

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης.



**ΚΑΤΣΑΟΥΝΟΣ ΛΑΜΠΡΟΣ Α.Μ. 6155
ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΒΟΥΡΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ (Π.Υ)**

**ΠΑΤΡΑ
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8
Εισαγωγή.....	9
1 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	11
1.1 Φυσικά χαρακτηριστικά του Υδρογόνου.....	11
1.2 Το υδρογόνο ως «καθαρό» καύσιμο.....	11
1.3 Φυσικές Ιδιότητες του Υδρογόνου.....	12
1.4 Χημικές Ιδιότητες του Υδρογόνου.....	13
1.5 Θερμοφυσικές Ιδιότητες του Υδρογόνου.....	14
1.6 Μέθοδοι Παρασκευής Υδρογόνου.....	17
1.6.1 Παραγωγή Υδρογόνου από Ορυκτά Καύσιμα.....	19
1.6.2 Παραγωγή Υδρογόνου από το Φυσικό Αέριο/Υδρογονάνθρακες.....	19
1.6.3 Παραγωγή Υδρογόνου από Άνθρακα.....	20
1.6.4 Παραγωγή Υδρογόνου από τη Διάσπαση του Νερού.....	20
1.7 Παραγωγή Υδρογόνου μέσω Ηλεκτρόλυσης του Νερού.....	21
1.8 Παραγωγή Υδρογόνου μέσω Φωτολυτικών μεθόδων.....	23
1.8.1 Φωτοηλεκτρόλυση.....	23
1.9 Το υδρογόνο ως ενεργειακό καύσιμο.....	25
1.10 Τρόποι μεταφοράς του υδρογόνου – πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των συστημάτων διανομής.....	31
1.11 Πλεονεκτήματα του υδρογόνου έναντι των συμβατικών πηγών ενέργειας.....	35
1.12 Μειονεκτήματα του υδρογόνου έναντι των συμβατικών πηγών ενέργειας.....	37
1.13 Ασφάλεια κατά τη χρήση του υδρογόνου.....	38
1.13.1 Διαρροές σε σωλήνες υδρογόνου.....	38
1.13.2 Μέτρα Ασφαλείας.....	41
1.14 Αποθήκευση σε μπαταρίες.....	42
2 ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	45
2.1 Εισαγωγή στις κυψέλες καυσίμου (ΚΚ).....	45
2.2 Ιστορική Εξέλιξη κυψελών καυσίμου.....	46
2.3 Αρχή λειτουργίας.....	47
2.4 Τύποι των κυψελών καυσίμου και χρήσεις τους.....	51
2.4.1 Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (Alkaline fuel cells AFCs).....	52
2.4.2 Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος Phosphoric-acid fuel cells (PAFC).....	53
2.4.3 Φάσεις κατά τη διαδικασία παραγωγής υδρογόνου.....	54
2.4.4 Κυψέλες καυσίμου Solid oxide fuel cells (SOFC).....	56
2.4.5 Molten carbonate fuel cells (MCFC).....	57
2.4.6 Polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC).....	58
2.4.7 Κυψέλες καυσίμου μεθανόλης (DMFC).....	59
2.5 Σύγκριση των fuel cells.....	59
2.6 Εφαρμογές των fuel cells.....	60
2.6.1 Εφαρμογή στην αυτοκίνηση.....	60
2.6.2 Εφαρμογή στις γεννήτριες ισχύος.....	61
2.6.3 Άλλες εφαρμογές.....	61
2.7 Χρήσεις του Υδρογόνου.....	62
2.8 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Χρήσης του Υδρογόνου.....	63
2.8.1 Πλεονεκτήματα Χρήσης Υδρογόνου.....	63
2.8.2 Μειονεκτήματα Χρήσης Υδρογόνου.....	64
3 Μηχανές Εσωτερικής Καύσης.....	67
3.1 Εισαγωγή.....	67
3.2 Τετράχρονος κινητήρας.....	68
3.3 Δίχρονος κινητήρας.....	69
3.4 Κινητήρας Otto (βενζίνης).....	70

3.5	Κινητήρας Diesel.....	71
3.6	Περιστροφικός κινητήρας Wankel.	74
4	Υδρογονοκίνηση.....	77
4.1	Το Υδρογόνο ως καύσιμο.	77
4.2	Κριτήρια ικανοποίησης του καυσίμου του μέλλοντος.....	79
4.3	Χαρακτηριστικά του Υδρογόνου ως καύσιμο σε ΜΕΚ.	81
4.3.1	Ευρύ φάσμα αναφλεξιμότητας.	82
4.3.2	Χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης.	82
4.3.3	Υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης.	83
4.3.4	Μεγάλη ταχύτητα καύσης.	83
4.3.5	Πολύ χαμηλή πυκνότητα & μεγάλη κατά μάζα ενέργεια καύσης.	83
4.3.6	Υψηλός συντελεστής διάχυσης.	84
4.3.7	Μικρή απόσταση σβησίματος και εξάλειψης της φλόγας.	84
4.3.8	Υπολογισμός του λόγου αέρα – υδρογόνου για στοιχειομετρική καύση.....	85
4.4	Παράγωγα της καύσης των ΜΕΚ Υδρογόνου - σύγκριση με τους ρύπους βενζίνης.....	85
4.4.1	ΜΕΚ υδρογόνου και οξειδία του αζώτου (NOx).....	86
4.4.2	Παράμετροι λειτουργίας των ΜΕΚ υδρογόνου –δημιουργία (NOx).	87
4.4.3	Μηχανισμοί μείωσης των επεμπόμενων NOx.	88
4.4.4	Υπεροξειδίο του υδρογόνου ως ρύπος των ΜΕΚ υδρογόνου.	89
4.5	Φαινόμενα ανώμαλης καύσης των ΜΕΚ υδρογόνου.	89
4.5.1	Ανάφλεξη εισαγωγής (backfire).	90
4.5.2	Αιτίες πρόκλησης ανάφλεξης στην εισαγωγή.	90
4.6	Μηχανισμοί αντιμετώπισης της ανάφλεξης εισαγωγής.	91
4.6.1	Προανάφλεξη (preignition).....	92
4.6.2	Κρουστική καύση (Knock).....	93
4.7	Μέθοδοι τροφοδοσίας καυσίμου & σχηματισμού του μίγματος.....	94
4.8	Εξαεριωτής – Έγχυση στην πολλαπλή εισαγωγής (TMI).....	94
4.8.1	Άμεση έγχυση (DI) – Έγχυση στη θυρίδα εισαγωγής (PFI).	95
4.9	Τεχνικά προβλήματα – περιορισμοί στις ΜΕΚ υδρογόνου.	96
4.10	Χαρακτηριστικά σχεδιασμού & λειτουργίας των ΜΕΚ υδρογόνου.....	97
4.10.1	Σύστημα τροφοδοσίας του καυσίμου.....	97
4.10.2	Σύστημα ανάφλεξης – σπινθηριστές (μπουζί).	98
4.10.3	Λίπανση των ΜΕΚ υδρογόνου.....	99
4.10.4	Τεχνικές ψύξης του θαλάμου καύσης.....	99
4.10.5	Σχεδιασμός του θαλάμου καύσης.	99
4.10.6	Βαθμός συμπίεσης.	100
4.10.7	Στρατηγική ελέγχου του φορτίου της μηχανής.....	100
4.10.8	Γενικό συμπέρασμα.....	101
5	Νέοι ορίζοντες στη χρήση του υδρογόνου.	103
5.1	Νεότερες εξελίξεις στην τεχνολογία του υδρογόνου.	103
5.2	Ιστορική εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης.....	105
5.3	Μηχανισμός μετατροπής.....	107
5.4	Νέες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου.	108
5.4.1	Παραγωγή υδρογόνου από πετρώματα του φλοιού της γης.....	108
5.4.2	Παραγωγή υδρογόνου από πράσινη άλγη.	108
5.4.3	Παραγωγή υδρογόνου από βακτήρια.	109
5.4.4	Παραγωγή υδρογόνου από νανοσωματίδια.	109
6	Πρωτότυπα οχήματα καύσης υδρογόνου.	113
6.1	Ιστορική εξέλιξη της χρήσης του υδρογόνου στην αυτοκινητοβιομηχανία.....	113
6.2	Μοντέλο BMW 728hL (1998).	115
6.3	Μοντέλο BMW 750hL (1999).	115

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

6.4	Μοντέλο BMW E65 745h (2001).....	117
7	Συμπεράσματα.....	119
8	Αναφορές.....	121

Εικόνα 1: Διάγραμμα πίεσης, θερμοκρασίας και διαφορετικών θερμοφυσικών φάσεων σε ισορροπία για το υδρογόνο [8].....	16
Εικόνα 2: Παραγωγή Υδρογόνου από ανανεώσιμες και μη πηγές ενέργειας [11].	19
Εικόνα 3: Παραγωγή Υδρογόνου από ΑΠΕ [16].	21
Εικόνα 4: Αναπαράσταση λειτουργίας φωτοηλεκτροχημικού στοιχείου [20].....	25
Εικόνα 5: Περιεκτικότητα καυσίμων σε άνθρακα και υδρογόνο [21].....	27
Πίνακας 3: Συγκριτικά στοιχεία ενεργειακής πυκνότητας μεταξύ του υδρογόνου και των κυριότερων ενεργειακών καυσίμων.....	29
Εικόνα 6: Αστικό λεωφορείο με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου σε λειτουργία στην πόλη του Αμβούργου από το 2006 [26].....	30
Εικόνα 7: Αστικά λεωφορεία MAN κινούμενα με MEK υδρογόνου σε κυκλοφορία τον Ιούνιο του 2006 στο Βερολίνο ως τμήμα του ευρωπαϊκού προγράμματος HyFLEET [26].....	31
Εικόνα 8: Διανομή του υδρογόνου κατά συγκεντρωτικό τρόπο [28].....	33
Εικόνα 9: Σταθμός ανεφοδιασμού υδρογόνου σε συνοικία του Βερολίνου [31].....	35
Εικόνα 10: Διαρροή καυσίμου υδρογόνου στο αριστερό όχημα (α) και βενζίνης στο δεξί όχημα (β) σε δύο στιγμιότυπα, μετά 3sec και μετά από 1min από έκρηξη.	41
Εικόνα 11: Εργαστηριακή Μονάδα FuelCell [35].....	46
Εικόνα 12: Η βασική διάταξη ενός fuelcell.....	49
Εικόνα 13: Παροχή ισχύος στο φορτίο μέσω fuelcell [44].....	49
Εικόνα 14: Στοιβα από fuelcell.....	49
Εικόνα 15: Μπλοκ διάγραμμα συστήματος fuelcell [36].....	50
Εικόνα 16: Φόρτιση στοιχείου σε διάταξη κυψέλης.	50
Εικόνα 17: Παραγωγή τάσης σε κυψέλη υδρογόνου	51
Εικόνα 18: Τροφοδοσία κυψέλης καυσίμου από υδρογόνο.....	51
Εικόνα 19: Σχήμα διάταξης Alkalinefuelcell (AFC) [37].....	52
Εικόνα 20: Σχήμα διάταξης Phosphoric-acid fuel cell (PAFC) [38].	53
Εικόνα 21: Τμήματα κυψέλης PAFC [38].....	54
Εικόνα 22: Στάδια κατά την διαδικασία παραγωγής υδρογόνου.	56
Εικόνα 23: Σχήμα διάταξης Solid oxide fuel cell (SOFC) [38].....	57
Εικόνα 24: Σχήμα διάταξης Molten carbonate fuel cell (MCFC) [39].....	58
Εικόνα 25: Διάταξη κυψέλης PEMFC.....	59
Εικόνα 26: Συντελεστές απόδοσης των fuelcells.....	60
Εικόνα 27: Ο κύκλος του υδρογόνου ως δευτερογενής ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.....	62
Εικόνα 28: Το υδρογόνο ως ενεργειακή πηγή στη βιομηχανία.	65
Εικόνα 29: Το υδρογόνο ως ενεργειακή πηγή στην αυτοκίνηση.	65
Εικόνα 30: Μηχανή εσωτερικής καύσης σε τομή.....	67
Εικόνα 31: Τετράχρονη Μηχανή εσωτερικής καύσης. Διακρίνονται οι τέσσερις χρόνοι της καύσης.	68
Εικόνα 32: Δίχρονη Μηχανή εσωτερικής καύσης.....	69
Εικόνα 33: Ο Νικολάους Όττο (NicolausAugustOtto, Χόλτσχάουζεν) ήταν Γερμανός εφευρέτης της Μηχανής εσωτερικής καύσης.....	70
Εικόνα 34: Κύκλος Όττο σε σύγκριση με τον κύκλο Diesel.....	71
Εικόνα 35: Μηχανή εσωτερικής καύσης Diesel.....	72
Εικόνα 36: (α) Διμερής θάλαμος καύσης εμμέσου ψεκασμού με προθάλαμο, (β) Διμερής θάλαμος καύσης εμμέσου ψεκασμού με στροβιλοθάλαμο.	74
Εικόνα 37: Τα μηχανικά μέρη του περιστροφικού κινητήρα Wankel.	75
Εικόνα 38: Στην αριστερή φωτογραφία διακρίνεται 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....	84
Εικόνα 39: η Ηλεκτρολυτική Συσκευή Hydro-Gen.	111
Εικόνα 40 Μοντέλο BMW 728hL (1998).....	115
Εικόνα 41 Μοντέλο BMW 728hL (1999).....	115
Εικόνα 42: Ο στόλος των 750hL σε παράταξη κατά τη διάρκεια της παγκόσμιας εκστρατείας της BMW, Clean Energy World Tour.....	116

<i>Εικόνα 43: Η χωροθέτηση του κινητήρα και των συστημάτων του αυτοκινήτου. Διακρίνεται η δεξαμενή καυσίμου στον χώρο αποσκευών και το ηλεκτρονικό κύκλωμα ελέγχου.....</i>	<i>116</i>
<i>Εικόνα 44: Ο σταθμός ανεφοδιασμού στο αεροδρόμιο του Μονάχου και το ρομποτικό σύστημα τροφοδοσίας.....</i>	<i>117</i>
<i>Εικόνα 45.: Η BMW 745h στο Σαλόνι Αυτοκινήτου της Φρανκφούρτης το 2001.....</i>	<i>117</i>
<i>Εικόνα 46: 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 χώρου αποσκευών.....</i>	<i>118</i>
<i>Εικόνα 47: Η 745h στο σταθμό ανεφοδιασμού του αεροδρομίου του Μονάχου.</i>	<i>118</i>

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και αναφέρεται στην εφαρμογή συστήματος παραγωγής υδρογόνου σε κινητήρα εσωτερικής καύσης.

Αφορμή για την παρούσα πτυχιακή εργασία αποτέλεσε η πρόθεσή μου να ασχοληθώ με την τεχνολογία του υδρογόνου και την εφαρμογή σε κινητήρες ΜΕΚ. Στο παρόν τεύχος της πτυχιακής εργασίας μου αναφέρεται η μέχρι σήμερα εξέλιξη της τεχνολογίας του υδρογόνου ως καυσίμου και μπορεί να αποτελέσει μια αρχή για επόμενες εργασίες πιο εφαρμοσμένες. Ελπίζω στο μέλλον να γίνει εφικτή μια πειραματική διάταξη παραγωγής υδρογόνου στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε του ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ που θα οδηγήσει στην πρωτοπορεία ανάμεσα στα ερευνητικά κέντρα και τους φορείς σχετικούς με το θέμα.

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον Επιβλέποντα Παν/κό Υπότροφο κ.Βούρο Α., υπεύθυνο καθηγητή μου, για τις πολύτιμες συμβουλές του και την αμέριστη συμπαράστασή του κατά την διεξαγωγή της παρούσας εργασίας. Τον ευχαριστώ για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υπομονή και στήριξη που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας αλλά και συνολικά κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

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

Ο σπουδαστής
(Ονοματεπώνυμο)

.....

Υπογραφή

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη του σχεδιασμού ενός συστήματος παραγωγής υδρογόνου σε κινητήρα εσωτερικής καύσης. Το σύστημα αναμένεται να έχει θετικά αποτελέσματα βελτιώνοντας την απόδοση του κινητήρα αλλά ταυτόχρονα να έχει και ευεργετικές συνέπειες στην ατμόσφαιρα με μειωμένες εκπομπές ρύπων.

Πιο αναλυτικά η δομή της εργασίας υποδιαιρείται σε κεφάλαια ως ακολούθως:

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύονται εκτενώς τα χαρακτηριστικά του υδρογόνου και ειδικότερα οι φυσικές και οι χημικές του ιδιότητες, καθώς και οι θερμοφυσικές ιδιότητες του στοιχείου. Αναλύονται οι τεχνικές παραγωγής υδρογόνου και δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στην ηλεκτρόλυση του νερού που μπορεί να αποδώσει καθαρό υδρογόνο έτοιμο προς χρήση ως ενεργειακό καύσιμο. Περιγράφονται επίσης τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης του υδρογόνου ως καύσιμο καθώς και μέτρα ασφαλείας σε περιπτώσεις διαρροής ή έκρηξης. Τέλος συζητώνται τρόποι αποθήκευσης του υδρογόνου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο μελετώνται οι κυψέλες καυσίμου (υδρογόνου), δίνεται ο τρόπος λειτουργίας τους καθώς και οι διάφοροι τύποι ενώ επιχειρείται και μια σύγκριση ανάμεσα στους πιο χρησιμοποιούμενους τύπους. Αναφέρονται επίσης ενδεικτικές εφαρμογές των fuelcells σε κινητήρες σε γεννήτριες ισχύος και σε άλλες εφαρμογές.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική αναφορά στις τεχνολογίες ΜΕΚ ως βάση για την περαιτέρω εξέλιξη των κινητήρων με καύσιμο το υδρογόνο. Συζητούνται επιγραμματικά τα βασικά τους χαρακτηριστικά γνωρίσματα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται τα χαρακτηριστικά του υδρογόνου ως καύσιμο στις ΜΕΚ καθώς και η επίδραση του καυσίμου στα επιμέρους τμήματα του κινητήρα. Αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της εισαγωγής του υδρογόνου ως καύσιμο στους κινητήρες ΜΕΚ. Πιο αναλυτικά περιγράφονται τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού και λειτουργίας των ΜΕΚ υδρογόνου καθώς επίσης τα φαινόμενα ανώμαλης καύσης και οι μηχανισμοί πρόληψης και αντιμετώπισης της ανάφλεξης εισαγωγής.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται οι νέοι τρόποι παραγωγής υδρογόνου από ΑΠΕ και ο τρόπος συμβολής τους στην παραγωγή υδρογόνου.

Τέλος στο έκτο κεφάλαιο καταγράφονται τα πρωτότυπα μοντέλα της αυτοκινητοβιομηχανίας που χρησιμοποιούν το υδρογόνο ως καύσιμο και η πρόοδος που έχει σημειωθεί από πλευράς τεχνολογίας στον τομέα του υδρογόνου ως καύσιμο.

Εισαγωγή

Το υδρογόνο ήταν το πρώτο στοιχείο που σχηματίστηκε μετά το Big Bang και είναι ακόμα το πιο κοινό στοιχείο στο σύμπαν. Το υδρογόνο είναι ένα άχρωμο άοσμο άγευστο και μη τοξικό αέριο το οποίο υπάρχει άφθονο. Ως καύσιμο μπορεί να ανακτηθεί από το φυσικό αέριο, το μεθάνιο ή το πετρέλαιο. Το υδρογόνο μπορεί να χαρακτηριστεί σαν το απόλυτο καύσιμο, δεν έχει καθόλου αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Είναι το πιο απλό και ελαφρύτερο στοιχείο στο σύμπαν. Μια άλλη μέθοδος για να παραχθεί υδρογόνο είναι από τα βακτηρίδια και την άλγη. Τα κυανοβακτήρια, που είναι άφθονα στη Γη, είναι μονοκύτταροι οργανισμοί, παράγουν υδρογόνο μέσω της κανονικής μεταβολικής λειτουργίας τους. Τα κυανοβακτήρια μπορούν να αναπτυχθούν στον αέρα ή το νερό, και περιέχουν τα ένζυμα που απορροφούν το φως του ήλιου για την ενέργεια και τη διάσπαση των μορίων του νερού, παράγοντας κατά συνέπεια το υδρογόνο. Δεδομένου ότι το κυανοβακτήριο παίρνει το νερό και το αποσυνθέτουν σε υδρογόνο, τα απόβλητα τους που είναι περισσότερο νερό, γίνεται τροφή για τον επόμενο μεταβολισμό.

Το υδρογόνο που παράγεται με τη βοήθεια ανανεώσιμων ενεργειακών πηγών παρέχει μια καθαρή και άφθονη πηγή ενέργειας, ικανή για τις περισσότερες από τις μελλοντικές υψηλές ανάγκες ενέργειας. Όταν το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως πηγή ενέργειας σε μια κυψέλη καυσίμων, η μόνη εκπομπή που δημιουργείται είναι το νερό, το οποίο μπορεί έπειτα να ηλεκτρολυθεί για να κάνει περισσότερο υδρογόνο - τα απόβλητα δηλαδή προμηθεύουν περισσότερα καύσιμα. Αυτός ο συνεχής κύκλος ενεργειακής παραγωγής έχει τη δυνατότητα αντικατάστασης των παραδοσιακών πηγών ενέργειας με κάθε ικανότητα, έτσι δεν θα επιμολλύνεται και το περιβάλλον από περισσότερες νεκρές μπαταρίες ή από μηχανές εσωτερικής καύσης (βενζίνης, πετρελαίου). Το μόνο μειονέκτημα είναι ότι το υδρογόνο είναι ακόμα ακριβότερο από τις άλλες πηγές ενέργειας όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Οι ερευνητές τα τελευταία χρόνια έχουν ενσκήψει σε μια προσπάθεια ανάπτυξης εκείνων των τεχνολογιών που θα οδηγήσουν στην παραγωγή υδρογόνου σε μαζικές ποσότητες και με φτηνότερες τιμές, προκειμένου να ανταγωνιστούν τις τεχνολογίες παραδοσιακών πηγών ενέργειας.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης

Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155

ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

1 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

1.1 Φυσικά χαρακτηριστικά του Υδρογόνου.

Το υδρογόνο (H_2) σε θερμοκρασία δωματίου, βρίσκεται σε αέρια φάση και είναι το ελαφρύτερο στοιχείο του Περιοδικού Πίνακα καθώς το άτομό του αποτελείται από ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο, και η μάζα 1 L υδρογόνου είναι μόλις 0.09g. Το υδρογόνο υπάρχει σχεδόν παντού, αλλά δυστυχώς είναι δύσκολο να βρεθεί στη φύση ως ξεχωριστό στοιχείο, αντί αυτού συνδέεται με χημικό δεσμό με το οξυγόνο στο νερό και με τον άνθρακα σε υδρογονάνθρακες. Το υδρογόνο που υφίσταται δεσμευμένο στο νερό και σε οργανικές ενώσεις αποτελεί περισσότερο από το 70% της γήινης επιφάνειας [1]. Έτσι το υδρογόνο βρίσκεται σε αφθονία στο σύμπαν, αφού εμπεριέχεται στα κύτταρα, στην κερατίνη, στα ένζυμα που συντελούν στην πέψη, στα μόρια του DNA, ενώ βρίσκεται άφθονο στις τροφές υπό τη μορφή λιπών, πρωτεϊνών και υδρογονανθράκων.

Αυτό το άχρωμο, άοσμο, και άγευστο χημικό στοιχείο αποτελεί μία χρήσιμη "πρώτη ύλη" για ποικίλες βιομηχανικές δραστηριότητες και ένα σημαντικότερο καύσιμο που επαρκεί να τροφοδοτήσει το σύνολο των δραστηριοτήτων της κοινωνίας, από τις ανάγκες για ηλεκτρικό στα σπίτια, στις επιχειρήσεις, στη βιομηχανία ακόμα και ως καύσιμο στις μεταφορές.

1.2 Το υδρογόνο ως «καθαρό» καύσιμο.

Το υδρογόνο, εκτός του ότι είναι ένα πολύ χρήσιμο αντιδραστήριο για την παραγωγή πολλών χημικών ουσιών, είναι επίσης το πιο καθαρό και φιλικό καύσιμο προς το περιβάλλον, το οποίο κατά την καύση του παράγει νερό, αντί των αερίων του θερμοκηπίου, και διαθέτει υψηλή ενεργειακή απόδοση (θερμογόνο δύναμη ή θερμογόνο ισχύ) της τάξης των 142 MJ/kg, το οποίο είναι 2.75 φορές μεγαλύτερη από εκείνη των καυσίμων που προέρχονται από υδρογονάνθρακες. Το υδρογόνο θεωρείται πράγματι ένα βιώσιμο πιθανό εναλλακτικό καύσιμο και ο ενεργειακός φορέας του μέλλοντος [2].

Το υδρογόνο αποτελεί έναν υψηλής ποιότητας δευτερεύοντα ενεργειακό φορέα και δεν πρέπει να θεωρείται ως πρωτογενής πηγή ενέργειας. Αυτή η θεώρηση γίνεται κατά βάση λόγω του ότι το υδρογόνο δεν βρίσκεται απομονωμένο στη φύση αλλά μπορεί να εξαχθεί από τις ενώσεις του. Επομένως, πρέπει να παραχθεί από μία άλλη πρώτη ύλη, γεγονός που θέτει προκλήσεις και πολυπλοκότητα, αλλά συγχρόνως προσφέρει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ένα διαφοροποιημένο ενεργειακό μίγμα που θα μειώσει την εξάρτηση από τις εισαγωγές πετρελαίου, θα μειώσει τις εκπομπές αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και θα αποτελεί ένα βιώσιμο ενεργειακό σύστημα [3].

Σήμερα, το υδρογόνο συναντάται σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών εφαρμογών, μεταξύ των οποίων είναι η χρήση του ως πρώτη ύλη για την παραγωγή των χημικών ουσιών, υδρογόνωση των λιπιδίων και ελαίων στη βιομηχανία τροφίμων, παραγωγή ηλεκτρονικών συσκευών, επεξεργασία του χάλυβα, καθώς και για αποθείωση και εκ νέου διαμόρφωση της βενζίνης στα διυλιστήρια [2]. Επιπλέον, χρησιμοποιείται στο διαστημικό πρόγραμμα της NASA, ως καύσιμο για τα διαστημικά λεωφορεία και σε κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούμενες από μεμβράνες τροφοδοτούμενες με υδρογόνο, θεωρούνται ο καλύτερος μηχανισμός που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας σε οχήματα. Δηλαδή το υδρογόνο δίνει τη δυνατότητα αντικατάστασης της βενζίνης και του ντίζελ σε κινητήρες εσωτερικής καύσης [4]. Σύμφωνα με το Εθνικό Πρόγραμμα Υδρογόνου των Ηνωμένων Πολιτειών, η συμβολή του υδρογόνου στη συνολική ενεργειακή αγορά αναμένεται να είναι 8-10% μέχρι το 2025 [5].

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα το υδρογόνο έχει την υψηλότερη ενεργειακή απόδοση ανά μονάδα βάρους, από όλα τα καύσιμα. Συγκεκριμένα 1 kg υδρογόνου περιέχει την ίδια ποσότητα ενέργειας με 2.1 kg φυσικού αερίου ή 2.8 kg βενζίνης (120.7 MJ/kg). Εντούτοις, αν και το υδρογόνο αναμένεται να παίξει μεν ένα σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια οικονομία της ενέργειας, μέχρι σήμερα αυτός ο ρόλος περιορίζεται σχεδόν μόνο στη χημική βιομηχανία (σύνθεση χημικών προϊόντων, βιομηχανία γυαλιού, τροφίμων κλπ.) και σπάνια χρησιμοποιείται ως καύσιμο. Αυτό συμβαίνει αφενός γιατί δεν υπάρχει η υποδομή για ευρεία χρήση του και αφετέρου γιατί υπάρχει μια «προκατάληψη» ότι το υδρογόνο είναι επικίνδυνο κατά τη χρήση του, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η κατά το δυνατό χρήση του.

Αποδεικνύεται όμως ότι αν το υδρογόνο συγκρινόμενο με τη βενζίνη σε περίπτωση διαρροής και ανάφλεξης, είναι περισσότερο ασφαλές, καθώς ως ελαφρύτερο από τον αέρα, ανεβαίνει και διασκορπίζεται στην ατμόσφαιρα καιγόμενο προς τα πάνω, ενώ η βενζίνη ως υγρό καίγεται στο σημείο διαρροής αποδίδοντας δηλητηριώδεις αναθυμιάσεις (CO₂, CO κλπ.).

Παρόλο που σε υγρή κατάσταση (-253 βαθμούς °C) το υδρογόνο χρησιμοποιείται σήμερα ως καύσιμο πυραύλων, η αέρια μορφή του δεν χρησιμοποιείται, αλλά υπάρχει ελπίδα ότι ίσως γίνει το νούμερο ένα καύσιμο του 21ου αιώνα. Όταν καίγεται με τον ατμοσφαιρικό αέρα, ο οποίος αποτελείται περίπου από 68% άζωτο, παράγονται επίσης πολύ μικρές ποσότητες οξειδίων του αζώτου. Εξαιτίας της καθαρής καύσης του δε συμβάλει στη μόλυνση του περιβάλλοντος. Το ποσό του νερού που παράγεται κατά την καύση του είναι τέτοιο ώστε να θεωρείται επίσης αμελητέο και μη ικανό να επιφέρει κάποια κλιματική αλλαγή.

Το υδρογόνο είναι πιο ακίνδυνο από τη βενζίνη, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο καθώς είναι λιγότερο εύφλεκτο σε απουσία αέρα με θερμοκρασία ανάφλεξης τους 585 °C (έναντι 480 °C της βενζίνης). Μπορεί κατά αυτή την έννοια το υδρογόνο θα μπορούσε με μεγάλη ασφάλεια να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε κινητήρα αυτοκινήτου, πετυχαίνοντας οφέλη, τόσο στην οικονομία του καυσίμου όσο και στην μείωση των ρύπων προς το περιβάλλον [6]. Για όλους τους λόγους που προαναφέρθηκαν, το υδρογόνο μπορεί να θεωρηθεί ένα πολύ υποσχόμενο καύσιμο του μέλλοντος με ποικίλες εφαρμογές, συμβάλλοντας στην οικονομική ανάπτυξη της χώρας.

1.3 Φυσικές Ιδιότητες του Υδρογόνου.

Όπως συμβαίνει με τα μόρια των περισσοτέρων αερίων, το μόριο του αερίου υδρογόνου είναι όπως έχουμε πει διατομικό. Υπό ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, το υδρογόνο ως αέριο είναι πολύ ελαφρύτερο από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Συγκεκριμένα, σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (Κ.Σ.), δηλαδή πίεση 1 atm (101.325 kPa) και θερμοκρασία 0 °C (273.15 K), το υδρογόνο έχει πυκνότητα 0.0899 kgm⁻³, δηλαδή περίπου δέκα φορές μικρότερη από αυτήν του αέρα.

Για το λόγο αυτό και σε συνδυασμό με την πολύ μικρή μάζα του μορίου του, το υδρογόνο διαφεύγει πολύ εύκολα από το βαρυντικό πεδίο της γης και έτσι βρίσκεται σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις στην ατμόσφαιρα αυτής. Με εξαίρεση το αέριο He, το αέριο υδρογόνο

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

έχει το χαμηλότερο σημείο βρασμού (20K σε P = 1atm) και το χαμηλότερο σημείο πήξεως (14 K σε P = 1atm) από όλα τα υπόλοιπα αέρια.

Όταν η θερμοκρασία του αέριου υδρογόνου κατεβεί κάτω από τους 20,268K σε Κ.Σ., αυτό αρχίζει να υγροποιείται, περνώντας σταδιακά από την αέρια στην υγρή του φάση. Το υγρό υδρογόνο σε μικρές ποσότητες είναι άχρωμο, αλλά όταν μελετάται σε λεπτά δείγματα παίρνει ένα ανοιχτό μπλε. Με συνεχή μείωση της θερμοκρασίας του σε Κ.Σ. πίεσης (P= 1atm), το υγρό υδρογόνο τελικά στερεοποιείται στους 14,025 βαθμούς Κ. Το στερεό υδρογόνο σαν υλικό, είναι κι αυτό άχρωμο όπως και το υγρό υδρογόνο.

Στη φύση, το υδρογόνο συναντιέται με τρία διαφορετικά ισότοπα ατόμου του μορίου του. Το ισότοπο που αποτελεί το 99,98% της συνολικής του ποσότητας σ' αυτήν, ονομάζεται πρώτιο (^1H) και αποτελείται από ένα πρωτόνιο και από ένα ηλεκτρόνιο. Σε ποσοστό 0,02% συναντούμε επίσης στη φύση ένα δεύτερο ισότοπο του υδρογόνου, το δευτέριο (^2H), το οποίο αποτελείται από ένα πρωτόνιο, ένα νετρόνιο και ένα ηλεκτρόνιο. Το δευτέριο χρησιμοποιείται σήμερα στις περισσότερες από τις εργαστηριακές εφαρμογές του υδρογόνου. Το τρίτο, κατά φθίνουσα σειρά ποσότητας, αέριο ισότοπο του υδρογόνου στη φύση, είναι το λεγόμενο τρίτιο (^3H), το οποίο αποτελείται από ένα πρωτόνιο, δύο νετρόνια και ένα ηλεκτρόνιο. Το τρίτιο βρίσκεται σε αναλογία στη φύση με τα υπόλοιπα άτομα του υδρογόνου σε έναν συντελεστή της τάξης των 1/10000 άτομα υδρογόνου και είναι ραδιενεργό, με χρόνο ημίσειας ζωής που προσεγγίζει τα 12,4 χρόνια περίπου. Μέχρι σήμερα, εκτός των τριών παραπάνω ισωτόπων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, έχει γίνει δυνατό να παραχθούν σε εργαστηριακή κλίμακα μερικά άλλα ισότοπα του υδρογόνου, τα οποία περιλαμβάνουν μέχρι και 6 νετρόνια στον πυρήνα του ατόμου τους [7].

1.4 Χημικές Ιδιότητες του Υδρογόνου.

Το γεγονός ότι το υδρογόνο σε ελεύθερη αέρια κατάσταση δεν αντιδρά συνήθως με άλλα στοιχεία ή χημικές ενώσεις, οφείλεται κυρίως στην σταθερότητα του χημικού δεσμού μεταξύ των ατόμων των μορίων του, ο οποίος είναι τόσο σταθερός, ώστε να μην επιτρέπει στα μόρια αυτού να διασπαστούν και να αντιδράσουν σαν μεμονωμένα άτομα. Από την άλλη μεριά, όταν το μοριακό υδρογόνο θερμαίνεται πάνω από φλόγα, αντιδρά σε συνθήκες περιβάλλοντος βίαια με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα και δίνει σαν παράγωγα νερό και θερμότητα σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



Από την αντίδραση αυτή, η οποία αποτελεί την αντίδραση οξείδωσης του υδρογόνου με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο, παράγεται, ταυτόχρονα με το νερό και θερμότητα (εξώθερμη αντίδραση). Η θερμότητα αυτή ισούται περίπου με 285.83kJ/mol παραγόμενου H_2O . Οι δεσμοί που σχηματίζουν τα άτομα μέσα στο μόριο του υδρογόνου είναι ομοιοπολικής φύσης και χαρακτηρίζονται, από μεγάλη σταθερότητα. Το ίδιο, όσον αφορά την ομοιοπολική τους φύση, ισχύει και για τους δεσμούς που σχηματίζονται μεταξύ των ατόμων του υδρογόνου και μεταξύ των ατόμων άλλων στοιχείων μέσα στις διάφορες χημικές ενώσεις. Κάτι τέτοιο συμβαίνει για παράδειγμα μεταξύ των ατόμων του μορίου του H_2O , στο οποίο τα δύο άτομα H που περιέχει ενώνονται με το ένα και μοναδικό άτομο του O μέσω ομοιοπολικών δεσμών (H-O-H).

Επίσης το ίδιο παρατηρείται και στο μόριο του μεθανίου (CH_4) που σχηματίζεται κατά την ένωση του υδρογόνου με τον άνθρακα, στο οποίο τα τέσσερα άτομα του H σχηματίζουν 4 ομοιοπολικούς δεσμούς με το μοναδικό άτομο του C. Ως προς την σταθερότητά τους, οι

ομοιοπολικοί δεσμοί που σχηματίζουν τα άτομα του υδρογόνου με τα άτομα άλλων στοιχείων μέσα στις διάφορες χημικές ενώσεις, δεν είναι πάντοτε πολύ ισχυροί και γι' αυτό συχνά διασπώνται σχετικά εύκολα. Κάτι τέτοιο παρατηρείται κατά κανόνα στην περίπτωση των ομοιοπολικών δεσμών που σχηματίζονται μεταξύ του υδρογόνου και διαφόρων άλλων ατόμων μέσα στα μόρια των οξέων. Έτσι, για παράδειγμα, στο μόριο του μεθανικού οξέως (CH_3COOH), το υδρογόνο σχηματίζει εξαιρετικά ασταθείς ομοιοπολικούς δεσμούς με τα άτομα του C και του O, με αποτέλεσμα όταν το μεθανικό οξύ διαλυθεί στο νερό, να διασπάται εύκολα σε αρνητικά και θετικά ιόντα (CH_3COO^- και H^+). Να αναφερθεί τέλος, ότι το υδρογόνο σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να σχηματίσει και δεσμούς ιοντικής φύσης με ορισμένα στοιχεία, κάτι που συμβαίνει για παράδειγμα κατά την αντίδρασή του με το χλώριο και τον σχηματισμό του HCl .

Μια τρίτη κατηγορία δεσμών που μπορεί να σχηματίσει το υδρογόνο με άτομα άλλων χημικών στοιχείων και η οποία συναντιέται μόνο σ' αυτό, είναι οι λεγόμενοι δεσμοί υδρογόνου (hydrogen bonds). Τα διάφορα άλλα χημικά στοιχεία με τα οποία το υδρογόνο μπορεί να σχηματίσει αυτούς τους δεσμούς υδρογόνου είναι τα: O, S, N, F και Cl.

Η ενέργεια του συγκεκριμένου δεσμού είναι σχετικά μικρή. Δεσμοί υδρογόνου σχηματίζονται επίσης και μεταξύ των διαφορετικών μορίων των χημικών ενώσεων που περιέχουν στο μόριό τους το υδρογόνο και κάποιο από τα παραπάνω στοιχεία. Χαρακτηριστικότερο γι' αυτό παράδειγμα, αποτελούν τα μόρια του H_2O σε χαμηλές θερμοκρασίες, τα οποία υπό τις συνθήκες αυτές ενώνονται μεταξύ τους μέσω δεσμών υδρογόνου σε συμπλέγματα μορίων H_2O . Ο δεσμός του υδρογόνου, σαν χημικός δεσμός, κατά το μεγαλύτερο του μέρος οφείλεται σε δυνάμεις Van Der Waals, ενώ κατά ένα μικρότερο ποσοστό έχουμε και συμμετοχή δυνάμεων καθαρά χημικού δεσμού [7].

1.5 Θερμοφυσικές Ιδιότητες του Υδρογόνου.

Οι ιδιότητες της ύλης που συνδέονται με τη μετάδοση της θερμότητας, συνήθως χαρακτηρίζονται σαν θερμοφυσικές ιδιότητες. Αυτές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς.

Στην πρώτη κατηγορία (θερμοδυναμικές ιδιότητες) συγκαταλέγονται ιδιότητες όπως η ειδική θερμοχωρητικότητα και η πυκνότητα, ενώ στη δεύτερη κατηγορία (ιδιότητες μεταφοράς) συμπεριλαμβάνεται ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k , που σχετίζεται άμεσα με την αγωγή θερμότητας και το κινηματικό ιξώδες ν που σχετίζεται με τη συναγωγή της θερμότητας.

Κάθε υλικό (απλό ή σύνθετο), χαρακτηρίζεται από διάφορες θερμοφυσικές φάσεις στο εσωτερικό της μάζας του. Γενικά, ως (θερμοφυσική) φάση, ορίζεται η ομογενής περιοχή της μάζας ενός υλικού, η οποία διαφέρει σε δομή ή σύσταση από κάποια άλλη γειτονική της περιοχή μέσα στη μάζα του. Σε κάθε σταθερό υλικό, κάτω από κατάλληλες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας και ανάλογα με τη μέθοδο που έχει ακολουθηθεί για την παρασκευή του, μπορούν να σχηματιστούν περισσότερες από μία ομογενείς περιοχές της μάζα του, δηλαδή περισσότερες από μία φάσεις του. Οι διαφορετικές αυτές φάσεις βρίσκονται πάντα σε ισορροπία μεταξύ τους, χωρίς να παρατηρούνται κάποιες αλλαγές στη σύστασή τους σε συνάρτηση με το χρόνο, δηλαδή αποτελούν καταστάσεις μακροσκοπικής σταθερότητας του υλικού.

Αναφορικά με το υδρογόνο, ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας στις οποίες βρίσκεται, μπορεί να υπάρξει σε τρεις διαφορετικές φάσεις (υγρή, αέρια και στερεή). Οι

φάσεις αυτές μπορούν να εμφανιστούν και ταυτόχρονα στη μάζα του σε θερμοδυναμική ισορροπία μεταξύ τους, ανάλογα πάλι με τις συνθήκες της πίεσης και της θερμοκρασίας.

Στην εικόνα 1, απεικονίζεται προσεγγιστικά το διάγραμμα σχηματισμού των διαφόρων φάσεων που μπορούν να υπάρξουν σε θερμοδυναμική ισορροπία μεταξύ τους μέσα στη μάζα μιας ορισμένης ποσότητας υδρογόνου, όταν η πίεση και η θερμοκρασία αυτού μεταβάλλονται:

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι τόσο η στερεά όσο και η υγρή και η αέρια φάση του υδρογόνου χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες περιοχές πίεσης και θερμοκρασίας πάνω στο διάγραμμα. Οι τρεις αυτές φάσεις οριοθετούνται από τρεις αντίστοιχες καμπύλες (τις a, b και c στο σχήμα), οι οποίες παριστάνουν η καθεμία τους ισόχωρη μεταβολή. Πάνω σε κάθε μία από αυτές τις καμπύλες, το υδρογόνο συνυπάρχει ως μίγμα δύο φάσεών του, οι οποίες χαρακτηρίζουν και τις περιοχές εκτός της εκάστοτε καμπύλης. Η συγκεκριμένη κατάσταση παραμένει αμετάβλητη σε όλο το μήκος κάθε καμπύλης. Στις περιοχές που βρίσκονται εκτός των τριών καμπυλών του παραπάνω διαγράμματος, το υδρογόνο χαρακτηρίζεται από μία και μοναδική φάση (μονοφασικές περιοχές του διαγράμματος) και μόνο σε ένα και μοναδικό σημείο του διαγράμματος, στο οποίο οι τρεις καμπύλες συναντιούνται μεταξύ τους, μπορεί να συνυπάρξει και με τις τρεις διαφορετικές του φάσεις.

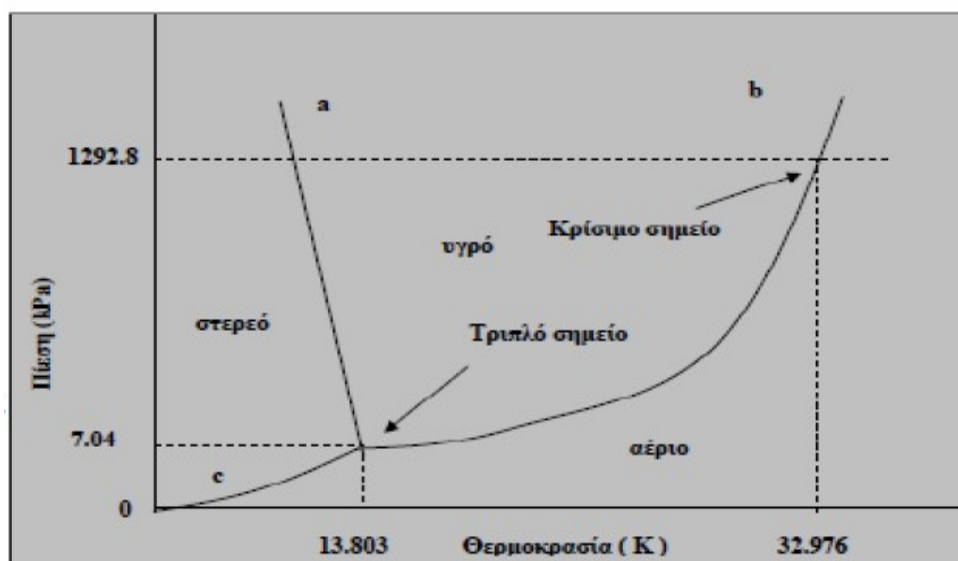
Οι τρεις διαφορετικές καμπύλες μεταβολής που οριοθετούν τις τρεις μονοφασικές περιοχές του υδρογόνου στο παραπάνω διάγραμμα έχουν την εξής ονομασία:

- **Καμπύλη a:** Ονομάζεται καμπύλη τήξης και το υδρογόνο βρίσκεται πάνω σ' αυτή με την μορφή διφασικού διαλύματος στερεής και υγρής φάσης.
- **Καμπύλη b:** Ονομάζεται καμπύλη εξάτμισης και το υδρογόνο βρίσκεται πάνω σ' αυτή με την μορφή διφασικού διαλύματος αέριας και υγρής φάσης.
- **Καμπύλη c:** Ονομάζεται καμπύλη εξάχνωσης και το υδρογόνο βρίσκεται πάνω σ' αυτή με τη μορφή διφασικού διαλύματος στερεής και αέριας φάσης.

Στο ένα και μοναδικό σημείο στο οποίο οι παραπάνω καμπύλες συναντιούνται μεταξύ τους, το υδρογόνο, υπάρχει ως μίγμα και των τριών του φάσεών, δηλαδή της αέριας της στερεής και της υγρής του φάσης. Το μοναδικό αυτό σημείο ονομάζεται και τριπλό σημείο και χαρακτηρίζεται από θερμοκρασία $T = 13.803\text{K}$ και πίεση $P = 7.04\text{ kPa}$, όπως απεικονίζεται και στο παρακάτω διάγραμμα.

Στο τριπλό σημείο, καμιά από τις θερμοδυναμικές μεταβλητές (πίεση ή θερμοκρασία) του τριφασικού μίγματος του υδρογόνου δεν μπορεί να μεταβληθεί ανεξάρτητα η μία από την άλλη, έτσι ώστε οι τρεις φάσεις του να συνεχίσουν να συνυπάρχουν σε ισορροπία μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει, ότι στη μάζα μιας οποιασδήποτε ποσότητας υδρογόνου δεν μπορεί να υπάρξει κάποια θερμοδυναμική κατάσταση, πέραν του τριπλού σημείου, στην οποία το υδρογόνο να συνυπάρξει ως μίγμα και των τριών του θερμοφυσικών φάσεων.

Ένα άλλο σημαντικό σημείο που χαρακτηρίζει το διάγραμμα πίεσης, θερμοκρασίας και μεταβολής των φάσεων του υδρογόνου που απεικονίζεται στο σχήμα 1, είναι και το λεγόμενο κρίσιμο σημείο. Το κρίσιμο σημείο αντιπροσωπεύει για το υδρογόνο τη χαμηλότερη τιμή πίεσης και θερμοκρασίας στην οποία μπορούν να συνυπάρξουν σε ισορροπία μεταξύ τους δύο συγκεκριμένες φάσεις του: η υγρή και η αέρια φάση. Το συγκεκριμένο σημείο έχει σαν θερμοδυναμικές τιμές: Θερμοκρασία: $T = 32.976\text{ K}$ και Πίεση: $P = 1292.8\text{ kPa}$.



Εικόνα 1: Διάγραμμα πίεσης, θερμοκρασίας και διαφορετικών θερμοφυσικών φάσεων σε ισορροπία για το υδρογόνο [8].

Για υψηλότερες τιμές πίεσης και θερμοκρασίας από αυτές που επικρατούν στο κρίσιμο σημείο του υδρογόνου, η αλλαγή φάσης στο εσωτερικό της μάζας του δεν μπορεί να γίνει πλέον διακριτή, οπότε μιλάμε για την περιοχή του όπου αυτό υπάρχει σαν «καθαρό ρευστό» (υγρό ή αέριο, ανάλογα με τις τιμές της πίεσης και της θερμοκρασίας που επικρατούν στη μάζα του).

Με το κρίσιμο σημείο ολοκληρώνεται η εξέταση του διαγράμματος πίεσης, θερμοκρασίας και μεταβολής των φάσεων του υδρογόνου. Στην συνέχεια θα ακολουθήσουν τέσσερις πίνακες με τα σημαντικότερα μεγέθη που χαρακτηρίζουν την θερμοφυσική συμπεριφορά του υδρογόνου, ξεκινώντας από τις τιμές τους για κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (Κ.Σ.Π.Θ.: $P = 101.325 \text{ kPa}$ ή 14.7 psi και $T = 273.15 \text{ K}$ ή $-160.426 \text{ }^\circ\text{F}$) και συνεχίζοντας ισόογκα, μειώνοντας διαδοχικά τις τιμές της πίεσης και της θερμοκρασίας, μέχρι το τριπλό σημείο του υδρογόνου, δηλαδή μέχρι το σημείο στο οποίο υφίσταται σαν τριφασικό διάλυμα (αέριο, υγρό και στερεό).

Στους παρακάτω πίνακες, οι μονάδες των μεγεθών είναι υπολογισμένες στο Διεθνές Συστήματα Μονάδων (S.I.) και στο Αγγλοσαξονικό Σύστημα Μονάδων. Τα στοιχεία των πινάκων προέρχονται από τους Κανονισμούς Ασφαλείας για το υδρογόνο και τα συστήματα του υδρογόνου που πιστοποιήθηκαν από τη NASA για το έτος 2005 [9].

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικές Ιδιότητες του Υδρογόνου σε Κανονικές Συνθήκες Πίεσης & Θερμοκρασίας

Ιδιότητα	Ευρωπαϊκές μονάδες μέτρησης	Αγγλοσαξονικές μονάδες μέτρησης
Πυκνότητα αέριου H ₂ , ρ σε Κ.Σ.Π.Θ.	83.764 g/m ³	0.00523 lbm/ft ³
Πυκνότητα αέρα σε Κ.Σ.Π.Θ. (προς σύγκριση)	1.198 g/m ³	0.0749 lbm/ft ³
Ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση, C _p	14.89 kJ/kgK	3.559 Btu/lbm°R
Συντελεστής ενεργότητας, Y = C _p /C _v	1.383	1.383
Ενθαλπία, H	4097.7 kJ/kg	1762.8 Btu/lbm
Εσωτερική ενέργεια, U	2888.0 kJ/kg	1242.5 Btu/lbm
Εντροπία, S	64.44 kJ/kgK	15.40 Btu/lbm°R
Ταχύτητα του ήχου, ω (αδιαβατικά)	1294 m/s	4246 ft/s
Ιξώδες, η	8.81 μPa·s	0.00881 centipoise
Θερμική αγωγιμότητα, k	19.14 mW/mK	0.111 Btu/ft·h°R
Βαθμός διαμοριακού δυναμικού, ε		1.00026
Παράγοντας συμπίεσότητας, Z		1.0006

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικές Ιδιότητες του Υδρογόνου στο Κρίσιμο Σημείο.

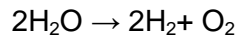
ΚΡΙΣΙΜΟ ΣΗΜΕΙΟ		
Ιδιότητα	Ευρωπαϊκές μονάδες μέτρησης	Αγγλοσαξονικές μονάδες μέτρησης
Θερμοκρασία, T	32.976 K	-400.6 °F
Πίεση, P	1.292.8 kPa	187.5 psia
Πυκνότητα, ρ	31.43 kg/m ³	1.96 lbm/ft ³
Ειδική θερμότητα κορεσμού, C		Πολύ μεγάλη
Ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση, C _p		Πολύ μεγάλη
Συντελεστής ενεργότητας, γ = C _p /C _v		Μεγάλη
Ενθαλπία, H	38.49 kJ/kg	16.56 Btu/lbm
Εσωτερική ενέργεια, U	2.83 kJ/kg	1.22 Btu/lbm
Εντροπία, S	17.6 kJ/kgK	4.20 Btu/lbm°R
Ταχύτητα του ήχου, ω (αδιαβατικά)	350 m/s	1148 ft/s
Ιξώδες, η	3.5 μPa·s	0.0035 centipoise
Θερμική αγωγιμότητα, k		Σχεδόν άπειρη
Βαθμός διαμοριακού δυναμικού, ε		1.098
Παράγοντας συμπίεσότητας, Z		0.3025

1.6 Μέθοδοι Παρασκευής Υδρογόνου.

Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι που οι επιστήμονες ερευνούν για την φθηνή παραγωγή υδρογόνου. Και οι τρεις ξεχωρίζουν το υδρογόνο από ένα "αέριο της πετροχημικής βιομηχανίας", όπως τα ορυκτά καύσιμα ή το νερό - αλλά με πολύ διαφορετικά μέσα [11].

Το υδρογόνο ανήκει στην ομάδα των δευτερογενών πηγών ενέργειας. Αποθηκεύει και απελευθερώνει ενέργεια σε χρησιμοποιήσιμη μορφή, ενώ παράγεται από ορυκτούς πόρους (όπως είναι ο άνθρακας και το φυσικό αέριο), από νερό και βιομάζα. Το υδρογόνο δεν υπάρχει

στη φύση με τη μορφή καθαρού αερίου. Οι εμπορικές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου είναι η αναμόρφωση υδρογονανθράκων με ατμό (κυρίως φυσικό αέριο), η μερική οξειδωση-αεριοποίηση βαρέων υδρογονανθράκων (πετρέλαιο) και η ηλεκτρόλυση του νερού.



Για την παραγωγή υδρογόνου από αναμόρφωση υδρογονανθράκων, καταναλώνεται περίπου το 20-30% του υδρογονάνθρακα και εκλύονται συνεπώς αέρια του θερμοκηπίου. Το πρόβλημα της ρύπανσης παραμένει και στην περίπτωση της ηλεκτρόλυσης, εφόσον η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από ορυκτά καύσιμα. Εάν όμως η ηλεκτρική ενέργεια έχει παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τότε κατά την παραγωγή του υδρογόνου εκλύονται μηδενικοί ρύποι.

Το υδρογόνο μπορεί στο μέλλον να αποτελέσει ένα καύσιμο φιλικό προς το περιβάλλον αλλά δεν υπάρχει στη φύση με τη μορφή καθαρού αερίου. Οι μέθοδοι παρασκευής υδρογόνου χωρίζονται σε 3 κύριες κατηγορίες, τις θερμοχημικές, τις ηλεκτρολυτικές και τις φωτολυτικές. Οι περισσότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή υδρογόνου περιλαμβάνουν τη διαδικασία της υδρόλυσης: (δηλαδή την γνωστή ηλεκτρόλυση).

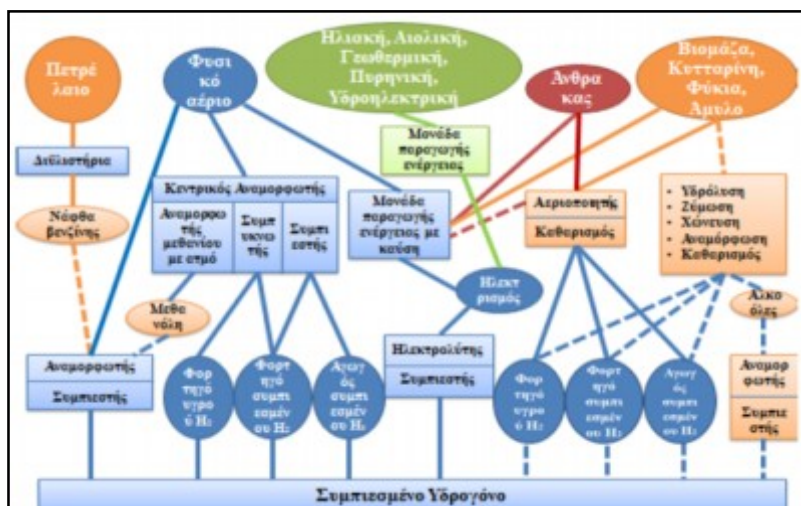
Σήμερα το υδρογόνο παράγεται κυρίως από φυσικό αέριο με την επίδραση υδρατμών, αλλά η πιο φιλική προς το περιβάλλον μέθοδος είναι η παραγωγή του από ηλεκτρόλυση του νερού. Ιδιαίτερη δε σημασία έχει το γεγονός ότι, εκτός από τη δυνατότητα καύσης του σε ηλεκτρογεννήτριες, το υδρογόνο μπορεί να "τροφοδοτήσει" τις κυψέλες καυσίμου, μια από τις σημαντικότερες ενεργειακές πηγές του μέλλοντος [12].

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από μία ποικιλία ευρέως διαθέσιμων πρώτων υλών συμπεριλαμβανομένων των διάφορων ορυκτών καυσίμων και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με χρήση διαφορετικών τεχνολογιών ανά περίπτωση [4]:

- Ορυκτά καύσιμα (αναμόρφωση του φυσικού αερίου, αεριοποίηση άνθρακα),
- Ανανεώσιμη και πυρηνική ενέργεια (διεργασίες αξιοποίησης της βιομάζας, φωτο-ηλεκτρόλυση, βιολογική παραγωγή, διάσπαση του νερού σε υψηλή θερμοκρασία),
- Ηλεκτρική ενέργεια (ηλεκτρόλυση του νερού μέσω της οποίας το νερό διαχωρίζεται στα μεμονωμένα στοιχεία του υδρογόνου και οξυγόνου) [10].

Κάθε μία από τις παραπάνω τεχνολογίες βρίσκεται σε ένα διαφορετικό στάδιο ανάπτυξης και κάθε μία διακρίνεται από τις διαφορετικές τεχνικοοικονομικές προκλήσεις. Η διαθεσιμότητα των πρώτων υλών, η ωριμότητα της τεχνολογίας, οι εφαρμογές και η ζήτηση της αγοράς, ο τρόπος διαχείρισης και το κόστος δύναται να επηρεάσουν την απόφαση για την βέλτιστη επιλογή τεχνολογίας για παραγωγή υδρογόνου. Στην εικόνα 2 παρουσιάζονται τα διάφορα μονοπάτια της παραγωγής υδρογόνου από μη ανανεώσιμες, αλλά και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [11].

Προφανώς, έμφαση δίνεται στους τρόπους παραγωγής υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές (όπως βιομάζα, ηλιακή, αιολική, γεωθερμική, υδροηλεκτρική, κλπ.), καθώς είναι ανεξάντλητες και φιλικές προς το περιβάλλον [11]. Οι τρόποι παραγωγής υδρογόνου, που φαίνεται ότι είναι οι περισσότερο αποδοτικοί, αναλύονται παρακάτω [4]:



Εικόνα 2: Παραγωγή Υδρογόνου από ανανεώσιμες και μη πηγές ενέργειας [11].

1.6.1 Παραγωγή Υδρογόνου από Ορυκτά Καύσιμα.

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από τα περισσότερα ορυκτά καύσιμα (π.χ. κάρβουνο, φυσικό αέριο, πετρέλαιο, κ.λπ.). Η πολυπλοκότητα των διεργασιών ποικίλλει. Δεδομένου ότι το διοξείδιο του άνθρακα παράγεται ως παραπροϊόν, το CO₂ πρέπει να συλλέγεται και να αποθηκεύεται προκειμένου να εξασφαλιστεί μια βιώσιμη (με μηδενικές εκπομπές) διεργασία. Η βιωσιμότητα της διεργασίας θα διαφέρει ανάλογα με το μέγεθος της κλίμακας, δηλαδή σε κεντρικές ή κατανεμημένες εγκαταστάσεις παραγωγής υδρογόνου.

1.6.2 Παραγωγή Υδρογόνου από το Φυσικό Αέριο/Υδρογονάνθρακες.

Έναντι των υπολοίπων ορυκτών καυσίμων, το φυσικό αέριο αποτελεί μία ιδανική, από οικονομική άποψη, πρώτη ύλη για την παραγωγή υδρογόνου, επειδή είναι ευρέως διαθέσιμο, είναι εύκολο να διαχειριστεί και έχει υψηλή αναλογία υδρογόνου-άνθρακα, η οποία ελαχιστοποιεί το σχηματισμό CO₂ ως παραπροϊόν. Το υδρογόνο σήμερα μπορεί να παραχθεί από το φυσικό αέριο χρησιμοποιώντας τις παρακάτω διεργασίες:

- Αναμόρφωση με ατμό (αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό, SMR)
- Μερική οξείδωση (CPO)
- Αυτόθερμη αναμόρφωση (ATR)

Η αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιημένη και λιγότερο δαπανηρή μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου και περιλαμβάνει την ενδόθερμη αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό προς παραγωγή αερίου σύνθεσης (μίγμα υδρογόνου και μονοξειδίου άνθρακα). Η διεργασία της μερικής οξείδωσης χρησιμοποιείται στα διωλιστήρια για τη μετατροπή των υδρογονάνθρακων παραπροϊόντων σε υδρογόνο, CO, CO₂ και νερό [12]. Η αυτόθερμη μετατροπή του μεθανίου σε H₂ πραγματοποιείται στους 850°C, όπου συνδυάζονται οι διεργασίες της μερικής οξείδωσης και της καταλυτικής αναμόρφωσης [13].

Ακόμα, οι μακροχρόνιες έρευνες των ειδικών - κυρίως της πετρελαιοβιομηχανίας - μας έχουν καταδείξει ότι η λιγότερο ακριβή μέθοδος εξαγωγής υδρογόνου είναι ο «**ανασηματισμός ατμού**» (**steam reforming**). Κατ' αυτόν, το φυσικό αέριο αντιδρά χημικά με ατμό και παράγει υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Το φυσικό αέριο έχει πολύ μεγαλύτερα αποθέματα στον πλανήτη, το χειρίζονται ήδη με δίκτυά τους οι πετρελαϊκές εταιρείες - εξ ου και η προθυμία τους να είναι χορηγοί των ερευνών για το υδρογόνο - και το διοξείδιο του άνθρακα είναι... το γνωστό αέριο που ευθύνεται για το φαινόμενο του

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

θερμοκηπίου! Οπότε; Οπότε προκύπτει και πάλι η πρόταση των περιβαλλοντολόγων για αξιοποίηση των ήπιων πηγών ενέργειας: υδροφράγματα, ηλιοσυσσωρευτές και ανεμογεννήτριες θα παράγουν την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για την ηλεκτρόλυση νερού, από την οποία ως γνωστόν εκλύονται υδρογόνο και οξυγόνο.

1.6.3 Παραγωγή Υδρογόνου από Άνθρακα.

Ο άνθρακας μπορεί επίσης να αναμορφωθεί για να παραχθεί υδρογόνο, μέσω ποικίλων διεργασιών αεριοποίησης (π.χ. σταθερής κλίνης, ρευστοστερεάς κλίνης κ.α.), [14]. Η συγκεκριμένη διεργασία εφαρμόζεται εμπορικά αλλά μπορεί να θεωρηθεί ανταγωνιστικότερη της αναμόρφωσης του μεθανίου μόνο σε περιπτώσεις όπου το φυσικό αέριο είναι ακριβό. Η αεριοποίηση του άνθρακα είναι μια διεργασία που μετατρέπει το στερεό άνθρακα σε ένα αέριο μίγμα που αποτελείται κυρίως από H_2 , CO , CO_2 και CH_4 . Ο άνθρακας μπορεί να αεριοποιηθεί με πολλούς τρόπους διαφοροποιώντας το μίγμα άνθρακα, οξυγόνου και ατμού μέσα στον αεριοποιητή [14]. Δεδομένου ότι αυτή η αντίδραση είναι ενδόθερμη, απαιτείται επιπλέον θερμότητα, όπως και με την αναμόρφωση του μεθανίου.

1.6.4 Παραγωγή Υδρογόνου από τη Διάσπαση του Νερού.

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από την διάσπαση του νερού μέσω διάφορων διεργασιών που εκτείνονται από την ηλεκτρόλυση του νερού, φωτο/ηλιακή-ηλεκτρόλυση, φωτο-βιολογική παραγωγή έως την διάσπαση του νερού σε υψηλή θερμοκρασία.

Ηλεκτρόλυση του νερού: Μια ελπιδοφόρος και ιστορική μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου είναι η ηλεκτρόλυση του νερού, μια ηλεκτροχημική διεργασία, η οποία περιλαμβάνει τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για τον διαχωρισμό του νερού στα συστατικά του, π.χ. σε υδρογόνο και οξυγόνο. Σήμερα, περίπου 4% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου παράγεται από την ηλεκτρόλυση του νερού [15]. Αυτή η διεργασία είναι ήδη οικονομικά αποδοτική για την παραγωγή καθαρού υδρογόνου σε μικρές ποσότητες, εντούτοις, εξακολουθεί να παραμένει ακριβή για εφαρμογές μεγαλύτερης κλίμακας, λόγω κυρίως της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι μέθοδοι ηλεκτρόλυσης του νερού αναφέρονται ως:

- Αλκαλική ηλεκτρόλυση,
- Ηλεκτρόλυση σε πολυμερικής μεμβράνης ηλεκτρολύτες (PEM),
- Ηλεκτρόλυση σε υψηλές θερμοκρασίες.

Υπάρχουν επίσης και ορισμένες άλλες επιλογές για παραγωγή υδρογόνου μέσω της διάσπασης του νερού, εντούτοις, οι τεχνικές αυτές απαιτούν περαιτέρω έρευνα & ανάπτυξη προκειμένου να εφαρμοστούν σε μεγάλα ή μικρής κλίμακας συστήματα παραγωγής υδρογόνου. Αυτές οι μέθοδοι διάσπασης του νερού συγκαταλέγονται στις:

- Φωτο-ηλεκτρόλυση (φωτόλυση)
- Φωτο-Βιολογική παραγωγή
- Θερμοχημική διάσπαση του νερού
- Υδρογόνο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ)

Περίπου το 95% του H_2 που χρησιμοποιείται σήμερα προέρχεται από αναμόρφωση του φυσικού αερίου. Το υπόλοιπο H_2 προέρχεται από ηλεκτρόλυση του νερού, κυρίως από ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται με την καύση ορυκτών καυσίμων. Για να γίνουν ορατά τα

πλεονεκτήματα από μια οικονομία υδρογόνου (σταθερότητα, μειωμένη ατμοσφαιρική ρύπανση και εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, ενεργειακή ασφάλεια) το H_2 πρέπει να παράγεται καθαρά, αποτελεσματικά, και οικονομικά αποδεκτά από τις υπάρχουσες τεχνολογίες ΑΠΕ.



Εικόνα 3: Παραγωγή Υδρογόνου από ΑΠΕ [16].

Η παραγωγή υδρογόνου από ΑΠΕ θεωρείται η περισσότερο ελπιδοφόρα μέθοδος, τουλάχιστον σε ότι αφορά την ρύπανση του περιβάλλοντος και την μη εξαντλησιμότητα των πηγών. Η παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές περιλαμβάνει τις παρακάτω μεθόδους [17].

- Παραγωγή υδρογόνου από αιολική ενέργεια μέσω ηλεκτρόλυσης,
- Βιολογική παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα (παραγωγή υδρογόνου από την μετατροπή διαλύματος γλυκόζης με την ενέργεια του φωτός).

Στη συνέχεια αναλύεται ευρύτερα η ηλεκτρόλυση ως μέθοδος παρασκευής του υδρογόνου αφού αποτελεί το βασικό κομμάτι κατά την παραγωγή του υδρογόνου για χρήση κύριο τρόπο ο παρόν κεφάλαιο, έμφαση θα δοθεί στους τρόπους παραγωγής υδρογόνου από ηλεκτρόλυση, καθώς αποτελεί σημαντικό μέρος της παρούσας εργασίας.

1.7 Παραγωγή Υδρογόνου μέσω Ηλεκτρόλυσης του Νερού.

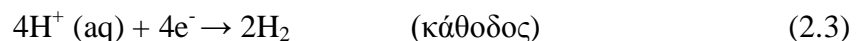
Υπάρχει μία και μοναδική μέθοδος παραγωγής του υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης και αυτή είναι από το νερό. Ως γνωστόν, το νερό κατά τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης διασπάται στα δύο στοιχεία που το αποτελούν, δηλαδή το υδρογόνο και το οξυγόνο. Η ηλεκτρόλυση του νερού, προς παραγωγή υδρογόνου, πραγματοποιείται μέσα σε ειδικές διατάξεις που ονομάζονται διατάξεις ηλεκτρόλυσης και απαιτεί την ταυτόχρονη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Το βασικό πλεονέκτημα που προκύπτει κατά την ηλεκτρόλυση του νερού προς παραγωγή υδρογόνου, είναι ότι το υδρογόνο που παράγεται χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα υψηλές τιμές «καθαρότητας» και επομένως δύναται να χρησιμοποιηθεί απευθείας σε κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, χωρίς περαιτέρω επεξεργασία. Η ηλεκτρόλυση του νερού, για την παραγωγή υδρογόνου, μέσω της χρησιμοποίησης του ηλεκτρικού ρεύματος που προέρχονταν από το κλασικό δίκτυο ηλεκτρισμού, σαν μέθοδος, βρήκε ευρεία απήχηση από τις αρχές του 1900 μέχρι και τη δεκαετία του 1950 περίπου. Μετά τη δεκαετία του '50 όμως, λόγω των

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

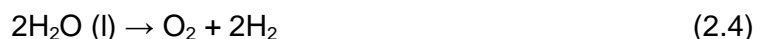
διαφόρων φθηνότερων μεθόδων που ανακαλύφθηκαν για την παραγωγή του υδρογόνου (κυρίως της καταλυτική αναμόρφωση φυσικού αερίου), η ηλεκτρόλυση του νερού εγκαταλείφθηκε στο μεγαλύτερο μέρος της, με αποτέλεσμα στις μέρες μας, μόνο ένα σχετικά μικρό ποσοστό της συνολικής ποσότητας του παραγόμενου υδρογόνου σε παγκόσμια κλίμακα να παράγεται πλέον με αυτόν τον τρόπο. Η εφαρμογή της ηλεκτρόλυσης του νερού προς παραγωγή του υδρογόνου εφαρμόζεται σήμερα κυρίως όταν υπάρχουν αυξημένες απαιτήσεις σε «καθαρό» υδρογόνο και οι ποσότητες αυτού που απαιτούνται δεν είναι πολύ μεγάλες.

Από την άλλη μεριά, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σταδιακά μια σταδιακή αύξηση του παγκόσμιου ενδιαφέροντος για την παραγωγή του υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού, κυρίως εξαιτίας της σύγχρονης δυνατότητας κατασκευής ολοκληρωμένων συστημάτων από ηλεκτρολυτικές διατάξεις νερού, οι οποίες λειτουργούν μέσω της παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος με τη βοήθεια διαφόρων ΑΠΕ (κυρίως της ηλιακής και αιολικής ενέργειας). Τα ολοκληρωμένα αυτά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω διαφόρων ΑΠΕ παρουσιάζουν το σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τα παραδοσιακά ηλεκτρολυτικά συστήματα, ότι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν παράγεται χωρίς κάποιο σημαντικό κόστος, μιας και βασίζεται όπως είπαμε στην παραγωγή της από διάφορες ΑΠΕ. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η εφαρμογή τους για την μαζική παραγωγή του υδρογόνου να γίνεται πολύ φθηνότερα από την κλασσική μέθοδο παραγωγής του υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης (παραγωγή με χρησιμοποίηση της συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου) και να εφαρμόζεται σταδιακά όλο και περισσότερο. Από την άλλη μεριά βέβαια, το κόστος κυρίως των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αυτών των ολοκληρωμένων ηλεκτρολυτικών συστημάτων παραγωγής υδρογόνου μέσω ΑΠΕ, είναι προς το παρόν ακόμα αρκετά υψηλό ώστε η παραγωγή αυτού μέσω των συγκεκριμένων διατάξεων να μπορεί να υποσκελίσει τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής του μέσω π.χ. των ορυκτών καυσίμων, με αποτέλεσμα η παραγωγή υδρογόνου μέσω ολοκληρωμένων ηλεκτρολυτικών διατάξεων να μην χρησιμοποιείται τόσο μαζικά όσο αυτές.

Κατά την ηλεκτρόλυσή του νερού, μέσα σε μία ηλεκτρολυτική διάταξη, προς παραγωγή υδρογόνου, αυτό οξειδώνεται αρχικά στην άνοδο της διάταξης σε μοριακό οξυγόνο και σε θετικά ιόντα υδρογόνου (ή πρωτόνια υδρογόνου, H⁺). Στη συνέχεια, τα πρωτόνια υδρογόνου που έχουν προκύψει, διέρχονται διαμέσου του νερού, που βρίσκεται μέσα στην ηλεκτρολυτική διάταξη, προς την κάθοδο αυτής και εκεί ανάγονται σε μοριακό υδρογόνο. Οι συγκεκριμένες διεργασίες παριστάνονται με αντιδράσεις ως εξής



Η συνολική αντίδραση ηλεκτρόλυσης του νερού τότε έχει ως εξής:



Το οξυγόνο που παράγεται κατά τη διαδικασία ηλεκτρόλυσης του νερού από ηλεκτρολυτικές διατάξεις, μπορεί και αυτό, όπως και το υδρογόνο, να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω σε διάφορες εφαρμογές, οι οποίες όμως είναι κυρίως βιομηχανικού τύπου.

Αποδεικνύεται θεωρητικά, ότι η παραγωγή του υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού, απαιτεί ηλεκτρική τάση η οποία ισούται με 1,23 V [17]. Στην πράξη όμως, η ηλεκτρική τάση που συνήθως εφαρμόζεται γι' αυτόν το σκοπό είναι κατά τι μεγαλύτερη (μεταξύ 1.55 V και 1.65 V). Η αυξημένη αυτή τιμή της, οφείλεται κυρίως στις διάφορες απώλειες που υφίσταται το ηλεκτρικό ρεύμα (απώλειες θερμότητας και ηλεκτρομαγνητικού πεδίου) όταν διοχετεύεται μέσα στις ηλεκτρολυτικές διατάξεις. Η απόδοση παραγωγής υδρογόνου μέσω της

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

ηλεκτρόλυσης του νερού, ορίζεται από τον λόγο της τάσης των 1.23 V η οποία απαιτείται θεωρητικά για την παραγωγή του, προς την ηλεκτρική τάση την οποία εφαρμόζουμε κάθε φορά στη πράξη γι' αυτό. Για παράδειγμα, με πρακτικά εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση ίση με 1.60 V, θα έχουμε απόδοση παραγωγής υδρογόνου 77%.

Κατά αυτή την έννοια, προκύπτει ότι από ενεργειακής άποψης η παραγωγή υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού, συνοδεύεται από αρκετά υψηλή απόδοση, σε σχέση και με τα διάφορα ορυκτά καύσιμα των οποίων η απόδοση δεν υπερβαίνει το 60% συνήθως.

1.8 Παραγωγή Υδρογόνου μέσω Φωτολυτικών μεθόδων.

Μια άλλη κατηγορία μεθόδων παραγωγής του υδρογόνου, βασίζεται στην παραγωγή αυτού μέσω της διαδικασίας της φωτόλυσης. Ο ένας τρόπος για να επιτευχθεί αυτό, είναι να αξιοποιηθεί η ιδιότητα που εμφανίζουν ορισμένοι μικροοργανισμοί (κυρίως άλγη και κυανοβακτήρια), να παράγουν αυτούσια υδρογόνο μέσω του φυσικού φωτοσυνθετικού τους κύκλου (που αποτελεί μέρος του αναερόβιου μηχανισμού παραγωγής της ενέργειάς τους) [18]. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία ονομάζεται και φωτοβιολογική παραγωγή του υδρογόνου. Με κατάλληλη εκμετάλλευση της ποσότητας του υδρογόνου που παράγεται από τη μεθοδολογία αυτή, είναι δυνατό να παραχθεί υδρογόνο με απόδοση που προσεγγίζει το 25% [19].

Η φωτοβιολογική μέθοδος παραγωγής του υδρογόνου παρουσιάζει ωστόσο και ένα σημαντικό μειονέκτημα το οποίο συνίσταται στο γεγονός, ότι παράλληλα με το υδρογόνο, οι μικροοργανισμοί που χρησιμοποιούνται κατά τη φωτοσύνθεσή τους παράγουν και ορισμένες ποσότητες από οξυγόνο, το οποίο σε μεγάλες ποσότητες, δρα καταστρεπτικά πάνω στους υπόλοιπους αναερόβιους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς που υπάρχουν πάνω στη Γη. Πάντως, για μικρής και μεσαίας κλίμακας παραγωγή του υδρογόνου, η φωτοβιολογική παραγωγή μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς κανένα πρόβλημα.

1.8.1 Φωτοηλεκτρόλυση.

Ο δεύτερος τρόπος παραγωγής υδρογόνου μέσω φωτόλυσης, επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας της υδρόλυσης του νερού (ο όρος υδρόλυση χρησιμοποιείται για να περιγράψει την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης του νερού από ολοκληρωμένα ηλιακά συστήματα). Η συγκεκριμένη διαδικασία ονομάζεται και φωτοηλεκτρόλυση του νερού. Κατά τη διαδικασία αυτή, ολοκληρωμένα συστήματα πολυάριθμων ηλιακών συλλεκτών συνδεδεμένων σε σειρά, εκμεταλλεύονται τις ακτίνες του ηλίου και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, την οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούν για να υδρολύσουν το νερό και να παράγουν υδρογόνο. Τα ολοκληρωμένα συστήματα ηλιακών συλλεκτών που χρησιμοποιούνται γι' αυτό το σκοπό, παρουσιάζουν αρκετά ικανοποιητική απόδοση, η οποία θεωρητικά προσεγγίζει και το 40%. Στην πράξη όμως, η απόδοση αυτή δεν υπερβαίνει συνήθως το 20% με 25% [18].

Από οικονομικής πλευράς, τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα διάφορα ολοκληρωμένα ηλιακά συστήματα παραγωγής υδρογόνου, είναι ακόμη σχετικά ακριβά. Πάντως τελευταία, έχουν ευδοωθεί κάποιες προσπάθειες να κατασκευαστούν νέα πιο οικονομικά υλικά, αλλά αυτά παρουσίασαν παράλληλα και αρκετά μειωμένες αποδόσεις σε παραγωγή υδρογόνου, οι οποίες δεν υπερέβησαν το 5% με 10% περίπου. Η χρήση όμως των συγκεκριμένων υλικών σε ολοκληρωμένα ηλιακά συστήματα παραγωγής υδρογόνου τελικά συμφέρει ενεργειακά για μαζική παραγωγή του υδρογόνου, αν αναλογιστεί κανείς το γεγονός ότι η πηγή της ηλεκτρικής τους ενέργειας, δηλαδή ο ήλιος, είναι μια άφθονη και ανεξάντλητη πρωτογενής μορφή ενέργειας κατάλληλη προς συνεχή και αδιάκοπη χρήση.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

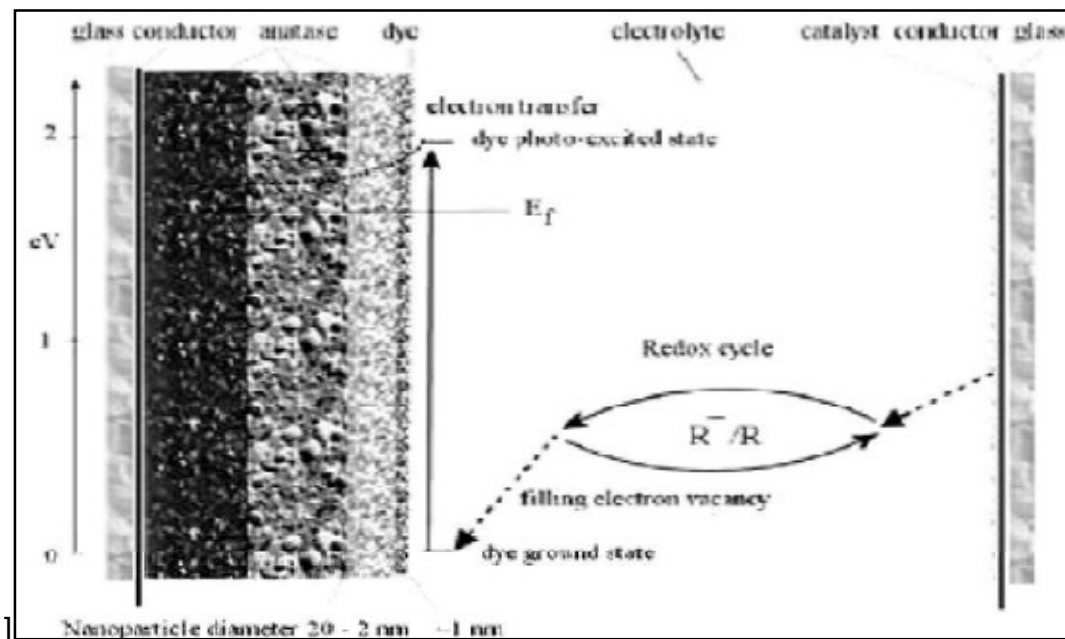
Μια σημαντική κατηγορία ολοκληρωμένων ηλιακών συστημάτων που αναπτύχθηκε τα τελευταία σχετικά χρόνια και η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υδρογόνου μέσω της υδρόλυσης του νερού, αποτελεί η κατηγορία των λεγομένων φωτοηλεκτροχημικών στοιχείων ή στοιχείων Gratzel (photoelectrochemical cells - PEC cells ή Gratzel cells). Τα φωτοηλεκτροχημικά στοιχεία αποτελούν ολοκληρωμένες ηλιακές διατάξεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που συγκροτούνται από πολυάριθμους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες, οι οποίοι έχουν την ικανότητα να αξιοποιούν τις προσπίπτουσες πάνω στις επιφάνειές τους ηλιακές ακτίνες και να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Οι επίπεδες επιφάνειες των ηλιακών τους συλλεκτών περιέχουν στο εσωτερικό τους ένα υψηλά πορώδες λεπτό υμένιο από TiO_2 (συνήθως), το οποίο είναι νανοδομημένο με διαστάσεις κόκκων που δεν υπερβαίνουν τα $2\div 20$ nm περίπου. Το πολύ πορώδες αυτό λεπτό υμένιο, βρίσκεται σε επαφή με την ποσότητα νερού μιας ηλεκτρολυτικής διάταξης, που επίσης περιέχεται στο εσωτερικό των φωτοηλεκτροχημικών στοιχείων και από το οποίο παράγεται το επιθυμητό υδρογόνο μέσω της υδρόλυσής του από την ηλιακή ενέργεια που έχει απορροφήσει το φωτοηλεκτροχημικό στοιχείο και η οποία έχει μετατραπεί πρώτα σε ηλεκτρική.

Η διαδικασία παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του ηλιακού φωτός που προσπίπτει πάνω στις επίπεδες επιφάνειες των φωτοηλεκτροχημικών υλοποιείται στα ακόλουθα βήματα:

1. Αρχικά, το ηλιακό φως προσπίπτει πάνω στην εξωτερική επιφάνεια του λεπτού υμενίου τους, όπου εκεί απορροφάται προς στο εσωτερικό αυτού με τη βοήθεια από μια ειδική σκούρα βαφή που βρίσκεται επικαλυμμένη στην εξωτερική του επιφάνεια και η οποία μεγιστοποιεί την απορρόφηση του προσπιπτόμενου πάνω σ' αυτό ηλιακού φωτός.
2. Αφού το ηλιακό φως διαπεράσει τη βαφή του λεπτού υμενίου και εισέλθει στο εσωτερικό αυτού, λόγω της ηλεκτρικής διέγερσης που προκαλεί εκεί στα ηλεκτρόνια του υλικού του λεπτού υμενίου (TiO_2), δημιουργεί πολυάριθμα ζεύγη ηλεκτρονίων - οπών (δηλαδή ζεύγη που αποτελούνται από θετικά ιόντα και ελεύθερα ηλεκτρόνια).
3. Στη συνέχεια, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που σχηματίζονται στο εσωτερικό του λεπτού υμενίου, μεταπηδούν στη «ζώνη» αγωγιμότητας ενός λεπτού μεταλλικού στρώματος που βρίσκεται σε επαφή με την εσωτερική επιφάνεια του λεπτού υμενίου και από τη «ζώνη» αυτή μέσω ενός στρώματος ηλεκτρολύτη στην άνοδο της ηλεκτρολυτικής διάταξης που βρίσκεται στο εσωτερικό του όλου συστήματος του φωτοηλεκτροχημικού στοιχείου.
4. Η άνοδος της ηλεκτρολυτικής διάταξης του συστήματος του φωτοηλεκτροχημικού στοιχείου βρίσκεται προφανώς συνδεδεμένη με την κάθοδό της, μέσω ενός εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος, οπότε τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, κινούμενα προς την κάθοδό της, δημιουργούν το επιθυμητό ηλεκτρικό ρεύμα. Η τάση του ηλεκτρικού αυτού ρεύματος που παράγεται, χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την ηλεκτρόλυση της ποσότητας του νερού που βρίσκεται μέσα στην ηλεκτρολυτική διάταξη και έτσι παράγεται τελικά το υδρογόνο. Γενικά, ένα φωτοηλεκτροχημικό στοιχείο κατασκευάζεται από σχετικά φτηνά υλικά.

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι το TiO_2 από το οποίο κατασκευάζεται συνήθως το λεπτό υμένιο κάθε φωτοηλεκτροχημικού στοιχείου, σαν υλικό, έχει από μόνο του τη δυνατότητα να δημιουργήσει ελεύθερα ηλεκτρόνια στο εσωτερικό του, όταν στο εσωτερικό του εισέλθει ηλιακό φως. Η ειδική όμως σκούρα βαφή με την οποία επικαλύπτεται συνήθως εξωτερικά, συντελεί στη μεγαλύτερη διεύρυνση του ηλιακού φάσματος που προσπίπτει σ' αυτό, με αποτέλεσμα να αυξάνεται αρκετά η απορρόφηση αυτού και να μεγιστοποιείται η παραγόμενη, από το φωτοηλεκτροχημικό του σύστημα, ηλεκτρική ενέργεια. Μία άλλη τεχνική που

χρησιμοποιείται, εναλλακτικά έναντι της βαφής, για την μεγιστοποίηση της απορρόφησης του ηλιακού φωτός στα λεπτά υμένα των φωτοηλεκτροχημικών στοιχείων, είναι η προσθήκη μικρών ποσοτήτων από άνθρακα στο υλικό κατασκευής τους (στο TiO_2) [18]. Στο παρακάτω σχήμα 2.6, απεικονίζει η εσωτερική δομή ενός τυπικού φωτοηλεκτροχημικού στοιχείου, καθώς και οι βασικότερες διαδικασίες που συντελούνται εκεί για την παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος:



Εικόνα 4: Αναπαράσταση λειτουργίας φωτοηλεκτροχημικού στοιχείου [20]

1.9 Το υδρογόνο ως ενεργειακό καύσιμο.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το υδρογόνο έχει μία σημαντική ιδιότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ωφέλιμο τρόπο: Μπορεί να αποτελέσει πρώτη ύλη, δηλαδή «καύσιμο», για την παραγωγή ενέργειας. Όπως έχει αποδείξει η ιστορία, ο άνθρωπος κατά την διάρκεια της εξέλιξής του, έχει χρησιμοποιήσει διάφορες πηγές ενέργειας οι οποίες περιείχαν αφενός σαν βασικό συστατικό τους τον άνθρακα, αλλά αφετέρου σε ολόένα και μικρότερες περιεκτικότητες στο εσωτερικό τους. Από τον ξυλάνθρακα (ξύλο) για παράδειγμα που αποτέλεσε την κύρια πηγή ενέργειας της ανθρωπότητας στην Αρχαιότητα, στον γαιάνθρακα κατά την διάρκεια της Βιομηχανικής Επανάστασης και στο πετρέλαιο κατά την Σύγχρονη Εποχή, ο άνθρωπος χρησιμοποίησε τον άνθρακα σαν βασικό μέσο παραγωγής της αναγκαίας του ενέργειας, με τη μορφή των διαφόρων φυσικών πηγών του που του ήταν κάθε φορά περισσότερο εύκολα προσβάσιμες σ' αυτόν. Επιπλέον, η εξέλιξη και ανάπτυξη των τεχνολογικών του εφευρέσεων, τον οδήγησαν να αναζητεί συνεχώς νέες πηγές άνθρακα, οι οποίες, όπως είπαμε, περιείχαν όλο και λιγότερο αυτόν σαν βασικό συστατικό στη μάζα τους. Ποτέ όμως, οποιοδήποτε καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε από τον άνθρωπο για την μαζική παραγωγή ενέργειας του δεν περιείχε στη μάζα του μηδενικές ποσότητες από άνθρακα και αυτό συνεχίζεται έως τις μέρες μας με τη μαζική χρησιμοποίηση των διαφόρων ορυκτών καυσίμων (π.χ. πετρέλαιο, φυσικό αέριο, γαιάνθρακας) από τον σύγχρονο πολιτισμό για την παραγωγή ενέργειας.

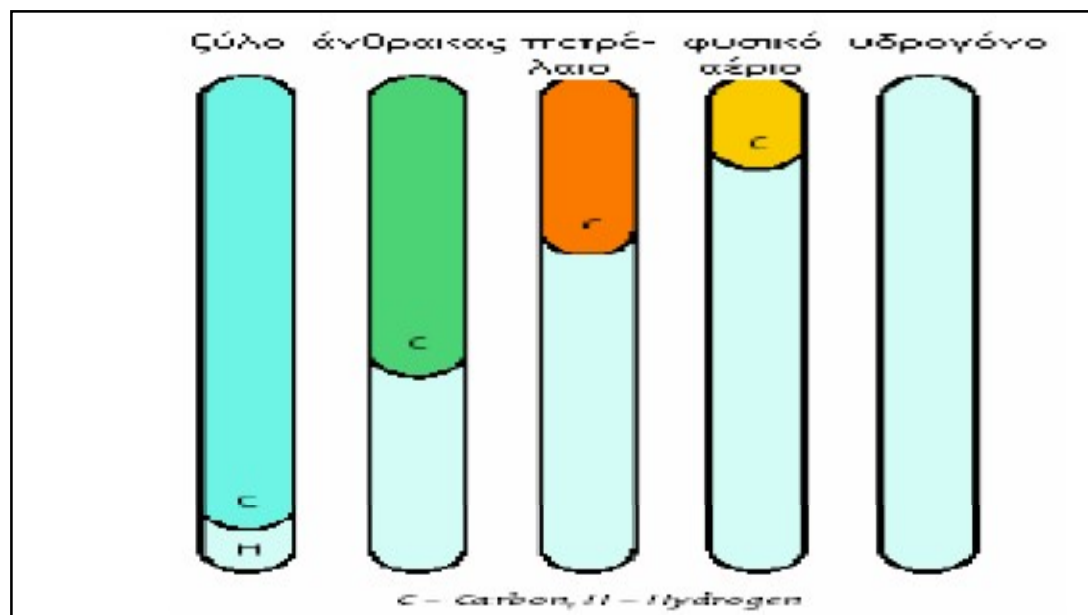
ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

Το υδρογόνο, απ' αυτή τη σκοπιά, αποτελεί πράγματι μια τομή για την ιστορική εξέλιξη της ενεργειακής παραγωγής από τον άνθρωπο, μιας και είναι ουσιαστικά το πρώτο καύσιμο που δεν βασίζεται καθόλου στον άνθρακα [21]. Στο παρακάτω σχήμα 2.7, απεικονίζεται ποσοτικά η διαφορετική σύσταση σε περιεκτικότητα σε άνθρακα, των κυριότερων ορυκτών καυσίμων που έχουν χρησιμοποιηθεί ιστορικά από τα αρχαία χρόνια μέχρι σήμερα από τον άνθρωπο, καθώς επίσης και η διαφοροποίηση του υδρογόνου έναντι αυτών, σαν πιθανό μελλοντικό καύσιμο μαζικής παραγωγής ενέργειας.

Εκτός από την μηδενική του περιεκτικότητα σε άνθρακα, ένα εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό που παρουσιάζει το υδρογόνο σαν καύσιμο, είναι ότι μπορεί να προσφέρει πολύ μεγαλύτερα ποσά ενέργειας από τα αντίστοιχα ποσά των διαφόρων ορυκτών καυσίμων, τα οποία είναι ικανά να τροφοδοτήσουν τις περισσότερες από τις καθημερινές ανάγκες του ανθρώπου, ξεκινώντας από την ηλεκτροδότηση των σπιτιών και των πόλεων του, την κίνηση των μεταφορικών του μέσων και την ικανοποίηση των μικρότερων καθημερινών του αναγκών (π.χ. οικιακές εργασίες, θέρμανση χώρων κ.τ.λ.) [22].

Χαρακτηριστικό παράδειγμα ηλεκτρομηχανολογικής / χημικής διάταξης παραγωγής ενέργειας από το υδρογόνο, αποτελούν οι λεγόμενες κυψέλες καυσίμου του (fuel cells), οι οποίες χρησιμοποιούν την αντίδραση σύντηξης του με το «καθαρό» οξυγόνο (ή με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα) και μέσω ηλεκτρόλυσης παράγουν ηλεκτρική ενέργεια ή θερμότητα. Μια δεύτερη κατηγορία, θερμοχημικών κυρίως, διατάξεων παραγωγής ενέργειας από το υδρογόνο, αποτελούν οι μηχανές εσωτερικής καύσης αυτού (ΜΕΚ υδρογόνου), οι οποίες, όσον αφορά την κατασκευή τους, δεν παρουσιάζουν κάποια ιδιαίτερη διαφοροποίηση από τις συμβατικές μηχανές εσωτερικής καύσης των ορυκτών καυσίμων. Όπως και στις κυψέλες καυσίμου, στις ΜΕΚ υδρογόνου η πρωταρχική μορφή ενέργειας που παράγεται από αυτές είναι είτε ο ηλεκτρισμός είτε η θερμότητα, οι οποίες στη συνέχεια μετατρέπονται σε άλλες δευτερεύουσες μορφές ενέργειας ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη.

Το υδρογόνο μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στις ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας στο μέλλον, μιας και οι δυνατότητες που υπάρχουν από αυτό για την μαζική παραγωγή ενέργειας είναι πολύ μεγάλες και μάλιστα μέσω ανανεώσιμου τρόπου. Η χρήση του υδρογόνου σαν ενεργειακό μέσο μπορεί να συνδυαστεί με την εφαρμογή των περισσότερων από τις υπόλοιπες ΑΠΕ (π.χ. ηλιακή και αιολική ενέργεια, υδροηλεκτρισμός κ.λπ.), μέσω των οποίων μπορεί να εξασφαλιστεί η επαρκής ποσότητα παραγωγής του, η οποία επιτυγχάνεται κατά βάση μέσω της παραγωγής του από το νερό (ηλεκτρόλυση), του οποίου και αποτελεί βασικό συστατικό. Ο τρόπος αυτός παραγωγής του υδρογόνου παρουσιάζει ιδιαίτερα ευοίωνες προοπτικές για το μέλλον, μιας και ως γνωστόν, το νερό αποτελεί το πλουσιότερο στοιχείο του πλανήτη μας και υπάρχει άφθονο στα περισσότερα μέρη της γης (είτε σαν συστατικό των ποταμών και των λιμνών, είτε πολύ περισσότερο σαν συστατικό των ωκεανών). Προς το παρόν πάντως, η κύρια μέθοδος παραγωγής του υδρογόνου πραγματοποιείται μέσω της θερμοχημικής επεξεργασίας του φυσικού αερίου, μιας και αποτελεί τον οικονομικότερο τρόπο γι' αυτό [18].



Εικόνα 5: Περιεκτικότητες καυσίμων σε άνθρακα και υδρογόνο [21].

Το υδρογόνο, εκτός από υλικό παραγωγής ενέργειας, αποτελεί και ιδανική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (ΑΠΕ), μιας και η ένωσή του στη πράξη με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο με σκοπό την παραγωγή ενέργειας, είτε μέσω της ηλεκτρόλυσης είτε μέσω της καύσης του, δημιουργεί ως κύρια υποπαραγώγα της το νερό και τη θερμότητα και δευτερευόντως ορισμένα άλλα αέρια (κυρίως οξείδια του αζώτου), τα οποία όμως βρίσκονται σε πολύ μικρές ποσότητες ώστε να μην επηρεάζουν σημαντικά το περιβάλλον τους. Έτσι το υδρογόνο, μπορεί στο μέλλον να αποτελέσει την κύρια εναλλακτική λύση για την μαζική παραγωγή ενέργειας έναντι των ορυκτών καυσίμων, μιας και αυτή βασίζεται σήμερα κυρίως στην χρησιμοποίηση αυτών (μέσω της καύσης τους).

Η πιθανή όμως υιοθέτησή του υδρογόνου ως βασικού ενεργειακού μέσου στο μέλλον, προϋποθέτει και την ριζική μεταστροφή της παγκόσμιας ενεργειακής οικονομίας σε έναν καινούργιο και διαφορετικό τρόπο λειτουργίας της, ο οποίος θα βασίζεται κατά κύριο λόγο σ' αυτό και στις διάφορες τεχνολογίες του. Η νέα αυτή μορφή, χαρακτηρίζεται σήμερα από τους επιστήμονες που ασχολούνται με την τεχνολογία του σαν παγκόσμια «Οικονομία του υδρογόνου». Μεταξύ των άλλων, οι διάφοροι σχεδιασμοί που γίνονται σήμερα όσον αφορά την πιθανή υιοθέτηση της «Οικονομίας του υδρογόνου» στο μέλλον, αφορούν τη μετατόπιση του παρόντος ενεργειακού ενδιαφέροντος της ανθρωπότητας από τα διάφορα δίκτυα μεταφοράς του ηλεκτρισμού και των ορυκτών καυσίμων της, στα καινούργια δίκτυα μαζικής μεταφοράς υδρογόνου είτε σε υγρή είτε σε αέρια μορφή, μέσα από μεγάλους αγωγούς ή μεταφερόμενο πάνω σε δεξαμενές πλοίων (που ήδη υπάρχει). Το μελλοντικό δίκτυο διανομής του υδρογόνου που προβλέπεται να εφαρμοστεί στο μέλλον, παρουσιάζει ορισμένα θετικά σημεία έναντι του παρόντος δικτύου διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται σήμερα (δευτερευόντως έναντι του δικτύου διανομής του πετρελαίου και του φυσικού αερίου), τα οποία μπορούν να συνοψιστούν ως εξής: Η διανομή του υδρογόνου (σε αέρια κυρίως μορφή), θεωρείται πολύ πιο αποδοτική από την διανομή του ηλεκτρισμού μέσω μετασχηματιστών και καλωδίων, ενώ το αέριο υδρογόνο μπορεί επίσης να αποθηκευτεί πιο εύκολα και πιο αποδοτικά από την ηλεκτρική ενέργεια.

Υπάρχουν πάντως και ορισμένα μειονεκτήματα, όσον αφορά τη διανομή του υδρογόνου σε αέρια ή υγρή κατάσταση, τα οποία αφορούν κυρίως την δυσκολία κατά την αποθήκευση και διανομή του σε κλειστούς χώρους, λόγω της δυνατότητάς του για εύκολη ανάφλεξη σ' αυτούς.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

Ένα δεύτερο, μικρότερης σημασίας μειονέκτημα, αφορά το γεγονός, ότι το υδρογόνο σε συνήθεις συνθήκες περιβάλλοντος σαν αέριο είναι άχρωμο και άοσμο, με αποτέλεσμα να είναι εύκολη η διαφυγή του από τα δίκτυα μεταφοράς του προς το περιβάλλον, χωρίς αυτό να γίνει άμεσα αντιληπτό. Το συγκεκριμένο όμως μειονέκτημα μπορεί να λυθεί σχεδόν ουσιαστικά, χρησιμοποιώντας τον τεχνητό χρωματισμό του ή την προσδώση σ' αυτό τεχνητής οσμής, όπως εφαρμόζεται και κατά την διανομή του φυσικού αερίου. Θα πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι οι νέες τεχνικές μέθοδοι αποθήκευσης του υδρογόνου που έχουν αρχίσει να εξελίσσονται τα τελευταία χρόνια, κυρίως μέσω της αποθήκευσης του μέσα σε στερεά υλικά (π.χ. μεταλλικά υδρίδια και στερεές ενώσεις του με τον άνθρακα) έχουν επίσης αρχίσει να επιφέρουν πολλές λύσεις στο εξίσου σημαντικό, σε σχέση με την διανομή του, πρόβλημα της αποθήκευσής του, με αποτέλεσμα η νέα γενιά τεχνολογιών του στα επόμενα από τώρα χρόνια να μπορεί να βασίζεται σε ασφαλή και αποτελεσματική του αποθήκευση. Ο σχεδιασμός της μελλοντικής «οικονομίας του υδρογόνου», συνδυάζεται σήμερα κυρίως με την ιδέα της αποκεντρωμένης και τοπικής ενεργειακής μετατροπής του υδρογόνου (local hydrogen generation), η οποία μπορεί να ενταχθεί σε κάθε ενεργειακό σύστημα μιας οποιασδήποτε χώρας (ανεξάρτητα από την έκτασή της και τον πληθυσμό της). Κατά την ενεργειακή αυτή μετατροπή, η τοπικά παραγόμενη πλεονάζουσα ενέργεια υδρογόνου από διάφορες ΑΠΕ, π.χ. βιομάζα, Φ/Β κύτταρα, μικρούς υδροστρόβιλους, Α/Γ κ.ά. σε οικίες, αιολικά πάρκα, εγκαταστάσεις ΑΠΕ τοπικών αυτοδιοικήσεων κ.λπ., προβλέπεται ότι θα διοχετεύεται έναντι αμοιβής ή μέσω ανταλλαγής μέσα στο εθνικό δίκτυο της κάθε χώρας.

Με τον τρόπο αυτό, θα αποφεύγονται οι διάφορες απώλειες ισχύος που υπάρχουν σήμερα στο εθνικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικού ρεύματος αυτών, που ως γνωστόν λειτουργεί κατά πλείστον με «κεντροποιημένο» τρόπο, δηλαδή μέσω παραγωγής και διανομής του ηλεκτρικού ρεύματος από μεγάλους ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς. Σε αντίθεση δηλαδή με το «κεντροποιημένο» σύστημα παραγωγής και διανομής του ηλεκτρικού ρεύματος που ισχύει σήμερα, το μελλοντικό «αποκεντρωμένο» ενεργειακό σύστημα του υδρογόνου θα χαρακτηρίζεται σε μεγάλο ποσοστό από την ενσωματωμένη ενεργειακή μετατροπή αυτού (embedded hydrogen generation), δηλαδή την τοπικά ασκούμενη μετατροπή του υδρογόνου σε ενέργεια από τοπικούς σταθμούς παραγωγής του. Το «αποκεντρωμένο» αυτό σύστημα παραγωγής και διανομής του υδρογόνου, εκτός από την αποφυγή απωλειών σε εθνικό επίπεδο, παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι αποτελεί και ένα νέο «καθαρό» σύστημα παραγωγής ενέργειας, το οποίο αξιοποιεί και διάφορες άλλες μορφές ΑΠΕ εκτός από το υδρογόνο.

Η λειτουργία ενός αποκεντρωμένου συστήματος διανομής του υδρογόνου, θα μπορούσε να υποδιαιρεθεί στα ακόλουθα στάδια από τα οποία αυτό αποτελείται, ξεκινώντας από το στάδιο της παραγωγής του μέσω κυρίως διαφόρων ΑΠΕ, μέχρι το στάδιο της κατανάλωσης της ενέργειάς του από τον τελικό αποδέκτη του (τον άνθρωπο) [23]:

Το πρώτο στάδιο, περιλαμβάνει την παραγωγή του υδρογόνου, μέσω κατάλληλων τεχνικών, χρησιμοποιώντας γι' αυτό σαν πρώτες ύλες κυρίως το νερό (μέσω της ηλεκτρόλυσης ή της υδρόλυσής του) ή εναλλακτικά τα ορυκτά καύσιμα και εφαρμόζοντας τις διάφορες άλλες τεχνολογίες ΑΠΕ για την παραγωγή του (π.χ. ηλιακή ή αιολική ενέργεια).

Το δεύτερο στάδιο, περιλαμβάνει την αποθήκευση του παραχθέντος υδρογόνου του πρώτου σταδίου, με τη βοήθεια διαφόρων φυσικών ή χημικών διεργασιών αποθήκευσής του (π.χ. αποθήκευσή του σε στερεά υλικά).

Το τρίτο και τελευταίο στάδιο του «αποκεντρωμένου» συστήματος παραγωγής και διανομής του υδρογόνου, περιλαμβάνει την μετατροπή της εσωτερικής χημικής ενέργειας του υδρογόνου, αρχικά σε ηλεκτρισμό ή θερμότητα και στη συνέχεια σε οποιαδήποτε άλλη μορφή ενέργειας, στο σημείο όπου γίνεται η κατανάλωσή του.

Οι ενεργειακές απαιτήσεις του μέλλοντος μπορούν πράγματι να καλυφθούν από την μαζική χρησιμοποίηση του υδρογόνου ως φορέα ενέργειας, μιας και το υδρογόνο, εκτός από

την δυνατότητα που έχει να παράγει σχεδόν «καθαρή» ενέργεια στη πράξη, αποτελεί, όπως έχουμε αναφέρει και το πιο συμφέρον, από άποψη ενεργειακών δυνατοτήτων, καύσιμο σε σχέση με όλα τα ενεργειακά καύσιμα που χρησιμοποιούνται σήμερα. Το γεγονός αυτό απεικονίζεται έκδηλα στον παρακάτω πίνακα 2.3, στον οποίο γίνεται μια σύγκριση μεταξύ της παραγωγικής ικανότητας του υδρογόνου σε ενέργεια και της παραγωγικής ικανότητας των κυριότερων σημερινών ενεργειακών καυσίμων που χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο [23],[24]:

Πίνακας 3: Συγκριτικά στοιχεία ενεργειακής πυκνότητας μεταξύ του υδρογόνου και των κυριότερων ενεργειακών καυσίμων.

Καύσιμο	Υδρογόνο	Φυσικό αέριο	LPG (προπάνιο)	Πετρέλαιο (αργό)	Μεθανόλη	Βενζίνη	Μπαταρίες Μολύβδου
Ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα βάρους (kwh/kg)*	33.3	13.9	12.9	12.1	5.6	12.7	0.03
Ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου (kwh/l)	0.53	2.6	7.5	10.8	4.4	8.7	0.09

Όπως παρατηρούμε από τον παραπάνω πίνακα, το υδρογόνο παρουσιάζει την μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα βάρους του (33.3 kwh/kg) σε σχέση με αυτή των υπολοίπων (ορυκτών ή μη) ενεργειακών καυσίμων που χρησιμοποιούνται σήμερα. Από την άλλη μεριά όμως, παρουσιάζει και την μικρότερη ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου του (0.53 kwh/l) σε σχέση με αυτά, γεγονός που οφείλεται στην εξαιρετικά μικρή του αέρια πυκνότητα υπό συνθήκες περιβάλλοντος. Αυτό, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, αποτελεί σήμερα το κυριότερο εμπόδιο στην ανάπτυξη της τεχνολογίας του, κυρίως στον τομέα της ασφαλούς και αποτελεσματικής αποθήκευσής του. Όπως όμως έχουμε αναφέρει, τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες να επιλυθεί και το πρόβλημα αυτό, μέσω κυρίως της ανάπτυξης των τεχνικών μεθόδων αποθήκευσής του σε διάφορα υλικά. Τα αποτελέσματα από αυτές τις προσπάθειες έχουν ήδη αρχίσει σιγά - σιγά να γίνονται ορατά. Ένας επιστημονικός τομέας του οποίου η εφαρμογή αποτελεί το βασικό κλειδί για την ανάπτυξη της τεχνολογίας του υδρογόνου, είναι η επιστήμη μανομέτρου (ή η νανοεπιστήμη). Αυτό, διότι πολλά υλικά προοριζόμενα για την αποθήκευσή του στη μάζα τους ή και για την κατασκευή βασικών μερών διατάξεων παραγωγής ενέργειάς του (π.χ. μεμβρανών και ηλεκτροδίων από κυψέλες καυσίμου του), βελτιώνουν ριζικά τις επιδόσεις τους, όταν αποκτήσουν νανοκρυσταλλική. Ο λόγος γι' αυτό είναι, ότι όταν τα συγκεκριμένα αυτά υλικά, όταν αντιδρούν στην διάσταση του nm, παρουσιάζουν κάποιες ξεχωριστές ιδιότητες που συντελούν σημαντικά στην απόσπαση ενέργειας από το υδρογόνο. Οι ξεχωριστές αυτές ιδιότητες, προέρχονται κυρίως από τις μεγάλες επιφάνειες που έχουν οι θεμελιώδη λίθοι τους (κόκκοι), όταν αυτοί βρίσκονται δομημένοι στη διάσταση του nm.

Εξετάζοντας, από την άλλη μεριά, τη χρησιμοποίηση του υδρογόνου σαν μαζικού φορέα ενέργειας σε μακροσκοπική κλίμακα, η μαζική του εφαρμογή, από ενεργειακή και περιβαλλοντική σκοπιά, προφανώς αποτελεί μια εξαιρετικά ελπιδοφόρα λύση για το μέλλον, όσον αφορά το ενεργειακό και περιβαλλοντικό πρόβλημα που σήμερα αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα. Ωστόσο, δεν θα πρέπει να ξεχνάμε, ότι η τεχνολογία αξιοποίησης του

υδρογόνου σαν ενεργειακό καύσιμο αποτελεί μια σχετικά καινούργια επιστήμη, η οποία μόλις τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχει αρχίσει να κάνει τα πρώτα δυναμικά της βήματα. Επομένως, είναι φυσιολογικό να υπάρχουν ακόμα πολλοί τομείς στους οποίους αυτή θα πρέπει να εξελιχτεί περαιτέρω, πριν η μαζική της χρησιμοποίηση εφαρμοστεί και στην πράξη. Υπάρχουν δηλαδή ακόμα αρκετά τεχνολογικά ζητήματα τα οποία πρέπει πρώτα να ξεπεραστούν, πριν το υδρογόνο μπορέσει να αποτελέσει μια αξιόπιστη εναλλακτική λύση έναντι των διαφόρων ορυκτών καυσίμων που κατά πλείστον χρησιμοποιούνται σήμερα για τη μαζική παραγωγή ενέργειας. Ένας σημαντικός τομέας στον οποίο η ενέργεια του υδρογόνου θα πρέπει να κάνει ακόμα αρκετά βήματα, είναι ο τομέας της μαζικής παραγωγής των διαφόρων ενεργειακών τεχνολογιών της σε οικονομική κλίμακα, η οποία προς το παρόν δεν έχει ακόμα επιτευχθεί. Υπάρχουν αρκετά αίτια που συντελούνε σ' αυτό, μεταξύ των οποίων προφανώς βρίσκεται και η κατασκευή μηχανών της οι οποίες θα αποτελούνται από φθηνά και προσβάσιμα υλικά. Η βασικότερη όμως αιτία που συντελεί στην καθυστέρηση της ανάπτυξής της, είναι η κατασκευή ενός μαζικού δικτύου διανομής της ενέργειάς του υδρογόνου, η οποία κατά κύριο λόγο οφείλεται στην υποσκέλιση αυτής από τη χρησιμοποίηση των ορυκτών καυσίμων σαν βασικά μέσα παραγωγής ενέργειας. Ωστόσο, σε διάφορες χώρες ανά το κόσμο έχουν ήδη γίνει βήματα προς αυτή τη κατεύθυνση, κυρίως μέσω της χρησιμοποίησης του υδρογόνου σε διάφορα μεταφορικά μέσα [25]:



Εικόνα 6: Αστικό λεωφορείο με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου σε λειτουργία στην πόλη του Αμβούργου από το 2006 [26].



Εικόνα 7: Αστικά λεωφορεία MAN κινούμενα με ΜΕΚ υδρογόνου σε κυκλοφορία τον Ιούνιο του 2006 στο Βερολίνο ως τμήμα του ευρωπαϊκού προγράμματος HyFLEET [26].

1.10 Τρόποι μεταφοράς του υδρογόνου – πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των συστημάτων διανομής.

Το υδρογόνο μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες ποσότητες μέσω υπόγειων αγωγών (αέριο υδρογόνο) ή με δεξαμενόπλοια (υγρό υδρογόνο). Επί του παρόντος, η μεταφορά υδρογόνου μέσω αγωγών χρησιμοποιείται είτε σε σύνδεση μεταξύ της παραγωγής και των γύρω χώρων χρήσης (μέχρι 10 χλμ.) ή σε πιο εκτεταμένα δίκτυα (περίπου 200 χλμ.). Για την κατασκευή των αγωγών υδρογόνου, είναι αναγκαία η χρήση του χάλυβα που είναι ανθεκτικός ως προς την ευθραυστότητα κατά την χρήση υδρογόνου υπό πίεση, ιδίως για το πολύ καθαρό υδρογόνο (περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 99,5%). Εμβολοφόροι συμπιεστές αερίου που χρησιμοποιούνται για το φυσικό αέριο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το υδρογόνο χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις του σχεδιασμού. Ωστόσο, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην σφράγιση (για την αποφυγή διαρροών του υδρογόνου) και την επιλογή των βασικών υλικών για τα μέρη που υπόκεινται σε μηχανική κόπωση. Η χρήση των φυγοκεντρικών συμπιεστών για το υδρογόνο δημιουργεί περισσότερα προβλήματα που οφείλονται στην εξαιρετική ελαφρότητα του υδρογόνου. Κατά κανόνα, η μετάδοση του υδρογόνου μέσω αγωγών απαιτεί μεγαλύτερη διάμετρο σωληνώσεων και μεγαλύτερη δύναμη συμπίεσης από τους αντίστοιχους του φυσικού αερίου για την ίδια απόδοση ενέργειας. Ωστόσο, λόγω των χαμηλότερων απωλειών πίεσης στην περίπτωση του υδρογόνου, οι σταθμοί συμπίεσης μπορούν να είναι τοποθετημένοι δύο φορές μακρύτερα μεταξύ τους. Σε οικονομικό επίπεδο, σε περισσότερες από τις μελέτες διαπιστώθηκε ότι το κόστος της μεταφοράς του υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα είναι μεγαλύτερο περίπου 1.5-1.8 φορές του κόστους της μεταφοράς φυσικού αερίου.

Η διανομή του υδρογόνου παίζει ξεχωριστό ρόλο στην ανάπτυξη και εδραίωση της «Οικονομίας του υδρογόνου». Ο τρόπος συγκρότησης του δικτύου διανομής του υδρογόνου, τόσο σε τοπικό, όσο και σε ευρύτερο επίπεδο, διαφέρει σημαντικά από αυτόν που χρησιμοποιείται σήμερα, σε παγκόσμια κλίμακα, για τη διανομή των διαφόρων συμβατικών ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, φυσικό αέριο κ.τ.λ.). Ως γνωστόν, τα περισσότερα συμβατικά ορυκτά καύσιμα που καταναλώνονται στις μέρες μας από τον άνθρωπο (με εξαίρεση το φυσικό αέριο), μεταφέρονται αποκλειστικά σε υγρή ή στερεά μορφή. Το γεγονός αυτό καθιστά τις υπάρχουσες υποδομές μεταφοράς τους ακατάλληλες για την μεταφορά του υδρογόνου, το οποίο σε συνθήκες συνθήκες περιβάλλοντος είναι αέριο. Ακόμα και αν το υδρογόνο μετατρέπονταν σε υγρό, μέσω συμπίεσης και μεταφέρονταν από το σημερινό υπάρχον

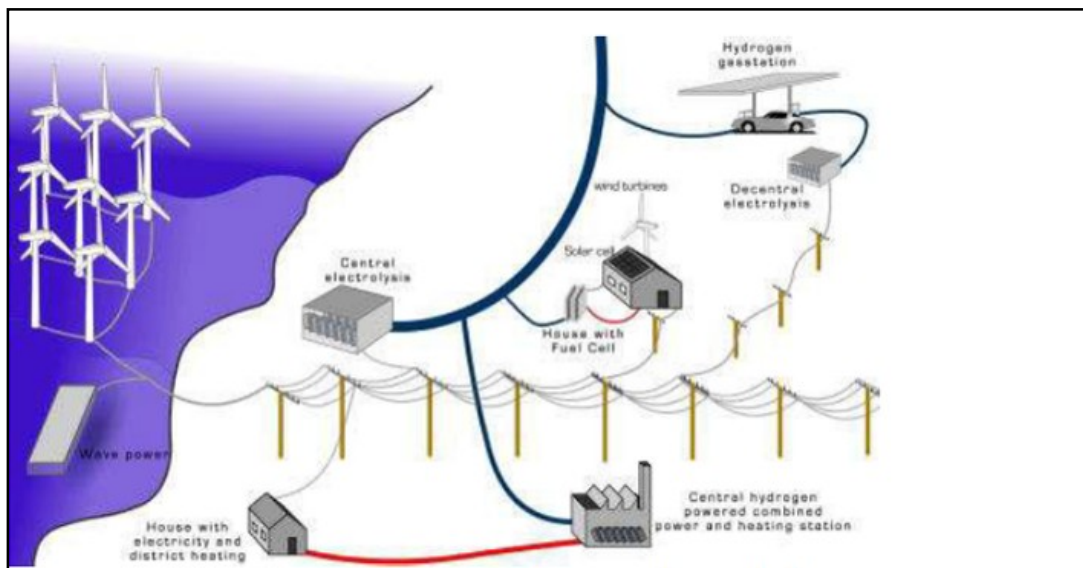
ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

σύστημα μαζικής διανομής των υγρών ορυκτών καυσίμων, η μεταφορά του αυτή θα σήμαινε αφενός την κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας για την μετατροπή του σε υγρό (με αποτέλεσμα το κόστος για τη μεταφορά του να γινότανε υπερβολικά μεγάλο) και αφετέρου θα παρουσίαζε αυξημένα προβλήματα ασφάλειας και αξιοπιστίας εξαιτίας των ιδιαίτερων συνθηκών που επικρατούν κατά τη μεταφορά του υδρογόνου σε υγρή μορφή (υψηλές πιέσεις).

Από την άλλη μεριά, η υποδομή του παγκόσμιου δικτύου διανομής που χρησιμοποιείται σήμερα για τη μεταφορά του φυσικού αερίου σαν αέριο, είναι εξίσου ανεπαρκής για τη μεταφορά του αερίου υδρογόνου, μιας και οι συνθήκες πιέσεων που απαιτούνται για τη μεταφορά του φυσικού αερίου σε συνήθεις θερμοκρασίες περιβάλλοντος είναι πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες της μεταφοράς του υδρογόνου. Έτσι, από τα παραπάνω μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα, ότι η μελλοντική διανομή του υδρογόνου με ασφαλή και αποτελεσματικό τρόπο, μπορεί να γίνει μόνο μέσω ειδικού σχεδιασμού του μελλοντικού δικτύου μεταφοράς του, ο οποίος αναγκαστικά θα είναι μεγαλύτερων απαιτήσεων από αυτόν που εφαρμόζεται σήμερα για τη μεταφορά των συμβατικών υγρών ή αέριων ορυκτών καυσίμων. Σε θεωρητικό επίπεδο, υπάρχουν σήμερα ήδη αρκετοί σχεδιασμοί όσον αφορά τη μελλοντική δομή του δικτύου διανομής του υδρογόνου σε παγκόσμια κλίμακα. Οι σχεδιασμοί αυτοί, διαφοροποιούνται ανάλογα με την φιλοσοφία με την οποία προσεγγίζεται γενικότερα το ζήτημα της μελλοντικής συγκρότησης της Οικονομίας του υδρογόνου, λαμβάνοντας υπόψη και τις τοπικές γεωγραφικές και περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε περιοχή της Γης. Από τους διάφορους αυτούς θεωρητικούς σχεδιασμούς, δύο είναι οι σημαντικότεροι, κυρίως επειδή δίνουν μια εύγλωττη εικόνα του ριζικά διαφορετικού τρόπο προσέγγισης της μελλοντικής συγκρότησης της Οικονομίας του υδρογόνου.

Η πρώτη προσέγγιση συγκρότησης του μελλοντικού δικτύου διανομής του υδρογόνου, έχει αρκετά παρόμοια μορφή μ' αυτή που εφαρμόζεται σήμερα για τη μαζική διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο σε τοπικό, όσο και σε ευρύτερο πλαίσιο. Σύμφωνα μ' αυτή μελλοντικά προβλέπεται, ότι πολλές μεγάλες μονάδες παραγωγής του υδρογόνου ικανές να παράγουν μεγάλες ποσότητες αυτού, θα βρίσκονται συνδεδεμένες μεταξύ τους μέσω κατάλληλων αγωγών μεταφοράς του, οι οποίοι θα το μεταφέρουν σε αέρια μορφή. Μέρος του δικτύου αυτού θα αποτελούν και τα διάφορα κέντρα ελέγχου διανομής του υδρογόνου, τα οποία θα αναλαμβάνουν να το τροφοδοτούν σε μικρότερους σταθμούς διανομής του (όπως για παράδειγμα σε πρατήρια ανεφοδιασμού οχημάτων του, ηλεκτρικά εργοστάσια κ.τ.λ.). Επειδή η παραγωγή, κατά τη συγκεκριμένη προσέγγιση συγκρότησης του μελλοντικού δικτύου διανομής του υδρογόνου, λαμβάνει χώρα μακριά από τις τοπικές πηγές κατανάλωσής του, ο συγκεκριμένος τρόπος διανομής του χαρακτηρίζεται ως κεντρικός [27]. Το όλο σκεπτικό της κεντρικής μελλοντικής συγκρότησης του δικτύου διανομής του υδρογόνου, παριστάνεται σχηματικά παρακάτω στην Εικ.6:

Η δεύτερη προσέγγιση της πιθανής μελλοντικής συγκρότησης του δικτύου διανομής του υδρογόνου, βρίσκεται στον αντίποδα της πρώτης και αναφέρεται ως αποκεντρωμένη διανομή του υδρογόνου [27]. Σύμφωνα μ' αυτή, το υδρογόνο θα παράγεται μελλοντικά απευθείας στα διάφορα τοπικά σημεία της κατανάλωσής του, δηλαδή απευθείας στα διάφορα τοπικά κέντρα της ζήτησής του, μέσω της εκάστοτε μεθόδου παραγωγής του που θα είναι περισσότερο κατάλληλη γι' αυτό (ανάλογα με τις εκάστοτε γεωγραφικές, τεχνολογικές και κοινωνικές συνθήκες που θα επικρατούν στα σημεία αυτά). Εκτός από αυτό, οι μελλοντικές ποσότητες του που θα παράγονται στα διάφορα τοπικά σημεία της ζήτησής του θα είναι τέτοιες, ώστε να μπορούν αφενός να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες του κάθε τοπικού πληθυσμού και αφετέρου να διοχετευτούν και στο ευρύτερο δίκτυο διανομής.



Εικόνα 8: Διανομή του υδρογόνου κατά συγκεντρωτικό τρόπο [28].

Αυτό μπορεί να συμβαίνει είτε για εσωτερική κατανάλωση (για ένα κράτος) είτε για εξαγωγή. Έτσι, η συγκεκριμένη διανομή του υδρογόνου προς τα διάφορα σημεία της κατανάλωσής του, θα ακολουθεί έναν, λίγο ή περισσότερο, τοπικό δρόμο μεταφοράς, ο οποίος δεν θα απέχει ιδιαίτερα από τα εκάστοτε κέντρα της παραγωγής του. Ένα βήμα παραπέρα, αποτελεί επίσης η απευθείας παραγωγή του υδρογόνου στο κάθε σημείο της ζήτησής του, όπου αυτό προφανώς κρίνεται δυνατό, χωρίς την απαραίτητη μεσολάβηση οποιονδήποτε ενδιάμεσων σταθμών παραγωγής του. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε για παράδειγμα να συμβεί με την παραγωγή του υδρογόνου από τον ίδιο τον χρήστη του, δηλαδή της ενέργειάς του, π.χ. στο χώρο του σπιτιού μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού από οικιακά ηλιακά ή αιολικά ηλεκτροπαραγωγικά συστήματα με σκοπό την κάλυψη των διαφόρων οικιακών αναγκών ή στο χώρο της εργασίας για μικρές ή μεσαίες επιχειρήσεις. Από την παραπάνω ανάλυση της πιθανούς συγκρότησης του μελλοντικού δικτύου διανομής του υδρογόνου μπορούμε να συμπεράνουμε, ότι το σημαντικό πλεονέκτημα που παρουσιάζει η αποκεντρωμένη διανομή του είναι η σημαντική ενεργειακή ανεξαρτησία που αυτή προσφέρει σε σχέση με την κεντρική του διανομή. Αυτό γιατί, η δυσλειτουργία που ενδεχομένως θα μπορούσε αυτή να παρουσιάσει σε κάποιο σημείο του δικτύου της, δε θα είχε οπωσδήποτε σαν συνέπεια την παρεμπόδιση ή διακοπή της λειτουργίας και κάποιων άλλων σημείων του δικτύου της, μιας και, όπως αναφέραμε, τα διάφορα σημεία του ευρύτερου δικτύου της λειτουργούν σχεδόν ανεξάρτητα μεταξύ τους.

Κάτι τέτοιο προφανώς δεν μπορεί να ισχύσει στην περίπτωση της κεντρικής διανομής του υδρογόνου, αφού η ελαττωματική λειτουργία οποιουδήποτε τυχαίου σημείου του δικτύου της θα επηρεάσει πιθανότατα ένα ή περισσότερα γειτονικά του σημεία (όπως συμβαίνει σήμερα με την κεντρική διανομή που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας). Από το συγκεκριμένο γεγονός μπορούμε να συμπεράνουμε, ότι η αποκεντρωμένη διανομή του υδρογόνου μπορεί να λειτουργήσει ομαλά και σε πιθανές περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης που καταστρέφουν ή θέτουν προσωρινά εκτός λειτουργίας κάποια σημεία του δικτύου της (όπως π.χ. συμβαίνει σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών, δηλαδή εκτεταμένων πυρκαγιών, σεισμών, χιονοπτώσεων κ.τ.λ.). Αντίθετα, μια τέτοια προοπτική είναι σχεδόν αδύνατη για την κεντρική διανομή του υδρογόνου. Εκτός από την προστασία, λόγω ενεργειακής ανεξαρτησίας, απέναντι σε φυσικές καταστροφές και σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, το αποκεντρωμένο σύστημα διανομής του υδρογόνου προσφέρει σημαντική

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

διευκόλυνση και στην κάλυψη των ευρύτερων ενεργειακών αναγκών οποιουδήποτε κράτους, το οποίο συνεπάγεται γι' αυτό την οικονομική και ενεργειακή του ανεξαρτησία από άλλα κράτη. Αυτός είναι και ο λόγος που σε παγκόσμια κλίμακα σήμερα, αρκετά μικρά ή μεγαλύτερα κράτη επενδύουν αρκετά μεγάλα ποσά σε αναπτυξιακά προγράμματα που αφορούν την μελλοντική συγκρότηση της «Οικονομίας του υδρογόνου», μιας και αυτή θα σημάνει την ανεξαρτητοποίηση από τον μικρό εκείνο αριθμό των σημερινών κρατών-παραγωγών που ελέγχουν την παραγωγή και διακίνηση των ορυκτών καυσίμων σε παγκόσμια κλίμακα.

Σε σχέση με την ασφάλεια των μελλοντικών δικτύων διανομής του υδρογόνου και των κέντρων παραγωγής και διοχέτευσής του, υπάρχουν ακόμα αρκετά σημαντικά ζητήματα που πρέπει να επιλυθούν, πρώτου αυτά λειτουργήσουν πρακτικά με αξιόπιστο και ασφαλή τρόπο. Όπως και στην περίπτωση του φυσικού αερίου, οι αγωγοί μεταφοράς του (αερίου) υδρογόνου και οι διάφοροι σταθμοί ανεφοδιασμού του, θα πρέπει να εξοπλιστούν με κατάλληλες τεχνολογίες διαχείρισής του. Οι τεχνολογίες αυτές θα πρέπει να είναι υψηλότερων απαιτήσεων από αυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα για το φυσικό αέριο (εξαιτίας των αρκετά υψηλότερων πιέσεων που απαιτούνται για τη διανομή του υδρογόνου).

Όλες επίσης οι τεχνικές προφυλάξεις ανίχνευσης πιθανούς διαρροής που εφαρμόζονται σήμερα κατά την διανομή του φυσικού αερίου (π.χ. ανιχνευτές διαρροής, βαλβίδες πιέσεων, βαλβίδες ασφαλείας κ.τ.λ.) θα πρέπει να εφαρμοστούν και στο μελλοντικό δίκτυο διανομής του υδρογόνου, καθώς η διαρροή του υδρογόνου κατά τη διανομή του είναι το ίδιο επικίνδυνη με αυτή του φυσικού αερίου (υπάρχει κίνδυνος έκρηξης).

Επειδή η διανομή και ο ανεφοδιασμός του υδρογόνου γίνονται κάτω από πολύ υψηλές πιέσεις, τα υλικά με τα οποία θα κατασκευάζονται οι μελλοντικοί αγωγοί μεταφοράς του θα πρέπει να έχουν μεγαλύτερη αντοχή από τους αγωγούς που χρησιμοποιούνται σήμερα για τη μεταφορά του φυσικού αερίου. Αυτή είναι και η σημαντικότερη διαφοροποίηση μεταξύ των δύο δικτύων διανομής αερίων (υδρογόνου και φυσικού αερίου), αφού οι τεχνολογίες των υλικών που απαιτούνται για το πρώτο διαφοροποιούνται αρκετά απ' αυτές του δεύτερου.

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι εκτός από τη χρήση εξελεγμένων υλικών για την κατασκευή των αγωγών διακίνησης του υδρογόνου, είναι αναγκαίο αυτοί οι αγωγοί να εφοδιαστούν και με κατάλληλες διατάξεις συμπίεστών του υδρογόνου σε διάφορα σημεία τους, μιας και εκτός από υψηλές πιέσεις κατά τη μεταφορά του, το υδρογόνο σαν αέριο απαιτεί οι υψηλές αυτές πιέσεις να παραμένουν και συνεχώς σταθερές.

Αυτό οφείλεται κυρίως στην μεγάλη πτώση πίεσης που παρατηρείται στο δίκτυο διανομής του όταν αυτό πάγεται απ' αυτό και χρησιμοποιείται για λόγους ανεφοδιασμού [27]. Παρά τις διάφορες τεχνικές δυσκολίες που υπάρχουν ακόμη για την ευρύτερη εφαρμογή της διανομής του υδρογόνου, αρκετά τεχνολογικά προηγμένα κράτη σήμερα (μεταξύ αυτών και αρκετά κράτη της Ε.Ε.), έχουν ήδη αρχίσει να αναπτύσσουν τις πρώτες, μικρής κλίμακας, υποδομές διανομής και ανεφοδιασμού του υδρογόνου, κυρίως δε για τον ανεφοδιασμό με υδρογόνο αστικών μεταφορικών οχημάτων του (λεωφορεία, Ι.Χ. κ.τ.λ.). Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί ο τοπικός σταθμός ανεφοδιασμού με υδρογόνο ο οποίος έχει κατασκευαστεί στη περιοχή Spandau του Βερολίνου της Γερμανίας, ο οποίος χρησιμοποιείται για τον ανεφοδιασμό των 14 αστικών επιβατικών λεωφορείων υδρογόνου που υπάρχουν στην πόλη του Βερολίνου(Εικόνα 7).



Εικόνα 9: Σταθμός ανεφοδιασμού υδρογόνου σε συνοικία του Βερολίνου [31].

1.11 Πλεονεκτήματα του υδρογόνου έναντι των συμβατικών πηγών ενέργειας.

Σταεπόμενα αναφέρονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το υδρογόνο ως πρώτη ύλη παραγωγής ενέργειας, ως προς τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται σήμερα [29]:

- Ως προς οποιοδήποτε συμβατικό καύσιμο, το υδρογόνο παρουσιάζει την υψηλότερη ικανότητα παραγωγής ενέργειας ανά μονάδα βάρους του, η οποία ισούται περίπου με 120.7 kJ/kg. Η ενέργεια αυτή, είναι τρεις φορές μεγαλύτερη περίπου από την ενέργεια 1 kg συμβατικής βενζίνης.
- Κατά την καύση του (ή κατά την ηλεκτρόλυσή του μέσα σε κυψέλες καυσίμου), το υδρογόνο παράγει ελάχιστους ρύπους, οι οποίοι είναι πολύ λιγότεροι από αυτούς που παράγονται κατά την καύση των ορυκτών καυσίμων. Όσο περισσότερο «καθαρή» είναι η ποσότητα του υδρογόνου που καίγεται με το οξυγόνο, τόσο λιγότεροι ρύποι εκλύονται κατά την καύση αυτή. Παρουσία «καθαρού» οξυγόνου, η καύση του «καθαρού» υδρογόνου παράγει μόνο νερό και θερμότητα, ενώ όταν το συμμετέχον οξυγόνο αντιδρά σαν «ατμοσφαιρικό» παράγονται και ορισμένα οξειδία του αζώτου (λόγω της παρουσίας του αζώτου στον ατμοσφαιρικό αέρα). Οι ποσότητες όμως αυτές είναι πολύ μικρές για να επηρεάσουν σημαντικά την ατμόσφαιρα της γης, ακόμα και για μαζικής κλίμακας κατανάλωση του υδρογόνου.
- Η καύση (ή η ηλεκτρόλυση) του υδρογόνου με τον ατμοσφαιρικό αέρα παράγει σαν κύριο προϊόν της το νερό. Οι ποσότητες όμως αυτού, όπως και οι αντίστοιχες ποσότητες των οξειδίων του αζώτου, είναι πολύ μικρές, ακόμα και για μαζική κατανάλωση του υδρογόνου, ώστε να επηρεάσουν σημαντικά το γήινο περιβάλλον. Εξάλλου, η πλεονάζουσα ποσότητα του νερού που παράγεται κατά την ένωση του υδρογόνου με το οξυγόνο μέσα σε ενεργειακές διατάξεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για περαιτέρω σκοπούς (π.χ. άρδευση γης, υδροδότηση πόλεων από σταθερές διατάξεις παραγωγής ενέργειας υδρογόνου). Εκτός από αυτό, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, μια δυνατή μέθοδος παραγωγής του υδρογόνου είναι και η παραγωγή του μέσω της

ηλεκτρόλυσης του νερού, οπότε οι παραπάνω ποσότητες νερού που παράγονται από τη χρήση του μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν για την εκ νέου παραγωγή του, βάζοντας έτσι το παραγόμενο από αυτό νερό σε έναν ημιανανεώσιμο κύκλο ζωής. Η διαδικασία αυτή αναμένεται να εφαρμοστεί στη πράξη στα επόμενα χρόνια, με την αντίστοιχη ανάπτυξη των εναλλακτικών τεχνολογιών παραγωγής του μέσω ηλεκτρόλυσης (π.χ. χρήση ηλιακής ή αιολικής ενέργειας).

- Το υδρογόνο είναι το ίδιο ακίνδυνο, από πλευράς αυθόρμητης ανάφλεξης, σε σχέση με τα υπόλοιπα συμβατικά ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται σήμερα (π.χ. βενζίνη, πετρέλαιο, φυσικό αέριο κ.τ.λ.). Μάλιστα, κατά την απουσία ατμοσφαιρικού αέρα και υπό συνήθεις συνθήκες περιβάλλοντος ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $P = 1\text{atm}$), το υδρογόνο είναι λιγότερο εύφλεκτο από αυτά τα καύσιμα, έχοντας για θερμοκρασία αυθόρμητης ανάφλεξης του τους 585°C (αντίστοιχη θερμοκρασία αυθόρμητης ανάφλεξης της βενζίνης, απουσία ατμοσφαιρικού αέρα: $230\text{ }^{\circ}\text{C} - 480\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- Το υδρογόνο μπορεί να συμβάλει σταδιακά στη μείωση του ρυθμού κατανάλωσης των ορυκτών καυσίμων, επιφέροντας έτσι σημαντικές ωφέλειες στον περιβαλλοντικό, ενεργειακό αλλά και οικονομικό τομέα, μέσω της δημιουργίας νέων θέσεων εργασίας για τον τελευταίο. Αν και σε πολλές περιπτώσεις τα διάφορα ορυκτά καύσιμα χρησιμοποιούνται και τα ίδια σαν πρώτες ύλες για την παρασκευή του υδρογόνου, το ενεργειακό και περιβαλλοντικό όφελος που προκύπτει από τη χρησιμοποίηση του υδρογόνου ως φορέα ενέργειας είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των ορυκτών καυσίμων. Όπως έχουμε αναφέρει, η πιο αποδοτική και συμφέρουσα οικονομικά μέθοδος παρασκευής του υδρογόνου αυτή τη στιγμή, βασίζεται στην αναμόρφωση του φυσικού αερίου. Το φυσικό αέριο είναι ένα ορυκτό, το οποίο είναι αρκετά φθινό, πολύ αποδοτικό και υπάρχει ακόμα σε μεγάλες διαθέσιμες ποσότητες στη φύση. Βεβαίως η χρησιμοποίησή του δεν σημαίνει ότι δεν θα πρέπει να γίνει αξιοποίηση των διαφόρων ΑΠΕ για την παραγωγή του υδρογόνου, οι οποίες μάλιστα μελλοντικά θα πρέπει και να το αντικαταστήσουν σ' αυτήν τη λειτουργία. Η χρήση του πάντως, αποτελεί ένα καλό προσωρινό μέτρο για την παραγωγή υδρογόνου με περιβαλλοντικά φιλικούς τρόπους, μέχρις ότου η μαζική χρήση των διαφόρων ΑΠΕ για το σκοπό αυτό υλοποιηθεί.
- Τέλος, το υδρογόνο μπορεί να παρασκευαστεί με πολυάριθμες μεθόδους και σε οποιοδήποτε μέρος της γης και επομένως μπορεί να βοηθήσει πολλά κράτη που είναι «φτωχά» σε διαθέσιμα κοιτάσματα ορυκτών καυσίμων να αναπτύξουν τα δικά τους αυτόνομα και ολοκληρωμένα ενεργειακά συστήματα. Μέσου αυτού τα συγκεκριμένα κράτη, που ως γνωστόν είναι τα πολυπληθέστερα πάνω στον πλανήτη, θα μπορέσουν να αναπτύξουν τις δικές τους αυτόνομες ενεργειακές οικονομίες, ξεφεύγοντας από τον φαύλο κύκλο της ενεργειακής τους εξάρτησης από άλλα κράτη - προμηθευτές τους σε ορυκτά καύσιμα. Να αναφερθεί επίσης, ότι στα πλαίσια της ενεργειακής ανεξαρτησίας που προσφέρει το υδρογόνο ως καύσιμο ανήκει και η υψηλή αυτονομία και αυτοδιαχείριση που προσφέρει όταν καταναλώνεται στα πλαίσια ενός ενεργειακού συστήματος, η οποία συντελεί στο να προφυλάσσεται ικανοποιητικά το σύστημα αυτό όταν στο δίκτυό του συμβούν διάφορες καταστροφές λόγω δυσμενών γεγονότων (π.χ. πυρκαγιές, πλημμύρες, σεισμοί κ.τ.λ.), αφού η διακοπή της λειτουργίας μερικών τμημάτων του δεν έχει οπωσδήποτε σαν αποτέλεσμα την καθολική του κατάρρευση, μιας και τα διάφορα τμήματα που το αποτελούν είναι, λίγο ή περισσότερο ανεξάρτητα το ένα με το άλλο.

1.12 Μειονεκτήματα του υδρογόνου έναντι των συμβατικών πηγών ενέργειας.

Αναφορικά με τα μειονεκτήματα του υδρογόνου έναντι των υπολοίπων συμβατικών πηγών ενέργειας, τα περισσότερα από αυτά έχουν να κάνουν με την σχετικά πρόσφατη στροφή της έρευνας προς την αξιοποίηση του υδρογόνου ως καύσιμο, με αποτέλεσμα να μην έχουν ακόμα εξελιχθεί οι κατάλληλες τεχνικές, ώστε να είναι ικανό να αξιοποιηθεί σε μαζική κλίμακα στη πράξη. Συνοπτικά, τα μειονεκτήματα αυτά έχουν ως εξής [29]:

- Το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίζει σήμερα το υδρογόνο σαν καύσιμο, αλλά και γενικότερα ως βιομηχανικό προϊόν, είναι αυτό της αποτελεσματικής και ασφαλούς αποθήκευσής του. Δεδομένου ότι το υδρογόνο είναι ένα στοιχείο που σε αέρια κατάσταση είναι πολύ ελαφρύ, η συμπίεση μεγάλης ποσότητάς του σε πολύ μικρού μεγέθους δεξαμενές είναι ακόμα αρκετά δύσκολη, εξαιτίας των υψηλών πιέσεων που χρειάζονται γι' αυτό (ή αντίστοιχα εξαιτίας των πολύ χαμηλών θερμοκρασιών που χρειάζονται για την αποθήκευσή του σαν υγρό). Εκτός από αυτό, οι ακραίες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που απαιτούνται για την αέρια ή την υγρή του αποθήκευση, συνεπάγονται και την κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας για την επίτευξή τους, με αποτέλεσμα η αέρια ή η υγρή αποθήκευση του υδρογόνου να είναι αρκετά δαπανηρή σαν μέθοδος αποθήκευσής του. Για τον λόγο αυτό και η έρευνα που γίνεται σήμερα πάνω στην αποθήκευση του υδρογόνου έχει στραφεί προς νέες τεχνικές μεθόδους, οι οποίες αφενός έχουν σαν πεδίο αναφοράς τους την αποθήκευσή του σε αναδομημένα υλικά (αύξηση της ποσότητας αποθήκευσής του) και στην δέσμευσή του από στερεά υλικά τα οποία το αποθηκεύουν στη μάζα τους με τη μορφή «στερεού» (προσροφημένο ή απορροφημένο μεταξύ των στερεών τους μορίων). Η «στερεή» αποθήκευση του υδρογόνου στα συγκεκριμένα υλικά, έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνονται δραματικά οι ακραίες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που απαιτούνται κατά την αποθήκευσή του σαν υγρό ή σαν αέριο.
- Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει το υδρογόνο σαν καύσιμο παραγωγής ενέργειας είναι και το γεγονός, ότι το παγκόσμιο δίκτυο διανομής του προς το παρόν δεν υφίσταται, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μαζική κλίμακα και από όλες τις χώρες του κόσμου. Επιπλέον, λόγω της ανυπαρξίας του δικτύου διανομής του, το κόστος ανεφοδιασμού του υδρογόνου σε παγκόσμια κλίμακα παραμένει ακόμα υψηλό, μιας και οι διάφορες τεχνολογίες παραγωγής του μέσω ΑΠΕ δεν έχουν εξελιχθεί ακόμα σε ικανοποιητικό βαθμό. Το γεγονός όμως αυτό αναμένεται να αλλάξει στο μέλλον, όσο η κατανάλωσή του σαν καύσιμο θα αρχίσει να αυξάνεται και όσο η παραγωγή του από ΑΠΕ θα γίνεται όλο και περισσότερο φθηνότερη.
- Τέλος ένα άλλο πρόβλημα που αντιμετωπίζει σήμερα το υδρογόνο ως καύσιμο μαζικής παραγωγής ενέργειας, είναι και το αυξημένο κόστος των διαφόρων ενεργειακών διατάξεων που χρησιμοποιούνται για την αξιοποίησή του σαν καύσιμο (των κυψελών καυσίμου και των ΜΕΚ υδρογόνου). Η τεχνολογία των διατάξεων αυτών, προς το παρόν, δε μπορεί ακόμα να θεωρηθεί ολοκληρωτικά αξιόπιστη, μιας και κατά την εφαρμογή τους παρουσιάζονται ορισμένα τεχνικά και οικονομικής φύσης προβλήματα που δεν καθιστούν ικανή τη μαζική χρήση τους. Για παράδειγμα, διάφορες κυψέλες καυσίμου υδρογόνου (π.χ. κυψέλες καυσίμου για οικιακή ή μεταφορική χρήση), εμφανίζουν ακόμα αρκετά προβλήματα μη ανοχής σε «μη καθαρά» υδρογονούχα καύσιμα, δηλαδή σε υδρογονούχα καύσιμα που δεν περιέχουν το υδρογόνο σε μεγάλες περιεκτικότητες (ως γνωστόν οι κυψέλες αυτές μπορούν να λειτουργήσουν και με «μη

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

καθαρό» υδρογόνο π.χ. μεθανόλη, αιθανόλη κ.τ.λ.). Αυτό με τη σειρά του αυξάνει το κόστος χρήσης τους, λόγω της ανάγκης παραγωγής «καθαρού» υδρογόνου για μέγιστη αποδοτική λειτουργία τους, με αποτέλεσμα οι συγκεκριμένες κυψέλες καυσίμου να μην είναι ακόμα αρκετά ανταγωνιστικές σε σχέση με τις αντίστοιχες συμβατικές διατάξεις ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούνται σήμερα για την παραγωγή ενέργειας και να μην χρησιμοποιούνται ακόμα ευρέως. Επιπλέον, ένα ακόμα «αδύνατο» σημείο των κυψελών αυτών είναι, ότι τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή διαφόρων μηχανικών μερών είναι σχετικά ακριβά με αποτέλεσμα το κόστος χρήσης τους να αυξάνει ακόμα περισσότερο. Από την άλλη μεριά, τόσο στον τομέα της «καθαρότητας» των καυσίμων τους, όσο και στον τομέα των υλικών κατασκευής, οι ολόένα και περισσότερες ανακαλύψεις που γίνονται σήμερα από τους επιστήμονες που ασχολούνται με το συγκεκριμένο πεδίο δείχνουν, ότι στο μέλλον οι «απόγονες» ενεργειακές διατάξεις τους θα έχουν αντιμετωπίσει τα περισσότερα από τα προβλήματα αντιμετωπίζουν σήμερα.

1.13 Ασφάλεια κατά τη χρήση του υδρογόνου.

Στο ευρύ κοινό έχει αποκατασταθεί η άποψη ότι το υδρογόνο είναι επικίνδυνο για γενική χρήση, ένας μύθος που ξεκίνησε από την έκρηξη του γερμανικού αερόπλοιου με υδρογόνο, το 1937 στο Lakehurst του New Jersey. Πρόσφατα, όμως, βρέθηκε ότι η αιτία της έκρηξης οφειλόταν στο εξωτερικό ύφασμα του αερόστατου, που ήταν πολύ υψηλής ευφλεκτότητας. Στην πραγματικότητα φορτία με υγροποιημένο υδρογόνο έχουν ήδη διασχίσει 33 δισεκατομμύρια μίλια μεταφοράς. Σ' όλη αυτή τη διάρκεια δεν υπάρχει ούτε μια αναφορά απώλειας προϊόντος ή πυρκαγιάς.

Η βενζίνη, που είναι το κατεξοχήν αυτοκινούμενο καύσιμο, είναι 22 φορές πιο εκρηκτική και έχει πολύ χειρότερη αναφορά στην ιστορία της, ως προς το κίνδυνο που μπορεί να προκαλέσει. Το υδρογόνο, παρόλο που είναι εύφλεκτο, όταν αναφλέγεται καίει με καθαρή φλόγα και μόνο το ένα δέκατο της αποτελείται από υδρογονανθρακικής προέλευσης καύση. Η ενέργεια που παράγεται μ' αυτό τον τρόπο έχει τη τάση να διασκορπίζεται πολύ πιο γρήγορα από ότι εκείνη που είναι αποτέλεσμα καύσης της βενζίνης ή διαφόρων ελαίων καύσης[30].

Όπως κάθε άλλο καύσιμο ή φορέας ενέργειας, το υδρογόνο ενέχει κινδύνους, μπορεί κάτω από ορισμένες συνθήκες να οδηγήσει σε φωτιά ή και έκρηξη αν δεν ελέγχεται ή χρησιμοποιείται σωστά. Για το λόγο αυτό απαιτείται η κατανόηση των θεμάτων ασφάλειας που σχετίζονται με την παραγωγή, αποθήκευση, διανομή και χρήση του. Κατά την συγκριτική εκτίμηση της ασφάλειας ενός καυσίμου σε σχέση με τα άλλα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τόσο η φύση του καυσίμου όσο και οι συνθήκες έκλυσης.

1.13.1 Διαρροές σε σωλήνες υδρογόνου.

Ο κίνδυνος της χρήσης του υδρογόνου πρέπει να εξεταστεί σε σχέση με τα κοινά καύσιμα όπως η βενζίνη, το προπάνιο ή το φυσικό αέριο. Τα ειδικά φυσικά χαρακτηριστικά του υδρογόνου και οι ιδιότητες που του προσδίδουν είναι αρκετά διαφορετικές από τα κοινά καύσιμα. Ορισμένες από αυτές τις ιδιότητες καθιστούν το υδρογόνο δυνητικά λιγότερο επικίνδυνο, ενώ άλλα χαρακτηριστικά του υδρογόνου το καθιστούν πιο επικίνδυνο σε ορισμένες περιπτώσεις.

Λόγω του ότι το υδρογόνο είναι το μικρότερο μόριο από όλα τα αέρια έχει μεγαλύτερη τάση να διαφεύγει μέσα από μικρά ανοίγματα σε σχέση με άλλα υγρά ή αέρια καύσιμα. Με

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

βάση τις ιδιότητες του υδρογόνου, όπως η πυκνότητα, ιξώδες, και το συντελεστή διάχυσης στον αέρα, η ροπή του υδρογόνου να διαρρέει μέσα από τις οπές ή στις αρθρώσεις των αγωγών καυσίμου χαμηλής πίεσης μπορεί να είναι μόνο 1.26-2.8 φορές γρηγορότερη από τη διαρροή φυσικού αερίου μέσα από την ίδια οπή (και δεν είναι 3.8 φορές πιο γρήγορα, όπως συχνά θεωρείται όταν ο υπολογισμός βασίζεται αποκλειστικά σε συντελεστές διάχυσης).

Πρόσφατες μελέτες κάνουν λόγο για απώλεια 0.1% αερίου υδρογόνου από το υπάρχον βιομηχανικό πλέγμα διανομής υδρογόνου στη Γερμανία. Αυτό είναι το μόνο στοιχείο όσον αφορά τις απώλειες για τις σωληνώσεις υδρογόνου. Είναι ενδιαφέρον να εξεταστεί η διαρροή των αγωγών φυσικού αερίου. Η διαρροή μεθανίου υπολογίστηκε από τις ρωσικές σωληνώσεις φυσικού αερίου, οι οποίες καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις, και βρέθηκε περί τα 0.7% (με διακύμανση 0.4-1.6%) συμπεριλαμβανομένων των συμπιεστών, των βαλβίδων και των μηχανών. Αναφέρθηκαν επίσης 0.5-0.8% απώλειες για τα δίκτυα διανομής χαμηλής πίεσης NG από αμερικάνικα έντυπα. Εντούτοις για διαφορετικούς λόγους, π.χ. ασφάλεια, οι σωληνώσεις υδρογόνου χτίζονται από διαφορετικά υλικά συναρμολόγησης έναντι των αγωγών φυσικού υγραερίου. Επομένως είναι πιθανό ότι η διαρροή των αγωγών φυσικού αερίου μπορεί τουλάχιστον να «αγγίζει» τη διαρροή υδρογόνου, η οποία προτείνεται 1.7%, με μια διακύμανση (0.9%-2.4%) για τα μη βιομηχανικά συστήματα σωληνώσεων υδρογόνου.

Πειράματα έχουν δείξει ότι η ροή από αγωγούς φυσικού αερίου είναι στρωτή στις περισσότερες διαρροές των κατοικιών. Επειδή το φυσικό αέριο έχει πάνω από τρεις φορές τη θερμογόνο δύναμη ανά μονάδα όγκου, διαρροή φυσικού αερίου θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη απελευθέρωση ενέργειας από μια διαρροή υδρογόνου. Η διαρροή υδρογόνου από χώρο υψηλής πίεσης είναι συνήθως ηχητική. Κάτω από αυτές τις συνθήκες η παροχή όγκου είναι περίπου 2.8 φορές μεγαλύτερη, ενώ η παροχή ενέργειας 12% μικρότερη, σε σχέση με παρόμοια διαρροή μεθανίου.

Οι ανωστικές δυνάμεις παίζουν ιδιαίτερο ρόλο στην ατμοσφαιρική διασπορά σε περίπτωση ατυχήματος. Εάν είναι θετικές τότε αφενός ενισχύουν την διάχυση και αφετέρου οδηγούν σε μετατόπιση του νέφους καυσίμου αέρα προς τα άνω. Η ύπαρξη μεγάλων ανωστικών δυνάμεων οδηγεί σε ταχεία αραιώση του νέφους, που σημαίνει ταχεία εμφάνιση εύφλεκτου νέφους αλλά και μικρό χρόνο παραμονής του. Αν ο χώρος του ατυχήματος είναι ανοικτός, τότε οι μεγάλες ανωστικές δυνάμεις οδηγούν σε περιορισμό της οριζόντιας επέκτασης του επικίνδυνου νέφους, καθώς αυτό μετατοπίζεται προς τα πάνω. Εάν ο χώρος του ατυχήματος είναι κλειστός, τότε θα πρέπει να υπάρχει τεχνολογία περιορισμού του ρίσκου (π.χ. εξαναγκασμένη κυκλοφορία αέρα). Εάν οι ανωστικές δυνάμεις είναι αρνητικές τότε τείνουν να οδηγήσουν το βαρύ νέφος προς τα κάτω, ενώ ταυτόχρονα επιβραδύνουν σημαντικά τον ρυθμό αραιώσής του. Ως αποτέλεσμα το βαρύ νέφος μπορεί να επεκταθεί σταδιακά σε μεγάλες οριζόντιες αποστάσεις, γεγονός που αυξάνει το ρίσκο.

Το υδρογόνο σε αέρια μορφή σε συνθήκες περιβάλλοντος είναι λόγω πυκνότητας κατά πολύ πιο ανωστικό από το μεθάνιο, προπάνιο και βενζίνη και κατά συνέπεια σε περίπτωση ατυχήματος, τείνει να διαχυθεί προς τα πάνω πολύ πιο γρήγορα από τα άλλα καύσιμα. Σε περίπτωση κρυογονικής έκλυσης το πολύ κρύο μίγμα ατμών υδρογόνου και αέρα θα μετακινηθεί προς τα κάτω. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να σημειωθεί ότι οι κορεσμένοι ατμοί υδρογόνου που θα δημιουργηθούν μετά από μία κρυογονική έκλυση έχουν πυκνότητα περίπου ίση με αυτήν του αέρα, ενώ για μεθάνιο η αντίστοιχη πυκνότητα είναι κατά πολύ μεγαλύτερη του αέρα. Οι ανωστικές δυνάμεις είναι ασήμαντες, όταν οι συγκεντρώσεις είναι πολύ μικρές (πυκνότητα του μίγματος αέρα καυσίμου είναι περίπου ίση με αυτήν του αέρα) και επίσης όταν η ορμή της έκλυσης είναι πολύ μεγάλη.

Κάποιοι τύποι χάλυβα και υψηλής αντοχής είναι επιρρεπείς σε αστοχία λόγω ευθραυστότητας εξαιτίας του υδρογόνου. Η παρατεταμένη έκθεση σε υδρογόνο, ιδιαίτερα σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, μπορεί να προκαλέσει στο χάλυβα απώλεια της αντοχής του

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

και να οδηγήσει σε αστοχία του υλικού. Ωστόσο, οι περισσότερες άλλες κατασκευές, δεξαμενές, σωλήνες και τα άλλα υλικά δεν είναι επιρρεπή σε αστοχία ευθραυστότητας λόγω του υδρογόνου. Ως εκ τούτου, με την κατάλληλη επιλογή των υλικών, οι κίνδυνοι για την ασφάλεια από αστοχία ευθραυστότητας λόγω του υδρογόνου θα μπορούσαν να αποφευχθούν.

Σε περίπτωση που θα παρουσιαστεί διαρροή για οποιονδήποτε λόγο, το υδρογόνο θα διαλυθεί στον αέρα πολύ πιο γρήγορα από οποιοδήποτε άλλο καύσιμο, μειώνοντας έτσι γρήγορα τα επίπεδα επικινδυνότητας. Το υδρογόνο είναι το πιο δυναμικό και πιο διαχυτό από τη βενζίνη, το προπάνιο ή το φυσικό αέριο. Το μείγμα υδρογόνου/αέρα μπορεί να καεί σε σχετικά ευρεία αναλογία όγκων, μεταξύ 4% και 75% του υδρογόνου στον αέρα. Τα άλλα καύσιμα έχουν πολύ χαμηλότερο εύρος ευφλεκτότητας: το φυσικό αέριο 5,3-15%, το προπάνιο 2,1-10%, και η βενζίνη 1-7,8%.

Σε πολλές πραγματικές καταστάσεις διαρροής, η βασική παράμετρος που καθορίζει εάν μια διαρροή θα αναφλεγεί είναι το κατώτερο όριο ευφλεκτότητας, και κατώτατο όριο ευφλεκτότητας υδρογόνου είναι 4 φορές υψηλότερο από εκείνο της βενζίνης, 1,9 φορές υψηλότερο από αυτό του προπανίου, και ελαφρώς μικρότερο από αυτό του φυσικού αερίου. Το υδρογόνο έχει πολύ χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης (0,02 MJ), περίπου μία τάξη μεγέθους χαμηλότερη από άλλα καύσιμα και είναι συνάρτηση του λόγου καυσίμου/αέρα (για το υδρογόνο πρέπει να φθάσει τουλάχιστον περίπου στο 25-30%). Στο χαμηλότερο όριο ευφλεκτότητας, του υδρογόνου η ενέργεια ανάφλεξης είναι συγκρίσιμη με εκείνη του φυσικού αερίου. Το υδρογόνο έχει ταχύτητα φλόγας επτά φορές πιο γρήγορη από ότι το φυσικό αέριο ή τη βενζίνη.

Επομένως, μια φλόγα υδρογόνου είναι πιο πιθανό να προχωρήσει σε μια ανάφλεξη ή ακόμη και μια έκρηξη από άλλα καύσιμα, αλλά η πιθανότητα μιας τέτοιας έκρηξης εξαρτάται από την ακριβή αναλογία καυσίμου/αέρα, τη θερμοκρασία και τη γεωμετρία του κλειστού χώρου. Έκρηξη του υδρογόνου στην ανοικτή ατμόσφαιρα είναι εξαιρετικά απίθανη. Το κάτω όριο του λόγου καυσίμου/αέρα για την εκρηκτικότητα του υδρογόνου είναι 13-18%, το οποίο είναι δύο φορές υψηλότερο από εκείνο του φυσικού αερίου και 12 φορές υψηλότερο από εκείνο της βενζίνης. Επειδή το κατώτατο όριο ευφλεκτότητας είναι 4%, μια έκρηξη είναι δυνατή μόνο υπό τα πιο απίθανα σενάρια, π.χ., το υδρογόνο θα πρέπει πρώτα να συσσωρεύεται και να φθάσει σε συγκέντρωση 13% σε κλειστό χώρο χωρίς ανάφλεξη, και μόνο τότε μια πηγή ανάφλεξης θα πρέπει να ενεργοποιηθεί. Σε περίπτωση που συμβεί μια έκρηξη, το υδρογόνο έχει τη χαμηλότερη εκρηκτική ενέργεια ανά μονάδα αποθηκευμένης ενέργειας, και μία δεδομένη ποσότητα υδρογόνου θα έχει 22 φορές λιγότερο εκρηκτική ενέργεια από τον ίδιο όγκο γεμάτο με ατμούς βενζίνης. Η φλόγα του υδρογόνου είναι σχεδόν αόρατη, το οποίο μπορεί να είναι επικίνδυνο επειδή οι άνθρωποι στην περιοχή που γειτνιάζει με μια φλόγα υδρογόνου μπορεί να μην γνωρίζουν καν ότι υπάρχει φωτιά. Αυτό μπορεί να διορθωθεί με την προσθήκη χημικών ουσιών που θα παρέχουν την απαραίτητη φωτεινότητα. Ο χαμηλός συντελεστής εκπομπής της φωτιάς υδρογόνου σημαίνει ότι τα υλικά και οι άνθρωποι από γύρω θα είναι πολύ λιγότερο πιθανό να προκληθεί ανάφλεξη και / ή να προκληθεί ζημιά από ακτινοβολούμενη μεταφορά θερμότητας. Οι καπνοί και η αιθάλη από μια πυρκαγιά βενζίνης αποτελούν κίνδυνο για οποιονδήποτε εισπνεύσει τον καπνό, ενώ οι πυρκαγιές υδρογόνου παράγουν μόνο υδρατμούς (εφόσον δεν καίγονται δευτερογενή υλικά)[31,32].

Το υγρό υδρογόνο παρουσιάζει μια άλλη σειρά ζητημάτων ασφάλειας, όπως ο κίνδυνος εγκαυμάτων λόγω του κρύου, καθώς και την αυξημένη διάρκεια διαρροής ενός κρυογονικού καυσίμου. Μια μεγάλη διαρροή υγρού υδρογόνου έχει κάποια χαρακτηριστικά της διαρροής ενός υγρού καυσίμου όπως η βενζίνη, όμως θα διαλυθεί πολύ γρηγορότερα στον αέρα. Ένας άλλος πιθανός κίνδυνος είναι μια βίαιη έκρηξη ενός ζέοντος υγρού και μετατροπή του σε ατμό σε περίπτωση εκτόνωσης λόγω αποτυχίας βαλβίδας ανακούφισης. Ως συμπέρασμα το υδρογόνο παρουσιάζει ανάλογη επικινδυνότητα με το φυσικό αέριο ή την βενζίνη.



Εικόνα 10: Διαρροή καυσίμου υδρογόνου στο αριστερό όχημα (α) και βενζίνης στο δεξί όχημα (β) σε δύο στιγμιότυπα, μετά 3sec και μετά από 1min από έκρηξη.

1.13.2 Μέτρα Ασφαλείας.

Απαραίτητες συνθήκες για την εκδήλωση πυρκαγιάς ή εκρήξεως τρία στοιχεία είναι απαραίτητα: εύφλεκτα υλικά, οξυγόνο, μια πηγή καύσης. Διαφορετικά μέτρα ασφαλείας λαμβάνονται σε περιπτώσεις διαρροής σε κλειστούς χώρους, σε ανοικτούς χώρους και για την καταπολέμηση της πυρκαγιάς σε επόμενο στάδιο.

Μέτρα σε περίπτωση διαρροής σε κλειστό χώρο:

- Γίνεται προσπάθεια ελέγχου της διαρροής (από την πηγή) και απομάκρυνσης της πηγής ανάφλεξης, ενώ παράλληλα λαμβάνεται μέριμνα για τον αερισμό του χώρου,
- Γίνεται προσπάθεια διασφάλισης της ατμόσφαιρας με αισθητήρες, π.χ. με explosimeter, αισθητήρες,
- Η εισαγωγή στο χώρο από άνθρωπο γίνεται μόνο με αυτόνομη αναπνευστική συσκευή.

Μέτρα σε περίπτωση διαρροής σε ανοιχτό χώρο:

- εξασφαλίζουμε ότι η ατμόσφαιρα δεν είναι επικίνδυνη, π.χ. explosimeter, αισθητήρες
- απομακρύνουμε πηγές ανάφλεξης
- προσπαθούμε να σταματήσουμε τη διαρροή

Μέτρα για την καταπολέμηση πυρκαγιάς:

- εφόσον είναι δυνατόν σταματάμε τη διαρροή
- απομακρύνουμε το δοχείο από τη φωτιά ή το ψύχουμε με κατάβρεξη από προστατευμένη θέση
- εάν το αέριο έχει αναφλεγεί το σβήνουμε μόνον εάν αυτό είναι δυνατό και απολύτως αναγκαίο
- μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλα τα γνωστά μέτρα πυρόσβεσης
- είναι εξαιρετικά εύφλεκτο, η φλόγα του είναι αόρατη
- η θερμική επίδραση της πυρκαγιάς μπορεί να προκαλέσει τη διάρρηξη φιαλών/συστοιχιών

Χειρισμός των φιαλών-συστοιχιών:

- Σύνδεση του μειωτήρα με τη φιάλη/συστοιχία, καθώς υπάρχει ο κίνδυνος ανάφλεξης του εξερχόμενου υδρογόνου (κίνηση πολύ συνήθης σε άλλα αέρια).

- Ανοίγουμε τα κλείστρα των φιαλών/συστοιχιών μόνο εφόσον έχουμε τοποθετήσει τους κατάλληλους μειωτήρες με τα σταθεροποιητικά παρεμβύσματα.
- Ελέγχουμε τις συνδέσεις ως προς τη στεγανότητά τους.
- Μετά το τέλος των εργασιών κλείνουμε τα κλείστρα των φιαλών/συστοιχιών.

Προσωπικά μέτρα ασφαλείας:

- Χρησιμοποιούμε παπούτσια με αγωγίμες σόλες.

Χρήση και αποθήκευση:

- γειώνουμε τον εξοπλισμό (κέντρα, συστοιχίες, δίκτυα)
- αποφεύγουμε την εισροή νερού στα δοχεία με υδρογόνο (κλείστρα κλειστά)
- χρησιμοποιούμε τον κατάλληλο εξοπλισμό (κέντρα, σωληνώσεις, φιάλες),
- απομακρύνουμε πιθανές πηγές ανάφλεξης
- δεν το αποθηκεύουμε μαζί με οξειδωτικά και εύφλεκτα αέρια (π.χ. Οξυγόνο),
- δεν το αποθηκεύουμε σε θερμοκρασία υψηλότερη των 50 οC,
- καθαρίζουμε τον εξοπλισμό από τον αέρα πριν από τη διοχέτευση υδρογόνου (purging),
- το χρησιμοποιούμε μόνο για εφαρμογές που προορίζεται (π.χ. όχι φούσκωμα μπαλονιών),
- όπου είναι απαραίτητο χρησιμοποιούμε επιπρόσθετα μέτρα ασφαλείας (π.χ. αισθητήρες),
- χρησιμοποιούμε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό αντιακρηκτικού τύπου,
- τηρούμε αυστηρά τις προβλεπόμενες ζώνες ασφαλείας (Ex-Zones),

1.14 Αποθήκευση σε μπαταρίες.

Η αποθήκευση του υδρογόνου αποτελεί σημαντικό ανασταλτικό παράγοντα στην μαζική παραγωγή του. Ένας συμβατικός τρόπος αποθήκευσης ενέργειας είναι οι μπαταρίες. Οι μπαταρίες αποτελούν τη δεξαμενή, μέσα στην οποία διοχετεύεται το ρεύμα που παράγεται από τις φωτοβολταϊκές πλάκες. Υπάρχουν πολλά είδη μπαταριών από άποψη μεγέθους και κατασκευής. Δεν είναι όμως όλα τα είδη κατάλληλα. Αν χρησιμοποιηθούν μπαταρίες μόλυβδου (αυτοκινήτου), τότε δεν θα δίνεται η δυνατότητα άντλησης του ρεύματος, που φαίνεται ότι μπορεί να μας δώσει η μπαταρία αυτή. Απλά, γιατί αν αντληθεί ως κάτω από το 40% της χωρητικότητάς της, τότε υπάρχει κίνδυνος αχρήστευσης και η απόδοσή της θα πέσει κατακόρυφα.

Σε περίπτωση κλειστού τύπου μπαταριών που περιέχουν gel ή σωληνωτού τύπου, που είναι όμως πιο ακριβές από τις κοινές, έχουμε τη δυνατότητα να αντλούμε το περιεχόμενο τους από το 0% πάρα πολλές φορές χωρίς να καταστρέφονται και με δυνατότητα επαναφόρτισής τους ως το 100% με σταθερή απόδοση. Αν φορτίζονται μερικώς καθυστερείται ο χρόνος "γήρανσης" της μπαταρίας όπως και αν βρίσκονται σε δροσερό περιβάλλον, πρέπει εκ τούτου να αποθηκεύονται 40% περίπου φορτισμένες σε δροσερό μέρος. Το ότι πρέπει να φορτίζονται μερικώς για να μειωθεί ο χρόνος γήρανσης της μπαταρίας που αποτελεί μειονέκτημα από μόνο του ή τα υπόλοιπα που πάλι αποτελούν μειονεκτήματα αφού ο τύπος της μπαταρίας έχει τέτοιες απαιτήσεις για την ορθή λειτουργία του σε βάθος χρόνου όπως φύλαξη σε δροσερό μέρος ή η αποθήκευση τους στο 40% της χωρητικότητάς τους. Οι κρύσταλλοι είναι προϊόντα ηλεκτροχημικών αντιδράσεων κατά την λειτουργία της μπαταρίας που σε βάθος χρόνου

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

μειώνουν την διάρκεια ζωής της και την απόδοση της κάτι που σε καμία περίπτωση δεν συμβαίνει στις φιάλες υδρογόνου [37].

2 ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Η ονομασία του υδρογόνου δεν είναι τυχαία. Όταν αυτό - το πιο ελαφρύ στοιχείο της φύσης - ενώνεται σε αναλογία 2:1 με το οξυγόνο, γεννάει την πηγή της ζωής, το νερό. Υπό ειδικές συνθήκες όμως γεννάει και ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτή η λιγότερο γνωστή ιδιότητά του γεννάει την ελπίδα μας για ένα ενεργειακά αστείρευτο μέλλον. Το μυστικό κρύβεται στα ηλεκτροπαραγωγά στοιχεία χημικής αντίδρασης, τα fuel cells, γνωστά και ως «μπαταρίες καυσίμου». Τα fuel cells είναι κληρονομιά του διαστημικού προγράμματος «Apollo» που έστειλε τον άνθρωπο στο φεγγάρι. Είχαν αναπτυχθεί από τη NASA, βάσει θεωρίας του 1850 και πρωτοτύπων της General Electric. Η διαφορά τους από τους συμβατικούς κινητήρες είναι ότι, αντί να κινούν πιστόνια με διαδοχικές εκρήξεις αερίων από την καύση υδρογονανθράκων, αφαιρούν μέσω καταλύτη ηλεκτρόνια από το υδρογόνο και παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο κινεί τα πιστόνια των οχημάτων. Τα εναπομείναντα ιόντα υδρογόνου (πρωτόνια) ενώνονται με οξυγόνο, οπότε αυτό που αποβάλλεται είναι νερό. Η ισχύς που παράγουν είναι διπλάσια εκείνης ενός αντίστοιχου βενζινοκινητήρα, και μάλιστα αθόρυβα.

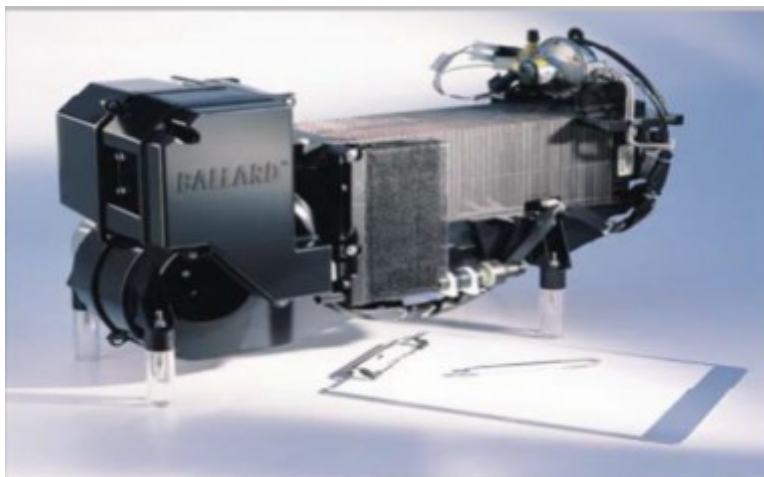
2.1 Εισαγωγή στις κυψέλες καυσίμου (ΚΚ).

Οι κυψέλες καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές συσκευές που μετατρέπουν την χημική ενέργεια του καυσίμου απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Επειδή τα ενδιάμεσα στάδια της παραγωγής θερμότητας και του μηχανικού έργου αποφεύγονται η απόδοση των ΚΚ δεν περιορίζεται από την απόδοση του θερμοδυναμικού κύκλου Carnot. Έτσι επιτυγχάνονται υψηλότερες αποδόσεις και επομένως μειωμένοι ρύποι και μειωμένο κόστος καυσίμου. Ο ηλεκτρισμός παράγεται με τη μορφή συνεχούς ρεύματος.

Τα βασικά μέρη μιας κυψέλης καυσίμου είναι ο ηλεκτρολύτης, ο οποίος είναι ικανός να επιτρέπει σε ιόντα να διαπερνούν τα ηλεκτρόδια (άνοδος και κάθοδος) τα οποία κατασκευάζονται από πορώδη αγώγιμα υλικά με στόχο την διάχυση του καυσίμου (πχ Υδρογόνου) και της οξειδωτικής ουσίας καθώς και την αγωγή των ηλεκτρονίων [33].

- Οι λειτουργίες του ηλεκτρολύτη είναι να διευκολύνει την ηλεκτροχημική αντίδραση, να επιτρέπει στα ιόντα, είτε θετικά είτε αρνητικά, ανάλογα με το είδος της κυψέλης να τον διαπερνούν, να διευκολύνει την μεταφορά των αντιδρώντων ουσιών από και προς τα ηλεκτρόδια και ταυτόχρονα να αποτελεί ένα φυσικό εμπόδιο που να αποτρέπει την απευθείας ανάμειξη του καυσίμου με την οξειδωτική ουσία.
- Οι λειτουργίες των ηλεκτροδίων είναι να παρέχουν την επιφάνεια στην οποία πραγματοποιείται η ηλεκτροχημική αντίδραση, να παρέχουν ηλεκτρική σύνδεση με το φορτίο, να μοιράζουν τις ουσίες που αντιδρούν ομοιόμορφα και να οδηγούν τα προϊόντα της αντίδρασης στην έξοδο της ΚΚ. Για τους παραπάνω λόγους κατασκευάζονται από πορώδη αγώγιμα υλικά [34].

Το fuel cell μπορεί να συγκριθεί με μία μπαταρία, η οποία μπορεί να επαναφορτίζεται όταν καταναλώνουμε ισχύ από αυτή. Σαν αποτέλεσμα τα fuel cells μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδοσία διαφορετικών ηλεκτρικών εφαρμογών, όπως κομπιούτερ, αυτοκίνητα, γεννήτριες ισχύος, τόσο οικιακές όσο και βιομηχανικού μεγέθους και άλλα μικρά ηλεκτρονικά.



Εικόνα 11: Εργαστηριακή Μονάδα FuelCell [35]

2.2 Ιστορική Εξέλιξη κυψελών καυσίμου.

Η πρώτη κυψέλη καυσίμων φτιάχθηκε το 1839 από τον Sir William Grove, έναν Ουαλλό δικαστή και πειραματικό επιστήμονα. Όμως σοβαρό ενδιαφέρον για τη κυψέλη καυσίμων ως πρακτική γεννήτρια δεν άρχισε παρά μόνο τη δεκαετία του '60, όταν επέλεξε το διαστημικό πρόγραμμα των ΗΠΑ τις κυψέλες καυσίμων κι όχι την επικίνδυνη πυρηνική ενέργεια και την ακριβότερη ηλιακή ενέργεια. Οι κυψέλες καυσίμων εφοδίασαν ενέργεια το διαστημικό σκάφος Gemini και Apollo, και παρέχουν ακόμα ηλεκτρική ενέργεια και νερό για το Διαστημικό Λεωφορείο.

Οι κυψέλες καυσίμων μπορούν να χρησιμοποιηθούν με διάφορα καύσιμα και μάλιστα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το υδρογόνο είναι το αφθονότερο στοιχείο στη Γη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα. Οι κυψέλες καυσίμων μπορούν επίσης να χρησιμοποιήσουν καύσιμα που περιέχουν υδρογόνο, συμπεριλαμβανομένης της μεθανόλης, της αιθανόλης, του φυσικού αερίου, και των ορυκτών καυσίμων ακόμη όπως η βενζίνη ή το ντίζελ. Τα καύσιμα που περιέχουν υδρογόνο απαιτούν γενικά έναν "μετασχηματιστή καυσίμου" που θα εξάγει από το καύσιμο το υδρογόνο. Η ενέργεια θα μπορούσε επίσης να παρασχεθεί από τη βιομάζα, τον αέρα, την ηλιακή ενέργεια ή άλλες ανανεώσιμες πηγές. Οι κυψέλες καυσίμων σήμερα λειτουργούν με πολλά διαφορετικά καύσιμα, ακόμη και με αέριο από τις εγκαταστάσεις σκουπιδιών και της επεξεργασίας απόβλητου ύδατος. Επίσης η δύναμη του αέρα, οι παλίρροιες και οι υδροηλεκτρικοί στρόβιλοι μπορούν επίσης να δημιουργήσουν ηλεκτρική ενέργεια για να χωρίσουν το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο. Όταν το υδρογόνο παράγεται από τον ήλιο ή άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καλείται "ηλιακό-υδρογόνο".

Κατά τη χρήση καυσίμων εκτός από το καθαρό υδρογόνο, απαιτείται ένας μετασχηματιστής ή επεξεργαστής καυσίμων. Ο μετασχηματιστής καυσίμου είναι μια συσκευή που παράγει υδρογόνο από καύσιμα όπως η βενζίνη, η μεθανόλη, η αιθανόλη ή η νάφθα. Τρία βασικά σχέδια μετασχηματιστών αξιολογούνται ως κατάλληλα για τις κυψέλες καυσίμων για χρήση τους σε οχήματα: Υπάρχουν μετασχηματιστές ατμού, μερικής οξείδωσης και αυτοθερμικού μετασχηματιστή.

Οι μετασχηματιστές ατμού συνδυάζουν τα καύσιμα με τον ατμό και τη θερμότητα για να παραγάγουν το υδρογόνο. Η θερμότητα που απαιτείται για να ενεργοποιηθεί το σύστημα λαμβάνεται από την καύση των καυσίμων ή του πλεονάζοντος υδρογόνου από την έξοδο των κυττάρων καυσίμων.

Οι μετασχηματιστές μερικής οξείδωσης συνδυάζουν χημικά τα καύσιμα με το οξυγόνο για να παραγάγουν μονοξείδιο υδρογόνου και άνθρακα. Το μονοξείδιο του άνθρακα αντιδρά

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

έπειτα με τον ατμό για να παραγάγει περισσότερο υδρογόνο. Η μερική οξείδωση ελευθερώνει θερμότητα, η οποία συλλαμβάνεται και χρησιμοποιείται αλλού στο σύστημα.

Οι αυτοθερμικοί μετασχηματιστές συνδυάζουν χημικά τα καύσιμα και με τον ατμό και με το οξυγόνο έτσι ώστε η αντίδραση να είναι σε θερμική ισορροπία. Ο αυτοθερμικός μετασχηματισμός, ενώ δεν είναι πλήρως αναπτυγμένος όσο οι άλλοι, προσφέρει την περισσότερη ευελιξία στη διαχείριση της θερμότητας. Γενικά, η μεθανόλη και η βενζίνη μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιαδήποτε από τα τρία σχέδια μετασχηματιστών. Οι διαφορές στη χημική φύση των καυσίμων, εντούτοις, μπορούν να ευνοήσουν ένα σχήμα παραγωγής πίο πολύ από ένα άλλο.

Τα αυτοκίνητα που κάνουν χρήση κυψέλης καυσίμου είναι μια ελκυστική πρόοδος ως προς τα ηλεκτρικά που απαιτούν μπαταρίες. Προσφέρουν τα ίδια πλεονεκτήματα με εκείνα των οχημάτων που φέρουν μπαταρίες αλλά μπορούν επίσης να ανεφοδιαστούν σε καύσιμο γρήγορα και δίνουν τη δυνατότητα μεγαλύτερης διανυόμενης απόστασης μεταξύ των ανεφοδιασμών. Οι κυψέλες καυσίμων που χρησιμοποιούν το υδρογόνο ως καύσιμο θα είχαν μηδενικές εκπομπές καυσαερίων και θα είναι επίσης αποδοτικότερες από τα αυτοκίνητα που βασίζονται σε μπαταρίες. Επιπλέον, τα αυτοκίνητα των κυψελών καυσίμων θα μπορούσαν να παραγάγουν λιγότερα "σε όλο το σύστημα της παραγωγής" αέρια του θερμοκηπίου -- λαμβάνοντας υπόψη όλες τις εκπομπές που συνδέθηκαν με την επεξεργασία των καυσίμων και τη χρήση τους. Οι μελέτες από τις αυτοκινητοβιομηχανίες όπως η General Motors έδειξαν ότι οι μηχανές αυτοκινήτων κυψέλης καυσίμων θα μπορούσαν να παραχθούν σχεδόν με την ίδια τιμή όπως μια μηχανή εσωτερικής καύσεως.

Η πρώτη κυψέλη καυσίμων φτιάχτηκε το 1839 από τον Sir William Grove, έναν Ουαλλό δικαστή και πειραματικό επιστήμονα. Όμως σοβαρό ενδιαφέρον για τη κυψέλη καυσίμων ως πρακτική γεννήτρια δεν άρχισε παρά μόνο τη δεκαετία του '60, όταν επέλεξε το διαστημικό πρόγραμμα των ΗΠΑ τα κυψέλες καυσίμων κι όχι την επικίνδυνη πυρηνική ενέργεια και την ακριβότερη ηλιακή ενέργεια. Οι κυψέλες καυσίμων εφοδίασαν ενέργεια το διαστημικό σκάφος Gemini και Apollo, και παρέχουν ακόμα ηλεκτρική ενέργεια και νερό για το Διαστημικό Λεωφορείο. Οι κυψέλες έχουν μια απλή δομή. Μια κυψέλη περιέχει τρία στρώματα, το ένα δίπλα στο άλλο. Το πρώτο στρώμα είναι η άνοδος, το δεύτερο ο ηλεκτρολύτης και το τρίτο η κάθοδος. Η άνοδος και η κάθοδος παίζουν το ρόλο του καταλύτη. Το μεσαίο στρώμα αποτελείται από ένα φορέα που απορροφάει τον ηλεκτρολύτη. Χρησιμοποιούνται διάφορες ουσίες σαν ηλεκτρολύτες. Άλλες ουσίες είναι υγροί ηλεκτρολύτες και κάποιοι είναι σε στερεή μορφή με μια μεμβρανώδη δομή.

2.3 Αρχή λειτουργίας.

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

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

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:

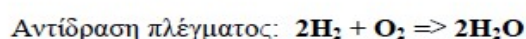
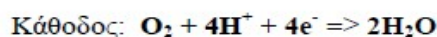
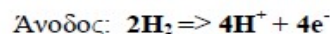
- Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)
- Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)
- Κυψέλες καυσίμου αλκαλίων (AFC)
- Κυψέλες καυσίμου ανθρακικών αλάτων (MCFC)
- Κυψέλες καυσίμου στερεοποιημένων οξειδίων (SOFC)
- Κυψέλες καυσίμου μεθανόλης (DMFC)

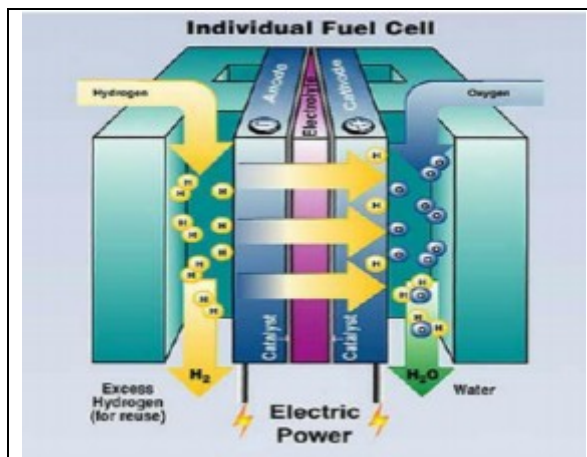
Ο ηλεκτρολύτης καθορίζει τις χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στην κυψέλη καυσίμου, τη θερμοκρασία λειτουργίας της, τον τύπο του καταλύτη που απαιτείται, το καύσιμο που χρησιμοποιείται, και άλλες παραμέτρους. Τα χαρακτηριστικά αυτά με τη σειρά τους καθορίζουν τις εφαρμογές για τις οποίες είναι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

Όλα τα fuel cells μπορούν να αναπαρασταθούν με την ιδέα μιας ανόδου και μιας καθόδου. Όπως φαίνεται στην Εικ.10, ένα fuel cell αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια, μία άνοδο και μία κάθοδο. Η άνοδος που είναι το αρνητικό ηλεκτρόδιο, και η κάθοδος, το θετικό ηλεκτρόδιο, βρίσκονται τοποθετημένα το ένα απέναντι από το άλλο και γύρω από έναν ηλεκτρολύτη, ο οποίος λέγεται αλλιώς μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (proton exchange membrane, PEM). Η μεμβράνη αυτή άγει μόνο θετικά ιόντα. Υπάρχει επίσης ένας καταλύτης, ο οποίος χρησιμοποιείται για να επιταχύνει τη διαδικασία της αντίδρασης, χωρίς να επηρεάζει την άνοδο ή την κάθοδο. Ο καταλύτης είναι συνήθως μια σκληρή και πορώδης σκόνη που καλύπτει χαρτί άνθρακα ή ύφασμα έτσι ώστε η μέγιστη δυνατή επιφάνεια να είναι εκτεθειμένη στο υδρογόνο ή στο οξυγόνο.

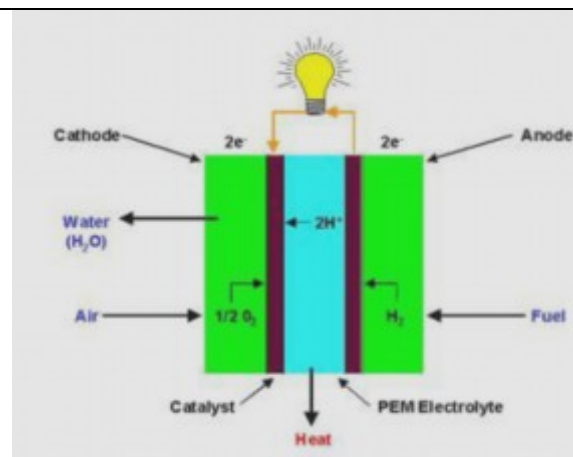
Αυτός ο συγκεκριμένος τύπος fuel cell που παρουσιάστηκε στην Εικ.10 ονομάζεται πολυμερούς ηλεκτρολυτικής μεμβράνης (polymer electrolytic membrane – PEM). Στην Εικ.11, αέριο υδρογόνο τροφοδοτείται στην άνοδο και αέριο οξυγόνο στην κάθοδο. Αντιδρώντας στην πίεση τους, τα άτομα υδρογόνου εξαναγκάζονται να περάσουν στον καταλύτη. Από τη στιγμή που θα έρθει σε επαφή με τον καταλύτη το υδρογόνο σχηματίζει δύο ιόντα υδρογόνου και δύο ηλεκτρόνια. Τα πρωτόνια, τα θετικά φορτισμένα ιόντα και τα ηλεκτρόνια, τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα, μεταβαίνουν στην κάθοδο. Τα ηλεκτρόνια, περνούν σε ένα εξωτερικό κύκλωμα, δημιουργώντας μια ροή ρεύματος, που παρέχει ισχύ στο ηλεκτρικό φορτίο [33].

Στην πλευρά της καθόδου, το αέριο οξυγόνο σπρώχνεται στον καταλύτη, όπως και το αέριο υδρογόνο και αυτό σχηματίζει δύο ιόντα υδρογόνου. Τα δύο ιόντα έχουν ισχυρό αρνητικό φορτίο και θα προσελκύσουν τα δύο θετικά ιόντα υδρογόνου και αυτό θα σχηματίσει νερό. Αυτό αποδεικνύεται από τις ακόλουθες χημικές εξισώσεις





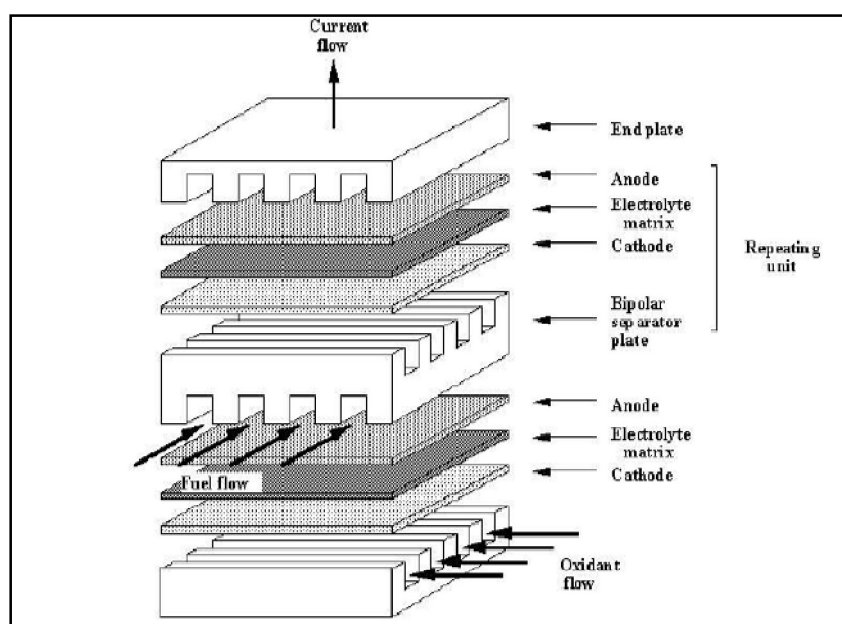
Εικόνα 12: Η βασική διάταξη ενός fuelcell



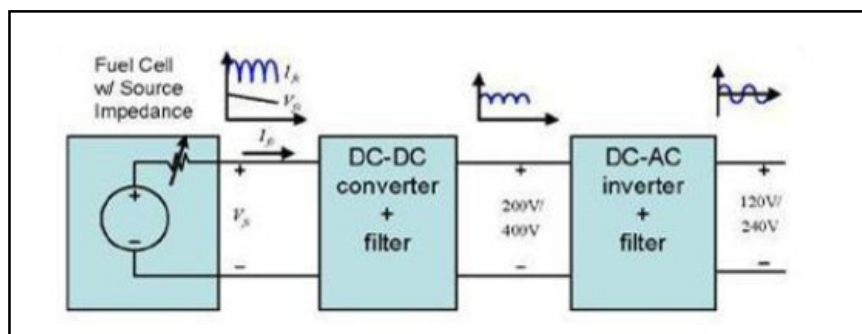
Εικόνα 13: Παροχή ισχύος στο φορτίο μέσω fuelcell [44]

Αυτός ο τύπος fuelcell παράγει μόνο ένα μικρό ποσό τάσης, περίπου 0,7V. Για να αυξήσουμε την τάση σε ένα πιο ρεαλιστικό επίπεδο πολλά ξεχωριστά fuelcell πρέπει να τοποθετηθούν σε στοίβα, όπως στο σχήμα 4.3. Γενικά όταν δημιουργήσουμε μία στοίβα κυψελών καυσίμου, τότε η τάση εξόδου που παίρνουμε είναι συνήθως της τάξης των 20-50V και έτσι απαιτείται ένας μετατροπέας dc-dc για να ανυψώσει την τάση σε ένα επίπεδο, όπου στη συνέχεια με τη βοήθεια μετατροπέα θα μας δώσει εναλλασσόμενη τάση 50 Hz, 240Vac. Το μπλοκ διάγραμμα ενός συστήματος ισχύος βασισμένο σε fuelcell φαίνεται στο σχήμα 4.4.

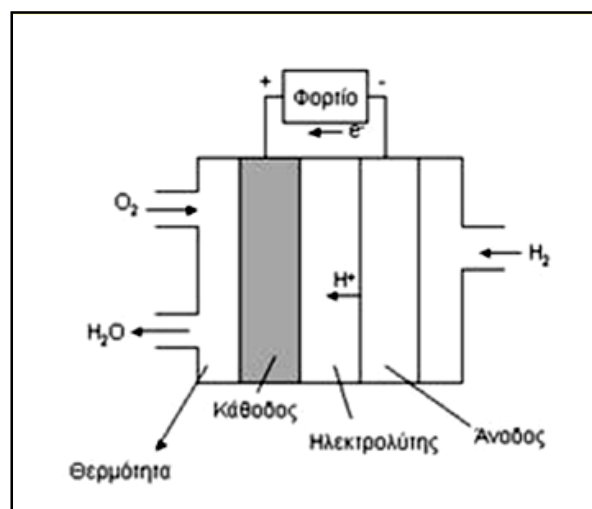
Κυψέλη καυσίμου (fuelcell) είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρισμό χωρίς τη μεσολάβηση της καύσης. Στη βασική της μορφή λειτουργεί ως εξής: Υδρογόνο και Οξυγόνο αντιδρούν με την παρουσία ηλεκτρολύτη και παράγουν νερό, ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσεται ένα ηλεκτροχημικό δυναμικό που προκαλεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο εξωτερικό κύκλωμα (φορτίο).



Εικόνα 14: Στοίβα από fuelcell.

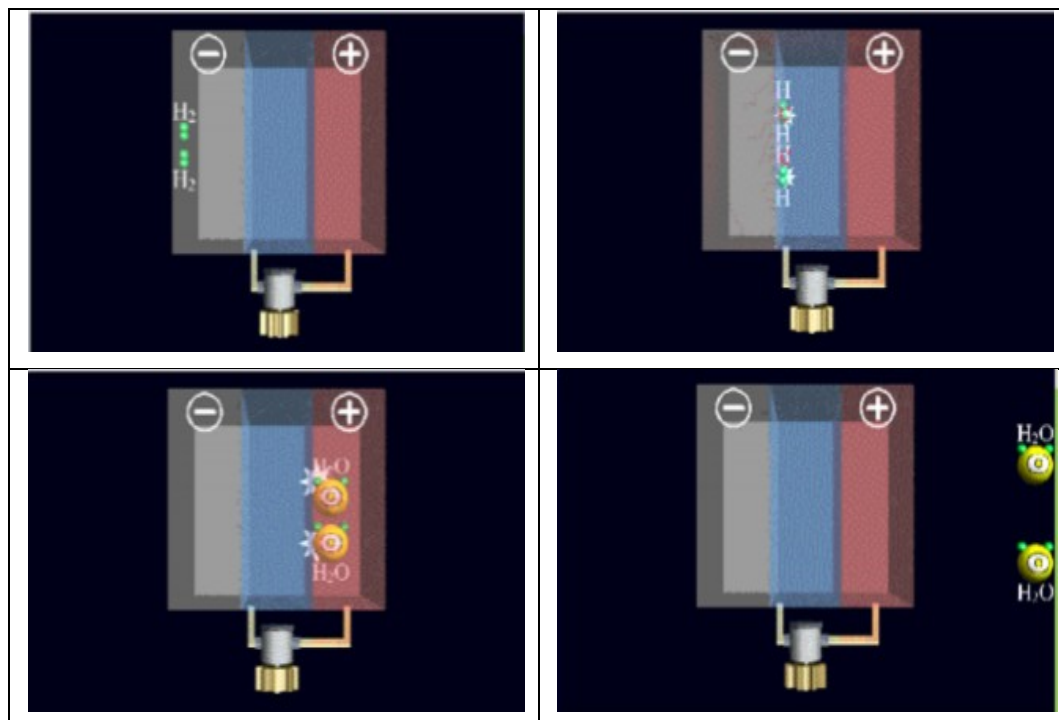


Εικόνα 15: Μπλοκ διάγραμμα συστήματος fuelcell [36]

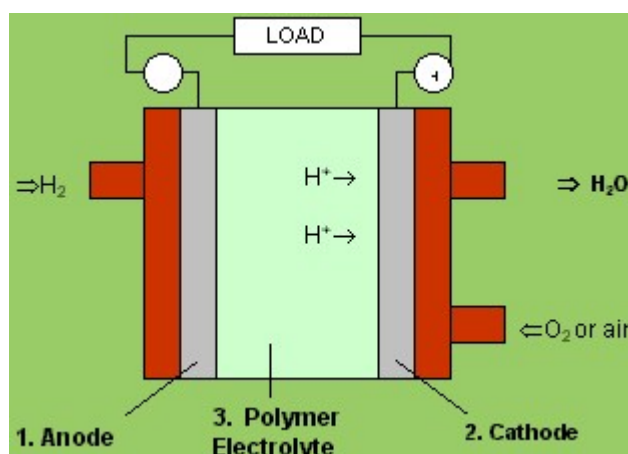


Εικόνα 16: Φόρτιση στοιχείου σε διάταξη κυψέλης.

Η κυψέλη καυσίμων λειτουργεί παρόμοια με μια μπαταρία. Έχει δύο ηλεκτρόδια, μια άνοδο και μια κάθοδο, που χωρίζονται από μια μεμβράνη. Το οξυγόνο περνά πάνω από το ένα ηλεκτρόδιο και το υδρογόνο από το άλλο. Το υδρογόνο αντιδρά με έναν καταλύτη στην άνοδο (+) που μετατρέπει το αέριο υδρογόνο σε αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια (e^-) και θετικά φορτισμένα ιόντα (H^+). Τα ηλεκτρόνια ρέοντας από την κυψέλη αποτελούν ένα ρεύμα που χρησιμοποιείται ως ηλεκτρική ενέργεια. Τα ιόντα του υδρογόνου τώρα κινούνται μέσω της ηλεκτρολυτικής μεμβράνης προς την κάθοδο (-) όπου ενώνονται με το οξυγόνο και τα ηλεκτρόνια για να παραγάγουν το νερό. Αντίθετα από τις μπαταρίες, οι κυψέλες καυσίμων ποτέ δεν φορτίζονται απ' έξω. Μία κυψέλη καυσίμου παράγει περίπου 0.6 Volt και και πολλές μαζί συνδυάζονται για να δώσουν την ηλεκτρική ισχύ που χρειάζεται.



Εικόνα 17: Παραγωγή τάσης σε κυψέλη υδρογόνου



Εικόνα 18: Τροφοδοσία κυψέλης καυσίμου από υδρογόνο.

Σήμερα το υδρογόνο παράγεται κυρίως από φυσικό αέριο με την επίδραση υδρατμών, αλλά η πιο φιλική προς το περιβάλλον μέθοδος είναι η παραγωγή του από ηλεκτρόλυση του νερού. Ιδιαίτερη δε σημασία έχει το γεγονός ότι, εκτός από τη δυνατότητα καύσης του σε ηλεκτρογεννήτριες, το υδρογόνο μπορεί να "τροφοδοτήσει" τις κυψέλες καυσίμου, μια από τις σημαντικότερες ενεργειακές πηγές του μέλλοντος.

2.4 Τύποι των κυψελών καυσίμου και χρήσεις τους.

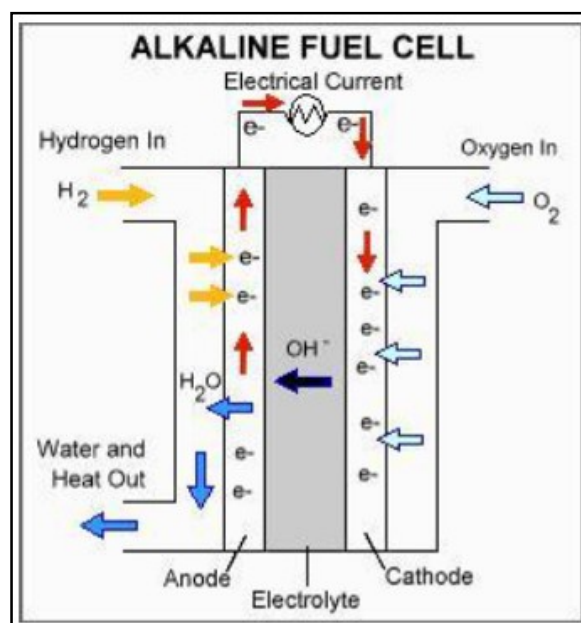
Υπάρχουν διαφορετικά είδη fuel cells αναλόγως του πρωτογενούς χρησιμοποιούμενου καυσίμου. Η επιλογή ενός συγκεκριμένου fuel cell μπορεί να βοηθήσει στη δημιουργία της

μέγιστης δυνατής χρησιμότητας στην κατάσταση που χρησιμοποιείται, π.χ. αν αυτό χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει οχήματα, κοινωνίες ή εφαρμογές.

2.4.1 Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (Alkaline fuel cells AFCs).

Αλκαλικότητα είναι ένας κοινός όρος που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό των μπαταριών. Η Εικ.16 είναι στην πραγματικότητα, το αρχικό σχέδιο ενός fuel cell, που στην ουσία είναι μία μπαταρία. Αυτό πρωτοχρησιμοποιήθηκε από το Αμερικανικό Διαστημικό Πρόγραμμα για να παράγει ηλεκτρισμό και νερό για τους αστροναύτες. Τα αλκαλικά fuel cells λειτουργούν περίπου στους 100-250 °C, αλλά πρόσφατοι σχεδιασμοί έχουν αποδείξει ότι μπορούν να λειτουργήσουν και σε μικρότερες θερμοκρασίες, στο εύρος (23 – 70)°C.

Τα AFCs είναι κυψέλες καυσίμου πολύ υψηλής απόδοσης, κάτι που οφείλεται στη γρήγορη χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα στην κυψέλη. Οσυγκεκριμένος τύπος κυψελών καυσίμου έχουν λίγα πλεονεκτήματα, που τα έχουν ρίξει χαμηλά στη λίστα πιθανής εμπορικής και οικιακής χρήσης. Ένα μειονέκτημα είναι ότι είναι πολύ ευαίσθητα στο διοξείδιο του άνθρακα. Μια μικρή ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να μολύνει την κυψέλη και έτσι να καταστραφεί ολόκληρη. Η διαδικασία του απολύμανσης είναι επίσης πολύ ακριβή, κάτι που θα μπορούσε να κάνει το αλκαλικό fuel cell να κοστίζει πολύ περισσότερο από την ενέργεια που παράγει. Ένα πλεονέκτημα είναι ότι αυτοί οι τύποι των fuel cell έχουν πολύ υψηλές επιδόσεις. Εξαιτίας αυτού, αγγίζουν ένα επίπεδο απόδοσης της τάξης του 60% [35].



Εικόνα 19: Σχήμα διάταξης Alkaline fuel cell (AFC) [37].

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 Απολλοπρος 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

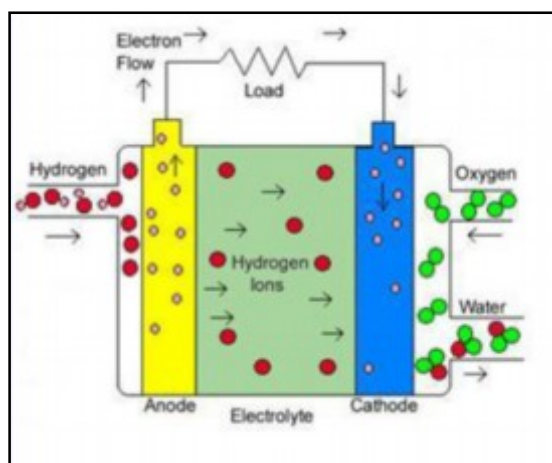
στην κυψέλη τους. Είναι επίσης εξαιρετικά αποδοτικές στις εφαρμογές παραγωγής ισχύος επιτυγχάνοντας αποδόσεις της τάξης του 70%. Η ισχύς τους μπορεί να κυμανθεί από 300Wμέχρι και 5kW. Είναι κατάλληλες για περιπτώσεις εξεζητημένων εφαρμογών όπως η εξερεύνηση του διαστήματος και των ωκεανών, όπου το κόστος 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.

2.4.2 Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος Phosphoric-acid fuel cells (PAFC).

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (εικ.17) είναι από τις πιο καθιερωμένες και από τις πρώτες που χρησιμοποιήθηκαν εμπορικά. Η τυπική χρήση για αυτόν τον τύπο είναι σε σταθμούς γεννητριών ισχύος, ωστόσο μερικά PAFC έχουν χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτήσουν μεγάλα οχήματα όπως αστικά λεωφορεία.

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος 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 οξέος 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.

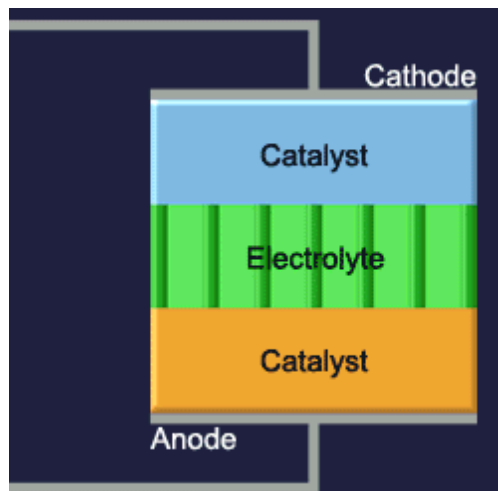
Αυτό το είδος fuel cell έχει επίσης συγκεκριμένες ατέλειες, που καθιστά τη μαζική παραγωγή του ελαφρώς αβέβαιη. Είναι λιγότερο ισχυρά από υπόλοιπα fuel cell, αλλά έχουν το ίδιο βάρος και όγκο με αυτά, ενώ είναι και ακριβά. Απαιτούν ακόμη έναν ακριβό καταλύτη λευκόχρυσου, γεγονός που αυξάνει περαιτέρω το κόστος παραγωγής τους. Ένα τυπικό PAFC κοστίζει μεταξύ \$4000 - \$4500 ανά kW για να λειτουργήσει [38].



Εικόνα 20: Σχήμα διάταξης Phosphoric-acid fuel cell (PAFC) [38].

Οι κυψέλες του τύπου φωσφορικού οξέος - PAFC , είναι από τις πιο προηγμένες τεχνολογικά και εμπορικά. Μπορούν να λειτουργούν σε υψηλή θερμοκρασία και ταιριάζουν έτσι με τις συνθήκες που επικρατούν συνήθως. Το φωσφορικό οξύ είναι σε υψηλή συγκέντρωση το οποίο ενώνεται με μια γέλη (ζελ) που παίζει το ρόλο του καταλύτη. Το PAFC

απαιτεί ατμοσφαιρικό οξυγόνο και υδρογόνο ως αέρια αναγωγής. Υπάρχει όμως ένα μειονέκτημα.



Εικόνα 21: Τμήματα κυψέλης PAFC [38]

Το φωσφορικό οξύ δεν λειτουργεί όταν η θερμοκρασία βρίσκεται κάτω από τους 42°C. Τότε δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ενεργειακή κυψέλη. Η ενεργειακή κυψέλη στην παρακάτω μορφή αποτελείται από δύο ξεχωριστά τμήματα --τους δύο καταλύτες-- ανάμεσά στα οποία υπάρχει ένας ηλεκτρολύτης (διάλυμα υδροξειδίου του καλίου). Οι καταλύτες περιέχουν πλατίνα, για την διευκόλυνση των χημικών αντιδράσεων που ακολουθούν. Το τμήμα που εισάγεται το υδρογόνο θα αποτελέσει την άνοδο και στο τμήμα που εισάγεται το οξυγόνο θα αποτελεί την κάθοδο. Στους δύο πόλους συνδέεται η συσκευή που θέλουμε να λειτουργήσει.

2.4.3 Φάσεις κατά τη διαδικασία παραγωγής υδρογόνου.

Η διαδικασία παραγωγής υδρογόνου σε κυψέλες τύπου φωσφορικού οξέος υποδιαιρείται στις ακόλουθες φάσεις.

1^η φάση: Αρχίζει και ρέει αέριο οξυγόνο (O_2) --πορτοκαλί χρώμα-- και αέριο υδρογόνο (H_2) --μπλε χρώμα-- στα δύο ξεχωριστά τμήματα της καθόδου και της ανόδου αντίστοιχα. Έτσι συνολικά υπάρχουν 2 άτομα οξυγόνου πάνω και 4 άτομα υδρογόνου.

2^η φάση: Όταν έρθουν σε επαφή τα δύο μόρια H_2 με τον καταλύτη ιονίζονται προς τέσσερα πρωτόνια και τέσσερα ηλεκτρόνια. Την ίδια στιγμή τα 4 ελεύθερα ηλεκτρόνια φεύγουν προς το εξωτερικό κύκλωμα, μέσω του οποίου έρχονται προς την άνοδο.

3^η φάση: Τα 4 ηλεκτρόνια κινούνται από την άνοδο προς την κάθοδο και δημιουργούν έτσι ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Το κάτω μέρος έχει έλλειμμα ηλεκτρονίων (θετικός πόλος) ενώ το πάνω μέρος έχει περίσσεια ηλεκτρονίων (αρνητικός πόλος). Αυτό το ηλεκτρικό κύκλωμα μπορεί να τροφοδοτήσει μια ηλεκτρική συσκευή.

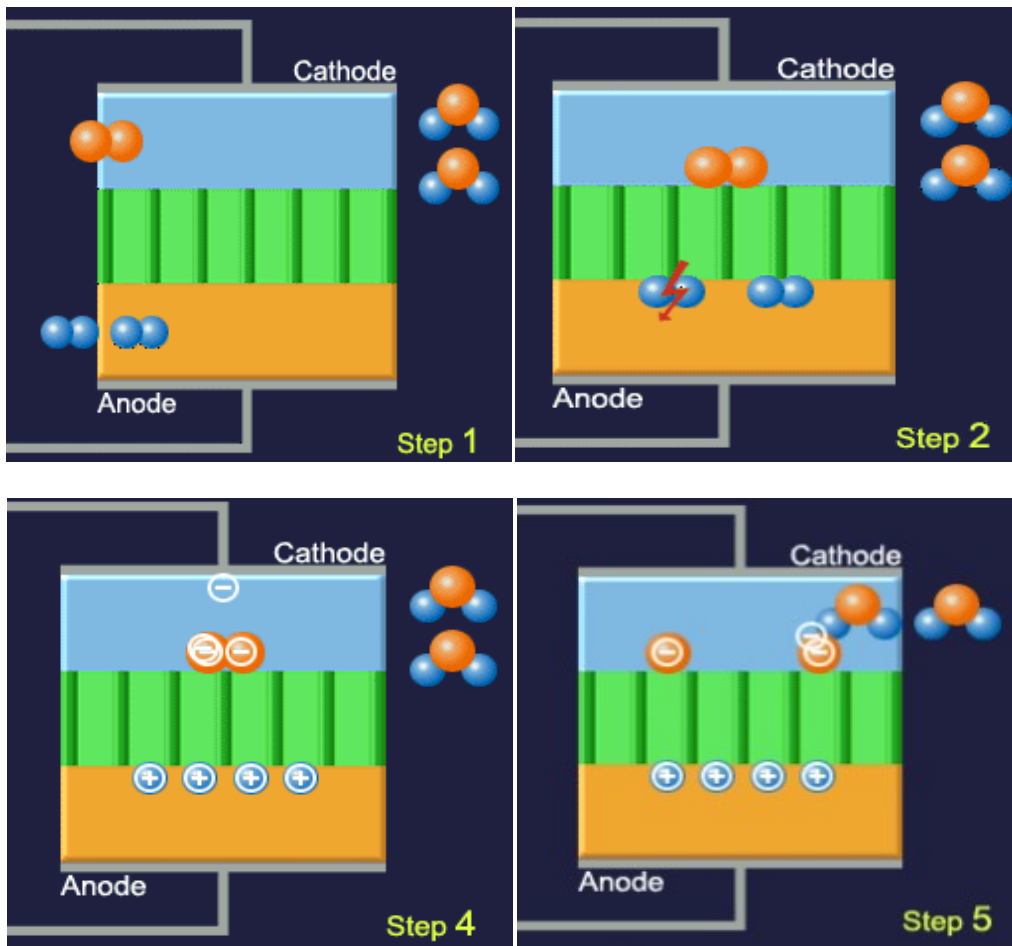
4^η φάση: Τα 4 ηλεκτρόνια, που βρίσκονται στην κάθοδο, ενώνονται με τα δύο άτομα οξυγόνου και τα φορτίζουν αρνητικά.

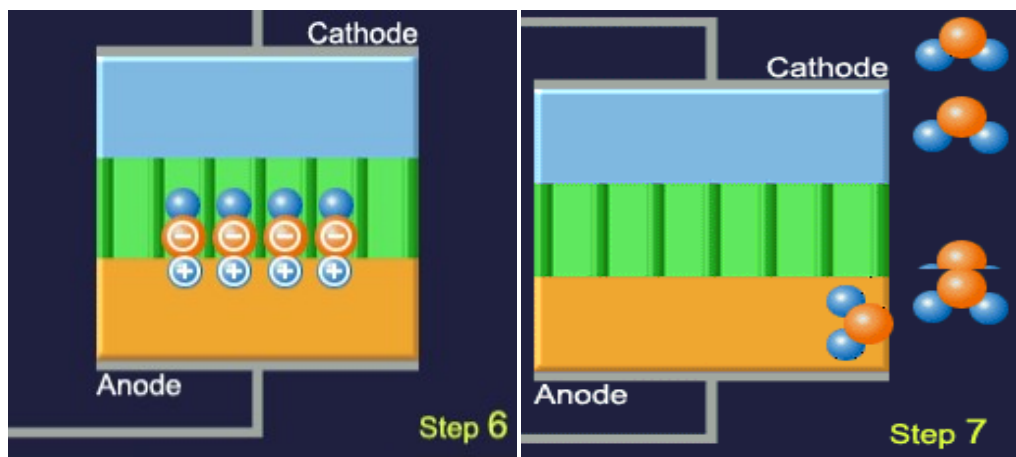
η φάση: Τα δύο μόρια του νερού, που βρίσκονται ήδη στην κάθοδο (στο δεξί μέρος) ενώνονται με τα δύο ιόντα οξυγόνου (πορτοκαλί σφαίρα) σχηματίζοντας 4 ιόντα υδροξυλίου OH .

β^η φάση: Αυτά τα 4 ιόντα του OH^- κινούνται μέσω του ηλεκτρολύτη (διάλυμα υδροξειδίου του καλίου) προς την άνοδο.

7η φάση: Τα υδροξυλιόντα αντιδρούν στην άνοδο με τα προϋπάρχοντα πρωτόνια προς δημιουργία νερού. Αυτό το νερό μερικώς οδηγείται στην εξάτμιση και μερικώς οδηγείται πίσω στην κάθοδο για να συμμετάσχει ξανά στην αντίδραση που ακολουθεί.

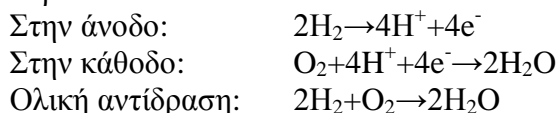
Ο καταλύτης αναλαμβάνει την επιτάχυνση της δημιουργίας του νερού από τα συστατικά του. Στο σχηματισμό του νερού συμμετέχουν εκτός των μορίων του οξυγόνου και των ιόντων του υδρογόνου, τα ηλεκτρόνια τα οποία διοχετεύτηκαν μέσω του εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος στην κάθοδο, στην αρχή της διαδικασίας. Τα δύο στρώματα (στηριζόμενου) καταλύτη χρησιμεύουν στην αύξηση της ταχύτητας των αντιδράσεων διάσπασης του μορίου του υδρογόνου και της ένωσης υδρογόνου οξυγόνου για τη δημιουργία νερού, στην άνοδο και στην κάθοδο αντίστοιχα. Συνήθως αποτελείται από ένα υπέρλεπτο στρώμα λευκόχρυσου (Pt) πάνω σε επιφάνεια άνθρακα. Το στρώμα αυτό είναι και το μέρος του καταλύτη το οποίο βρίσκεται σε επαφή με τη μεμβράνη. Ο καταλύτης είναι τραχύς και πορώδης ώστε να μεγιστοποιεί η εκτεθειμένη επιφάνεια του.





Εικόνα 22: Στάδια κατά την διαδικασία παραγωγής υδρογόνου.

Οι χημικές αντιδράσεις οι οποίες χαρακτηρίζουν τα παραπάνω βήματα, συνοψίζονται παρακάτω.



Οι παραπάνω αντιδράσεις σε μία απλή κυψέλη καυσίμου παράγει περίπου στα 0,7 Volts . Προκειμένου να παραχθούν μεγαλύτερες (και πρακτικά αξιοποιήσιμες) τάσεις, χρησιμοποιούνται περισσότερες κυψέλες σε σειρά (fuel cell stack).

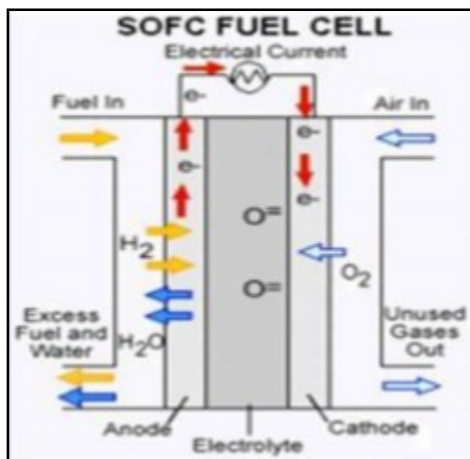
2.4.4 Κυψέλες καυσίμου Solid oxide fuel cells (SOFC).

Ο σχεδιασμός των κυψελών καυσίμου στερεού οξειδίου (εικ.18) διαφέρει από το σχεδιασμό ενός τυπικού fuel cell. Εφόσον το SOFC είναι στερεό, δε χρειάζεται να κατασκευαστεί με τις τυπικές ρυθμίσεις των άλλων τύπων fuel cell. Το SOFC λειτουργεί σε πολύ υψηλή θερμοκρασία ώστε να μπορεί να παράγει ατμό που μπορεί να περιστρέφει τουρμπίνες, παράγοντας έτσι επιπρόσθετη ισχύ. Από τη χρήση του καταλύτη που είναι συνήθως φτιαγμένος από λευκόχρυσο βγάζει ένα πολύ ακριβό μέταλλο. Η μείωση όμως της επένδυσης του λευκόχρυσου μειώνει δραστικά το κόστος του fuel cell.

Από τη στιγμή που το SOFC λειτουργεί σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες, περίπου 1000°C, υπάρχει μεγάλο ρίσκο για την ασφάλεια των εργαζομένων. Επειδή λειτουργεί σε μεγάλες θερμοκρασίες, το SOFC χρειάζεται αρκετή ώρα για να εκκινήσει. Ένα τμήμα του κόστους που αποφεύγεται από τη μη χρήση της επένδυσης λευκόχρυσου, ισοσταθμίζεται από τη χρήση ενός θερμικού καλύμματος, το οποίο χρησιμοποιείται για να διατηρεί τη θερμότητα και να προστατέψει το προσωπικό.

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%.



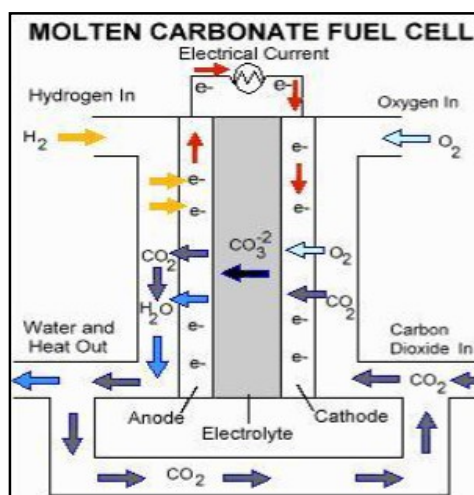
Εικόνα 23: Σχήμα διάταξης Solid oxide fuel cell (SOFC) [38].

2.4.5 Molten carbonate fuel cells (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.

Οι κυψέλες καυσίμου λειωμένου ανθρακικού άλατος (σχήμα 4.8) είναι αρκετά διαφορετικές από τις υπόλοιπες. Τα MCFC αυτή τη στιγμή επεκτείνονται σε εφαρμογές με φυσικό αέριο και σε εργοστάσια παραγωγής ισχύος που λειτουργούν με άνθρακα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, σε εμπορικές και στρατιωτικές εφαρμογές. Τα MCFC είναι fuel cells υψηλής θερμοκρασίας, που χρησιμοποιούν ένα ηλεκτρολύτη φτιαγμένο από ένα μίγμα λειωμένου ανθρακικού άλατος που επικάθεται σε πορώδες, κεραμικό αργιλικό οξείδιο του λιθίου (LiAlO₂).

Εφόσον λειτουργούν σε εξαιρετικά μεγάλες θερμοκρασίες, από 650°C και πάνω, όπως τα SOFC, μπορούν να χρησιμοποιηθούν φτηνότερα μέταλλα από το λευκόχρυσο σαν καταλύτης στην άνοδο και την κάθοδο, κάτι που μειώνει το κόστος. Η βελτιωμένη απόδοση είναι ένας ακόμη λόγος που τα MCFC προσφέρουν μειώσεις στο κόστος έναντι των PAFC. Τα MCFC Μπορούν να φτάσουν το 60% σε απόδοση, που είναι πολύ μεγαλύτερο από το 37-42% απόδοσης των PAFC, που οφείλεται στις απώλειες θερμότητας. Αν αυτή η θερμότητα συγκρατηθεί και ξαναχρησιμοποιηθεί, μπορούμε να φτάσουμε τελικές αποδόσεις της τάξης του 85%.



Εικόνα 24: Σχήμα διάταξης Molten carbonate fuel cell (MCFC) [39].

Σε αντίθεση με όλα τα προηγούμενα είδη τα MCFC δεν χρειάζονται εξωτερικό μετατροπέα για να μεταφέρει περισσότερο καύσιμο στο υδρογόνο. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών στις οποίες λειτουργούν, αυτά τα καύσιμα μετατρέπονται σε υδρογόνο μέσα στο fuel cell από μία διαδικασία που ονομάζεται εσωτερικός μετασχηματισμός. Αυτή η διαδικασία επίσης μειώνει το κόστος. Το μειονέκτημα των MCFC είναι η μικρή διάρκεια ζωής. Οι υψηλές θερμοκρασίες στις οποίες αυτά λειτουργούν καθώς και ο χρησιμοποιούμενος ηλεκτρολύτης επιταχύνουν την καταστροφή των υλικών και τη διάβρωση, κάτι που στην ουσία μειώνει τη διάρκεια ζωής του fuel cell. Στην παρούσα φάση βρίσκονται υπό δοκιμή υλικά που είναι πιο ανθεκτικά στη διάβρωση, για χρήση τους ως συστατικά των fuel cells έτσι ώστε να επεκταθεί η διάρκεια ζωής τους [39].

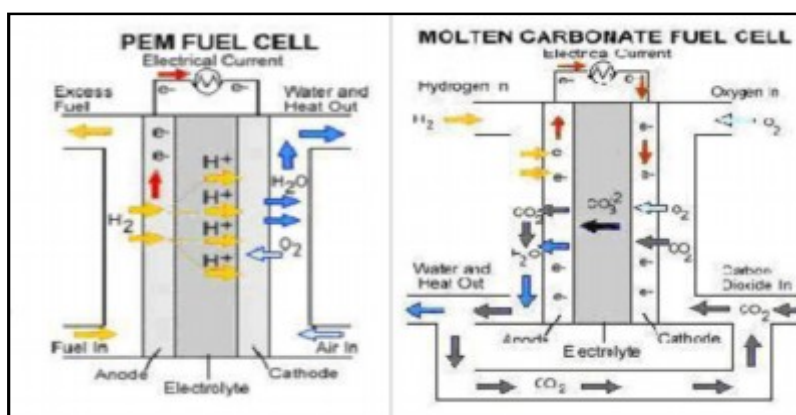
2.4.6 Polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC)

Οι συγκεκριμένες κυψέλες καυσίμου είναι επίσης γνωστές ως κυψέλες καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης. Η τεχνολογία τους επινοήθηκε από την GeneralElectric 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.

Το παράδειγμα που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.1.1 σχετικά με το πώς δουλεύουν τα fuel cells, είναι με ένα fuel cell πολυμερούς ηλεκτρολυτικής μεμβράνης. Χρειάζονται μόνο υδρογόνο, οξυγόνο από τον αέρα και νερό για να λειτουργήσουν. Δεν απαιτούν διαβρωτικά ρευστά όπως κάποια άλλα είδη. Το καύσιμο τους συνήθως είναι το υδρογόνο που παρέχεται από αποθηκευτικές δεξαμενές. Αυτά τα fuel cell λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτό τους επιτρέπει να εκκινούν γρήγορα, προκαλώντας λιγότερη φθορά και καταστροφή, παρέχοντας έτσι μεγαλύτερη μακροζωία.

Ένα μειονέκτημα είναι ότι ο καταλύτης είναι φτιαγμένος από λευκόχρυσο, που είναι πολύ ακριβός, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο το κόστος. Ο λευκόχρυσος είναι πολύ ευαίσθητος στο μονοξειδίο του άνθρακα και αυτό ίσως οδηγήσει στη χρησιμοποίηση άλλου

υλικού για την αντίδραση μέσα στο fuel cell. Τα PEM επειδή είναι φτιαγμένα από ελαφρύ υλικό και μπορούν να χρησιμοποιούνται μέσα σε οχήματα (fuel cell vehicles FCVs). Αυτά τα οχήματα έχουν συνήθως ως καύσιμο αέριο υδρογόνο, κάτι όμως που δημιουργεί ορισμένες ανησυχίες. Είναι δύσκολο να διατηρηθεί μεγάλη ποσότητα υδρογόνου μέσα σε δεξαμενές διατηρημένες σε σταθερή ατμοσφαιρική πίεση, λόγω της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητάς του. Για ένα μέσο όχημα που κινείται με υδρογόνο πρέπει να ξαναγεμίζει την παροχή υδρογόνου του περίπου κάθε 482,80 χλμ. με 643,74 χλμ. (300 με 400 μίλια) [39].



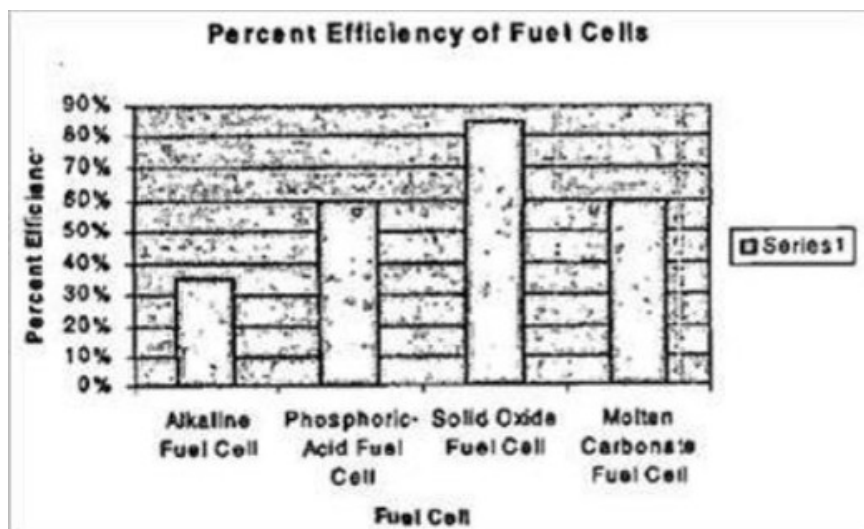
Εικόνα 25: Διάταξη κυψέλης PEMFC

2.4.7 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.

2.5 Σύγκριση των fuel cells.

Στην εικ. δείχνει ένα PEM fuel cell δίπλα σε ένα MCFC που συζητήσαμε νωρίτερα. Από τη σύγκριση των δύο σχημάτων, προκύπτει εύκολα η διαφορά τους. Το MCFC ανακυκλώνει το διοξείδιο του άνθρακα, κάτι που παράγει περισσότερη ισχύ, ενώ το PEM δεν ανακυκλώνει τίποτα. Το διάγραμμα παρακάτω εξηγεί τις % αποδόσεις τεσσάρων τύπων fuel cell που συζητήθηκαν. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτές είναι οι μέγιστες αποδόσεις, όπως επίσης και το ότι αν και μια υψηλή απόδοση είναι πάντα πολύ θετική, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλοι παράγοντες όπως η εκλυόμενη θερμότητα, η διάβρωση, το κόστος και η ασφάλεια του προσωπικού.



Εικόνα 26: Συντελεστές απόδοσης των fuelcells

Εκτός όμως από τα 5 αυτά είδη fuelcell που αναφέραμε και είναι τα βασικότερα, υπάρχουν και άλλα τα οποία είναι πολύ λιγότερο διαδεδομένα. Κάποια μάλιστα βρίσκονται ακόμη στα επίπεδα της έρευνας και δεν διατίθενται για εμπορική χρήση. Ακολουθεί στην επόμενη σελίδα, ένας πίνακας (πίνακας 4.1) με όλα τα είδη των κυψελών καυσίμων, όπου στην πρώτη στήλη δίνεται το όνομα του, στο δεύτερο ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιεί, στην τρίτη η ισχύς που μπορεί αυτό να παράγει, στην τέταρτη η θερμοκρασία λειτουργίας τους, στην Πέμπτη η ηλεκτρική απόδοση της κυψέλης αλλά και του συστήματος με στο οποίο λειτουργούν ενώ στην τελευταία βλέπουμε αν διατίθενται για εμπορική χρήση (commercial) ή βρίσκονται ακόμη σε ερευνητικό επίπεδο [48].

2.6 Εφαρμογές των fuelcells.

2.6.1 Εφαρμογή στην αυτοκίνηση.

Όταν αναφέρεται ο όρος fuel cell, τότε η πρώτη εφαρμογή που προκρίνεται είναι η αυτοκίνηση. Αυτή τη στιγμή σύμφωνα με το σύλλογο Μηχανικών Αυτοκίνησης, οι εταιρίες BMW, Renault και Delphi Automotive Systems συνεργάζονται για την ανάπτυξη μιας νέας τεχνολογίας με κυψέλες καυσίμων, που θα έχει εφαρμογή στη βιομηχανία της αυτοκίνησης. Το σύστημα θα αναπτυχθεί έτσι ώστε να λειτουργεί με ντίζελ αλλά και με βενζίνη, γεγονός που θα επεκτείνει την εφαρμογή και σε μικρά και σε μεγάλα εμπορικά αυτοκίνητα. Οι συνεργαζόμενες εταιρίες επίσης, σκοπεύουν να χρησιμοποιήσουν τα fuel cells σαν βοηθητική μονάδα ισχύος (APU) παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα να αυξηθεί η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας εντός του οχήματος.

Το τμήμα fuel cell της United Technologies Companies προσπαθεί να χρησιμοποιήσει τα PEM fuel cells για να τροφοδοτήσει όχι μόνο αυτοκίνητα, αλλά και μεγάλα οχήματα όπως λεωφορεία. Το τμήμα αυτό συνεργάζεται με μεγάλους κατασκευαστές αυτοκινήτων όπως Nissan, Renault, Hyundai και BMW καθώς και με το US Department of Energy για να αναπτύξει τεχνολογία fuel cells για αυτοκίνητα. Επίσης, συνεργάζεται με μεγάλους κατασκευαστές λεωφορείων όπως οι Thor και Irisbus, ενσωματώνοντας fuel cells σε λεωφορεία αλλά και σε οχήματα.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

Και η Honda όμως έχει δείξει ενδιαφέρον για την ενσωμάτωση τους στα αυτοκίνητα. Αφού παρουσίασαν το Honda Insight και το Honda Civic Hybrid, ήλθαν να παρουσιάσουν στη συνέχεια το, τροφοδοτούμενο από fuel cell, Honda FCX, ενώ όπως δήλωσε η εταιρία, η Honda σκοπεύει να κυκλοφορήσει περίπου 30 fuel cell αυτοκίνητα μέσα στα επόμενα χρόνια, στην Καλιφόρνια και την Ιαπωνία.

Εκτός από τα αυτοκίνητα και τα λεωφορεία πάντως, γίνεται ενσωμάτωση κυψελών καυσίμων και σε μηχανάκια (scooters), γεγονός που θα μειώσει αισθητά τις εκπομπές τους βλαβερών για την ατμόσφαιρα ρύπων, που μάλιστα είναι μεγάλες. Όπως έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα στην Ινδία αλλά και σε πολλές άλλες χώρες της Ασίας, όπου τα χρησιμοποιεί μεγάλο τμήμα του πληθυσμού, πρόκειται για μία πολύ επωφελή εφαρμογή [38].

2.6.2 Εφαρμογή στις γεννήτριες ισχύος.

Τα fuel cells ωστόσο δε θα χρησιμοποιηθούν μόνο για να τροφοδοτούν οχήματα, αλλά και για να παράγουν μεγάλες ποσότητες ισχύος, που είναι μια άλλη βασική τους εφαρμογή. Συγκεκριμένα, πάνω από 2500 συστήματα fuel cells είναι εγκατεστημένα σε ολόκληρο τον κόσμο - σε νοσοκομεία, ξενοδοχεία, κτίρια με γραφεία, σχολεία, εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος - και είτε είναι συνδεδεμένα στο υπάρχον δίκτυο, παρέχοντας ισχύ, είτε λειτουργούν σαν ανεξάρτητες μονάδες παραγωγής, για να παρέχουν ισχύ σε περιοχές οι οποίες δεν είναι προσβάσιμες από τις γραμμές του δικτύου. Ειδικότερα στο θέμα των τηλεπικοινωνιών, με την συνεχόμενη χρήση των υπολογιστών, του ίντερνετ και των δικτύων τηλεπικοινωνίας, γίνεται έντονη η ανάγκη για πιο αξιόπιστη ισχύ από αυτή που είναι διαθέσιμη από το δίκτυο και τα fuel cells έχουν αποδειχθεί να είναι 99.999% αξιόπιστα. Μπορούν να αντικαταστήσουν τις μπαταρίες, για να δώσουν ισχύ 1kW-5kW σε τοποθεσίες με τηλεπικοινωνίες, χωρίς θόρυβο και εκπομπές, ενώ έχουν και μεγάλη διάρκεια, παρέχοντας ισχύ σε τοποθεσίες που είτε δεν φτάνει το υπάρχον δίκτυο είτε υπόκεινται σε δριμύτατες καιρικές συνθήκες. Τέτοια συστήματα θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να παρέχουν κύρια ή βοηθητική ισχύ σε περίπτωση ανάγκης σε τηλεπικοινωνιακούς κόμβους, σε πύργους, ή σε άλλα ηλεκτρονικά συστήματα.

Μάλιστα η εταιρία Siemens Westinghouse Power Corp ήλεγξε ένα SOFC, το οποίο συμπλήρωσε ένα χρόνο λειτουργίας και ήταν εγκατεστημένο στο Westervoort στην Ολλανδία. Διαπιστώθηκε ότι η ελεγχθείσα μονάδα λειτουργούσε για ένα διάστημα 8760 ωρών και παρείχε 110 kW στο τοπικό δίκτυο αλλά και ζεστό νερό στο σύστημα θέρμανσης της περιοχής [50].

2.6.3 Άλλες εφαρμογές.

Εκτός από τις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν στην βιομηχανία αυτοκίνησης, οι κυψέλες καυσίμου θεωρούνται ως μία πολύ καλή επιλογή στην αεροπλοΐα, γιατί έχουν μηδενικές ή έστω ελάχιστες εκπομπές και δεν κάνουν σχεδόν καθόλου θόρυβο. Αυτή η εφαρμογή ενδιαφέρει πολύ το στρατιωτικό τομέα (κυρίως λόγω της απουσίας θορύβου) και για το λόγο αυτό γίνεται προσπάθεια από διάφορες εταιρίες, συμπεριλαμβανομένου και της Boeing, για τη δημιουργία ενός τέτοιου αεροπλάνου.

Ακόμα όμως και τα θαλάσσια σκάφη όμως, συγκαταλέγονται στις εφαρμογές. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι για κάθε λίτρο καυσίμου που χρησιμοποιείται η μηχανή των σκαφών αυτών, παράγει κατά μέσο όρο ποσότητα υδρογονανθράκων, 140 φορές μεγαλύτερη από αυτή του σημερινού μέσου αυτοκινήτου. Έτσι τα fuel cells εκτός από μεγάλη απόδοση, θα προσφέρουν και λιγότερες εκπομπές. Σε αυτήν την κατεύθυνση μάλιστα, η Ισλανδία έχει δεσμευθεί ως το 2015 να εξοπλίσει όλο τον αλιευτικό της στόλο με κυψέλες καυσίμου.

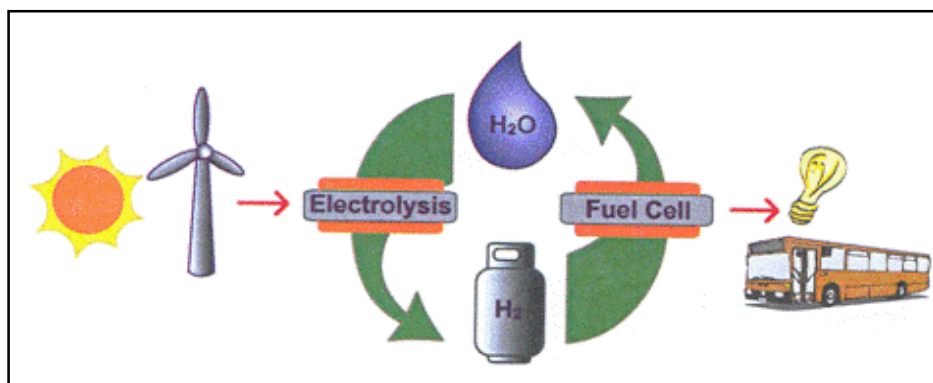
Στον ίδιο άξονα, οι κυψέλες χρησιμοποιούνται και σε αμαξοστοιχίες ορυχείων εφόσον δεν έχουν εκπομπές. Ταυτόχρονα, μια διεθνής κοινοπραξία, αναπτύσσει το μεγαλύτερο

παγκοσμίως όχημα fuel cell, μια αμαξοστοιχία 109 μετρικών τόνων, ισχύος 1MW, για στρατιωτικές αλλά και βιομηχανικές εφαρμογές.

Τέλος, σε εφαρμογές επιπέδου ηλεκτρονικών, αναμένεται ότι τα fuel cells θα αλλάξουν και τον κόσμο της τηλεργασίας, καθώς θα χρησιμοποιηθούν και για την τροφοδοσία κινητών τηλεφώνων, laptop, με διάρκεια ζωής πολύ μεγαλύτερη από τις μπαταρίες. Ορισμένες εταιρίες έχουν ήδη παρουσιάσει κυψέλες καυσίμου που μπορούν να τροφοδοτήσουν κινητά τηλέφωνα για 30 ολόκληρες μέρες, χωρίς επαναφόρτιση και laptop για 20 ώρες. Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν video recorders και απομονωμένες συσκευές μικρής ισχύος, όπως ανιχνευτές καπνού, συναγερμούς, συστήματα κλειδώματος για ξενοδοχεία κ.α. Αυτές οι κυψέλες-μινιατούρες λειτουργούν κυρίως με μεθανόλη [44].

2.7 Χρήσεις του Υδρογόνου.

Μεταξύ των κυριότερων χρήσεων του υδρογόνου είναι στην παρασκευή αμμωνίας, μεθανίου ή μεθανόλης, στην τεχνολογία τροφίμων (υδρογόνωση ελαίων), ενώ ο βασικός ενεργειακός χρήστης του υδρογόνου είναι η διαστημική βιομηχανία. Πέρα από τις πολλές του χρήσεις στη χημική βιομηχανία, το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κατάλληλα τροποποιημένους καυστήρες, λέβητες και κινητήρες εσωτερικής καύσης. Η καύση του υδρογόνου παράγει νερό αλλά, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών καύσης, παράγονται και οξειδία του αζώτου. Ιδανική ενεργειακή του εφαρμογή είναι όμως οι κυψέλες καυσίμου που αποτελούν μια νέα τεχνολογία που επιτρέπει την παραγωγή ηλεκτρισμού από την ένωση υδρογόνου και οξυγόνου που υπάρχει στον αέρα.



Εικόνα 27: Ο κύκλος του υδρογόνου ως δευτερογενής ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

Οι κυψέλες καυσίμου είναι μία σχετικά πρόσφατη τεχνολογία που επιτρέπει μέσω ηλεκτροχημικής αντίδρασης την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, με μόνο υποπροϊόν το νερό. Η λειτουργία τους είναι αντίστροφη από αυτήν μιας ηλεκτρολυτικής μονάδας και προσομοιάζει με τη λειτουργία μιας μπαταρίας, με τη διαφορά ότι δεν έχει τον περιορισμό της εξάντλησης του καυσίμου. Οι κυψέλες καυσίμων μπορούν να αντικαταστήσουν τις μηχανές εσωτερικής καύσης στα οχήματα και να παρέχουν ενέργεια σε σταθερές και κινητές εφαρμογές, κινητά τηλέφωνα και φορητούς υπολογιστές, όσο και σε μεγάλες φορητές συσκευές, καθώς και σε αυτοκίνητα, τα φορητά ή τα πλοία. Ακόμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θέρμανση και παροχή ενέργειας σε γεννήτριες για οικιακή ή βιομηχανική χρήση.

Το υδρογόνο χρησιμοποιείται στην παρασκευή αμμωνίας, μεθανίου ή μεθανόλης. Αυτά τα αέρια χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την παρασκευή άλλων προϊόντων, όπως εκρηκτικά, λιπάσματα, αντιψυκτικά κτλ. Το υδρογόνο επίσης χρησιμοποιείται στην τεχνολογία τροφίμων για την παρασκευή υδρογονανθράκων. Και τέλος το υδρογόνο χρησιμοποιείται στην επιστήμη της φυσικής με εφαρμογή στη μελέτη των στοιχειωδών σωματιδίων. Υδρογόνο με τη μορφή υγρού βρίσκουμε να χρησιμοποιείται στη μελέτη της υπεραγωγιμότητας. Πέρα από τις πολλές χρήσεις του υδρογόνου στη χημική βιομηχανία, το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως φορέας ενέργειας για την παραγωγή ενέργειας ή κίνησης. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η τάση κατανάλωσης καυσίμων όλο και λιγότερης περιεκτικότητας σε άνθρακα είναι εμφανής. Είναι μάλιστα ιδιαίτερα ενδιαφέρον ότι τα αεροπλάνα (αερόπλοια) κινόντουσαν με υδρογόνο πολύ πριν κινηθούν με πετρελαιοειδή καύσιμα. (13)

2.8 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Χρήσης του Υδρογόνου.

Το υδρογόνο διαθέτει όπως έχει φανεί και από όσα προηγούνται πολλά πλεονεκτήματα, εντούτοις υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα τα οποία περιγράφονται ακολούθως:

2.8.1 Πλεονεκτήματα Χρήσης Υδρογόνου.

Στα πλεονεκτήματα της χρήσης του υδρογόνου θα μπορούσαν να προσμετρηθούν:

- Το υδρογόνο έχει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα βάρους από οποιοδήποτε άλλο γνωστό καύσιμο.
- Όταν καίγεται με οξυγόνο παράγει μόνο νερό και θερμότητα (καθαρή καύση), ενώ όταν καίγεται με τον ατμοσφαιρικό αέρα, ο οποίος αποτελείται περίπου από 68% άζωτο, παράγονται αμελητέες ποσότητες οξειδίων του αζώτου.
- Το ποσό του νερού που παράγεται κατά τη καύση είναι τέτοιο ώστε να θεωρείται επίσης αμελητέο και μη ικανό να επιφέρει κάποια κλιματολογική αλλαγή δεδομένης ακόμα και με μαζική χρήση του.
- Είναι το ίδιο ακίνδυνο όσο η βενζίνη, το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο.
- Μπορεί να συμβάλει στη μείωση του ρυθμού κατανάλωσης των συμβατικών καυσίμων σε περίπτωση που παράγεται με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- Μπορεί να παραχθεί με πάρα πολλές μεθόδους σε οποιαδήποτε χώρα και σε οποιοδήποτε μέρος. Επομένως μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη αποκεντρωμένων συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Αυτό θα ωφελήσει φτωχότερα και λιγότερο αναπτυγμένα κράτη τα οποία σήμερα εξαρτώνται ενεργειακά από άλλα ισχυρότερα.

Επίσης τα πλεονεκτήματα του υδρογόνου έναντι συμβατικών πηγών ενέργειας πιο αναλυτικά συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Το υδρογόνο έχει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα βάρους από οποιοδήποτε άλλο γνωστό καύσιμο, 120,7 kJ/kg (θερμογόνο δύναμη), περίπου τρεις φορές μεγαλύτερο από αυτό της συμβατικής βενζίνης. Το υδρογόνο κάνει καθαρή καύση. Όταν καίγεται το υδρογόνο με οξυγόνο παράγει μόνο νερό και θερμότητα. Όταν καίγεται το υδρογόνο με τον ατμοσφαιρικό αέρα, ο οποίος αποτελείται περίπου από 68% άζωτο, παράγονται επίσης αμελητέες ποσότητες οξειδίων του αζώτου. Εξαιτίας της καθαρής καύσης του υδρογόνου είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι το καύσιμο αυτό δε συμβάλει στη μόλυνση του περιβάλλοντος. Το ποσό του νερού που παράγεται κατά τη καύση του υδρογόνου είναι τέτοιο ώστε να θεωρείται επίσης αμελητέο και μη ικανό να

επιφέρει κάποια κλιματολογική αλλαγή δεδομένης ακόμα και μαζικής χρήσης του υδρογόνου ως καύσιμο που θα μπορούσε να αντικαταστήσει τα υγρά καύσιμα τα οποία του πήραν την πρώτη θέση στην αρχή του αιώνα μας, με τις διαστρεβλωμένες πληροφορίες που πήραν το φως της δημοσιότητας στο αεροπορικό ατύχημα που προαναφέραμε.

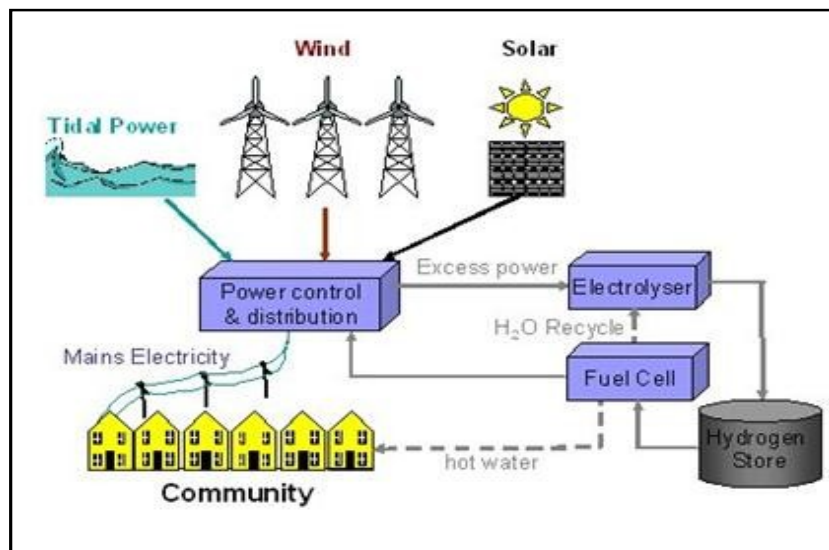
- Το υδρογόνο με τις κατάλληλες συνθήκες φύλαξης και διακίνησης είναι το ίδιο ακίνδυνο όσο η βενζίνη, το πετρέλαιο diesel ή το φυσικό αέριο. Ακόμα περισσότερο περιορίζεται κάθε κίνδυνος όταν παράγουμε υδρογόνο την στιγμή της κατανάλωσης του με την απλή διαδικασία της διάσπασης του από το νερό με την γνωστή μέθοδο της ηλεκτρόλυσης. Δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση η αποθήκη καυσίμου μας είναι μόνο μια δεξαμενή νερού. Το υδρογόνο μάλιστα είναι το λιγότερο εύφλεκτο σε απουσία αέρα με θερμοκρασία αυθόρμητης ανάφλεξης τους 585 °C (230 °C έναντι 480 °C της βενζίνης). Το υδρογόνο μπορεί να συμβάλει στη μείωση του ρυθμού κατανάλωσης των περιορισμένων φυσικών καυσίμων. Αν και σε πολλές περιπτώσεις αυτά τα ίδια καύσιμα χρησιμοποιούνται για την παρασκευή υδρογόνου το ενεργειακό όφελος είναι μεγάλο. Μάλιστα η πιο συμφέρουσα οικονομικά αυτή τη στιγμή μέθοδος παρασκευής υδρογόνου βασίζεται στη μετατροπή του μεθανίου του φυσικού αερίου. Υδρογόνο μπορεί να παρασκευαστεί με πάρα πολλές μεθόδους σε οποιαδήποτε χώρα και σε οποιοδήποτε μέρος κι επομένως μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη αποκεντροποιημένων συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Αυτό θα ωφελήσει φτωχότερα και λιγότερο αναπτυγμένα κράτη τα οποία σήμερα εξαρτώνται ενεργειακά από άλλα ισχυρότερα. Η πιο συνηθισμένη και διαδεδομένη μέθοδος σήμερα είναι η τοποθέτηση μικρών φωτοβολταϊκών πάνελ για την παραγωγή από τον ήλιο οπουδήποτε στον πλανήτη της λίγης ενέργειας που χρειάζεται για την διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο και στην συνέχεια η αποθήκευση του υδρογόνου για οποιαδήποτε από τις χρήσεις που προαναφέραμε. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξ ίσου καλά η και ακόμα καλύτερα μια υδρογεννήτρια η μια ανεμογεννήτρια.

2.8.2 Μειονεκτήματα Χρήσης Υδρογόνου.

Στα μειονεκτήματα της χρήσης του υδρογόνου συγκαταλέγονται δυσκολίες που σχετίζονται με διάφορους παράγοντες όπως την αποθήκευση, τη διανομή, την τιμή την ασφάλεια. Συνοπτικά:

- Η αποθήκευση του υδρογόνου καθίσταται δύσκολη δεδομένου του ότι το υδρογόνο είναι πολύ ελαφρύ, η συμπίεση μεγάλης ποσότητας σε μικρού μεγέθους δεξαμενή είναι δύσκολη λόγω των υψηλών πιέσεων που χρειάζονται για να επιτευχθεί η υγροποίηση.
- Η έλλειψη οργανωμένου δικτύου διανομής του.
- Η τιμή του είναι σχετικά υψηλή σε σύγκριση με αυτή της βενζίνης ή του πετρελαίου. Η περισσότερο διαδεδομένη λόγω χαμηλού κόστους μέθοδος παραγωγής υδρογόνου αυτή τη στιγμή είναι η μετατροπή του φυσικού αερίου. Ωστόσο όσο εξελίσσονται και άλλες μέθοδοι, το κόστος θα συνεχίσει να μειώνεται.
- Αν και στις περισσότερες των περιπτώσεων το υδρογόνο θεωρείται περισσότερο ασφαλές από οποιοδήποτε άλλο καύσιμο, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες μπορεί να γίνει εξαιρετικά επικίνδυνο (εκρηκτικό).
- Η αυξημένη τιμή των κυψέλων καυσίμου με τις οποίες αυτή τη στιγμή γίνεται η μεγαλύτερη εκμετάλλευση του υδρογόνου ως καύσιμο. Επιπλέον η τεχνολογία τους δε μπορεί να θεωρηθεί ολοκληρωτικά αξιόπιστη αφού προς το παρόν υπάρχουν αρκετά τεχνικά προβλήματα τα οποία αναζητούν αξιόπιστες λύσεις.

Κυψέλες προσανατολισμένες για οικιακή και μεταφορική χρήση χαρακτηρίζονται από μικρή ανοχή σε καύσιμα μη υψηλής καθαρότητας. Αυτό με τη σειρά του αυξάνει το κόστος παραγωγής του καυσίμου. Κυψέλες καυσίμου προσανατολισμένες για βιομηχανική χρήση πάλι χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας (I4).



Εικόνα 28: Το υδρογόνο ως ενεργειακή πηγή στη βιομηχανία.



Εικόνα 29: Το υδρογόνο ως ενεργειακή πηγή στην αυτοκίνηση.

Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα του υδρογόνου είναι ότι έχει πολύ μικρή «αποθηκευτική πυκνότητα». Αν δηλαδή το χρησιμοποιούσαμε ασυμπίεστο, θα χρειαζόμασταν ντεπόζιτο 3.000 φορές μεγαλύτερο από εκείνο του αυτοκινήτου μας προκειμένου να διανύσουμε την ίδια απόσταση. Στα πολυετή πειράματα των αυτοκινητοβιομηχανιών έχουν εξετασθεί διάφορες προτάσεις αποθήκευσής του: ως συμπιεσμένου αερίου, ως υγροποιημένου και ως στερεού σε υβρίδια μετάλλων.

Η συμπίεση του αερίου υδρογόνου έχει περιορισμένα αποτελέσματα και αρκετή επικινδυνότητα. Η υγροποιημένη μορφή του παρέχει τον μεγαλύτερο βαθμό συμπίεσης αλλά απαιτεί το 30%-40% του ντεπόζιτου ως ενέργεια ψύξης, καθώς το υδρογόνο βράζει στους -253 βαθμούς Κελσίου! Ακόμη και τότε, ένα ποσοστό 1%-2% εξατμίζεται κάθε μέρα.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

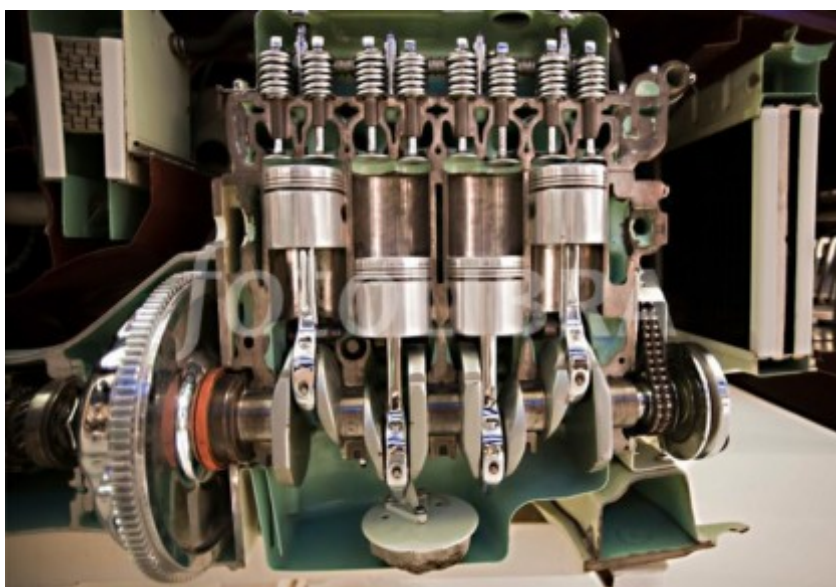
Η παγίδευση του υδρογόνου σε ειδικά μέταλλα - τα οποία το απορροφούν ψυχόμενα και το αποδίδουν θερμαινόμενα - είναι αποδοτική, αλλά... το ντεπόζιτο ζυγίζει πολύ, η εξαγωγή του υδρογόνου απαιτεί ενέργεια και το γέμισμα παίρνει αρκετό χρόνο.

Οι ελπίδες στο μέλλον συγκεντρώνονται στην τεχνολογία νανοσωλήνων άνθρακα, οι οποίοι είναι τέλειες παγίδες και ελαφρές. Σε ένα-δύο χρόνια πιστεύεται ότι η τεχνολογία αυτή θα δώσει την τελική λύση.

3 Μηχανές Εσωτερικής Καύσης.

3.1 Εισαγωγή.

Η μηχανή εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) αποτελεί τη θερμική μηχανή στην οποία το εργαζόμενο μέσο για την παραγωγή μηχανικής ισχύος συνίσταται από τα καυσαέρια δηλ. τα προϊόντα της καύσης του αέρα με το καύσιμο. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα ΜΕΚ αποτελούν οι εμβολοφόρες μηχανές (κινητήρες) και οι αεριοστρόβιλοι. Ο εμβολοφόρος κινητήρας είναι μια ΜΕΚ που χρησιμοποιείται ευρέως στις μεταφορές (αυτοκίνητα, οχήματα βαρέως τύπου, και αεροπλάνα μικρής ταχύτητας και πλοία. Μοναδική εξαίρεση κατά την επιλογή της στροβιλομηχανής αποτελούν τα μέσης και μεγάλης ταχύτητας αεροσκάφη στα οποία η στροβιλομηχανή επιβάλλεται από την απαίτηση μεγάλης ισχύος.



Εικόνα 30: Μηχανή εσωτερικής καύσης σε τομή.

Ο εμβολοφόρος κινητήρας έχει καθιερωθεί στις μεταφορές και γενικότερα στην αυτοκίνηση γιατί συνδυάζει χαρακτηριστικά όπως απλή κατασκευή, υψηλό ολικό βαθμό απόδοσης και μεγάλη συγκέντρωση ισχύος. Οι εμβολοφόροι κινητήρες διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες σε συμφωνία με τις βασικές αρχές λειτουργίας τους, τον τρόπο ανάφλεξης του μίγματος αλλά και κατασκευαστικές διαμορφώσεις. Δηλαδή ως προς τον θερμοδυναμικό κύκλο που ακολουθείται, υπάρχουν δίχρονοι και τετράχρονοι κινητήρες, κινητήρες Otto, Diesel. Υπάρχουν ακόμα παλινδρομικοί, περιστροφικοί σύμφωνα με την κίνηση του εμβόλου.

Κοινό χαρακτηριστικό όλων των τύπων ΜΕΚ, αποτελεί ο θερμοδυναμικός κύκλος που ακολουθείται, δηλαδή οι φάσεις λειτουργίας όπως η συμπίεση, η καύση και η εκτόνωση καθώς και οι φάσεις εναλλαγής των αερίων δηλ. της εκκένωσης του κυλίνδρου από τα καυσαέρια και τέλος του κύκλου λειτουργίας και της εκ νέου πλήρωσής του με νέο καύσιμο για την εκτέλεση νέου κύκλου. Στην παρούσα εργασία δεν θα γίνει ανάλυση κάθε τύπου κινητήρα σε βάθος αφού δεν είναι αυτός ο σκοπός παρά μόνο θα αναφερθούν επιγραμματικά οι βασικές αρχές

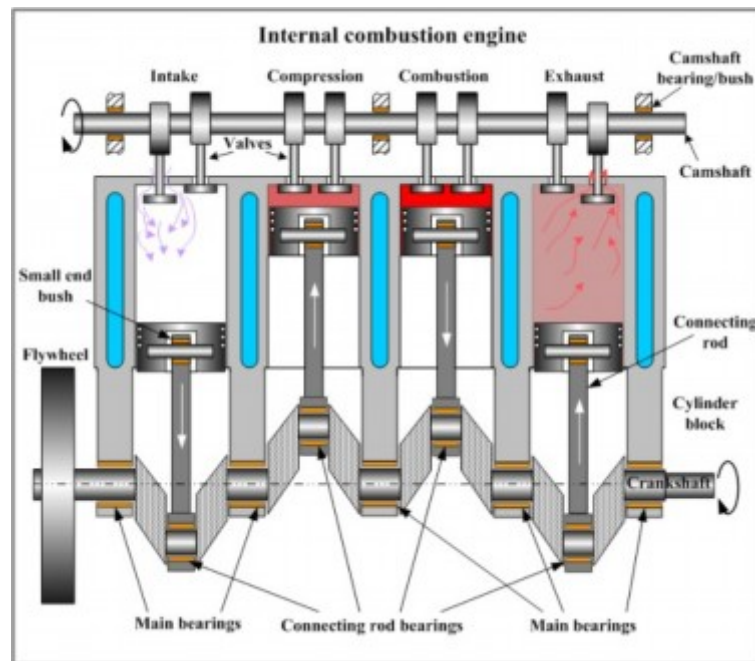
λειτουργίας και τα κύρια χαρακτηριστικά γνωρίσματα του κάθε τύπου κινητήρα για λόγους πληρότητας.

3.2 Τετράχρονος κινητήρας.

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 μέσω του διωστήρα.

Στους εμβολοφόρους παλινδρομικούς κινητήρες, το έμβολο αναγκαστικά ακινητοποιείται σε δύο ορισμένες θέσεις του στροφαλοφόρου άξονα, προτού επέλθει αναστροφή της κίνησής του. Αυτές οι θέσεις ονομάζονται 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° της στροφαλοφόρου ατράκτου.

Στους τετράχρονους κινητήρες ένας κύκλος λειτουργίας διαρκεί δύο πλήρεις περιστροφές της στροφαλοφόρου ατράκτου ή 720° γωνίας στροφάλου δηλ. περιλαμβάνει 4 πλήρεις διαδρομές εμβόλου ή 4 «χρόνους».



Εικόνα 31: Τετράχρονη Μηχανή εσωτερικής καύσης. Διακρίνονται οι τέσσερις χρόνοι της καύσης.

Οι 4 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 εκτόνωσης κατά τον οποίο το μίγμα αναφλέγεται λόγω της ηλεκτρικής εκκένωσης του σπινθηριστή και εκτονώνεται προσδίδοντας στο έμβολο γραμμική ταχύτητα η οποία μετατρέπεται σε γωνιακή στη στροφαλοφόρο άτρακτο και τέλος ο χρόνος της εξαγωγής κατά τον οποίο ο κύλινδρος εκκενώνεται από τα προϊόντα της καύσης. Στους τετράχρονους

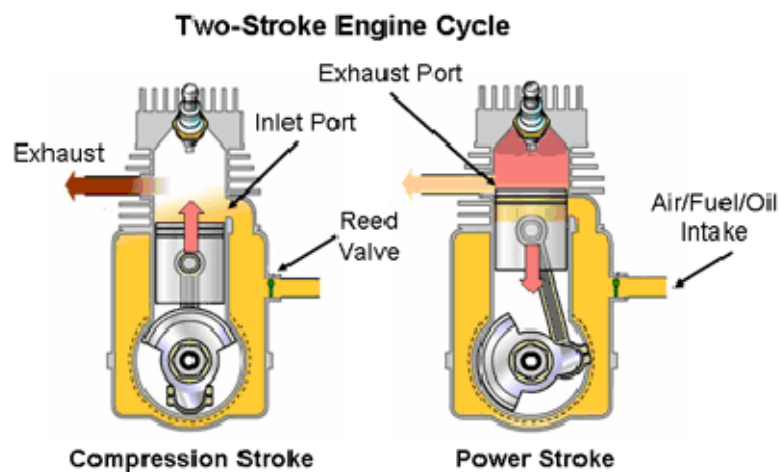
κινητήρες Diesel, μόνο ο ατμοσφαιρικός αέρας συμπιέζεται κατά τη φάση της συμπίεσης ενώ το καύσιμο εγχύεται λίγο πριν το ΑΝΣ.

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 μάντα ή αλυσίδας. Οι τετράχρονοι κινητήρες αποτελούν την κυρίαρχη επιλογή σε παγκόσμια βάση, λόγω της απλής λειτουργίας τους, την αξιοπιστία τους και τον καλό βαθμό απόδοσής τους.

3.3 Δίχρονος κινητήρας.

Η ειδοποιός διαφορά των δίτροχων κινητήρων από τους τετράχρονους είναι ότι ένας κύκλος λειτουργίας ολοκληρώνεται σε μία μόνο περιστροφή της στροφαλοφόρου άτρακτου ή 360° γωνίας στροφάλου. Μια περίοδος λειτουργίας περιλαμβάνει δύο διαδρομές του εμβόλου ή δύο «χρόνους» εκ των οποίων μόνο το μισό 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. Κατά αυτό τον τρόπο η εναλλαγή των αερίων διεξάγεται πάντα υπό δυσμενείς συνθήκες που καθιστούν απαραίτητη τη βιαία πλήρωση του κυλίνδρου με τη βοήθεια ειδικής αντλίας απόπλυσης ή σάρωσης που απορροφά πολύτιμο έργο από τη στροφαλοφόρο άτρακτο.



Εικόνα 32: Δίχρονη Μηχανή εσωτερικής καύσης.

Στην περίπτωση του δίχρονου κινητήρα, όπου οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής απουσιάζουν, ο εκκεντροφόρος άξονας εξυπηρετεί μόνο τον χρονοισμό και την έναυση του ψεκασμού και της καύσης, ενώ περιστρέφεται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα με τη στροφαλοφόρο άτρακτο.

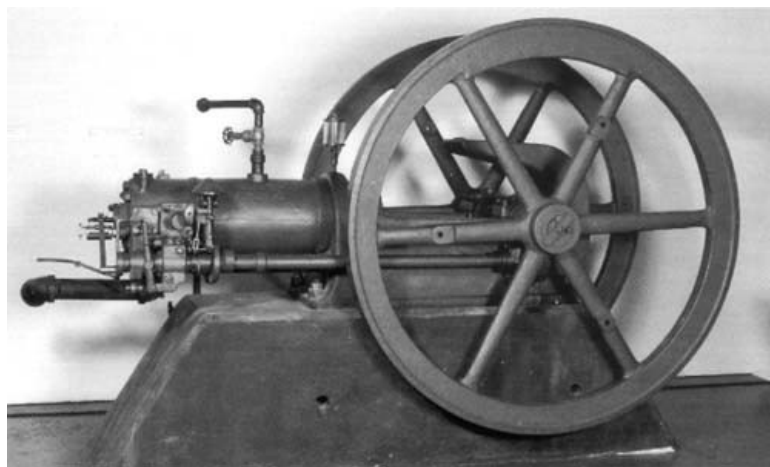
Οι δίχρονοι κινητήρες χρησιμοποιούνται για πολλά χρόνια σε μοτοσυκλέτες και μοτοποδήλατα, μηχανές γκαζόν, εξωλέμβιες μηχανές και μικρές βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς συνδυάζουν την απλότητα του μηχανισμού λειτουργίας, την ευκολία κατασκευής, το μικρό βάρος και την οικονομικά συμφέρουσα μαζική παραγωγή. Παρά ταύτα, είναι σχετικά

θορυβώδεις με υψηλή κατανάλωση καυσίμου και αντίστοιχα υψηλές εκπομπές καυσαερίων ενώ η ανάμιξη του ελαίου λίπανσης με το καύσιμο προσδίδει μια 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 ρυπών έχουν τη ρίζα τους στις αρχές λειτουργίας του δίχρονου κινητήρα, στον οποίο ο χρόνος της εξαγωγής, με το 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).

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης διακρίνονται σε κινητήρες Otto και σε κινητήρες Diesel, βάσει της εσωτερικής τους λειτουργίας, του τρόπου δηλ. με τον οποίο προκαλείται η ανάφλεξη (έναυση) του καυσίμου το οποίο μπορεί να είναι υγρό ή αέριο. Στους κινητήρες Otto ή καύσης ή έναυσης με σπινθήρα (sparkignition) υπάρχει πάντοτε ανάφλεξη με τη βοήθεια κάποιου εξωτερικού μέσου συνηθέστερα ενός ηλεκτρικού σπινθήρα. Οι κινητήρες Otto, ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο καύσιμο διακρίνονται σε βενζινομηχανές και αεριομηχανές. Οι αεριομηχανές χρησιμοποιούν ως καύσιμο φυσικά ή τεχνητά αέρια (π.χ φυσικό αέριο, υγραέριο, κλπ). Οι βενζινομηχανές χρησιμοποιούν ως καύσιμο τη βενζίνη προφανώς αλλά και γενικότερα άλλα ελαφρά υγρά καύσιμα μεγάλης πτητικότητας (π.χ μεθανόλη, αιθανόλη.



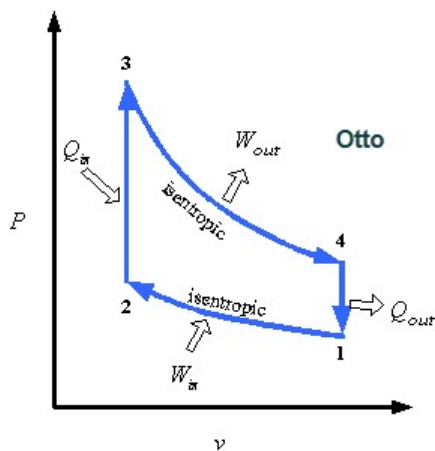
Εικόνα 33: Ο Νικολάους Όττο (NicolausAugustOtto, Χόλτσχάουζεν) ήταν Γερμανός εφευρέτης της Μηχανής εσωτερικής καύσης.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι σχηματισμού του μίγματος αέρα – καυσίμου. Ο παλαιότερος τρόπος ο οποίος χρησιμοποιείται σε πολλές περιπτώσεις είναι αυτός του εξαερωτή. Στον εξαερωτήρα (καρμπυρατέρ) σχηματίζεται και προετοιμάζεται το καύσιμο μίγμα το οποίο έχει αναρροφηθεί από τη μηχανή με φυσικές μεθόδους και ειδικές τεχνικές. Τα πιο σύγχρονα συστήματα σχηματισμού του μίγματος περιλαμβάνουν μεθόδους όπως την ηλεκτρονική έγχυση μονού σημείου ή πολλαπλών σημείων (συστήματα έμμεσης έγχυσης) και την άμεση έγχυση. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται και συστήματα διακοπόμενης έγχυσης σε αντιδιαστολή με τα παλαιότερα συστήματα συνεχούς έγχυσης κατά τη λειτουργία των οποίων η βενζίνη ψεκαζόταν συνεχώς σε όλους τους κυλίνδρους. Κατά τις μεθόδους αυτές

διακοπτόμενης και συνεχούς έγχυσης, επιτυγχάνεται η έγχυση του καυσίμου με τη βοήθεια αντλίας καυσίμου ελεγχόμενα ηλεκτρονικά.

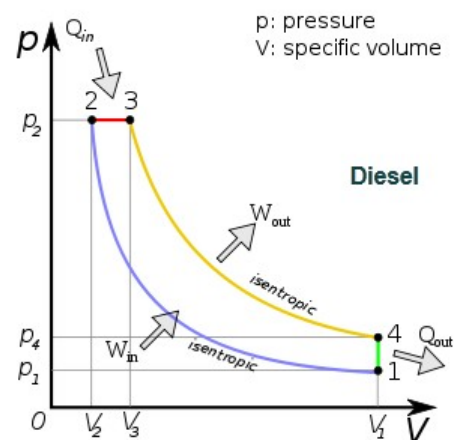
Η ρύθμιση της ισχύος του κινητήρα Otto δύναται να αυξομειώνει το έργο και την ισχύ με μεταβολή της ποσότητας του μίγματος που εισέρχεται στον κύλινδρο. Η μεταβλητότητα της ποσότητας του μίγματος ρυθμίζεται με τη βοήθεια στραγγαλιστικής βαλβίδας (πεταλούδα) η οποία παρεμβάλλεται στη διαδρομή του μίγματος προς τον κύλινδρο και η περιστροφή της οποίας ρυθμίζει την υποπίεση κατά την είσοδο στους κυλίνδρους. Ταυτόχρονα η ποιότητα του μίγματος δηλ. ο λόγος μαζών αέρα – καυσίμου, παραμένει σταθερός με εξαίρεση περιπτώσεις όπως, την κατάσταση εκκίνησης (παγωμένος κινητήρας), την άφορτη λειτουργία και τη ραγδαία επιτάχυνση όπου γίνεται αυτόματη ρύθμιση πιο πλούσιου μίγματος έναντι στοιχειομετρικής αναλογίας.

Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η στοιχειομετρική αναλογία αέρα – καυσίμου (βενζίνης) είναι περίπου 14.7:1 δηλ. απαιτούνται 14.7 μέρη αέρα για την πλήρη καύση ενός μέρους βενζίνης. Στον αντίποδα, η καύση πολύ φτωχών μιγμάτων, η καύση δηλ. με περίσσεια αέρα, έχει ως θετική συνέπεια τη βελτίωση του βαθμού απόδοσης και τη μείωση των εκπεμπόμενων ρυπογόνων αερίων. Οι κινητήρες Otto φτωχού μίγματος (κινητήρας May), επιτρέπουν την καύση πολύ φτωχών μιγμάτων, με λόγο αέρα – καυσίμου έως και 50:1, κατάσταση που επιτυγχάνεται με αύξηση του επιπέδου της τύρβης (swirl) του καυσίμου και πιο συγκεντρωτικό θάλαμογύρω από τη βλβίδα εξαγωγής. Αυτές οι σχεδιαστικές παράμετροι μειώνουν τον κίνδυνο εμφάνισης κρουστικής καύσης και επιτρέπουν έτσι τη χρήση υψηλών βαθμών συμπίεσης, κάτι που είναι ευεργετικό για την απόδοση της μηχανής και την οικονομία του καυσίμου.



Οι μεταβολές που αποτελούν τον κύκλο Otto είναι:

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



Οι μεταβολές που αποτελούν τον κύκλο Diesel είναι:

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

Εικόνα 34: Κύκλος Otto σε σύγκριση με τον κύκλο Diesel.

3.5 Κινητήρας Diesel.

Στους κινητήρες Diesel που πήραν το όνομά τους από τον εφευρέτη Rudolf Diesel, ή καύσης ή έναυσης με συμπίεση (compressinignition), υπάρχει πάντα αυτανάφλεξη του

μίγματος λόγω της χρονικά κατάλληλης εισαγωγής του καυσίμου στον κύλινδρο τη στιγμή κατά την οποία το περιεχόμενό του έχει ήδη θερμανθεί σε αρκετά 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, γνωστός και ως πετρελλαιομηχανή, αναρροφά ατμοσφαιρικό αέρα και χρησιμοποιεί ως καύσιμα υγρά καύσιμα βαρύτερα της βενζίνης της κατηγορίας των πετρελαιοειδών, τα οποία είναι λιγότερο πτητικά και φθινότερα. Για το σχηματισμό του μίγματος καύσης, το πετρέλαιο εγχύεται στον κύλινδρο προς το τέλος της διαδρομής συμπίεσης, λίγο πριν το ΑΝΣ και διασκορπίζεται στη μάζα του ήδη συμπιεσμένου αέρα. Ως γνωστό η θερμοκρασία ενός συμπιεζόμενου ρευστού (ατμοσφαιρικός αέρας) αυξάνεται κατά τη συμπίεσή του. Κατά αυτό τον τρόπο, 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 μίγμα αέρα – καυσίμου αναφλέγεται.

Σε αντίθεση με τον κινητήρα Otto, η ρύθμιση της ισχύος του κινητήρα Diesel είναι ποιοτική, δηλ. η αυξομείωση του έργου και της ισχύος επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της ποιότητας του μίγματος, δηλ. 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 ποσοστικού ελέγχου της αντλίας έγχυσης.



Εικόνα 35: Μηχανή εσωτερικής καύσης Diesel

Η αρχή λειτουργίας του τετράχρονου κινητήρα Diesel συνοπτικά περιγράφεται 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 σταγγαλιστική βαλβίδα στην πολλαπλή εξαγωγής. Λόγω 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 στην υγρή μορφή, μέχρι τη στιγμή της ανάφλεξης του.

Η καλή λειτουργία του κινητήρα Diesel εξαρτάται από τον κατάλληλο έλεγχο της έγχυσης του καυσίμου και της κίνησης του αέρα στο θάλαμο καύσης, με σκοπό την ακτά το δυνατόν καλύτερη ανάμιξη των ατμών του καυσίμου με τον αέρα και την ομογενοποίηση του

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

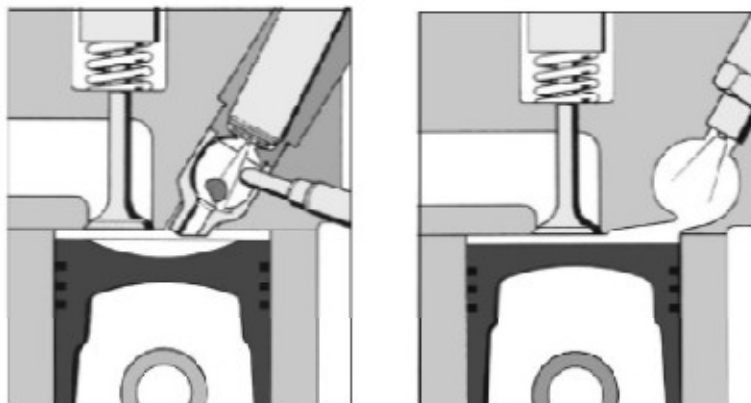
μίγματος σε σύντομο χρονικό διάστημα. Για να επιτευχθούν τα παραπάνω έχουν χρησιμοποιηθεί δύο λύσεις σχεδιασμού του θαλάμου καύσης.

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 πολύ υψηλές πιέσεις μεταξύ 100 και 180bar. 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 στροβιλοδών κινήσεων του αέρα κατά τη φάση της συμπίεσης, με στόχο την ομοιόμορφη κατανομή του μίγματος στο 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 σε 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 μέσω μιας στενής διόδου. Ο κύριος θάλαμος σχηματίζεται 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 μιας οπής στις περισσότερες περιπτώσεις, καθώς και το απαραίτητο στην περίπτωση του διμερούς θαλάμου βοηθητικό μέσο εκκίνησης που συνήθως είναι ένας ηλεκτρικός πυρακτωτής.

Διακρίνονται 3 κατηγορίες διμερών θαλάμων καύσης: οπροθάλαμος (precombustionchamber), ο στροβιλοθάλαμος (swirlchamber) και ο ταμειυτής αέρα. Και στις 3 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.

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 συγκέντρωσης ισχύος λόγω της δυνατότητας επιτυχούς καύσης με μικρότερη περίσσεια αέρα και επομένως μειωμένες εκπομπές άκαυστου άνθρακα στην εξαγωγή.



Εικόνα 36: (α) Διμερής θάλαμος καύσης εμμέσου ψεκασμού με προθάλαμο, (β) Διμερής θάλαμος καύσης εμμέσου ψεκασμού με στροβιλοθάλαμο.

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 δίσκος). 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 37: Τα μηχανικά μέρη του περιστροφικού κινητήρα Wankel.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

4 Υδρογονοκίνηση.

Η ανάγκη απεξάρτησης από εισαγόμενους υδρογονάνθρακες από τη μία πλευρά αλλά και μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη χρήση ορυκτών καυσίμων από την άλλη οδηγούν στο συμπέρασμα ότι στο μέλλον το υδρογόνο που θα παράγεται από ΑΠΕ θα παίξει σημαντικό ρόλο μεσοπρόθεσμα, ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας και μακροπρόθεσμα, ως καθαρό καύσιμο για απωκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας (για θέρμανση) και στις μεταφορές. Αρκεί να σκεφτεί κανείς ότι βρισκόμενος με το αυτοκίνητο σε μποτιλιάρισμα, βρίσκεται ακριβώς πίσω από την εξάτμιση του μπροστινού αυτοκινήτου και τα υπολείμματα της ατελούς καύσης του προπορευόμενου αυτοκινήτου ίσως μπαίνουν εξ ολοκλήρου στην καμπίνα του αυτοκινήτου.

Πριν από περίπου 140 χρόνια ο Ιούλιος Βερν το 1874 είχε προβλέψει:

«..πιστεύω ότι το νερό κάποια μέρα θα χρησιμοποιείται ως καύσιμο, ότι το Υδρογόνο και το Οξυγόνο που το αποτελούν, είτε μαζί είτε χωριστά, μια μέρα θα χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο, και θα αποτελέσουν μια ανεξάντλητη πηγή θερμότητας και φωτός..»
Ιούλιος Βερν, 1874, «Το μυστηριώδες νησί»

Είναι ξεκάθαρο ότι ο συνδυασμός του σύγχρονου τρόπου ζωής, η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και η ανάγκη μείωσης των εκπομπών αερίων ρύπων σε παγκόσμια κλίμακα, όπου εντείνουν το απειλητικό φαινόμενο του θερμοκηπίου, είναι επιτακτική ανάγκη η στροφή τα τελευταία χρόνια σε άλλες, περισσότερο ήπιες μορφές ενέργειας. Ανάμεσά τους εντάσσεται και το υδρογόνο, το οποίο αντιμετωπίζεται ως η κορυφαία εναλλακτική πηγή ενέργειας. Τόσο στην Ευρώπη, όσο και στις υπόλοιπες ανεπτυγμένες χώρες, έχουν εντατικοποιηθεί οι προσπάθειες για την εδραίωση της «οικονομίας του υδρογόνου», με σημαντικότητα ποσά να επενδύονται στην έρευνα και την ανάπτυξη προς αυτή την κατεύθυνση.

Ήδη οι καταναλωτές τα τελευταία χρόνια στρέφονται προς ολοένα και οικονομικότερες λύσεις στη μετακίνηση. Ένα παράδειγμα είναι τα συστήματα υγραεριοκίνησης τα οποία παίρνουν συνεχώς όλο και μεγαλύτερο μερίδιο στην αγορά λόγω της χαμηλής τιμής του υγραερίου ως καύσιμο. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή του υγραερίου είναι περίπου μισή ως προς της βενζίνης και η απόσβεση ενός συστήματος υγραεριοκίνησης αναλόγως και των διανυόμενων χιλιομέτρων μπορεί να γίνει σε 2 -3 χρόνια το αργότερο. Επομένως αποτελεί μια συμφέρουσα λύση. Ένας ανασταλτικός παράγοντας ως προς την υγραεριοκίνηση είναι ότι η τιμή του υγραερίου ακολουθεί την τιμή της βενζίνης και του πετρελαίου. Μια απάντηση στις συνεχιζόμενες αυξήσεις της τιμής της βενζίνης μπορεί να δοθεί μέσω της νέας εναλλακτικής μορφής υβριδικής κίνησης, την λεγόμενη «υδρογονοκίνηση» υπό την αίρεση ότι και αυτό το τελευταίο καύσιμο (υδρογόνο) δεν θα συναρτάται με την βενζίνη ως προς την τιμολόγησή του.

4.1 Το Υδρογόνο ως καύσιμο.

Από τεχνολογικής αλλά και οικονομικής άποψης, το υδρογόνο στο μέλλον πρόκειται να είναι το πιο πιθανό υποψήφιος καύσιμο αντικατάστασης των σημερινών συμβατικών καυσίμων (βενζίνης, πετρελαίου) που βασίζονται στους ορυκτούς υδρογονάνθρακες (βενζίνη,

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

ντίζελ, μεθάνιο κ.λπ.). Το υδρογόνο μπορεί να παρασκευαστεί με πολλούς τρόπους όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα, όπως για παράδειγμα από την ηλιακή ενέργεια μέσω ηλεκτρόλυσης του νερού, και έχει προταθεί από την επιστημονική κοινότητα ως το πιο πιθανό καύσιμο του μέλλοντος λόγω των σημαντικών εναλλακτικών χαρακτηριστικών του αντικαθιστώντας τα παράγωγα του πετρελαίου, καύσιμα της σημερινής εποχής.

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 που επίσης εκτενής αναφορά έγινε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Το υδρογόνο είναι ένα πολύ αποτελεσματικό - αποδοτικό καύσιμο για τους κινητήρες εσωτερικής καύσης, διότι οι ιδιότητες καύσης του, εξασφαλίζουν υψηλό βαθμό απόδοσης και την απρόσκοπτη λειτουργία του κινητήρα. 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 στις μηχανές εσωτερικής καύσης.

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 (θερμογόνος δύναμη $H_2 \sim 120000 \text{kJ/kg}$ έναντι (40000 – 45000) των συνηθών υγρών υδρογονανθράκων).

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

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 ΜΕΚ 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 ΜΕΚ 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 ΜΕΚ υδρογόνου είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες σε μία ΜΕΚ βενζίνης. και έτσι αναμένονται υψηλότερες εκπομπές οξειδίων του αζώτου από την καύση υδρογόνου.

4.2 Κριτήρια ικανοποίησης του καυσίμου του μέλλοντος.

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 καυσίμης 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,

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

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 ($\theta_{\text{πετρ}} = 40 - 42,5\text{MJ/kg}$). 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.

4.3 Χαρακτηριστικά του Υδρογόνου ως καύσιμο 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.

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.

Στον Πίνακα 4.1 που ακολουθεί δίνονται συνοπτικά οι ιδιότητες καύσης του υδρογόνου σε σύγκριση με το μεθάνιο και τη βενζίνη.

- 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.

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

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)	1,90	0,38	0,37 – 0,43
Αδιαβατική θερμοκρασία καύσης (K)	2318	2190	~ 2470
Θερμοκρασία αυτανάφλεξης (K)	858	813	~ 501 – 744
Στοιχειομετρικός λόγος Αέρα/Καυσίμου κατά μάζα	34,3	–	15,1
Στοιχειομετρικός λόγος Αέρα/Καυσίμου κατ' όγκο	2,38	–	59,5
Ταχύτητα καύσης (m/s)	2,65 – 3,25	0,37 – 0,45	0,37 – 0,43
Κατώτερη θερμογόνος δύναμη (MJ/kg)	119,7	46,72	44,79
Ανώτερη θερμογόνος δύναμη (MJ/kg)	141,7	52,68	48,29
Συντελεστής διάχυσης στον αέρα (cm ² /s)	0,61	0,189	0,05
Πυκνότητα αερίου σε ΚΣ (kg/m ³)	0,083764	0,65119	4,4
Απόσταση σβησίματος φλόγας (mm)	0,64	2,03	~2,0
Θερμογόνος δύναμη ανά kg μάζας αέρα (MJ/kg _{air})	3,37	2,56	2,79

4.3.1 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.

4.3.2 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

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

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.

4.3.3 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' ότι 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).

4.3.4 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.

4.3.5 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 ασυμπίεστο 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.

4.3.6 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 38: Στην αριστερή φωτογραφία διακρίνεται 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.

4.3.7 Μικρή απόσταση σβησίματος και εξάλειψης της φλόγας.

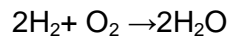
Η ιδιότητα αυτή, της καύσης, που περιγράφει την απόσταση από τα τοιχώματα του κυλίνδρου στην οποία αποσβένεται το μέτωπο του αναφλεγέντος μίγματος λόγω θερμικών απωλειών, είναι ευεργετική για την απόδοση της ΜΕΚ υδρογόνου εφόσον επιτρέπει στο μέτωπο της καύσης να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση πριν αυτό 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 εισαγωγής κατά το χρόνο της εισαγωγής (backfire ή flashback).

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

4.3.8 Υπολογισμός του λόγου αέρα – υδρογόνου για στοιχειομετρική καύση.

Στη συνέχεια παρατίθεται ο υπολογισμός του λόγου αέρα - καυσίμου (AirFuelRatio), 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:



Δηλαδή για την πλήρη καύση δύο moles H_2 απαιτείται ένα mole O_2 . Επειδή όμως δεν χρησιμοποιείται καθαρό οξυγόνο ως μέσο οξείδωσης αλλά ατμοσφαιρικός αέρας πρέπει το άζωτο του αέρα να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς. Έτσι λοιπόν ισχύει:

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

Η περιεκτικότητα του αέρα σε άζωτο και οξυγόνο είναι 79% N_2 και 21% O_2 . Επομένως τα moles του αζώτου N_2 για κάθε mole οξυγόνου O_2 στον αέρα θα είναι:

$$\text{Moles } \text{N}_2 = 1 \text{ mole } \text{O}_2 \times (79 / 21) = 3.7619 \text{ moles}$$

$$\text{Άρα moles αέρα} = \text{moles } \text{O}_2 + \text{moles } \text{N}_2 = 1 + 3,7619 = 4,7619 \text{ moles}$$

Βάρος οξυγόνου (O_2) = 1 mole O_2 x 16 g/mole = 32g.

Βάρος αζώτου (N_2) = 3,7619 moles N_2 x 28 g/mole = 105,33g.

Βάρος αέρα = 105,33 + 32 = 137,33g.

Βάρος υδρογόνου (H_2) = 2 moles H_2 x 2 g/mole = 4g.

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

A/F κατά μάζα = μάζα αέρα / μάζα υδρογόνου (H_2) = 137,33g / 4g = 34,3325 : 1

A/F κατά όγκο = όγκος (moles) αέρα / όγκος (moles) υδρογόνου (H_2) =
= 4,7619 moles / 2 moles = 2,38 : 1.

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

4.4 Παράγωγα της καύσης των ΜΕΚ Υδρογόνου - σύγκριση με τους ρύπους βενζίνης.

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 αναπτυσσόμενες 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

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

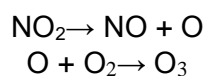
διοξειδίου του άνθρακα. Όμως οι μηχανές εσωτερικής καύσης εκτός από το διοξείδιο του άνθρακα εκπέμπουν και πολλούς άλλους βλαβερούς πρωτογενείς ή δευτερογενείς ρύπους όπως είναι το μονοξείδιο του άνθρακα, άκαυστοι υδρογονάνθρακες, αλδεΐδες, κετόνες, οξειδία του θείου, οξειδία του αζώτου, βενζόλιο και 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 οξειδία 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 καρκινογενέσεων.

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 (NO₂). Οι συνολικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) 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_x, 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 πολύ μικρές και δεν αποτελούν πρόβλημα.

4.4.1 MEK υδρογόνου και οξειδία του αζώτου (NO_x).

Πρόσφατες έρευνες υποδεικνύουν το όζον (O₃) της τροπόσφαιρας ως το 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 απλό μηχανισμό:



Το διοξείδιο του αζώτου διασπάται υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μονοξείδιο 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

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

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 οξειδία 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 οξειδία 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 (HNO_3 & H_2SO_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 NO_x χωρίς σημαντική μείωση της απόδοσης του.

4.4.2 Παράμετροι λειτουργίας των MEK υδρογόνου –δημιουργία (NO_x).

Στους κινητήρες βενζίνης ή ντίζελ, τα υψηλότερα επίπεδα των 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 NO_x .

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 NO_x , είναι δυνατόν να καθοριστούν οι συνθήκες εκείνες που ελαχιστοποιούν τα NO_x . Παρότι διαφορετικά πειράματα με διαφορετικούς κινητήρες που διεξήχθησαν κατά καιρούς, έχουν καταλήξει σε ελαφρώς διαφορετικά αποτελέσματα και απόλυτα νούμερα σε επιμέρους ζητήματα των εκπομπών NO_x , όλοι συμφωνούν ότι οι συγκρίσεις πρέπει να γίνονται στον λόγο ισοδυναμίας καυσίμου - αέρα Φ (equivalenceratio) που επιτρέπει την ομαλή και απροβλημάτιστη λειτουργία του κινητήρα περιορίζοντας παράλληλα σημαντικά το σχηματισμό NO_x . Έτσι οι περισσότεροι από τους ερευνητές καταλήγουν σε μία περιοχή του λόγου ισοδυναμίας Φ , ($0.5 < \Phi < 1.1$), εκτός της οποίας εξασφαλίζεται ομαλή λειτουργία με χαμηλές

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

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 NOx.

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.

4.4.3 Μηχανισμοί μείωσης των επεμπόμενων NOx.

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 NOx, 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 μείγματος. 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.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

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 οξείδωση των μεταλλικών μερών του και αλλοίωση της σύνθεσης του λιπαντικού (oilcontamination).

Η ανακύκλωση των καυσαερίων, εξάλλου, είναι μία ακόμη μέθοδος μείωσης των ΝΟχαλλά είναι αποτελεσματική μόνο για τα πτωχά μίγματα υδρογόνου - αέρα. Σε στοιχειομετρικά ή πλούσια μίγματα 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 ΜΕΚ βενζίνης βρίσκονται στο 15 - 30%.

4.4.4 Υπεροξείδιο του υδρογόνου ως ρύπος των ΜΕΚ υδρογόνου.

Πέρα από τα οξείδια του αζώτου, για τα οποία εκτεταμένες αναφορές υπάρχουν στην σχετική με τις ΜΕΚ υδρογόνου βιβλιογραφία, μία ακόμη χημική ένωση - το υπεροξείδιο του υδρογόνου (H_2O_2) - ανιχνεύεται στην εξαγωγή της μηχανής υδρογόνου. Οι συνέπειες του υπεροξειδίου του υδρογόνου στο περιβάλλον, αν και σπανίως αναφέρεται ως ρύπος των ΜΕΚ υδρογόνου στην σχετική βιβλιογραφία, δεν πρέπει να υποτιμηθούν. Το υπεροξείδιο 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 υπεροξείδιο 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 Φ , 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 ΜΕΚ 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_2O_2) σε υδρογόνο H_2 και οξυγόνο O_2 .

4.5 Φαινόμενα ανώμαλης καύσης των ΜΕΚ υδρογόνου.

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 (pre-ignition), η κρουστική καύση (knock ή knocking) και η ανάφλεξη του μίγματος στην πολλαπλή εισαγωγής (inductionignition 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.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

4.5.1 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 εξαιρεωτή (καρμπυρατέρ), ο περιορισμός του φαινομένου ήταν δύσκολος, όπως και η εξεύρεση των αιτιών 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.

4.5.2 Αιτίες πρόκλησης ανάφλεξης στην εισαγωγή.

Οι αιτίες που προκαλούν την ανάφλεξη στην εισαγωγή εξηγούνται αναλυτικά στα επόμενα:

- **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 στο 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 ελλειπώς 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.
- **Υπολοιπόμενη ενέργεια στο ηλεκτρικό κύκλωμα 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

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

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 ΜΕΚ υδρογόνου περισσότερο από τις ΜΕΚ 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 επιστροφή 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 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, 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 (PortFuelInjection).

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

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

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 DIή FSI (DirectInjectionή FuelStratifiedInjection). Τα συστήματα άμεσης έγχυσης βέβαια είναι πολύπλοκα και κοστοβόρα, και η μετατροπή υπαρχόντων κινητήρων σε πειραματικούς με την υιοθέτησησυστημάτων 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 μείγματος 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 εισαγωγής. 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 διείσδυση 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.

4.6.1 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, που 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

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

πυρανάφλεξη 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 ελλειπώς 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 πυρανάφλεξης, 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 υδατοψεκάσμο στην εισαγωγή για την ψύξη του μίγματος, το μεταβλητό χρονισμό των βαλβίδων για την αποτελεσματική κένωση του θαλάμου καύσης από τα καυσαέρια καθώς και την άμεση έγχυση του καυσίμου απευθείας στο θάλαμο καύσης.

4.6.2 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 σημειώθηκε και προηγούμενα 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

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

μεγαλύτερος αριθμός οκτανίων του υδρογόνου (RON > 120) σε σχέση με τον αριθμό οκτανίων της βενζίνης.

4.7 Μέθοδοι τροφοδοσίας καυσίμου & σχηματισμού του μίγματος.

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 απαιτήση 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 NOx 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 εξαεριωτής (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.

4.8 Εξαεριωτής – Έγχυση στην πολλαπλή εισαγωγής (TMI).

Από τις παραπάνω μεθόδους ο εξαεριωτής χρησιμοποιήθηκε ευρύτατα στα πρώτα βήματα της έρευνας για το υδρογόνο ως η παλιότερη και απλούστερη τεχνολογία. Όμως η

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

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 (TimedManifoldInjection) 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.

4.8.1 Άμεση έγχυση (DI) – Έγχυση στη θυρίδα εισαγωγής (PFI).

Τα τελευταία χρόνια έχει καθιερωθεί η χρήση συστημάτων άμεσης έγχυσης (DirectInjection) ή συστημάτων έγχυσης του καυσίμου στη θυρίδα εισαγωγής (PortFuelInjection) 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

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

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.

4.9 Τεχνικά προβλήματα – περιορισμοί στις MEK υδρογόνου.

Στη σχετική με το θέμα βιβλιογραφία παρατηρείται το φαινόμενο να δίδεται ιδιαίτερη έμφαση στα θετικά χαρακτηριστικά του υδρογόνου ως καύσιμο στις MEK 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 MEK 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 αντίστοιχη χωρητικότητας MEK βενζίνης. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

- ιδιαιτέρως χαμηλή κατ' όγκο θερμογόνο δύναμη του υδρογόνου σε σχέση μ' αυτήν της βενζίνης. Εξάλλου για την απόδοση της ίδιας ισχύος με μία MEK βενζίνης, η MEK 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 MEK υδρογόνου να είναι τουλάχιστον συγκρίσιμη με τις MEK βενζίνης.
- Η παρουσία των υδρατμών στα προϊόντα της καύσης της MEK 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 MEK βενζίνης είναι μάλλον ακατάλληλα για τις MEK 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.

4.10 Χαρακτηριστικά σχεδιασμού & λειτουργίας των MEK υδρογόνου.

Η ομαλή και αξιόπιστη, με υψηλή απόδοση και χωρίς την εμφάνιση φαινομένων ανώμαλης καύσης, λειτουργία των MEK υδρογόνου προϋποθέτει διαφορετικά χαρακτηριστικά λειτουργίας και σχεδιασμού τους σε σχέση με τα γνωστά και καθιερωμένα χαρακτηριστικά λειτουργίας των MEK 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.

4.10.1 Σύστημα τροφοδοσίας του καυσίμου.

Όπως προέκυψε και νωρίτερα, οι μέθοδοι του εξαεριοτή και της έγχυσης του καυσίμου στην πολλαπλή εισαγωγής είναι εντελώς ακατάλληλες για την τροφοδοσία των MEK υδρογόνου. Αντίθετα, η έγχυση του καυσίμου είτε στην θυρίδα εισαγωγής (PortFuelInjection) είτε απευθείας στον θάλαμο καύσης (DirectInjection) 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

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

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.

4.10.2 Σύστημα ανάφλεξης – 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 απρογραμμάτιστης 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 πυρανόφλεξης. 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 θερμοκή 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 εμπειρισταωμένης διερεύνησης

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

πριν την τελική επιλογή.

4.10.3 Λίπανση των ΜΕΚ υδρογόνου.

Η αυξημένη συγκέντρωση νερού με την μορφή υδρατμών στον στροφαλοθάλαμο των ΜΕΚ υδρογόνου κάνει μάλλον απαγορευτική τη χρήση των λιπαντικών ελαίων που χρησιμοποιούνται στις ΜΕΚ 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 ΜΕΚ 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 ΜΕΚ υδρογόνου.

Τέλος, σημαντική προσοχή πρέπει να δοθεί στην αποφυγή δημιουργίας της ανεπιθύμητης τέφρας (sulfatedash) που σχηματίζεται από τα μεταλλικά στοιχεία των προσθέτων του λιπαντικού καθώς και από τα κατάλοιπα που δημιουργούνται κατά τη χρήση τους (οξείδια, 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 πυρανόφλεξης.

4.10.4 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 ΜΕΚ 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 ΜΕΚ 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.

4.10.5 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

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

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 καύσιμου 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.

4.10.6 Βαθμός συμπίεσης.

Η υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης του υδρογόνου επιτρέπει την λειτουργία των MEK υδρογόνου με υψηλότερους βαθμούς συμπίεσης από τις MEK 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 περιπτωσιολογικά για κάθε μηχανή καθώς ο βέλτιστος για μέγιστη απόδοση βαθμός συμπίεσης μπορεί να διαφέρει από εκείνον για μέγιστη ισχύ.

4.10.7 Στρατηγική ελέγχου του φορτίου της μηχανής.

Τα μεγάλα όρια αναφλεξιμότητας του υδρογόνου (4-75% κατ' όγκο) επιτρέπουν τον έλεγχο του φορτίου της μηχανής με την υιοθέτηση συστήματος εισαγωγής χωρίς στραγγαλιστική δικλείδα (WideOpenThrottle). 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 MEK 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

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

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 ΝΟ_x ποσοτικός έλεγχος του φορτίου με την χρήση «πεταλούδας» στην εισαγωγή κρίνεται επιβεβλημένος.

4.10.8 Γενικό συμπέρασμα.

Η μηχανή εσωτερικής καύσης υδρογόνου δεν αποτελεί ουτοπία ούτε όραμα για το μέλλον αλλά σύγχρονη πραγματικότητα. Ακόμα και η προσαρμογή μιας σύγχρονης ΜΕΚ 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 ΜΕΚ 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 ΜΕΚ υδρογόνου ευεργετικά βελτιώνοντας σε μεγάλο βαθμό τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους.

5 Νέοι ορίζοντες στη χρήση του υδρογόνου.

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά γίνεται αναφορά στις τελευταίες εξελίξεις στην τεχνολογία του υδρογόνου ως καυσίμου στην αυτοκίνηση και μια ιστορική αναδρομή της ηλεκτροκίνησης. Ακόμα περιγράφεται μια μέθοδος μετατροπής του κινητήρα ώστε αυτός να καθίσταται ικανός να λειτουργεί αποδοτικά χρησιμοποιώντας ως καύσιμο το υδρογόνο.

Θα πρέπει τέλος να γίνει μια σύντομη αναφορά στο υδρογόνο ως ανανεώσιμη και ήπια μορφή ενέργειας αφού το υδρογόνο απαλλαγμένο από κάθε ποσό άνθρακα (βασικό πρόβλημα των πετρελαιοειδών καυσίμων) μπορεί να προσφέρει αρκετή ενέργεια για καθημερινές χρήσεις όπως η ηλεκτροδότηση κτιρίων ή η κίνηση των μεταφορικών μας μέσων, η θέρμανση των πόλεων κ.α..Μάλιστα αυτή τη στιγμή φαίνεται να γίνονται σημαντικές προσπάθειες, σε πολλές χώρες, από πολλούς επιστήμονες να επαναφέρουν ξανά το υδρογόνο στο προσκήνιο, για τη μετατροπή της προσαρμοσμένης στα καύσιμα άνθρακα υποδομής σε υποδομή με βάση το υδρογόνο.

Ενδεικτικά, η Ισλανδία, προβλέπει σε μία υποδομή πλήρως βασισμένη στο υδρογόνο μέχρι το 2030-2040, ενώ μέχρι το 2030 στόχος του υπουργείου ενέργειας των Η.Π.Α. είναι η αντικατάσταση του 10% της ενεργειακής κατανάλωσης από ενέργεια υδρογόνου.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα για το πως το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παραχθεί ενέργεια είναι οι λεγόμενες κυψέλες καυσίμου (fuel cells) στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση αυτό.

5.1 Νεότερες εξελίξεις στην τεχνολογία του υδρογόνου.

Η υδρογονοκίνηση [44]αποτελεί μία σχετικά πρόσφατη τεχνολογία υβριδικής κίνησης, η οποία συντελεί στην μείωση κατανάλωσης καυσίμου, με καθαρότερα παράγωγα για το περιβάλλον. Μέσω ενός σχετικά απλού στη λειτουργία συστήματος, το οποίο τροφοδοτείται με απλό αποσταγμένο νερό, επιτυγχάνεται η παραγωγή καθαρού υδρογόνου. Το νερό διασπάται στα αέρια συστατικά μέρη του, το υδρογόνο (H_2) και οξυγόνο (O_2). Το παραγόμενο υδρογόνο κατευθύνεται προς το θάλαμο καύσης, όπου αναμιγνύεται με το καύσιμο του αυτοκινήτου. Καθώς το υδρογόνο έχει μεγάλη θερμογόνο δύναμη, αναμιγνυόμενο με το καύσιμο του κινητήρα επιτρέπει την ευκολότερη και γρηγορότερη ανάφλεξη του μίγματος.

Η κίνηση με υδρογόνο εξασφαλίζει ότι:

- Η καύση είναι καθαρότερη και επομένως έχουμε μείωση της κατανάλωσης.
- Επιτυγχάνεται αύξηση της ιπποδύναμης και καλύτερη ανάφλεξη του βασικού καυσίμου, μέσω της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου και αύξησης του επιπέδου των οκτανίων.
- Εξασφαλίζεται μεγαλύτερη αυτονομία με περισσότερα χιλιόμετρα ανά λίτρο, μειώνοντας παράλληλα την ποσότητα των ρύπων που απελευθερώνονται στην εξάτμιση.
- Απομακρύνονται τα υπολείμματα του άνθρακα από το εσωτερικό της μηχανής και αποτρέπεται παράλληλα η δημιουργία νέων. Εξίσου σημαντικό είναι πως τα υπολείμματα της καύσης του υδρογόνου είναι καθαρό νερό.
- Μπορεί να γίνει χρήση του Υδρογόνου σε κινητήρες βενζίνης, πετρελαίου, ακόμη και υγραερίου, χωρίς καμία απολύτως παρενέργεια στην αξιοπιστία του κινητήρα.
- Επιτυγχάνεται οικονομία στην κατανάλωση καυσίμου σε επίπεδα, από 25-40%.
- Επιτυγχάνεται 100% αξιοπιστία και ασφάλεια για το αυτοκίνητο.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

- Επιτυγχάνεται καλύτερη και οικολογικότερη απόδοση, καθώς αυξάνει τη ροπή και την ιπποδύναμη ενώ παράλληλα μειώνει τους βλαβερούς υδρογονάνθρακες που απελευθερώνονται μέσω της εξάτμισης.

Τον Οκτώβριο του 2012, ανακοινώθηκε από το Εργαστήριο Επιστημονικών Ερευνών του πολεμικού ναυτικού των Ηνωμένων Πολιτειών [45]. Σύμφωνα με την ανακοίνωση του συγκεκριμένου εργαστηρίου, μία επιστημονική ομάδα πέτυχε να εξάγει το διοξείδιο του άνθρακα από θαλασσινό νερό, παράγοντας με τον τρόπο αυτό υδρογόνο σε αέρια μορφή.

Αν το πείραμα αποδειχθεί επιτυχημένο, οι επιστήμονες θα μπορέσουν να μετατρέψουν το διοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο σε υδρογονάνθρακες, ικανούς να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα αεροσκαφών. Σύμφωνα με το εργαστήριο, το κόστος του καυσίμου είναι της τάξης του ενός δολαρίου ανά λίτρο, τιμή η οποία το καθιστά οικονομικά βιώσιμο. Το σημαντικότερο κίνητρο της έρευνας αυτής γύρω από εναλλακτικά καύσιμα από το πολεμικό ναυτικό των Ηνωμένων Πολιτειών είναι ασφαλώς γεωπολιτικό, καθώς εάν οι επιστήμονες του ναυτικού πετύχουν το στόχο τους, ο αμερικανικός στρατός θα είναι ικανός να αναλάβει δύσκολες μακρινές αποστολές, αδιαφορώντας για το υψηλό κόστος των καυσίμων.

Πιο συγκεκριμένα όπως αναφέρουν τα μέλη της επιστημονικής ομάδας *«Τα πιθανά οφέλη, από την παραγωγή αεροπορικού καυσίμου JP-5 εν πλω, είναι ότι συρρικνώνει τα προβλήματα παράδοσης του καυσίμου, εξαφανίζει τις δεινές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της μεταφοράς των καυσίμων και αυξάνει δραστικά την αυτονομία του πολεμικού ναυτικού»*. Κλειδί της προσπάθειας αυτής αποτελεί πλέον η μείωση της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή του καυσίμου, ώστε αυτή να καταστεί οικονομικά συμφέρουσα.

Με αφορμή την παραπάνω έρευνα για την μετατροπή του θαλασσινού νερού σε καύσιμο, είναι αναγκαίο να ειπωθεί ότι ο Έλληνας Μιχάλης Καλογεράκης [46], από την Κρήτη, έχει καταφέρει να αποκτήσει ενεργειακή αυτονομία στο σπίτι του χρησιμοποιώντας την αιολική και ηλιακή ενέργεια. Παράλληλα, στην αποθήκη του σπιτιού του παράγει το οικολογικό καύσιμο από ζαχαροκάλαμο και σάπια φρούτα, το οποίο, σε συνδυασμό με μια μικρή μετατροπή στον κινητήρα της μηχανής του, του έχει δώσει μέχρι σήμερα πάνω από 25.000 δωρεάν χιλιόμετρα. Ο Έλληνας ερευνητής (ηλεκτρονικός-ηλεκτρολόγος στο επάγγελμα) παρουσίασε προ ετών στις αρμόδιες υπηρεσίες την εφεύρεσή του για παρόμοια μετατροπή από νερό της βρύσης. Έχει κατασκευάσει κινητήρα ο οποίος λειτουργεί με νερό ως καύσιμο και μάλιστα τροποποίησε έτσι το αυτοκίνητό του έτσι ώστε με ένα ποτήρι νερό να μπορεί να κινηθεί για περίπου 50 χιλιόμετρα. Και φυσικά, μία τέτοια λειτουργία δεν είναι μόνο συμφέρουσα οικονομικά αλλά και οικολογική.

Επίσης, το 2010 παρουσιάστηκαν τα πρώτα αποτελέσματα του ερευνητικού έργου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου [47], που χρηματοδοτήθηκε από τη Νομαρχία Αθηνών αναφορικά με την ολιστική μετατροπή συμβατικών αυτοκινήτων σε ηλεκτρικά και στη βιώσιμη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το νερό. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων έγινε από τον επιστημονικό υπεύθυνο του ερευνητικού-αναπτυξιακού έργου «Μετατροπή Συμβατικών Αυτοκινήτων σε Ηλεκτρικά», με διακριτικό τίτλο "City Battery Electric Car" (CiBEC), Ευάγγελο Χριστοφόρου. Το ερευνητικό έργο βασίζεται σε μια καινοτόμο μέθοδο ταχείας παραγωγής υδρογόνου και ηλεκτρικής ενέργειας από το πόσιμο, το μη πόσιμο αλλά και το θαλασσινό νερό. Το κόστος μετατροπής για αυτοκίνητα μικρού κυβισμού ανέρχεται περίπου στα 5 με 7 χιλιάδες ευρώ, με κόστος χρήσης και συντήρησης μικρότερο από 1 ευρώ ανά 100 χιλιόμετρα, χωρίς την παραμικρή μόλυνση του περιβάλλοντος. Η απόσβεση του ποσού για τη μετατροπή γίνεται σε τέσσερα χρόνια, με μέσο όρο κυκλοφορίας τα 15.000 χιλιόμετρα το χρόνο. Αυτό μπορεί, κάλλιστα, να συντελέσει στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας που θα προκύψουν με την ίδρυση του φορέα μετατροπών, αλλά και γενικότερα στη μείωση των εξόδων στα ελληνικά νοικοκυριά που τόσο πλήττονται το τελευταίο διάστημα.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

Η Ελλάδα θα μπορούσε να γίνει η νέα παγκόσμια δύναμη στην διαμορφούμενη «Οικονομία του Υδρογόνου», η οποία αλλάζει τους κανόνες του ενεργειακού παγκόσμιου χάρτη. Αποτελεί την μεγάλη ευκαιρία της Ελλάδας, καθώς το νερό, ο αέρας και ο ήλιος που υπάρχουν σε αυτήν βρίσκονται σε αφθονία. Όταν έχεις ήλιο, νερό και αέρα, τότε έχεις τα πάντα... και καθώς διαθέτουμε όλα αυτά τα πλεονεκτήματα, οφείλουν οι πολιτικοί μας κατά τη δύσκολη τούτη κατάσταση στην οποία έχει περιέλθει η χώρα μας, να δώσουν κίνητρα και κατευθύνσεις για την πράσινη ενέργεια και την τεχνολογική πρόοδο παράλληλα με την στήριξη και διατήρηση του φυσικού περιβάλλοντος αφού οι ρύποι θα ελαχιστοποιούνται.

Για παράδειγμα, μπορούν να δώσουν οικονομικά (και όχι μόνο) κίνητρα για την ίδρυση κοινωνικών συνεταιριστικών επιχειρήσεων, που θα αξιοποιήσουν τις δυνατότητες του υδρογόνου και των άλλων ήπιων μορφών ενέργειας, εξασφαλίζοντας τοπική ανάπτυξη, δημιουργία πολλών θέσεων εργασίας, μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης και ως ένα σημείο μία διέξοδο από την πολύπλευρη κρίση την οποία αντιμετωπίζουμε. Και τούτο διότι πολύ σύντομα θα έρθει η ώρα που το νερό θα μπορέσει να αντικαταστήσει πλήρως τα ορυκτά καύσιμα τα οποία καταστρέφουν τον πλανήτη μας.

5.2 Ιστορική εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η τεχνολογία της υδρογονοκίνησης αποτελεί τμήμα της εξέλιξης της ηλεκτροκίνησης. Στα επόμενα παρατίθενται συνοπτικά ιστορικά γεγονότα αναφορικά με την εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης τόσο στην αεροπλοία όσο και στην αυτοκίνηση.

Αναφορικά με την αυτοκίνηση, η τεχνολογία του ηλεκτρικού αυτοκινήτου δεν αναπτύχθηκε μόνο τα τελευταία χρόνια όπως πολλοί πιστεύουν αλλά έχει μια μακρά ιστορία που όμως από πολλούς αποκρύφθηκε. Μερικοί σημαντικοί σταθμοί είναι οι εξής:

- 1834 Ο Thomas Davenport ανακάλυψε τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα χρησιμοποιώντας μη-επαναφορτιζόμενες μπαταρίες,
- 1859 Ο Gaston Plante ανακαλύπτει τις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, οξέος-μολύβδου και μπαίνουν οι πρώτες βάσεις για την βελτίωση της αποθήκευσης της ενέργειας των τότε αυτοκινήτων που ήταν κατα βάση ηλεκτρικά,
- 1887 Το πρώτο όχημα με υδραυλικό τιμόνι εμφανίζεται,
- 1889 Ο Thomas Edison κατασκευάζει ένα ηλεκτρικό όχημα χρησιμοποιώντας μπαταρίες αλκαλικές,
- 1890 Ο William Morrison κατασκευάζει ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο στο Des Moines που μπορεί να ταξιδεύει για 13 ώρες με μία ταχύτητα 14mph,
- 1895 Ο πρώτος αγώνας αυτοκινήτων στην Αμερική, νικητή βρήκε το Electrobat II, ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο,
- 1896 Η εταιρεία του Andrew Riker αρχίζει την κατασκευή των ηλεκτρικών αυτοκινήτων.
- 1899 Το αυτοκίνητο του Camille Jenatzy's "Jamais Contente" (ποτέ ικανοποιημένος) θέτει το πρώτο ρεκόρ των 66mph (106χλμ/ώρα) σε ένα αεροδυναμικό αυτοκίνητο που είχε δύο μοτέρ των 12 volt. Η εξέλιξη των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι ραγδαία σχεδόν ένα αιώναπριν,
- 1900 Το πρώτο ρεκόρ απόστασης μπαίνει από το αυτοκίνητο της εταιρείας BGS και ασφαλώς είναι ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Οδηγείται συνεχόμενα για 180 μίλια (290 χλμ) με μία μόνο φόρτιση,
- 1903 Το πρώτο πρόστιμο για υπερβολική ταχύτητα δίδεται σε οδηγό ηλεκτρικού αυτοκινήτου,

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

- 1903 Ο Krieger κατασκευάζει το πρώτο υβριδικό αυτοκίνητο. Ένα εμπροσθοκίνητο ηλεκτρικό αυτοκίνητο το οποίο είχε και βενζινοκινητήρα. Το αυτοκίνητο ήταν εφοδιασμένο με υδραυλικό τιμόνι πράγμα πολύ πρωτοπριακό για την εποχή αυτή. Ο Krieger κατασκευάζει το πρώτουβριδικό αυτοκίνητο. Ένα εμπροσθοκίνητο ηλεκτρικό αυτοκίνητο το οποίο είχε και βενζινοκινητήρα. Το αυτοκίνητο ήταν εφοδιασμένο με υδραυλικό τιμόνι πράγμα πολύ πρωτοποριακό για την εποχή αυτή. Μάλιστα είναι αξιόλογο ότι πιο πρωτοποριακό ήταν το υδραυλικό τιμόνι από τον ηλεκτρικό κινητήρα για την κίνηση των αυτοκινήτων.
- 1930 Τελευταία στάση...Αμερική. Η τεχνολογική πρόοδος των ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε ολόκληρο τον κόσμο οδηγείται σε ξαφνικό τερματισμό, όχι γιατί ακρίβυναν οι μπαταρίες ή επειδή η κίνηση με πετρελαιοειδή ήταν καλύτερη. Αλλά κάτω από το βάρος της παγκόσμιας οικονομικής κρίσης που διέλυσε οικονομικά τις κυριότερες οικονομίες του κόσμου. Η πετρελαϊκή εταιρεία Standart oil πρόγονος των σημερινών 7 αδερφών πετρελαϊκών εταιρειών θεωρήθηκε ότι ήταν μέσα στους κυριότερους ύποπτους για την παγκόσμια αυτή καταστροφή.

Η παγκόσμια οικονομική κρίση του 1929-1933 είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα και επίκαιρη σήμερα γιατί έχει αρκετές ομοιότητες με την σημερινή. Έκτοτε όλα τα σχέδια για την εξέλιξη των ηλεκτρικών αυτοκινήτων πάγωσαν. Εξαφανίστηκε κάθε προσπάθεια και ερευνητικό ενδιαφέρον. Από τότε χρηματοδοτήθηκαν και επικράτησαν ερευνητικές προσπάθειες μόνο πάνω στον κινητήρα με βενζίνη (μηχανή εσωτερικής καύσεως) με την μέγιστη βλάβη για την υγεία μας και το περιβάλλον ενώ οι εταιρείες ηλεκτρικών οχημάτων εξαφανίστηκαν κάτω από τα χρέη και την δύνη των προβλημάτων της εποχής.

Είναι ενδιαφέρον να αναγνωρίσει κανείς καλύτερα τις αλλαγές που έγιναν τη δεκαετία του 1930 στην αεροπλοία στα τότε αεροπλάνα, τα αερόπλοια δηλαδή που μέχρι εκείνη τη στιγμή ανυψώνονταν επιτυχώς και πραγματοποιούσαν υπερατλαντικά ταξίδια καίγοντας υδρογόνο (δηλαδή νερό).

Η πρώτη υπερατλαντική πτήση (χωρίς στάσεις) έγινε από το βρετανικό αερόπλοιο R34 το 1919. Οι κανονικές αερογραμμές με αερόπλοια επαναλήφθηκαν τη δεκαετία του 1920 και η ανακάλυψη του ηλίου στις ΗΠΑ, ως μη εύφλεκτο υποσχόταν αυξημένη ασφάλεια, αλλά οι ΗΠΑ αρνήθηκαν να πουλήσουν το νέο αέριο για μια τέτοια χρήση. Γι' αυτό συνεχίστηκε η χρήση υδρογόνου στα αερόπλοια, μέχρι το περίφημο δυστύχημα του αερόπλοιου Hindenburg πάνω από το New Jersey στις 6 Μαΐου του 1937. Το επεισόδιο μεταδόθηκε ζωντανά από το ραδιόφωνο και κινηματογραφήθηκε. Η ανάφλεξη διαρροής υδρογόνου προβλήθηκε αμέσως και ευρέως από τα ΜΜΕ ως η αιτία του δυστυχήματος, αλλά πιο προσεκτικές έρευνες που έγιναν αργότερα έδειξαν πως η αιτία ήταν η ανάφλεξη του υφάσματος με επικάλυψη αλουμινίου, που χρησίμευε σαν περίβλημα, από στατικό ηλεκτρισμό. Όμως η δυσφήμιση του υδρογόνου από τα ΜΜΕ της εποχής, ως ανυψωτικού αερίου από το συμβάν είχε γίνει και ήταν καταλυτική. Αμέσως διακόπηκε η χρήση αερόπλοιων εις όφελος των βαρύτερων του αέρα αεροπλάνων, που όμως, στην πραγματικότητα ποτέ δεν εγγυήθηκαν τη σχετικά ανώτερη ασφάλεια των αερόπλοιων, που είχαν μόλις ένα δυστύχημα σε 30 χρόνια πτήσεων.

Παρατηρώντας όμως το γενικότερο πλαίσιο την εποχή εκείνη αναγνωρίζονται κάποιες συναρτήσεις ιστορικών συμβάντων. Για παράδειγμα το δυστύχημα έγινε χρονικά πολύ κοντά στην οικονομική κρίση του 1929 – 1933, περίοδο κατά την οποία ανατράπηκαν όλες οι προσπάθειες στην κατεύθυνση των ήπιων μορφών ενέργειας χάριν των υγρών καυσίμων (πετρελαιοειδών) των γνωστών συνεπειών που συνετέλεσαν στην επιμόλυνση του περιβάλλοντος με τους αέριους ρύπους της καύσης και το συνεπαγόμενο φαινόμενο του θερμοκηπίου που λαμβάνει επικίνδυνες διαστάσεις στις μέρες μας.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

Η οπισθοδρόμηση και η ανάσχεση της τεχνολογικής εξέλιξης της ηλεκτρικής ενέργειας στην κίνηση και στις μεταφορές γενικότερα και ειδικότερα της τεχνολογίας υδρογόνου οφείλεται στο ότι η παραγωγή γίνεται πολύ εύκολα από το νερό, το οποίο είναι αγαθό που δεν χειραγωγείται εύκολα όπως τα πετρελαιοειδή. Χώρες πλούσιες σε νερά (λίμνες και ποτάμια) θα μπορούσαν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με νερό σε ηλεκτρογεννήτριες (υδρογεννήτριες), αντί τις γνωστές ακριβές και ρυπογόνες ηλεκτρογεννήτριες υγρών και ορυκτών καυσίμων που προμηθεύεται η ΔΕΗ μέχρι σήμερα.

Εξ αυτών των γεγονότων οι πετρελαιοειδή εταιρείες και οι τράπεζες μεγάλωσαν και εξαπλώθηκαν πάνω από όλα τα έθνη όπως βλέπουμε ολοι σήμερα. Οι αυτοκινητοβιομηχανίες ηλεκτρικών οχημάτων της εποχής οδηγήθηκαν σε πτώχευση και εξαφανίσθηκαν κάτω από το βάρος των οικονομικών προβλημάτων η οδηγήθηκαν στον πλήρη έλεγχο των τραπεζών. Οι παραπάνω συμπτώσεις του 1930 δεν ήταν τυχαίες ούτε η ανάσχεση της τεχνολογίας υδρογόνου. Στις μέρες μας με την οικονομική κρίση που συνοδεύει σήμερα την επανεμφάνιση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι και πάλι δύσκολη η γρήγορη εξέλιξη τους μια και δεν υπάρχει ευημερία και ανάπτυξη που θα βοηθούσε στις μαζικές πωλήσεις των αρχικά ακριβών ηλεκτρικών αυτοκινήτων ώστε να εξελιχθούν και να βελτιωθούν αλλά και να πέσει το κόστος τους. (<http://www.youtube.com/watch?v=HrqrHvHI9ZQ>).

5.3 Μηχανισμός μετατροπής.

Το υδρογόνο όπως φάνηκε και από τα παραπάνω είναι ένα καθαρό καύσιμο το οποίο παράγεται εύκολα από το νερό. Δεν απαιτείται κάποια άδεια ή έγκριση από επίσημες αρχές του κράτους ενώ κατά την εφαρμογή του συστήματος δεν αχριστεύεται ο χώρος του πορτμπαγκάζ όπως συμβαίνει με την εφαρμογή συστήματος υγραερίου. Αναφορικά με την επίδοση του κινητήρα αυξάνεται η ιπποδύναμη λόγω της υψηλής θερμογόνου δύναμης και της ευκολίας ανάφλεξης του κινητήρα. Παράλληλα μειώνονται οι ρύποι αφού τα εκλυόμενα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα είναι μηδενικά. Επιπλέον ο κινητήρας λειτουργεί πιο αθόρυβα και ξεκούραστα και η τοποθέτηση ενός συστήματος υδρογόνου γίνεται άμεσα εντός λίγων ωρών.

Με την διάσπαση του νερού προκύπτουν υδρογόνο και οξυγόνο τα οποία είναι αέρια που καίγονται χωρίς υπολύματα παράγοντας ισχυρή ενέργεια. Τα αέρια μετά την διάσπαση του νερού δεν αποθηκεύονται αλλά διοχετεύονται κατευθείαν στον θάλαμο καύσης μέσω της εισαγωγής του αέρα, έτσι το σύστημα είναι 100% ασφαλές και απλό χωρίς μετατροπές στον κινητήρα του αυτοκινήτου σας. Η εξοικονόμηση καυσίμου γίνεται σε ποσοστά 25-40% του ποσού που δαπανάται σε συμβατικά καύσιμα (βενζίνες – πετρέλαιο).

Απαιτείται μια συσκευή που κάνει το διαχωρισμό του υδρογόνου από το νερό. Με τον τρόπο αυτό το αυτοκίνητο γίνεται υβριδικό με χαμηλό κόστος. Το βασικό χαρακτηριστικό της υβριδικής λειτουργίας είναι ότι ο αέρας που μπαίνει στον κινητήρα του αυτοκινήτου εμπλουτίζεται με υδρογόνο με αποτέλεσμα να είναι πιο δραστικός και να συμβάλει στην παραγωγή ενέργειας.

Η συσκευή κάνει την ηλεκτρόλυση του νερού την στιγμή της εκκίνησης του κινητήρα, διασπώντας το νερό σε υδρογόνο (H_2) και οξυγόνο (O) τα οποία αμέσως διοχετεύει στον κινητήρα από την γραμμή εισόδου του αέρα σε αυτόν. Την στιγμή που διακόπτεται η λειτουργία του κινητήρα διακόπτεται ταυτόχρονα και η παραγωγή του υδρογόνου. Με τον τρόπο αυτό δεν χρειάζεται ποτέ να διατηρείται αποθηκευμένο υδρογόνο, πράγμα που για λόγους ασφαλείας είναι η καλύτερη λύση.

Η είσοδος του καυσίμου υδρογόνου στον θάλαμο καύσης του κινητήρα συμβάλει ώστε το συμβατικό καύσιμο (πετρέλαιο, βενζίνη κ.τ.λ.) να καεί ακόμα καλύτερα, μειώνοντας έτσι

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

την ποσότητα των ρύπων που απελευθερώνονται στην εξάτμιση. Επίσης η καύση του γίνεται πλέον πιο καθαρή δεν αφήνει επικαθίσεις στον κινητήρα αφήνοντας τον θάλαμο καύσης και τις βαλβίδες πιο καθαρά.

Όλοι οι κινητήρες εσωτερικής καύσης κάνουν ατελή καύση των υγρών καυσίμων που χρησιμοποιούμε (βενζίνη, πετρέλαιο) με αποτέλεσμα να έχουμε ρύπους (τα γνωστά και πολυσυζητημένα καυσαέρια). Με τη χρήση του αερίου υδρογόνου στον κινητήρα, χωρίς καμία ρύθμιση, παρά μόνο την προσθήκη μιας μικρής συσκευής η οποία ονομάζεται ηλεκτρολυτική συσκευή που κάνει και την παραγωγή του υδρογόνου (γεννήτρια υδρογόνου), πετυχαίνεται καλύτερη και καθαρότερη καύση αλλά και αύξηση της απόδοσης του κινητήρα.

Το παραγόμενο εκείνη τη στιγμή υδρογόνο που διοχετεύεται στον κινητήρα δεν αντικαθιστά το συμβατικό καύσιμο (τουλάχιστον όχι ακόμα) αλλά προστίθεται μέσω του αέρα που μπαίνει στον θάλαμο καύσης και έτσι τα δυο αυτά καύσιμα καίγονται ταυτόχρονα. Όλα τα σύγχρονα αυτοκίνητα είναι εφοδιασμένα με ένα αισθητήρα (αισθητήρας Λάμδα) που βλέπει κάθε στιγμή την ποιότητα του καυσίμου που καίγεται στον κινητήρα σας και μειώνει αντίστοιχα το συμβατικό σας καύσιμο το οποίο χρειάζεται πλέον σε μικρότερες ποσότητες λόγω της ύπαρξης και του δεύτερου καυσίμου (του υδρογόνου). Έτσι δεν χρειάζεται να γίνει καμία μετατροπή στον προγραμματισμό του κινητήρα σας με την προσθήκη του υδρογόνου.

Τα συστήματα παραγωγής υδρογόνου DC2000, είναι ειδικά σχεδιασμένα για αυτοκίνητα και βασίζονται σε ελάχιστα μέρη τα οποία εύκολα και με ασφάλεια μπορούν να εγκατασταθούν στο αυτοκίνητό σας ανεξαρτήτως μάρκας, κυβικών, χρονολογίας κ.α.

5.4 Νέες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου.

Εκτός από τον προαναφερόμενο και πολυσυζητημένο τρόπο παραγωγής υδρογόνου από την διάσπαση (ηλεκτρόλυση) του νερού αναφέρουμε μερικές ακόμα ενδιαφέρουσες μεθόδους

5.4.1 Παραγωγή υδρογόνου από πετρώματα του φλοιού της γης.

Σύμφωνα με πρόσφατη ανακοίνωση των ερευνητών της NASA υπάρχουν ενδείξεις ότι ο φλοιός της Γης σε βάθος ως και 20 χλμ. περιέχει αποθέματα υδρογόνου ικανά να εξαλείψουν διά παντός το ενεργειακό πρόβλημα. Πιο συγκεκριμένα, το υδρογόνο παράγεται κατά τη διάσπαση ατόμων ύδατος που είναι εγκλωβισμένα σε λιωμένους βράχους. Τα στοιχεία της έρευνας μιλούν για ως και έναν τόνο υδρογόνου ανά κυβικό μέτρο τέτοιων πετρωμάτων. Κάτι τέτοιο σημαίνει ότι οι ημερήσιες ενεργειακές ανάγκες της Βρετανίας θα καλύπτονται από την εξόρυξη υδρογόνου από δύο κυβικά χιλιόμετρα τέτοιου βράχου.

Ο πιο εύκολος τρόπος εξόρυξης των εγκλωβισμένων αποθεμάτων υδρογόνου είναι με τη μέθοδο των γεωλογικών παγίδων, όπως αυτές χρησιμοποιούνται για την άντληση φυσικού αερίου. Το άσχημο όμως είναι ότι τα είδη των πετρωμάτων που λειτουργούν σαν «σφουγγάρι υδρογόνου» είναι κυρίως γρανιτικά, οπότε τίθεται και πάλι το ερώτημα αν το κόστος της ενέργειας εξόρυξης είναι μικρότερο από την αξία της ενέργειας που αποκτάται.

5.4.2 Παραγωγή υδρογόνου από πράσινη άλγη.

Μια «συνθετική» λύση στο πρόβλημα του υδρογόνου είχε παρουσιάσει το 2000 και ο έλληνας ερευνητής του Πανεπιστημίου UCLA στο Μπέρκλεϊ Αναστάσιος Μέλης. Ο ερευνητής είχε καταφέρει μια μεθοδολογία την παραγωγή υδρογόνου κατά τη φωτοσύνθεση της κοινής πράσινης άλγης (*Chlamydomonas Reinhardtii*), αντί για διοξείδιο του άνθρακα.

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο η αποστέρωση του θείου από την άλγη, οπότε εκείνη αντιδρούσε με παραγωγή υδρογόνου. Η άλγη εξήγε το υδρογόνο από το νερό με μια διαδικασία παρόμοια της ηλεκτρόλυσης, εκλύοντας ελάχιστες αναθυμιάσεις. Το εμπόδιο όμως

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

στην υψηλή παραγωγή ήταν ότι το ποσοστό της χλωροφύλλης στην άλγη είναι τόσο πολύ που το 60% των φωτονίων που συλλαμβάνει καίγεται. Ο ερευνητής αντιμετώπισε το πρόβλημα με γενετική μετάλλαξη της άλγης σήμερα έχει φθάσει να παράγει υδρογόνο με κόστος 0,7 δολάρια ανά κιλοβάτ. Στις άμεσες επιδιώξεις του είναι να φθάσει το κόστος του φυσικού αερίου και αμέσως μετά ελπίζει ότι θα κατορθώσει να φθάσει στο μισό του κόστους. Τότε ο δρόμος θα είναι ανοιχτός για χαμηλού κόστους παραγωγή υδρογόνου.

5.4.3 Παραγωγή υδρογόνου από βακτήρια.

Μια ακόμα ανακοίνωση ήλθε να προσθέσει περισσότερες ελπίδες για φθηνή και οικολογική παραγωγή υδρογόνου: Μια βιολόγος κατόρθωσε να παράγει υδρογόνο από βακτήρια (σκουλίκια) Η ερευνήτρια Σου-Ελεν Βαν Ότενεγκεμ κατάφερε να παράγει στο εργαστήριο στο Βανκούβερ του Καναδά.

Πιο συγκεκριμένα η παραπάνω ερευνήτρια απομόνωσε στο 14 λίτρων γυάλινο δοχείο του βιοντιδραστήρα της να ζουν βακτήρια του τύπου *Thermotoga neapolitana*. Κατά έναν μυστηριώδη τρόπο τα βακτήρια αυτά εκκενώνουν 8 λίτρα αερίων την ώρα, από τα οποία 80% είναι καθαρό υδρογόνο. Το ποσοστό αυτό είναι πολύ υψηλό, όπως και το γεγονός ότι αυτή η παραγωγή γίνεται στην παρουσία οξυγόνου.

Τα συγκεκριμένα βακτήρια βγάζουν το υδρογόνο από την αμμωνία, εφόσον η θερμοκρασία είναι περίπου 75°C. Μείωση της θερμοκρασίας σημαίνει «κλείσιμο του διακόπτη και διακοπή της παραγωγής υδρογόνου». Η ανακάλυψη παραγωγής υδρογόνου με την βοήθεια μικροοργανισμών είναι μεγάλης σημασίας. Η πηγή αμμωνίας που χρειάζονται αυτοί οι μικροσκοπικοί «παραγωγοί υδρογόνου» είναι η κρυσταλλοποιημένη ουρία, ένα πάμφθινο δηλαδή παράγωγο των σταθμών επεξεργασίας λυμάτων. Με τον τρόπο αυτό στο μέλλον θα είναι εφικτή η παραγωγή ενέργειας που χρειάζεται ο πλανήτης μόνο από τα σκουπίδια του [48].

Μια ανακοίνωση ήλθε να προστεθεί πρόσφατα στην παραγωγή υδρογόνου από βακτήρια. Μια βιολόγος κατόρθωσε να παράξει υδρογόνο με σκουλήκια. Η Σου-Ελεν Βαν Οοτενεγκεμ στη Μοργκαντάουν του Βανκούβερ των ΗΠΑ, έθεσε στο 14 λίτρων γυάλινο δοχείο του βιοντιδραστήρα της βακτήρια του τύπου *Thermotoga neapolitana*. Κατά έναν μυστηριώδη τρόπο τα βακτήρια αυτά εκκενώνουν 8 λίτρα αερίων την ώρα, από τα οποία 80% είναι καθαρό υδρογόνο. Δεν είναι μόνο το ποσοστό που είναι εκπληκτικό αλλά και το γεγονός ότι αυτή η παραγωγή γίνεται στην παρουσία οξυγόνου. Τα σκουλήκια αυτά βγάζουν το υδρογόνο από την αμμωνία, εφόσον η θερμοκρασία είναι περίπου 75 βαθμοί Κελσίου. Κατέβασμα της θερμοκρασίας σημαίνει «κλείσιμο του διακόπτη».

Η σημασία της ανακάλυψης είναι μεγάλη. Η πηγή αμμωνίας που χρειάζονται αυτοί οι μικροσκοπικοί «εξωρύχοι υδρογόνου» είναι η κρυσταλλοποιημένη ουρία, ένα πάμφθινο δηλαδή παράγωγο των σταθμών επεξεργασίας λυμάτων. Αν όλα ευσταθούν, θα μπορούμε στο μέλλον να παράγουμε την ενέργεια που χρειάζεται ο πλανήτης μόνο από τα σκουπίδια του - που τώρα μας πνίγουν.

5.4.4 Παραγωγή υδρογόνου από νανοσωματίδια.

Εκτός όμως από τις παραπάνω μεθόδους παραγωγής υδρογόνου που ερευνώνται, πολλές έρευνες γίνονται και πάνω στη βελτίωση της διαδικασίας διάσπασης του υδρογόνου από το νερό δαπανώντας ελάχιστη ενέργεια

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

Ερευνητές υποστηρίζουν ότι ανακάλυψαν μια καινοτομία για να παράγουν νανοσωματίδια τα οποία μπορούν να παίξουν καταλυτικό ρόλο (κυριολεκτικά και μεταφορικά) για την παραγωγή φθηνού υδρογόνου. Η QuantumSphere Inc. υποστηρίζει ότι έχει τελειοποιήσει την κατασκευή νανοσωματιδίων τα οποία χρησιμοποιούνται ως ειδική επικάλυψη σε ηλεκτρόδια από ανοξείδωτο ατσάλι και μπορούν να παίξουν το ρόλο του καταλύτη στη γνωστή ηλεκτρόλυση του νερού, αυξάνοντας την απόδοση της διαδικασίας κατά 85% μειώνοντας παράλληλα την ενέργεια που απαιτείται για την διάσπαση του νερού [49].

Εκτός αυτού οι ερευνητές υποστηρίζουν επίσης, ότι με τη χρήση των συγκεκριμένων νανοσωματιδίων μπορεί να ελαχιστοποιηθεί η χρήση ευγενών (και ακριβών μετάλλων) όπως πλατίνας στις κυψέλες καυσίμου. Λόγω της μικροσκοπικής τους δομής η επιφάνεια που αντιδρά πολλαπλασιάζεται οπότε και η απόδοση της ηλεκτρόλυσης αυξάνεται αυξάνοντας ουσιαστικά το παραγόμενο υδρογόνο με σημαντικά λιγότερη ενέργεια. Ουσιαστικά τα νανοσωματίδια χρησιμοποιούνται σαν επικάλυψη στα ηλεκτρόδια στην διαδικασία της ηλεκτρόλυσης.

Η εταιρεία QuantumSphere υποστηρίζει ότι με τα ηλεκτρόδια που κατασκευάζει θα είναι εφικτή η παραγωγή υδρογόνου για οικιακή χρήση, χωρίς να χρειάζεται κάποιος να το προμηθεύεται. Για την απαιτείται μόνο αποσταγμένο νερό και τα συγκεκριμένα ηλεκτρόδια με μια απλή υλοποίηση. Επίσης η παραπάνω εταιρία ετοιμάζεται να παράγει μπαταρίες που θα χρησιμοποιούν την συγκεκριμένη τεχνολογία στα ηλεκτρόδια ούτως ώστε να είναι μέχρι και 320% πιο ισχυρές από τις κοινές αλκαλικές. Οι στόχοι ομολογουμένως ακούγονται κάτι παραπάνω από ιδανικοί αλλά αυτό θα το δείξει ο χρόνος. Στη συνέχεια η εταιρεία QuantumSphere σχεδιάζει αφού τελειοποιήσει την μέθοδο της για την ηλεκτρόλυση, να συνεργαστεί με άλλες εταιρείες ώστε να παράγουν συσκευές για παραγωγή υδρογόνου στο σπίτι ή εν κινήσει στο αυτοκίνητο [50].

Η ηλεκτρολυτική συσκευή που απαιτείται για την παραγωγή υδρογόνου είναι μια διάταξη μεταλλικών επιφανειών (πλάκες), παράλληλα τοποθετημένες (ανάλογη διάταξη διαθέτουν και οι μπαταρίες των αυτοκινήτων) η οποία αποθηκεύει μικρή ποσότητα νερού μεταξύ των θαλάμων που δημιουργούν οι μεταλλικές επιφάνειες. Οι μεταλλικές αυτές επιφάνειες αποτελούν τα ηλεκτρόδια της ηλεκτρολυτικής συσκευής. Μια ωσμωτική μεμβράνη παρεμβάλλεται μεταξύ των ηλεκτροδίων επιτρέποντας τη διέλευση του νερού αλλά εμποδίζοντας τη διέλευση των φυσαλίδων των αερίων που παράγονται κατά την ηλεκτρόλυση. Αυτό επιτρέπει την αποφυγή της μίξης των παραγόμενων αερίων και εξασφαλίζει την οδήγηση τους με ασφαλή τρόπο σε χωριστές εξόδους. Η συσκευή έχει απλουστευθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελεί ένα ενιαίο σύνολο. Δεν έχει χωριστά δοχεία για αποθήκευση του ηλεκτρολύτη και δεν χρειάζονται πλαστικοί σωλήνες και μεταλλικοί σφιγκτήρες για τις συνδέσεις. Επίσης έχει μειωθεί δραστικά ο χρόνος τοποθέτησης καθώς επίσης και ο συνολικός όγκος της συσκευής. Τα παραγόμενα αέρια είναι 2 μέρη Υδρογόνου 1 μέρος Οξυγόνου τα οποία διαχωρίζονται. Το μεν υδρογόνο οδηγείται στο φιλτροκούτι και με φορέατον ατμοσφαιρικό αέρα οδηγείται στο θάλαμο καύσης το δε οξυγόνο απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα.

Οι διαστάσεις της Hydro-Gen είναι: $YX\Pi X M = 15X4,5X14$ εκατοστά. Το διάλυμα του ηλεκτρολύτη με το αποσταγμένο νερό είναι αρκετό για να διανυθεί μια απόσταση μεγαλύτερη των 10000 Km. Η συσκευή μπορεί να λειτουργεί αυτόματα μετά την εκκίνηση του κινητήρα και να διακόπτει την λειτουργία της όταν διακόπτεται η λειτουργία του κινητήρα.



Εικόνα 39: η Ηλεκτρολυτική Συσκευή Hydro-Gen.

Συνοδεύεται από τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος με διακόπτη on-off και ρυθμιστή τάσης με το οποίο τροφοδοτείται η ηλεκτρολυτική συσκευή με ενέργεια. Με το τροφοδοτικό διατηρείται σταθερό το προς διαχείριση ρεύμα για την λειτουργία της συσκευής ανεξάρτητα από την συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη. Μας παρέχει την δυνατότητα να καταναλώνουμε μικρό ποσό ενέργειας από την μπαταρία και να ελέγχουμε την παραγωγικότητα της ηλεκτρόλυσης κατά βούληση.

Τα πλεονεκτήματα της διάταξης παραγωγής υδρογόνου έχουν αναπτυχθεί και νωρίτερα, εδώ θα αναφερθούν επιγραμματικά.

- Το Υδρογόνο έχει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα βάρους από οποιοδήποτε άλλο γνωστό καύσιμο, 120.7 kJ/gr και 3 φορές μεγαλύτερο από αυτό της συμβατικής βενζίνης,
- Κάνει “καθαρή” καύση. Όταν καίγεται με οξυγόνο παράγει μόνο νερό και θερμότητα. Όταν καίγεται με τον ατμοσφαιρικό αέρα, ο όγκος του οποίου αποτελείται κατά 78% από άζωτο, παράγονται επίσης μερικά οξείδια του αζώτου, σε αμελητέο ωστόσο βαθμό,
- Έχει μεγαλύτερη ευφλεκτότητα και ταχύτητα μετάδοση φλόγας.
- Με την ηλεκτρολυτική συσκευή πετυχαίνεται καλύτερη θερμική απόδοση του κινητήρα δηλ. γίνεται καλύτερη καύση. Το υδρογόνο εισέρχεται στο θάλαμο καύσης σε αέρια μορφή και αναφλέγεται άμεσα μεταδίδοντας σε ελάχιστο χρόνο την φλόγα σε όλο τον χώρο του κυλίνδρου εξ’ αιτίας της διάχυσή του στο θάλαμο καύσης, επιταχύνοντας την ανάφλεξη της βενζίνης.

Στο χρόνο που απαιτείται μεταξύ της εμφάνισης σπινθήρα και το άνοιγμα των βαλβίδων εξαγωγής έχουμε καταναλώσει το μεγαλύτερο μέρος αν όχι όλο, του μίγματος καυσίμου – ατμοσφαιρικού αέρα – υδρογόνου. Επειδή το Υδρογόνο έχει υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο, το παραγόμενο έργο είναι μεγαλύτερο και πλουσιότερο σε ενεργειακή απόδοση, προσθέστε και την καύση πολύ περισσότερου συμβατικού μίγματος, γίνεται αντιληπτό λοιπόν από που προέρχεται η μεγαλύτερη ροπή, η μεγαλύτερη δύναμη και η απίθανη γραμμικότητα ισχύος που παρατηρούνται μετά την εγκατάσταση. (Για τους δύσπιστους υπάρχουν τα δυναμόμετρα).

Το κέρδος είναι η βελτίωση της ταχύτητας καύσης συντελεί στο περιορισμό νέων εξανθρακωμάτων και βοηθάει στην απομάκρυνση παλαιότερων επικαθίσεων διατηρώντας καθαρά τις βαλβίδες και τα πιστόνια . Αποτέλεσμα αυτής της βελτίωσης είναι να ελαχιστοποιούνται φαινόμενα κακού χρονισμού, προανάφλεξης και αρρυθμίες. Επίσης έχουμε μείωση του θορύβου λειτουργίας του κινητήρα, μείωση του ρελαντί, δραστική μείωση καυσαερίων, ιδιαίτερα υδρογονανθράκων. Αυτό επιβεβαιώνεται άμεσα η κάρτα καυσαερίων. Εκεί προκύπτουν καθαρά οι διαφορές σε ρύπους πριν και μετά την εφαρμογή. Επίσης παρατηρούμε αύξηση των υδρατμών. Με αριθμητικά δεδομένα πετυχαίνεται οικονομία καυσίμου τουλάχιστον 20 – 30%, αύξηση ιπποδύναμης και ροπής κατά 10 – 15% και μείωση καυσαερίων έως και 80%. Μέχρι αυτό το σημείο το υδρογόνο είναι υποβοηθητικό καύσιμο αυξάνοντας (καταλύτης) την βελτιστοποίηση της καύσης και του παραγόμενου έργου του κινητήρα μας. Δεν αποθηκεύεται παρά μόνο παράγεται και καταναλώνεται άμεσα. Εφαρμόζεται σε όλους τους τύπους οχημάτων με κινητήρες εσωτερικής καύσης, ανεξάρτητα από το κυρίως καύσιμο (βενζίνη, πετρέλαιο, αέριο) [50-53].

6 Πρωτότυπα οχήματα καύσης υδρογόνου.

Μια άλλη εστία προώθησης του θέματος είναι οι αυτοκινητοβιομηχανίες. Η BMW, η Daimler-Chrysler, η Ford, η General Motors, η Honda, η Hyundai, η Nissan, η Toyota, η Volkswagen, όλες έχουν δημιουργήσει μοντέλα υδρογόνου και τα έχουν δώσει σε πιλοτική χρήση. Στο Λονδίνο κυκλοφορούν και παραδοσιακά ταξί μεταλλαγμένα σε «υδρογονικά». Λεωφορεία αυτού του τύπου κυκλοφορούν εδώ και χρόνια στο Τορόντο, στο Σικάγο και στο Μόναχο, και σύντομα θα κυκλοφορήσουν στο Λονδίνο, στο Αμβούργο και στη Μαδρίτη.

Ακόμη και η Boeing έχει μπει στον συρμό και ετοιμάζει για τον προσεχή Δεκέμβριο 2015 να πετάξει ένα πειραματικό μονοθέσιο αεροσκάφος, με ώση από ένα fuel cell των 25 κιλοβάτ. Ο πυρετός της προετοιμασίας για τη νέα εποχή είναι μεταδοτικός και ενισχύεται από τη συμπαρατάξη των κολοσσών του πετρελαίου, των BP, ChevronTexaco, ExxonMobil και Royal Dutch/Shell.

Σε διαρκή αναζήτηση για το βασικό καύσιμο που θα κινεί στο μέλλον τα οχήματα βρίσκεται η παγκόσμια αυτοκινητοβιομηχανία. Άλλες επενδύουν στην υβριδική τεχνολογία (συνδυασμός κινητήρα εσωτερικής καύσης – βενζίνης ή πετρελαίου- με ηλεκτροκινητήρα), άλλες υπερθεματίζουν στο φυσικό αέριο, αρκετές θεωρούν την ηλεκτροκίνηση ως την πλέον ενδεδειγμένη μιας και τον ηλεκτρισμό μπορούν να τον πάρουν από εναλλακτικές πηγές (ηλιακή, αιολική ακόμη και πυρηνική ενέργεια). Τέλος άλλες εξελίσσουν μια «παλιά» ιδέα που έχει να κάνει με το υδρογόνο (fuel cell). Στις τελευταίες εντάσσεται και η Hyundai η οποία εξελίσσει την «υδρογονοκίνηση» και μάλιστα σε μοντέλο παραγωγής και όχι σε πρωτότυπο. Πρόσφατα η κορεατική μάρκα πραγματοποίησε μια δοκιμή αυτονομίας με το SUV μοντέλο της ix35 το οποίο ήταν εξοπλισμένο με ενεργειακές κυψέλες (fuel cell) με καύσιμο υδρογόνο. Το μοντέλο διήνυσε μια απόσταση 700 χλμ. σε 10 ώρες με μέση ωριαία ταχύτητα 76 χλμ/ώρα συνδυάζοντας αστικές συνθήκες κίνησης και οδήγηση στον αυτοκινητόδρομο, καταναλώνοντας ένα ντεπόζιτο υδρογόνου που είναι η μεγαλύτερη που έχει διανύσει αυτοκίνητο αυτής της τεχνολογίας. Η επίδοση σημειώθηκε σε διαδρομή από το Όσλο (Νορβηγία) μέχρι το Μάλμο (Σουηδία) περνώντας και από την Κοπεγχάγη. Το ix35 ήταν ένα κανονικό FCEV παραγωγής δίχως καμία μετατροπή ενώ μετά την ολοκλήρωση της διαδρομής το trip computer έδειχνε αυτονομία για ακόμη 10 χλμ.

Τα αυτοκίνητα τεχνολογιών με πιστοποίηση EURO 2-3-4-5 από το 1994 μέχρι και το 2013 έχουν εξελιγμένους και σχεδόν αλάνθαστους αισθητήρες οι οποίοι μόλις αναγνωρίσουν οξυγόνο, δίνουν εντολή στον εγκέφαλο ECU, να στείλει επιπλέον καύσιμο στον κινητήρα, με αποτέλεσμα να μην έχουμε στην πραγματικότητα εξοικονόμηση καυσίμου. Στα συστήματα καθαρού υδρογόνου συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο. Οι αισθητήρες του αυτοκινήτου αναγνωρίζουν την έλλειψη οξυγόνου που εμπεριέχει ο εισερχόμενος αέρας λόγω του ότι ένα μέρος του οξυγόνου δεσμεύεται από το υδρογόνο στον θάλαμο καύσης, με αποτέλεσμα να δίνουν εντολή στον εγκέφαλο να μειώσει την παροχή καυσίμου και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την οικονομία.

6.1 Ιστορική εξέλιξη της χρήσης του υδρογόνου στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Η ιδέα της χρήσης του υδρογόνου στις μηχανές εσωτερικής καύσης 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.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

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 εκλύμενων 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 άλλοι κατασκευαστές 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 των πρωτότυπων οχημάτων των κατασκευαστών που έχουν ρίξει το βάρος τους στην έρευνα των μηχανών εσωτερικής καύσης υδρογόνου. Τα σημαντικότερα βήματα έχουν γίνει από τις προαναφερόμενες βιομηχανίες BMW, Ford και Mazda. Βέβαια, κάθε κατασκευαστής ακολουθεί διαφορετική φιλοσοφία στις τεχνολογικές επιλογές του. Έτσι, η BMW, όπως και η Mazda, επιλέγουν την τεχνολογία κινητήρων με δυνατότητα καύσης είτε βενζίνης, είτε υδρογόνου (dual fuel) με την εναλλαγή να γίνεται απλά με το πάτημα ενός διακόπτη. Η Mazda για την μετατροπή δεν επέλεξε κάποιον εμβολοφόρο τετράχρονο κινητήρα της γκάμας της αλλά τον περιστροφικό κινητήρα Wankel με την ονομασία RENESIS. Το σκεπτικό των δύο εταιρειών (BMW & Mazda) για την διττή δυνατότητα επιλογής της καύσιμης ύλης είναι ότι στα αρχικά στάδια δημιουργίας του δικτύου διανομής και ανεφοδιασμού του νέου καυσίμου δεν θα υπάρχουν αρκετοί σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την περιορισμένη συγκριτικά αυτονομία των αυτοκινήτων υδρογόνου θα δημιουργούσε πολλαπλά προβλήματα στην ομαλή μετάβαση σε μία κοινωνία όπου οι μεταφορικές ανάγκες θα καλύπτονταν αποκλειστικά από οχήματα μηχανών υδρογόνου. Τέλος, θα ήταν εξαιρετικά δύσκολο η μηχανή υδρογόνου να εκτοπίσει μονομιάς απ' τη συνείδηση του αγοραστή-καταναλωτή, τον καθιερωμένο πλέον κινητήρα βενζίνης.

6.2 Μοντέλο 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 40 Μοντέλο BMW 728hL (1998)

6.3 Μοντέλο 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. 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.

Η 750hL ήταν εξοπλισμένη με έναν κινητήρα 5,4 λίτρων ειδικά τροποποιημένο, ο οποίος διέθετε 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 διέθετε εξαιρετικά χαρακτηριστικά ροπής.



Εικόνα 416 Μοντέλο BMW 728hL (1999)

Το υγροποιημένο υδρογόνο ήταν κρυογονικώς αποθηκευμένο σε ειδικά μονωμένο ντεπόζιτο χωρητικότητας 140lt και σε θερμοκρασία -253°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 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 42: Ο στόλος των 750hL σε παράταξη κατά τη διάρκεια της παγκόσμιας εκστρατείας της BMW, Clean Energy World Tour.



Εικόνα 43: 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°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 44: Ο σταθμός ανεφοδιασμού στο αεροδρόμιο του Μονάχου και το ρομποτικό σύστημα τροφοδοσίας.

6.4 Μοντέλο 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 45.: Η BMW 745h στο Σαλόνι Αυτοκινήτου της Φρανκφούρτης το 2001.

Η δεξαμενή του κρυογονικώς 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°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 46: 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 χώρου αποσκευών.

Τέλος, και στην BMW 745h η συμβατική μπαταρία έχει αντικατασταθεί από μία κυψέλη καυσίμου του τύπου πολυμερισμένης μεμβράνης (Polymer-Electrolyte-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 47: Η 745h στο σταθμό ανεφοδιασμού του αεροδρομίου του Μονάχου.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

7 Συμπεράσματα.

Από τεχνολογικής αλλά και οικονομικής άποψης, το υδρογόνο στο μέλλον πρόκειται να είναι το πιο πιθανό υποψήφιο καύσιμο αντικατάστασης των σημερινών συμβατικών καυσίμων (βενζίνης, πετρελαίου) που βασίζονται στους ορυκτούς υδρογονάνθρακες (βενζίνη, ντίζελ, μεθάνιο κ.λπ.). Το υδρογόνο μπορεί να παρασκευαστεί με πολλούς τρόπους, όπως για παράδειγμα από την ηλιακή ενέργεια μέσω ηλεκτρόλυσης του νερού, και έχει προταθεί από την επιστημονική κοινότητα ως το πιο πιθανό καύσιμο του μέλλοντος λόγω των σημαντικών εναλλακτικών χαρακτηριστικών του αντικαθιστώντας τα παράγωγα του πετρελαίου, καύσιμα της σημερινής εποχής.

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 που επίσης εκτενής αναφορά έγινε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Το υδρογόνο είναι ένα πολύ αποτελεσματικό - αποδοτικό καύσιμο για τους κινητήρες εσωτερικής καύσης, διότι οι ιδιότητες καύσης του, εξασφαλίζουν υψηλό βαθμό απόδοσης και την απρόσκοπτη λειτουργία του κινητήρα. 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.

8 Αναφορές.

1. Dunn S, (2002). Hydrogen futures: toward a sustainable energy system. International Journal of Hydrogen Energy 27: 235–264,
2. Antonopoulou G*, Ntaikou I, Stamatelatos K and Lyberatos G, (2010), “Biofuels from chemical and biochemical conversion processes and technologies: Biological and fermentative production of hydrogen”, 4-30, 35-39,
3. Βουτετάκης Σ., Ε. Κικκινίδης, Γ. Μαρνέλλος (Χ.Μ.), Λ. Ντζιαχρήστος (Μ.Μ.), Ι. Παναπακίδης (Η.Μ.), (2010), ‘Υπάρχουσες τεχνολογίες και τελικές χρήσεις του "καυσίμου του μέλλοντος" - H₂’, ΤΕΕ-ΤΚΜ, σελ. 17-90,
4. www.fctec.com ,
5. Εθνικό Πρόγραμμα Υδρογόνου των Ηνωμένων Πολιτειών <<The AgSTAR Program)>>, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:<http://www.epa.gov/agstar/index.html>,
6. Λέλης Κ., 2008, Κέντρο Ηλιακής Προστασίας Designed and Developed,
7. wikipedia <<Φυσικές και χημικές ιδιότητες υδρογόνου>>, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: el.wikipedia.org/wiki/υδρογόνο,
8. Phase Diagrams Of Pure Substances, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: www.chemguide.co.uk/physical/phaseeqia/phasediags.html
9. National Aeronautics and Space Administration (NASA), July 25 2005, "Safety Standard For Hydrogen And Hydrogen Systems - Guidelines for Hydrogen System Design, Materials Selection, Operations, Storage, and Transportation", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/canceled/871916.pdf
10. Momirlan M and Veziroglu TN, (2002). Current status of hydrogen energy. Renewable and Sustainable Energy Reviews 6: 141–179
11. Stanko Hocevar and William Summers, (2008b), “, Hydrogen Technology” Springer-Verlag Berlin Heidelberg, chapter 3-4
12. Damen K, van Troost M, Faaij A, Turkenburg W, (2006a). A comparison of electricity and hydrogen production systems with CO₂ capture and storage. Part A: Review and selection of promising conversion and capture technologies. Progress in Energy and Combustion Science 32: 2514–2529.
13. Damen K, van Troost M, Faaij A, Turkenburg W, (2006b). A comparison of electricity and hydrogen production systems with CO₂ capture and storage. Part B:
14. Shoko E, McLellan B, Dicks AL, Diniz da Costa JC, (2006). Hydrogen from coal: Production and utilisation technologies. International. Journal of Coal Geology 65: 213–222.
15. Berry GD, (2004). Hydrogen production. Encyclopedia of Energy 253–265.
16. Φούντη Μ. και Γ. Βουρλιωτάκης, (2007), ‘Θεωρία Καύσης και Συστήματα Καύσης: Οικονομία και Τεχνολογία Υδρογόνου’, ΕΜΠ
17. The World’s Largest Online Library , διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: www.scribd.com/doc/23659722/electrolysis
18. Νικόλαος Ρωμανός, <<Το Αυτοκίνητο του Μέλλοντος κινούμενο με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.)>>, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: http://library.tee.gr/digital/m2102/m2102_romanos.pdf
19. sciencenews.gr, <<Παραγωγή υδρογόνου>>, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.sciencenews.gr/afieromata/ydrogono/ydrogono2.asp>
20. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας <<Υπάρχουσες τεχνολογίες και τελικές χρήσεις του "καυσίμου του μέλλοντος" - H₂>> , διαθέσιμο στο

- διαδίκτυο στη διεύθυνση:
http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teetkm/DRASTHRIOTHTES/OMADESERGASIAS/HydrogenTechnology_Final.pdf
21. Πύλη Περιβαλλοντικής Εκπαίδευσης , «<Το υδρογόνο ως φορέας ενέργειας>>, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:
www.kpe.gr/index.php?option=com_weblinks&catid=97&Itemid=23,
 22. Νόμος και Φύση, Νοέμβριος 2004, «<Δίκαιο Περιβάλλοντος και Αειφόρου Ανάπτυξης – Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Η εναλλακτική τεχνολογία για ένα αειφόρο μέλλον>>, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:
http://www.nomosphysis.org.gr/articles.php?artid=353&lang=1&catpid=1#_ftnref4
 23. J. Rifkin, “Η οικονομία του Υδρογόνου (Η δημιουργία του Παγκόσμιου Ενεργειακού Ιστού και η Ανακατανομή της Εξουσίας στη Γη, Η επόμενη Μεγάλη Οικονομική Επανάσταση)”, Αθήνα 2003, Εκδόσεις Λιβάνη
 24. ΤΕΕ Μήλου, «<Σύγκριση H2 με άλλους ενεργειακούς φορείς>> , διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://tee-milou.kyk.sch.gr/daidalos2005/CompareH2.htm>
 25. hySolutions, " HamburgsAntriebWasserstoff - Projekte", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.hysolutions-hamburg.de/index.php?id=20>
 26. H2 Mobility.org, "H2Buses", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:
http://www.h2cars.de/2_busdata/b068.htm
 27. openarchives.gr «<Διανομή υδρογόνου>> Βαλάκας, Μιχαήλ Ι. Valakas, Michael I., διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:
<http://openarchives.gr/search/Διανομή%υδρογόνου>
 28. Sciencenews.gr, «<Διανομή υδρογόνου>>, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:
<http://www.sciencenews.gr/afieromata/ydrogono/ydrogono3.asp>
 29. Allaboutenergy, «<Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα έναντι συμβατικών πηγών ενέργειας>>, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:
<http://www.allaboutenergy.gr/Paragogi34.html>
 30. Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογίας Ελλάδος , «<Υδρογόνο - Γενικά περί Ασφαλείας>>, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.certh.gr/B09CEAD6.el.aspx>
 31. Υπάρχουσες τεχνολογίες και τελικές χρήσεις του "καυσίμου του μέλλοντος" - H2, Σπυρίδων Βουτετάκης, Χ.Μ., Ευθύμιος Κικκινίδης, Χ.Μ., Γεώργιος Μαρινέλλος, Χ.Μ., Λεωνίδα Ντζιαχρήστος, Μ.Μ., Ιωάννης Παναπακίδης, Η.Μ., Θεσσαλονίκη Μάρτιος 2010,
 32. Καύση Υδρογόνου σε Εμβολοφόρες ΜΕΚ , διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:
http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/1719/3/avdelidiv_piston.pdf
 33. Kettering University , «<Fuel Cell background information>> , διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://orgs.kettering.edu/altfuel/fcbac.htm>
 34. ARE paper publication, «<Economic analysis comparison>> , διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.ruralelec.org/PV-Diesel>,
 35. Wikipedia, " Proton exchange membrane fuel cell" , διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:
http://en.wikipedia.org/wiki/Proton_exchange_membrane_fuel_cell ,
 36. ScienceNews.gr, «<Κυψέλες καυσίμου>>, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:
<http://www.sciencenews.gr/afieromata/ydrogono/ydrogono6.asp> ,
 37. Wikipedia, "Fuel cell – History" , διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:
http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell ,
 38. hy2.gr, «<Κυψέλη καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης (PEM)>>, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.hy2.gr/reference.php?item=204>,

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Εφαρμογή Συστήματος Παραγωγής Υδρογόνου σε Κινητήρα Εσωτερικής Καύσης	
Κατσαούνος Λάμπρος Α.Μ 6155	
ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ	

39. Rocky Mountain Institute, "Types of Fuel cells – Alkaline Fuel Cell (AFC)", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.rmi.org/sitepages/pid201.php> ,
40. Wikipedia, "Alkaline fuel cell", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: http://en.wikipedia.org/wiki/Alkaline_fuel_cell ,
41. hy2.gr, «Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.hy2.gr/reference.php?item=203> ,
42. hy2.gr, «Κυψέλη καυσίμου τηγμένου άνθρακα (MCFC)», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.hy2.gr/reference.php?item=205> ,
43. hy2.gr, «Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.hy2.gr/reference.php?item=206> ,
44. <http://vivanews.gr/article.php?id=13477>
45. <http://www.qualitynet.gr/displayITM1.asp?ITMID=68319&LANG=GR>
46. <http://www.piperies.gr/posts/mixalis-kalogerakis-o-polymixanos-kritikos-poy-eksasfalise-energeiaki-aytonomia>
47. http://www.4troxoi.gr/default.php?pname=Article&cat_id=34&art_id=12103
48. <http://www.tovima.gr/science/article/?aid=151727>
49. <http://el.wikipedia.org/wiki/Ηλεκτρόλυση>
50. <http://www.mikres-aggelies.com/ydrogono.php>
51. http://www.hydro-gen.gr/%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF_H2
52. http://www.hydro-gen.gr/Hydro-Gen_%CE%B7_%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BB%CF%85%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%A3%CF%85%CF%83%CE%BA%CE%B5%CF%85%CE%AE
53. http://www.hydro-gen.gr/%CE%A0%CF%89%CF%82_%CE%BB%CE%B5%CE%B9%CF%84%CE%BF%CF%85%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%AF%3B
54. <http://www.cie.org.cy/sxoliko/menus/menu2-4.html>
55. http://users.sch.gr/imarinakis/energy_hydrogen.htm
56. http://www.hydro-gen.gr/Υδρογόνο_H2
57. <http://socialactivism.gr/index.php/kales-praktikes/104-ydrogono>