



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ  
ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης  
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

### Κίνηση Οχημάτων με Υδρογόνο

Σπουδαστής : Κωνσταντίνος Μπακατσέλος  
Καθηγητής : Γεώργιος Κουδουμάς

# Hydrogen



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο Κεφάλαιο 2ο της πτυχιακής αυτής εργασίας επιχειρείται μία εκτενής γνωριμία με το χημικό στοιχείο υδρογόνο, γνωρίζονται οι φυσικές και οι χημικές του ιδιότητες και παρουσιάζονται οι μέθοδοι παρασκευής του, οι τρόποι αποθήκευσής του και οι χρήσεις του.

Το 3ο Κεφάλαιο αναφέρεται στη μηχανή εσωτερικής καύσης, στη σημαντικότερη ίσως μηχανολογική εφαρμογή του 20ου αιώνα που έφερε την επανάσταση στις μεταφορές και έθεσε τα θεμέλια για την αειφόρο οικονομική ανάπτυξη των σύγχρονων κοινωνιών. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι σημαντικότεροι τύποι κινητήρων εσωτερικής καύσης, που πήραν την ονομασία τους από τους ανθρώπους που τους επινόησαν (Otto, Diesel, Wankel), και οι οποίοι καθολικά χρησιμοποιούνται σήμερα στα ατομικά και μαζικά μέσα μετακίνησης.

Στο 4ο Κεφάλαιο διεξοδικά μελετώνται τα χαρακτηριστικά του υδρογόνου ως καύσιμο, αναλύονται οι ιδιότητες καύσης του και διερευνώνται τα προβλήματα που προκύπτουν από τη χρήση του στις μηχανές εσωτερικής καύσης. Επίσης, στοιχειοθετείται η επιλογή του ως το πιο πιθανό εναλλακτικό καύσιμο του κοντινού μέλλοντος.

Τέλος, στο 5ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται λεπτομερώς τα πρωτότυπα οχήματα μεγάλων κατασκευαστών, που παίρνουν κίνηση από υδρογόνο.

## **ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ**

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
2. ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟ.....	10
2.1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ.....	10
2.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	13
2.3. ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	17
2.4. ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	21
2.5. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	22
2.5.1. Αποθήκευση του υδρογόνου ως συμπιεσμένο αέριο.....	23
2.5.2. Αποθήκευση του υδρογόνου ως κρυογονικό υγρό.....	24
2.5.3. Αποθήκευση του υδρογόνου σε υδρίδια μετάλλων.....	25
2.5.4. Αποθήκευση του υδρογόνου σε νανοσωλήνες άνθρακα.....	28
2.6. ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	31
3. Η ΜΗΧΑΝΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ.....	33
3.1. Εισαγωγή.....	33
3.2. Τετράχρονος κινητήρας (4-X).....	35
3.3. Δίχρονος κινητήρας (2-X).....	36
3.4. Κινητήρας Otto (βενζίνης).....	38
3.5. Κινητήρας Diesel (πετρελαίου).....	40
3.6. Περιστροφικός κινητήρας Wankel.....	44
4. ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΤΙΣ Μ.Ε.Κ.....	46
4.1. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ.....	46
4.2. ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΤΙΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	49
4.2.1. Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC).....	50
4.2.2. Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC).....	50

4.2.3. Κυψέλες καυσίμου αλκαλίων (AFC).....	51
4.2.4. Κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC).....	51
4.2.5. Κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC).....	52
4.2.6. Κυψέλες καυσίμου μεθανόλης (DMFC).....	52
4.3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΩΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΦΟΡΕΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	52
4.4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΕ ΜΕΚ.....	55
4.4.1. Ευρύ φάσμα αναφλεξιμότητας.....	57
4.4.2. Χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης.....	57
4.4.3. Υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης.....	58
4.4.4. Μεγάλη ταχύτητα καύσης.....	58
4.4.5. Πολύ χαμηλή πυκνότητα & μεγάλη κατά μάζα ενέργεια καύσης.....	59
4.4.6. Υψηλός συντελεστής διάχυσης.....	59
4.4.7. Μικρή απόσταση σβησίματος-εξάλειψης της φλόγας....	61
4.4.8. Υπολογισμός του λόγου αέρα – υδρογόνου για στοιχειομετρική καύση.....	61
4.5. ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ & ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΥΤΩΝ ΜΕ ΤΟΥΣ ΡΥΠΟΥΣ ΤΩΝ ΜΕΚ BENZINΗΣ.....	62
4.5.1. ΜΕΚ υδρογόνου και οξείδια του αζώτου (Nox).....	63
4.5.2. Παράμετροι λειτουργίας των ΜΕΚ υδρογόνου που επηρεάζουν το σηματισμό των Nox.....	65
4.5.3. Μηχανισμοί μείωσης των εκπεμπόμενων Nox.....	66
4.5.4. Υπεροξείδιο του υδρογόνου ως ρύπος των ΜΕΚ υδρογόνου.....	67
4.6. ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΑΝΩΜΑΛΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	68
4.6.1. Ανάφλεξη εισαγωγής (backfire).....	68

4.6.1.1. Αιτίες πρόκλησης ανάφλεξης στην εισαγωγή.....	69
4.6.1.2. Μηχανισμοί αντιμετώπισης της ανάφλεξης εισαγωγής.....	71
4.6.2. Προανάφλεξη (preignition).....	72
4.6.3. Κρουστική καύση (knock)....	74
4.7. ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ & ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΜΙΓΜΑΤΟΣ.....	74
4.7.1. Εξαεριωτής & Έγχυση στην πολλαπλή εισαγωγής (TMI).....	75
4.7.2. Άμεση έγχυση (DI) & Έγχυση στην θυρίδα εισαγωγής (PFI).....	76
4.8. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΕΜΠΟΔΙΑ & ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΤΙΣ ΜΕΚ.....	78
4.9. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ & ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	79
4.9.1. Σύστημα τροφοδοσίας του καυσίμου.....	79
4.9.2. Σύστημα ανάφλεξης και σπινθηριστές (μπουζί).....	80
4.9.3. Λίπανση των ΜΕΚ υδρογόνου.....	81
4.9.4. Τεχνικές ψύξης του θαλάμου καύσης.....	82
4.9.5. Σχεδιασμός του θαλάμου καύσης.....	82
4.9.6. Βαθμός συμπίεσης.....	83
4.9.7. Στρατηγική ελέγχου του φορτίου της μηχανής.....	83
4.10. ΕΠΙΛΟΓΟΣ...	84
5. ΠΡΩΤΟΤΥΠΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	85
5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	85
5.2. BMW 728hL (1998).....	86
5.3. BMW 750hL (1999).....	87
5.4. BMW E65 745h (2001).....	94

5.5. BMW MINI Cooper Hydrogen (2001).....	98
5.6. BMW 7-series 6.0-liter V12 Hydrogen (2003).....	99
5.7. BMW H2R (2004).....	101
5.8. BMW Hydrogen 7 (2006).....	104
5.9. Ford P2000 Hydrogen ICE (2001).....	107
5.10. Ford H2RV (2003).....	110
5.11. Ford Focus C-Max H2ICE (2004).....	111
5.12. MAZDA HR-X (1991) & MAZDA HR-X2 (1993).....	114
5.13. MAZDA RX-8 RE (2003).....	115
5.14. MAZDA 5/PREMACY Hydrogen RE Hybrid Minivan (2005).....	119
5.15. MAN SL 202 & NL 202 (Πιλοτικό Πρόγραμμα ΕQHHP).....	120
5.16. MAN Lion's City H 150kW & MAN Lion's City H 200kW.....	122
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	124

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### **1.1. ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

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 στις μέρες μας. Κύριος ένοχος, η αλόγιστη χρήση των ορυκτών καυσίμων ως η εύκολη και οικονομικότερη λύση της κάλυψης των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών. Η σημαντική αύξηση των εκπεμπόμενων αερίων του θερμοκηπίου (διοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου κ.λπ.) από τις ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν ως συνέπεια τον εγκλωβισμό της υπέρυθρης ακτινοβολίας του ήλιου στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα την άνοδο της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη. Λύσεις για την αποφυγή της επερχόμενης καταστροφής υπάρχουν, στοιχίζουν όμως ακόμη αρκετά. Οι εναλλακτικές έχουν μπει στο μικροσκόπιο των ερευνητών και τεράστια κονδύλια διατίθενται πλέον σε πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα για την έρευνα με σκοπό την απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Όσες διαφωνίες και να υπάρχουν για τις μεταβατικές τεχνολογίες, όλες οι επιστημονικές απόψεις συμπίπτουν στην τελική λύση. Η «οικονομία του υδρογόνου» είναι αυτή που πιθανότατα θα διαδεχθεί την οικονομία του «μαύρου χρυσού». Φαίνεται λοιπόν ότι το υδρογόνο, το πολύτιμο αυτό στοιχείο που αποτελεί την βάση του σύμπαντος και υπάρχει σε αφθονία στη γη, αλλά σχεδόν πάντα ενωμένο με άλλα στοιχεία, αποτελεί μία από τις σημαντικότερες λύσεις για την κάλυψη των μεταφορικών αναγκών του μέλλοντος. Σύμφωνα με τις προβλέψεις των ειδικών, στις επόμενες τρεις με τέσσερις δεκαετίες, το υδρογόνο θα διεισδύσει στην αγορά του αυτοκινήτου, με την άμεση χρήση του ως κύριο καύσιμο στις μηχανές εσωτερικής καύσης πριν η παγκόσμια ενεργειακή κοινότητα οδηγηθεί στην ευρεία έμμεση χρήση του υδρογόνου για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος σε συστήματα κυψελών καυσίμου, με σκοπό την τροφοδοσία ηλεκτρικών κινητήρων για την κίνηση των αυτοκινήτων. Στην διπλωματική αυτή εργασία εξετάζεται η χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο στις μηχανές εσωτερικής καύσης και σε μορφή κυψελών. Παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι τελευταίες εξελίξεις σχετικά με τη χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο στις ΜΕΚ, τα κύρια εξαρτήματα ενός κινητήρα



υδρογόνου και πώς αυτά διαφέρουν από έναν κινητήρα βενζίνης, καθώς και τα θετικά σημεία της καύσης του υδρογόνου. Επίσης εξετάζονται τα προβλήματα που παρατηρούνται στον κινητήρα κατά την παραγωγή χρήσιμου μηχανικού έργου κατά την καύση του υδρογόνου, (π.χ. προανάφλεξη) και τέλος παρουσιάζονται τα οχήματα μεγάλων κατασκευαστών που κινούνται με κυψέλες καυσίμου καθώς και με καύσιμη ύλη το υδρογόνο.



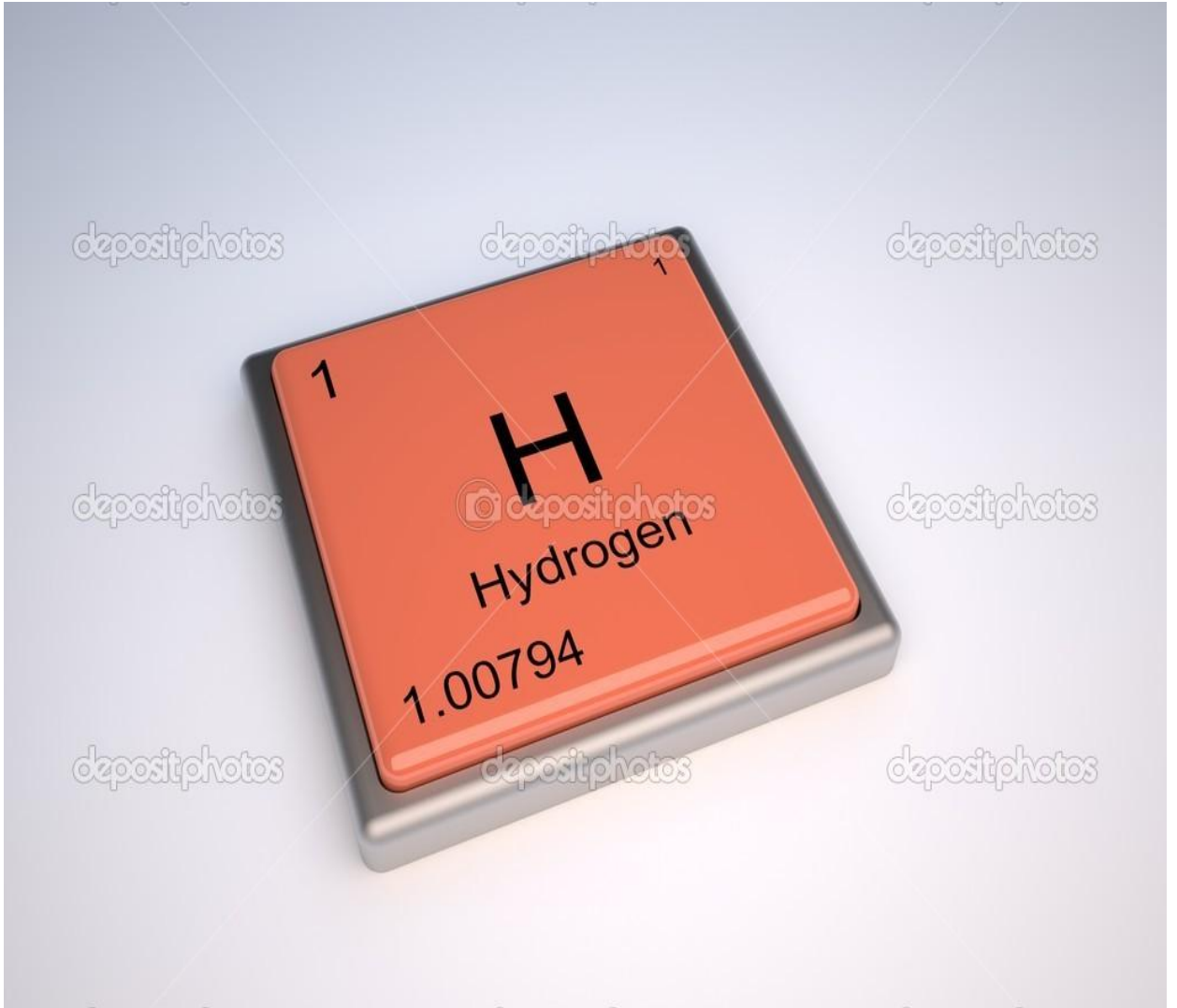
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΧΗΜΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ

#### 2.1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ

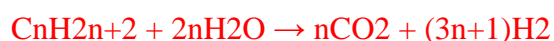
Το χημικό στοιχείο υδρογόνο είναι ένα αμέταλλο με ατομικό αριθμό 1 και ατομικό βάρος 1,008. Το υδρογόνο είναι το πρώτο στοιχείο του περιοδικού πίνακα και συμβολίζεται με H. Σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας βρίσκεται σε αέρια κατάσταση. Κατά την καύση του υδρογόνου σχηματίζεται νερό. Το όνομα του στοιχείου δόθηκε από τον Γάλλο χημικό Λαβουαζιέ (Antoine Lavoisier) και έχει τις ρίζες του στις λέξεις της αρχαίας ελληνικής γλώσσας «ύδωρ» και «γένομαι». Το υδρογόνο είναι το πιο άφθονο χημικό στοιχείο στον Γαλαξία όπου απαντάται σε δεκαπλάσια περίπου αναλογία σε σχέση με το ήλιο, το δεύτερο κατά σειρά αφθονίας χημικό στοιχείο. Συγκεντρώνεται υπό την επίδραση των δυνάμεων της βαρύτητας στους αστέρες, όπου, μέσω μιας σειράς θερμοπυρηνικών αντιδράσεων μετατρέπεται σε ήλιο. Η διαδικασία αυτή που λαμβάνει χώρα στον Ήλιο και στους άλλους αστέρες συνοδεύεται από την απελευθέρωση τεραστίων ποσών ενέργειας (της αστρικής ενέργειας). Παρά την πολύ μεγάλη του αναλογία του στο Σύμπαν, η οποία εκτιμάται ότι ανέρχεται στο 75% της μάζας του, το υδρογόνο αντιπροσωπεύει μόλις το 0,14% του στερεού φλοιού της Γης. Απαντάται, εντούτοις, σε πολύ μεγάλες ποσότητες ως συστατικό του νερού όπου περιέχεται σε αναλογία περίπου 11% των θαλασσών, των λιμνών, των ποταμών των πάγων και της ατμόσφαιρας. Έτσι υπολογίζεται ότι αποτελεί το 0,9% της μάζας ολόκληρου του πλανήτη. Η παρουσία, πάντως, ελεύθερου αερίου υδρογόνου στην ατμόσφαιρα παραμένει χαμηλή εξαιτίας της συνεχούς διαφυγής των μορίων του προς το διάστημα. Καθώς υπεισέρχεται στη σύσταση των πολυάριθμων οργανικών ενώσεων το υδρογόνο συναντάται σε όλους τους φυτικούς και ζωικούς ιστούς καθώς και στο πετρέλαιο. Έτσι όπως και ο άνθρακας σχηματίζει τεράστιο αριθμό χημικών ενώσεων ενώ ενώνεται με όλα τα χημικά στοιχεία εκτός από τα ευγενή αέρια. Είναι μάλιστα πολύ πιθανό οι ενώσεις του υδρογόνου να είναι περισσότερες κι απ' αυτές ακόμη τις ενώσεις του άνθρακα. Ο Παράκελσος γερμανοελβετός αλχημιστής και γιατρός του 16ου αιώνα ήταν ο πρώτος ο οποίος χωρίς να το γνωρίζει πειραματίστηκε με το υδρογόνο. Διαπίστωσε την έκλυση ενός εύφλεκτου αερίου κατά την κατεργασία ορισμένων μετάλλων με οξέα. Για μεγάλη χρονική περίοδο ωστόσο υπήρχε σύγχυση ανάμεσα στο αέριο αυτό και σε άλλα καύσιμα αέρια όπως είναι το

μονοξείδιο του άνθρακα και οι αέριοι υδρογονάνθρακες. Το 1766 ο Άγγλος χημικός και φυσικός Κάβεντις (Henry Cavendish) απέδειξε ότι το υδρογόνο το οποίο ήταν τότε γνωστό με τις ονομασίες «εύφλεκτος αέρας», «φλογιστόν» και «εύφλεκτο στοιχείο» διακρίνεται από τα άλλα εύφλεκτα αέρια λόγω της χαμηλής του πυκνότητας και του γεγονότος ότι παράγεται συγκεκριμένος όγκος του από την αντίδραση δεδομένων ποσοτήτων οξέων και μετάλλων. Το 1781 ο Κάβεντις επιβεβαίωσε ορισμένες παλαιότερες παρατηρήσεις του ότι το νερό είναι προϊόν της καύσης του υδρογόνου. Με αφορμή το γεγονός αυτό ο Γάλλος χημικός Λαβουαζιέ ο οποίος θεωρείται πατέρας της σύγχρονης χημείας έδωσε στο στοιχείο αυτό την ονομασία «υδρογόνο» η οποία και καθιερώθηκε. Το 1929 ο Γερμανός φυσικοχημικός Μπόνχεφερ (Karl Friedrich Bonhoeffer) και ο Αυστριακός χημικός Χάρτεκ (Paul Harteck) απέδειξαν βασιζόμενοι σε μια παλαιότερη θεωρητική εργασία ότι το κοινό αέριο υδρογόνο ( $H_2$ ) είναι στην πραγματικότητα ένα μίγμα δύο ειδών μορίων του ορθό-και του παρα-υδρογόνου. Χάρη στην απλή δομή των μορίων του υδρογόνου οι ιδιότητες τους είναι δυνατό να συναχθούν θεωρητικώς με σχετική ευκολία. Έτσι το υδρογόνο συχνά χρησιμοποιείται ως πρότυπο κατά τη μελέτη πολυπλοκότερων ατόμων αφού τα συμπεράσματα που προκύπτουν γι' αυτό είναι δυνατόν να εφαρμοστούν ποιοτικώς και στην περίπτωση άλλων ατόμων.



## 2.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Η συγκέντρωση καθαρού αέριου υδρογόνου στην ατμόσφαιρα είναι αμελητέα καθώς τα μόρια του υδρογόνου λόγω του χαμηλού τους βάρους διαφεύγουν προς το διάστημα. Έτσι τίθεται το πρόβλημα της παρασκευής του. Οι μέθοδοι για την παρασκευή του υδρογόνου είναι πολυάριθμοι και χωρίζονται ενδεικτικά σε τέσσερις κατηγορίες: τις θερμοχημικές αντιδράσεις, τις ηλεκτρολυτικές, τις φωτολυτικές καθώς και τις αντιδράσεις απλής αντικατάστασης. Η σημαντικότερη βιομηχανική μέθοδος για την παρασκευή του υδρογόνου αφορά την κατεργασία με υδρατμούς αερίων υδρογονανθράκων ή υδρογονανθράκων σε κατάσταση ατμών υπό υψηλή πίεση και σε θερμοκρασίες 650 και 950°C παρουσία νικελίου ως καταλύτη.



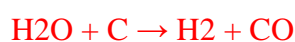
Με την τεχνική αυτή παράγεται ένα μίγμα υδρογόνου και οξειδίων του άνθρακα το οποίο είναι δυνατόν να υποβληθεί περαιτέρω σε διάφορες κατεργασίες αναλόγως των εφαρμογών για τις οποίες προορίζεται το υδρογόνο. Μία άλλη σημαντική διαδικασία για την παραγωγή υδρογόνου είναι η μερική οξείδωση υδρογονανθράκων απουσία καταλύτη υπό υψηλές πιέσεις:



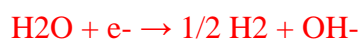
Η μέθοδος αυτή επιβάλλει την ύπαρξη ενός συστήματος τροφοδοσίας για τον ακριβή καθορισμό του ρυθμού εισαγωγής του οξυγόνου και των υδρογονανθράκων τη χρησιμοποίηση καυστήρων ειδικού τύπου οι οποίοι να εξασφαλίζουν την ταχεία ανάμιξη των αντιδρώντων σωμάτων, την κατασκευή των αντιδραστήρων από ανθεκτικά πυρίμαχα υλικά και την εισαγωγή ενός συστήματος ψύξης για την απαγωγή της θερμότητας από τα αέρια προϊόντα της αντίδρασης, καθώς πρόκειται για μια εξώθερμη διαδικασία, σε αντίθεση με την προηγούμενη διαδικασία, που είναι ενδόθερμη. Έχει αναπτυχθεί ακόμα και μια τρίτη μέθοδος η οποία αποτελεί συνδυασμό των δύο παραπάνω τεχνικών. Συγκεκριμένα πρόκειται για τη μερική οξείδωση υδρογονανθράκων υπό πίεση παρουσία καταλύτη κατά την οποία η εκλύομενη θερμότητα αξιοποιείται για τη διατήρηση της κλίσης του καταλύτη στην απαιτούμενη θερμοκρασία χωρίς εξωτερική θέρμανση. Οι υδρογονάνθρακες αφού αναμιχθούν

με υπέρθερμους υδρατμούς και προθερμανθούν εισάγονται μαζί με αέριο οξυγόνο το οποίο έχει επίσης προθερμανθεί σε μια διάταξη διάχυσης τοποθετημένη στην κορυφή του καταλυτικού αντιδραστήρα. Το οξυγόνο αντιδρά με τους υδρογονάνθρακες στον χώρο πάνω από τον καταλύτη ενώ το μίγμα προωθείται ακολούθως μέσα από την κλίνη του καταλύτη νικελίου όπου οι αντιδράσεις ανάμεσα στους υδρογονάνθρακες και τους υδρατμούς τελικά οδηγούνται σε μια κατάσταση σχεδόν ισορροπίας. Πριν από το 1940 το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου

βασιζόταν στο σχηματισμό υδραερίου (ισομοριακού μίγματος υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα) που λαμβάνεται κατά τη διοχέτευση υδρατμών πάνω από διάλυρο άνθρακα:



Μετά το 1970 όμως πολύ μικρό μέρος της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου λαμβάνεται μ' αυτήν τη διαδικασία. Για μεγάλη χρονική περίοδο μικρά σχετικά ποσά υδρογόνου παρήχθησαν με ηλεκτρόλυση υδατικών διαλυμάτων υδροξειδίου του νατρίου ή αλάτων. Η ηλεκτρολυτική παρασκευή του υδρογόνου βασίζεται στην ακόλουθη ημιαντίδραση αναγωγής του νερού:



Στα χημικά εργαστήρια η παρασκευή υδρογόνου είναι δυνατόν να επιτευχθεί κατά την επίδραση αραιού διαλύματος θεικού ή υδροχλωρικού οξέος σ' ένα δραστικό μέταλλο όπως ο ψευδάργυρος.



Για τον διαχωρισμό του υδρογόνου από το μονοξείδιο του άνθρακα μαζί με το οποίο συνήθως παράγεται έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές όπως για παράδειγμα η μέθοδος της αεριώδους διάχυσης. Κατ' αυτήν το αέριο μίγμα ρέει υπό πίεση μέσα από δέσμες μικροσκοπικών διάτρητων πολυεστερικών ινών, διαπιδύοντας διαμέσου των τοιχωμάτων τους.

Άλλες μέθοδοι παρασκευής του υδρογόνου συνοπτικά είναι οι παρακάτω:

- Από το φυσικό αέριο ή το φωταέριο με κλασματική διαπίδυση.
- Με την επίδραση νερού «εν ψυχρώ» σε νάτριο:  $\text{H}_2\text{O} + \text{Na} \rightarrow \text{NaOH} + 1/2 \text{H}_2$

- Με την επίδραση υπέρθερμων υδρατμών σε διάλυτο σίδηρο: $4\text{H}_2\text{O} + 3\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2$
- Με την επίδραση νερού σε υδρολίθιο: $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{LiH} \rightarrow 2\text{LiO} + 3\text{H}_2$
- Από τις βάσεις με την επίδραση επαμφοτεριζόντων στοιχείων: $3\text{KOH} + \text{Al} \rightarrow \text{K}_3\text{AlO}_3 + 3/2 \text{H}_2$
- Από την πυρόλυση του μεθανίου: $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$
- Με υδρόλυση στους  $5000^\circ\text{C}$ : $2\text{H}_2\text{O} + \text{ενέργεια} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$

Είναι προφανές ότι η γενικευμένη χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο προϋποθέτει την προέλευση του υδρογόνου από μία μέθοδο η οποία είναι αποδοτική από μία πηγή που ιδανικά είναι ανεξάντλητη με την κατά το δυνατόν λιγότερη απαιτούμενη ενέργεια ιδανικά προερχόμενη από ανανεώσιμες πηγές και τέλος από μία αντίδραση η οποία δεν απελευθερώνει ρυπογόνες ουσίες στην ατμόσφαιρα (όπως π.χ. μονοξείδιο ή διοξείδιο του άνθρακα). Φαίνεται λοιπόν ως ιδανική λύση η παρασκευή του υδρογόνου από την ηλεκτρόλυση υδατικών διαλυμάτων ακόμα και θαλασσινού νερού με την αναγκαία ηλεκτρική ενέργεια προερχόμενη από ανανεώσιμες πηγές. Έτσι λύνεται το πρόβλημα των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου όχι μόνο κατά την παραγωγή χρήσιμου έργου από την καύση του εναλλακτικού καυσίμου αλλά και κατά την παραγωγή του ίδιου του καυσίμου. Από την άλλη πλευρά το συνολικό ισοζύγιο ενέργειας είναι θετικό εφόσον η κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή του καυσίμου είναι στην ουσία μηδενική αν η ενέργεια βέβαια προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές.

# ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Μέθοδοι Παραγωγής:

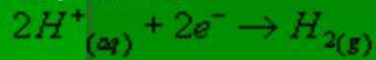
Θερμοχημικές

Ηλεκτρολυση

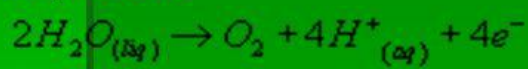
Φωτολυτικές

## Ηλεκτρόλυση Νερού

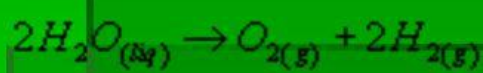
Στην κάθοδο



Στην άνοδο

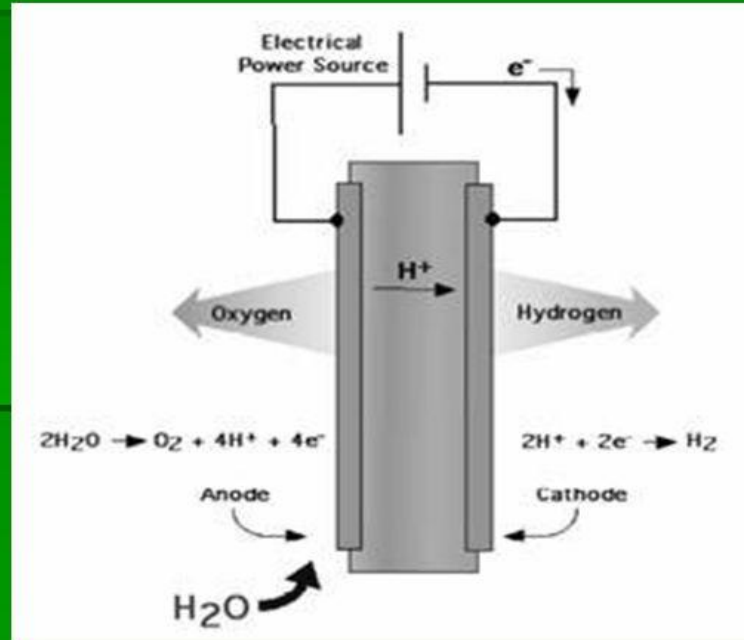


Τελικά



- Απόδοση 77%

- Αργός κινητικός μηχανισμός αντίδρασης καθόδου → Χρήση καταλύτη (Pt)





### **2.3. ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ**

Το υδρογόνο σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας είναι αέριο άχρωμο, άοσμο, άγευστο και εύφλεκτο. Όπως και τα περισσότερα αέρια το μόριο του υδρογόνου είναι διατομικό. Κάθε άτομο υδρογόνου αποτελείται από έναν πυρήνα γύρω από τον οποίο περιφέρεται ένα ηλεκτρόνιο. Το υδρογόνο απαντάται στη φύση με τη μορφή τριών ισότοπων του με μαζικούς αριθμούς 1, 2 και 3. Απ' αυτά το πρώτο που είναι γνωστό ως ελαφρύ υδρογόνο ή απλά υδρογόνο ή πρώτιο ( $1\text{H}$  ή απλά  $\text{H}$ ) αποτελείται από άτομα οι πυρήνες των οποίων συνίστανται από ένα απλό πρωτόνιο. Το ισότοπό του με μαζικό αριθμό 2 γνωστό ως βαρύ υδρογόνο ή δευτέριο ( $2\text{H}$  ή  $\text{D}$ ) περιέχεται στο φυσικό υδρογόνο σε αναλογία 0,0156% ενώ οι πυρήνες των ατόμων του αποτελούνται από ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο. Το ισότοπο του τέλος με μαζικό αριθμό 3 γνωστό ως υπερβαρύ υδρογόνο ή τρίτιο ( $3\text{H}$  ή  $\text{T}$ ) περιέχεται στο υδρογόνο σε αναλογία 10-16-10-15%, ενώ οι πυρήνες των ατόμων του αποτελούνται από ένα πρωτόνιο και δύο νετρόνια. Το τρίτιο είναι ραδιενεργό με χρόνο ημίσειας ζωής τα 12,4 χρόνια και σχηματίζεται κατά την επίδραση των νετρονίων της κοσμικής ακτινοβολίας στο ατμοσφαιρικό άζωτο. Η απόδοση ξεχωριστών ονομάτων και χημικών συμβόλων στα ισότοπα του υδρογόνου αιτιολογείται από το γεγονός ότι παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στις ιδιότητές τους.

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι κυριότερες φυσικές ιδιότητες του υδρογόνου.

### Φυσικές Ιδιότητες του Υδρογόνου

Ατομικό Υδρογόνο	Πρώτιο	Δευτέριο
<b>Ιδιότητα</b>		
Σύμβολο	H	D
Ατομικός αριθμός	1	1
Ατομικό βάρος	1,008	2,0141
Ενέργεια ιοντισμού (eV)	13,595	13,6
Ηλεκτροσυγγένεια (eV)	0,754	-
Πυρηνικό σπιν	1/2	1
Πυρηνική μαγνητική διπολική ροπή (Πυρηνικά μαγνητόνια)	2,7927	0,8574
Πυρηνική ηλεκτρική τετραπολική ροπή (cm <sup>2</sup> )	0	2,77x10 <sup>-27</sup>
Ηλεκτραρνητικότητα (κατά 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 (ώγκστρεμ)	0,7416	0,7416
Ενέργεια διάστασης (25°C) (kcal/mol)	104,19	105,97
Ενέργεια ιοντισμού (eV)	15,427	15,457
Ειδικό βάρος (στερεού)	0,08671	0,1967

Σημείο τήξης (°C)	-259,20	-254,43
Ειδικό βάρος (υγρού)	0,07099	0,1630
Λανθάνουσα θερμότητα τήξης (cal/mol)	28	47
Σημείο ζέσης (°C)	-252,77	-252,77
Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης	216	293
Κρίσιμη θερμοκρασία (°C)	-240	-234,8
Κρίσιμη πίεση (atm)	13	16,4
Κρίσιμη πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	0,0310	0,0668
Θερμότητα καύσης(προς υδρατμούς kcal/mol)	-57,796	-59,564

**Πίνακας 2.1: Οι φυσικές ιδιότητες των ισοτόπων του υδρογόνου, πρώτιο και δευτέριο.**

Διαπιστώνεται ότι το μοριακό υδρογόνο χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά χαμηλά σημεία τήξης και ζέσης, γεγονός που αποδίδεται στις πολύ ασθενείς ελκτικές δυνάμεις οι οποίες ασκούνται μεταξύ των μορίων του. Η ύπαρξη αυτών των διαμοριακών δυνάμεων επιβεβαιώνεται επίσης και από την ανύψωση της θερμοκρασίας του αέριου υδρογόνου όταν αυτό εκτονώνεται (φέρεται δηλαδή από χαμηλές σε υψηλές πιέσεις) στη συνήθη θερμοκρασία σε αντίθεση με τα περισσότερα αέρια η θερμοκρασία των οποίων μειώνεται κάτω από αντίστοιχες συνθήκες. Το υδρογόνο είναι διαφανές στις υπέρυθρες, ορατές και υπεριώδεις φωτεινές ακτινοβολίες με μήκη κύματος μικρότερα από 1800 ώγκστρεμ. Καθώς το μοριακό του βάρος είναι μικρότερο από το μοριακό βάρος οποιουδήποτε άλλου αερίου τα μόριά του χαρακτηρίζονται από ταχύτητες μεγαλύτερες από εκείνες όλων των άλλων αερίων για μια δεδομένη θερμοκρασία. Πράγματι, το αέριο υδρογόνο διαχέεται ταχύτερα από κάθε άλλο αέριο, ενώ η κινητική ενέργεια κατανέμεται μεταξύ των μορίων του με γρηγορότερο ρυθμό σε σύγκριση με τα υπόλοιπα αέρια. Έτσι το υδρογόνο χαρακτηρίζεται από τη μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα σε σύγκριση με τα άλλα αέρια.

Στα μόρια του υδρογόνου δύο άτομα υδρογόνου συνδέονται μεταξύ τους με ομοιοπολικό χημικό δεσμό μέσω ενός κοινού ζεύγους ηλεκτρονίων. Έτσι στο σύστημα αυτό όπως και

στην περίπτωση του απλού ατόμου υδρογόνου αντιστοιχούν πολυάριθμες επιτρεπόμενες ενεργειακές στάθμες.



**Εικόνα 2.1**

Στην εικόνα 2.1 απεικονίζεται η αόρατη φλόγα υδρογόνου που αναφλέγει σκούπα κατασκευασμένη από καλαμπόκι. Ο τρόπος αυτός συχνά χρησιμοποιείται από το προσωπικό ασφαλείας βιομηχανιών, σχετικών με τεχνολογίες υδρογόνου, για την ανίχνευση φλόγας υδρογόνου.

## 2.4. ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Τα μόρια του υδρογόνου δίστανται σε απλά άτομα ( $H_2 \rightarrow 2H$ ) εφόσον παρασχεθεί σ' αυτά ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη απ' αυτήν που απαιτείται για τη διάσπαση του υπάρχοντος χημικού δεσμού. Η ενέργεια διάστασης του μοριακού υδρογόνου είναι ίση με 104kcal/mol και είναι δυνατό να προσφερθεί όταν π.χ. το αέριο έλθει σε επαφή μ' ένα λευκοκυρωμένο νήμα βολφραμίου ή κατά τη δημιουργία ηλεκτρικής εκκένωσης μέσα στη μάζα του. Αν το ατομικό υδρογόνο σχηματίζεται υπό ελαττωμένη πίεση διατηρείται σ' αυτή την κατάσταση για σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα, π.χ. για 0,3s υπό πίεση 0,5mmHg. Το ατομικό υδρογόνο είναι εξαιρετικά δραστικό από χημικής απόψεως.

Ενώνεται με τα περισσότερα χημικά στοιχεία, σχηματίζοντας υδρίδια, όπως είναι π.χ. Το υδρίδιο του νατρίου (NaH), ή ανάγει τα οξείδια των μετάλλων, επαναφέροντας τα αντίστοιχα μέταλλα στην ελεύθερη κατάσταση. Οι επιφάνειες των μετάλλων τα οποία δεν ενώνονται με το ατομικό υδρογόνο προκειμένου να σχηματίσουν υδρίδια (όπως π.χ. του λευκόχρυσου), καταλύουν την αντίδραση επανασύνδεσης των ατόμων υδρογόνου σε μόρια υδρογόνου, ενώ η θερμότητα που απελευθερώνεται από την αντίδραση αυτή είναι δυνατόν να οδηγήσει τη μεταλλική επιφάνεια στη κατάσταση της λευκοπύρωσης. Το μοριακό υδρογόνο είναι δυνατόν να αντιδράσει με πολλά χημικά στοιχεία και ενώσεις, αλλά στη συνήθη θερμοκρασία οι ταχύτητες των αντίστοιχων αντιδράσεων είναι τόσο μικρές ώστε να θεωρούνται αμελητέες. Η φαινομενική αυτή αδράνεια του μοριακού υδρογόνου συνδέεται και με την υψηλή ενέργεια διάστασης των μορίων του. Σε υψηλές θερμοκρασίες εντούτοις οι ρυθμοί αυτών των αντιδράσεων γίνονται σημαντικοί.

Το υδρογόνο σχηματίζει με ορισμένα αέρια σώματα όπως είναι το χλώριο και το οξυγόνο εκρηκτικά μίγματα τα οποία εκρήγνυνται βιαίως όταν υποστούν την κατάλληλη διέγερση. Έτσι ένα μίγμα υδρογόνου και χλωρίου αντιδρά με εκρηκτικό τρόπο όταν φωτίζεται από ορισμένες ακτινοβολίες ή κατά την ανάπτυξη σπινθήρων παρέχοντας υδροχλώριο σύμφωνα με την αντίδραση:  $H_2 + Cl_2 \rightarrow 2HCl$

Τα μίγματα υδρογόνου και οξυγόνου αντιδρούν με υπολογίσιμες ταχύτητες μόνο σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 300°C, σύμφωνα με την αντίδραση:  $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

Τέτοια μίγματα περιεκτικότητας σε υδρογόνο μεταξύ 4 και 75% αναφλέγονται όταν θερμαίνονται στους 550-600°C ή φέρονται σε επαφή με έναν καταλύτη, έναν σπινθήρα ή μία φλόγα. Η έκρηξη ενός μίγματος υδρογόνου και οξυγόνου αναλογίας 2:1 είναι εξαιρετικά βίαιη. Το υδρογόνο αντιδρά με όλα σχεδόν τα μέταλλα και τα αμέταλλα χημικά στοιχεία σε υψηλές θερμοκρασίες. Κάτω από αυξημένες θερμοκρασίες και πιέσεις το υδρογόνο ανάγει τα

οξειδία των περισσότερων μετάλλων και πολλά μεταλλικά άλατα προς ελεύθερα μέταλλα. Παραδείγματος χάριν, αντιδρά με το πρωτοξείδιο του σιδήρου σχηματίζοντας μεταλλικό σίδηρο και νερό:  $\text{H}_2 + \text{FeO} \rightarrow \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$

ή με το χλωριούχο παλλάδιο προς μεταλλικό παλλάδιο και υδροχλώριο:  $\text{H}_2 + \text{PdCl}_2 \rightarrow \text{Pd} + 2\text{HCl}$

Το υδρογόνο απορροφάται από πολλά στοιχεία μετάπτωσης σχηματίζοντας υδρίδια μεταλλικής κατασκευής, δηλαδή μια μορφή κράματος. Σ' αυτά, το κρυσταλλικό πλέγμα του μετάλλου απλώς διαστέλλεται ώστε να περιλάβει τα άτομα του υδρογόνου τα οποία τοποθετούνται σε διαπλεγματικές θέσεις χωρίς να συμβαίνει κάποια πραγματική χημική μεταβολή.

## **2.5. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ**

Λόγω της εξαιρετικά χαμηλής πυκνότητάς του το υδρογόνο κατά την αποθήκευση του ως ασυμπίεστο ρευστό καταλαμβάνει εξαιρετικά μεγάλο όγκο. Αυτή η ιδιότητα του υδρογόνου αποτελεί ίσως τον σημαντικότερο ανασταλτικό παράγοντα στην άμεση ανάπτυξη και εδραίωση της οικονομίας υδρογόνου. Για παράδειγμα, 1kg υδρογόνου σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (20°C, 1atm) καταλαμβάνει όγκο 11m<sup>3</sup>.

Επομένως για την χρήση του ως καύσιμο και την απόδοση ενέργειας της ίδιας τάξης μεγέθους με τα συμβατικά καύσιμα πρέπει να αυξηθεί με κάποιο τρόπο η πυκνότητα του ώστε η δεξαμενή καυσίμου στο όχημα να καταλαμβάνει λογικές διαστάσεις. Έτσι το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί στο όχημα με τους εξής αναγνωρισμένους από την επιστημονική κοινότητα τρόπους:

- με τη μορφή συμπιεσμένου αερίου σε εξαιρετικά υψηλές πιέσεις
- ως κρυογονικό υγρό σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες
- με τη μορφή μεταλλικού υδριδίου, όπου αέριο υδρογόνο σχηματίζει χημικές ενώσεις με συγκεκριμένα μέταλλα ή μεταλλικά κράματα
- ως αέριο υδρογόνο προσροφημένο από κάποιο στερεό όπως οι νανοσωλήνες άνθρακα (carbon nanotubes).

Στην παρούσα φάση η λύση που ευρέως χρησιμοποιείται είναι αυτή της αποθήκευσης του υδρογόνου ως συμπιεσμένο αέριο ενώ η πλέον υποσχόμενη είναι αυτή της αποθήκευσής του σε υδρίδια μετάλλων. Σήμερα πάντως τα συστήματα αποθήκευσης κρυογονικού υδρογόνου παρά το υψηλό τους κόστος και την πολυπλοκότητά τους αποτελούν την χρυσή τομή μεταξύ βάρους και αυτονομίας. Απ' την άλλη μεριά η τεχνολογία της αποθήκευσης σε νανοσωλήνες

άνθρακα αν και υποσχόμενη για το μέλλον είναι ακόμη σχετικά καινούργια και τα πειραματικά αποτελέσματα δεν είναι τόσο ξεκάθαρα αλλά μάλλον αμφιλεγόμενα.



### **2.5.1. Αποθήκευση του υδρογόνου ως συμπιεσμένο αέριο**

Η πιο κοινή μέθοδος αποθήκευσης του υδρογόνου είναι αυτή της συμπίεσής του σε φιάλες αερίου. Οι πιέσεις που αναφέρονται στην σχετική βιβλιογραφία μπορεί να διαφέρουν από 345bar ή περίπου 5000psi έως και 690bar ή περίπου 10000psi. Η αποθήκευση σε συστήματα υψηλής πίεσης αυξάνει την πυκνότητα ενέργειας του υδρογόνου και είναι σαφώς απαραίτητη για την μείωση του όγκου των δεξαμενών που μεταφέρονται στον περιορισμένο διαθέσιμο χώρο ενός αυτοκινήτου. Η αναγκαιότητα συμπίεσης του υδρογόνου, όμως, προϋποθέτει την κατανάλωση σημαντικών ποσών ενέργειας γεγονός που μειώνει την συνολική απόδοση του συστήματος αποθήκευσης και αυξάνει το κόστος λειτουργίας και διαχείρισης. Συνήθως χρησιμοποιούνται φιάλες κατασκευασμένες από κράματα αλουμινίου ενισχυμένες με συνθετικά υλικά αν και η αεροδιαστημική βιομηχανία παρέχει την τεχνολογία για την κατασκευή κυλίνδρων από ειδικά κράματα αλουμινίου ενισχυμένα με άνθρακα ικανά να

αποθηκεύσουν υδρογόνο σε πιέσεις μέχρι και 700bar. Βέβαια αυτού του είδους οι φιάλες είναι ακόμη πολύ ακριβές για την εμπορική τους χρήση σε προϊόντα αυτοκίνησης.



### **2.5.2. Αποθήκευση του υδρογόνου ως κρυογονικό υγρό**

Η πλέον αποδεκτή λύση σήμερα για βελτιστοποίηση του βάρους των δεξαμενών (ρεζερβουάρ) και της αυτονομίας του οχήματος, μπορεί να επιτευχθεί από την αποθήκευση υδροποιημένου υδρογόνου σε κρυογονικές δεξαμενές. Η αποθήκευση του υδρογόνου ως κρυογονικό υγρό είναι εφικτή στην θερμοκρασία των 20K ή  $-253^{\circ}\text{C}$ . Με την μέθοδο αυτή το ειδικό περιεχόμενο ενέργειας του υδρογόνου αυξάνεται κατά περίπου επτά φορές σε σχέση με το περιεχόμενο ενέργειας του υδρογόνου αποθηκευμένου σε πίεση 700bar. Στην περίπτωση του κρυογονικώς αποθηκευμένου υδρογόνου το ειδικό βάρος της δεξαμενής είναι περίπου 7kg ανά 1kg υδρογόνου και ο ειδικός όγκος της είναι 36lt ανά kg υδροποιημένου υδρογόνου. Εντούτοις η διαδικασία υδροποίησης του υδρογόνου απαιτεί μεγάλα ποσά ενέργειας που μπορεί να φτάσουν ακόμη και το 40% της ενέργειας του υδρογόνου που αποθηκεύεται.



Πέραν αυτού ένα ακόμη πρόβλημα είναι η ατμοποίηση του περιεχομένου υδρογόνου (περίπου 2% ανά ημέρα) που αφ' ενός υπαγορεύει την κατά το δυνατόν τέλεια θερμική μόνωση της δεξαμενής και αφ' ετέρου απαγορεύει την αποθήκευση του καυσίμου για μακρές χρονικές περιόδους.



### **2.5.3. Αποθήκευση του υδρογόνου σε υδρίδια μετάλλων**

Υδρίδιο στην ουσία αποκαλείται η ένωση κάθε στοιχείου με το υδρογόνο. Μεγάλος αριθμός μετάλλων και μεταλλικών κραμάτων ενώνονται με το υδρογόνο και σχηματίζουν υδρίδια μετάλλων. Κατά τις ενώσεις αυτές, αέριο υδρογόνο σε μεγάλες ποσότητες έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του μετάλλου (ή του μεταλλικού κράματος), συχνά παρουσία καταλύτη και τα άτομα του υδρογόνου διαχέονται στο εσωτερικό μετάλλου, εισχωρούν στο μεταλλικό κρυσταλλικό πλέγμα και καταλαμβάνουν θέσεις ανάμεσα στα μεταλλικά άτομα. Η αντίδραση αυτή του υδρογόνου με τα μέταλλα είναι μία εξώθερμη αντίδραση και είναι απολύτως αναστρέψιμη. Με άλλα λόγια, θερμική ενέργεια απαιτείται για την αποδέσμευση των ατόμων

υδρογόνου από το μεταλλικό πλέγμα και αυτή πρακτικά παρέχεται από την θερμότητα των καυσαερίων του κινητήρα υδρογόνου που σε κάποιες περιπτώσεις ανεβάζουν την θερμοκρασία των υδριδίων στους 600K.

Ο ρυθμός απορρόφησης του υδρογόνου από το μέταλλο εξαρτάται από τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας υπό τις οποίες το αέριο υδρογόνο έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του μετάλλου με τις συνθήκες αυτές να δρουν αντίστροφα. Σύμφωνα με τα παραπάνω, μείωση της θερμοκρασίας και αύξηση της πίεσης επιταχύνει τον σχηματισμό του υδριδίου. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα της διαδικασίας είναι:

- Η δομή του μετάλλου, καθώς η εξέλιξη της νανοτεχνολογίας επιτρέπει τη χρήση νανοκρυσταλλικών υδριδίων στα οποία το μέγεθος των δομικών τους λίθων στην κλίμακα του νανομέτρου επιταχύνει την κινητική της απορρόφησης του υδρογόνου από αυτά.
- Η καθαρότητα της επιφάνειας του μετάλλου καθώς ο σχηματισμός οξειδίων ή άλλων προσμίξεων σε αυτή δυσχεραίνει τη διαδικασία απορρόφησης.
- Η παρουσία καταλύτη καθώς οι αντιδράσεις του υδρογόνου είναι αρκετά ευαίσθητες στην κατάλυση η οποία επιδρά επιταχυντικά στην κινητική των αντιδράσεων.
- Η ταχύτερη και ανεμπόδιση μεταφορά θερμότητας από το υδρίδιο στο περιβάλλον κατά τον σχηματισμό του καθώς η οποιαδήποτε παρεμπόδιση έκλυσης της θερμότητας επιβραδύνει την διαδικασία προσρόφησης.

Μία αποτελεσματική και επιτυχής διαδικασία σχηματισμού ενός υδριδίου μετάλλου πρέπει να χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα γνωρίσματα:

- Υψηλή χωρητικότητα σε υδρογόνο.
- Μεγάλη ταχύτητα απορρόφησης και αποδέσμευσης του υδρογόνου.
- Καθαρότητα σύστασης του υδρογόνου καθώς αλλοιώσεις στη σύστασή του μειώνουν τη χωρητικότητα αποθήκευσης.
- Πρακτικές κατά το δυνατόν συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας για την ενεργοποίηση των μηχανισμών απορρόφησης και αποδέσμευσης.
- Ελάχιστη αλλοίωση της σύστασης του μετάλλου ύστερα από συνεχείς κύκλους υδρογόνωσης – αφυδρογόνωσης.

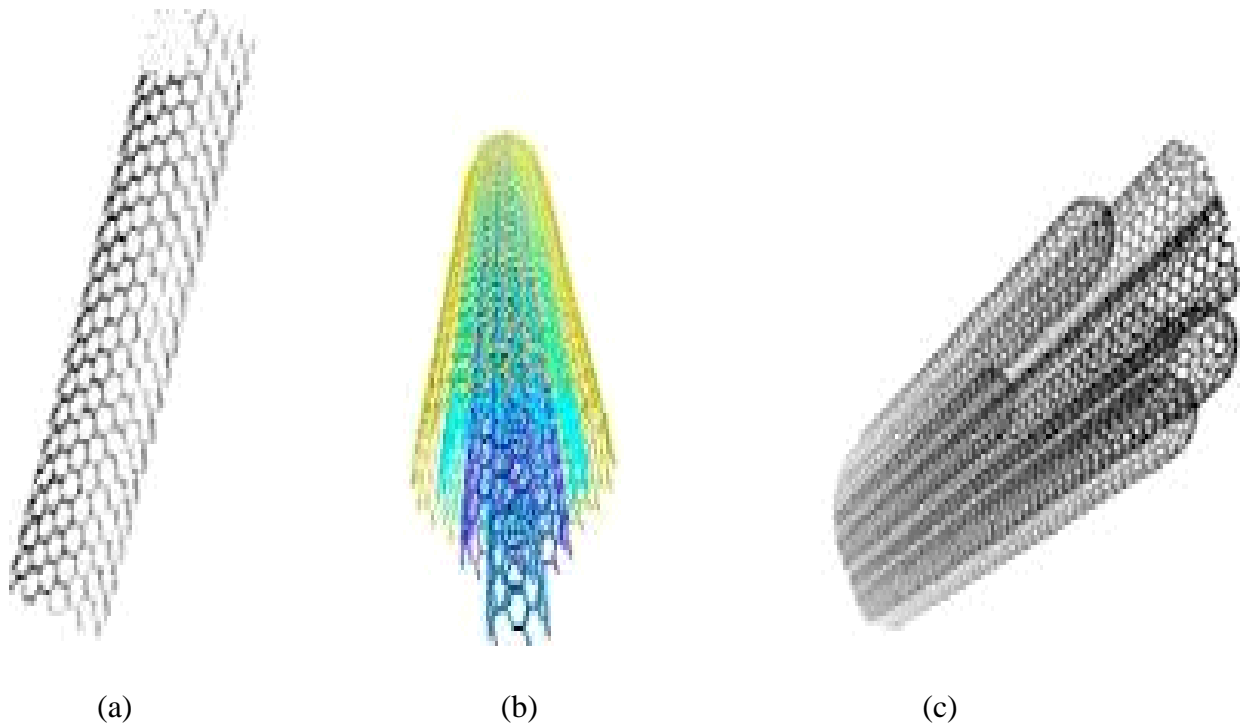
Αν και τα υδρίδια μετάλλου έχουν προταθεί για την αποθήκευση του υδρογόνου ήδη από το 1960, μόνο τα τελευταία χρόνια αναθερμάνθηκε το ενδιαφέρον των επιστημόνων για το συγκεκριμένο μέσο αποθήκευσης υδρογόνου γεγονός που οφείλεται κατά κύριο λόγο στα βελτιωμένα χαρακτηριστικά τους τα οποία προκύπτουν από την επίτευξη των δομικών τους λίθων σε διαστάσεις νανομέτρου.



#### **2.5.4. Αποθήκευση του υδρογόνου σε νανοσωλήνες άνθρακα**

Η αποθήκευση του υδρογόνου με τη μορφή αερίου σε κάποιο στερεό όπως οι νανοσωλήνες άνθρακα (carbon nanotubes ή CNTs), είναι μία ακόμα υποσχόμενη και ασφαλής μέθοδος αποθήκευσης υψηλής τεχνολογίας και ικανοποιητικής σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα, απόδοσης. Η συγκεκριμένη τεχνολογία όμως βρίσκεται ακόμη σε εμβρυϊκό στάδιο και το τοπίο είναι ακόμη λίγο θολό καθώς τα πειραματικά δεδομένα δεν έχουν επαληθευτεί πλήρως ως προς την πρακτική τους εφαρμογή. Οι νανοσωλήνες άνθρακα είναι ομόκεντροι κύλινδροι γραφίτη νανοκρυσταλλικής δομής και διαμέτρου 1-2 $\mu\text{m}$  σχηματισμένοι από μοριακής κλίμακας φύλλα γραφίτη κλειστοί τουλάχιστον στο ένα άκρο τους με πενταμελείς δακτυλίους και εφευρέθηκαν το 1991 από τον Ιάπωνα Sumio Iijima. Οι νανοσωλήνες μπορεί να είναι πολυφλοιϊκοί (multi-wall nanotubes ή MWNTs) με ένα κεντρικό σωλήνα να περιβάλλεται από ένα ή περισσότερα στρώματα γραφίτη ή μονοφλοιϊκοί (single-wall nanotubes ή SWNTs) όπου αποτελούνται από ένα μόνο σωλήνα χωρίς επιπλέον στρώματα γραφίτη. Όταν οι νανοσωλήνες ομαδοποιούνται έχουμε τις λεγόμενες συστοιχίες ή δέσμες νανοσωλήνων (nanotubes bundles).

Οι νανοσωλήνες άνθρακα θεωρούνται ιδανικά υλικά καθώς χαρακτηρίζονται από μικρό βάρος μεγάλη χωρητικότητα και εξαιρετική σταθερότητα. Η μεγάλη κενότητα χώρου ειδικά στους μονοφλοιϊκούς νανοσωλήνες παρέχει τη δυνατότητα χρησιμοποίησής τους ως μέσο για την απορρόφηση και την αποθήκευση υδρογόνου με μηχανισμούς που δεν έχουν ακόμα πλήρως κατανοηθεί.



**Εικόνα 2.2:** (a). μονοφλοϊικός νανοσωλήνας, (b). πολυφλοϊικός νανοσωλήνας, (c). Συστοιχία νανοσωλήνων.

Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σε συστοιχίες μονοφλοϊικών νανοσωλήνων με τη μορφή ατομικού ή μοριακού υδρογόνου σε ποσοστό 5-10% κατά βάρος. Πειραματικά μοντέλα εξάλλου προβλέπουν ότι η χωρητικότητα των νανοσωλήνων σε υδρογόνο μπορεί να υπερβεί κατά βάρος το 14% ( $160\text{kgH}_2/\text{m}^3$ ). Υπάρχουν δύο τρόποι αποθήκευσης του υδρογόνου στην δομή των νανοσωλήνων. Ο πρώτος είναι η αποθήκευση υπό πίεση 71–82,4bar κλίμακα πιέσεων σημαντικά μικρότερη σε σχέση με τις απαιτούμενες πιέσεις άλλων μεθόδων όπως η συμπίεση αερίου υδρογόνου. Ο δεύτερος τρόπος είναι η ηλεκτροχημική μέθοδος κυκλικής φόρτισης και εκφόρτισης. Το υδρογόνο αποθηκεύεται στην εσωτερική και στην εξωτερική επιφάνεια των μονοφλοϊικών νανοσωλήνων καθώς και στον κενό χώρο του εσωτερικού τους. Η χωρητικότητα των μονοφλοϊικών νανοσωλήνων αυξάνεται με την αύξηση της διαμέτρου τους ιδιότητα που δεν ισχύει στην περίπτωση των πολυφλοϊικών νανοσωλήνων. Τέλος, οι μονοφλοϊικοί νανοσωλήνες άνθρακα παρέχουν τη δυνατότητα απορρόφησης μεγαλύτερων ποσοτήτων υδρογόνου από ότι οι πολυφλοϊικοί.



## 2.6. ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Η κυριότερη χρήση του υδρογόνου είναι για την παραγωγή αμμωνίας (NH<sub>3</sub>). Η αμμωνία είναι δυνατόν να παρασκευαστεί με τη μέθοδο Haber, κατά την οποία το υδρογόνο και το άζωτο αντιδρούν μεταξύ τους παρουσία καταλυτών υπό πίεση 1000atm και θερμοκρασία 500°C σύμφωνα με την αντίδραση:



Μεγάλα ποσά υδρογόνου, εξάλλου, χρησιμοποιούνται για την παρασκευή μεθυλικής αλκοόλης σύμφωνα με την αντίδραση:



η οποία πραγματοποιείται παρουσία ορισμένων μικτών καταλυτών, που περιέχουν οξειδία του ψευδαργύρου και του χρωμίου σε θερμοκρασίες μεταξύ 300 και 375°C και πιέσεις μεταξύ 275 και 350atm.

Μία άλλη σημαντική εφαρμογή του υδρογόνου αφορά την καταλυτική υδρογόνωση οργανικών ενώσεων. Τα ακόρεστα φυτικά και ζωικά λίπη και έλαια είναι δυνατόν να υποβληθούν σε υδρογόνωση για την παραγωγή μαργαρίνης, κ.λπ..

Το υδρογόνο χρησιμοποιείται επίσης για την αναγωγή των αλδεϋδών και των κετονών όπως επίσης και των λιπαρών οξέων και των εστέρων τους στις αντίστοιχες αλκοόλες. Οι αρωματικές ενώσεις είναι επίσης δυνατόν να αναχθούν στις αντίστοιχες αλεικυκλικές ενώσεις όπως συμβαίνει π.χ. κατά τη μετατροπή του βενζολίου σε κυκλοεξάνιο και της φαινόλης σε κυκλοεξανόλη. Οι νιτροενώσεις ανάγονται εύκολα με τη βοήθεια του υδρογόνου σε αμίνες. Το υδρογόνο έχει επίσης χρησιμοποιηθεί ως κύριο καύσιμο πυραύλων αναμεμιγμένο μ' ένα κατάλληλο οξειδωτικό μέσον όπως είναι το οξυγόνο ή το φθόριο και ως προωθητικό πυρηνοκίνητων πυραύλων και διαστημικών σκαφών.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα χρήση του υδρογόνου αναφέρεται στην άμεση αναγωγή των σιδηρομεταλλευμάτων σε μεταλλικό σίδηρο και των οξειδίων του βολφραμίου και του μολυβδαινίου στα αντίστοιχα μέταλλα. Πλούσιες σε υδρογόνο (αναγωγικές) ατμόσφαιρες χρησιμοποιούνται κατά την παραγωγή του μαγνησίου τη διαδικασία της ανόπτησης των μετάλλων και την ψύξη των μεγάλων ηλεκτροκινητήρων. Το υδρογόνο χρησιμοποιήθηκε παλιότερα για την πλήρωση των αεροστάτων έχοντας σήμερα αντικατασταθεί για τον σκοπό αυτό από το ήλιο το οποίο είναι άκαυστο. Εντούτοις τα αεροπορικά αερόστατα που χρησιμοποιήθηκαν στην Αγγλία κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου είχαν

πληρωθεί από υδρογόνο. Επίσης το υγρό υδρογόνο χρησιμοποιείται στο εργαστήριο για την παραγωγή χαμηλών θερμοκρασιών.





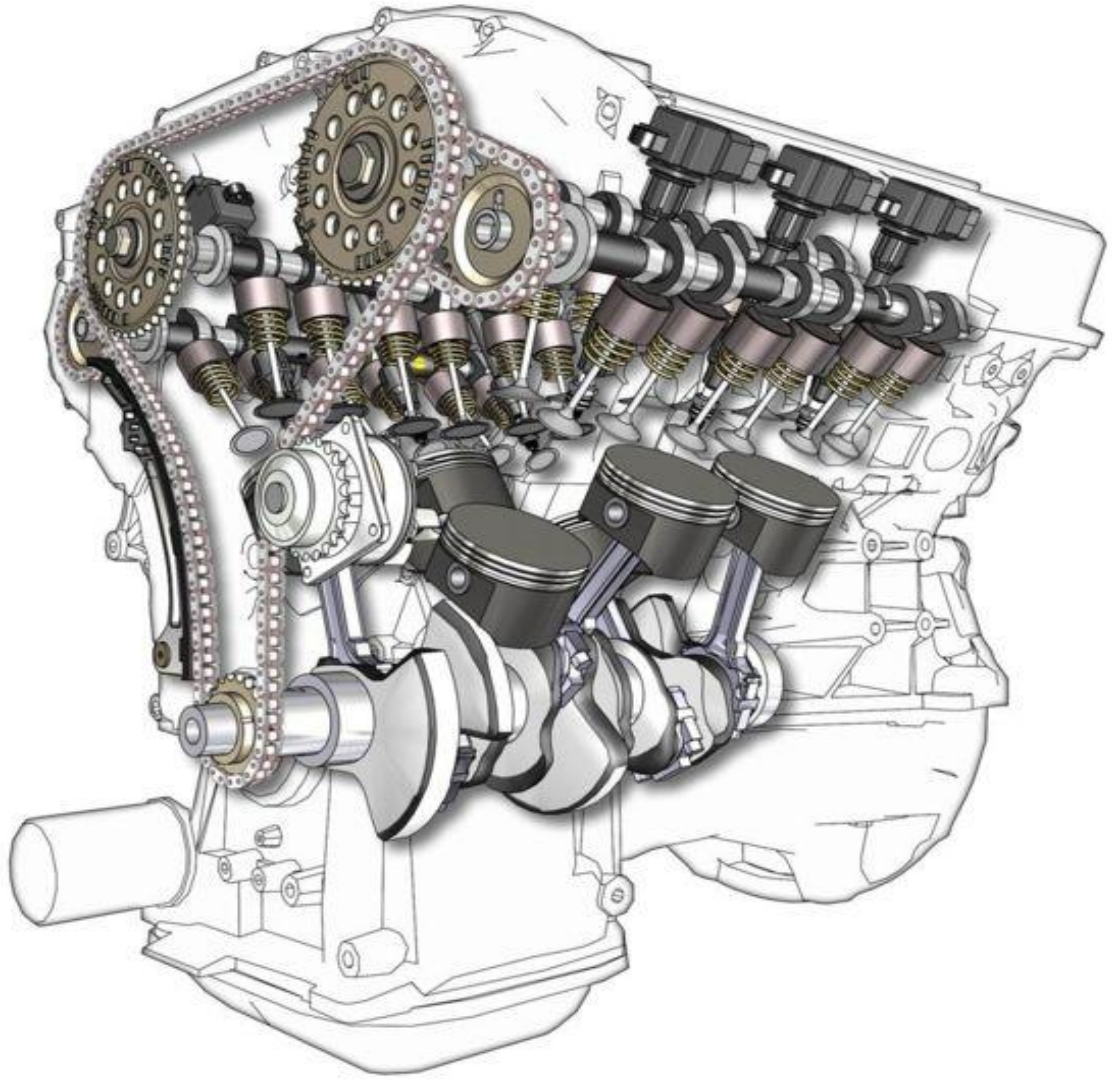
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### **Η ΜΗΧΑΝΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ**

#### **3.1. Εισαγωγή**

Η μηχανή εσωτερικής καύσης είναι μία θερμική μηχανή στην οποία το εργαζόμενο μέσο για την παραγωγή μηχανικής ισχύος αποτελείται από τα ίδια τα καυσαέρια τα προϊόντα δηλαδή της καύσης του αέρα με το καύσιμο. Στις ΜΕΚ ανήκουν οι εμβολοφόροι κινητήρες, οι αεριοστρόβιλοι, οι στροβιλοαντιδραστήρες, οι στατοί θερμοαντιδραστήρες και οι πυραυλοκινητήρες. Η πιο κοινή εφαρμογή των ΜΕΚ είναι ο εμβολοφόρος κινητήρας που χρησιμοποιείται σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα στις μεταφορές (αυτοκίνητα, βαρέα οχήματα, πλοία, τρένα και αεροπλάνα μικρής ταχύτητας). Μόνη εξαίρεση αποτελούν τα μέσης και υψηλής ταχύτητας αεροσκάφη στα οποία η επιλογή των στροβιλοαντιδραστήρων επιβάλλεται από την απαίτηση για υψηλή συγκέντρωση ισχύος.

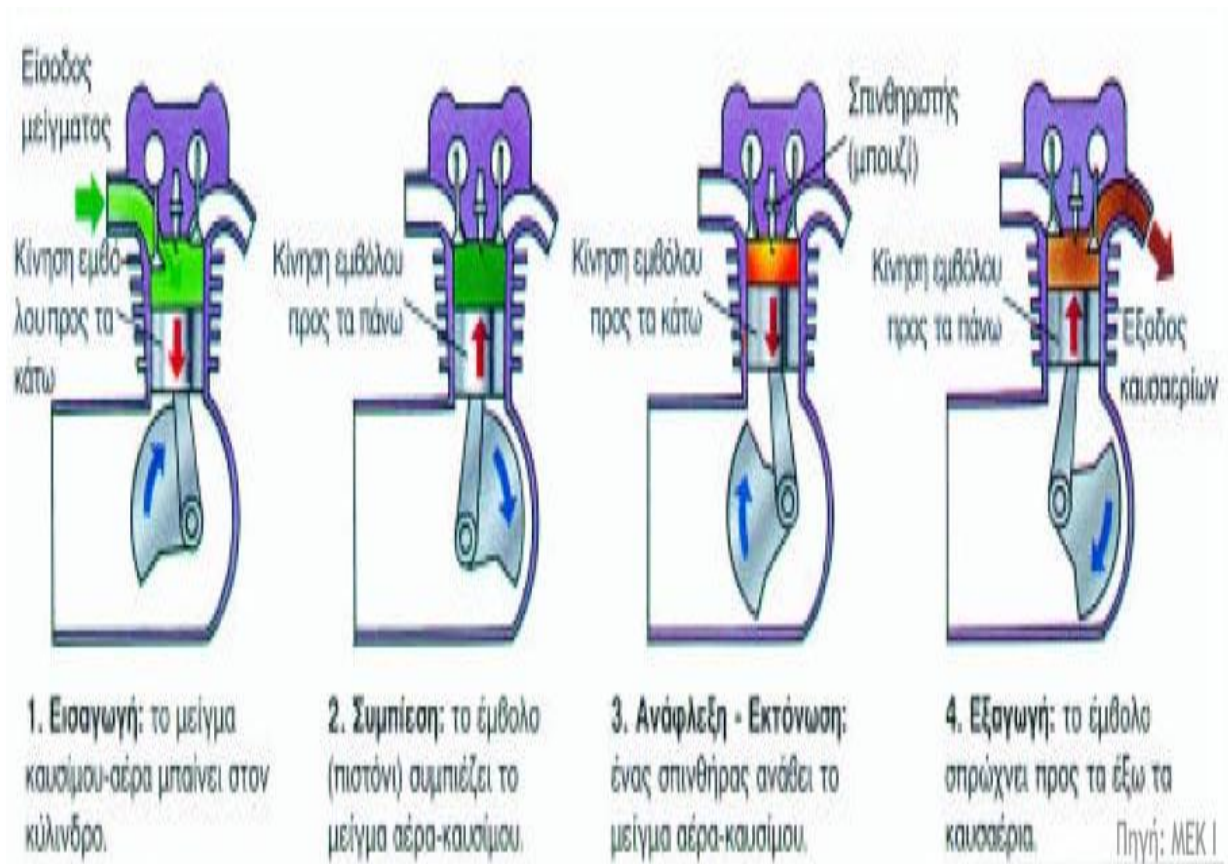
Ο εμβολοφόρος κινητήρας έχει καθιερωθεί στις μεταφορές διότι συνδυάζει την απλοϊκότητα της κατασκευής, τον καλό ολικό βαθμό απόδοσης και την υψηλή συγκέντρωση ισχύος. Οι εμβολοφόροι κινητήρες κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες σύμφωνα με τις αρχές λειτουργίας τους, τον τρόπο ανάφλεξης του μίγματος ή την κατασκευαστική τους διαμόρφωση. Έτσι για παράδειγμα διακρίνονται σε δίχρονους ή τετράχρονους σύμφωνα με την εξωτερική τους λειτουργία, σε κινητήρες Otto ή Diesel, σύμφωνα με την εσωτερική τους λειτουργία, και σε παλινδρομικούς ή περιστροφικούς κινητήρες, σύμφωνα με την κίνηση του εμβόλου τους. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των ΜΕΚ, πάντως αποτελούν οι βασικές φάσεις λειτουργίας δηλαδή η συμπίεση, η καύση και η εκτόνωση καθώς και οι φάσεις εναλλαγής των αερίων δηλαδή της εκκένωσης του κυλίνδρου από τα καυσαέρια κατά το τέλος του κύκλου λειτουργίας και της εκ νέου πλήρωσης του με νέα γόμωση για την εκτέλεση νέου κύκλου. Η σε βάθος ανάλυση του κάθε τύπου κινητήρα είναι πέρα από τους σκοπούς του παρόντος συγγράμματος και μόνο επιγραμματικά αναφέρονται παρακάτω οι βασικές αρχές λειτουργίας και τα κύρια χαρακτηριστικά γνωρίσματα του κάθε τύπου κινητήρα για λόγους πληρότητας του παρόντος.



### 3.2. Τετράχρονος κινητήρας (4-X)

Η συγκρότηση των εμβολοφόρων παλινδρομικών κινητήρων βασίζεται στον κινηματικό μηχανισμό Εμβόλου-Διωστήρα-Στροφάλου όπου το έμβολο παλινδρομεί μέσα στον κύλινδρο και μεταφέρει την ισχύ στην στροφαλοφόρο άτρακτο διαμέσου του διωστήρα. Στους εμβολοφόρους παλινδρομικούς κινητήρες το έμβολο αναγκαίως ακινητεί σε δύο ορισμένες θέσεις της στροφαλοφόρου ατράκτου προτού επέλθει αναστροφή της κίνησής του. Αυτές οι θέσεις καλούνται άνω νεκρό σημείο (ΑΝΣ) και κάτω νεκρό σημείο (ΚΝΣ). Η απόσταση που διανύει το έμβολο για να βρεθεί από το ένα νεκρό σημείο στο άλλο καλείται διαδρομή ή «χρόνος» και αντιστοιχεί σε μισή στροφή ή  $180^\circ$  της στροφαλοφόρου ατράκτου. Στους τετράχρονους κινητήρες ένας κύκλος λειτουργίας διαρκεί δύο πλήρεις περιστροφές της στροφαλοφόρου ατράκτου ή  $720^\circ$  γωνίας στροφάλου δηλαδή περιλαμβάνει 4 πλήρεις διαδρομές εμβόλου ή 4 «χρόνους». Οι τέσσερις χρόνοι που χαρακτηρίζουν τους τετράχρονους κινητήρες Otto είναι ο χρόνος της αναρρόφησης κατά τον οποίο ο κύλινδρος πληρώνεται με νέο καύσιμο μίγμα, ο χρόνος της συμπίεσης κατά τον οποίο το μίγμα συμπιέζεται μέχρι το ΑΝΣ, ο χρόνος της καύσης και αποτόνωσης κατά τον οποίο το μίγμα αναφλέγεται από την ηλεκτρική εκκένωση του σπινθηριστή και εκτονώνεται προσδίδοντας στο έμβολο γραμμική ταχύτητα η οποία μετατρέπεται σε γωνιακή στην στροφαλοφόρο άτρακτο και τέλος ο χρόνος της εξαγωγής κατά τον οποίο ο κύλινδρος εκκενώνεται από τα προϊόντα της καύσης. Στους τετράχρονους κινητήρες Diesel μόνο ατμοσφαιρικός αέρας συμπιέζεται κατά την φάση της συμπίεσης ενώ το καύσιμο εγχύεται λίγο πριν το ΑΝΣ.

Η πλήρωση και η κένωση του θαλάμου καύσης καθώς και η έναρξη της καύσης ρυθμίζονται από ειδικά όργανα διανομής τα οποία εξαναγκάζονται σε κίνηση από τον εκκεντροφόρο άξονα ο οποίος κινείται από τη στροφαλοφόρο άτρακτο με το μισό της ταχύτητάς της με τη βοήθεια ιμάντα ή αλυσίδας. Οι τετράχρονοι κινητήρες αποτελούν την κυρίαρχη επιλογή παγκοσμίως χάρη στην απλότητα της λειτουργίας τους, την αξιοπιστία τους και τον καλό βαθμό απόδοσής τους.

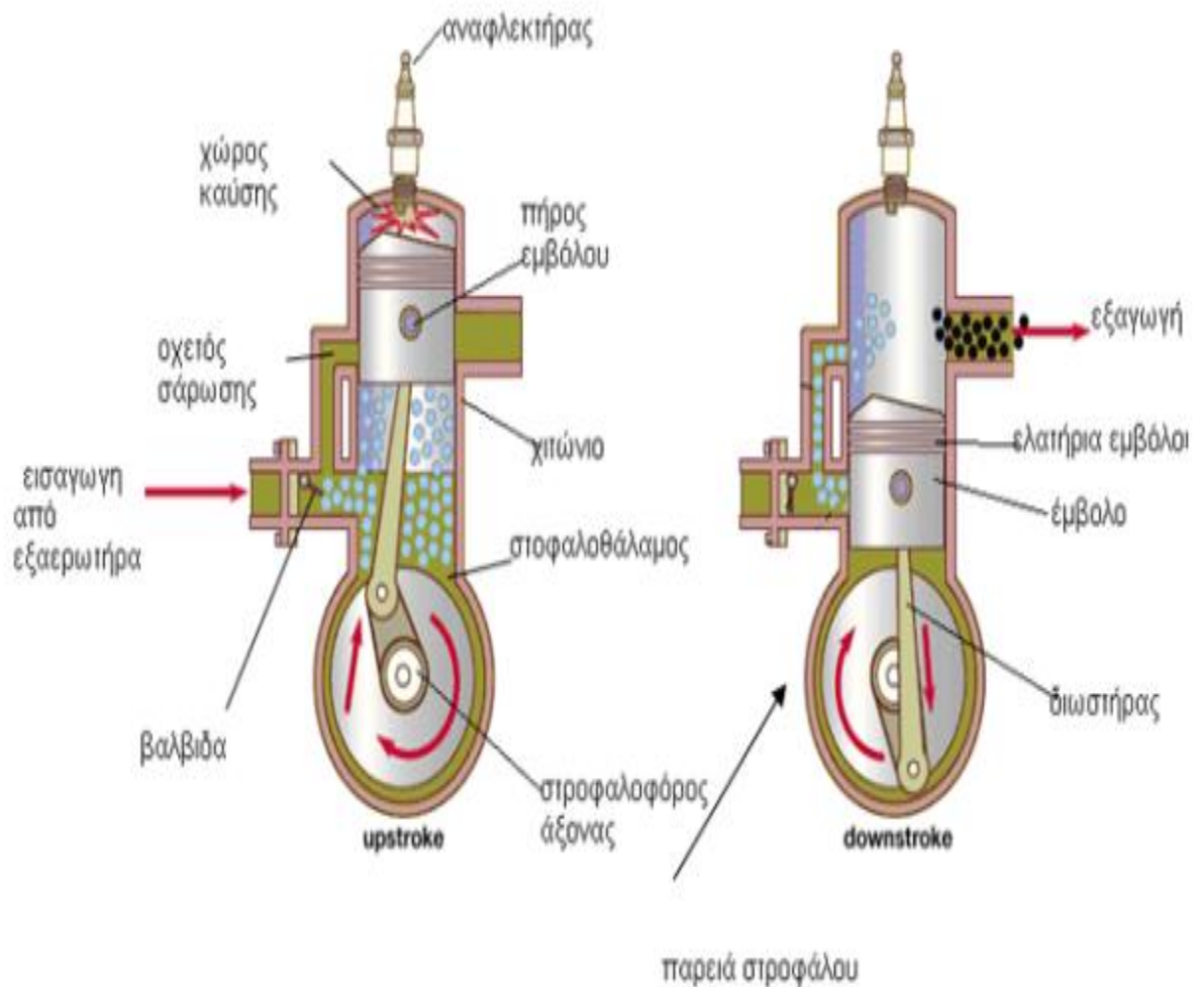


### 3.3. Δίχρονος κινητήρας (2-X)

Η ειδοποιός διαφορά των δίχρονων κινητήρων από τους τετράχρονους είναι ότι ένας κύκλος λειτουργίας ολοκληρώνεται σε μία μόνο περιστροφή της στροφαλοφόρου ατράκτου ή 360° γωνίας στροφάλου. Με άλλα λόγια μία περίοδος λειτουργίας περιλαμβάνει δύο διαδρομές του εμβόλου ή δύο «χρόνους» εκ των οποίων μόνο το ήμισυ διατίθεται για την εναλλαγή των αερίων. Συνήθως η πλήρωση και η εκκένωση του κυλίνδρου ρυθμίζεται από την άνω ακμή του εμβόλου η οποία κατά την παλινδρομική κίνησή της αποκαλύπτει ή καλύπτει διαδοχικά σχετικές θυρίδες τοποθετημένες στην παράπλευρη επιφάνεια του κυλίνδρου. Έτσι η εναλλαγή των αερίων διεξάγεται πάντοτε υπό δυσμενείς συνθήκες που καθιστούν απαραίτητη τη βίαιη πλήρωση του κυλίνδρου με τη βοήθεια ειδικής αντλίας αποπλύσεως ή σαρώσεως που απορροφά πολύτιμο έργο από τη στροφαλοφόρο άτρακτο. Στην περίπτωση του δίχρονου κινητήρα που οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής απουσιάζουν ο εκκεντροφόρος άξονας εξυπηρετεί μόνο τον χρονισμό και την έναυση του ψεκασμού και της καύσης ενώ περιστρέφεται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα με την στροφαλοφόρο άτρακτο. Οι δίχρονοι κινητήρες χρησιμοποιούνται για πολλά χρόνια σε μοτοσυκλέτες και μοτοποδήλατα,

κουρευτικές μηχανές γκαζόν, εξωλέμβιες μηχανές και μικρές βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς συνδυάζουν την απλότητα του μηχανισμού λειτουργίας, την ευκολία κατασκευής, τη μεγάλη απόδοση, το μικρό βάρος και την οικονομικά συμφέρουσα μαζική παραγωγή.

Εντούτοις, είναι σχετικά θορυβώδεις με υψηλή κατανάλωση καυσίμου και αντίστοιχα υψηλές εκπομπές καυσαερίων ενώ η ανάμιξη του ελαίου λίπανσης με το καύσιμο προσδίδει μία δυσάρεστη οσμή στα καυσαέρια του κινητήρα. Επιπλέον, παρουσιάζουν μειωμένη αξιοπιστία και διάρκεια ζωής σε σχέση με τους τετράχρονους κινητήρες. Η υψηλότερη κατανάλωση και οι υψηλότερες εκπομπές ρύπων έχουν τη ρίζα τους στις αρχές λειτουργίας του δίχρονου κινητήρα στον οποίο ο χρόνος της εξαγωγής, με τον χρόνο της εισαγωγής επικαλύπτονται χρονικά με συνέπεια μέρος του εισαγόμενου άκαυστου μίγματος να ελευθερώνεται στην εξαγωγή μαζί με τα καυσαέρια.



### 3.4. Κινητήρας Otto (βενζίνης)

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου οι μηχανές εσωτερικής καύσης διακρίνονται σε κινητήρες Otto και σε κινητήρες Diesel βάσει της εσωτερικής τους λειτουργίας του τρόπου δηλαδή με τον οποίο προκαλείται η ανάφλεξη (έναυση) του καυσίμου το οποίο μπορεί να είναι υγρό ή αέριο. Οι κινητήρες Diesel θα εξεταστούν σε επόμενη παράγραφο. Στους κινητήρες Otto ή καύσης ή έναυσης με σπινθήρα (spark ignition) υπάρχει πάντοτε ανάφλεξη με τη βοήθεια κάποιου εξωτερικού μέσου συνηθέστατα ενός ηλεκτρικού σπινθήρα. Οι κινητήρες Otto, ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο καύσιμο διακρίνονται σε βενζινομηχανές και αεριομηχανές. Οι αεριομηχανές χρησιμοποιούν σαν καύσιμο φυσικά ή τεχνητά αέρια (όπως π.χ. φυσικό αέριο, υγραέριο, φωταέριο κ.λπ.). Οι βενζινομηχανές χρησιμοποιούν σαν καύσιμο κατ' εξοχήν βενζίνη αλλά και γενικότερα ελαφρά υγρά καύσιμα μεγάλης πτητικότητας (όπως π.χ. μεθανόλη, αιθανόλη, κ.λπ.)

Πάντως σήμερα το συντριπτικά μεγαλύτερο ποσοστό των αυτοκινήτων με κινητήρες Otto χρησιμοποιούν ως καύσιμο την βενζίνη. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι σχηματισμού του μείγματος αέρα-καυσίμου. Ο παλαιότερος τρόπος ο οποίος χρησιμοποιείται ακόμα σε πολλές περιπτώσεις (π.χ. μοτοσυκλέτες και μοτοποδήλατα), είναι αυτός του εξαεριωτή (ή καρμπυρατέρ). Στον εξαεριωτή σχηματίζεται και προετοιμάζεται το καύσιμο μείγμα το οποίο έχει αναρροφηθεί από τη μηχανή με φυσικές μεθόδους και ειδικές τεχνικές. Πιο σύγχρονα συστήματα σχηματισμού του μείγματος περιλαμβάνουν μεθόδους όπως την ηλεκτρονική έγχυση μονού σημείου ή πολλαπλών σημείων (συστήματα εμμέσου εγχύσεως) και την άμεση έγχυση. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται και συστήματα διακοπτόμενης εγχύσεως σε αντιδιαστολή με τα παλαιότερα συστήματα συνεχούς εγχύσεως κατά τη λειτουργία των οποίων η βενζίνη ψεκαζόταν αδιάκοπα σε όλους τους κυλίνδρους. Κατά τις μεθόδους αυτές, διακοπτόμενης και συνεχούς εγχύσεως δηλαδή επιτυγχάνεται ηλεκτρονική έγχυση της βενζίνης με τη βοήθεια συγκροτήματος αντλίας καυσίμου- εγχυτήρα. Η ρύθμιση της ισχύος του κινητήρα Otto είναι βασικά ποσοτική, δηλαδή η αυξομείωση το έργου και της ισχύος επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας την ποσότητα του μείγματος που εισέρχεται στον κύλινδρο. Η μεταβλητότητα της ποσότητας του μείγματος ρυθμίζεται με τη βοήθεια στραγγαλιστικής δικλείδας («πεταλούδα»), η οποία βρίσκεται στη διαδρομή του μείγματος προς τον κύλινδρο και η περιστροφή της οποίας ρυθμίζει την υποπίεση κατά την είσοδο στους κυλίνδρους. Ταυτόχρονα η ποιότητα του μείγματος δηλαδή ο λόγος μαζών αέρα-καυσίμου παραμένει

ουσιωδώς σταθερός με εξαίρεση τις περιπτώσεις κρύας εκκίνησης, άφορτης λειτουργίας και ραγδαίας επιτάχυνσης όπου γίνεται αυτόματη ρύθμιση πλουσιότερου ή φτωχότερου μίγματος έναντι της στοιχειομετρικής αναλογίας. Πρέπει στο σημείο αυτό να επισημάνουμε ότι η στοιχειομετρική αναλογία αέρα-βενζίνης είναι περίπου 14,7:1 δηλαδή απαιτούνται 14,7 μέρη αέρα για την πλήρη καύση ενός μέρους βενζίνης. Απ' την άλλη μεριά η καύση πολύ πτωχών μειγμάτων η καύση δηλαδή με περίσσεια αέρα έχει ως θετική συνέπεια τη βελτίωση του βαθμού απόδοσης και τη μείωση των εκπεμπόμενων ρυπογόνων αερίων. Οι κινητήρες Otto πτωχού μίγματος, όπως για παράδειγμα ο κινητήρας του May, επιτρέπουν την καύση πολύ πτωχών μειγμάτων, με λόγο αέρα-καυσίμου μέχρι και 50:1, πράγμα που επιτυγχάνεται με αύξηση του επιπέδου της τύρβης (swirl) της γομώσεως και πιο συγκεντρωτικό θάλαμο γύρω από τη βαλβίδα εξαγωγής. Οι δύο αυτές σχεδιαστικές παράμετροι μειώνουν τον κίνδυνο εμφάνισης κρουστικής καύσης και επιτρέπουν έτσι τη χρήση υψηλών βαθμών συμπίεσης, γεγονός ευεργετικό για την απόδοση της μηχανής και την οικονομία του καυσίμου. Ο κινητήρας του May για παράδειγμα, με βαθμό συμπίεσης 14,5:1 επιτύγχανε αύξηση του βαθμού απόδοσης κατά 15% σε πλήρες φορτίο και ακόμη μεγαλύτερη στα μερικά.

Πάντως, η υιοθέτηση συστημάτων κατάλυσης των προϊόντων της καύσης στους σύγχρονους κινητήρες βενζίνης, με στόχο την μείωση των ρυπαντών υπαγορεύει την καύση μειγμάτων σε στοιχειομετρική αναλογία, συνθήκη αναγκαία για την αποδοτική λειτουργία του τριοδικού καταλύτη.



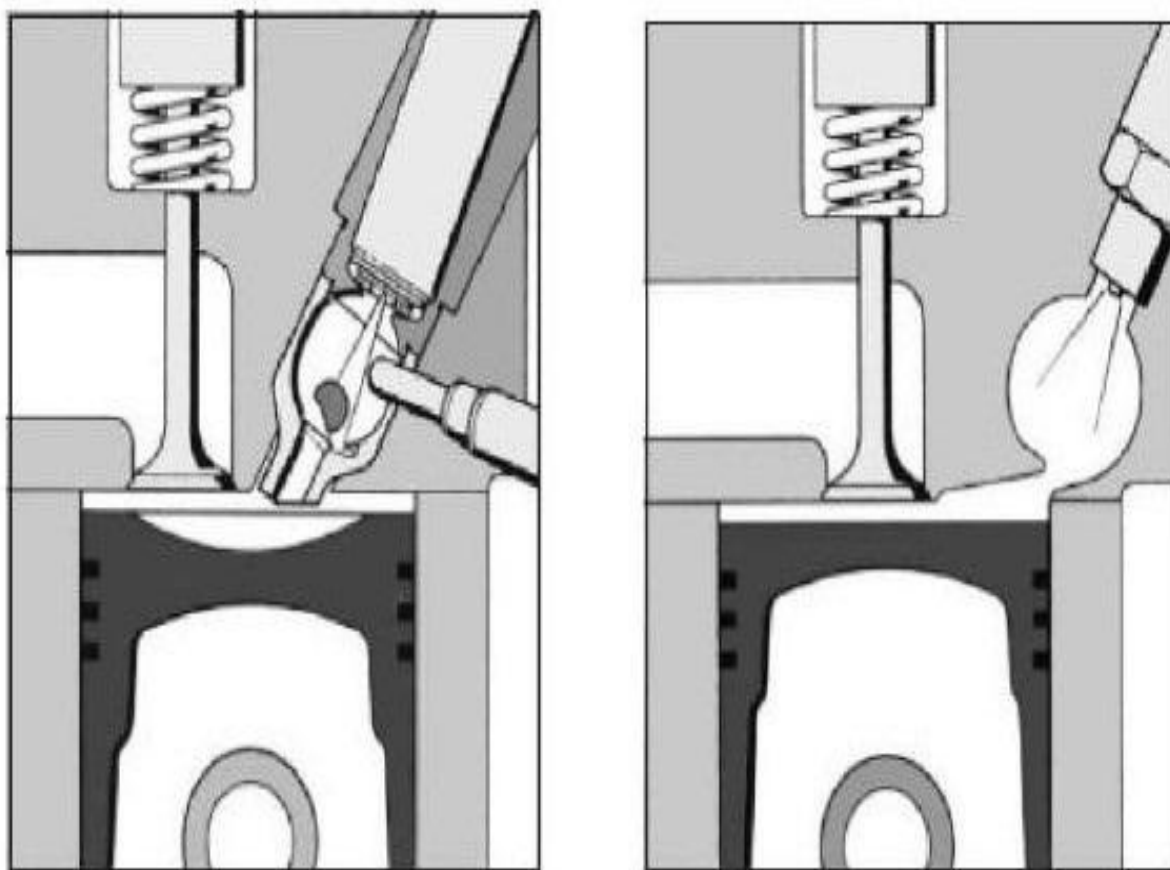
### **3.5. Κινητήρας Diesel (πετρελαίου)**

Στους κινητήρες Diesel, που πήραν το όνομά τους από τον εφευρέτη τους Rudolf Diesel, ή καύσης ή έναυσης με συμπίεση (compression ignition), όπως αλλιώς λέγονται, υπάρχει πάντοτε αυτανάφλεξη του μίγματος λόγω της χρονικά κατάλληλης εισαγωγής του καυσίμου στον κύλινδρο τη στιγμή κατά την οποία το περιεχόμενό του έχει ήδη θερμανθεί σε επαρκώς υψηλή θερμοκρασία λόγω της προηγούμενης σχετικά ισχυρής συμπίεσης. Στους κινητήρες Diesel, χρησιμοποιούνται μεγαλύτεροι βαθμοί συμπίεσης σε σχέση με τους κινητήρες Otto, ενώ επιτυγχάνονται και μεγαλύτεροι βαθμοί απόδοσης. Ο κινητήρας Diesel, καλούμενος και πετρελαιομηχανή, αναρροφά ατμοσφαιρικό αέρα και χρησιμοποιεί ως καύσιμα τα βαρύτερα της βενζίνης υγρά καύσιμα της κατηγορίας των πετρελαιοειδών, τα οποία είναι λιγότερο πτητικά και φθηνότερα. Για το σχηματισμό του καυσίμου μείγματος, το πετρέλαιο εγχύεται στον κύλινδρο προς το τέλος της διαδρομής συμπίεσης, λίγο πριν το ΑΝΣ, και διασκορπίζεται στη μάζα του ήδη συμπιεσμένου αέρα. Όπως είναι γνωστό η θερμοκρασία ενός συμπιεζόμενου ρευστού (ατμοσφαιρικός αέρας) αυξάνεται κατά τη συμπίεσή του. Έτσι όταν



το καύσιμο ψεκάζεται στο θάλαμο καύσης ενός κινητήρα Diesel, η θερμοκρασία εντός του θαλάμου είναι υψηλή και μεγαλύτερη της θερμοκρασίας αυτανάφλεξης του καυσίμου οπότε το μείγμα αέρα-καυσίμου αναφλέγεται. Σε αντίθεση με τον κινητήρα Otto, η ρύθμιση της ισχύος του κινητήρα Diesel είναι ποιοτική, δηλαδή η αυξομείωση του έργου και της ισχύος επιτυγχάνεται με την μεταβολή της ποιότητας του μίγματος, δηλαδή του λόγου αέρα-καυσίμου. Επειδή όμως, η ποσότητα του αέρα για δεδομένη ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα είναι σταθερή για όλα τα φορτία, η ρύθμιση της ισχύος επιτυγχάνεται διαμέσου της μεταβολής της ανά κύκλο εγχυόμενης ποσότητας καυσίμου. Επομένως για την αυξομείωση της ισχύος μεταβάλλεται ο ρυθμός έγχυσης του καυσίμου διαμέσου του ποσοτικού ελέγχου της αντλίας έγχυσης. Η αρχή λειτουργίας του τετράχρονου κινητήρα Diesel έχει ως εξής: κατά τη φάση της αναρρόφησης ατμοσφαιρικός αέρας διοχετεύεται στον κύλινδρο. Η ποσότητα του αέρα δεν περιορίζεται διότι στην περίπτωση του κινητήρα Diesel δεν υπάρχει στραγγαλιστική βαλβίδα στην πολλαπλή εισαγωγής, όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Εξαιτίας του αρκετά υψηλού λόγου συμπίεσης η θερμοκρασία του συμπιεσμένου αέρα προς το τέλος της φάσης συμπίεσης είναι αρκετή για να προκαλέσει την αεριοποίηση του καυσίμου, που εγχύεται σε υγρή μορφή, μέχρι την στιγμή της ανάφλεξης του. Η καλή λειτουργία του κινητήρα Diesel εξαρτάται από τον κατάλληλο έλεγχο της έγχυσης του καυσίμου και της κίνησης του αέρα στον θάλαμο καύσης με σκοπό την κατά το δυνατόν καλύτερη ανάμιξη των ατμών του καυσίμου με τον αέρα και την ομογενοποίηση του μίγματος σε σύντομο χρονικό διάστημα. Για να επιτευχθούν τα παραπάνω έχουν χρησιμοποιηθεί δύο λύσεις σχεδιασμού του θαλάμου καύσης. Ο ενιαίος θάλαμος καύσης με άμεση έγχυση αποτελεί την επιλογή σχεδιασμού που προτιμάται για τους περισσότερους σύγχρονους πετρελαιοκινητήρες και σχηματίζεται από την άνω επιφάνεια του εμβόλου και την κάτω επιφάνεια της κεφαλής του κυλίνδρου. Η διάταξη αυτή συνδυάζει τη χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου, τις αυξημένες πιέσεις έγχυσης και τις μειωμένες εκπομπές ρύπων. Στους σημερινούς πολύστροφους, μέσω και μεγάλων διαστάσεων κινητήρες με ηλεκτρονικά ελεγχόμενο ψεκασμό, επιτυγχάνονται υψηλότερες πιέσεις έγχυσης μεταξύ 1000 και 1800bar. Για την καλύτερη διανομή του καυσίμου στον κύλινδρο και επομένως την καλύτερη καύση χρησιμοποιούνται εγχυτήρες υψηλής πίεσης με ακροφύσια πολλαπλών οπών με τον αριθμό, το μέγεθος και τη γωνία έγχυσης των ακροφυσίων να εξαρτάται από τη γεωμετρία της κεφαλής του εμβόλου. Η άνω επιφάνεια του εμβόλου καθώς και γενικότερα όλα τα τοιχώματα του κυλίνδρου διαμορφώνονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να προάγουν την ένταση των στροβιλωδών κινήσεων του αέρα κατά τη φάση της συμπίεσης με στόχο την ομοιόμορφη κατανομή του μίγματος στον θάλαμο καύσης. Ο διμερής θάλαμος καύσης με έμμεση έγχυση

του καυσίμου αποτέλεσε για χρόνια την προτιμητέα λύση των κατασκευαστών για τους μικρών διαστάσεων κινητήρες, υψηλής ταχύτητας περιστροφής που χρησιμοποιούνται στα αυτοκίνητα και στα μικρά φορτηγά. Πάντως και σ' αυτές τις εφαρμογές οι κινητήρες διμερών θαλάμων τείνουν να αντικατασταθούν ολοκληρωτικά από κινητήρες με ενιαίους θαλάμους άμεσης έγχυσης. Ο διμερής θάλαμος καύσης υποδιαιρείται σε δύο τμήματα τον κύριο και το δευτερεύοντα ή βοηθητικό θάλαμο καύσης που επικοινωνούν μεταξύ τους διαμέσου μίας στενής διόδου. Ο κύριος θάλαμος σχηματίζεται κανονικά μεταξύ εμβόλου και καλύμματος κυλίνδρου, ενώ ο δευτερεύων έχει τη μορφή ιδιαίτερου θύλακα διαμορφωμένου κατά το μεγαλύτερο συνήθως μέρος του εντός του καλύμματος της κεφαλής. Ο δευτερεύων θάλαμος στεγάζει τον εγχυτήρα ψεκασμού με ακροφύσιο μίας οπής στις περισσότερες περιπτώσεις καθώς και το απαραίτητο στην περίπτωση του διμερούς θαλάμου βοηθητικό μέσο εκκίνησης που είναι συνήθως ένας ηλεκτρικός πυρακτωτής. Διακρίνονται τρεις κατηγορίες διμερών θαλάμων καύσης: ο προθάλαμος (precombustion chamber), ο στροβιλοθάλαμος (swirl chamber) και ο ταμιευτής αέρα. Και στις τρεις περιπτώσεις η τοποθέτηση ενός πρόσθετου θαλάμου μεταξύ της αντλίας ψεκασμού και του θαλάμου καύσης βασίζεται στην ίδια αρχή λειτουργίας. Μέρος του καυσίμου καίγεται στον θύλακα σε συνθήκες αυξημένου στροβιλισμού και η πίεση που παράγεται αναμιγνύει το υπόλοιπο καύσιμο στον κύριο θάλαμο καύσης με αποτέλεσμα την ταχεία καύση του.



(A)

(B)

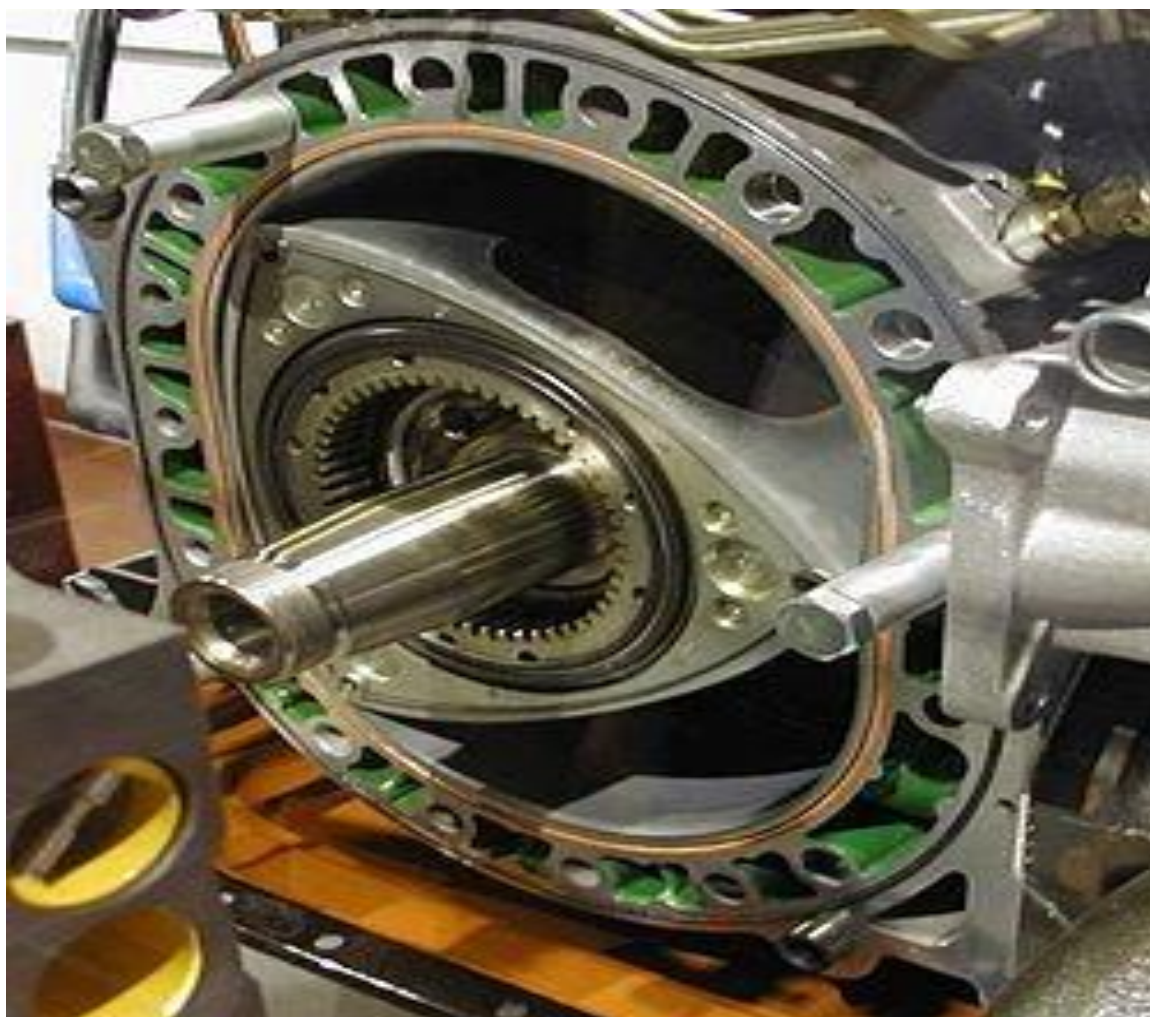
**Εικόνα 3.1:** (A). Διμερής θάλαμος καύσης εμμέσου ψεκασμού με προθάλαμο.(B). Διμερής θάλαμος καύσης εμμέσου ψεκασμού με στροβιλοθάλαμο.

Συμπερασματικά, η διαμόρφωση του διμερούς θαλάμου καύσης καθιστά την κατασκευή του καλύμματος του κυλίνδρου δύσκολη και δαπανηρή. Επίσης οι κινητήρες με διμερή θάλαμο καύσης εμφανίζουν αυξημένη ειδική κατανάλωση καυσίμου και επομένως χαρακτηρίζονται από μειωμένο βαθμό απόδοσης. Όμως οι κινητήρες με διμερείς θαλάμους καύσης επιτυγχάνουν σημαντική αύξηση της ταχύτητας περιστροφής τους καθώς και αύξηση της συγκεντρώσεως ισχύος λόγω της δυνατότητας επιτυχούς καύσεως με μικρότερη περίσσεια αέρα και επομένως μειωμένες εκπομπές άκαυστου άνθρακα στην εξαγωγή.

### 3.6. Περιστροφικός κινητήρας Wankel

Ο περιστροφικός κινητήρας Wankel που πήρε το όνομα από τον εφευρέτη του Felix Wankel (1902-1988) αποτελεί μία ιδιότυπη περίπτωση εμβολοφόρου κινητήρα. Ο κινητήρας περιστρεφόμενου εμβόλου όπως αλλιώς ονομάζεται δεν εκμεταλλεύεται την παλινδρομική κίνηση ενός εμβόλου στον κύλινδρο αλλά παράγει απ' ευθείας περιστροφική κίνηση καθώς χρησιμοποιεί ένα τριγωνικό δισκοειδές έμβολο το οποίο περιστρέφεται έκκεντρα μέσα σε ένα κέλυφος κατάλληλης μορφής (επιτροχοειδής δίλοβος). Καθώς το έμβολο περιστρέφεται η κάθε μία πλευρά του που έχει σχήμα τόξου κύκλου σχηματίζει με το κέλυφος ένα χώρο μεταβαλλόμενου μεγέθους που αντιστοιχεί στον κύλινδρο του παλινδρομικού εμβολοφόρου κινητήρα. Σε μία πλήρη περιστροφή του εμβόλου συμπληρώνεται ένας πλήρης τετράχρονος θερμοδυναμικός κύκλος λειτουργίας με όλες τις βασικές φάσεις λειτουργίας και άνετη εναλλαγή των αερίων. Το δισκοειδές έμβολο φέρει εσωτερική οδοντοστεφάνη η οποία εμπλέκεται με σταθερό οδοντοτροχό ο οποίος είναι στερεωμένος επάνω στο κέλυφος και συγκεντρικά προς τον κινητήριο άξονα. Ένα έκκεντρο που αποτελεί σταθερό τμήμα του κινητήριου άξονα εξαναγκάζει το έμβολο σε μία πλανητική κίνηση γύρω από τον κινητήριο άξονα. Ο λόγος μετάδοσης είναι τέτοιος ώστε ο κινητήριος άξονας περιστρέφεται με τριπλάσια ταχύτητα από αυτή του εμβόλου.

Κινηματικά και δυναμικά ο κινητήρας Wankel είναι πολύ απλός και εξασφαλίζει πλήρη και εύκολη ζυγοστάθμιση των κινουμένων μερών του. Έτσι σε σχέση με τους παλινδρομικούς κινητήρες παράγει λιγότερους κραδασμούς και χαρακτηρίζεται από πιο ομαλή λειτουργία. Επιπλέον σε σχέση με ένα συμβατικό εμβολοφόρο κινητήρα ίδιας ισχύος είναι πιο συμπαγής καθώς έχει μικρότερο όγκο και βάρος και επομένως παρουσιάζει αυξημένη συγκέντρωση ισχύος. Απ' την άλλη μεριά το σημαντικότερο μειονέκτημα του κινητήρα Wankel ήταν πάντοτε η στεγανότητα στα σημεία επαφής των ακμών του εμβόλου με το κέλυφος πρόβλημα που οδηγεί αναγκαστικά σε χαμηλούς λόγους συμπίεσης και κατ' επέκταση σε χαμηλούς βαθμούς απόδοσης. Αρνητικά σημεία είναι επίσης η υψηλή κατανάλωση καυσίμου καθώς και οι υψηλές θερμικές καταπονήσεις του εμβόλου και του κελύφους γύρω από τη θέση του σπινθηριστή. Τέλος ο κινητήρας περιστρεφόμενου εμβόλου του Wankel παρουσιάζει αυξημένες θερμικές απώλειες συγκριτικά με τον παλινδρομικό κινητήρα του Otto και επομένως χαρακτηρίζεται από μικρότερο βαθμό απόδοσης.



**Εικόνα 3.2:** Μηχανικά μέρη του περιστροφικού κινητήρα Wankel.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΤΙΣ Μ.Ε.Κ**

#### **4.1. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ**

Από κάθε οπτική γωνία, τεχνολογική ή οικονομική, το υδρογόνο φαίνεται να είναι ο πιο πιθανός υποψήφιος για την αντικατάσταση των καυσίμων που βασίζονται στους ορυκτούς υδρογονάνθρακες (βενζίνη, ντίζελ, μεθάνιο κ.λπ.). Το υδρογόνο μπορεί να παρασκευαστεί με πολλούς και διάφορους τρόπους όπως για παράδειγμα από την πυρηνική ενέργεια μέσω θερμικής αποσύνθεσης (decomposition) του νερού ή από την ηλιακή ενέργεια μέσω ηλεκτρόλυσης του νερού, και έχει προταθεί από την επιστημονική κοινότητα σαν το πιο πιθανό καύσιμο του μέλλοντος λόγω των σημαντικών ιδιοτήτων του, εις αντικατάσταση των παραγώγων του πετρελαίου, καυσίμων του σήμερα.

Άοσμο, άγευστο, άχρωμο και μη τοξικό, το υδρογόνο παράγει μόνο καθαρή ενέργεια και υδρατμούς μέσω της καύσης του με το οξυγόνο του αέρα, οπότε επιστρέφει στο περιβάλλον το νερό από το οποίο παράχθηκε. Επομένως δεν μπορεί ποτέ να υπάρξει εξάντληση αποθεμάτων από την χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο. Το υδρογόνο βέβαια, πέρα από τους κινητήρες εσωτερικής καύσης μπορεί να τροφοδοτήσει και τις κυψέλες καυσίμου.

Το υδρογόνο είναι ένα εξαιρετικά καλό καύσιμο για τους κινητήρες εσωτερικής καύσης διότι οι ιδιότητες καύσης του εξασφαλίζουν υψηλό βαθμό απόδοσης και απρόσκοπτη λειτουργία. Οι εκπεμπόμενοι ρύποι των ΜΕΚ υδρογόνου αν και θεωρητικά έπρεπε να είναι μηδενικοί στην πραγματικότητα είναι απειροελάχιστοι σε σχέση με τους κινητήρες βενζίνης. Κατά την καύση του υδρογόνου παράγονται ορισμένα οξείδια του αζώτου τα οποία οφείλουν την ύπαρξη τους στην καύση του υδρογόνου με αέρα ο οποίος περιέχει κατά 79% άζωτο. Η παρουσία του αζώτου και του οξυγόνου στις υψηλές θερμοκρασίες του θαλάμου καύσης δημιουργεί τις συνθήκες διάστασης για την παραγωγή οξειδίων του αζώτου στα παράγωγα της καύσης του υδρογόνου. Κάποιοι άκαυστοι υδρογονάνθρακες μαζί με αμελητέες ποσότητες μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα οφείλονται στα κατάλοιπα του λιπαντικού που πάντα καταφέρνει να εισχωρήσει στον θάλαμο καύσης κατά την λειτουργία του κινητήρα.

Το υδρογόνο αντιδρά εύκολα με τον αέρα και το μίγμα είναι αρκετά σταθερό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Παρόλα αυτά η ενέργεια ανάφλεξης του υδρογόνου είναι πολύ χαμηλή σε σχέση με άλλα υγρά ή αέρια καύσιμα. Το υδρογόνο αναφλέγεται ακόμα και σε ιδιαίτερα χαμηλή περιεκτικότητα του στον αέρα. Τα όρια αναφλεξιμότητας του υδρογόνου βρίσκονται μεταξύ 4 και 75% περιεκτικότητάς του κατ' όγκο στον αέρα σε κανονικές συνθήκες πίεσης

και θερμοκρασίας. Κατά συνέπεια από την καύση μιγμάτων αέρα – υδρογόνου σε διαφορετικές περιεκτικότητες του υδρογόνου στον αέρα, μπορεί να επιτευχθεί ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων καύσης και μέγιστων θερμοκρασιών στο θάλαμο καύσης.

Οι κινητήρες βενζίνης πλέον λόγω και της καταλυτικής τεχνολογίας, πρέπει να λειτουργούν με στοιχειομετρική αναλογία αέρα – καυσίμου δημιουργώντας έτσι τις συνθήκες για το σχηματισμό οξειδίων του αζώτου άκαυστων υδρογονανθράκων και μονοξειδίου του άνθρακα στα παράγωγα της καύσης. Απ' την άλλη πλευρά το υδρογόνο μπορεί να καίγεται σε πολύ πτωχά μίγματα με αποτέλεσμα την εντυπωσιακή μείωση των οξειδίων του αζώτου (NOx), χωρίς καν τη χρήση καταλυτικού μετατροπέα λόγω των μειωμένων θερμοκρασιών στο θάλαμο καύσης. Παρόλα αυτά όσο ιδανική και αν φαίνεται εκ πρώτης όψεως η επιλογή του υδρογόνου ως καύσιμο ένα πλήθος τεχνικών δυσκολιών που σχετίζονται με την ομαλή λειτουργία του κινητήρα πρέπει να αντιμετωπιστούν προτού αυτό χρησιμοποιηθεί ευρύτατα για την κίνηση των οχημάτων. Η μεγάλη ταχύτητα καύσης του υδρογόνου έχει ως αποτέλεσμα τους υψηλούς ρυθμούς αύξησης της πίεσης καθώς και την 'τραχιά' λειτουργία του κινητήρα. Ένα άλλο πρόβλημα που αποτελεί ίσως την κυριότερη τροχοπέδη στην γενικευμένη χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο έχει να κάνει με την πολύ μικρή κατ' όγκο περιεκτικότητα ενέργειας του καυσίμου εξαιτίας της μικρής του πυκνότητας παρόλο που κατά βάρος περικλείει 2,5 φορές περισσότερη θερμογόνο δύναμη από εκείνη της βενζίνης (θερμογόνο δύναμη  $H_2 \approx 120000 \text{ kJ/kg}$  έναντι  $40000 \div 45000$  των συνήθων υγρών υδρογονανθράκων). Επίσης τα μίγματα αέρα – υδρογόνου εξαιτίας της χαμηλότερης ενέργειας ανάφλεξης σε σχέση με τα μίγματα αέρα – βενζίνης, είναι πιο ευαίσθητα στην πυρανάφλεξη εξαιτίας υπέρθερμων σημείων στο θάλαμο καύσης. Υπάρχουν διάφορα πιθανά υπέρθερμα σημεία στο θάλαμο καύσης μίας MEK υδρογόνου τα οποία μπορεί να προκαλέσουν πυρανάφλεξη.

Αυτά μπορεί να είναι εναποθέσεις άνθρακα στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης από την πυρόλυση του λιπαντικού καθώς και οι ίδιοι οι σπινθηριστές που εξαιτίας ανεπαρκούς θερμικής αγωγιμότητας ή προβληματικής ψύξης υπερθερμαίνονται κατά τη λειτουργία του κινητήρα και αναφλέγουν το μίγμα πριν τη χρονικά ελεγχόμενη εκκένωση του σπινθηριστή. Επίσης αν η απαγωγή της θερμότητας από τις βαλβίδες εξαγωγής είναι για κάποιο λόγο προβληματική τότε οι ίδιες οι βαλβίδες, οι οποίες έτσι και αλλιώς αναπτύσσουν υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να αποτελέσουν αιτία πυρανάφλεξης. Η πυρανάφλεξη μπορεί να οδηγήσει στο φαινόμενο της προανάφλεξης δηλαδή την πρωθύστερη ανάφλεξη του μίγματος κατά το χρόνο της συμπίεσης αρκετά πριν την άφιξη του πιστονιού στο άνω νεκρό σημείο και την προγραμματισμένη ανάφλεξη του μίγματος από την ηλεκτρική εκκένωση του

σπινθηριστή. Η προανάφλεξη έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ιδιαίτερα υψηλών θερμοκρασιών στις επιφάνειες του θαλάμου καύσης και μπορεί να αποτελέσει αιτία για σημαντικές φθορές στο χώρο της μηχανής όπως λιώσιμο μετάλλων και ολοσχερή καταστροφή των εμβόλων (διάνοιξη οπής στην επιφάνειά τους). Η πυρανάφλεξη είναι ένα από τα κυριότερα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά τη διαδικασία προσαρμογής των MEK βενζίνης να λειτουργούν με καύσιμο το υδρογόνο διότι η ύπαρξη του φαινομένου στους κινητήρες υδρογόνου όπως και στους κινητήρες βενζίνης εξάλλου έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια ισχύος, την ‘τραχιά’ λειτουργία καθώς και την υπερθέρμανση του κινητήρα.

Πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι οι θερμοκρασίες των αερίων που παρατηρούνται στο τέλος της καύσης σε μια MEK υδρογόνου είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες σε μία MEK βενζίνης και έτσι αναμένονται υψηλότερες εκπομπές οξειδίων του αζώτου από την καύση υδρογόνου.

## **4.2. ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΤΙΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

Η ιδέα των κυψελών καυσίμου δεν είναι καινούργια. Η πρώτη κυψέλη καυσίμου κατασκευάστηκε το 1839 από τον Sir William Grove, έναν Ουαλλό δικαστή και πειραματικό επιστήμονα που συνέλαβε την ιδέα της παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος μέσω των επονομαζόμενων κυψελών καυσίμου. Οι τελευταίες χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά ως γεννήτριες ηλεκτρικού ρεύματος στα διαστημικά προγράμματα της NASA κατά τη δεκαετία του 1960, τροφοδοτώντας με ηλεκτρικό ρεύμα και καθαρό νερό τα διαστημικά λεωφορεία Gemini και Apollo.

Η κυψέλη καυσίμου είναι στην ουσία μία ηλεκτροχημική συσκευή η οποία τροφοδοτείται με υδρογόνο και οξυγόνο και παράγει ηλεκτρικό ρεύμα και θερμότητα ενώ συνάμα σχηματίζεται νερό με τη μορφή υδρατμών. Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια, την άνοδο και την κάθοδο, τα οποία διαχωρίζονται από έναν υγρό ή στερεό ηλεκτρολύτη, ο οποίος συχνά έχει τη μορφή μεμβράνης. Ο ηλεκτρολύτης επιτρέπει την διέλευση φορτισμένων ιόντων από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο, όχι όμως των ηλεκτρονίων. Υδρογόνο ή ένα καύσιμο πλούσιο σε υδρογόνο (π.χ.φυσικό αέριο) τροφοδοτεί την άνοδο της κυψέλης, όπου τα ηλεκτρόνια του υδρογόνου διαχωρίζονται από τα θετικά φορτισμένα ιόντα (πρωτόνια) και οδηγούνται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα εκμεταλλεύσιμο για διάφορες εφαρμογές. Τα πρωτόνια διαπερνούν τον ηλεκτρολύτη και οδηγούνται στην κάθοδο όπου ενώνονται με τα ηλεκτρόνια και το οξυγόνο σχηματίζοντας νερό. Η ηλεκτροχημική αντίδραση που μόλις περιγράφηκε είναι εξώθερμη και είναι γνωστή ως αντίστροφη ηλεκτρόλυση. Τα ηλεκτρόδια τέλος είναι επικαλυμμένα με έναν καταλύτη



υψηλής αγωγιμότητας (π.χ. πλατίνα) με σκοπό την επιτάχυνση της διαδικασίας ιονισμού (διάσπασης) του υδρογόνου.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου και χαρακτηρίζονται από τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν. Έτσι, οι κυψέλες καυσίμου διακρίνονται στους εξής κυριότερους τύπους:

- Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)
- Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)
- Κυψέλες καυσίμου αλκαλίων (AFC)
- Κυψέλες καυσίμου ανθρακικών αλάτων (MCFC)
- Κυψέλες καυσίμου στερεοποιημένων οξειδίων (SOFC)
- Κυψέλες καυσίμου μεθανόλης (DMFC)

Ο ηλεκτρολύτης καθορίζει τις χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στην κυψέλη καυσίμου, τη θερμοκρασία λειτουργίας της, τον τύπο του καταλύτη που απαιτείται, το καύσιμο που χρησιμοποιείται, και άλλες παραμέτρους. Τα χαρακτηριστικά αυτά με τη σειρά τους καθορίζουν τις εφαρμογές για τις οποίες είναι κατάλληλος ο κάθε τύπος κυψέλης καυσίμου. Στις παραγράφους που ακολουθούν, επιγραμματικά αναφέρονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του κάθε τύπου κυψέλης.

#### **4.2.1. Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)**

Οι συγκεκριμένες κυψέλες καυσίμου είναι επίσης γνωστές ως κυψέλες καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης. Η τεχνολογία τους επινοήθηκε από την General Electric κατά τη δεκαετία του 1950 και χρησιμοποιήθηκε από τη NASA για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και καθαρού νερού στην αποστολή του διαστημικού σκάφους Gemini. Οι κυψέλες καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης λογίζονται ως ο πιο ιδανικός υποψήφιος για την αντικατάσταση των μηχανών εσωτερικής καύσης στις μεταφορές εξαιτίας των ιδιοτήτων της που είναι η εύκολη κρύα εκκίνηση, η προσαρμοστικότητα της ισχύος τους στις απότομες αλλαγές φορτίου και ο μικρός λόγος βάρους-ισχύος. Είναι επίσης κατάλληλες για μικρές οικιακές εφαρμογές. Η σχετικά χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας τους (περίπου 80°C) και οι συμπαγείς τους διαστάσεις είναι δύο ακόμη επωφελή χαρακτηριστικά. Τέλος, παρουσιάζουν υψηλή απόδοση της τάξης του 40-50% της μέγιστης θεωρητικής τους παροχής τάσης.

### **4.2.2. Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)**

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέως θεωρούνται η «πρώτη γενιά» των σύγχρονων κυψελών καυσίμου διότι είναι ο πρώτος τύπος κυψέλης που έχει διατεθεί εμπορικά με εκατοντάδες μονάδες σε λειτουργία. Χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε κτίρια και εγκαταστάσεις όπως νοσοκομεία, ξενοδοχεία, σχολεία, εμπορικά κέντρα, αεροδρόμια και εγκαταστάσεις διαχείρισης αποβλήτων. Η απόδοσή τους κυμαίνεται από 37 ως 42% κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενώ μπορεί να φτάσει ακόμη και το 85% όταν χρησιμοποιούνται για τη συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Η θερμοκρασία λειτουργίας τους κυμαίνεται μεταξύ 150°C και 200°C. Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέως είναι συνήθως ογκώδεις και βαριές, αφ' ενός λόγω των μεγάλης κλίμακας εφαρμογών τους και αφ' ετέρου λόγω του μεγάλου τους λόγου βάρους – ισχύος σε σχέση με άλλους τύπους κυψελών καυσίμου. Τέλος, έχουν αρκετά μεγάλο κόστος λόγω του λευκόχρυσου που χρησιμοποιείται στα ηλεκτρόδιά τους ως καταλύτης.

### **4.2.3. Κυψέλες καυσίμου αλκαλίων (AFC)**

Η τεχνολογία κυψελών καυσίμου αλκαλίων αποτέλεσε μία από τις πρώτες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου που αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκε εκτενώς στο διαστημικό πρόγραμμα της NASA, όπως εξάλλου και η τεχνολογία κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. Η πρώτη τους εφαρμογή έγινε στο διαστημικό σκάφος Apollo προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και καθαρού νερού. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας των κυψελών καυσίμου αλκαλίων είναι σχετικά υψηλές και κυμαίνονται μεταξύ 100°C και 250°C ενώ πιο σύγχρονες μορφές τους λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ 23°C και 70°C. Οι κυψέλες καυσίμου αλκαλίων θεωρούνται συστήματα υψηλών επιδόσεων εξαιτίας του ταχύτατου ρυθμού των αντιδράσεων που ολοκληρώνονται στην κυψέλη τους. Είναι επίσης εξαιρετικά αποδοτικές στις εφαρμογές παραγωγής ισχύος επιτυγχάνοντας αποδόσεις της τάξης του 70%. Η ισχύς τους μπορεί να κυμανθεί από 300W μέχρι και 5kW. Είναι κατάλληλες για περιπτώσεις εξεζητημένων εφαρμογών όπως η εξερεύνηση του διαστήματος και των ωκεανών όπου το κόστος δεν έχει ιδιαίτερη σημασία. Για την εμπορική τους διάθεση όμως πρέπει να μειωθεί το κόστος τους και να αυξηθεί η αντοχή και η διάρκεια ζωής τους.

#### **4.2.4. Κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC)**

Οι κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων επιτυγχάνουν ιδιαίτερα υψηλές αποδόσεις της τάξης του 70% ενώ με την εκμετάλλευση της εκλυόμενης θερμότητας η απόδοσή τους μπορεί να αγγίξει το 85%. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας τους υπερβαίνουν τους 650°C και επομένως μη πολύτιμα μέταλλα όπως το νικέλιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καταλύτες στα ηλεκτρόδια μειώνοντας σημαντικά το κόστος κατασκευής τους. Η αυξημένη απόδοσή τους, σε σχέση με άλλους τύπους κυψελών καυσίμου καθιστά τις κυψέλες τηγμένων ανθρακικών αλάτων μία συμφέρουσα οικονομικά επιλογή για εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο ή γαιάνθρακα καθώς και βιομηχανικές και στρατιωτικές εφαρμογές. Οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας τους, όμως τις καθιστούν ακατάλληλες για οικιακές εφαρμογές και σε συνδυασμό με τον διαβρωτικό ηλεκτρολύτη τους επιταχύνουν τη φθορά των εξαρτημάτων τους μειώνοντας την διάρκεια ζωής τους. Μονάδες παραγωγής ισχύος μέχρι 2MW έχουν ήδη κατασκευαστεί ενώ υπάρχουν τα σχέδια για τη δημιουργία μονάδων παραγωγής μέχρι 100MW.

#### **4.2.5. Κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC)**

Στις κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων χρησιμοποιείται ως ηλεκτρολύτης μία σκληρή, μη πορώδης κεραμική ένωση οξειδίου μετάλλου (π.χ. νατρίου ή ζirkονίου) και επομένως οι κυψέλες δεν απαιτείται να είναι στη συνηθισμένη τους μορφή αλλά απαντώνται σε διάφορες μορφές όπως αυτές του κυλίνδρου, του δίσκου ή άλλες. Η θερμοκρασία λειτουργίας τους υπερβαίνει τους 1000°C γεγονός που καταργεί την ανάγκη κατασκευής του καταλύτη από πολύτιμα μέταλλα μειώνοντας έτσι το κόστος. Απ' την άλλη μεριά όμως δημιουργείται η απαίτηση για προσεκτικά μελετημένη θερμική μόνωση με σκοπό τη διατήρηση της θερμότητας και την προστασία των χειριστών ενώ συγχρόνως απαιτούνται πιο ανθεκτικά στις αυξημένες θερμοκρασίες υλικά κατασκευής. Επιπλέον περιορίζεται σημαντικά η γκάμα των εφαρμογών τους καθώς εξαιτίας των πολύ υψηλών θερμοκρασιών καθίστανται ακατάλληλες για εφαρμογές παροχής ισχύος στις μεταφορές ή στις φορητές συσκευές. Εντούτοις οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων είναι κατάλληλες για στατικές εφαρμογές καθώς και για βοηθητικές μονάδες παροχής ισχύος με μέγιστη ισχύ τα 100kW. Τέλος κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος επιτυγχάνουν αποδόσεις μεταξύ 50% και 60% ενώ σε περιπτώσεις συμπαραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας η απόδοσή τους μπορεί να φτάσει το 80% με 85%.

#### 4.2.6. Κυψέλες καυσίμου μεθανόλης (DMFC)

Οι κυψέλες καυσίμου μεθανόλης χρησιμοποιούν ως καύσιμο μεθανόλη χωρίς να απαιτείται η μετατροπή της σε υδρογόνο. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας τους κυμαίνονται μεταξύ 50°C και 120°C γεγονός που τις καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικές για εφαρμογές πολύ μικρού ή μεσαίου μεγέθους όπως για την τροφοδοσία κινητών τηλεφωνικών συσκευών και φορητών υπολογιστών. Η απόδοση του συγκεκριμένου τύπου κυψέλης καυσίμου περιορίζεται στο 40% όμως υψηλότερες αποδόσεις είναι δυνατό να επιτευχθούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Ως ηλεκτρολύτη χρησιμοποιούν μεμβράνη πολυμερούς όπως και οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) όμως στην περίπτωση των κυψελών καυσίμου μεθανόλης απαιτούνται σημαντικές καταναλώσεις καταλύτη (πλατίνας) για την επιτάχυνση των αντιδράσεων με αποτέλεσμα το υψηλό κόστος χρήσης τους.

### 4.3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΩΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΦΟΡΕΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση των ορυκτών καυσίμων ως κύρια πηγή ενέργειας κατά τον 20ο αιώνα επέβαλαν τη διεξοδική έρευνα για την εξεύρεση εναλλακτικών καυσίμων και δρομολόγησαν την όσο το δυνατόν ταχέως αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων από μία νέα καύσιμη ύλη η οποία θα πρέπει να εκπληρώνει τα περισσότερα από τα κάτωθι κριτήρια:

- **Αφθονία πόρων και δυσκολία εξάντλησης αποθεμάτων:** το καύσιμο θα πρέπει να βρίσκεται σε αφθονία για την κάλυψη των διαρκώς αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών ολόκληρου του πλανήτη και ει δυνατόν να παράγεται μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή, αιολική, γεωθερμική, κ.λπ.). Η ραγδαία ανάπτυξη των αναπτυσσόμενων χωρών (Κίνα, Ινδία, κ.λπ.) συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση των ενεργειακών αναγκών των χωρών αυτών με αποτέλεσμα την αενάως διογκούμενη παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα με ετήσια αυξητική τάση παγκοσμίως.
- **Μεγάλο περιεχόμενο ενέργειας:** το ποσό ενέργειας που παράγεται από την καύση της εναλλακτικής καύσιμης ύλης θα πρέπει να είναι τουλάχιστον συγκρίσιμο με άλλα λόγια της ίδιας τάξης μεγέθους με το παραγόμενο ποσό ενέργειας από την καύση της ίδιας ποσότητας ορυκτών καυσίμων.
- **Ευκολία παραγωγής, διανομής και αποθήκευσης:** είναι γεγονός ότι η υγρή κατάσταση των ορυκτών καυσίμων διευκολύνει τα μέγιστα στη μεταφορά και αποθήκευση τους, καθώς δεν απαιτούνται εξεζητημένα συστήματα διαχείρισης του καυσίμου μέχρι την τελική διάθεση του στους καταναλωτές. Μία νέα και εναλλακτική καύσιμη ύλη ιδανικά θα

πρέπει να χρησιμοποιεί την παρούσα δικτύωση διανομής και αποθήκευσης καθώς και τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες. Η επιλογή, μελλοντικά, ενός αερίου ή κρυογονικώς υγροποιημένου καυσίμου σαν το υδρογόνο επιβάλλει την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών και διαδικασιών για την παραγωγή, διανομή και αποθήκευση και κάνει τη μετάβαση στη νέα οικονομία δύσκολη και δαπανηρή αλλά όχι ανέφικτη. Ιστορικά εξάλλου έχει παρατηρηθεί ότι η μετάβαση της παγκόσμιας ενεργειακής κοινότητας σε νέα καύσιμα έχει ακολουθήσει την διαδρομή στερεό (άνθρακας), υγρό (βενζίνη & ντίζελ), αέριο (φυσικό αέριο), με κάθε επόμενο σταθμό της λογικής αλληλουχίας ένα καύσιμο, η χημική αλυσίδα του οποίου περιείχε όλο και λιγότερα άτομα άνθρακα. Επόμενος σταθμός της λογικής αλληλουχίας λοιπόν, φαίνεται να είναι ένα αέριο καύσιμο από την χημική αλυσίδα του οποίου, θα απουσιάζουν εντελώς τα άτομα άνθρακα.

- **Ελάχιστη περιβαλλοντική επιβάρυνση:** η ελαχιστοποίηση της ρύπανσης είναι η κύρια και σημαντικότερη αιτία για την ανακίνηση της διαδικασίας αναζήτησης εναλλακτικών ενεργειακών λύσεων. Η άλλη αιτία, αυτή της εξάντλησης των αποθεμάτων πετρελαίου στον αιώνα που διανύουμε, όσο σημαντική και αν ακούγεται, παραμένει δευτερεύουσας σημασίας γιατί η καταστροφή του πλανήτη, εξαιτίας του φαινομένου του θερμοκηπίου και των συνεπειών αυτού, θα έχει επέλθει πολύ πριν την εξάντληση των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων.

- **Ασφάλεια κατά την χρήση και ευκολία διαχείρισης:** πρέπει να καταστεί σαφές ότι κανένα καύσιμο από αυτά που χρησιμοποιούνται σήμερα δεν είναι απολύτως ασφαλές κατά τη διαχείρισή του και την καύση του, καθώς ακόμα και η ελάχιστη θερμική πηγή μπορεί να προκαλέσει πυρκαγιά ή έκρηξη. Η πιστή τήρηση των διαδικασιών και των κανόνων ασφαλείας είναι οι συνθήκες που έχουν καταστήσει το φυσικό αέριο, το πετρέλαιο και τα παράγωγά του ως ασφαλή καύσιμα στη συνείδηση του κόσμου.

Το υδρογόνο έχει επιλεγεί από την διεθνή επιστημονική κοινότητα ως το πλέον κατάλληλο καύσιμο για τη σταδιακή αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων εφόσον πληροί τα περισσότερα από τα παραπάνω κριτήρια και μάλιστα σε βαθμό ανώτερο από τη βενζίνη ή το ντίζελ. Τα κριτήρια που καθιστούν το υδρογόνο μία τόσο ελκυστική επιλογή ως μελλοντικό καύσιμο για τις ΜΕΚ είναι η καθαρότητα των προϊόντων της καύσης του, η δυνατότητα παραγωγής του από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς και η ανακυκλωσιμότητά του,

εφόσον το υδρογόνο κατά την καύση του αντικαθιστά στο περιβάλλον το νερό από το οποίο παράχθηκε. Επομένως τα ενεργειακά αποθέματα υδρογόνου είναι στην ουσία ανεξάντλητα.

Όσον αφορά στο κριτήριο του ποιοτικού προσδιορισμού των προϊόντων της καύσης, το υδρογόνο κρίνεται ως το ιδανικότερο από όλα τα γνωστά μέχρι σήμερα καύσιμα, καθώς από την καύση του παράγονται μόνο υδρατμοί και κάποια ελάχιστη ποσότητα οξειδίων του αζώτου, με το διοξείδιο του άνθρακα να απουσιάζει από τα προϊόντα της καύσης του.

Σ' ότι έχει να κάνει με την ασφάλεια κατά την διαχείριση του καυσίμου, το υδρογόνο δεν μπορεί να χαρακτηριστεί περισσότερο επικίνδυνο από τη βενζίνη, παρότι είναι πιο εύφλεκτο, διότι ο μεγάλος συντελεστής διάχυσής του στα ρευστά, εξασφαλίζει την ταχύτατη διαφυγή του στον αέρα. Εκτός αυτού, η μεγάλη ταχύτητα καύσης του μετά την ακούσια ανάφλεξή του, εξασφαλίζει τη σύντομη καύση του και τις, συγκριτικά με την βενζίνη, μικρότερες καταστρεπτικές συνέπειες.

Στα δύο εναπομείναντα κριτήρια, αυτό του ειδικού περιεχομένου ενέργειας και του δικτύου διανομής και αποθήκευσης τα υγρά καύσιμα που χρησιμοποιούνται σήμερα (βενζίνη & ντίζελ) σαφώς υπερέχουν έναντι του υδρογόνου. Πρέπει στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι το ποσό της θερμογόνου δύναμης που περικλείεται κατά μάζα σε μία ποσότητα υδρογόνου ( $\theta_{\text{H}_2} = 120 \text{ MJ/kg}$ ) είναι μεγαλύτερο από το ποσό της θερμογόνου δύναμης που περικλείεται στην ίδια κατά μάζα ποσότητα βενζίνης ( $\theta_{\text{βενζ}} = 44,5 \text{ MJ/kg}$ ) ή ντίζελ ( $\theta_{\text{ντίζελ}} = 40 \div 42,5 \text{ MJ/kg}$ ). Η κατά όγκο περιεκτικότητα ενέργειας του υδρογόνου όμως είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με τα άλλα καύσιμα λόγω της μικρής πυκνότητάς του. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η διαχείριση ενός υγρού, σε συνθήκες περιβάλλοντος, καυσίμου είναι πάντοτε πιο εύκολη και λιγότερο επικίνδυνη από τη διαχείριση ενός αερίου ή κρυογονικού υγρού καυσίμου όπως είναι το υδρογόνο.

#### 4.4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΕ ΜΕΚ

Το υδρογόνο ως καύσιμο παρουσιάζει κάποιες πολύ ελκυστικές ιδιότητες που έχουν να κάνουν με την ανάμιξή του στον αέρα, την ανάφλεξή του από θερμική πηγή και την καύση του. Τα χαρακτηριστικά καύσης του υδρογόνου τα οποία και συνηγορούν στη χρήση του ως το πλέον πιθανό καύσιμο του μέλλοντος παραθέτονται στον Πίνακα 4.1 και αναλύονται στις παρακάτω παραγράφους ως προς τις επιπτώσεις τους (θετικές ή αρνητικές) στην λειτουργία της μηχανής. Στον ίδιο πίνακα παραθέτονται προς σύγκριση και οι ιδιότητες καύσης της βενζίνης, καθώς και του μεθανίου, που είναι ένα ακόμα ενδιαφέρον καύσιμο για τις μηχανές εσωτερικής καύσης.

Ιδιότητα	Υδρογόνο	Μεθάνιο	Βενζίνη
Όρια καύσης (Περιεκτικότητα % κ.ο. στον αέρα)	4-75	5,3-15	1,2-6
Όρια αναφλεξιμότητας	0,1 – 7,1	–	~ 0,7 – 4
Ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης (mJ)	0,02	0,28	0,25
Ταχύτητα ομαλής καύσης υπό Κ.Σ. (m/s)	1,9	0,38	0,37-0,43
Αδιαβατική θερμοκρασία καύσης (K)	2318	2190	~ 2470
Θερμοκρασία αυτανάφλεξης (K)	858	813	~ 501– 744
Στοιχειομετρικός λόγος Αέρα/Καυσίμου κατά μάζα	34,3	–	15,1
Στοιχειομετρικός λόγος Αέρα/Καυσίμου κατ' όγκο	2,38	–	59,5
Ταχύτητα καύσης (m/s)	2,65-3,25	0,37-0,45	0,37-0,43
Κατώτερη θερμογόνος δύναμη (MJ/kg)	119,7	46,72	44,79

Ανώτερη θερμογόνο δύναμη (MJ/kg)	141,7	52,68	48,29
Συντελεστής διάχυσης στον αέρα (cm <sup>2</sup> /s)	0,61	0,189	0,05
Πυκνότητα αερίου σε ΚΣ (kg/m <sup>3</sup> )	0,083764	0,65119	4,4
Απόσταση σβησίματος φλόγας (mm)	0,64	2,03	~2,0
Θερμογόνο δύναμη ανά kg μάζας αέρα (MJ/kgair)	3,37	2,56	2,79

**Πίνακας 4.1:** Ιδιότητες καύσης του υδρογόνου σε σύγκριση με το μεθάνιο και τη βενζίνη.

Σύμφωνα με τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα το υδρογόνο χαρακτηρίζεται από κάποιες πολύ σημαντικές ιδιότητες καύσης που δύνανται να εξασφαλίσουν εξαιρετικά ποιοτικά χαρακτηριστικά λειτουργίας της μηχανής, και κάποιες άλλες που προϋποθέτουν την αναζήτηση και εφαρμογή καινοτόμων λύσεων για την εύρυθμη και χωρίς προβλήματα λειτουργία της. Από την άλλη μεριά, αυτές οι ίδιες ιδιότητες απαιτούν μία διαφορετική προσέγγιση του σχεδιασμού βασικών μερών και υποσυστημάτων του κινητήρα αλλά και επιβάλλουν διαφορετικές συνθήκες και ρυθμίσεις λειτουργίας σε σχέση με έναν κινητήρα βενζίνης (π.χ. υψηλότερους ρυθμούς περιστροφής). Ιδιαίτερη μνεία θα δοθεί παρακάτω στα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά επιμέρους τμημάτων και υποσυστημάτων του κινητήρα. Οι ιδιότητες καύσης του υδρογόνου επιγραμματικά αναφέρονται εδώ και διεξοδικά επεξηγούνται στις παραγράφους που ακολουθούν ως προς την ευεργετική ή αρνητική επίδρασή τους στην λειτουργία της μηχανής.

- Ευρύ φάσμα αναφλεξιμότητας
- Χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης
- Μεγάλη ταχύτητα καύσης
- Υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης
- Μεγάλη ταχύτητα διάχυσης
- Πολύ χαμηλή πυκνότητα



- Μικρή απόσταση σβησίματος φλόγας
- Μεγάλη ενέργεια καύσης κατά μάζα

#### **4.4.1. Ευρύ φάσμα αναφλεξιμότητας**

Το υδρογόνο, σε σχέση με άλλα καύσιμα, παρουσιάζει ένα ευρύ φάσμα αναφλεξιμότητας. Η ιδιότητα αυτή του υδρογόνου εξασφαλίζει ότι η καύση του με αέρα μπορεί να επιτευχθεί με ένα ευρύ φάσμα λόγων αέρα – καυσίμου. Συνεπώς ακόμη και πολύ πτωχά μίγματα αέρα – καυσίμου αναφλέγονται εύκολα. Αυτή η δυνατότητα ανάφλεξης του καυσίμου σε πτωχά μίγματα είναι ιδανική και προσφέρει πολλά θετικά αποτελέσματα τόσο σε θέματα θερμικής απόδοσης και οικονομίας καυσίμου όσο και σε θέματα μείωσης των παραγόμενων ρύπων της καύσης (εκπεμπόμενων καυσαερίων).

Έτσι όταν ένας κινητήρας λειτουργεί με μίγματα πτωχότερα από την στοιχειομετρική αναλογία επιτυγχάνεται σημαντική οικονομία καυσίμου και πιο τέλεια καύση. Επίσης οι μέγιστες θερμοκρασίες καύσης είναι εν γένει χαμηλότερες και έτσι παρατηρείται μείωση των εκλυόμενων οξειδίων του αζώτου στην εξαγωγή. Βέβαια υπάρχει ένα όριο στη λειτουργία του κινητήρα με πτωχά μίγματα πέρα από το οποίο μειώνεται σημαντικά η ισχύς του εξαιτίας της μείωσης της ογκομετρικής "θερμικής δύναμης" του μίγματος.

#### **4.4.2. Χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης**

Το υδρογόνο παρουσιάζει πολύ μικρή ενέργεια ανάφλεξης. Με άλλα λόγια το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για την ανάφλεξη του υδρογόνου είναι πολύ μικρό ακόμα και σε σχέση με την βενζίνη ή το ντίζελ. Αυτή η ιδιότητα είναι που επιτρέπει στο υδρογόνο να καίγεται σε πτωχά μίγματα και εξασφαλίζει ανάφλεξη και πλήρη καύση ακόμα και με κρύο κινητήρα

Δυστυχώς όμως η μικρή ενέργεια ανάφλεξης έχει ως αρνητικό αντίκτυπο την εύκολη εκδήλωση του φαινομένου της προανάφλεξης εξαιτίας υπέρθερμων σημείων ή και πολύ θερμών αερίων μαζών στον θάλαμο καύσης που μπορεί να αποτελέσουν πηγές ανάφλεξης του μίγματος σε χρόνο διάφορο από την προκαθορισμένη στιγμή ηλεκτρικής εκκένωσης του σπινθηριστή.

### 4.4.3. Υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης

Το υδρογόνο παρουσιάζει σχετικά υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης (858K). Η σημαντική αυτή ιδιότητα παρέχει τη δυνατότητα στις μηχανές εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το υδρογόνο να λειτουργούν με μεγαλύτερους βαθμούς συμπίεσης απ' ό,τι οι κινητήρες βενζίνης. Ο βαθμός συμπίεσης αποτελεί ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά λειτουργίας κάθε κινητήρα εσωτερικής καύσης, και μάλιστα η μεγάλη σχέση συμπίεσης είναι επιθυμητή γιατί συμβάλλει στην αύξηση της θερμικής απόδοσης του συστήματος, καθώς και σε μεγαλύτερες ιπποδυνάμεις. Όπως είναι γνωστό, κατά τη φάση της συμπίεσης το μίγμα αέρα – καυσίμου που εισάγεται στο θάλαμο καύσης με θερμοκρασία  $T_1$ , θερμαίνεται και στο τέλος της συμπίεσης έχει θερμοκρασία  $T_2$  όπου  $T_2 > T_1$ . Επίσης κατά τη φάση της συμπίεσης ισχύει η σχέση:  $T_2 = T_1 (V_1/V_2)^{\gamma-1}$  όπου ο λόγος του αρχικού όγκου  $V_1$  και τελικού όγκου  $V_2$  του θαλάμου καύσης μετά τη συμπίεση είναι ευθέως ανάλογος της τελικής θερμοκρασίας του μίγματος. Επομένως όπως φαίνεται από τα παραπάνω η θερμοκρασία του μίγματος αέρα – καυσίμου στο τέλος της συμπίεσης είναι αυτή που θέτει το όριο στον βαθμό συμπίεσης. Στους κινητήρες υδρογόνου το όριο αυτό βρίσκεται υψηλότερα εξαιτίας της μεγάλης θερμοκρασίας αυτανάφλεξης. Αν το όριο αυτό ξεπεραστεί τότε παρουσιάζονται φαινόμενα κρουστικής προανάφλεξης εφόσον το μίγμα αυταναφλέγεται πριν το έμβολο φτάσει στο άνω νεκρό σημείο (ΑΝΣ).

### 4.4.4. Μεγάλη ταχύτητα καύσης

Μία άλλη σημαντική ιδιότητα του υδρογόνου είναι η μεγάλη ταχύτητα καύσης του. Η ταχύτητα καύσης είναι ένα θεμελιώδες και βασικό χαρακτηριστικό στην διαδικασία της καύσης και περιγράφει τη σχετική ταχύτητα του μετώπου της φλόγας σε σχέση με το άκαυστο μίγμα. Ο ρυθμός καύσης του μίγματος υδρογόνου – αέρα σε στοιχειομετρική αναλογία είναι ταχύς ενώ μειώνεται κάπως στις περιπτώσεις πτωχότερου μίγματος. Εντούτοις, ακόμη και σε ιδιαίτερα πτωχά μίγματα με μεγάλη περίσσεια αέρα το υδρογόνο καίγεται ταχύτατα. Η απελευθέρωση της ενέργειας είναι τόσο σύντομη και η διάρκεια της καύσης τόσο μικρή ώστε η καύση υδρογόνου να πλησιάζει περισσότερο από την καύση βενζίνης τον ιδανικό θερμοδυναμικό κύκλο με αποτέλεσμα σημαντικά μεγαλύτερο συντελεστή απόδοσης. Όμως η καύση πτωχών μιγμάτων παρότι έχει θετικές συνέπειες όσον αφορά στην κατανάλωση καυσίμου, στην απόλυτη τελική θερμοκρασία του θαλάμου καύσης και στις εκπομπές ρύπων, έχει ως αρνητικό επακόλουθο τις μικρότερες ιπποδυνάμεις σε σχέση με ΜΕΚ βενζίνης αντίστοιχης χωρητικότητας. Επίσης η σχεδόν στιγμιαία απελευθέρωση της ενέργειας και η σύντομη διάρκεια της καύσης έχουν ως δυσάρεστο αποτέλεσμα την καταπόνηση των μηχανικών μερών λόγω της απότομης αύξησης της πίεσης

και των πολύ μεγαλύτερων απόλυτων θερμοκρασιών στον κύλινδρο της μηχανής. Τέλος, το χαρακτηριστικό του υψηλού ρυθμού καύσης του υδρογόνου, επιτρέπει την πολύ ικανοποιητική λειτουργία του κινητήρα σε υψηλούς ρυθμούς περιστροφής.

#### **4.4.5. Πολύ χαμηλή πυκνότητα & μεγάλη κατά μάζα ενέργεια καύσης**

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1, το αέριο υδρογόνο παρουσιάζει πολύ χαμηλή πυκνότητα ως προς το μεθάνιο ή την βενζίνη. Έτσι παρά τη συγκριτικά μεγαλύτερη κατά μάζα ενέργεια καύσης του θα απαιτείτο μία τεράστια σε όγκο δεξαμενή ώστε να αποδοθεί ενέργεια, ανάλογη αυτής της βενζίνης, από το υδρογόνο ως ασυμπιεστο αέριο. Η πολύ χαμηλή πυκνότητα του υδρογόνου υπαγορεύει την ανάγκη για εξαιρετικά δαπανηρούς και ενεργοβόρους τρόπους αποθήκευσής του, όπως είναι η συμπίεση του, η αποθήκευσή του ως κρυογονικό υγρό και η αποθήκευσή του σε υδρίδια μετάλλου. Αξίζει να αναφερθεί εδώ ότι το υψηλό κόστος αποθήκευσης του υδρογόνου αποτελεί και τη σημαντικότερη τροχοπέδη για την απαρχή της ευρείας χρήσης του εξαιρετικού κατά τα άλλα καυσίμου, στις μηχανές εσωτερικής καύσης

#### **4.4.6. Υψηλός συντελεστής διάχυσης**

Αυτή είναι μία πολύ σημαντική ιδιότητα του υδρογόνου που περιγράφει την ικανότητα του καυσίμου να διαχέεται στον αέρα πιο αποτελεσματικά από τη βενζίνη δημιουργώντας έτσι ένα πιο ομοιογενές μίγμα επηρεάζοντας θετικά τη λειτουργία της μηχανής κατά την καύση πτωχών ή πολύ πτωχών μιγμάτων. Επίσης το χαρακτηριστικό αυτό του υδρογόνου ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο έκρηξης σε περίπτωση διαρροής εφόσον αυτό διαφεύγει και διαχέεται ταχύτατα στο περιβάλλον.



#### **Εικόνα 4.1**

Στο αριστερό μέρος της εικόνας 4.1 απεικονίζεται η διάχυση του υδρογόνου ύστερα από εκούσια ανάφλεξη του ρεζερβουάρ υδρογόνου. Στα δεξιά παρατηρούμε την ολοσχερή καταστροφή άλλου αυτοκινήτου με ρεζερβουάρ βενζίνης, ύστερα από παρόμοια ανάφλεξη.

#### 4.4.7. Μικρή απόσταση σβησίματος-εξάλειψης της φλόγας

Η ιδιότητα αυτή, της καύσης, που περιγράφει την απόσταση από τα τοιχώματα του κυλίνδρου στην οποία αποσβένεται το μέτωπο του αναφλεγέντος μίγματος λόγω θερμικών απωλειών, είναι ευεργετική για την απόδοση της MEK υδρογόνου εφόσον επιτρέπει στο μέτωπο της καύσης να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση πριν αυτό σβηστεί κοντά στα τοιχώματα του κυλίνδρου. Έτσι επιτυγχάνεται καλύτερη και πιο ομοιογενής καύση του μείγματος υδρογόνου σε σχέση με το μείγμα βενζίνης πριν η καύση εκτονωθεί λόγω θερμικών απωλειών. Η ίδια αυτή ιδιότητα όμως, δημιουργεί και τις συνθήκες εκείνες που οδηγούν στο φαινόμενο της ανάφλεξης του μείγματος μέσα στην πολλαπλή εισαγωγή κατά το χρόνο της εισαγωγής (backfire ή flashback).

#### 4.4.8. Υπολογισμός του λόγου αέρα – υδρογόνου για στοιχειομετρική καύση

Ακολουθεί ο υπολογισμός του λόγου αέρα – καυσίμου (Air Fuel Ratio), τόσο κατά μάζα όσο και κατά όγκο, για τη στοιχειομετρική καύση του υδρογόνου. Η θεωρητική ή αλλιώς στοιχειομετρική αντίδραση υδρογόνου και οξυγόνου δίνεται από τη χημική εξίσωση:



Επομένως για την πλήρη καύση δύο moles  $\text{H}_2$  απαιτείται ένα mole  $\text{O}_2$ . Επειδή όμως δεν χρησιμοποιείται καθαρό οξυγόνο ως μέσο οξείδωσης αλλά ατμοσφαιρικός αέρας πρέπει το άζωτο του αέρα να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς. Ισχύει:

$$\text{moles αέρα} = \text{moles O}_2 + \text{moles N}_2$$

Η περιεκτικότητα του αέρα σε άζωτο και οξυγόνο είναι 79%  $\text{N}_2$  και 21%  $\text{O}_2$ . Επομένως τα moles του αζώτου  $\text{N}_2$  για κάθε mole οξυγόνου  $\text{O}_2$  στον αέρα είναι:

$$\begin{aligned} \text{Moles N}_2 &= 1 \text{ mole O}_2 \times (79 / 21) = 3.7619 \text{ moles. Άρα moles αέρα} = \text{moles O}_2 + \text{moles N}_2 \\ &= 1 + 3,7619 = 4,7619 \text{ moles} \end{aligned}$$

$$\text{Βάρος οξυγόνου (O}_2\text{)} = 1 \text{ mole O}_2 \times 16 \text{ g/mole} = 32\text{g.}$$

$$\text{Βάρος αζώτου (N}_2\text{)} = 3,7619 \text{ moles N}_2 \times 28 \text{ g/mole} = 105,33\text{g.}$$

$$\text{Βάρος αέρα} = 105,33 + 32 = 137,33\text{g.}$$

$$\text{Βάρος υδρογόνου (H}_2\text{)} = 2 \text{ moles H}_2 \times 2 \text{ g/mole} = 4\text{g}$$

Επομένως τώρα μπορεί να υπολογιστεί ο στοιχειομετρικός λόγος αέρα / καυσίμου κατά μάζα και κατά όγκο.

$$\text{A/F κατά μάζα} = \text{μάζα αέρα} / \text{μάζα υδρογόνου (H}_2\text{)} = 137,33\text{g} / 4\text{g} = 34,3325 : 1$$

$$\text{A/F κατ' όγκο} = \text{όγκος (moles) αέρα} / \text{όγκος (moles) υδρογόνου (H}_2\text{)} = 4,7619 \text{ moles} / 2 \text{ moles} = 2,38 : 1$$

Υπενθυμίζεται ότι για τη στοιχειομετρική καύση ενός μέρους βενζίνης απαιτούνται περίπου 14,7 μέρη αέρα κατά μάζα.

#### **4.5. ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ & ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΥΤΩΝ ΜΕ ΤΟΥΣ ΡΥΠΟΥΣ ΤΩΝ ΜΕΚ ΒΕΝΖΙΝΗΣ**

Η παγκόσμια κατανάλωση ορυκτών καυσίμων έχει σχεδόν διπλασιαστεί τις τελευταίες τρεις δεκαετίες. Η συνολική ζήτηση ενέργειας καλύπτεται από τους ορυκτούς υδρογονάνθρακες σε ποσοστό μεγαλύτερο του 90%. Η ζήτηση αυτή αναμένεται να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια με πολύ ταχύτερους ρυθμούς λόγω της αύξησης των ενεργειακών αναγκών στις αναπτυγμένες χώρες αλλά και της αλματώδους αύξησης στις αναπτυσσόμενες. Η αύξηση της ζήτησης σε ενέργεια που θα οδηγήσει με μαθηματική ακρίβεια στην εξάντληση των αποθεμάτων πετρελαίου σε μερικές δεκαετίες συνοδεύεται από ανάλογη αύξηση στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα του βασικού αιτίου του φαινομένου του θερμοκηπίου. Η μηχανή εσωτερικής καύσης, στην οποία ο σύγχρονος άνθρωπος οφείλει την κάλυψη των μεταφορικών του αναγκών λογίζεται ως ο σημαντικότερος παράγοντας εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Όμως οι μηχανές εσωτερικής καύσης εκτός από το διοξείδιο του άνθρακα εκπέμπουν και πολλούς άλλους βλαβερούς πρωτογενείς ή δευτερογενείς ρύπους όπως είναι το μονοξείδιο του άνθρακα, άκαυστοι υδρογονάνθρακες, αλδεύδες, κετόνες, οξείδια του θείου, οξείδια του αζώτου, βενζόλιο και άλλα. Κάποιες από αυτές τις ενώσεις όπως το διοξείδιο του άνθρακα είναι βασικοί υπαίτιοι του φαινομένου του θερμοκηπίου. Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι ισχυρότατο τοξικό αέριο που σε μικρές συγκεντρώσεις προκαλεί βλάβες στο κεντρικό νευρικό σύστημα του ανθρώπου ενώ σε μεγάλες συγκεντρώσεις προκαλεί ακόμη και τον θάνατο.

Άλλες ενώσεις όπως το διοξείδιο του θείου και τα οξείδια του αζώτου είναι υπεύθυνες για το φαινόμενο της όξινης βροχής. Το διοξείδιο του αζώτου επίσης υπό την επίδραση της υπερϊώδους ακτινοβολίας, δημιουργεί το όζον με δυσάρεστες συνέπειες για τους ανθρώπους των πόλεων. Τέλος κάποιες άλλες ενώσεις, γνωστές ως αρωματικοί υδρογονάνθρακες όπως είναι το βενζόλιο που εκπέμπεται από αυτοκίνητα με κατεστραμμένους και άρα αναποτελεσματικούς καταλύτες, έχουν ενοχοποιηθεί για την πρόκληση καρκινογένεσεων.

Λαμβάνοντας όλα τα παραπάνω υπόψη γίνονται εύκολα κατανοητοί οι λόγοι για τους οποίους όλες οι προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στην εξεύρεση ενός πιο καθαρού καυσίμου. Το

υδρογόνο είναι το πλέον υποσχόμενο από όλα τα καύσιμα εφόσον από την χημική του αλυσίδα απουσιάζουν εντελώς τα μόρια άνθρακα και επομένως από την καύση του με το οξυγόνο του αέρα παράγονται μόνο υδρατμοί και κάποια οξειδία του αζώτου. Τα οξειδία του αζώτου οφείλουν την ύπαρξη τους, στις υψηλές θερμοκρασίες του θαλάμου καύσης. Όπως και στους κινητήρες βενζίνης, αλλά και σε κάθε καύση στην οποία παρατηρούνται υψηλές θερμοκρασίες, μέρος του οξυγόνου και του αζώτου του αέρα αντιδρούν μεταξύ τους με τον ίδιο μηχανισμό προς σχηματισμό μονοξειδίου του αζώτου (NO). Μέρος του μονοξειδίου του αζώτου αντιδρά εν συνεχεία με το οξυγόνο είτε στην εξαγωγή της μηχανής είτε στην ατμόσφαιρα και σχηματίζει διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>). Οι συνολικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) κάθε μηχανής είναι ίσες με το άθροισμα των συγκεντρώσεων μονοξειδίου και διοξειδίου του αζώτου και συνήθως μετρώνται σε μέρη ανά εκατομμύριο (ppm) ή gr/kWh. Όπως είναι αναμενόμενο περισσότερα οξειδία του αζώτου ανιχνεύονται στις εκπομπές των MEK υδρογόνου λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών που επικρατούν στο θάλαμο καύσης τους. Εκτός από τα NO<sub>x</sub>, στα προϊόντα της καύσης του υδρογόνου ανιχνεύονται και κάποιοι άκαυστοι υδρογονάνθρακες μαζί με μικρές ποσότητες μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα. Αυτό συμβαίνει γιατί πάντοτε στους κινητήρες, κάποια ελάχιστη ποσότητα λιπαντικού καταφέρνει να εισχωρεί στο θάλαμο καύσης και καίγεται μαζί με το μείγμα. Βέβαια αυτές οι ποσότητες είναι απειροελάχιστες και δεν αποτελούν πρόβλημα.

#### **4.5.1. MEK υδρογόνου και οξειδία του αζώτου (Nox)**

Πρόσφατες έρευνες υποδεικνύουν το όζον (O<sub>3</sub>) της τροπόσφαιρας ως κύριο συστατικό του φωτοχημικού νέφους πάνω από τις μεγαλουπόλεις. Το αέριο αυτό δημιουργείται από τις φωτοχημικές αντιδράσεις που ενεργοποιούνται υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Τα οξειδία του αζώτου είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία της φωτοχημικής ρύπανσης και εμπλέκονται στον σχηματισμό του φωτοχημικού νέφους με τον κάτωθι απλό μηχανισμό:



Το διοξείδιο του αζώτου διασπάται υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μονοξειδίο του αζώτου και μονοατομικό οξυγόνο. Το μονοατομικό οξυγόνο με τη σειρά του ενώνεται με το δυατομικό οξυγόνο της ατμόσφαιρας και δημιουργεί το αέριο όζον στα κατώτερα στρώματα της κοντά στη επιφάνεια της γης. Κύρια πηγή οξειδίων του αζώτου είναι οι εξατμίσεις των οχημάτων αν και δεν είναι η μοναδική. Το όζον στην ανώτερη ατμόσφαιρα (στρατόσφαιρα) έχει ευεργετικό ρόλο και προστατεύει τον άνθρωπο, τα φυτά και τα ζώα από την υπερϊώδη ακτινοβολία του ήλιου. Στην κατώτερη ατμόσφαιρα (τροπόσφαιρα) όμως,

προκαλεί σημαντικά προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον. Κάποια από αυτά περιλαμβάνουν βήχα, άσθμα, διαταραχή της αναπνευστικής λειτουργίας, φλεγμονή στους πνεύμονες και πιθανή επιδεκτικότητα σε μολύνσεις του αναπνευστικού. Εξάλλου το όζον είναι ο ρύπος με τις δυσμενέστερες επιδράσεις στα φυτά διότι μπορεί να προκαλέσει μείωση της αγροτικής παραγωγής και καταστροφή της δασικής βλάστησης.

Τα οξείδια του αζώτου απ' την άλλη μεριά, σε υψηλές συγκεντρώσεις είναι υπεύθυνα για την πρόκληση βλαβών στους ανθρώπους και στο οικοσύστημα. Οι βλαβερές συνέπειες μπορεί να διαφέρουν από έναν απλό βήχα ή δυσκολία αναπνοής μέχρι και χρόνια αναπνευστική λοίμωξη και πνευμονική δυσλειτουργία. Σε μεγάλες συγκεντρώσεις είναι αντιληπτά στον ουρανό των μεγαλουπόλεων από τη δυσάρεστη καφέ απόχρωση που προσδίδουν στην ατμόσφαιρα. Στα οξείδια του αζώτου οφείλεται επίσης και το φαινόμενο της όξινης βροχής. Η όξινη βροχή οφείλει την ονομασία της στον όξινο χαρακτήρα της (χαμηλό PH) εξαιτίας της αυξημένης περιεκτικότητάς της σε θειικό και νιτρικό οξύ ( $\text{HNO}_3$  &  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Τα οξέα αυτά σχηματίζονται από την αντίδραση των οξειδίων του αζώτου και του διοξειδίου του θείου με τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας. Οι συνέπειες της όξινης βροχής είναι εξαιρετικά καταστρεπτικές τόσο για τα ζώα, τα φυτά και τα ψάρια, όσο και για τον άνθρωπο. Έτσι η όξινη βροχή προσβάλλει το δέρμα και το αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου, την υδρόβια ζωή σε λίμνες και ποτάμια, τις γεωργικές καλλιέργειες και τη δασική βλάστηση, καθώς και τα μάρμαρα των μνημείων.

Επομένως είναι πολύ σημαντικό για την εισαγωγή του υδρογόνου στον παγκόσμιο ενεργειακό χάρτη των μεταφορών, να αναγνωριστούν οι συνθήκες λειτουργίας της μηχανής που διευκολύνουν ή αποτρέπουν τον σχηματισμό των οξειδίων του αζώτου κατά την καύση του υδρογόνου και να εφαρμοστούν μηχανισμοί μείωσης των εκπεμπόμενων ρύπων. Με άλλα λόγια, είναι απαραίτητο η έρευνα να καταδείξει τους ρυθμιστικούς παράγοντες που επηρεάζουν το σχηματισμό των οξειδίων του αζώτου και να επιλέξει εκείνες τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα που ελαχιστοποιούν τα  $\text{NO}_x$  χωρίς σημαντική μείωση της απόδοσης του.

#### **4.5.2. Παράμετροι λειτουργίας των ΜΕΚ υδρογόνου που επηρεάζουν το σχηματισμό των $\text{NO}_x$**

Στους κινητήρες βενζίνης ή ντίζελ τα υψηλότερα επίπεδα των  $\text{NO}_x$  παρατηρούνται όταν το μίγμα αέρα – καυσίμου καίγεται σε στοιχειομετρική αναλογία. Η ίδια τάση παρατηρείται



επίσης και για τα μίγματα υδρογόνου – αέρα. Οι μέγιστες θερμοκρασίες του θαλάμου καύσης κοντά στη στοιχειομετρική αναλογία σε συνδυασμό με την ικανή διαθέσιμη ποσότητα οξυγόνου ευθύνονται για τα υψηλά επίπεδα των NOx.

Έχει παρατηρηθεί ότι τα επίπεδα των οξειδίων του αζώτου στην εξαγωγή εξαρτώνται από τον λόγο αέρα – καυσίμου. Έτσι μεταβάλλοντας τον λόγο αέρα –καυσίμου και καταγράφοντας τη θερμοκρασία στο θάλαμο καύσης καθώς και τα επίπεδα των NOx, είναι δυνατόν να καθοριστούν οι συνθήκες εκείνες που ελαχιστοποιούν τα NOx. Παρότι διαφορετικά πειράματα με διαφορετικούς κινητήρες που διεξήχθησαν κατά καιρούς έχουν καταλήξει σε ελαφρώς διαφορετικά αποτελέσματα και απόλυτα νούμερα σε επιμέρους ζητήματα των εκπομπών NOx όλοι συμφωνούν στον λόγο ισοδυναμίας καυσίμου – αέρα  $\Phi$  (equivalence ratio) που επιτρέπει την ομαλή και απροβλημάτιστη λειτουργία του κινητήρα περιορίζοντας παράλληλα σημαντικά το σχηματισμό NOx. Έτσι οι περισσότεροι από τους ερευνητές καταλήγουν σε μία περιοχή του λόγου ισοδυναμίας  $\Phi$ , ( $0,5 < \Phi < 1,1$ ), εκτός της οποίας εξασφαλίζεται ομαλή λειτουργία με χαμηλές εκπομπές NOx.

Έχει βρεθεί επίσης ότι οι εκπομπές των NOx εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από το χρόνο της έγχυσης και την προπορεία της ανάφλεξης. Οι παράγοντες αυτοί πρέπει να ρυθμίζονται ειδικά για κάθε κινητήρα υδρογόνου με γνώμονα τη βέλτιστη απόδοση με την ελάχιστη δυνατή ρύπανση. Έχει παρατηρηθεί ότι μία μικρή προπορεία σε σχέση με την προπορεία που οδηγεί σε μέγιστη απόδοση ή βαθμό απόδοσης μπορεί να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές NOx. Επίσης η MEK υδρογόνου απαιτεί μικρότερη προπορεία σε σχέση με την αντίστοιχη MEK βενζίνης γεγονός που οφείλεται στην ταχύτερη καύση του υδρογόνου. Έτσι λιγότερα NOx παράγονται εφόσον δεν υπάρχει αρκετός διαθέσιμος χρόνος για την εξέλιξη του μηχανισμού σχηματισμού τους.

Ο βαθμός συμπίεσης όπως έχει παρατηρηθεί στα σχετικά με το θέμα πειράματα είναι μία ακόμη παράμετρος λειτουργίας του κινητήρα από την οποία εξαρτάται η συγκέντρωση των NOx στην εξαγωγή. Ο μεγάλος βαθμός συμπίεσης συνεπάγεται υψηλότερες πιέσεις και θερμοκρασίες στο θάλαμο καύσης και επομένως υψηλότερες συγκεντρώσεις NOx. Έχει αποδειχτεί πειραματικά ότι η χρήση της "πεταλούδας" για τον έλεγχο του φορτίου του κινητήρα αυξάνει τις εκπομπές των NOx. Το γεγονός ότι τα ευρέα όρια καύσης του υδρογόνου επιτρέπουν την λειτουργία του κινητήρα χωρίς "πεταλούδα" είναι ιδιαίτερα ευεργετικό στη μείωση των εκπομπών NOx καθώς το πτωχότερο μίγμα που επιτυγχάνεται σε συνδυασμό με την απουσία "πεταλούδας" συνεπάγονται χαμηλότερες θερμοκρασίες στο θάλαμο καύσης.

Επιπλέον η μεγάλη ταχύτητα διάχυσης είναι μία ακόμη ιδιότητα του υδρογόνου που επιδρά με θετικό τρόπο στις εκπομπές των οξειδίων του αζώτου. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει την ομογενοποίηση του μίγματος αέρα – υδρογόνου χωρίς την εφαρμογή των τεχνικών σχεδιασμού του θαλάμου καύσης, που συνηθίζονται στους κινητήρες βενζίνης για την ενίσχυση της τυρβώδους ροής προς ομογενοποίηση του μίγματος. Έτσι η τυρβώδης ροή περιορίζεται σημαντικά σε σχέση με τις MEK βενζίνης ή ντίζελ και επιτυγχάνονται χαμηλότερες θερμοκρασίες στο θάλαμο καύσης με συνακόλουθη μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub>.

Τέλος, η επιλογή του υδρογόνου ως καύσιμο στη μορφή κρυογονικού υγρού συμβάλλει στη διατήρηση του μίγματος στην εισαγωγή σε χαμηλή θερμοκρασία και κατ' επέκταση στην επίτευξη σχετικά χαμηλών μέγιστων θερμοκρασιών καύσης στην μηχανή. Από όλα τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι κάθε παράμετρος λειτουργίας του κινητήρα, όπως για παράδειγμα ο βαθμός συμπίεσης που επηρεάζει αυξητικά ή μειωτικά τις μέγιστες θερμοκρασίες του θαλάμου καύσης επηρεάζει αντίστοιχα και τα εκπεμπόμενα οξείδια του αζώτου.

### **4.5.3. Μηχανισμοί μείωσης των εκπεμπόμενων NO<sub>x</sub>**

Η πειραματική έρευνα με αντικείμενο τις μηχανές υδρογόνου έχει καταδείξει διάφορες αποτελεσματικές τεχνικές με σημαντική την επίδραση αυτών στη μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου. Έτσι προτείνεται η ανακύκλωση καυσαερίων (EGR) και η κατάλυση των προϊόντων της καύσης στην εξαγωγή, μέθοδοι γνωστές από τους κινητήρες βενζίνης καθώς και η έγχυση νερού στο μείγμα αέρα – υδρογόνου. Όπως έχει αναφερθεί οι υψηλές θερμοκρασίες που παρατηρούνται στον κύλινδρο όταν αυξάνεται το φορτίο της μηχανής επιταχύνουν το σχηματισμό οξειδίων του αζώτου. Αν και η έγχυση ατμού στην πολλαπλή εισαγωγής αποτελεί έναν τρόπο μείωσης των NO<sub>x</sub> εντούτοις η έγχυση νερού σε υγρή μορφή έχει αποδειχτεί ότι μπορεί να μειώσει σημαντικά τις θερμοκρασίες στο θάλαμο καύσης εφόσον η θερμότητα η αναγκαία για την εξάτμιση του νερού εξάγεται από την θερμική δύναμη του μίγματος. Ουσιαστικά το νερό δρα ως ένας διαλύτης που ελέγχει τη μέγιστη θερμοκρασία καύσης. Η εξάτμιση του νερού λοιπόν βοηθά στη μείωση της θερμοκρασίας του μίγματος. Επιπρόσθετα ο ατμός μειώνει τη συγκέντρωση οξυγόνου και αζώτου και μεταβάλλει τις ειδικές θερμότητες των συστατικών του μίγματος. Ο υδατοψεκασμός στην εισαγωγή λοιπόν μπορεί να χαρακτηριστεί ως μία πολύ αποτελεσματική μέθοδος μείωσης των εκπομπών αζώτου παρότι μπορεί να επιφέρει δυσμενείς συνέπειες στον κινητήρα όπως

οξειδωση των μεταλλικών μερών του και αλλοίωση της σύνθεσης του λιπαντικού (oil contamination). Η ανακύκλωση των καυσαερίων εξάλλου, είναι μία ακόμη μέθοδος μείωσης των NOx αλλά είναι αποτελεσματική μόνο για τα πτωχά μίγματα υδρογόνου – αέρα. Σε στοιχειομετρικά ή πλούσια μείγματα το όφελος είναι αμελητέο.

Σύμφωνα με σχετικά πειράματα η μεγάλη ταχύτητα καύσης των μιγμάτων υδρογόνου – αέρα επιτρέπει την ανακύκλωση των καυσαερίων ακόμη και σε ποσοστό 50% με αμελητέες τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία του κινητήρα. Τα αντίστοιχα επίπεδα ανακύκλωσης των καυσαερίων για τις MEK βενζίνης βρίσκονται στο 15 – 30%.

#### **4.5.4. Υπεροξειδίο του υδρογόνου ως ρύπος των MEK υδρογόνου**

Πέρα από τα οξείδια του αζώτου, για τα οποία εκτεταμένες αναφορές υπάρχουν στην σχετική με τις MEK υδρογόνου βιβλιογραφία, μία ακόμη χημική ένωση – το υπεροξειδίο του υδρογόνου (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) – ανιχνεύεται στην εξαγωγή της μηχανής υδρογόνου. Οι συνέπειες του υπεροξειδίου του υδρογόνου στο περιβάλλον, αν και σπανίως αναφέρεται ως ρύπος των MEK υδρογόνου στην σχετική βιβλιογραφία, δεν πρέπει να υποτιμηθούν. Το υπεροξειδίο του υδρογόνου αποσυντίθεται στην ατμόσφαιρα και σχηματίζει ρίζες υδροξυλίου, οι οποίες έχουν βαρύνοντα ρόλο στο σχηματισμό της φωτοχημικής ομίχλης. Διάφορες πειραματικές μετρήσεις έδειξαν ότι για λόγο ισοδυναμίας καυσίμου αέρα  $\Phi > 0,5$  η συγκέντρωση υπεροξειδίου του υδρογόνου στην εξαγωγή ήταν πρακτικά μηδενική ενώ για  $\Phi < 0,5$  το υπεροξειδίο του υδρογόνου ήταν ανιχνεύσιμο με τα επίπεδα συγκέντρωσής του να αυξάνονται όσο ο λόγος ισοδυναμίας μειωνόταν. Οι υψηλές συγκεντρώσεις υπεροξειδίου του υδρογόνου στην εξαγωγή, σε χαμηλούς λόγους  $\Phi$ , πιθανότατα οφείλονται σε προ της καύσης αντιδράσεις στο θάλαμο καύσης. Πάντως, περαιτέρω επιστημονική έρευνα είναι απαραίτητη για τον ποσοτικό προσδιορισμό του συγκεκριμένου ρύπου για διάφορες συνθήκες λειτουργίας των MEK υδρογόνου και εν τέλει, θα πρέπει να αποσαφηνιστεί αν οι συγκεντρώσεις υπεροξειδίου του υδρογόνου είναι ικανές να αποτελέσουν μία νέα πηγή κινδύνου για το περιβάλλον. Σε ένα τέτοιο ενδεχόμενο, η χρήση καταλυτικού ή θερμικού μετατροπέα είναι επιτακτική προς αποσύνθεση του υπεροξειδίου του υδρογόνου (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) σε υδρογόνο H<sub>2</sub> και οξυγόνο O<sub>2</sub>.

## **4.6. ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΑΝΩΜΑΛΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ**

Οι ιδιότητες καύσης του υδρογόνου όπως τα ευρέα όρια αναφλεξιμότητας, η μεγάλη ταχύτητα καύσης και η μικρή ενέργεια ανάφλεξης είναι ιδιαίτερα επωφελείς για τη χρήση του καυσίμου στις μηχανές εσωτερικής καύσης και προσδίδουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά λειτουργίας στις ΜΕΚ υδρογόνου. Εντούτοις, οι ίδιες ιδιότητες είναι αυτές που ευνοούν τα φαινόμενα ανώμαλης καύσης, γνωστά και από τις ΜΕΚ βενζίνης όπως είναι η προανάφλεξη (preignition), η κρουστική καύση (knock ή knocking) και η ανάφλεξη του μίγματος στην πολλαπλή εισαγωγής (induction ignition ή backfire). Τα φαινόμενα αυτά όταν εκδηλώνονται στις μηχανές εσωτερικής καύσης έχουν ως αποτέλεσμα την άνοδο της πίεσης και της θερμοκρασίας στον κύλινδρο, τη μείωση της απόδοσης και την απώλεια ισχύος της μηχανής, και μπορεί να προκαλέσουν από ένα απλό σβήσιμο του κινητήρα μέχρι και σημαντική καταστροφή επιμέρους τμημάτων του.

### **4.6.1. Ανάφλεξη εισαγωγής (backfire)**

Η ανάφλεξη κατά την φάση της εισαγωγής είναι ένα φαινόμενο που μπορεί να εκδηλωθεί σε κάθε μηχανή εσωτερικής καύσης που η ανάμιξη του καυσίμου γίνεται πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο καύσης. Οφείλεται στην ανάφλεξη του μίγματος αέρα – καυσίμου από μία πηγή υψηλού θερμικού φορτίου κατά το χρόνο της εισαγωγής όταν η βαλβίδα εισαγωγής είναι ακόμα ανοιχτή και επομένως το μίγμα εκρήγνυται στην πολλαπλή εισαγωγής. Στα πρώτα βήματα της έρευνας σχετικά με τις ΜΕΚ υδρογόνου όπου η ανάμιξη του μίγματος γινόταν με εξαεριωτή (καρμπυρατέρ), ο περιορισμός του φαινομένου ήταν δύσκολος, όπως και η εξεύρεση των αιτίων που το προκαλούσαν. Έτσι η ανάφλεξη στην εισαγωγή αποτέλεσε το σημαντικότερο εμπόδιο στην εξέλιξη των μηχανών εσωτερικής καύσης υδρογόνου καθώς ο έλεγχος του φαινομένου αποδείχθηκε ιδιαίτερα δύσκολος και τα πρώτα μηνύματα ήταν απολύτως αποθαρρυντικά λόγω της συχνής και δυσεπίλυτης εμφάνισης του φαινομένου. Με το πέρασμα των ετών όμως η επιστημονική έρευνα ανέδειξε όλους εκείνους τους μηχανισμούς που συντελούν στην εκδήλωση του φαινομένου καθώς και τις τεχνολογικές προτάσεις αντιμετώπισής του.

#### 4.6.1.1. Αιτίες πρόκλησης ανάφλεξης στην εισαγωγή

Οι αιτίες που προκαλούν την ανάφλεξη στην εισαγωγή επεξηγούνται αναλυτικά στις σελίδες που ακολουθούν:

- **Υπέρθερμα σημεία στο θάλαμο καύσης**, τα οποία μπορεί να είναι επικαθίσεις στα τοιχώματα του κυλίνδρου και σωματίδια από την πυρόλυση του λιπαντικού που λόγω κατασκευαστικών ανοχών ή άλλων αιτιών μπορεί να έχει εισχωρήσει στον θάλαμο καύσης. Ακόμη και αδρανή σωματίδια σκόνης στον αέρα της εισαγωγής αποτελούν εν δυνάμει υπέρθερμα σημεία. Η θερμοκρασία των μικρών αυτών σωματιδίων στο τέλος της φάσης της εκτόνωσης μπορεί να είναι σημαντικά υψηλότερη από την μέση θερμοκρασία των επιφανειών του θαλάμου καύσης εξαιτίας της μικρής θερμικής μάζας και των ιδιοτήτων ανεπαρκούς μεταφοράς της θερμότητας αυτών στο περιβάλλον τους. Έτσι κατά τη φάση της εισαγωγής τα σωματίδια αυτά μπορεί να έχουν θερμοκρασία τόσο υψηλή ώστε να αποτελέσουν εστία ανάφλεξης του εισαγόμενου στο θάλαμο μίγματος. Άλλες υπέρθερμες πηγές ανάφλεξης μπορεί να είναι ο ίδιος ο σπινθηριστής (μπουζί), μία ελλιπώς ψυχόμενη βαλβίδα εξαγωγής καθώς και εναπομείνουσες ποσότητες υπέρθερμων αερίων μαζών από τον προηγούμενο κύκλο καύσης. Όλα τα παραπάνω σημεία μπορεί να έχουν την απαιτούμενη ελάχιστη ενέργεια για την ανάφλεξη του μίγματος υδρογόνου στην πολλαπλή εισαγωγής κατά το διάστημα που η βαλβίδα εισαγωγής παραμένει ανοιχτή.
- **Εναπομείνουσα ενέργεια στο ηλεκτρικό κύκλωμα της ανάφλεξης:** Είναι πιθανό εξαιτίας της χαμηλότερης συγκέντρωσης ιόντων κατά την καύση του μίγματος αέρα – υδρογόνου σε σχέση με τη συγκέντρωση ιόντων στο καύσιμο μίγμα αέρα – βενζίνης να μην εκλύεται όλη η ενέργεια ανάφλεξης στο μίγμα για την ανάφλεξή του και μέρος αυτής να παραμένει στο κύκλωμα μέχρις ότου επικρατήσουν στον κύλινδρο συνθήκες χαμηλότερης πίεσης τέτοιες που να ευνοήσουν μία δεύτερη ανεπιθύμητη ανάφλεξη κατά το χρόνο της εκτόνωσης ή της εισαγωγής.
- **Επαγωγή στα καλώδια του ηλεκτρικού συστήματος ανάφλεξης:** Αναφέρεται στην σχετική βιβλιογραφία η περίπτωση κατά την οποία σε πολυκύλινδρους κινητήρες η ελεγχόμενη ανάφλεξη σε έναν κύλινδρο μπορεί να προκαλέσει την επαγωγική ανάφλεξη σε γειτονικό του κύλινδρο στην περίπτωση που τα καλώδια του ηλεκτρικού συστήματος ανάφλεξης είναι τοποθετημένα σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους.
- **Διαδοχικές προαναφλέξεις:** Η προανάφλεξη είναι ένα φαινόμενο ανώμαλης καύσης το οποίο χαρακτηρίζει τις MEK υδρογόνου περισσότερο από τις MEK βενζίνης εξαιτίας της χαμηλής ενέργειας ανάφλεξης και του ευρύτατου πεδίου αναφλεξιμότητας του υδρογόνου. Η προανάφλεξη πυροδοτείται από υπέρθερμα σημεία στο θάλαμο καύσης – τα ίδια που

προκαλούν και την ανάφλεξη στην εισαγωγή – και έχει ως συνέπεια την πρόωμη καύση του μίγματος κατά τη φάση της συμπίεσης και την ανάπτυξη ιδιαίτερα υψηλών θερμοκρασιών στις επιφάνειες του θαλάμου καύσης. Διαδοχικές προαναφλέξεις συμβαίνουν όλο και νωρίτερα εξαιτίας της διαδοχικής αύξησης της θερμοκρασίας και επομένως το έμβολο τείνει να βρίσκεται κατά τη στιγμή της προανάφλεξης όλο και μακρύτερα από το ΑΝΣ και όλο και πιο κοντά στο ΚΝΣ. Αν η μηχανή αντέξει τις τάσεις και τις καταπονήσεις μετά από τις διαδοχικές προαναφλέξεις και υπάρξει υπέρθερμο σημείο κατά το χρόνο της εισαγωγής μπορεί το μίγμα αέρα – καυσίμου να αναφλεγεί πριν το κλείσιμο της βαλβίδας εισαγωγής δημιουργώντας έτσι εκρήξεις στην πολλαπλή εισαγωγής (backfire) με καταστροφικές για τον κινητήρα συνέπειες. Ο μηχανισμός αυτός της ανάφλεξης στην πολλαπλή εισαγωγής μπορεί να προκληθεί και από ένα άλλο είδος ανώμαλης καύσης αυτό της κρουστικής καύσης συνέπεια της οποίας είναι επίσης η άνοδος της θερμοκρασίας στο θάλαμο καύσης και η γένεση υπέρθερμων σημείων. Πρέπει βέβαια στο σημείο αυτό να επισημανθεί ότι σε πειράματα που έγιναν παρατηρήθηκε ανάφλεξη στην εισαγωγή χωρίς την προηγούμενη εμφάνιση προανάφλεξης ή κρουστικής καύσης, αλλά και ανιχνεύτηκε προανάφλεξη που ποτέ δεν οδήγησε σε ανάφλεξη στην εισαγωγή.

- **Καταλυτική επίδραση των μετάλλων του θαλάμου καύσης:** Έχει βρεθεί πως η επαφή του μίγματος αέρα – υδρογόνου με τις μεταλλικές επιφάνειες του θαλάμου καύσης και των βαλβίδων σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν στον κύλινδρο πυροδοτεί έναν μηχανισμό ανάφλεξης του μίγματος μέσω καταλυτικών αντιδράσεων των μετάλλων με το μίγμα σε συνθήκες θερμοκρασίας που σε άλλη περίπτωση δεν θα ήταν ικανές να προκαλέσουν προανάφλεξη. Γι' αυτό προτείνεται η επίστρωση αλουμινίου στις επιφάνειες του θαλάμου καύσης και των βαλβίδων με σκοπό αφ' ενός τη μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας των τοιχωμάτων του θαλάμου καύσης και αφ' ετέρου τον περιορισμό των πιθανοτήτων ανάφλεξης του μίγματος εξαιτίας καταλυτικών αντιδράσεων των θερμών μετάλλων με το καύσιμο υδρογόνο.

#### 4.6.1.2. Μηχανισμοί αντιμετώπισης της ανάφλεξης εισαγωγής

Είναι σαφές από τα παραπάνω ότι κάθε μέθοδος ανάμιξης του μίγματος αέρα – καυσίμου εκτός του θαλάμου καύσης (εξωτερικός σχηματισμός μίγματος) παρέχει πρόσφορο έδαφος για την ανάφλεξη του μίγματος στην πολλαπλή εισαγωγής. Από τις μεθόδους εξωτερικού σχηματισμού του μίγματος οι οποίες θα αναπτυχθούν αργότερα στο Κεφάλαιο αυτό η πιο υποσχόμενη μέθοδος είναι αυτή της έγχυσης του καυσίμου στον αυλό εισαγωγής διαδοχικά σε κάθε κύλινδρο κατά το άνοιγμα της βαλβίδας εισαγωγής γνωστή ως PFI (Port Fuel Injection). Η μέθοδος αυτή περιορίζει σημαντικά την πιθανότητα ανάφλεξης στην εισαγωγή χωρίς όμως να την εκμηδενίζει. Αντιθέτως η τελευταία τεχνολογία δανεισμένη από τους κινητήρες diesel που επιτρέπει την άμεση έγχυση του καυσίμου απευθείας στο θάλαμο καύσης μέσω συστημάτων ψεκασμού υψηλής πίεσης, αποκλείει σε κάθε περίπτωση την εμφάνιση του φαινομένου της ανάφλεξης στην εισαγωγή εφόσον το καύσιμο μίγμα σχηματίζεται απευθείας στον κύλινδρο. Τα μπεκ ψεκασμού βρίσκονται μέσα στο θάλαμο καύσης και η μέθοδος αυτή ηλεκτρονικής έγχυσης του καυσίμου είναι γνωστή ως DI ή FSI (Direct Injection ή Fuel Stratified Injection). Τα συστήματα άμεσης έγχυσης βέβαια είναι πολύπλοκα και κοστοβόρα και η μετατροπή υαρχόντων κινητήρων σε πειραματικούς με την υιοθέτηση συστημάτων άμεσου ψεκασμού ήταν δύσκολη έως αδύνατη. Γι' αυτούς τους λόγους ελάχιστα χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα των MEK υδρογόνου παρά την τεχνολογική υπεροχή τους έναντι άλλων συστημάτων. Εξάλλου η χρησιμοποίησή τους χωρίς προβλήματα αξιοπιστίας και ρύπων έγινε εφικτή μόνο κατά την τελευταία δεκαετία ακόμη και για τους κινητήρες βενζίνης. Έτσι η ανάγκη για περιορισμό του κόστους και εύκολο έλεγχο των ρυθμίσεων της μηχανής επέβαλε την υιοθέτηση συστημάτων έγχυσης του καυσίμου στην πολλαπλή εισαγωγής (PFI) πιο πολύ από κάθε άλλη μέθοδο ψεκασμού. Η έγχυση του καυσίμου κοντά στη θυρίδα εισαγωγής στα τελευταία στάδια της φάσης συμπίεσης και η σωστή ρύθμιση της προπορείας αποτελούν τους δύο σημαντικότερους ρυθμιστικούς παράγοντες περιορισμού της ανάφλεξης στην εισαγωγή. Η μέθοδος αυτή μπορούσε να εξασφαλίσει με απλές μετατροπές και υπό συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας την ομαλή και απροβλημάτιστη λειτουργία της μηχανής χωρίς την παρουσία προανάφλεξης.

Πέρα από τη μέθοδο σχηματισμού του καυσίμου μίγματος άλλες τεχνικές περιορισμού του φαινομένου της ανάφλεξης στην εισαγωγή έχουν να κάνουν με την συγκράτηση των θερμοκρασιών σε επίπεδα που αποτρέπουν την ανάφλεξη του μίγματος από υπέρθερμα σημεία ή υπέρθερμες εναπομείνουσες μάζες καυσαερίων καθώς και επικαθίσεις. Έτσι προτείνεται η ανακύκλωση των καυσαερίων η καύση πτωχών μιγμάτων η έγχυση νερού στην

εισαγωγή η βελτιωμένη ψύξη των βαλβίδων και των μπουζί καθώς και η επίστρωση θερμικά αγωγίμου υλικού όπως το αλουμίνιο στις επιφάνειες του θαλάμου καύσης. Όλες οι παραπάνω μέθοδοι μειώνουν την ταχύτητα καύσης και αυξάνουν την απαιτούμενη ενέργεια ανάφλεξης. Κάθε άλλη μέθοδος που εξασφαλίζει μικρότερη ταχύτητα καύσης και μεγαλύτερη ενέργεια ανάφλεξης μπορεί να αποτελέσει τρόπο αποφυγής των φαινομένων πυρανόφλεξης.

Ακόμα ο σχεδιασμός των επιμέρους τμημάτων της μηχανής μπορεί να επιδεινώσει ή να επιλύσει το πρόβλημα της ανάφλεξης στην πολλαπλή εισαγωγή. Έτσι κατά το σχεδιασμό του θαλάμου καύσης πρέπει να αποφεύγονται γωνίες, εσοχές και ακμές μεγάλης κλίσης που μπορεί να αποτελέσουν εστίες ανεπιθύμητης ανάφλεξης με το σύνολο των επιφανειών να έχουν υποστεί διεξοδική επεξεργασία λείανσης. Επίσης η διείδυση του λιπαντικού στο θάλαμο καύσης πρέπει να αποφεύγεται με κάθε τρόπο και γι' αυτό απαιτούνται βελτιωμένα ελατήρια εμβόλων με στόχο τον κατά το δυνατόν περιορισμό των ανοχών μεταξύ των ελατηρίων και των τοιχωμάτων του θαλάμου καύσης. Ο αποκλεισμός του λιπαντικού από το θάλαμο καύσης πέρα από την αποφυγή των φαινομένων ανώμαλης καύσης είναι ιδιαίτερα σημαντικός και για τον περιορισμό των ρύπων. Τέλος οι σπινθηριστές που χρησιμοποιούνται στις MEK βενζίνης είναι ακατάλληλοι για τις MEK υδρογόνου εφόσον δεν είναι σχεδιασμένοι να αποβάλλουν το υψηλό θερμικό φορτίο στις συνθήκες υψηλότερων θερμοκρασιών που επικρατούν στο θάλαμο καύσης μίας μηχανής υδρογόνου αποτελώντας έτσι βασική θερμική πηγή πυρανόφλεξης.

#### **4.6.2. Προανάφλεξη (preignition)**

Ένα ακόμα σημαντικό φαινόμενο ανώμαλης καύσης που χαρακτηρίζει τις μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου και καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις συνθήκες λειτουργίας τους και τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού τους είναι η αποκαλούμενη προανάφλεξη. Η προανάφλεξη χαρακτηρίζει και τις MEK βενζίνης ορίζεται ως η πρωθύστερη ανάφλεξη του μίγματος κατά τη φάση της συμπίεσης πριν την ηλεκτρική εκκένωση του σπινθηριστή και οφείλεται σε πυρανόφλεξη εξαιτίας εστιών υψηλού θερμικού φορτίου. Με άλλα λόγια η προανάφλεξη προκαλείται από τις ίδιες αιτίες που προκαλούν την ανάφλεξη στην εισαγωγή. Επομένως αιωρούμενα σωματίδια και επικαθίσεις στα τοιχώματα του κυλίνδρου από την πυρόλυση του λιπαντικού καθώς και άλλα πιθανά υπέρθερμα σημεία όπως τα ηλεκτρόδια των μπουζί μία ελλιπώς ψυχόμενη βαλβίδα εξαγωγής ή εναπομείναντα καυσαέρια από προηγούμενο κύκλο στο θάλαμο καύσης μπορεί να έχουν την ικανή ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για την ανάφλεξη του μίγματος.

Η προανάφλεξη γίνεται ακουστικά αισθητή από το χαρακτηριστικό κροτάλισμα του κινητήρα κατά τη λειτουργία του και πειραματικά επαληθεύεται με ειδικούς αισθητήρες στο θάλαμο



καύσης που ανιχνεύουν την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας. Η πρόιμη απελευθέρωση του θερμικού φορτίου του μίγματος κατά το χρόνο της συμπίεσης έχει ως αποτέλεσμα την απότομη αύξηση της πίεσης στον κύλινδρο και γενικά υψηλότερες μέγιστες πιέσεις και θερμοκρασίες. Οι συνέπειες της προανάφλεξης στον κινητήρα είναι η μειωμένη απόδοση η απώλεια ισχύος και η τραχιά λειτουργία και στη χειρότερη περίπτωση προκαλούνται σημαντικές φθορές στα έμβολα και στον κορμό του κινητήρα. Μάλιστα οι πιέσεις και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο θάλαμο καύσης ύστερα από επαναλαμβανόμενες προαναφλέξεις είναι τόσο υψηλές που είναι ικανές να προκαλέσουν τη διάνοιξη οπής στο έμβολο. Εφόσον η ανάφλεξη στην εισαγωγή είναι στην πραγματικότητα μία πρόιμη μορφή προανάφλεξης είναι σαφές ότι οι ίδιες μέθοδοι που αποτρέπουν το φαινόμενο της ανάφλεξης στην εισαγωγή εμποδίζουν και την προανάφλεξη.

Έτσι η βελτιστοποίηση της ψύξης όλων των επιφανειών που μπορούν να αποτελέσουν αιτία πυρανόφλεξης, η επιλογή σπινθηριστών με μεγάλη ικανότητα αποβολής του θερμικού τους φορτίου και ο σχεδιασμός θαλάμων καύσης που συνδυάζουν τη σωστή λείανση απουσία απότομων ακμών και την κατά το δυνατόν τέλεια απομόνωση του λιπαντικού από το χώρο καύσης περιορίζουν σημαντικά τις πιθανότητες ανάφλεξης του μίγματος υδρογόνου από υπέρθερμα σημεία. Άλλες πιο προχωρημένες μέθοδοι περιορισμού της προανάφλεξης συμπεριλαμβάνουν τον υδατοψεκασμό στην εισαγωγή για την ψύξη του μίγματος, το μεταβλητό χρονισμό των βαλβίδων για την αποτελεσματική κένωση του θαλάμου καύσης από τα καυσάερια καθώς και την άμεση έγχυση του καυσίμου απευθείας στο θάλαμο καύσης.

### **4.6.3. Κρουστική καύση (knock)**

Η κρουστική καύση είναι ένα φαινόμενο ανώμαλης καύσης που χαρακτηρίζει τους κινητήρες Otto και ορίζεται ως η αυτανάφλεξη περιοχών του μίγματος αέρα – καυσίμου μπροστά από το μέτωπο της φλόγας, του αναφλεγέντος από τον σπινθήρα μίγματος. Έτσι αντί της βαθμιαίας και προοδευτικής καύσης του μίγματος, περιοχές του μίγματος αναφλέγονται πριν από την άφιξη του μετώπου της φλόγας με αποτέλεσμα την απότομη αύξηση της πίεσης στο θάλαμο καύσης. Το φαινόμενο αυτό πυροδοτείται από τις συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας που συνεχώς αυξάνονται στο θάλαμο καύσης κατά τη φάση της συμπίεσης, συνθήκες μάλιστα που επιτείνονται ύστερα από την εμφάνιση του σπινθήρα στο σπινθηριστή. Είναι επομένως σαφές ότι η κρουστική καύση θέτει τα όρια του βαθμού συμπίεσης για κάθε κινητήρα και εξαρτάται από τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης του καυσίμου. Όπως είδαμε στην Παράγραφο 4.3 η θερμοκρασία αυτανάφλεξης του υδρογόνου (858K) είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της βενζίνης και επομένως η καύση του υδρογόνου επιτρέπει τη λειτουργία του κινητήρα σε υψηλότερους βαθμούς συμπίεσης χωρίς την εμφάνιση κρουστικής ανάφλεξης. Έτσι εξηγείται η υψηλότερη ενεργειακή απόδοση των MEK υδρογόνου καθώς και ο μεγαλύτερος αριθμός οκτανίων του υδρογόνου (RON > 120) σε σχέση με τον αριθμό οκτανίων της βενζίνης.

## **4.7. ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ & ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΜΙΓΜΑΤΟΣ**

Στην έρευνα των μηχανών εσωτερικής καύσης υδρογόνου μία πλειάδα μεθόδων σχηματισμού του μίγματος αέρα – καυσίμου δοκιμάστηκε με κύριο γνώμονα τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και την απεξάρτηση από τα φαινόμενα ανώμαλης καύσης. Οι μέθοδοι αυτές, γνωστές και από τους κινητήρες βενζίνης, πέρα από τη βασική τους λειτουργία, την εισαγωγή δηλαδή της κατάλληλης ποσότητας καυσίμου στον θάλαμο καύσης έχουν να εκπληρώσουν και μία σειρά άλλων απαιτήσεων που είναι οι εξής:

- Αύξηση της ισχύος
- Βελτιωμένη απόδοση καυσίμου
- Μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων
- Ομαλή λειτουργία
- Αυξημένη αξιοπιστία
- Μειωμένο κόστος

Πάντως για τους κινητήρες εσωτερικής καύσης υδρογόνου η υπέρτατη όλων απαίτηση είναι αυτή της ομαλής λειτουργίας που εξασφαλίζεται με την αποφυγή του φαινομένου της ανάφλεξης στην εισαγωγή. Κάποια από τα παραπάνω κριτήρια είναι αντικρουόμενα, και προς το παρόν δεν υπάρχει κάποια μέθοδος που να υπερκαλύπτει όλες τις απαιτήσεις. Για παράδειγμα, η υιοθέτηση του συστήματος άμεσης έγχυσης (FSI ή DI) από τη μια μεριά αποκλείει την εμφάνιση του φαινομένου της ανάφλεξης στην εισαγωγή αλλά από την άλλη αυξάνει υπερβολικά το κόστος σε σχέση με τις άλλες μεθόδους τροφοδοσίας καυσίμου. Το κόστος βέβαια αυτό ισοσκελίζεται μακροπρόθεσμα από τη βελτιωμένη απόδοση και τη μειωμένη κατανάλωση καυσίμου. Οι μέθοδοι τροφοδοσίας καυσίμου και σχηματισμού του μίγματος είναι κατά βάση τέσσερις και κατά καιρούς παρουσιάζονται διάφορες παραλλαγές στο ίδιο θέμα ή άλλοτε συνδυάζονται με τρόπους μείωσης των NO<sub>x</sub> ή μείωσης της θερμοκρασίας στο θάλαμο καύσης, όπως η έγχυση ατμού στην εισαγωγή και η ανακύκλωση των καυσαερίων. Έτσι για το σχηματισμό και την εισαγωγή του μίγματος στον θάλαμο καύσης έχει χρησιμοποιηθεί εξαεριοτής (καρμπυρατέρ), έγχυση του καυσίμου στην πολλαπλή εισαγωγής (TMI), έγχυση του καυσίμου στους αυλούς εισαγωγής (PFI) και η άμεση έγχυση στο θάλαμο καύσης (FSI ή DI). Η μοναδική μέθοδος εσωτερικού σχηματισμού του μίγματος είναι αυτή της άμεσης έγχυσης ενώ σε όλες τις άλλες μεθόδους το μείγμα σχηματίζεται εκτός του θαλάμου καύσης, είτε στην πολλαπλή εισαγωγής είτε στους αυλούς εισαγωγής.

#### **4.7.1. Εξαεριοτής & Έγχυση στην πολλαπλή εισαγωγής (TMI)**

Από τις παραπάνω μεθόδους ο εξαεριοτής χρησιμοποιήθηκε ευρύτατα στα πρώτα βήματα της έρευνας για το υδρογόνο ως η παλιότερη και απλούστερη τεχνολογία. Όμως η χρονική επικάλυψη των βαλβίδων εισαγωγής και εξαγωγής κατά το διάστημα που παρέμεναν και οι δύο ανοιχτές, έφερνε σε επαφή το νεοεισερχόμενο στο θάλαμο καύσης μίγμα με εναπομείνουσες ποσότητες υπέρθερμων αερίων από προηγούμενη καύση. Έτσι το φαινόμενο της ανάφλεξης στην εισαγωγή ήταν δύσκολο να ελεγχθεί ενώ ακόμα και αν δεν παρατηρούταν ανώμαλη καύση, η μετρούμενη απώλεια ισχύος της τάξης του 15% σε σύγκριση με την αντίστοιχη MEK βενζίνης, ήταν από μόνη της αποτρεπτική. Η υιοθέτηση συστημάτων έγχυσης του καυσίμου λοιπόν ήταν μονόδρομος, όχι μόνο διότι περιόριζε σημαντικά τις πιθανότητες ανώμαλης καύσης αλλά και επειδή αντιστάθμιζε την απώλεια ισχύος. Αρχικά, η έγχυση του καυσίμου στην εισαγωγή (Timed Manifold Injection) έκανε δυνατή την αναρρόφηση του αέρα, με το καύσιμο να εγχύεται στα μετέπειτα στάδια του χρόνου εισαγωγής. Αυτή η πρωθύστερη παρουσία του αέρα στην πολλαπλή εισαγωγής

προσφέρει δύο σημαντικά ευεργετήματα. Αφ' ενός παρέχει συμπληρωματική ψύξη των επιφανειών καθιστώντας ανενεργά πιθανά σημεία προανάφλεξης και αφ' ετέρου αποτελεί μέσο αραίωσης υπέρθερμων αερίων κατάλοιπων προηγούμενης καύσης που επίσης θα μπορούσαν να αποτελέσουν αιτία προανάφλεξης. Παρόλα αυτά, η πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου της ανάφλεξης στην εισαγωγή παραμένει, αλλά αν συμβεί, προκαλεί σημαντικά λιγότερες ζημιές από την περίπτωση που θα χρησιμοποιούταν "καρμπυρατέρ" ως σύστημα τροφοδοσίας.

#### **4.7.2. Άμεση έγχυση (DI) & Έγχυση στην θυρίδα εισαγωγής (PFI)**

Τα τελευταία χρόνια έχει καθιερωθεί η χρήση συστημάτων άμεσης έγχυσης (Direct Injection) ή συστημάτων έγχυσης του καυσίμου στη θυρίδα εισαγωγής (Port Fuel Injection) καθώς οι άλλες μέθοδοι κρίθηκαν λιγότερο αποτελεσματικές ως προς τον έλεγχο των φαινομένων ανώμαλης καύσης. Τα φαινόμενα ανάφλεξης του καυσίμου μίγματος στην εισαγωγή αποκλείονται εντελώς με την μέθοδο της άμεσης έγχυσης του καυσίμου απευθείας στο θάλαμο καύσης ή αποτρέπονται σημαντικά με την μέθοδο της έγχυσης του καυσίμου στη θυρίδα εισαγωγής. Φαίνεται πάντως ότι αν και η μέθοδος της άμεσης έγχυσης είναι η πλέον υποσχόμενη η μέθοδος έγχυσης στη θυρίδα εισαγωγής είναι η πλέον αποδεκτή εφόσον απαιτούνται μικρότερες πιέσεις έγχυσης και επομένως ο τεχνολογικός εξοπλισμός που απαιτείται για την εφαρμογή της είναι πολύ απλούστερος και λιγότερο δαπανηρός. Επιπρόσθετα, η μέθοδος PFI επιτρέπει την καύση φτωχότερων μιγμάτων καθώς και την καλύτερη ομογενοποίηση του μίγματος λόγω αυξημένων χρόνων ανάμιξης με θετική συνέπεια τις μεγαλύτερες αποδόσεις λειτουργίας και τις μειωμένες εκπομπές οξειδίων του αζώτου.

Από την άλλη μεριά, η λύση της άμεσης έγχυσης συμβάλλει στην επίτευξη μεγαλύτερης μέγιστης ισχύος από τον κινητήρα εφόσον παρέχεται η δυνατότητα καύσης πλουσιότερων μιγμάτων χωρίς την πιθανότητα ανάφλεξης του μίγματος στην εισαγωγή. Εντούτοις, η πιθανότητα προανάφλεξης παραμένει εκτός και αν το καύσιμο εγχύεται στα τελευταία στάδια της φάσης συμπίεσης. Η λύση αυτή όμως πέρα από το δυσθεώρητο κόστος, προϋποθέτει την υιοθέτηση συστημάτων έγχυσης υψηλής πίεσης, επιλογή που απαιτεί την υπερπήδηση σημαντικών τεχνικών δυσκολιών για την εφαρμογή της μερικές από τις οποίες είναι οι εξής:

- Το καύσιμο εγχύεται απευθείας στο θάλαμο καύσης με πίεση υψηλότερη των 110bar, δηλαδή περίπου 30 φορές μεγαλύτερη από αυτήν των συστημάτων PFI γεγονός που προϋποθέτει την αποθήκευση του υδρογόνου στο όχημα με τη μορφή κρυογονικού υγρού ή ενός προηγμένου συστήματος αποθήκευσης σε υδρίδια μετάλλων.

- Η πιθανότητα προανάφλεξης περιορίζεται μόνο στην περίπτωση που το υδρογόνο εγχύεται στα πολύ τελευταία στάδια του χρόνου συμπίεσης και άρα το χρονικό διάστημα που διατίθεται για την ομογενοποίηση του μίγματος είναι το ελάχιστο δυνατό. Έτσι απαιτούνται τεχνικές ταχύτατης ανάμιξης του υδρογόνου και του αέρα στο θάλαμο με στόχο ένα ικανοποιητικά ομοιογενές μίγμα.
- Η τοποθέτηση του εγχυτήρα μέσα στο θάλαμο καύσης μετά τη βαλβίδα εισαγωγής καθιστά αναγκαία την κατασκευή του από ειδικά υλικά ώστε να αντέχει τις δυσμενείς συνθήκες υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών που επικρατούν στο θάλαμο κατά την καύση του υδρογόνου. Παρά τις παραπάνω τεχνικές δυσκολίες που απαιτούν την εφαρμογή καινοτόμων και δαπανηρών λύσεων είναι γενικά αποδεκτό ότι η έγχυση υδρογόνου απευθείας στο θάλαμο καύσης υπό υψηλή πίεση στα τελευταία στάδια της συμπίεσης είναι ο πλέον ενδεδειγμένος τρόπος για τη βελτίωση της απόδοσης και συνάμα την ομαλή λειτουργία του κινητήρα απουσία φαινομένων ανώμαλης καύσης. Φαίνεται λοιπόν από όλα τα παραπάνω ότι όταν ζητούμενο είναι η μέγιστη δυνατή ισχύς της μηχανής αδιαφορώντας για το κόστος και την πολυπλοκότητα της, η άμεση έγχυση είναι μονόδρομος. Έτσι για τη λειτουργία της μηχανής σε πλήρες φορτίο (μέγιστη ισχύς) η άμεση έγχυση (DI) είναι η ιδανική λύση, ενώ για τη λειτουργία της μηχανής υπό μερικό φορτίο (μέγιστη απόδοση) προτείνεται η έγχυση στη θυρίδα εισαγωγής (PFI). Εξάλλου η μέθοδος έγχυσης PFI επιτρέπει την ελεύθερη επιλογή του τρόπου αποθήκευσης του καυσίμου στο όχημα εφόσον για την τροφοδοσία απαιτούνται πολύ χαμηλότερες πιέσεις σε σχέση με τις αντίστοιχες της μεθόδου DI. Τέλος, η μέγιστη ισχύς μίας MEK υδρογόνου στην οποία το μίγμα σχηματίζεται εκτός του θαλάμου καύσης είναι μειωμένη κατά 18% περίπου σε σχέση με την ισχύ μίας αντίστοιχης MEK βενζίνης ενώ αντίθετα αν η ίδια μηχανή χρησιμοποιούσε άμεσο ψεκασμό θα παρατηρούταν αύξηση της ισχύος κατά 17%. Είναι σαφές λοιπόν ότι κάθε τεχνολογία έγχυσης παρουσιάζει θετικά και αρνητικά στοιχεία τα οποία πρέπει να εξετάζονται ξεχωριστά για κάθε περίπτωση ανάλογα με τις συνθήκες στις οποίες θα λειτουργεί ο κινητήρας κατά το μεγαλύτερο μέρος της ζωής του. Έχει πάντως προταθεί και ως λύση η επιλογή ενός διττού συστήματος τροφοδοσίας καυσίμου το οποίο θα συνδυάζει τα θετικά χαρακτηριστικά της άμεσης έγχυσης εν πλήρες φορτίο και τα αντίστοιχα της έγχυσης στον αυλό εισαγωγής υπό μερικό φορτίο.

## 4.8. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΕΜΠΟΔΙΑ & ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΤΙΣ ΜΕΚ

Στη σχετική με το θέμα βιβλιογραφία παρατηρείται το φαινόμενο να δίδεται ιδιαίτερη έμφαση στα θετικά χαρακτηριστικά του υδρογόνου ως καύσιμο στις ΜΕΚ ενώ ταυτόχρονα υποτιμώνται τα τεχνολογικά εμπόδια και οι περιορισμοί που προκύπτουν από τη χρήση του. Έτσι στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να αναφερθούν έστω και επιγραμματικά κάποια αρνητικά χαρακτηριστικά που έχουν τις ρίζες τους στις φυσικές και χημικές ιδιότητες του υδρογόνου καθώς και στις ιδιότητες καύσης του.

- Το σημαντικότερο τεχνολογικό εμπόδιο όσον αφορά στη χρήση του υδρογόνου στις ΜΕΚ πηγάζει από το μικρό περιεχόμενο ενέργειας του καυσίμου ανεξαρτήτως του τρόπου αποθήκευσης του στο όχημα. Για παράδειγμα το υδρογόνο κατά την αποθήκευσή του ως συμπιεσμένο αέριο υπό πίεση 200atm και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος περιέχει το 5% της ενέργειας βενζίνης ίδιου όγκου.
- Οι μηχανές εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούν υδρογόνο για την παραγωγή ωφέλιμου μηχανικού έργου αποδίδουν συγκριτικά πολύ μικρότερη μέγιστη ισχύ από μία αντίστοιχης χωρητικότητας ΜΕΚ βενζίνης. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ιδιαίτερως χαμηλή κατ' όγκο θερμογόνο δύναμη του υδρογόνου σε σχέση μ' αυτήν της βενζίνης. Εξάλλου για την απόδοση της ίδιας ισχύος με μία ΜΕΚ βενζίνης η ΜΕΚ υδρογόνου απαιτείται να είναι 40–60% μεγαλύτερης χωρητικότητας γεγονός που αυξάνει τις μηχανικές τριβές και επιτείνει τις απώλειες.
- Ο υψηλός ρυθμός αύξησης της πίεσης στο θάλαμο καύσης αποτέλεσμα της μεγάλης ταχύτητας καύσης του υδρογόνου μπορεί να σχετίζεται με αυξημένα επίπεδα θορύβου και κραδασμών των κινητήρων υδρογόνου. Αυτός είναι ένας τομέας που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης καθώς είναι επιτακτικό, για την καθιέρωση της χρήσης τους στις μεταφορές, η ομαλότητα της λειτουργίας των ΜΕΚ υδρογόνου να είναι τουλάχιστον συγκρίσιμη με τις ΜΕΚ βενζίνης.
- Η παρουσία των υδρατμών στα προϊόντα της καύσης της ΜΕΚ υδρογόνου ενέχει τον κίνδυνο της οξειδωσης για συγκεκριμένα εξαρτήματα του κινητήρα για τα οποία πρέπει να επιλεγούν υλικά με αυξημένη αντοχή στην οξειδωση.
- Για τον ίδιο ακριβώς λόγο τα λιπαντικά που χρησιμοποιούνται σήμερα στις ΜΕΚ βενζίνης είναι μάλλον ακατάλληλα για τις ΜΕΚ υδρογόνου γιατί η παρουσία των υδρατμών ως προϊόν της καύσης τους εξασθενίζει τις λιπαντικές τους ιδιότητες, αλλοιώνει το ιξώδες τους και περιορίζει σημαντικά την διάρκεια ζωής τους. Είναι λοιπόν αναγκαία η προσαρμογή

της τεχνολογίας των λιπαντικών στα νέα δεδομένα των μηχανών υδρογόνου και στις ιδιαιτερότητες των τελευταίων ως προς τις αυξημένες λιπαντικές τους ανάγκες

## **4.9. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ & ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ**

Η ομαλή και αξιόπιστη, με υψηλή απόδοση και χωρίς την εμφάνιση φαινομένων ανώμαλης καύσης, λειτουργία των ΜΕΚ υδρογόνου προϋποθέτει διαφορετικά χαρακτηριστικά λειτουργίας και σχεδιασμού τους σε σχέση με τα γνωστά και καθιερωμένα χαρακτηριστικά λειτουργίας των ΜΕΚ βενζίνης. Οι τόσο διαφορετικές ιδιότητες καύσης του υδρογόνου σε σχέση με αυτές της βενζίνης, που πηγάζουν από τις διαφορετικές φυσικοχημικές του ιδιότητες, αλλάζουν τα δεδομένα τόσο στο σχεδιασμό των επιμέρους τμημάτων του κινητήρα υδρογόνου όσο και στις συνθήκες λειτουργίας του.

### **4.9.1. Σύστημα τροφοδοσίας του καυσίμου**

Όπως εκτενώς συζητήθηκε στην Παράγραφο §4.7, οι μέθοδοι του εξαεριοτή και της έγχυσης του καυσίμου στην πολλαπλή εισαγωγής είναι εντελώς ακατάλληλες για την τροφοδοσία των ΜΕΚ υδρογόνου. Αντίθετα, η έγχυση του καυσίμου είτε στην θυρίδα εισαγωγής (Port Fuel Injection) είτε απευθείας στον θάλαμο καύσης (Direct Injection) εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία του μοτέρ, υπό συγκεκριμένες όμως ρυθμίσεις, χωρίς τα ανεπιθύμητα φαινόμενα προανάφλεξης ή ανάφλεξης στην εισαγωγή. Έτσι αν επιλεγεί η τροφοδοσία του καυσίμου με τη μέθοδο PFI ο χρονισμός πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να παρέχεται ένα ικανό χρονικό διάστημα για την ικανοποιητική ψύξη του κυλίνδρου κατά την αρχική φάση του χρόνου εισαγωγής αλλά και να εξασφαλίζεται η έγχυση ολόκληρης της υπολογισμένης ποσότητας υδρογόνου πριν το κλείσιμο της βαλβίδας εισαγωγής ώστε να αποτρέπεται η παρουσία καυσίμου στην πολλαπλή. Η μέθοδος αυτή, που προσφέρει αυξημένους χρόνους σχηματισμού του μίγματος, δίνει την δυνατότητα καύσης πτωχών μιγμάτων και άρα αυξημένων θερμικών αποδόσεων. Εκτός αυτού όμως η καύση πτωχών μιγμάτων, όπως έχει αποδειχτεί από σχετικά πειράματα, δημιουργεί τις προϋποθέσεις για αυξημένη αποτελεσματικότητα της μεθόδου ανακύκλωσης των καυσαερίων (EGR) στη μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου.

Όταν ζητούμενο είναι η απόλυτη ισχύς της μηχανής τότε η έγχυση του καυσίμου απευθείας στο θάλαμο καύσης είναι η μόνη ενδεδειγμένη λύση που αποκλείει την ανάφλεξη στην εισαγωγή. Επειδή όμως ο κίνδυνος της προανάφλεξης παραμένει, το καύσιμο πρέπει να εγχύεται στα τελευταία στάδια της φάσης συμπίεσης. Η μέθοδος άμεσης έγχυσης του

καυσίμου προϋποθέτει την υιοθέτηση συστημάτων εγχύσεως υψηλής πίεσης, την κατασκευή των εγχυτήρων από ειδικά κράματα αλλά και την αποθήκευση του υδρογόνου στη μορφή κρυογονικού υγρού. Και οι δύο προτεινόμενες λύσεις για την τροφοδοσία του κινητήρα (PFI & DI) απαιτούν προσεκτικά μελετημένο χρονοισμό της έγχυσης, για κάθε ξεχωριστή περίπτωση μηχανής, διότι μαγικές συνταγές δεν υπάρχουν και η ομαλή λειτουργία της εκάστοτε μηχανής με βελτιστοποίηση της απόδοσης και ελαχιστοποίηση των πιθανοτήτων ανώμαλης καύσης μπορεί να προκύψει μόνο από εκτεταμένες δοκιμές.

#### **4.9.2. Σύστημα ανάφλεξης και σπινθηριστές (μπουζί)**

Ο σχεδιασμός του συστήματος ανάφλεξης όπως και των σπινθηριστών χρήζει ιδιαίτερης προσοχής διότι όπως έχει ήδη αναφερθεί υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις μπορούν να αποτελέσουν αιτία ανάφλεξης του μίγματος πριν τον προκαθορισμένο χρόνο ανάφλεξης από τον σπινθήρα των μπουζί. Έτσι απαιτείται η σωστή χωροθέτηση των καλωδίων ανάφλεξης με στόχο την αποτροπή της ανεπιθύμητης και απρογραμματίστης ανάφλεξης σε έναν κύλινδρο από επαγωγή του καλωδίου διπλανού κυλίνδρου. Άλλη απαίτηση του σχεδιασμού είναι η σωστή γείωση του συστήματος ανάφλεξης καθώς και η μεταβολή της αντίστασης του καλωδίου ανάφλεξης με σκοπό την αποφυγή ανεξέλεγκτης ανάφλεξης του μίγματος από εναπομείνασα ενέργεια προηγούμενης ανάφλεξης στο καλώδιο της ανάφλεξης. Απ' την άλλη μεριά οι σπινθηριστές που χρησιμοποιούνται στους κινητήρες βενζίνης κρίνονται μάλλον ακατάλληλοι για τους κινητήρες υδρογόνου διότι δεν παρουσιάζουν ικανοποιητική απόδοση στην αποβολή του θερμικού τους φορτίου με αποτέλεσμα η θερμοκρασία των ηλεκτροδίων τους εύκολα να υπερβαίνει την θερμοκρασία αυτανάφλεξης του υδρογόνου, αποτελώντας έτσι βασική εστία πυρανάφλεξης. Φαίνεται λοιπόν ότι απαιτούνται σπινθηριστές ακόμη πιο ψυχροί από τους ψυχρότερους των MEK βενζίνης για ταχύτερη απομάκρυνση της θερμότητας από το θάλαμο καύσης. Εξάλλου, είναι απαγορευτική η κατασκευή των ηλεκτροδίων των σπινθηριστών από πλατίνα (λευκόχρυσος) καθώς το υλικό αυτό αποτελεί γνωστό καταλύτη για την οξειδωση του υδρογόνου.

Το διάκενο των ηλεκτροδίων από 0,7 – 1,1mm που κυμαίνεται για τους σπινθηριστές των MEK βενζίνης μπορεί να επιλεγεί πολύ μικρότερο για εκείνους των MEK υδρογόνου, ακόμη και 0,25mm, εφόσον δεν υφίσταται το πρόβλημα των επικαθίσεων άνθρακα στα μέταλλα των MEK υδρογόνου. Η ιδανική πάντως απόσταση διάκενου των σπινθηριστών των MEK υδρογόνου είναι γύρω στο μισό χιλιοστό και όχι χαμηλότερη, διότι διαφορετικά παρουσιάζεται δυσκολία στην κρύα εκκίνηση λόγω συμπύκνωσης ατμών στην ακίδα του σπινθηριστή κατά την ανάφλεξη με κρύο κινητήρα. Το μικρότερο διάκενο είναι ευεργετικό



στην ηλεκτρική απόδοση των σπινθηριστών διότι μικρότερη τάση απαιτείται από το σύστημα ανάφλεξης για την αξιόπιστη παραγωγή σπινθήρα από το σπινθηριστή.

Επομένως η επιλογή των χαρακτηριστικών σχεδιασμού των σπινθηριστών για τις MEK υδρογόνου είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για την αξιόπιστη ανάφλεξη του μίγματος. Με άλλα λόγια, τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά όπως η θερμική τους αγωγιμότητα, το μήκος και η διάμετρος του σπειρώματος τους, το μήκος της πορσελάνης τους καθώς και το σχήμα, οι ακριβείς διαστάσεις και τα υλικά κατασκευής τους, χρήζουν εμπειριστατωμένης διερεύνησης πριν την τελική επιλογή.

### **4.9.3. Λίπανση των MEK υδρογόνου**

Η αυξημένη συγκέντρωση νερού με την μορφή υδρατμών στον στροφαλοθάλαμο των MEK υδρογόνου κάνει μάλλον απαγορευτική τη χρήση των λιπαντικών ελαίων που χρησιμοποιούνται στις MEK βενζίνης. Απ' την άλλη μεριά, το υδρογόνο ως καύσιμο, είτε ως κρυογονικό υγρό αλλά κυρίως ως αέριο, παρουσιάζει αμελητέες λιπαντικές ιδιότητες σε σύγκριση με την βενζίνη. Επομένως οι κινητήρες εσωτερικής καύσης υδρογόνου παρουσιάζουν αυξημένες ανάγκες λίπανσης όχι μόνο για τον παραπάνω λόγο αλλά και εξαιτίας της λειτουργίας τους σε υψηλότερους ρυθμούς περιστροφής. Προβλέπεται λοιπόν η χρήση λιπαντικών συμβατών με αυξημένες ποσότητες νερού στην μηχανή και μάλιστα προτείνονται δύο τεχνολογικές λύσεις. Η πρώτη αφορά σε ένα λιπαντικό με υψηλό αριθμό απογαλακτωματοποίησης δηλαδή ταχύτατο ρυθμό διαχωρισμού του νερού από το λάδι. Ως δεύτερη λύση προτείνεται η επιλογή ενός πλήρως συνθετικού λαδιού το οποίο σχηματίζει παρουσία νερού και υδρατμών, διάλυμα με αυξημένες λιπαντικές ιδιότητες.

Άλλες απαιτούμενες ιδιότητες που η τεχνολογία λιπαντικών πρέπει να παράσχει στο λάδι για την αντοχή του στις αυξημένες θερμοκρασίες των MEK υδρογόνου είναι ο υψηλός δείκτης ιξώδους και η θερμική σταθερότητα. Έτσι το λάδι πρέπει να αντιστέκεται στη μεταβολή του ιξώδους του με την αύξηση της θερμοκρασίας αλλά και να μην καταλύεται η σύνθεσή του στις υψηλές θερμοκρασίες των MEK υδρογόνου. Τέλος, σημαντική προσοχή πρέπει να δοθεί στην αποφυγή δημιουργίας της ανεπιθύμητης τέφρας (sulfated ash) που σχηματίζεται από τα μεταλλικά στοιχεία των προσθέτων του λιπαντικού καθώς και από τα κατάλοιπα που δημιουργούνται κατά τη χρήση τους (οξειδία, σκόνη, ρινίσματα). Η τέφρα του λιπαντικού μπορεί να σχηματίσει επικαθίσεις στο χώρο καύσης οι οποίες με τη σειρά τους είναι πιθανό

να αποτελέσουν υπέρθερμα σημεία κατά τη λειτουργία της μηχανής, και επομένως εστίες πυρανάφλεξης.

#### **4.9.4. Τεχνικές ψύξης του θαλάμου καύσης**

Η επαρκής ψύξη του χώρου καύσης για την αποτροπή δημιουργίας υπέρθερμων σημείων που θα μπορούσαν να αποτελέσουν εστίες προανάφλεξης είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για την ομαλή λειτουργία των MEK υδρογόνου. Έτσι προτείνονται βαλβίδες εξαγωγής ψυχόμενες με νάτριο πολυβάλβιδες κεφαλές για περαιτέρω ψύξη των βαλβίδων εξαγωγής και πρόσθετα περάσματα του ψυκτικού γύρω από τις βαλβίδες αλλά και από άλλες περιοχές με υψηλά θερμικά φορτία. Η επαρκής κένωση του θαλάμου καύσης από υπέρθερμες μάζες καυσαερίων είναι μία ακόμα αναγκαία συνθήκη για την μείωση των μέγιστων θερμοκρασιών. Η τεχνολογία του μεταβλητού χρονισμού των βαλβίδων, γνωστή από τις MEK βενζίνης, ικανοποιεί και αυτήν τη συνθήκη, πέρα από τις απαιτήσεις για μεγαλύτερες τιμές ισχύος και ροπής σε όλο το φάσμα των στροφών με μειωμένη κατανάλωση και λιγότερους ρύπους.

#### **4.9.5. Σχεδιασμός του θαλάμου καύσης**

Οι ιδιότητες του υδρογόνου όπως ο υψηλός συντελεστής διάχυσης και η μεγάλη ταχύτητα καύσης βοηθούν στην καλύτερη ανάμιξη του καυσίμου με τον αέρα και στην αποδοτικότερη καύση του μίγματος χωρίς την ανάγκη εφαρμογής τεχνικών σχεδιασμού του θαλάμου καύσης που ενδυναμώνουν την τυρβώδη ροή στον θάλαμο. Έτσι το έμβολο μπορεί να είναι επίπεδο και ο θάλαμος καύσης ημισφαιρικής μορφής με τις βαλβίδες συμμετρικά τοποθετημένες και τον σπινθηριστή στον άξονα του θεωρητικού ημισφαιρίου. Η συγκεκριμένη διαμόρφωση είναι ιδιαίτερα επωφελής για την απόδοση της μηχανής. Κατά το σχεδιασμό του θαλάμου καύσης πρέπει να αποφεύγονται οξείες εσοχές και απότομες ακμές και γενικά σημεία που λόγω ελλιπούς ψύξης και επικαθίσεων από το λιπαντικό αποτελούν δυνάμενες εστίες φαινομένων προανάφλεξης.

Τέλος, τεχνικές ανάπτυξης τυρβώδους ροής στο θάλαμο καύσης και σχεδιασμού των αυλών εισαγωγής με στόχο την περιδίνηση του εισερχόμενου στο θάλαμο μίγματος για βελτιωμένη ανάμιξη και καλύτερη ομογενοποίηση του καυσίμου μίγματος, αμελητέα επίδραση ασκούν στην απόδοση της μηχανής. Οι παραπάνω τεχνικές σχεδιασμού είναι περιττές λόγω της μεγάλης ταχύτητας καύσης του υδρογόνου ακόμη και σε φτωχά μίγματα. Είναι μάλιστα πιθανό, η εφαρμογή τέτοιων τεχνικών να προάγει τα φαινόμενα ανώμαλης καύσης.

#### **4.9.6. Βαθμός συμπίεσης**

Η υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης του υδρογόνου επιτρέπει την λειτουργία των ΜΕΚ υδρογόνου με υψηλότερους βαθμούς συμπίεσης από τις ΜΕΚ βενζίνης. Το όριο σ' αυτήν την περίπτωση δίνεται από την εμφάνιση φαινομένων κρουστικής καύσης ή προανάφλεξης. Ο υψηλότερος βαθμός συμπίεσης κατά την καύση πτωχών μιγμάτων αέρα – υδρογόνου επιτρέπει την επίτευξη μεγαλύτερης απόδοσης και υψηλότερης ισχύος. Ο βέλτιστος βαθμός συμπίεσης πρέπει να εξετάζεται περιπτώσιολογικά για κάθε μηχανή καθώς ο βέλτιστος για μέγιστη απόδοση βαθμός συμπίεσης μπορεί να διαφέρει από εκείνον για μέγιστη ισχύ.

#### **4.9.7. Στρατηγική ελέγχου του φορτίου της μηχανής**

Τα ευρέα όρια αναφλεξιμότητας του υδρογόνου (4-75% κατ' όγκο) επιτρέπουν τον έλεγχο του φορτίου της μηχανής με την υιοθέτηση συστήματος εισαγωγής χωρίς στραγγαλιστική δικλείδα (Wide Open Throttle). Έτσι το φορτίο της μηχανής ελέγχεται μεταβάλλοντας την αναλογία του μίγματος, με άλλα λόγια δηλαδή απλώς ρυθμίζοντας τον λόγο αέρα – καυσίμου όπως ισχύει στους κινητήρες Diesel. Ο τρόπος αυτός ελέγχου του φορτίου της μηχανής ονομάζεται ποιοτικός (βλ. Παρ. 3.5) σε αντίθεση με τη ρύθμιση του φορτίου των ΜΕΚ βενζίνης όπου ο έλεγχος γίνεται ποσοτικά μέσω της μεταβολής της ποσότητας του μείγματος που εισέρχεται στον θάλαμο καύσης με την βοήθεια της "πεταλούδας" στην εισαγωγή. Η απουσία της στραγγαλιστικής δικλείδας είναι ιδιαίτερα επωφελής για τη λειτουργία του κινητήρα διότι μειώνει τις τριβές και τις απώλειες με συνέπεια την αύξηση της απόδοσης. Σε συνθήκες χαμηλού φορτίου και στο "ρελαντί" όπου το καύσιμο μίγμα είναι πολύ πτωχό, η παρουσία της "πεταλούδας" είναι αναγκαία για τον εμπλουτισμό του μίγματος ούτως ώστε να εξασφαλιστεί σταθερότητα καύσης και ομαλή λειτουργία. Σ' αυτές τις συνθήκες η χρήση της "πεταλούδας" επιβάλλεται και από την ανάγκη για περιορισμό των ποσοτήτων άκαυστου υδρογόνου που ανιχνεύεται στην εξαγωγή. Πρέπει στο σημείο αυτό να υπογραμμιστεί ότι ο σχηματισμός των οξειδίων του αζώτου εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την αναλογία του μίγματος εφόσον ο λόγος αέρα – καυσίμου καθορίζει την μέγιστη θερμοκρασία του θαλάμου καύσης. Τα πλουσιότερα μίγματα αυξάνουν την μέγιστη θερμοκρασία του θαλάμου καύσης και επιταχύνουν τον σχηματισμό NOx. Για πτωχά μίγματα, η συγκέντρωση οξειδίων του αζώτου στην εξαγωγή είναι αμελητέα ενώ υπάρχει ένα όριο του λόγου αέρα – καυσίμου πέρα από το οποίο τα επίπεδα των NOx στην εξαγωγή είναι πολύ υψηλά. Πέρα από αυτό το όριο, η χρήση της "πεταλούδας" σε συνδυασμό με κατάλυση στην εξαγωγή για τον περιορισμό των NOx είναι αναπόφευκτη.

Είναι λοιπόν προφανές ότι διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου του φορτίου πρέπει να εφαρμόζονται για διαφορετικά φορτία της μηχανής. Επομένως, εκμεταλλευόμενοι τις εξαιρετικές ιδιότητες ανάφλεξης του υδρογόνου, η στρατηγική του ποιοτικού ελέγχου του φορτίου της μηχανής (WOT) πρέπει να ακολουθείται όπου αυτό είναι δυνατό. Στις περιπτώσεις χαμηλών και πολύ χαμηλών φορτίων καθώς και πέρα από το όριο σχηματισμού σημαντικών ποσοτήτων NOx ο ποσοτικός έλεγχος του φορτίου με την χρήση «πεταλούδας» στην εισαγωγή κρίνεται επιβεβλημένος.

#### **4.10. ΕΠΙΛΟΓΟΣ**

Συμπερασματικά φαίνεται ότι η μηχανή εσωτερικής καύσης υδρογόνου καθώς και οι διατάξεις των κυψελών υδρογόνου δεν αποτελούν ουτοπία ούτε όραμα για το μέλλον αλλά σύγχρονη πραγματικότητα. Ακόμα και η προσαρμογή μιας σύγχρονης MEK βενζίνης στην καύση του υδρογόνου υπό προϋποθέσεις, χωρίς υψηλές απαιτήσεις λειτουργίας, δεν είναι δύσκολο να επιτευχθεί. Το δύσκολο είναι η σωστή, ομαλή και αξιόπιστη λειτουργία της μηχανής, με βελτιστοποίηση της απόδοσης και επίτευξη ικανοποιητικής ισχύος απουσία φαινομένων ανώμαλης καύσης. Όλα τα παραπάνω είναι εφικτά, αρκεί να τηρηθούν βασικές αρχές σχεδιασμού των επιμέρους τμημάτων και υποσυστημάτων της μηχανής, με γνώμονα τις ιδιαιτερότητες του υδρογόνου και να υιοθετηθούν ρυθμίσεις με οδηγό τις τόσο διαφορετικές από την βενζίνη ιδιότητες καύσης του νέου καυσίμου. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι οι κεκτημένες τεχνολογίες από τις MEK βενζίνης όπως η ανακύκλωση των καυσαερίων και ο μεταβλητός χρονισμός των βαλβίδων, η κατάλυση των προϊόντων της καύσης και τα συστήματα αμέσου εγχύσεως υψηλής πίεσης επιδρούν και στην περίπτωση των MEK υδρογόνου ευεργετικά βελτιώνοντας σε μεγάλο βαθμό τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΠΡΩΤΟΤΥΠΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΚΑΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

#### 5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ιδέα της χρήσης του υδρογόνου στις μηχανές εσωτερικής καύσης και κατ' επέκταση στα οχήματα για την παραγωγή χρήσιμου μηχανικού έργου δεν είναι καινούργια. Η τακτική πειραματισμού των ερευνητών με διαφορετικά καύσιμα είναι τόσο παλιά όσο και η εφεύρεση της μηχανής εσωτερικής καύσης. Μάλιστα, φημολογείται ότι ο ίδιος ο Νικόλαους Όττο (Nicolaus August Otto 1832-1891), ο εμπνευστής του τετράχρονου θερμοδυναμικού κύκλου και εφευρέτης του κινητήρα εσωτερικής καύσης, στα πειράματά του χρησιμοποιούσε ως καύσιμο ένα αέριο που στη σύνθεσή του περιείχε τουλάχιστον 50% υδρογόνο. Από τότε ως και σήμερα, πολλά έχουν αλλάξει τόσο στην τεχνολογία των κινητήρων όσο και στην επιστήμη των καυσίμων.

Κατά την εξέλιξη του αυτοκινήτου διάφορα καύσιμα δοκιμάστηκαν όμως τελικά τα ορυκτά υγρά καύσιμα (βενζίνη & ντίζελ) επικράτησαν και καθιερώθηκαν τόσο για την ευκολία διαχείρισής τους όσο και για τη συμφέρουσα οικονομοτεχνικά εξόρυξη τους. Έτσι, φιλικά προς το περιβάλλον καύσιμα, όπως το υδρογόνο, καταδικάστηκαν στην αφάνεια, και μόνο όταν οι κοινωνικοοικονομικές, πολιτικές και περιβαλλοντικές συνθήκες επέβαλαν την αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων, το υδρογόνο ανασυρόταν από τα κιτάπια των επιστημόνων. Φαίνεται λοιπόν ότι από τη γένεση του κινητήρα εσωτερικής καύσης και κατά τη διάρκεια της εξέλιξης του, μόνο ακραίες καταστάσεις, όπως ο 2ος Παγκόσμιος Πόλεμος, η πετρελαϊκή κρίση του 1970 και η προμηνυόμενη καταστροφή του πλανήτη, πυροδότησαν την παράλληλη έρευνα για το υδρογόνο. Όμως ο πόλεμος κάποτε τελείωσε, η πετρελαϊκή κρίση ξεπεράστηκε και το υδρογόνο πάλι ξεχάστηκε μαζί με την ανάγκη περιορισμού των εκλύομενων ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα. Σήμερα, όμως, που τα σημάδια των συνεπειών του φαινομένου του θερμοκηπίου έχουν πυκνώσει, πολλές ερευνητικές προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στο υδρογόνο. Βέβαια πρέπει στο σημείο αυτό να καταστεί σαφές ότι υπάρχουν κατασκευαστές που έχουν κατευθύνει την ερευνητική τους δραστηριότητα προς την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου και άλλοι προς τη γνώριμη, προσφιλή και αποδεκτή στο ευρύ κοινό τεχνολογία των μηχανών εσωτερικής καύσης. Έτσι, μεγάλοι κατασκευαστές όπως η GM, η Honda, η Toyota, η Mercedes και η Hyundai έχουν

παρουσιάσει πρωτότυπα οχήματα που στο εσωτερικό τους κρύβουν συστοιχίες κυψελών καυσίμου, ενώ άλλες μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες όπως η BMW, η Ford και η Mazda έχουν προβεί στις αναγκαίες τροποποιήσεις κινητήρων της γκάμας τους για την προσαρμογή αυτών στην καύση υδρογόνου. Όμως ακόμα και αυτοί οι κατασκευαστές αναγνωρίζουν πως η επιλογή της καύσης του υδρογόνου για την κίνηση των οχημάτων αποτελεί απλά την γέφυρα για την μετάβαση στην τεχνολογία των κυψελών καυσίμου. Στο παρόν Κεφάλαιο λοιπόν επιχειρείται η παρουσίαση κάποιων πρωτότυπων οχημάτων που χρησιμοποιούν το υδρογόνο ως καύσιμη ύλη για την κίνηση τους. Τα σημαντικότερα βήματα έχουν γίνει από τις προαναφερόμενες βιομηχανίες. Βέβαια, κάθε κατασκευαστής ακολουθεί διαφορετική φιλοσοφία στις τεχνολογικές επιλογές του. Τέλος, θα ήταν εξαιρετικά δύσκολο η μηχανή υδρογόνου και οι κυψέλες υδρογόνου να εκτοπίσουν μονομιάς απ' τη συνείδηση του αγοραστή-καταναλωτή, τον καθιερωμένο πλέον κινητήρα βενζίνης και ντίζελ.

## 5.2. BMW 728hL (1998)

Η πρώτη απόπειρα της BMW στο τεχνολογικό πεδίο των κινητήρων εσωτερικής καύσης υδρογόνου ήταν η παρουσίαση του πρωτότυπου 728hL το έτος 1998, με εξακύλινδρο κινητήρα αποκλειστικά καύσης υδρογόνου χωρητικότητας 2800κ.εκ. και απόδοσης 110hp (80kW). Το αυτοκίνητο αυτό που βασίστηκε στο αμάξωμα της σειράς 7, αποτέλεσε τον πρόδρομο του επόμενου εγχειρήματος της BMW, την 750hL.



Εικόνα 5.1: (1998) BMW 728hL

### 5.3. BMW 750hL (1999)

Το πρωτότυπο 750hL του 1999, υπήρξε το πρώτο αυτοκίνητο της BMW με δυνατότητα επιλογής λειτουργίας του κινητήρα με καύση υδρογόνου ή βενζίνης κατ' επιλογή του οδηγού, και ένα από τα πρωτοπόρα οχήματα στην αποθήκευση υγροποιημένου υδρογόνου σε κρυογονικές συνθήκες.



**Εικόνα 5.2:** (1999) BMW 750hL

Η BMW προκειμένου να αποδείξει την αξιοπιστία, την ασφάλεια και τη χρηστικότητα του δημιουργήματός της κατασκεύασε ένα στόλο δεκαπέντε τέτοιων οχημάτων τα οποία δοκιμάστηκαν με την εφαρμογή του παγκοσμίου προγράμματος BMW Clean Energy World Tour διανύοντας εκατομμύρια χιλιόμετρα και ταξιδεύοντας σε πολλές γωνιές του πλανήτη.



**Εικόνα 5.3:** Ο στόλος των 750hL σε παράταξη κατά τη διάρκεια της παγκόσμιας εκστρατείας της BMW, Clean Energy World Tour.

Η 750hL ήταν εξοπλισμένη με έναν κινητήρα 5,4 λίτρων ειδικά τροποποιημένο, ο οποίος διαθέτει δύο ανεξάρτητα ηλεκτρονικά ελεγχόμενα συστήματα ψεκασμού που επέτρεπαν την κίνηση του οχήματος με την καύση υδρογόνου ή βενζίνης. Ο δωδεκακύλινδρος αυτός κινητήρας με τους τέσσερις εκκεντροφόρους επικεφαλής απέδιδε ισχύ 204 hp κατά την καύση του υδρογόνου και διαθέτει εξαιρετικά χαρακτηριστικά ροπής.





**Εικόνα 5.4:** Η ιδιαίτερη μνεία της BMW στον δωδεκακύλινδρο σε διάταξη V κινητήρα καύσης υδρογόνου.

Το υγροποιημένο υδρογόνο ήταν κρυογονικώς αποθηκευμένο σε ειδικά μονωμένο ντεπόζιτο χωρητικότητας 140lt και σε θερμοκρασία  $-253^{\circ}\text{C}$ . Το ρεζερβουάρ είχε τοποθετηθεί πίσω από τη δεύτερη σειρά καθισμάτων καταλαμβάνοντας μέρος του χώρου αποσκευών. Με την ψύξη του υδρογόνου σ' αυτές τις θερμοκρασίες επιτυγχάνεται συρρίκνωση του όγκου του στο ένα χιλιοστό του αρχικού του. Για τη διατήρηση της ψύξης, το ρεζερβουάρ είναι κατασκευασμένο από 70 επάλληλες στρώσεις αλουμινίου και ινών γυαλιού (fiberglass) μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού τοιχώματος του. Είναι εφοδιασμένο με βαλβίδες ασφαλείας για την

περίπτωση ανεξέλεγκτης αύξησης της πίεσης και έχει περάσει με επιτυχία όλα τα προβλεπόμενα τεστ ασφαλείας που διεκπεραιώνονται από την BMW για τα ρεζερβουάρ των οχημάτων της. Η BMW υποστηρίζει ότι είναι αδύνατο να προκληθεί έκρηξη ακόμη και στη δυσμενή περίπτωση οπίσθιας σύγκρουσης. Το αυτοκίνητο είναι επίσης εφοδιασμένο με συμπληρωματικό ρεζερβουάρ βενζίνης. Πάντως, μόνο με την καύση υδρογόνου το αυτοκίνητο επιτυγχάνει αυτονομία 350-400χλμ. Για την τροφοδοσία, εξάλλου, όλων των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων του αυτοκινήτου, αντί της συμβατικής μπαταρίας, έχει εξελιχθεί από την BMW ειδικά για την 750hL μία κυψέλη καυσίμου τάσης 42V και ισχύος 5kW.



**Εικόνα 5.5:** Η χωροθέτηση του κινητήρα και των συστημάτων του αυτοκινήτου. Διακρίνεται η δεξαμενή καυσίμου στον χώρο αποσκευών και το ηλεκτρονικό κύκλωμα ελέγχου.

Πέρα από την εξέλιξη του κινητήρα υδρογόνου, η Βαυαρική εταιρία μελετά σε παράλληλη έρευνα την παραγωγή ικανοποιητικών ποσοτήτων υδρογόνου οικονομικά και οικολογικά μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, το υδρογόνο μπορεί να παρασκευαστεί δια της μεθόδου της ηλεκτρόλυσης διαλυμάτων νερού με ηλεκτρική ενέργεια προερχόμενη από ανανεώσιμες πηγές. Έτσι, η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή υδρογόνου, εξασφαλίζει την ελάχιστη συνολική επίπτωση των οχημάτων της BMW στο περιβάλλον, όχι μόνο κατά τη λειτουργία τους αλλά και κατά την παρασκευή του καυσίμου τους. Πέραν αυτών, η BMW σε συνεργασία με τη Shell, έχει

εξελίξει ένα ρομποτικό, πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα ανεφοδιασμού το οποίο διατηρεί το καύσιμο σε θερμοκρασία μικρότερη των  $-253^{\circ}\text{C}$  και ολοκληρώνει τον πλήρη ανεφοδιασμό του οχήματος σε λιγότερο από τρία λεπτά. Ο πρώτος δημόσιος σταθμός ανεφοδιασμού υδρογόνου αυτού του τύπου, ξεκίνησε τη λειτουργία του στο αεροδρόμιο του Μονάχου τον Μάιο του 1999.



**Εικόνα 5.6:** Ο σταθμός ανεφοδιασμού στο αεροδρόμιο του Μονάχου και το ρομποτικό σύστημα τροφοδοσίας.

#### 5.4. BMW E65 745h (2001)

Η BMW 745h φέρει έναν οκτακύλινδρο σε διάταξη V κινητήρα, χωρητικότητας 4400κ.εκ., με δυνατότητα διττής επιλογής καυσίμου (υδρογόνου ή βενζίνης). Ο κινητήρας αποδίδει μέγιστη ισχύ 135kW ή 184hp, κατά την καύση υδρογόνου.



Εικόνα 5.7: Η BMW 745h στο Σαλόνι Αυτοκινήτου της Φρανκφούρτης το 2001.

Η δεξαμενή του κρυογονικά αποθηκευμένου υδρογόνου, χωρητικότητας 170lt, είναι τοποθετημένη στο χώρο αποσκευών και εξασφαλίζει στο αυτοκίνητο αυτονομία 300χλμ. περίπου. Αν σ' αυτά προσθέσουμε και τα 650χλμ. αυτονομίας από την καύση της βενζίνης τότε η 745h μπορεί να διανύσει 950 περίπου χιλιόμετρα με μία μόνο επίσκεψη στο σταθμό ανεφοδιασμού. Η δεξαμενή διπλού τοιχώματος και κενού θαλάμου είναι κατασκευασμένη από την εταιρία Magna Steyr (Graz, Austria) και διατηρεί το υγροποιημένο υδρογόνο σε θερμοκρασία  $-253^{\circ}\text{C}$  και μέγιστη πίεση 5-7bar. Επιπρόσθετα, ανάμεσα στα τοιχώματα της δεξαμενής, υπάρχουν εκατό στρώσεις μονωτικού υλικού με σκοπό την κατά το δυνατόν τελειότερη μόνωση της και την ελαχιστοποίηση της αεριοποίησης του υδρογόνου.



**Εικόνα 5.8:** Η διάταξη των μηχανολογικών συστημάτων της BMW E65 745h. Διακρίνεται ο κινητήρας, ο άξονας μετάδοσης της κίνησης και η δεξαμενή υδρογόνου που καταλαμβάνει μέρος του χώρο αποσκευών.

Τέλος, και στην BMW 745h η συμβατική μπαταρία έχει αντικατασταθεί από μία κυψέλη καυσίμου του τύπου πολυμερισμένης μεμβράνης (PolymerElectrolyte-Membrane Fuel Cell) με ισχύ 5kW, ικανή να τροφοδοτήσει τον κλιματισμό και όλα τα άλλα βοηθητικά συστήματα του αυτοκινήτου. Μάλιστα, η κυψέλη καυσίμου τροφοδοτείται από την δεξαμενή υδρογόνου ανεξάρτητα από τον κινητήρα και έτσι τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα του αυτοκινήτου μπορούν να λειτουργούν ακόμα και με τον κινητήρα εκτός λειτουργίας. Απ' την άλλη μεριά, η κυψέλη καυσίμου επιτυγχάνει περισσότερο από 50% απόδοση στην παραγωγή της αναγκαίας ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή τουλάχιστον τη διπλή απόδοση σε σχέση με έναν εναλλάκτη (δυναμό) που απορροφά το 8% περίπου της ισχύος του κινητήρα. Έτσι επιτυγχάνεται σημαντική οικονομία καυσίμου περίπου ενός λίτρου καυσίμου για κάθε 100χλμ. αστικών μετακινήσεων.





**Εικόνα 5.9:** Η 745h στο σταθμό ανεφοδιασμού του αεροδρομίου του Μονάχου

## 5.5. BMW MINI Cooper Hydrogen (2001)

Το 2001 παρουσιάστηκε ένα ακόμη πειραματικό μοντέλο υδρογόνου, το BMW MINI Cooper Hydrogen, με κινητήρα αποκλειστικά καύσης υδρογόνου. Το μοντέλο αυτό βασίστηκε στο αμάξωμα του απλού MINI Cooper, και διέθετε τετρακύλινδρο κινητήρα 1600κ.εκ. με τις απαραίτητες, όμως, τροποποιήσεις για την λειτουργία του με καύση υδρογόνου.



**Εικόνα 5.10:** Το BMW MINI Cooper Hydrogen που αποκαλύφθηκε στην Έκθεση Αυτοκινήτου της Φρανκφούρτης το 2001. Δεξιά, κατά τη διάρκεια ανεφοδιασμού στο σταθμό ανεφοδιασμού του αεροδρομίου του Μονάχου.

Η ειδοποιός διαφορά του MINI Hydrogen με τα προηγούμενα πειραματικά μοντέλα της BMW είναι ότι ενσωματώνει μία νέα τεχνολογία ψεκασμού του καυσίμου κατά την οποία το υδρογόνο, δεν θερμαίνεται από τους  $-253^{\circ}\text{C}$  σε θερμοκρασία περιβάλλοντος πριν την καύση, αλλά ψεκάζεται σε υγρή κατάσταση στους αυλούς εισαγωγής όπου και αναμιγνύεται με τον αέρα πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο καύσης. Έτσι το μίγμα αέρα – υδρογόνου, λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας και της μεγαλύτερης πυκνότητας του, αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη μάζα καυσίμου μίγματος ανά κύκλο, δηλαδή σε αυξημένη πλήρωση του θαλάμου καύσης με συνέπεια την υψηλότερη ισχύ αλλά και απόδοση του κινητήρα. Τέλος, ένα ακόμη χαρακτηριστικό του MINI Hydrogen είναι το ρεζερβουάρ υδρογόνου το οποίο πλέον δεν καταλαμβάνει μέρος του χώρου αποσκευών ή του θαλάμου επιβατών καθώς έχει τις διαστάσεις και το σχήμα ενός συμβατικού ρεζερβουάρ καυσίμου.

## **5.6. BMW 7-series 6.0-liter V12 Hydrogen (2003)**

Το επόμενο βήμα της BMW αφορά και πάλι στο αμάξωμα της σειράς 7, μόνο που πλέον η χωρητικότητα του κινητήρα έχει αυξηθεί στα 6 λίτρα. Ο νέος 12κύλινδρος κινητήρας του αυτοκινήτου αποδίδει κατά την καύση υδρογόνου μέγιστη ισχύ 231hp στις 5500rpm και φτάνει τα 337Nm της μέγιστης ροπής, πολύ χαμηλά στο φάσμα των στροφών, μόλις στις 2000rpm. Και σε αυτό το πρωτότυπο υπάρχει η επιλογή λειτουργίας του κινητήρα τόσο με υδρογόνο όσο και με βενζίνη.

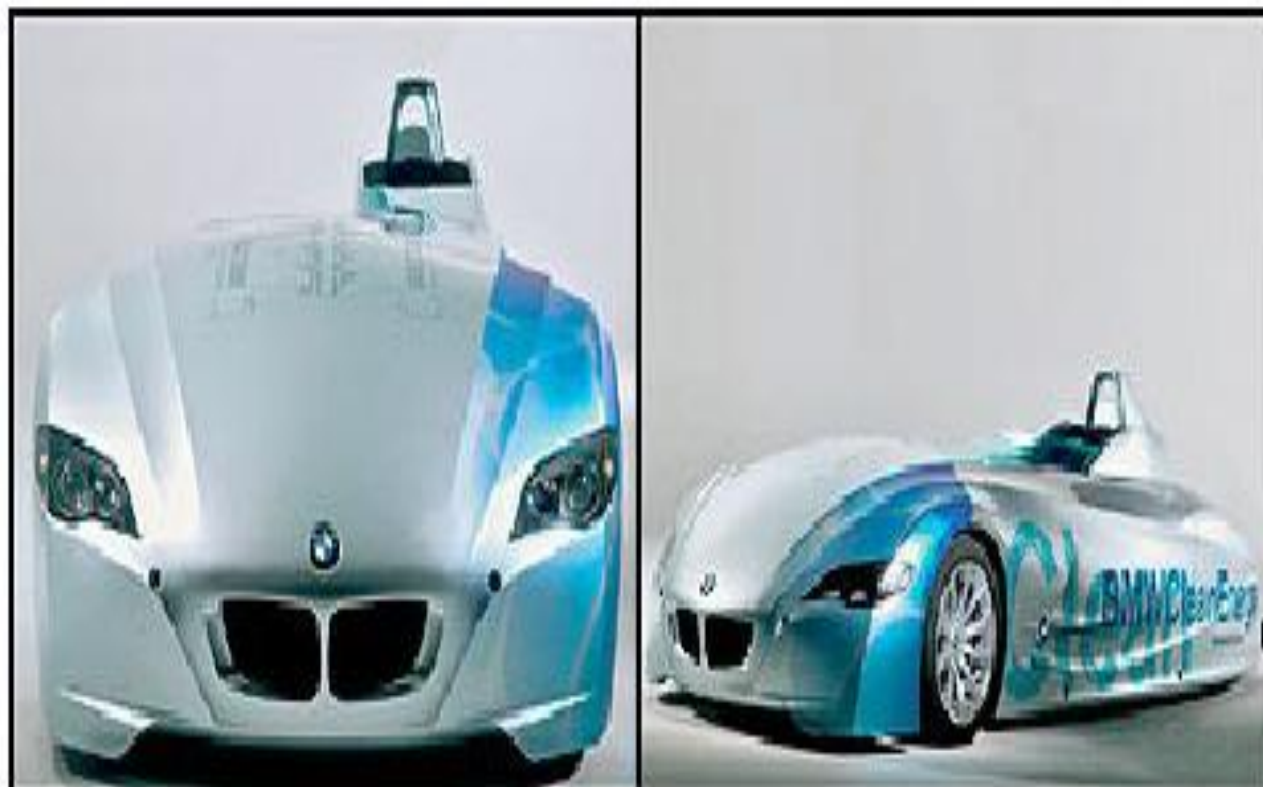


**Εικόνα 5.11:** Η σειρά 7 της BMW με τον νέο 12-κύλινδρο, 6-λιτρο κινητήρα καύσης υδρογόνου ή βενζίνης αποκαλύφθηκε στην Έκθεση Αυτοκινήτου της Φρανκφούρτης το 2003.

Το υδρογόνο είναι και εδώ κρυογονικώς αποθηκευμένο σε υγρή κατάσταση σε ένα ντεπόζιτο χωρητικότητας 140 λίτρων και παρέχει στο όχημα αυτονομία 200 χιλιομέτρων επιπροσθέτως της απόστασης των 500 περίπου χιλιομέτρων που μπορεί να διανύσει με την καύση της βενζίνης. Ειδικότερα, με τον νέο εξάλιτρο κινητήρα της σειράς 7, η BMW αντιμετώπισε την πρόκληση της καύσης στοιχειομετρικών μιγμάτων αέρα – υδρογόνου ( $\lambda=1$ ). Η πρόκληση στην περίπτωση αυτή είναι η αποφυγή των φαινομένων ανώμαλης καύσης, φαινόμενα που αντιμετωπίστηκαν με την εφαρμογή τεχνολογιών όπως το σύστημα μεταβλητού χρονισμού των βαλβίδων και το σύστημα ηλεκτρονικά ελεγχόμενου μεταβλητού βυθίσματος των βαλβίδων εισαγωγής.

## 5.7. BMW H2R (2004)

Το πρωτότυπο H2R (Hydrogen Race Car ή Hydrogen Record Car ή Hydrogen Research Car) ανήκει στην κατηγορία των σπορ πρωτότυπων αυτοκινήτων με μηχανή εσωτερικής καύσης υδρογόνου.



**Εικόνα 5.12:** Το σπορ πρωτότυπο όχημα της BMW H2R.

Στην περίπτωση του H2R, το μηχανικό σύνολο των έξι λίτρων, αποδίδει 285hp κατά την λειτουργία του με καύση υδρογόνου. Έτσι, επιταχύνει το αμάξωμα των 1460kg σε λιγότερο από 6 δευτερόλεπτα και προσδίδει τελική ταχύτητα 302km/h. Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης του πειραματικού οχήματος δεν διαθέτει την επιλογή καύσης βενζίνης αλλά ρυθμίστηκε αποκλειστικά για την καύση υδρογόνου με γνώμονα την μεγιστοποίηση της ισχύος και την βελτιστοποίηση της απόδοσης. Για τον περιορισμό του βάρους το σασί του αυτοκινήτου αποτελείται από ένα χωροδικτύωμα αλουμινίου, υλικό το οποίο έχει επιλεγθεί και για την κατασκευή των αναρτήσεων. Το αμάξωμα είναι κατασκευασμένο από ανθρακονήματα ενώ έχει μελετηθεί στην αεροσήραγγα για ελάχιστη αντίσταση και βελτιστοποίηση της κάθετης δύναμης (downforce) στις υψηλές ταχύτητες. Ο κινητήρας της

760i δέχθηκε τις απαραίτητες τροποποιήσεις για τη λειτουργία του με υδρογόνο. Οι διαφορετικές ιδιότητες καύσης του υδρογόνου επέβαλαν τις τροποποιήσεις τόσο στην ηλεκτρονική διαχείριση του κινητήρα όσο και στα υλικά κατασκευής συγκεκριμένων εξαρτημάτων του. Έτσι, σε αντίθεση με τον κινητήρα παραγωγής της σειράς 7, που χρησιμοποιεί τεχνολογία άμεσης έγχυσης του καυσίμου, στην περίπτωση του πρωτότυπου H2R, το καύσιμο εγχύεται στους αυλούς εισαγωγής και το μίγμα σχηματίζεται εκτός του θαλάμου καύσης. Λαμβάνοντας υπόψη την υψηλή ταχύτητα καύσης του υδρογόνου, το καύσιμο εγχύεται κατά το δυνατόν αργότερα στη φάση της συμπίεσης και το μίγμα αναφλέγεται όταν το έμβολο βρεθεί στο ΑΝΣ. Μ'αυτές τις ρυθμίσεις εξασφαλίζεται η μεγιστοποίηση της ισχύος και της απόδοσης του κινητήρα. Αυτές οι ίδιες όμως ρυθμίσεις, προϋποθέτουν τη χρησιμοποίηση διαφορετικών υλικών για τον θάλαμο καύσης και την επιλογή διαφορετικών παραμέτρων σχεδιασμού για τις βαλβίδες ψεκασμού του υδρογόνου. Έτσι, οι βαλβίδες έγχυσης έπρεπε να καλύψουν ένα ευρύ πεδίο συνθηκών και απαιτήσεων με διαφορετικές πιέσεις καθώς και περιόδους ψεκασμού, οι οποίες μπορεί να είναι από πολύ σύντομες κατά την έγχυση του υδρογόνου ως και πολύ μακρές κατά την έγχυση της βενζίνης. Η μεγαλύτερη, όμως, απαίτηση των βαλβίδων έγχυσης παραμένει η έγχυση της βέλτιστης ποσότητας υδρογόνου σε πολύ σύντομο χρόνο, στις συνθήκες υψηλού ρυθμού περιστροφών και μέγιστου φορτίου. Απ' την άλλη μεριά, τα συστήματα μεταβλητού χρονισμού και βυθίσματος των βαλβίδων, είναι και εδώ παρόντα, προσαρμοσμένα όμως στα διαφορετικά χαρακτηριστικά και στις απαιτήσεις του υδρογόνου, εξασφαλίζοντας την αποτελεσματικότερη πλήρωση και κένωση του θαλάμου καύσης, με ευεργετική την επίδραση στην απόδοση του κινητήρα. Τα συστήματα αυτά εξελίχθηκαν ειδικά για το πρωτότυπο H2R, λαμβάνοντας υπόψη τις αυξημένες θερμοκρασίες του θαλάμου καύσης κατά την καύση υδρογόνου, με σκοπό την βελτιωμένη ψύξη του θαλάμου καύσης και την αντιμετώπιση φαινομένων ανώμαλης καύσης. Έτσι, αέρας διαχέεται σε κάθε κύλινδρο χωριστά, πριν την εισαγωγή του μίγματος, ψύχοντας τον θάλαμο καύσης και αποτρέποντας με τον τρόπο αυτόν την περίπτωση φαινομένων προανάφλεξης.

Οι μειωμένες λιπαντικές ιδιότητες του υδρογόνου, εξάλλου, επέβαλαν την κατασκευή των ελατηρίων και των υλικών έδρασης των βαλβίδων καθώς και άλλων εξαρτημάτων του κινητήρα, από ειδικά κράματα ανθεκτικά στις αυξημένες τριβές που παρατηρούνται στον κινητήρα κατά την καύση υδρογόνου. Σε συνθήκες πλήρους φορτίου, το καύσιμο μίγμα υδρογόνου – αέρα που εγχύεται στους δώδεκα κυλίνδρους του μηχανικού συνόλου του H2R, βρίσκεται σε στοιχειομετρική αναλογία με σκοπό την μέγιστη ιπποδύναμη. Υπό μερικό φορτίο, όμως, το καύσιμο εγχύεται με περίσσεια αέρα διότι στόχος πλέον είναι η μειωμένη

κατανάλωση και ο περιορισμός των εκπομπών οξειδίων του αζώτου. Μάλιστα από τις δοκιμές του ερευνητικού τμήματος στον συγκεκριμένο κινητήρα προέκυψε ότι οι εκπομπές των NOx ελαχιστοποιούνται για  $\lambda \leq 1$  και για  $\lambda > 2$ . Επομένως, το ηλεκτρονικό σύστημα διαχείρισης του κινητήρα προγραμματίστηκε κατά τέτοιον τρόπο ώστε να εξασφαλίζονται οι παραπάνω συνθήκες αναλογίας του μίγματος. Τέλος, το διπλού τοιχώματος, ρεζερβουάρ καυσίμου, χωρητικότητας 11 λίτρων υγροποιημένου υδρογόνου, έχει τοποθετηθεί δίπλα στο κάθισμα του οδηγού. Με γνώμονα την ασφάλεια, είναι εφοδιασμένο με δύο βαλβίδες εκτόνωσης σε περίπτωση που η πίεση εντός του ρεζερβουάρ υπερβεί τα 5bar.



**Εικόνα 5.13:** Στην πρώτη εικόνα(επάνω) διακρίνονται ο κινητήρας καθώς και η δεξαμενή καυσίμου του πρωτότυπου H2R.

## 5.8. BMW Hydrogen 7 (2006)

Η BMW Hydrogen 7 παρουσιάστηκε τον Νοέμβριο του 2007 και αποτελεί το πρώτο αυτοκίνητο παραγωγής με κινητήρα υδρογόνου. Η τεχνολογία που προβλέπει την επιλογή δύο προγραμμάτων λειτουργίας, βενζίνης ή υδρογόνου, εφαρμόστηκε και στην περίπτωση της Hydrogen 7.



**Εικόνα 5.14:** Το πρώτο αυτοκίνητο υδρογόνου παραγωγής, η BMW Hydrogen7.



Η ελευθερία αυτής της επιλογής είναι ζωτικής σημασίας για την χρηστικότητα του αυτοκινήτου διότι η απουσία δικτύου σταθμών ανεφοδιασμού θα περιόριζε σημαντικά σε άλλη περίπτωση την ελευθερία μετακινήσεων, σε μικρή ακτίνα γύρω από τον σταθμό ανεφοδιασμού υδρογόνου. Έτσι, με το πάτημα ενός διακόπτη που βρίσκεται στο τιμόνι του οχήματος, ο οδηγός μπορεί να επιλέξει το καύσιμο με το οποίο θα λειτουργήσει ο κινητήρας. Η αυτονομία του οχήματος με το ρεζερβουάρ υδρογόνου περιορίζεται στα 200 χιλιόμετρα ενώ με το πρόγραμμα βενζίνης το αυτοκίνητο μπορεί να διανύσει 480 περίπου χιλιόμετρα επιπλέον. Κάτω από το καπό της Hydrogen 7 φιλοξενείται ένας δωδεκακύλινδρος κινητήρας, ο οποίος έχει δεχθεί τις απαραίτητες τροποποιήσεις για την καύση υδρογόνου και αποδίδει 260 ίππους κατά τη λειτουργία του με οποιοδήποτε από τα δύο καύσιμα, με τη μέγιστη ροπή των 390Nm να αποδίδεται στις 4300rpm. Για τη βελτιστοποίηση και προσαρμογή της λειτουργίας του κινητήρα στην καύση τόσο του υδρογόνου όσο και της βενζίνης, που χαρακτηρίζονται από τις τόσο διαφορετικές ιδιότητες καύσης, υιοθετήθηκαν συστήματα ελέγχου του χρονισμού και του βυθίσματος των βαλβίδων. Επίσης, η μεθοδολογία έγχυσης του καυσίμου είναι πανομοιότυπη με εκείνη που χρησιμοποιήθηκε στο πρωτότυπο H2R. Έτσι, η βενζίνη εγχύεται απευθείας στο θάλαμο καύσης ενώ το μίγμα αέρα – υδρογόνου σχηματίζεται εξωτερικά του θαλάμου καύσης, στους αυλούς εισαγωγής. Αντίστοιχες, με το πρωτότυπο H2R, είναι και οι ρυθμίσεις των λόγων αέρα – καυσίμου για τον περιορισμό των NOx. Έτσι, το ηλεκτρονικό σύστημα διαχείρισης του κινητήρα εξαιρεί την περιοχή μεταξύ  $\lambda=1$  και  $\lambda=2$  όπου παρατηρούνται οι μέγιστες εκπομπές οξειδίων του αζώτου.



**Εικόνα 5.15:** Ο 12-κύλινδρος κινητήρας έξι λίτρων της BMW Hydrogen 7. Δεξιά διακρίνεται η διάταξη των μηχανικών συστημάτων όπως ο κινητήρας, το κιβώτιο ταχυτήτων, ο άξονας μετάδοσης και η δεξαμενή υδρογόνου.

## 5.9. Ford P2000 Hydrogen ICE (2001)

Η βιομηχανία αυτοκινήτου Ford εκτιμά πως τα αυτοκίνητα με μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου θα γεφυρώσουν το χάσμα μεταξύ των καταλυτικών αυτοκινήτων του σήμερα με τα οχήματα κυψελών καυσίμου του αύριο. Επομένως, η ερευνητική δραστηριότητα της εταιρίας έχει δύο κατευθύνσεις, τις κυψέλες καυσίμου και τις ΜΕΚ υδρογόνου, παρουσιάζοντας κάθε τόσο και κάποιο πειραματικό μοντέλο. Η πρώτη επίσημη παρουσίαση αυτοκινήτου της Ford με μηχανή εσωτερικής καύσης υδρογόνου ήταν το Ford P2000 Hydrogen ICE με τον δίλιτρο κινητήρα Duratec, ειδικά τροποποιημένο για την καύση συμπιεσμένου αερίου υδρογόνου αποκλειστικά. Ο κινητήρας με 16 βαλβίδες και δύο εκκεντροφόρους επικεφαλής (DOHC) έχει αυξημένο βαθμό συμπίεσης 14,5:1 σε σχέση με το λόγο του συμβατικού κινητήρα βενζίνης. Έτσι, η απόδοση του τροποποιημένου κινητήρα είναι κατά 25 με 30% μεγαλύτερη σε σχέση με την απόδοση του συμβατικού κινητήρα βενζίνης.



**Εικόνα 5.16:** Το πρωτότυπο αυτοκίνητο της Ford με μηχανή εσωτερικής καύσης υδρογόνου, το P2000.

Η μηχανή του αυτοκινήτου τροφοδοτείται από δύο κυλινδρικές δεξαμενές υδρογόνου συνολικής χωρητικότητας 87lt οι οποίες είναι κατασκευασμένες από αλουμίνιο και ανθρακονήματα και καταλαμβάνουν σημαντικό μέρος του χώρου αποσκευών. Το υδρογόνο είναι αποθηκευμένο σε αέρια φάση και συμπιεσμένο στα 248bar. Για την ανίχνευση πιθανών διαρροών έχουν τοποθετηθεί αισθητήρες υδρογόνου τόσο στους χώρους αποσκευών και κινητήρα όσο και στο θάλαμο επιβατών. Οι αισθητήρες ενεργοποιούν ένα συναγερμό σε τρία διαδοχικά στάδια: όταν η συγκέντρωση του υδρογόνου στον αέρα υπερβεί το 0,6%, το 1,0% και το 1,6% κατ' όγκο (δηλαδή όταν η περιεκτικότητα φτάσει το 15%, το 25% ή το 40% του χαμηλού ορίου αναφλεξιμότητας του υδρογόνου). Πέρα από το σύστημα συναγερμού, είναι εγκατεστημένο στο χώρο αποσκευών και στο χώρο της μηχανής ένα σύστημα εξαερισμού, αποτελούμενο από τέσσερις ανεμιστήρες, με σκοπό να εμποδίσει την συγκέντρωση υδρογόνου σε επικίνδυνα επίπεδα στην περίπτωση διαρροής.

Με την αποθηκευμένη ποσότητα των 87lt υδρογόνου, το αυτοκίνητο μπορεί να διανύσει απόσταση περίπου 100km, αν και οι μηχανικοί της Ford, εγκατέστησαν αργότερα ένα εξελιγμένο σύστημα αποθήκευσης αερίου υδρογόνου, συμπιεσμένου στα 350bar, με χωρητικότητα 178lt ή 4kg υδρογόνου, ικανό να παρέχει αυτονομία στο αυτοκίνητο 270 ή και περισσότερων χιλιομέτρων. Το Ford P2000 Hydrogen ICE Vehicle είναι κατασκευασμένο εξ' ολοκλήρου από αλουμίνιο με στόχο τον περιορισμό του βάρους και των εκπομπών ρύπων. Το αυτοκίνητο ζυγίζει 1100kg και οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου κυμαίνονται μεταξύ 0,23 και 0,46g/km.



**Εικόνα 5.17:** Ο κινητήρας καύσης υδρογόνου και οι δεξαμενές καυσίμου στο χώρο αποσκευών του Ford P2000.

### **5.10. Ford H2RV (2003)**

Το πειραματικό υβριδικό όχημα Ford H2RV (Hydrogen Research Vehicle) κρύβει στο εσωτερικό του έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου απόδοσης 110 ίππων που συνδυάζεται με έναν ηλεκτροκινητήρα απόδοσης 33 ίππων. Η μετάδοση εξασφαλίζεται μέσω του συστήματος Modular Hybrid Transmission System (MHTS), το οποίο σβήνει αυτόματα τον κινητήρα υδρογόνου όταν το όχημα σταματά. Κατά την εκκίνηση του αυτοκινήτου, και όσο οι ταχύτητες παραμένουν χαμηλές, χρησιμοποιείται μόνο ο ηλεκτροκινητήρας ενώ το σύστημα θέτει και πάλι σε λειτουργία την ΜΕΚ υδρογόνου με ομαλό τρόπο όταν απαιτείται γρήγορη επιτάχυνση. Το H2RV της Ford είναι το πρώτο αυτοκίνητο με στροβιλο-υπερπληρωμένο κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου καθώς και το πρώτο αυτοκίνητο υδρογόνου που ενσωματώνει υβριδική τεχνολογία. Η μηχανή εσωτερικής καύσης υδρογόνου

του H2RV, βασίζεται σε έναν τετρακύλινδρο κινητήρα χωρητικότητας 2,3lt και απόδοσης 151 ίππων. Στην περίπτωση του H2RV έχει εφοδιαστεί με διβάθμιο στροβιλο-υπερπληρωτή και δύο ενδιάμεσα ψυγεία του αέρα υπερπλήρωσης και αποδίδει 110 ίππους. Σε συνδυασμό με τον ηλεκτροκινητήρα απόδοσης 33 ίππων, η συνολική ιπποδύναμη του κινητήρα είναι 143 ίπποι. Το υδρογόνο είναι αποθηκευμένο ως συμπιεσμένο αέριο υπό πίεση 5000psi σε μία δεξαμενή που βρίσκεται στο οπίσθιο μέρος του οχήματος. Η δεξαμενή συμπιεσμένου υδρογόνου είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο και είναι δομικά ενισχυμένη από ανθρακονήματα ενώ περιέχει 2,8kg υδρογόνου τα οποία παρέχουν στο αυτοκίνητο αυτονομία περίπου 200km.



**Εικόνα 5.18:** Το Ford H2RV.

### **5.11. Ford Focus C-Max H2ICE (2004)**

Το πρωτότυπο Ford Focus C-Max Hydrogen Car έχει τετρακύλινδρο κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου, με χωρητικότητα 2,3lt και φέρει μηχανικό στροβίλο-υπερπληρωτή με δύο ψυγεία του αέρα υπερπλήρωσης. Έτσι, ο κινητήρας αποδίδει ισχύ 110hp (82kW).



**Εικόνα 5.19:** Το πρωτότυπο όχημα της Ford με κινητήρα χωρητικότητας 2,3 λίτρων, το Focus C-Max H2ICE.

Η λειτουργία του συστήματος έγχυσης εκμεταλλεύεται την πολύ σημαντική ιδιότητα καύσης του υδρογόνου, τα ευρέα όρια αναφλεξιμότητας, και επομένως η ισχύς της μηχανής ρυθμίζεται με ποιοτικό τρόπο, δηλαδή διαμέσου της μεταβολής του λόγου των μαζών αέρα – καυσίμου.



**Εικόνα 5.20:** Η μηχανή εσωτερικής καύσης υδρογόνου του Ford Focus C-Max H2ICE. Στη φωτογραφία διακρίνεται ο μηχανικός στροβιλο-υπερπληρωτής

Για την αποθήκευση και μεταφορά του υδρογόνου χρησιμοποιούνται τρεις δεξαμενές συνολικής χωρητικότητας 119 λίτρων που ισοδυναμούν με 2,75kg υδρογόνου κατά βάρος, ποσότητα που παρέχει αυτονομία 200km στο αυτοκίνητο. Οι δύο δεξαμενές είναι τοποθετημένες στον χώρο των αποσκευών του αυτοκινήτου ενώ η τρίτη έχει τοποθετηθεί κάτω από το πάτωμα του χώρου αποσκευών. Το υδρογόνο είναι αποθηκευμένο σε αέρια φάση και για το λόγο αυτό είναι συμπιεσμένο στα 350bar. Δύο ρυθμιστές πίεσης μειώνουν την πίεση του αερίου στα 5,5bar στην πολλαπλή εισαγωγής πριν την έγχυσή του.





**Εικόνα 5.21:** Οι φιάλες που περιέχουν το υδρογόνο υπό πίεση 350bar στο πίσω μέρος του εκθεσιακού Ford Focus C-Max H2ICE. Το πάτωμα είναι κομμένο για να διακρίνεται η φιάλη κάτω από το πάτωμα. Όπως και στο πρωτότυπο Ford P2000, υπάρχουν και εδώ ειδικά συστήματα ασφαλείας με αισθητήρες ανίχνευσης της παραμικρής διαρροής υδρογόνου καθώς και βαλβίδες διακοπής της παροχής σε περίπτωση διαρροής.

## 5.12 MAZDA HR-X (1991) & MAZDA HR-X2 (1993)

Πέρα από τις BMW και Ford, η MAZDA είναι μία ακόμα εταιρία που έχει επενδύσει στην έρευνα για τις τεχνολογίες υδρογόνου. Η αρχή έγινε με το πρωτότυπο HR-X το 1991 και ακολούθησε το HR-X2 το 1993. Το πειραματικό μοντέλο HR-X χρησιμοποιούσε για πρώτη φορά έναν περιστροφικό κινητήρα Wankel υδρογόνου ο οποίος ήταν εξ' ολοκλήρου κατασκευασμένος από αλουμίνιο και διέθετε σύρτες στεγανότητας από κεραμικό υλικό. Και τα δύο αυτοκίνητα σχεδιάστηκαν από την αρχή με γνώμονα την λειτουργία τους με υδρογόνο. Έτσι κατασκευάστηκαν από ελαφρά κατά το δυνατόν υλικά ώστε να αντισταθμιστεί η απώλεια της ισχύος εξαιτίας της λειτουργίας της μηχανής με καύσιμο το υδρογόνο. Επιτεύχθηκε λοιπόν και στα δύο οχήματα ένας λόγος βάρους – ισχύος συγκρίσιμος με εκείνον μίας μοτοσικλέτας. Σε αντίθεση με την BMW, που επιλέγει την μέθοδο της κρυογονικής αποθήκευσης, η MAZDA, για την αποθήκευση του υδρογόνου χρησιμοποιεί την μέθοδο της απορρόφησης υδρογόνου σε υδρίδια μετάλλων. Με τον τρόπο αυτό, μεγαλύτερη ποσότητα υδρογόνου αποθηκεύεται στον ίδιο όγκο δεξαμενής.



**Εικόνα 5.22:** Τα πρωτότυπα της MAZDA, HR-X και HR-X2.

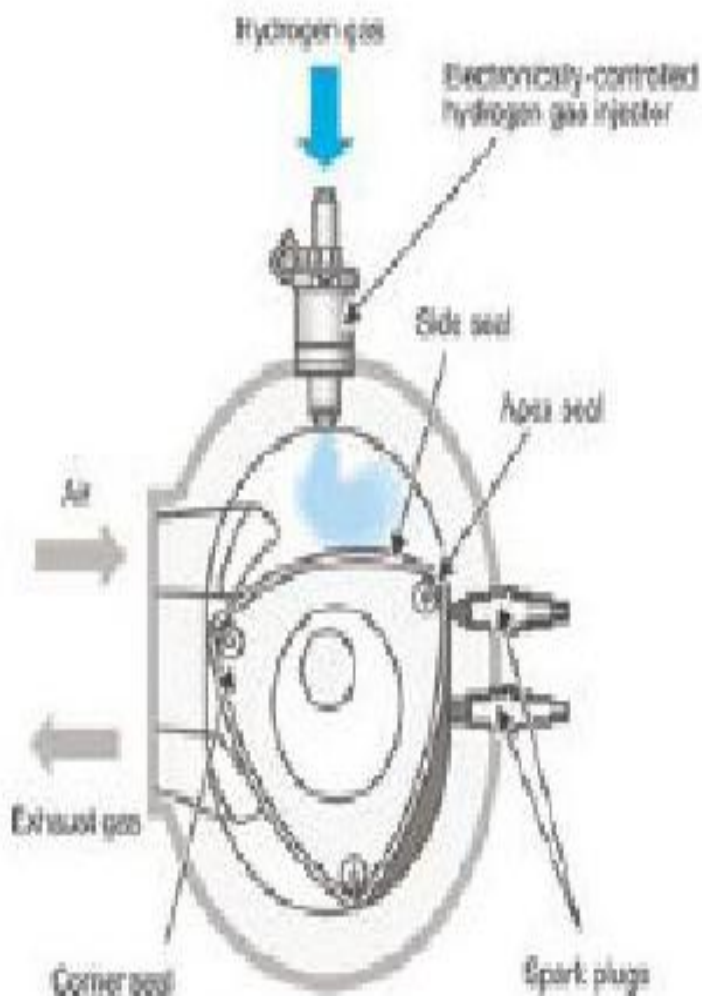
### **5.13 MAZDA RX-8 RE (2003)**

Όπως είδαμε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, οι ιδιότητες καύσης του υδρογόνου σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν στο θάλαμο καύσης του εμβολοφόρου κινητήρα δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για την γένεση φαινομένων ανώμαλης καύσης όπως η ανάφλεξη στην εισαγωγή. Για την αντιμετώπιση των φαινομένων, απαιτούνται πρωτοποριακές μέθοδοι, καινοτόμες τεχνικές και υλικά κατασκευής τα οποία επιβαρύνουν το κόστος της μηχανής και επιτείνουν την πολυπλοκότητα. Αντίθετα, οι αρχές λειτουργίας του περιστροφικού κινητήρα είναι ιδανικές για την υπερκέρωση των φαινομένων που έχουν τις ρίζες τους στις ιδιότητες καύσης του υδρογόνου. Ο περιστροφικός κινητήρας διαθέτει ξεχωριστούς θαλάμους για την εισαγωγή, την καύση και την εξαγωγή. Επομένως, κατά τη λειτουργία της μηχανής, το υδρογόνο εγχύεται σε έναν χαμηλότερης θερμοκρασίας θάλαμο εισαγωγής ενώ το καύσιμο μίγμα έρχεται σε επαφή με τις υψηλότερες θερμοκρασίες του διαφορετικού χώρου καύσης την στιγμή πριν την ανάφλεξη. Έτσι, αποκλείεται η περίπτωση της ανάφλεξης στην εισαγωγή. Απ' την άλλη μεριά, η εισαγωγή του μίγματος σε διαφορετικό χώρο από το θάλαμο ανάφλεξης και καύσης, δημιουργεί λιγότερο ακραίες συνθήκες για τους εγχυτήρες υδρογόνου, σε αντίθεση με την περίπτωση του παλινδρομικού κινητήρα όπου η παρουσία των μπεκ ψεκασμού στις ακραίες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας του θαλάμου καύσης μειώνει σαφώς την διάρκεια ζωής τους. Το πρωτότυπο RX-8 έφερε κάτω από το μπροστινό καπό του, τον πρώτο περιστροφικό κινητήρα στην ιστορία της αυτοκίνησης με διττή επιλογή καυσίμου υδρογόνου ή βενζίνης. Βάση για την εξέλιξη του εν λόγω μηχανικού συνόλου αποτέλεσε ο περιστροφικός κινητήρας RENESIS της MAZDA. Η φιλοσοφία πίσω από την επιλογή του διπλού προγράμματος λειτουργίας είναι ίδια με εκείνη της BMW, και στηρίζεται στην μειωμένη αυτονομία των οχημάτων με καύση αποκλειστικά υδρογόνου και στην έλλειψη των υποδομών για τον ανεφοδιασμό των αυτοκινήτων υδρογόνου.



**Εικόνα 5.23:** Το πρωτότυπο μοντέλο υδρογόνου της MAZDA, RX-8 RE με τον κινητήρα περιστρεφόμενου εμβόλου τύπου Wankel.

Ο περιστροφικός κινητήρας βενζίνης ή υδρογόνου RENESIS, αποτελούμενος από δύο περιστρεφόμενα έμβολα, χρησιμοποιεί ένα ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα άμεσου ψεκασμού αερίου υδρογόνου. Για την έγχυση του υδρογόνου χρησιμοποιούνται δύο εγχυτήρες σε κάθε ρότορα οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στο χώρο εισαγωγής του κάθε κελύφους. Η απαίτηση για διπλά μπεκ έγχυσης πηγάζει από την ανάγκη αυξημένης παροχής υδρογόνου εξαιτίας της σημαντικά μικρότερης πυκνότητας του καυσίμου σε σχέση με την βενζίνη. Οι εγχυτήρες βενζίνης έχουν τοποθετηθεί στους αυλούς εισαγωγής, όπως και στο συμβατικό κινητήρα RENESIS. Πρέπει να υπογραμμιστεί στο σημείο αυτό ένα ακόμη συγκριτικό πλεονέκτημα του περιστροφικού κινητήρα σε σχέση με τον παλινδρομικό κινητήρα κατά τη λειτουργία τους με υδρογόνο. Η γεωμετρία του κινητήρα Wankel επιτρέπει την εύκολη τοποθέτηση δύο εγχυτήρων στο χώρο εισαγωγής του κελύφους κάτι που είναι ιδιαίτερα δύσκολο στον κινητήρα Otto, εξαιτίας του περιορισμένου διαθέσιμου χώρου.



**Εικόνα 5.24:** Ο περιστροφικός κινητήρας RENESIS με δυνατότητα καύσης υδρογόνου ή βενζίνης (dual-fuel).

Το πρωτότυπο φέρει δύο δεξαμενές καυσίμου: ένα συμβατικό ρεζερβουάρ βενζίνης και μία φιάλη αποθήκευσης αέριου υδρογόνου υπό πίεση 350bar στον χώρο αποσκευών. Κατά την λειτουργία του με βενζίνη, ο κινητήρας αποδίδει 210hp και το αυτοκίνητο έχει αυτονομία περίπου 530km, ενώ κατά τη λειτουργία του με υδρογόνο, ο RENESIS αποδίδει μόλις 110hp και προσδίδει στο όχημα αυτονομία περίπου 100km. Οι μηχανικοί της MAZDA, έχουν εφοδιάσει τον κινητήρα του οχήματος με σύστημα ανακύκλωσης καυσαερίων για υψηλή απόδοση και μειωμένες εκπομπές οξειδίων του αζώτου. Ακόμα, το αυτοκίνητο διαθέτει σύστημα ανάκτησης της ενέργειας και φόρτισης της μπαταρίας των 144V, κατά το φρενάρισμα και την επιβράδυνση. Τέλος, για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης, ιδιαίτερη

βαρύτητα δόθηκε, κατά την εξέλιξη του αυτοκινήτου, στην ελάττωση των αεροδυναμικών αντιστάσεων και στη μείωση του συνολικού του βάρους.



**Εικόνα 5.25:** Η δεξαμενή υδρογόνου στον χώρο αποσκευών του οχήματος.

## 5.14 MAZDA 5/PREMACY Hydrogen RE Hybrid Minivan (2005)

Το πρωτότυπο MAZDA 5/Premacy Hydrogen RE Hybrid Minivan αποκαλύφθηκε 2005 και φέρει μία νέα, βελτιωμένη έκδοση του περιστροφικού κινητήρα του RX8 Hydrogen RE, με δυνατότητα επιλογής του καυσίμου, καθώς και όλα τα συστήματα υβριδικής τεχνολογίας που εφαρμόστηκαν στο RX8. Έτσι και το MAZDA Premacy Hydrogen RE διαθέτει ηλεκτροκινητήρα για την εκκίνηση του οχήματος από στάση, σύστημα επανάκτησης της ενέργειας κατά την επιβράδυνση, καθώς και σύστημα διακοπής λειτουργίας του κινητήρα κατά την ακινητοποίηση του οχήματος.



**Εικόνα 5.26:** Το πρωτότυπο MAZDA Premacy Hydrogen RE Hybrid Minivan.

Ο περιστροφικός κινητήρας του οχήματος, διττού προγράμματος λειτουργίας είναι εγκάρσια τοποθετημένος στο εμπρόσθιο μέρος του αυτοκινήτου μαζί με το υβριδικό σύστημα κίνησης.

Οι μηχανικοί της εταιρίας βελτίωσαν σημαντικά τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του κατά την καύση υδρογόνου, και στην περίπτωση του Premacy Hydrogen RE αποδίδει πλέον ιπποδύναμη 140hp, αυξημένη κατά 27% σε σχέση με την απόδοση του στο RX8 Hydrogen RE. Η μπαταρία υψηλής τάσης και η δεξαμενή βενζίνης έχουν τοποθετηθεί κάτω από την δεύτερη σειρά καθισμάτων ενώ το ρεζερβουάρ υδρογόνου βρίσκεται κάτω από την τρίτη σειρά καθισμάτων και περιέχει ποσότητα ικανή να προσδώσει στο αυτοκίνητο αυτονομία περίπου 200km. Το υβριδικό σύστημα υποβοήθησης του κινητήρα δουλεύει πλέον με ελαφρώς διαφορετικό τρόπο απ' ότι στην περίπτωση του RX8, προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα χαρακτηριστικά χαμηλής απόδοσης και ροπής κατά τη λειτουργία του κινητήρα Wankel στις χαμηλές στροφές. Έτσι, κατά την εκκίνηση του αυτοκινήτου από στάση, έργο παράγει μόνο ο ηλεκτροκινητήρας ενώ ο RENESIS εμπλέκεται όταν το όχημα έχει ήδη αποκτήσει κάποια ταχύτητα.

### **5.15 MAN SL 202 & NL 202 (Πιλοτικό Πρόγραμμα EQHHPP)**

Πρωτότυπα οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης υδρογόνου, εκτός από μεγάλους κατασκευαστές αυτοκινήτων έχουν παρουσιαστεί και από μεγάλους κατασκευαστές βαρέων οχημάτων. Στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Προγράμματος HyFLEET: CUTE (Clean Urban Transport for Europe), η εταιρία MAN κατασκεύασε τον κινητήρα με κωδικό H 2876 UH01 αποκλειστικά καύσης υδρογόνου ο οποίος αποτελεί εξέλιξη του προγενέστερου κινητήρα με κωδικό H 2866 UH εσωτερικής καύσης υδρογόνου ή βενζίνης. Ο κινητήρας H 2866 UH τοποθετήθηκε αρχικά στο συμβατικό λεωφορείο παραγωγής SL 202 κανονικού δαπέδου το οποίο εκτελούσε προγραμματισμένα δρομολόγια στις πόλεις του Μονάχου και του Έρλανγκεν μεταξύ 1996 και 1998. Ο τετράχρονος, εξακύλινδρος κινητήρας του SL 202 χωρητικότητας 12 λίτρων ήταν οριζόντια τοποθετημένος στο πίσω μέρος του οχήματος και κατά την καύση υδρογόνου απέδιδε ισχύ 140kW ή 190hp στις 2200rpm με τη μέγιστη ροπή των 750Nm να αποδίδεται στις 1000rpm ενώ κατά τη λειτουργία του με βενζίνη απέδιδε ισχύ 170 kW ή 230hp στις 2200rpm με τη μέγιστη ροπή των 840Nm να αποδίδεται επίσης στις 1000rpm. Το υδρογόνο ήταν κρυογονικώς αποθηκευμένο σε τρεις πανομοιότυπες δεξαμενές της εταιρίας Linde AG, συνολικής χωρητικότητας 570lt, ποσότητα ικανή να εξασφαλίσει μέγιστη αυτονομία 250km στο βαρύ όχημα. Αργότερα, που η τοποθέτηση των βαρέων δεξαμενών υδρογόνου στην οροφή του λεωφορείου χαμηλού δαπέδου NL 202 της MAN,



έγινε εφικτή, μία βελτιωμένη έκδοση του κινητήρα με υπερσυμπιεστή καυσαερίων τοποθετήθηκε στο μοντέλο NL 202, το οποίο τέθηκε σε υπηρεσία από τα τέλη του 1998 στο αεροδρόμιο του Μονάχου. Ο κινητήρας πλέον απέδιδε ισχύ 170kW ή 230hp κατά την καύση υδρογόνου ενώ δεν υπήρχε πλέον η επιλογή κίνησης με βενζίνη. Τέλος, το υδρογόνο που ήταν αποθηκευμένο ως συμπιεσμένο αέριο παρείχε αυτονομία μεταξύ 150 και 200km.



**Εικόνα 5.27:** Το λεωφορείο SL202 κανονικού δαπέδου της MAN με τον κινητήρα διττής επιλογής καυσίμου H 2866 UH.



**Εικόνα 5.28:** Το λεωφορείο NL202 χαμηλού δαπέδου με την βελτιωμένη υπερτροφοδοτούμενη έκδοση του κινητήρα H 2866 UH αποκλειστικά καύσης υδρογόνου.

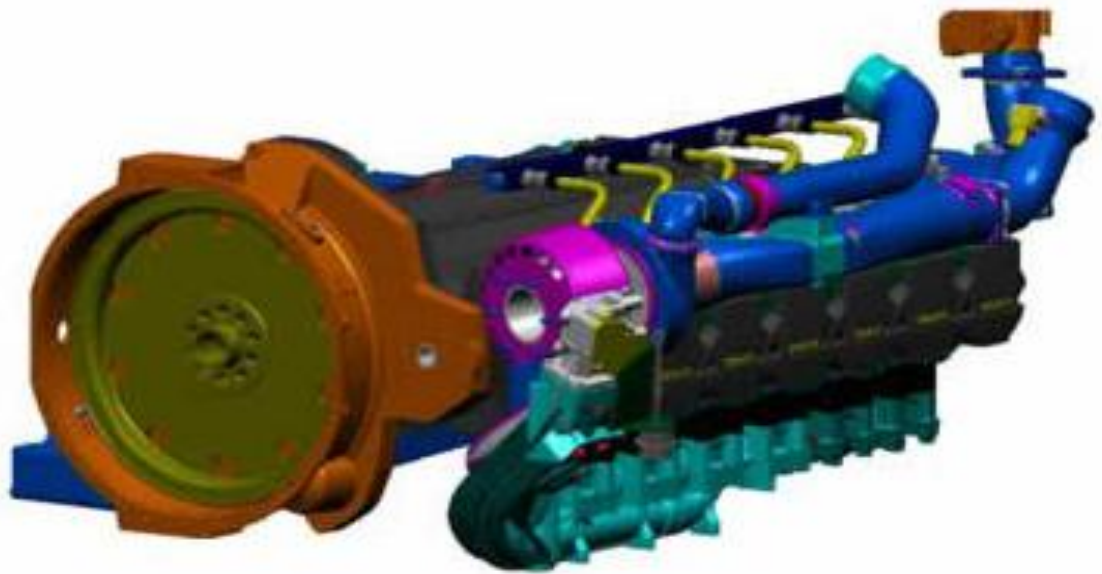
### **5.15. MAN Lion's City H 150kW & MAN Lion's City H 200kW**

Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης υδρογόνου με κωδικό H 2876 UH01 που εξελίχθηκε από τη MAN ειδικά για το πρόγραμμα HyFLEET:CUTE είναι τετράχρονος φυσικής αναπνοής, με έξι κυλίνδρους σε διάταξη σειράς, χωρητικότητας 12 λίτρων. Ο κινητήρας είναι οριζόντια τοποθετημένος με στόχο το χαμήλωμα του κέντρου βάρους του οχήματος και αποδίδει ισχύ 150kW ή 200hp στις 2200rpm με τη μέγιστη ροπή των 760Nm να αποδίδεται μεταξύ 1000 και 1400rpm. Το καύσιμο μίγμα σχηματίζεται εξωτερικά του θαλάμου καύσης, στην πολλαπλή εισαγωγής, μέσω ηλεκτρομαγνητικά ελεγχόμενων βαλβίδων εισαγωγής ενώ η στρωματική έγχυση του καυσίμου σε κάθε κύκλο καύσης συμβάλλει σημαντικά στον περιορισμό του θορύβου και στην καλύτερη καύση. Η παραγόμενη από τον κινητήρα ισχύς ρυθμίζεται ποσοτικά δηλαδή διαμέσου στραγγαλιστικής δικλείδας (πεταλούδας).



**Εικόνα 5.29:** Ο εξάλιτρος φυσικής αναπνοής κινητήρας καύσης υδρογόνου H 2876 UH01 της MAN απόδοσης 200 ίππων.

Ακολούθησε μία νέα έκδοση του συγκεκριμένου κινητήρα με κωδικό H 2876 LUH01, ο οποίος διαθέτει υπερσυμπιεστή καυσαερίων και ψυγείο του αέρα υπερπλήρωσης με σημαντικά βελτιωμένα χαρακτηριστικά ισχύος και απόδοσης. Έτσι ο κινητήρας κατά την καύση φτωχών μιγμάτων υδρογόνου αποδίδει ισχύ 200kW ή 270hp.



**Εικόνα 5.30:** Ο βελτιωμένος κινητήρας H 2876 LUH01 της MAN με υπερσυμπιεστή καυσαερίων και ισχύ 270 ίππων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Κ. Δ. Ρακόπουλος (1988), «Αρχές εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης. Εισαγωγή–Λειτουργία–Θερμοδυναμική», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
2. Κ. Δ. Ρακόπουλος (2000), «Εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης II. Εμβάθυνση στην κατασκευή και λειτουργία», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
3. Κ. Δ. Ρακόπουλος (1994), «Εργαστηριακές δοκιμές και μετρήσεις εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
4. Κ.Δ. Ρακόπουλος, Δ.Θ. Χουντάλας (1998), «Καύση ρύπανση εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης», Εκδόσεις Ε.Μ.Π..
5. Κ.Δ. Ρακόπουλος, Ε.Γ. Γιακουμής (2006), «Εναλλαγή αερίων και υπερπλήρωση ΜΕΚ», Εκδόσεις ΕΜΠ..

ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ

6. <http://www.hydrogencarsnow.com>
7. <http://www.fuelcells.gr>
8. <http://www.bmweducation.co.uk>
9. <http://www1.eere.energy.gov>

