (η οποία έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά).

#### 4.5.8 ΑΠΟΦΥΓΗ ΜΗ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΥΣΗΣ

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 γκαζιού. 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 στην 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 προς την συνάρτηση των στροφών του κινητήρα με ελάχιστο 0,48 ( $\lambda=2.1$ ) στις 6000 RPM. Ενώ αποτελεσματικά αποφεύγουμε 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).

#### 4.6 ΤΡΟΠΟΙ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΙΓΜΑΤΟΣ

Σε έρευνες πάνω στις ΜΕΚ υδρογόνου χρησιμοποιήθηκαν αρκετές μέθοδοι δημιουργίας μίγματος αέρα-καυσίμου, με σκοπό την βελτιστοποίηση της απόδοσης. 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 εκείνη της ομαλής λειτουργίας, η οποία επιτυγχάνεται εάν δεν πραγματοποιηθεί ανάφλεξη στην εισαγωγή. Φυσικά δεν υπάρχει κάποια μέθοδος, για την ώρα, η οποία θα εξυπηρετεί 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.

##### 4.6.1 ΕΞΑΕΡΩΤΗΣ

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 τοποθετείται στην μηχανή με στόχο την δημιουργία ισχύος, η οποία θα μας προσφέρει κάποιες συνθήκες λειτουργίας όπως ψυχρό ξεκίνημα κατά την

διάρκεια του χειμώνα. Επιπλέον έχει ρυθμιστή παροχής καυσίμου για την ρύθμιση ισχύος του μίγματος.

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

#### 4.6.2 ΕΓΧΥΣΗ ΣΤΗΝ ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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 απενεργοποιήσει πιθανά σημεία προανάφλεξης και 2] την αραιώση υπέρθερμων αερίων ,που είχαν μείνει από προηγούμενες καύσεις, τα οποία αποτελούν αιτία προανάφλεξης. Βέβαια υπάρχει πιθανότητα ανάφλεξης στην εισαγωγή όμως η ζημιά που θα προκληθεί θα είναι μικρότερη από την περίπτωση χρήσης καρμπυρατέρ.

#### 4.6.3 ΑΜΕΣΗ ΕΓΧΥΣΗ

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 καυσίμου που δημιουργείται στην εισαγωγή στον θάλαμο καύσης εκμηδενίζεται, με την επιλογή της άμεσης έγχυσης του καυσίμου κατευθείαν στον θάλαμο καύσης. Η μέθοδος είναι 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 χορηγείται 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 εγχύεται στον κινητήρα θα πρέπει να ξεπερνά την πίεση των 110 bar πετυχαίνοντας μία διαφοροποίηση, γιατί στην αντίστοιχη μέθοδο PFI η πίεση του καυσίμου στον κινητήρα είναι έως και 30 φορές μικρότερη, με αποτέλεσμα η αποθήκευση του υδρογόνου να είναι υπό μορφή κρυογονικού υγρού ή αποθήκευσης σε υδρίδια μετάλλων.
- Η μη πραγματοποίηση της προανάφλεξης μπορεί να γίνει μόνο στην περίπτωση που το υδρογόνο εγχύεται 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 που αναφέραμε για την εφαρμογή αυτών των κοστοβόρων λύσεων, καθώς και με την δυσκολία με την οποία γίνεται έγχυση να γίνεται η έγχυση υδρογόνου μέσα στο θάλαμο καύσης ,υπό υψηλές πιέσεις που υπάρχουν στο εσωτερικό του, κατά την είναι εφικτή η επίτευξη της μέγιστης απόδοσης αλλά και της όσο το δυνατόν ομαλότερης λειτουργίας της μηχανής χωρίς να υπάρχουν κατά συνέπεια ανώμαλη καύση. Με λίγα λόγια με την άμεση έγχυση μπορούμε να πετύχουμε την μέγιστη ισχύς 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, που Όπου παρατηρείται η δημιουργία μίγματος εκτός του θαλάμου καύσης, έχουμε μείωση κατά 17% συγκριτικά με τις μηχανές βενζίνης.

#### 4.6.4 ΕΓΧΥΣΗ ΣΤΗΝ ΘΥΡΙΔΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ

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 να 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 την εισαγωγή του στον θάλαμο καύσης, είναι μειωμένη κατά 18% σε σχέση με την αντίστοιχη μηχανή βενζίνης.

#### 4.7 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Στις ΜΕΚ υδρογόνου ,για να λειτουργούν με υψηλή απόδοση και με ομαλή καύση, υπάρχουν μερικά χαρακτηριστικά λειτουργίας αλλά και σχεδιασμού τα οποία διαφέρουν από εκείνες των ΜΕΚ βενζίνης. Αυτές οι αλλαγές οφείλονται στις διαφορετικές ιδιότητες καύσης που έχει το υδρογόνο. Μερικές από αυτές αναφέρονται παρακάτω.

#### 4.7.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

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 εισαγωγή. 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<sub>x</sub>.

Η απευθείας έγχυση, έτσι ώστε να ‘πετύχουμε’ την 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 κρυογονικού υγρού.

#### 4.7.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΚΑΙ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΕΣ

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 εκείνων 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.

#### 4.7.3 ΛΙΠΑΝΣΗ ΤΩΝ ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Για την λίπανση των ΜΕΚ υδρογόνου θα πρέπει να προσέχουμε τα εξής:

- Τα λιπαντικά έλαια που χρησιμοποιούνται στις ΜΕΚ βενζίνης δεν θα χρησιμοποιηθούν στις ΜΕΚ 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 με μεγάλες στροφές θα χρησιμοποιήσουμε είτε 1] λιπαντικό υψηλής συγκέντρωσης απογαλακτωματοποίησης, δηλαδή πιο γρήγορης αποσύνδεσης του νερού από το λάδι, είτε 2] συνθετικό λάδι το οποίο παρουσία νερού και υδρατμών δημιουργεί μίγμα με περισσότερες 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 εναντιώνεται 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 πυρανόφλεξης.

#### 4.7.4 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΨΥΞΗΣ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ

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 ψυχόμενες από νάτριο και με την χρήση ψυκτικού σε περιοχές με υψηλές θερμικές ενέργειες, 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 ΜΕΚ βενζίνης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις ΜΕΚ υδρογόνου αφού είναι ανεξάρτητη των υψηλών τιμών πίεσης και ροπών.

#### 4.7.5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ

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 ημισφαιρίου. Πρέπει όμως να αποφευχθούν απότομες εσοχές και ακμές καθώς επίσης και περιοχές όπου δημιουργούνται υπέρθερμα σημεία και περιοχές που καθιζάνει το λιπαντικό, γιατί προκαλούν 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.

#### 4.7.6 ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

Λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας στην οποία το υδρογόνο μπορεί να αυταναφλέγεται, οι ΜΕΚ υδρογόνου έχουν εφαρμογή κάτω από υψηλό βαθμό συμπίεσης ο οποίος είναι μεγαλύτερος από των ΜΕΚ 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 επιτυγχάνεται 1] μεγαλύτερη απόδοση και 2] μεγαλύτερη ισχύς, και διαφέρει μεταξύ τους για μέγιστες τιμές.

#### 4.7.7 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

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 την στραγγαλιστική δικλείδα. Δηλαδή έχουμε ποιοτικό έλεγχο. Όσον αφορά τις ΜΕΚ βενζίνης, έχουμε ποσοτικό έλεγχο, δηλαδή μεταβάλλεται η ποσότητα του μίγματος, το οποίο εισέρχεται στον θάλαμο καύσης, μέσω της πεταλούδας. Η έλλειψη στραγγαλιστικής δικλείδας 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 στον θάλαμο. Εάν το μίγμα είναι πλουσιότερο, τότε μεγαλώνει η μέγιστη θερμοκρασία με αποτέλεσμα να μεγαλώνει και η ποσότητα των οξειδίων του αζώτου που παράγονται.

## 5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕ ΑΛΛΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

### 5.1 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

- **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 (CO<sub>2</sub>) είναι αυτό που οφείλεται σε μεγάλο ποσοστό για το φαινόμενο του θερμοκηπίου λόγω της ανεξέλεγκτη καύση 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 την μη παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα, έτσι ονομάζουμε τις εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Γνωρίζουμε ότι τα ορυκτά καύσιμα δεν είναι αναλώσιμα άρα θα πρέπει να βρούμε σύντομα έως το 2050 άλλες μορφές ενέργειας για να αντικαταστήσουμε περίπου το 1/3 της παγκόσμιας ενέργειας από ηλιακή, αιολική και άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι η βιομάζα, γεωθερμική, υδροηλεκτρική ενέργεια, το φυσικό αέριο και το υδρογόνο). Η ικανότητα απορρόφησης διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα της γης είναι πολύ συγκεκριμένη. Με κάθε έτος που περνά απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα κάτι παραπάνω από 25 δις τόνους CO<sub>2</sub>. 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 επιστημονικά εφικτό και τι όχι με γνώμονα πάντα το περιβάλλον και την τεχνολογικά εφικτό.

- **Αιθανόλη**

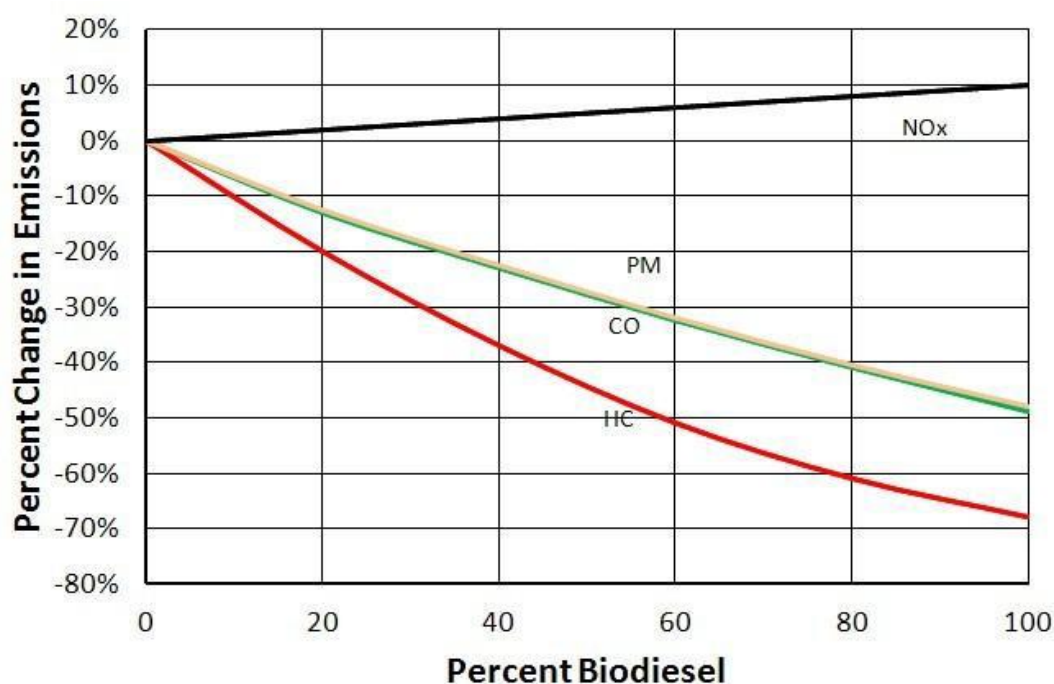
Η αιθανόλη κατατάσσεται στα ανανεώσιμα καύσιμα που δημιουργείται από το καλαμπόκι ή και άλλα φυτικά έλαια. Οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής χρησιμοποιούν σχεδόν σε όλη την βενζίνη αρκετή ποσότητα αιθανόλης. Το ποσοστό της αιθανόλης που βρίσκεται στην βενζίνη αλλάζει ανάλογα με την γεωγραφική θέση αλλά και την εποχή, έτσι για ένα μείγμα υψηλής ποιότητας μπορεί να περιέχει από 51% έως 83% αιθανόλη και ονομάζεται E85. Ενώ το E15 καθορίζεται από τον οργανισμό προστασίας του περιβάλλοντος, που αντιστοιχεί σε περιεκτικότητα από 10% έως 15% αιθανόλης με βενζίνη. Έτσι καταφέρνουμε να μειώσουμε τις εκπομπές του θερμοκηπίου έως και 52% σε αντίθεση 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 βιοντίζελ-biodiesel χρησιμοποιείται για κινητήρες ντίζελ-diesel, επειδή οι φυσικές ιδιότητες είναι παρόμοιες μεταξύ των 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 (NO<sub>x</sub>), υδρογονανθράκων (HC), αιωρούμενων σωματιδίων (PM) και μονοξειδίου του άνθρακα (CO), από την καύση βιοντίζελ-biodiesel σε μηχανές βαρέως τύπου οχήματος.

- **Φυσικό Αέριο**

Το φυσικό αέριο κατατάσσεται ως ορυκτό καύσιμο, επειδή 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 (CH<sub>4</sub>). Το μεθάνιο δεν έχει οσμή και γεύση για αυτό προσθέτουν μερκαπτάνη το οποίο έχει μια έντονη δυσάρεστη οσμή, έτσι ώστε να γίνεται αντιληπτή η οποιαδήποτε διαρροή. Επίσης το φυσικό αέριο που χρησιμοποιείται σε οχήματα καταφέρνει να αυξήσει την ενεργειακή ασφάλεια, παράγει χαμηλές εκπομπές υδρογονανθράκων (HC) και μειώνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) 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 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.



Εικόνα 19

- **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 αξιοποίησή του.

## 5.2 ΣΥΝΔΙΑΣΜΟΙ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Οι ιδιότητες του υδρογόνου, ιδίως των ευρέων ορίων ευφλεκτότητάς του, το καθιστούν ιδανικό καύσιμο για συνδυασμό με άλλα καύσιμα και βελτιώνοντας έτσι τις ιδιότητες καύσης τους. Με βάση τη στρατηγική σχηματισμού μείγματος, μπορεί κανείς να κάνει διάκριση μεταξύ 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

και καυσίμου για τα διαφορετικά καύσιμα είτε σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να παράγουν υδρογόνο στην μηχανή.

### 5.2.1 ΜΕΙΓΜΑΤΑ ΠΟΥ ΚΥΡΙΑΡΧΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ

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 CO<sub>2</sub> 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 H<sub>2</sub> / φυσικό αέριο κατ' όγκο%) απέδειξε ότι ήταν δυνατόν να επιτευχθεί μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub> 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<sub>2</sub> και μεθανίου, με το εμπορικό σήμα να είναι ιδιοκτησία της Eden Innovations Ltd. Το Denver Hythane Project το 1991 παρουσίασε περισσότερο από 75% μείωση των εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> κατά τη χρήση υθάνιου αντί για φυσικό αέριο.

### 5.2.2 ΜΕΙΓΜΑΤΑ ΠΟΥ ΚΥΡΙΑΡΧΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ

Η προσθήκη μεθανίου στο υδρογόνο βελτιώνει σημαντικά την πυκνότητα αποθήκευσης των συμπιεσμένων συστημάτων αποθήκευσης και συνεπώς αυξάνει την γκάμα των οχημάτων με αέρια καύσιμα. Η ανάμειξη υδρογόνου με 5% μεθάνιο αυξάνει την υποθηκευμένη 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 ένα μονοκύλινδρο κινητήρα που λειτουργεί με υδρογόνο και με μείγμα 5 και 20% έδειξαν ελαφρά μείωση εκπομπών NO<sub>x</sub> με αυξημένη περιεκτικότητα σε μεθάνιο, ενώ η απόδοση του κινητήρα μειώθηκε σε χαμηλά φορτία στον κινητήρα. Δοκιμές σε επίπεδο οχήματος σε Mercedes Benz E 200 NGT, ένα όχημα φυσικού αερίου βενζίνης, σε σχέση με ένα όχημα δύο καυσίμων που ήταν προσαρμοσμένο να λειτουργεί με βενζίνη, φυσικό αέριο, υδρογόνο και οποιοδήποτε μείγμα H<sub>2</sub>/ φυσικού αερίου 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<sub>2</sub> που προκύπτουν από χημικές διεργασίες. Τα αέρια που περιέχουν H<sub>2</sub> 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 NO<sub>x</sub> μειώνονται σε πολύ χαμηλό επίπεδο. Ανάλογα με την ποσότητα υδρογόνου και άλλων συστατικών του, είναι δυνατόν να επιτευχθούν τιμές NO<sub>x</sub> κάτω των 5 ppm(περιεκτικότητα και αναλογίες της τάξης κυρίως του εκατομμυριοστού, parts per million). Τα μείγματα

αερίων πλούσια σε H<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>), η ταχύτητα καύσης σε  $\lambda = 2 / \varphi = 0,5$  είναι η ίδια με εκείνη για το φυσικό αέριο με  $\lambda = 1,1 / \varphi = 0,9$ . 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<sub>2</sub>, λόγω της μονάδας υπερφόρτισης.

### 5.2.3 ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΜΕΙΓΜΑΤΑ ΑΕΡΙΟΥ

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 που περιέχει υδρογόνο 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 στην μείωση της μέσης θερμοκρασίας, στην μείωση των εκπομπών οξειδίου του αζώτου και επίσης δεν επηρεάζει τον βαθμό απόδοσης ακόμα και σε μεγάλες ποσότητες αέρα.

### 5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΔΙΠΛΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Εφαρμογές με διπλό καύσιμο όπως Diesel-Biodiesel ή βενζίνη-αλκοόλη αποσκοπούν στην βελτιστοποίηση της καύσης, στην μείωση των εκπομπών και αυξάνει την απόδοση του καυσίμου.

#### 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 πλούσιο 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 καύσιμων καυσαερίων, δημιουργεί ανάφλεξη στην φάση της συμπίεσης βελτιώνοντας την απόδοση και μειώνοντας τις εκπομπές.

#### 5.3.2 BENZINΗ ΚΑΙ ΚΑΥΣΙΜΑ ΑΛΚΟΟΛΗΣ

Πειράματα έγιναν σε ένα φορτηγό GMC όπου παρουσιάστηκε μείωση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 3% σε δρόμους πόλης και 4% σε αυτοκινητόδρομους. Σε αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα υποκατάστατο της βενζίνης με υδρογόνο σε ποσοστό 100%



όταν ήταν σε αδράνεια και 0% με πλήρες φορτίο ούτως ώστε να γίνει αποφυγή της απώλειας ισχύος. Η ποσότητα της υποκατάστατης βενζίνης κυμαίνεται μεταξύ 40-50% και έχει ως αποτέλεσμα για 110-180 χιλιόμετρα να χρησιμοποιείται πίεση 350bar και 150l δεξαμενής με συμπιεσμένο υδρογόνο.

## 6 ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕ ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

### 6.1.1 ΙΣΤΟΡΙΑ

Η ιδέα λειτουργίας ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης από 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 καύσιμα. Με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας του Ζαν Τζόζεφ Ετιέν Λενουάρ (Jean Joseph Etienne Lenoir) το 1860, ένας δίχρονος κινητήρας αερίου με οριζόντια διάταξη θεωρείται ο πρώτος επιτυχημένος κινητήρας εσωτερικής καύσης. Ο κινητήρας τροφοδοτείται από



Εικόνα 20

υδρογόνο που παράγεται μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού. Ήδη από το 1933, η Norsk Hydro (Νορβηγική εταιρία που ασχολείται και με Α.Π.Ε.) λειτούργησε ένα όχημα κινητήρα εσωτερικής καύσης με το υδρογόνο να παράγεται από την αμμωνία. Ο πρώτος κινητήρας DI 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 οδήγησε 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, το σύστημα εξάλειψε την πυρκαγιά 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 υδρογόνο DI. Η BMW σε συνεργασία με την DLR παρουσίασε το πρώτο της όχημα υδρογόνου το 1979.

### 6.1.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Τα οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου μπορούν να χαρακτηριστούν είτε ως οχήματα μετατροπής είτε ως ειδικά οχήματα, με οχήματα μετατροπής προσαρμοσμένα για λειτουργία υδρογόνου είτε από κατασκευαστή οχημάτων είτε από

προμηθευτή μετά την αγορά. Τα ειδικά αυτά οχήματα υδρογόνου έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί ειδικά για λειτουργία υδρογόνου 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 συμπιεσμένα υδρογόνα και κρυογονικά οχήματα υγρού υδρογόνου. Το υδρογόνο ως καύσιμο έχει εφαρμοστεί σε παλινδρομικούς κινητήρες εσωτερικής καύσης καθώς και σε περιστροφικούς κινητήρες.

### 6.1.3 ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ

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 σε λειτουργία υδρογόνου από την Electric Transportation Engineering Corporation. Το 6θέσιο ελαφρύ φορτηγάκι τροφοδοτείται από κινητήρα γενιάς V-8 6,0 L με έγχυση καυσίμου θύρας υδρογόνου. Χρησιμοποιεί έναν υπερσυμπιεστή-στροβιλοσυμπιεστή με κινητήρα που κινείται με μιάντα σε συνδυασμό με ένα intercooler (ψύκτη) 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) σε πίεση αποθήκευσης έως 350 bar, 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 CO<sub>2</sub> (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=Μίλια Ανά Γαλόνι).

### 6.1.4 ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

Μερικά βιοκαύσιμα οχήματα είναι η τελευταία γενιά οχημάτων της BMW, η Hydrogen 7, όπου τα αυτοκίνητά της είναι τύπου σεντάν (sedan) και λειτουργεί κινητήρα 6L γενιάς V-12. Τα μοντέλα αυτά είναι πανομοιότυπα με εκείνα της έκτης και πέμπτης σειράς 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 (κρυογονική 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 πιο πρόσφατα ήταν το 2003 το Mazda RX-8 Hydrogen RE. Ο κινητήρας Renesis είναι εφοδιασμένος με έναν στροβιλοσυμπιεστή ηλεκτρικού κινητήρα ο οποίος χρησιμοποιείται για την βελτίωση της αποτελεσματικότητας για μεγάλες στροφές (RPM). Το αυτοκίνητο εμπεριέχει δύο δεξαμενές συμπιεσμένου υδρογόνου σε πίεση 350bar το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για εκατό χιλιόμετρα καθώς και μια δεξαμενή βενζίνης η οποία θα χρησιμοποιηθεί για πεντακόσια πενήντα χιλιόμετρα. Ακόμα όσον αφορά την οικονομία καυσίμου, η καύση του υδρογόνου θα έχει σαν αποτέλεσμα μια βελτίωση κατά 23% από ότι η καύση της βενζίνης.

#### 6.1.5 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

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 ο αριθμός των οχημάτων που παράγονται.

Όνομα	Έτος	Κινητήρας	Δεξαμενή	Χωρητικότητα	Απόσταση	Παραγόμενα Οχήματα
<b>Ρίβαζ (Rivaz)</b>	1807	Μονοκύλ.	Συμπίεση	-	-	-
<b>Λενόιρ (Lenoir)</b>	1860	Μονοκύλ.	Ηλεκτρόλυση Νερού	-	-	-
<b>Νορσκ Χάιντρο (Norsk Hydro)</b>	1933		Αμμωνία	-	-	-
<b>Μουσάσι(Musa shi) 1</b>	1974	Τετράχρονος	Συμπίεση	7Nm <sup>3</sup>	-	-
<b>Μουσάσι(Musa shi) 2</b>	1975	Τετράχρονος	Κρυογονικό	230L	-	-
<b>Μουσάσι(Musa shi) 3</b>	1977	Δίχρονος	Κρυογονικό	65L	-	-
<b>BMW</b>	1979	3,5L	Κρυογονικό		300km	-
<b>Φόρντ(Ford) P2000</b>	2001	2L I4	Συμπίεση	1.5kg	100km	-
<b>BMW H7</b>	2003	6L V12	Κρυογονικό	8kg	200+480km	100
<b>Μάζντα(Mazda) RX-8 H RE</b>	2003	2 x 654cc	Συμπίεση	2.4kg	100+550km	>30
<b>Κουάντουμ Πρίους (Quantum Prius)</b>	2005	1.5L I4	Συμπ	1.6-2.4kg	100-130km	>30

## **7 ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΑΙΑ**

### **7.1 ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΑΙΑ**

Το υδρογόνο έχει σαν κύριο χαρακτηριστικό τη θερμογόνο ικανότητα, η οποία είναι υψηλότερη (120 MJ/kg) σε σύγκριση με τα άλλα χημικά καύσιμα. Παρόλα ταύτα σε ογκομετρική βάση, λόγω της χαμηλής ογκομετρικής ενεργειακής πυκνότητας του, το υδρογόνο σε υγρή μορφή θα αποθηκευτεί σε όγκο τέσσερις φορές μεγαλύτερο από τα άλλα χημικά καύσιμα ή δύο φορές μεγαλύτερο από τον όγκο που αποθηκεύεται το υδροποιημένο φυσικό αέριο ούτως ώστε να έχουμε την ίδια απόδοση ενέργειας. Λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας στην οποία το υδρογόνο υδροποιείται ( $-253^{\circ}\text{C}$  ή  $-423.4^{\circ}\text{K}$ ), ο απαιτούμενος όγκος αποθήκευσής του, δεδομένου των μονώσεων και των επιστρώσεων που είναι απαραίτητες, ίσως να είναι ακόμα μεγαλύτερος από όσο υπολογίζουμε. Η αποθήκευσή του θα μπορούσε να γίνει εντός υδριδίων μετάλλων, αλλά δεν θα ήταν η κατάλληλη λύση λόγω προσθήκης επιπλέον βάρους στο πλοίο. Επειδή το υδρογόνο χρειάζεται αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες ή τρομερά υψηλές πιέσεις, θα βρίσκεται μαζί με άλλα συστατικά όπως την αμμωνία ή την μεθανόλη.

### **7.2 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΕΥΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ**

Το υδρογόνο θα αποθηκεύεται σε μονωμένες δεξαμενές και υπό πίεση με τη μορφή κρυσυμπιεσμένου υδρογόνου. Αυτές οι κρυσυμπιεσμένες δεξαμενές θα χρειαστούν δύο ή τρεις φορές περισσότερη μόνωση στα τοιχώματά τους από εκείνες του υδροποιημένου φυσικού αερίου, λόγω των πολύ χαμηλών θερμοκρασιών που θα υπάρχουν μέσα σε εκείνες. Στο εσωτερικό της δεξαμενής θα πρέπει να έχουν αποβληθεί ποσότητες αέρα, οξυγόνου ή άλλων οξειδωτικών. Επιπλέον θα πρέπει να έχει αποβληθεί τέτοια ποσότητα υδρογόνου από την δεξαμενή και γενικώς από το σύστημα της εγκατάστασης, πριν έρθει σε επαφή με την ατμόσφαιρα (για τυχόν καθαρισμό της) ή για επισκευές στην γραμμή του υδρογόνου, έτσι ώστε να αποφύγουμε τον σχηματισμό μειγμάτων εύφλεκτων αερίων.

Λόγω του μικρού μοριακού μεγέθους του υδρογόνου, μικρές ποσότητες διαφεύγουν μέσα σε υλικά όπως για παράδειγμα στα τοιχώματα των δεξαμενών, μέσα σε άλλα υγρά ή και σε άλλα στερεά υλικά κατά το πέρασμα του χρόνου, με αποτέλεσμα την ισορροπία της συγκέντρωσης. Το υδρογόνο θα πρέπει να αποθηκεύεται σε κατάλληλες δεξαμενές οι οποίες θα ελαχιστοποιούν τη διαφυγή του και θα μειώνουν την χαμένη ποσότητα του υδρογόνου.

Όσον αφορά την ευθραυστότητα που προκαλεί το υδρογόνο σε διάφορα υλικά του συστήματος, αυτή παρατηρείται σε μερικά εξαρτήματα/τμήματα όπως: οι εσωτερικές επιφάνειες της δεξαμενής, οι συγκολλήσεις, οι σωληνώσεις, οι βαλβίδες, οι εγχυτήρες καυσίμου (καυστήρες) και οι εκτονωτικές βαλβίδες. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου υπάρχουν διάφορες λύσεις, για παράδειγμα η χρήση κατάλληλου υλικού με κατάλληλο πάχος καθώς και η επιφανειακή κατεργασία, όπως διάφορες επιστρώσεις με κατάλληλα υλικά, ούτως ώστε να προστατευτεί η επιφάνεια από την επαφή της με το υδρογόνο.

Για το κρυσυμπιεσμένο υδρογόνο όλα τα μέρη της εγκατάστασης (δεξαμενές, σωληνώσεις, βαλβίδες εκτόνωσης) θα πρέπει να είναι μονωμένα για να μην υπάρχει συμπύκνωση

του αέρα ή συσσώρευση πάγου που θα είχαν σαν αποτέλεσμα να φραγούν οι οδοί εξαερισμού.

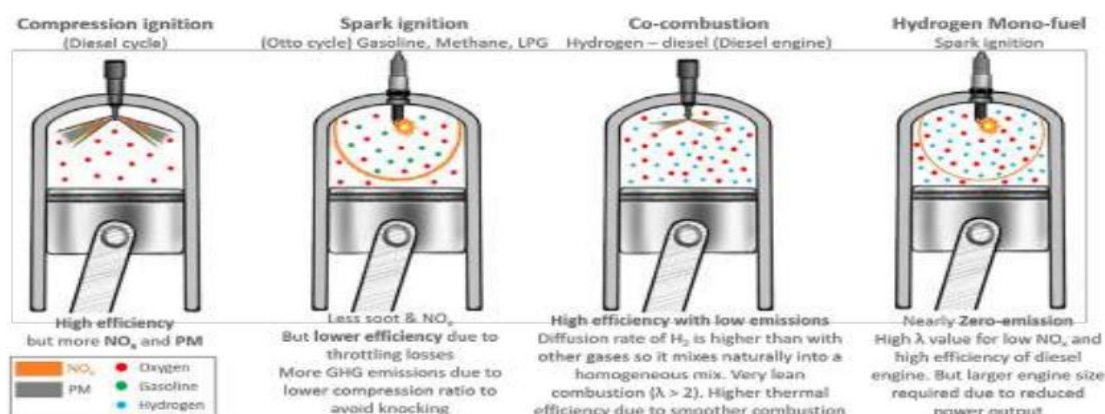
### 7.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Δεν περιέχεται άνθρακας ή θείο	Πιθανό υψηλό κόστος καυσίμων
Ανανεώσιμη παραγωγή από ηλεκτρική ενέργεια και βιο-ανανεώσιμες διεργασίες	Χαμηλή διαθεσιμότητα ανανεώσιμου υδρογόνου
Μπορεί να αποθηκευτεί και να μεταφερθεί ως υγρό ή αέριο	Δεν υπάρχουν υποδομές εφοδιασμού ή αποθήκευσης
Χωρίς εκπομπές αερίων και σωματιδίων	Υψηλός κίνδυνος έκρηξης σε περιορισμένους χώρους
	Εκπομπές NO <sub>x</sub> σε περίπτωση καύσης υδρογόνου στο εσωτερικό των ΜΕΚ

### 7.4 ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΣΕ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΑΠΛΟΥ Ή ΔΙΠΛΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Το υδρογόνο στους κινητήρες εσωτερικής καύσης χρησιμοποιείται είτε ως συμπληρωματικό καύσιμο ή αναμειγμένο με το μείγμα καυσίμου σε συμβατικούς κινητήρες αερίου και κινητήρες διπλού καυσίμου.

Μελέτες για την καύση του υδρογόνου στις ΜΕΚ δείχνουν ότι μικρή ποσότητα υδρογόνου στο αναμειγμένο καύσιμο αέριο θα έχει σαν αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης του κινητήρα και μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Σε κινητήρες απλού καυσίμου πρέπει να γίνουν κάποιες τροποποιήσεις, όπως για παράδειγμα μεγαλύτεροι κύλινδροι και συνεπώς το μεγαλύτερο μέγεθος του κινητήρα, που αποσκοπούν στην βελτιστοποίηση του χρονισμού καύσης.

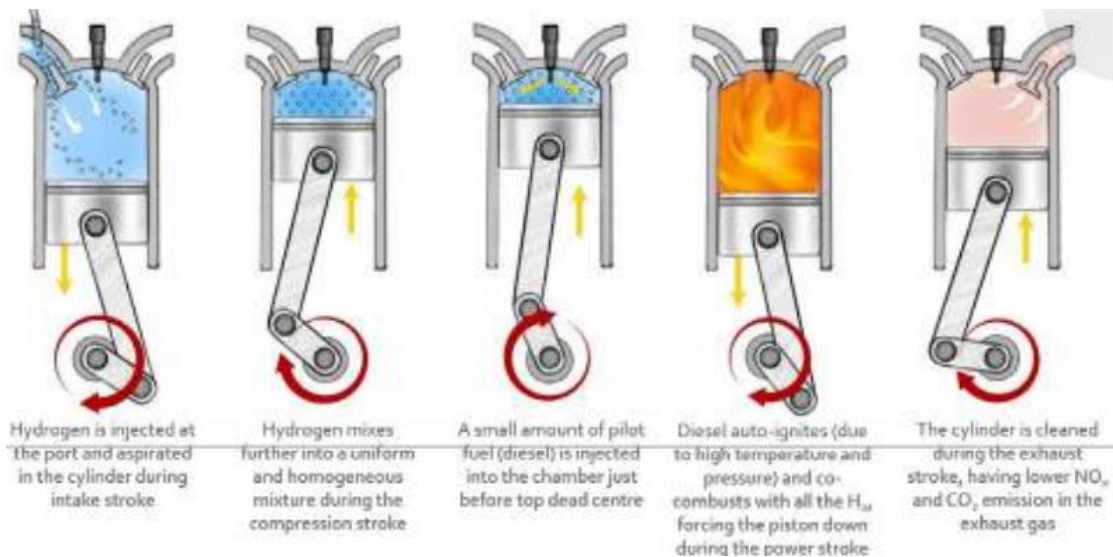


Εκτός από τους κινητήρες απλού καυσίμου, το υδρογόνο μπορεί να καεί και με αέριο ή και με άλλα συμβατά καύσιμα πχ diesel. Στις εφαρμογές των κινητήρων διπλού

καυσίμου το υδρογόνο εγχέεται στους κυλίνδρους και συμπιέζεται, ενώ ταυτόχρονα μικρή ποσότητα πετρελαίου έχει εισχωρήσει στον χώρο καύσης για να γίνει η έναρξη της καύσης. Τέτοιο σύστημα κινητήρα διπλού καυσίμου χρησιμοποιείται στο Μπεχάιντρο (Behydro). Εκεί η περιεκτικότητα υδρογόνου φτάνει έως και 85%. Το ποσοστό του υδρογόνου στο μείγμα σχετίζεται με το μέγεθος του κινητήρα, δηλαδή όσο μεγαλύτερος ο κινητήρας τόσο μεγαλύτερη και η ποσότητα του υδρογόνου που θα τροφοδοτηθεί σε αυτόν. Συνεπώς ο συνδυασμός υδρογόνου με ντίζελ θα φέρει ευελιξία και αποδοτικότητα. Αυτό θα έχει ως συνέπεια οι κινητήρες αυτοί να είναι και περιβαλλοντικά υγιείς σε σχέση με τους συμβατικούς που χρησιμοποιούνται σήμερα.



Εικόνα 22



Εικόνα 23

Για το κρυογενικό υδρογόνο, όλα τα συστήματα εκτόνωσης πίεσης θα πρέπει να είναι προστατευμένα από τον σχηματισμό νερού ή αερίων καθώς και από την συσσώρευση

του πάγου λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών που θα επικρατούν μέσα στον θάλαμο καύσης. Οποιαδήποτε έξοδος του υδρογόνου θα έχει ως αποτέλεσμα την αυτανάφλεξη του, για τον λόγο αυτό οι έξοδοι θα πρέπει να βρίσκονται μακριά από την περιοχή εισαγωγής αέρα, από τα ανοίγματα διανομής και από χώρους εξαγωγής καυσαερίων.

## 7.5 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ

Η ναυτιλία προσβλέπει στην καθιέρωση του υδρογόνου σαν κύριο καύσιμο στο μέλλον, αφού είναι περισσότερο φιλικό προς το περιβάλλον από τα πρότυπα καύσιμα που χρησιμοποιούνται σήμερα. Το υδρογόνο, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, μπορεί να παραχθεί σε οποιαδήποτε χώρα, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται ένα ανεξάρτητο ενεργειακό σύστημα.

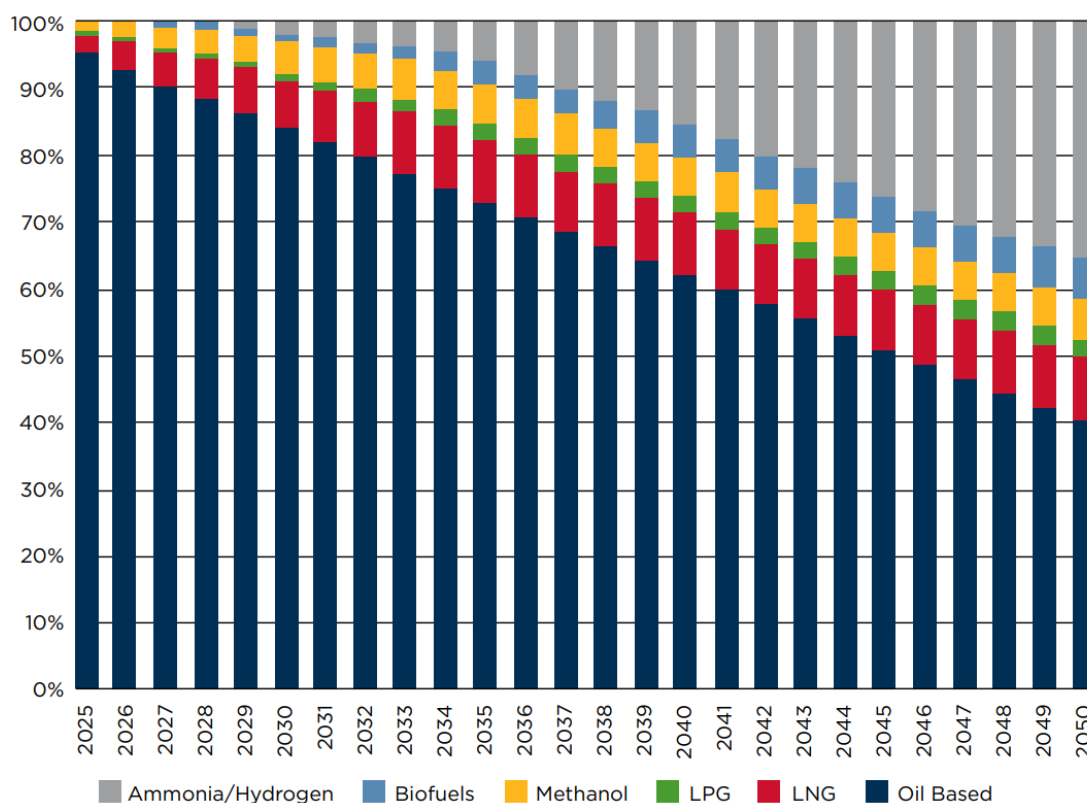


Figure 17: Projected Marine Fuel Use to 2050

(Source: ABS Setting the Course to Low Carbon Shipping - Pathways to Sustainable Shipping)

### Εικόνα 24

Στην Αυστραλία, η παραγωγή υδρογόνου έχει αυξηθεί σχετικά με άλλες χώρες με απώτερο σκοπό την ανεξαρτητοποίηση της από τον άνθρακα και την βελτίωση της ποιότητας των καυσίμων (ως προς το περιβάλλον). Μεγάλη ζήτηση του υδρογόνου παρατηρείται στην Ιαπωνία και κυρίως για χρήση σε μεταφορικές εφαρμογές οι οποίες θα έχουν μηδενικές εκπομπές ρύπων. Στην Ευρώπη στο διάστημα από το 2020 μέχρι το 2024 η ποσότητα παραγωγής υδρογόνου θα είναι κοντά στο ένα εκατομμύριο τόνους και μέχρι το 2030 θα έχει φτάσει στα 10 εκατομμύρια τόνους. Στις ΗΠΑ το υδρογόνο

θα αποτελέσει οδηγός προς την οικονομική ανάπτυξη και ένα μέσο σύμφωνα με το οποίο θα επιτευχθεί μείωση στις εκπομπές ρύπων. Η παραγωγή του υδρογόνου θα φτάσει μέχρι το 2030 κοντά στα 17 εκατομμύρια τόνους και 63 εκατομμύρια μέχρι το 2050.

## **8 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 συνιστάτε και ο τρόπος αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και την 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 και κυρίαρχο στόχο 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 μικρών αυτόνομων κοινοτήτων που υπάρχουν στην Ελλάδα. Για αυτό πρέπει να δοθούν επενδύσεις από τις εταιρίες ενέργειας για την ανάπτυξη της τεχνολογίας παραγωγής υδρογόνου από Α.Π.Ε. έτσι ώστε να εισαχθούν και να αξιοποιηθούν μετέπειτα δίνοντας κίνητρα στο κράτος. Το ορυκτό καύσιμο δημιουργησέ 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 την ηλιακή και αιολική ενέργεια.



## 9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) (2.1/2.3/2.5/2.5.1/2.5.2/2.5.3/2.5.4/2.6/3.3/3.5/4.1/4.3/4.3.2/4.3.3/4.3.4/4.3.5/4.3.6/4.3.7/4.4.1/4.4.2/4.5/4.5.1/4.5.2/4.5.5/4.5.6/4.5.7/4.6/4.6.1/4.6.2/4.6.3/4.6.4/4.7/4.7.1/4.7.2/4.7.3/4.7.4/4.7.5/4.7.6/4.7.7)[https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/1719/avdelidiv\\_piston.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/1719/avdelidiv_piston.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- 2) (2.2.1) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>
- 3) (2.2.2) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-biomass-derived-liquid-reforming>
- 4) (2.2.3) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>
- 5) (2.2.4) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-microbial-biomass-conversion>
- 6) (2.2.5) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-coal-gasification>
- 7) (2.2.6.) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-thermochemical-water-splitting>
- 8) (2.2.6.) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-thermochemical-water-splitting>
- 9) 2.2.7. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-photobiological>
- 10) 2.2.8. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-photoelectrochemical-water-splitting>
- 11) (2.3/2.4)<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF>
- 12) (2.5.1)[http://195.134.76.37/chemicals/chem\\_H2O2.htm](http://195.134.76.37/chemicals/chem_H2O2.htm)
- 13) (2.5.3)[https://hzg.de/science/materialien\\_verfahren/wasserstoffspeicherung/index.php.en](https://hzg.de/science/materialien_verfahren/wasserstoffspeicherung/index.php.en)
- 14) (2.5.3.) <http://www.hysafe.net/wiki/BRHS/StorageMetalHydrides>
- 15) (2.5.3)<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)
- 17) (2.5.4)<http://me1065.wikidot.com/hydrogen-storage-in-carbon-nanotubes>
- 18) (2.5.4)[https://www.google.com/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fwhat-when-how.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2011%2F03%2Ftmp124138\\_thumb.jpg&imgrefurl=http%3A%2F%2Fwhat-when-how.com%2Fnanoscience-and-nanotechnology%2Fcarbon-nanotubes-and-other-carbon-materials-part-2-nanotechnology%2F&tbnid=XqNciL58pUhZM&vet=10CBMQxiAoBWoXChMlqIWn1df67AIVAAAAABOAAAAEAc..i&docid=r7Q748qFhLzbbM&w=635&h=433&itg=1&q=carbon%20nanotubes%20h2&hl=el&ved=0CBMQxiAoBWoXChMlqIWn1df67AIVAAAAABOAAAAEAc](https://www.google.com/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fwhat-when-how.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2011%2F03%2Ftmp124138_thumb.jpg&imgrefurl=http%3A%2F%2Fwhat-when-how.com%2Fnanoscience-and-nanotechnology%2Fcarbon-nanotubes-and-other-carbon-materials-part-2-nanotechnology%2F&tbnid=XqNciL58pUhZM&vet=10CBMQxiAoBWoXChMlqIWn1df67AIVAAAAABOAAAAEAc..i&docid=r7Q748qFhLzbbM&w=635&h=433&itg=1&q=carbon%20nanotubes%20h2&hl=el&ved=0CBMQxiAoBWoXChMlqIWn1df67AIVAAAAABOAAAAEAc)
- 19) (3.1)<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>
- 20) (3.2)<https://www.caroto.gr/2012/01/08/2-stroke-engines/>

- 21) (3.2) <https://www.caroto.gr/static/media/2012/01/dixronos.jpg>
- 22) (3.3) [Βιβλίο Μαυρίδη σελίδες 14-16 και σελίδα 19](#)
- 23) (3.4) <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>
- 24) (3.5) [https://en.wikipedia.org/wiki/Diesel\\_engine](https://en.wikipedia.org/wiki/Diesel_engine)
- 25) (4.2) [https://www.greencarfuture.com/hydrogen/advantages-and-disadvantages#7 Hydrogen fuel cells are durable](https://www.greencarfuture.com/hydrogen/advantages-and-disadvantages#7_Hydrogen_fuel_cells_are_durable)
- 26) (4.2) <file:///D:/%CE%9D%CE%AD%CE%BF%CF%82%20%CF%86%CE%AC%CE%BA%CE%B5%CE%BB%CE%BF%CF%82/%CE%A3%CE%A7%CE%95%CE%94%CE%99%CE%91%CE%A3%CE%9C%CE%9F%CE%A3%20%CE%9A%CE%91%CE%99%20%CE%9A%CE%91%CE%A4%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%95%CE%A5%CE%97%20%CE%A0%CE%95%CE%99%CE%A1%CE%91%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%9F%CE%A5%20%CE%9C%CE%9F%CE%9D%CE%A4%CE%95%CE%9B%CE%9F%CE%A5%20%CE%91%CE%A5%CE%A4%CE%9F%CE%9D%CE%9F%CE%9C%CE%97%CE%A3%20%CE%9B%CE%95%CE%99%CE%A4%CE%9F%CE%A5%CE%A1%CE%93%CE%99%CE%91%CE%A3%20%CE%93%CE%99%CE%91%20%CE%A4%CE%97%CE%9D%20%CE%A0%CE%91%CE%A1%CE%91%CE%93%CE%A9%CE%93%CE%97%20%CE%A5%CE%94%CE%A1%CE%9F%CE%93%CE%9F%CE%9D%CE%9F%CE%A5%20%CE%A9%CE%A3%20%CE%9A%CE%91%CE%A5%CE%A3%CE%99%CE%9C%CE%9F..pdf>
- 27) (4.4/4.4.3/4.4.4./4.5.3/4.5.4.) <http://83.212.168.57/jspui/bitstream/123456789/337/2/1/01X00Z01Z0017.pdf>
- 28) (4.5.5) [https://www.researchgate.net/publication/222702191 Hydrogen-Fueled internal combustion engines](https://www.researchgate.net/publication/222702191_Hydrogen-Fueled_internal_combustion_engines)
- 29) (4.5.5.) <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>
- 30) (4.5.6) <https://www.autoblog.gr/2019/10/19/des-ti-einai-h-kroustikh-kaysh-peirakia-kai-ti-shmasia-paizoun-ta-oktania/>
- 31) (4.5.7) <https://core.ac.uk/download/pdf/55886219.pdf>
- 32) (4.5.8) <https://core.ac.uk/download/pdf/55886219.pdf>
- 33) (4.6.1) <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>
- 34) (4.6.1) [Βιβλίο Κ.Μαυρίδη σελ.94](#)
- 35) (5.1) <https://core.ac.uk/download/pdf/38468125.pdf>
- 36) (5.2/5.2.1/5.2.2./5.2.3./5.3/5.3.1/5.3.2/6.1.1/6.1.2/6.1.3/6.1.4/6.1.5) <https://biblio.u gent.be/publication/818298/file/818329.pdf>
- 37) (6.1.1) <http://inijapan.no/wp-content/uploads/2017/02/12-YARA-Carbon-free-ammonia.pdf>
- 38) (7.1-7.5) [Hydrogen as a Marine Fuel - guidance from ABS - MaritimeCyprus](#)

Εικόνα 1

[https://www.energy.gov/sites/prod/files/styles/borealis\\_photo\\_gallery\\_large\\_respondsmall/public/pem\\_electrolyzer.png?itok=tbiqAZoP](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=5heq55k3](https://www.energy.gov/sites/prod/files/styles/borealis_photo_gallery_large_respondsmall/public/2017/07/f35/05048.JPG?itok=5heq55k3)

Εικόνα 3 [https://www.energy.gov/sites/prod/files/mec\\_schematic\\_0.png](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](https://www.energy.gov/sites/prod/files/pec_mirror-based_approaches_0.png)

Εικόνες 5

[https://www.energy.gov/sites/prod/files/styles/media\\_energy\\_gov\\_320/public/15277.JPG?itok=ZSG5-ME1](https://www.energy.gov/sites/prod/files/styles/media_energy_gov_320/public/15277.JPG?itok=ZSG5-ME1)

Εικόνες 6

[https://www.energy.gov/sites/prod/files/styles/borealis\\_photo\\_gallery\\_large\\_respondlarge/public/pec\\_reactor\\_approaches\\_0.png?itok=wefRRvnY](https://www.energy.gov/sites/prod/files/styles/borealis_photo_gallery_large_respondlarge/public/pec_reactor_approaches_0.png?itok=wefRRvnY)

Εικόνες 7

[https://www.energy.gov/sites/prod/files/styles/borealis\\_photo\\_gallery\\_large\\_respondlarge/public/pec\\_reactor\\_design\\_schemes.png?itok=sDInbl-G](https://www.energy.gov/sites/prod/files/styles/borealis_photo_gallery_large_respondlarge/public/pec_reactor_design_schemes.png?itok=sDInbl-G)

Εικόνες 8

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1a/Electron\\_shell\\_001\\_Hydroq\\_en.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1a/Electron_shell_001_Hydroq_en.svg)

Εικόνες 9 [http://195.134.76.37/chemicals/images/H2O2/H2O2\\_rocket1.jpg](http://195.134.76.37/chemicals/images/H2O2/H2O2_rocket1.jpg)

Εικόνες 10 [http://what-when-how.com/wp-content/uploads/2011/03/tmp124138\\_thumb.jpg](http://what-when-how.com/wp-content/uploads/2011/03/tmp124138_thumb.jpg)

Εικόνες 11 <https://www.caroto.gr/static/media/2012/01/dixronos.jpg>

Εικόνες 12 [Βιβλίο Μαυρίδη](#)

Εικόνες 13 [http://8ermikoi-kukloi.weebly.com/uploads/1/8/3/3/18336781/8813058\\_orig.png](http://8ermikoi-kukloi.weebly.com/uploads/1/8/3/3/18336781/8813058_orig.png)

Εικόνες 14 [http://8ermikoi-kukloi.weebly.com/uploads/1/8/3/3/18336781/8813058\\_orig.png](http://8ermikoi-kukloi.weebly.com/uploads/1/8/3/3/18336781/8813058_orig.png)

Εικόνες 15 [https://oebemessinias.gr/pdf/systimata\\_petrelaiokinesis.pdf](https://oebemessinias.gr/pdf/systimata_petrelaiokinesis.pdf)

Εικόνες 16 [https://i0.wp.com/www.autoblog.gr/wp-content/uploads/2019/10/averillfwk-fiq02\\_024.jpg?resize=823%2C420&ssl=1](https://i0.wp.com/www.autoblog.gr/wp-content/uploads/2019/10/averillfwk-fiq02_024.jpg?resize=823%2C420&ssl=1)

Εικόνες 17 <http://3.bp.blogspot.com/-JfRq30zCB8w/U9Gavb5qHPI/AAAAAAAAAGqY/7d6JtsolpNs/s1600/FUEL+1.jpg>

Εικόνες 18 <https://core.ac.uk/download/pdf/38468125.pdf>

Εικόνες 19 <https://yt3.ggpht.com/ytc/AAUvwnivNTz7Smn5MBsBa50NNes-DHI50bk1kntalbzms176-c-k-c0x00ffffff-no-rj>

Εικόνες 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=12ahUKEwi2zuWRspvAhXE4YUKHdudAecQMygAegQIARA6..i&docid=VRhnuhP-7k\\_OEM&w=627&h=330&q=1933%20norsk%20hydro&ved=2ahUKEwi2zuWRspvAhXE4YUKHdudAecQMygAegQIARA6](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=12ahUKEwi2zuWRspvAhXE4YUKHdudAecQMygAegQIARA6..i&docid=VRhnuhP-7k_OEM&w=627&h=330&q=1933%20norsk%20hydro&ved=2ahUKEwi2zuWRspvAhXE4YUKHdudAecQMygAegQIARA6)

*Εικόνες 21-24* [Hydrogen as a Marine Fuel - guidance from ABS - MaritimeCyprus](#)