

Α.Τ.Ε.Ι ΚΡΗΤΗΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



**ΘΕΜΑ: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ
ΜΕ ΥΔΡΟΓΟΝΟ**

ΕΚΠΟΝΗΣΗ: ΣΠΥΡΙΔΑΚΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ: ΚΟΥΔΟΥΜΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ -
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ ΑΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ**

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου Κουδουμά Γεώργιο για την πολύτιμη συνδρομή και καθοδήγησή του στην ολοκλήρωση αυτής της πτυχιακής εργασίας.

Πρόλογος

Η πτυχιακή αυτή εργασία έχει σκοπό να συγκρίνει και να αναδείξει το υδρογόνο και τον ηλεκτρισμό σαν τα νέα μελλοντικά καύσιμα που θα παίξουν σημαντικό ρόλο στην αυτοκίνηση στο μέλλον. Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται αναλυτικά στο υδρογόνο από το πώς παράγεται μέχρι και το πώς χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε κυψέλες και σε μηχανές εσωτερικής καύσης. Επίσης, αναφέρεται και σε πρότυπα Μηχανών Εσωτερικής Καύσης (Μ.Ε.Κ.) υδρογόνου. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται τα υβριδικά συστήματα των οχημάτων και ειδικότερα τα ηλεκτρικά από το πώς είναι κατασκευασμένα μέχρι το πώς εμπλέκονται με τις μηχανές εσωτερικής καύσης. Ακόμη αναφέρονται και αναλύονται πρότυπα υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων. Τέλος, παρουσιάζονται τα θετικά και τα αρνητικά και των δύο συστημάτων με σκοπό να καταλάβουμε πιο θα είναι το καύσιμο που θα επικρατήσει και την πορεία των Μ.Ε.Κ. στο άμεσο μέλλον.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο	10
1. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ.....	10
2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	12
3. ΑΠΟΘΕΜΑΤΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	17
4. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ	18
5. ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ (Μ.Ε.Κ.).....	30
6. ΚΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ FC	38
1) <i>Κυψέλη Καυσίμου με Μεμβράνη Ανταλλαγής Πρωτονίων (Η Κυψέλη Καυσίμου PEMFC)</i>	38
2) <i>Κυψέλη καυσίμου αλκαλίων (ή κυψέλη καυσίμου AFC)</i>	38
3) <i>Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (ή κυψέλη καυσίμου PAFC)</i>	39
4) <i>Κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (ή κυψέλη καυσίμου MCFC)</i>	40
5) <i>Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (ή κυψέλη καυσίμου SOFC)</i>	40
7. ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ.....	42
8. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	48
1) <i>Μέθοδοι Τροφοδοσίας Καυσίμου & Σχηματισμού του Μιγματος</i>	48
2) <i>Τεχνολογικά Εμπόδια & Περιορισμοί στη Χρήση του Υδρογόνου ως Καύσιμο στις ΜΕΚ</i> 51	
3) <i>Χαρακτηριστικά Σχεδιασμού και Λειτουργίας των ΜΕΚ Υδρογόνου</i>	53
9. ΚΑΥΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ	59
10. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	64
11. ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	66
12. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ	67
12. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ	69
13. ΠΡΟΤΥΠΙΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΚΙΝΗΣΗΣ.....	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο - ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ	80
1. Η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ	80
2. ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	83
1) <i>Εισαγωγή</i>	83
2) <i>Κύρια Μέρη του Υβριδικού αυτοκινήτου</i>	84
3) <i>Λειτουργίες κατά την οδήγηση – Αναπαραγωγικό Φρενάρισμα</i>	85
4) <i>Μετάδοση Ισχύος Υβριδικών</i>	87
5) <i>Τύποι Υβριδικών</i>	91
6) <i>Συσσωρευτές Υβριδικών Συστημάτων</i>	96
7) <i>Σύγχρονα Υβριδικά Οχήματα</i>	101
ΣΥΓΚΡΙΣΗ	111
1. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	111
<i>Θετικά Υδρογόνου έναντι συμβατικών πηγών ενέργειας</i>	111

<i>Πλεονεκτήματα Υδρογονοκίνησης</i>	113
2. ΑΡΝΗΤΙΚΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	114
<i>Αρνητικά Υδρογόνου έναντι των συμβατικών πηγών ενέργειας</i>	114
<i>Αρνητικά Υδρογονοκίνησης</i>	116
3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ	116
4. ΑΡΝΗΤΙΚΑ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ.....	118
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	121
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	123

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Κινητήριες μηχανές καλούνται οι μηχανές με τις οποίες μπορούμε να μετατρέψουμε τη θερμική, υδραυλική, αιολική και ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανικό έργο.

1)Θερμικές κινητήριες μηχανές : Καλούνται οι μηχανές στις οποίες η παραγωγή μηχανικού έργου γίνεται με την καύση ενός καύσιμου μέσου. Η ενέργεια που περιέχεται στην μονάδα μάζας (στερεά, υγρά καύσιμα) ή στην μονάδα όγκου (αέρια καύσιμα) του καύσιμου καλείται θερμογόνο δύναμη του καυσίμου. Στη κατηγορία αυτή ανήκουν οι ατμομηχανές, οι ατμοστρόβιλοι, οι αεροστρόβιλοι, οι βενζινοκινητήρες ή βενζινομηχανές, οι πετρελαιομηχανές ή κινητήρες diesel κ.ά.

2) Υδραυλικοί κινητήρες. Στη κατηγορία αυτή οι μηχανές καταναλίσκουν υδραυλική ενέργεια. και

3)Ηλεκτρικοί κινητήρες ή ηλεκτροκινητήρες.

Ανάλογα με τον τρόπο πραγματοποίησης της καύσης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στις μηχανές εσωτερικής καύσεως (Μ.Ε.Κ.) και στις μηχανές εξωτερικής καύσεως ή ατμομηχανές .

1) Μηχανές εσωτερικής καύσεως-ΜΕΚ : Σε αυτές τις μηχανές η καύση και η παραγωγή του μηχανικού έργου συντελούνται στον ίδιο χώρο, στον θάλαμο καύσης του κινητήρα στο εσωτερικό του κυλίνδρου, και για αυτόν το λόγο καλούνται και ενδόθερμοι κινητήρες .Η παραγωγή του μηχανικού έργου οφείλεται στην εκτονωτική δύναμη του καυσαερίου στην άνω επιφάνεια του εμβόλου, η οποία μετατρέπεται σε ροπή του στροφαλοφόρου άξονα του κινητήρα με το σύστημα εμβόλου- διωστήρα -στροφαλοφόρου π.χ εμβολοφόρος κινητήρας αυτοκινήτου, αεροστρόβιλος αεροπλάνου.

2)Εξωτερικής καύσεως : ονομάζονται οι μηχανές όπου η καύση δεν λαμβάνει μέρος στο χώρο παραγωγής έργου αλλά έξω από αυτόν και στις οποίες το μέσο παραγωγής έργου δεν είναι το καυσαέριο αλλά κάποιο άλλο στοιχείο όπως π.χ. νερό. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι ατμοστρόβιλοι, οι ατμομηχανές.

α)Ανάλογα με τον τρόπο μετατροπής της θερμικής ενέργειας σε μηχανικό έργο οι θερμικές μηχανές διακρίνονται σε εμβολοφόρους ή παλινδρομικές (ισχύουν τόσο για τις ΜΕΚ όσο και για τις εξωτερικής καύσεως) και σε περιστροφικές .

β)Ειδικότερα όμως στις εμβολοφόρους - παλινδρομικές ΜΕΚ η έναυση στον κύλινδρο μπορεί να πραγματοποιηθεί : 1)είτε με τη βοήθεια εξωτερικού μέσου (π.χ. σπινθήρα). Σ' αυτή την περίπτωση υπάγονται οι «κινητήρες Otto»

(που διακρίνονται σε αεριομηχανές και βενζινομηχανές) 2) είτε αυτόματα λόγω μεγάλης θέρμανσης του καυσίμου . Σ' αυτή την περίπτωση ανήκουν οι μηχανές «Diesel».

Κινητήρες εσωτερικής καύσης: Σ' αυτήν την κατηγορία κινητήρων ανήκουν αυτοί που χρησιμοποιούν σαν κινητήρια δύναμη τη δύναμη που αναπτύσσεται από την ανάφλεξη και την έκρηξη του πετρελαίου ή των παραγώγων του (βενζίνη κλπ.). Είναι οι πιο διαδεδομένοι κινητήρες της σύγχρονης εποχής, γιατί συνδυάζουν ικανοποιητική απόδοση και σχετική ανεξαρτησία . Χωρίζονται σε κινητήρες «ντίζελ», που χρησιμοποιούν σαν καύσιμο το πετρέλαιο και διακρίνονται για την αντοχή και τη δύναμή τους και σε κινητήρες που χρησιμοποιούν σαν καύσιμο τη βενζίνη. Οι οποίοι χρειάζονται την ύπαρξη του ηλεκτρικού αναφλεκτήρα (μπουζί), για να δουλέψουν. Στην συνηθισμένη ερώτηση «Πως λειτουργεί ο κινητήρας εσωτερικής καύσης;» Πολλοί απαντούν ότι: "ή έκρηξη του καυσίμου σπρώχνει το έμβολο και έτσι γυρίζει ο στρόφαλος". Κατ' αρχήν το καύσιμο δεν εκρήγνυται, αλλά καίγεται γρήγορα και ομαλά. Καύση είναι η χημική αντίδραση όπου η καύσιμος ύλη (που στην περίπτωσή μας περιέχεται στο υγρό καύσιμο μαζί με λιπαντικό), ενώνεται με το οξυγόνο του αέρα για να δώσει νέα συστατικά διοξείδιο του άνθρακα και νερό (κ.α.). Επειδή η ενέργεια που χρειάζεται για να σχηματιστούν τα νέα αυτά μόρια είναι μικρότερη από αυτή που είχαν τα αρχικά μόρια, μένει ελεύθερο ένα σημαντικό ποσό ενέργειας, με την μορφή της θερμότητας .Η θερμότητα δεν είναι ακριβώς αυτό που ζητάμε, την εκμεταλλευόμαστε όμως για να πετύχουμε τον σκοπό μας. Μέρος λοιπόν αυτής της θερμότητας ανεβάζει την θερμοκρασία των αερίων προϊόντων της καύσης (το νερό είναι ατμός) και αυξάνει την πίεσή τους. Τα υπερσυμπιεσμένα αέρια σπρώχνουν προς όλες τις κατευθύνσεις και φυσικά και την επιφάνεια του εμβόλου που αρχίζει να κινείται. Όλα τα παραπάνω συμβαίνουν πολύ γρήγορα στον θάλαμο της καύσης, σε χρόνο περίπου ίσο με **1μsec**. Δυστυχώς όπως είπαμε δεν μπορούμε να μετατρέψουμε όλο το ποσό της εκλυόμενης ενέργειας του καυσίμου σε κινητική .Το γεγονός αυτό αποτελεί μόνιμη πρόκληση για τους σχεδιαστές που προσπαθούν να μειώσουν τις απώλειες , και να παρουσιάσουν κινητήρες με τον καλύτερο βαθμό μετατροπής, της προσφερόμενης ενέργειας σε αποδιδόμενη.

Τετράχρονη λειτουργία “Otto”

Ο τετράχρονος κινητήρας έχει δύο τουλάχιστον βαλβίδες, μία βαλβίδα εισαγωγής και μία εξαγωγής. Αυτές συνήθως βρίσκονται στην κεφαλή του κυλίνδρου. Οι βαλβίδες είναι χρονισμένες μηχανικά με τον στρόφαλο, απ' όπου παίρνουν εντολή να ανοίξουν και να κλείσουν την κατάλληλη στιγμή .Οι τέσσερις χρόνοι του κινητήρα είναι οι παρακάτω :

α) Αναρρόφηση ή εισαγωγή: Ανοίγει η βαλβίδα εισαγωγής. Καθώς το έμβολο κατεβαίνει το μίγμα εισέρχεται και καταλαμβάνει τον χώρο του κυλίνδρου. Η βαλβίδα εξαγωγής είναι κλειστή.

β) Συμπίεση: Το έμβολο ανεβαίνει και η βαλβίδα εισαγωγής κλείνει. Το μίγμα συμπιέζεται. Η βαλβίδα εξαγωγής παραμένει κλειστή. Συμπίεση μέχρι $1/7$ και $1/9$ του ολικού όγκου του κυλίνδρου

γ) Καύση –εκτόνωση: Το μίγμα αναφλέγεται και καίγεται. Η καύση προκαλείται από την αναπήδηση του σπινθήρα στο ηλεκτρόδιο του σπινθηριστή. Τα αέρια προϊόντα εκτονώνονται και σπρώχνουν το έμβολο προς τα κάτω. Και οι δυο βαλβίδες είναι κλειστές .

δ) Εξαγωγή: Ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής και το ανερχόμενο έμβολο σπρώχνει τα προϊόντα της καύσης να βγουν από τον κύλινδρο με μεγάλη ταχύτητα.

ΔΙΧΡΟΝΗ λειτουργία “Otto”

Ο δίχρονος κινητήρας δεν έχει βαλβίδες , αλλά αντίστοιχα ανοίγματα στα τοιχώματα του κυλίνδρου, τις γνωστές πόρτες, που ανοιγοκλείνουν με το πέρασμα του εμβόλου . Τα τέσσερα στάδια δεν έχουν πλέον τους ίδιους χρονικούς περιορισμούς σαν την τετράχρονη. Άνοιγμα και κλείσιμο μπορούν να οριστούν από τον σχεδιαστή (σε λογικά όρια) και έτσι να πάψουν να είναι ισοδύναμα ή ανεξάρτητα μεταξύ τους. Εκεί βασίζεται και η ποικιλία των σχεδίων.

Ο κινητήρας γυρίζει με εξωτερική βοήθεια και το έμβολο ανεβαίνει . Η πίεση στην βάση πέφτει και αναρροφάτε το μίγμα από την ανοικτή βαλβίδα .Το έμβολο αρχίζει να κατεβαίνει. Η βαλβίδα εισαγωγής έχει κλείσει .Το μίγμα στην βάση συμπιέζεται. Το έμβολο έχει φθάσει στο κατώτατο σημείο (με εξωτερική βοήθεια) και έχει αποκαλύψει (έχουν δηλαδή ανοίξει) τις δύο πόρτες της εισαγωγής και εξαγωγής (εξάτμιση). Λόγω της διαφοράς πίεσης, το μίγμα ανεβαίνει από τον πλάγιο διάδρομο μεταφοράς και εισχωρεί στον ελεύθερο χώρο του κυλίνδρου, επάνω από το έμβολο. Επειδή είναι ανοικτή η πόρτα εξαγωγής, μικρό μέρος του μίγματος αρχίζει να εξέρχεται. Ο πλήρης κύκλος του δίχρονου γίνεται μέσα σε μία ανερχόμενη και μία κατερχόμενη διαδρομή του εμβόλου.

ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ DIESEL

Μοιάζει στα κύρια μέρη του με την βενζινομηχανή .Κυρίως διαφέρει στον τρόπο ανάμιξης του αέρα με το καύσιμο καθώς και στον τρόπο ανάφλεξης του μίγματος. Η μηχανή **diesel** δεν έχει σύστημα ανάφλεξης γιατί το πετρέλαιο αναφλέγεται στους κυλίνδρους από την υψηλή πίεση του συμπιεσμένου αέρα. Η πετρελαιομηχανή έχει μεγαλύτερο εξωτερικό όγκο και μεγαλύτερο κυβισμό από

μια βενζινομηχανή της ίδιας ισχύος. Η μηχανή **diesel** κατά την λειτουργία της στις χαμηλές στροφές προκαλεί κραδασμούς σε αντίθεση με μια βενζινομηχανή. Ο θερμικός κύκλος του **diesel** χρειάζεται τις ίδιες φάσεις λειτουργίας με τον αντίστοιχο του Otto. Οι διαφορές παρατηρούνται στους χρόνους εισαγωγής και εκτόνωσης .

Στην μηχανή **Diesel** στον χρόνο εισαγωγής του κύκλου εισέρχεται ατμοσφαιρικός αέρας ενώ στην βενζινομηχανή εισέρχεται μίγμα αέρα-βενζίνης. Κατά την φάση της εκτόνωσης στην μηχανή **Diesel** η καύση του μίγματος πετρελαίου-αέρα γίνεται με σταθερή πίεση ,σε αντίθεση με τους βενζινοκινητήρες όπου η καύση βενζίνης-αέρα γίνεται με σταθερό όγκο. Οι πετρελαιοκινητήρες έχουν μεγάλη σχέση συμπίεσης με αποτέλεσμα η θερμοκρασία στον χώρο καύσης να είναι μεταξύ 700 - 900 βαθμούς Κελσίου σε αντίθεση με την βενζινομηχανή που η θερμοκρασία δεν ξεπερνά τους 400 βαθμούς Κελσίου. Από την υψηλή πίεση αυξάνεται η ισχύς του κινητήρα, ενώ από την υψηλή θερμοκρασία αναφλέγεται το μίγμα αέρια-καυσίμου.

Κινητήρες Wankel

Ο περιστροφικός κινητήρας wankel πήρε την ονομασία του από το επίθετο του εφευρέτη, Felix Wankel. Είναι ένας τετράχρονος κινητήρας εσωτερικής καύσης, που αναπτύχθηκε στην δεκαετία του 1950. Η βασική αρχή παραγωγής ισχύος είναι ίδια με του κλασικού τετράχρονου παλινδρομικού εμβολοφόρου, αφού χρησιμοποιεί την ισχύ από την καύση του μείγματος βενζίνης-αέρα για να παράγει έργο. Έχει λιγότερα κινητά μέρη από τον παλινδρομικό κινητήρα. Μπορεί να χρησιμοποιήσει σαν καύσιμο τόσο βενζίνη όσο και πετρέλαιο ή ακόμα και άλλα καύσιμα .Στον κύλινδρο υπάρχουν θυρίδες εισαγωγής του μίγματος και εξαγωγής των καυσαερίων καθώς και ο αναφλεκτήρας (μπουζί).

Ο κινητήρας Wankel είναι μια μηχανή τριών θαλάμων ,που κατά την διάρκεια κίνησης του εμβόλου μεγαλώνουν ή μικραίνουν. Το έμβολο που στηρίζεται με την εσωτερική του οδόντωση πάνω στον μικρό οδοντοτροχό, ο οποίος είναι σταθερά συνδεδεμένος με το πλευρικό κάλυμμα και ασκεί μια περιστροφική δύναμη στον στροφαλοφόρο άξονα του κινητήρα. Η δύναμη του εμβόλου μεταφέρεται κατ' ευθείαν στον στροφαλοφόρο άξονα του κινητήρα. Οι τρεις στροφές του στροφαλοφόρου άξονα αντιστοιχούν σε μια στροφή του εμβόλου .

Κεφάλαιο 1°

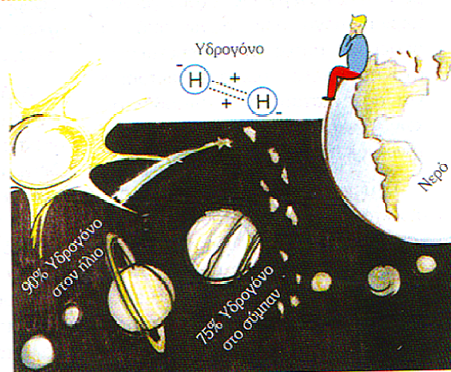
1. Γενικά για το υδρογόνο



Το υδρογόνο ανακαλύφθηκε το 1766 από τον Η. Cavendish και χαρακτηρίστηκε σαν «εύφλεκτος αέρας». Το 1923 ο Σκοτσέζος J. B. S. Haldane αναφέρει σε δημοσίευσή του ότι το υδρογόνο είναι το καύσιμο του μέλλοντος, όπου αυτό θα παράγεται από ανεμόμυλους που θα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και θα διασπών το νερό ηλεκτρολυτικά σε υδρογόνο και οξυγόνο. Το υδρογόνο θα αποθηκεύεται σε δεξαμενές με περίβλημα κενού και θα χρησιμοποιείται σε «οξειδωτικές κυψελίδες», την τότε πρόσφατη εφεύρεση του Sir Williams Grove. Όπως φαίνεται δεν απείχε πολύ από τη σημερινή πραγματικότητα.

Η πρώτη πρακτική χρήση του υδρογόνου ήταν για την ανύψωση των αερόστατων. Σημαντική έρευνα (1920-1930) για τη χρήση του υδρογόνου στις μεταφορές έκανε ο Γερμανός μηχανικός Rudolf Erren ο οποίος μετέτρεψε πλήθος κινητήρων για να καίνε υδρογόνο με εφαρμογές σε αυτοκίνητα ή φορτηγά ή τρένα. Μελέτησε ακόμα torπίλες που καίνε υδρογόνο για να μην αφήνουν πίσω τους ίχνος από τα καυσαέρια των συμβατικών κινητήρων τους.

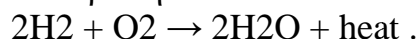
☛ Το υδρογόνο είναι το πιο διαδεδομένο στοιχείο στο σύμπαν



Το υδρογόνο αποτελεί το 90% της συνολικής μάζας του σύμπαντος και είναι το ελαφρύτερο στοιχείο που υπάρχει στη φύση. Σε καθαρή μορφή (αέρια) στο περιβάλλον της γης σπάνια συναντάται, αλλά δεσμευμένο, υπάρχει σχεδόν σε όλα τα ορυκτά της. Το υδρογόνο συναντιέται και σε πολλές σημαντικές δομικές οργανικές ενώσεις των έμβιων όντων της γης, μεταξύ αυτών των οργανικών ενώσεων στην κερατίνη, στα ένζυμα που συντελούν στη πέψη και στα μόρια του DNA.

Επίσης, υπάρχει άφθονο και στις διάφορες τροφές που καταναλώνει ο άνθρωπος, υπό τη μορφή των λιπών, των πρωτεϊνών και των υδρογονανθράκων. Λόγω του μικρού του βάρους, δεν αποτελεί περισσότερο από το 1% της συνολικής μάζας της γης. Καθώς το υδρογόνο συντήκεται, παράγονται διάφορα βαρύτερα στοιχεία από αυτό, με σημαντικότερο μεταξύ αυτών το Ήλιο (He). Η συγκεκριμένη διαδικασία της σύντηξης του υδρογόνου παράγει την ενέργεια που εκλύουν τα άστρα μέσα στο σύμπαν, ενώ βάσει αυτής πιστεύεται ότι δημιουργήθηκε αρχικά και το ίδιο το σύμπαν.

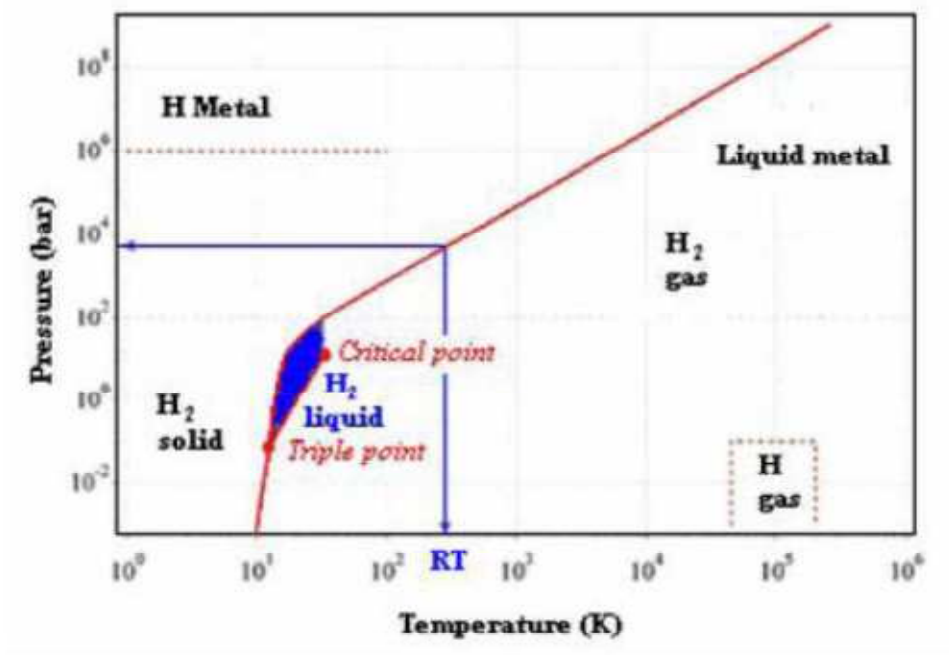
Σε συνήθη θερμοκρασία περιβάλλοντος, το υδρογόνο βρίσκεται πάντα σε αέρια φάση, στην οποία σαν υλικό είναι άχρωμο, άοσμο, και εύφλεκτο. Όταν καίγεται με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα (ή και με το «καθαρό» οξυγόνο), το υδρογόνο σχηματίζει νερό και παράγει θερμότητα σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



Η ονομασία του, οφείλεται στον Γάλλο χημικό Antoine Lavoisier και προέρχεται από τη σύμπτυξη δύο αρχαιοελληνικών λέξεων: «ύδωρ» και «γίγνομαι». Ως ξεχωριστό χημικό στοιχείο αναγνωρίστηκε για πρώτη φορά από τον Άγγλο χημικό Henry Cavendish το 1766. Το υδρογόνο κατέχει την πρώτη θέση στον περιοδικό πίνακα των χημικών στοιχείων και το άτομό του συμβολίζεται με το λατινικό γράμμα H. Κάθε άτομό του αποτελείται από ένα πρωτόνιο και από ένα

ηλεκτρόνιο, ενώ κατά την ένωση δύο διαφορετικών ατόμων του παράγεται ένα μόριο υδρογόνου με μοριακό τύπο: H₂ (H – H). Το υδρογόνο μπορεί να συνδυαστεί χημικά με σχεδόν οποιοδήποτε άλλο χημικό στοιχείο και έτσι δίνει τις περισσότερες χημικές ενώσεις από οποιοδήποτε άλλο του περιοδικού πίνακα. Στις σημαντικότερες από τις ενώσεις του συγκαταλέγονται το νερό, οι ενώσεις του με τον άνθρακα (οργανικές ενώσεις) και οι διάφοροι φυσικοί υδρογονάνθρακες όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο.

Διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων

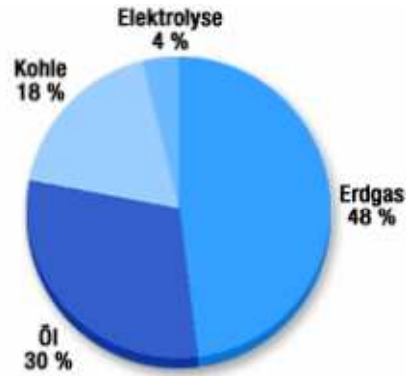


2. Μέθοδοι παραγωγής του υδρογόνου

Μία πρώτη γενική διάκριση των μεθόδων παραγωγής του υδρογόνου μπορεί να βασιστεί πάνω στον τύπο της ενέργειας που χρησιμοποιείται στη διεργασία διάσπασης του συνδέσμου που η φύση το συνδέει με το οξυγόνο (στο νερό) ή με τον άνθρακα (υδρογονάνθρακες, βιομάζα).

Μπορούν να θεωρηθούν κυρίως τρεις κατηγορίες μεθόδων παραγωγής του υδρογόνου.

- **Θερμοδυναμικές μέθοδοι παραγωγής:** Αυτές επιτρέπουν την εξαγωγή του υδρογόνου χρησιμοποιώντας θερμική ενέργεια. Το 96% της παρούσας παραγωγής υδρογόνου παράγεται από αναμόρφωση οργανικών υλών και ιδιαιτέρως υγραερίου ή καθαρού μεθανίου. Το υπόλοιπο 4% παράγεται από ηλεκτρόλυση του νερού.



Εικόνα 1- Πηγές Υδρογόνου

Με τον όρο αναμόρφωση χαρακτηρίζουμε την μετατροπή υδρογονανθράκων και αλκοολών σε υδρογόνο. Ως δευτερογενή παράγωγα, έχουμε υδρατμό, μονοξείδιο του άνθρακα και διοξείδιο του άνθρακα. Αν χρησιμοποιήσουμε αέρα ως οξειδωτικό μέσο έχουμε ως παράγωγο και άζωτο. Η αντίδραση αναμόρφωσης αποτελείται από πολλά βήματα, τα οποία ειδικά για υψηλούς υδρογονάνθρακες, δεν έχουν κατανοηθεί πλήρως. Οι αντιδράσεις μπορούν να επιταχυνθούν με χρήση καταλυτών. Εκτός των υψηλών θερμοκρασιών που κυμαίνονται από 700 °C - 900 °C και χρήση καταλύτη, χρειάζεται και μέσο οξείδωσης, όπως π.χ υδρατμός ή αέρας. Ανεξαρτήτως του μέσου οξείδωσης μπορούμε να διαχωρίσουμε τις διαδικασίες αναμόρφωσης σε τέσσερις κατηγορίες.

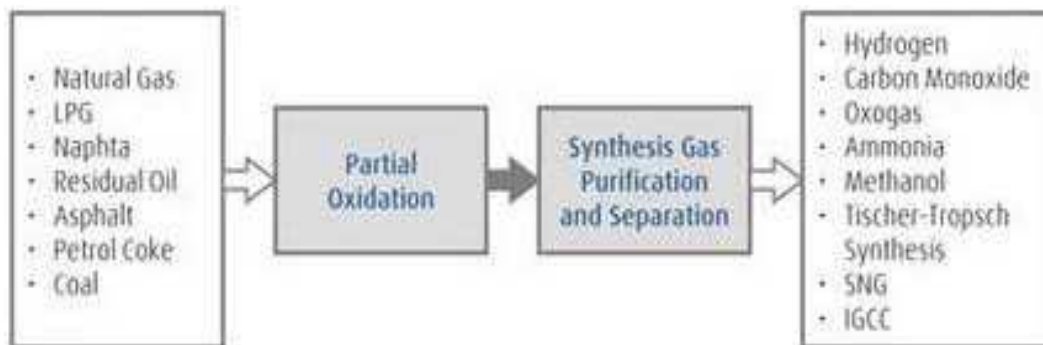
- Αναμόρφωση Ατμού: Στη διαδικασία αυτή χρησιμοποιούνται υδρογονάνθρακες οι οποίοι έχουν χρησιμοποιηθεί ήδη για άλλες διαδικασίες μετατροπής ενέργειας, οι οποίοι χωρίζονται μέσω 2 διαδικασιών με τη βοήθεια του ατμού σε οξειδωμένο άνθρακα και υδρογόνο. Κυρίως χρησιμοποιούμε όπως αναφέραμε ορυκτό υγραέριο το οποίο περιέχει συνήθως μεγάλο ποσοστό μεθανίου.



Εικόνα 2 - Υγραέριο Αναμορφωτής ατμού με CO μετατροπέα

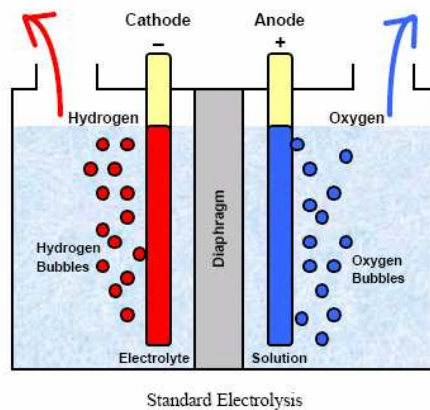
- Πυρόλυση , αεροποίηση, θερμόλυση: Μια εναλλακτική μέθοδος παραγωγής υδρογόνου είναι η θέρμανση υδρογονανθράκων χωρίς την παρουσία αέρα (πυρόλυση) (Larminie and Dicks, 2003 και Vielstich, et al 2003). Κατά την διαδικασία αυτή οι υδρογονάνθρακες διασπώνται σε υδρογόνο και στερεό άνθρακα. Αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για καύσιμα που περιέχουν μόνο υδρογονάνθρακες, διαφορετικά σχηματίζονται διάφορα παραπροϊόντα. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι το υδρογόνο που παράγεται είναι πολύ καθαρό. Βέβαια ο παραγόμενος άνθρακας πρέπει να απομακρυνθεί από τον αντιδραστήρα. Αυτό μπορεί να γίνει κλείνοντας την παροχή καυσίμου και εισάγοντας αέρα ώστε να καεί ο άνθρακας και να γίνει CO₂. Κάτι τέτοιο φαίνεται αρκετά απλό αλλά υπάρχουν σημαντικές δυσκολίες κυρίως σε σχέση με θέματα ασφαλείας. Ο έλεγχος της πυρόλυσης είναι πολύ σημαντικός διαφορετικά μπορεί να παραχθούν πολύ μεγάλες ποσότητες άνθρακα και να καταστραφεί ο καταλύτης. Χωρίς την χρήση καταλύτη είναι πάλι πιθανό να σχηματιστεί μεγάλη ποσότητα άνθρακα. Παρά τα προβλήματα αυτά η πυρόλυση θεωρείται μια από τις επιλογές για κάποια συστήματα κυψελών καυσίμου. (Larminie and Dicks, 2003).
- Μερική Οξειδωση: Η μερική οξειδωση των βαρέων λαδιών ή άλλων υδρογονανθράκων είναι μιας μεγάλης κλίμακας, μέθοδος παραγωγής H₂. Ακόμα και από άνθρακα και κοκ μπορεί να παραχθεί με αυτή την

διαδικασία ένα συνθετικό αέριο, που είναι μείγμα H_2 και CO . Μέσω της υποστοιχειομετρικής τροφοδοσίας οξυγόνου ρυθμίζεται η διαδικασία.



Εικόνα 3 - Μερική οξείδωση και παράγωγα

- **Ηλεκτρολυτικές μέθοδοι:** Οι μέθοδοι αυτές επιτρέπουν την εξαγωγή του υδρογόνου χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια (ηλεκτρόλυση, φωτοηλεκτρόλυση). Στην ηλεκτρόλυση μετατρέπεται η ηλεκτρική σε χημική ενέργεια. Ειδικά στην περίπτωση της διάσπασης νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο, αυτός είναι και ο σκοπός της ηλεκτρόλυσης. Η ηλεκτρόλυση δεν έχει παράγωγα CO_2 , γεγονός το οποίο την κάνει πολύ φιλική ως διαδικασία παραγωγής υδρογόνου για αποθήκευση ανανεώσιμων ροών ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαδικασία αυτή είναι κυρίως φτηνή όταν υπάρχει φτηνή τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας και το παραγόμενο καθαρό οξυγόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκ περαιτέρω, παρά να ελευθερωθεί άσκοπα στον αέρα. Η παλαιότερη και πιο αξιόπιστη τεχνολογία είναι η αλκαλική ηλεκτρόλυση, η οποία χαρακτηρίζεται από χαμηλή τιμή ρεύματος και συχνά εφαρμόζεται σε συνδυασμό με υδρογεννήτριες ιδιαίτερα στη Νορβηγία και στην Ισλανδία. Η αντίδραση συμβαίνει μέσα σε ένα δοχείο το οποίο είναι γεμάτο από αγωγίμους ηλεκτρολύτες (άλατα, οξέα) και περιέχει δύο ηλεκτρόδια τα οποία διαρρέονται από συνεχές ρεύμα. Η διαδικασία παραγωγής δουλεύει σε δύο στάδια, στην άνοδο και στην κάθοδο.

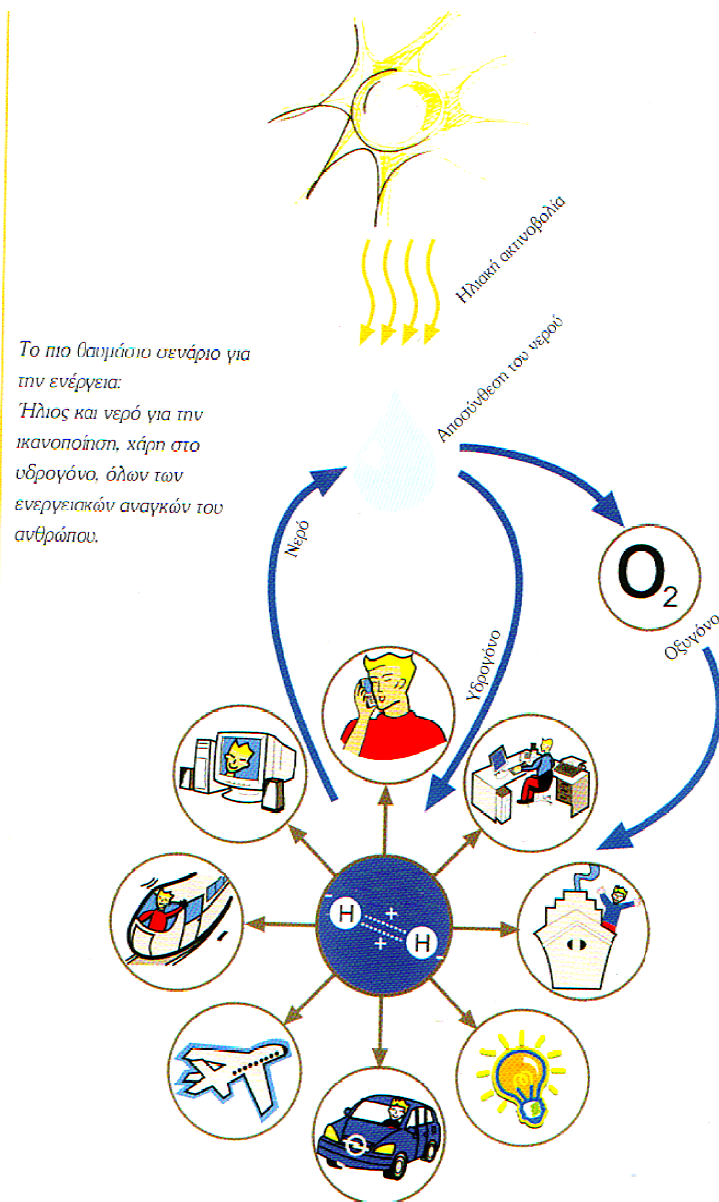


Στην άνοδο απελευθερώνονται ηλεκτρόνια τα οποία απορροφούνται από την κάθοδο. Αυτές οι δύο διαδικασίες αποτελούν μαζί μια ολοκληρωμένη αντίδραση στην οποία είναι φανερή η διαδικασία διαχωρισμού, δηλαδή το νερό διασπάται στα 2 βασικά του συστατικά το υδρογόνο και το οξυγόνο. Επειδή το φυσικό νερό είναι κακός αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος και περιέχει λίγα ιόντα, συνήθως το εμπλουτίζουμε με οξέα, τα οποία αυξάνουν την ποιότητά του με οικονομικό τρόπο.

- **Βιοχημικές μέθοδοι:** Αυτές επιτρέπουν την εξαγωγή του υδρογόνου χρησιμοποιώντας φύκια και μικροοργανισμούς (φωτοπαραγωγή, ζηνώσεις).

Μία άλλη ουσιαστική κατάταξη των μεθόδων παραγωγής του υδρογόνου μπορεί να είναι εκείνη που γίνεται σε συνάρτηση της πηγής ενέργειας που χρησιμοποιείται:

- **Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας**
 - Φυσικό αέριο (reforming)
 - Κάρβουνο (πυρόλυση αεροποίησης)
 - Προϊόντα πετρελαίου (μερική οξείδωση)
 - Πυρηνική ενέργεια (Θερμόλυση)
- **Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας**
 - Αιολική ενέργεια, υδροενέργεια ηλιακή ενέργεια (φωτοβολταϊκά στοιχεία)
 - Γεωθερμική ενέργεια (ηλεκτρόλυση)
 - Βιομάζα (θερμοχημικές και βιοχημικές μέθοδοι)



3. ΑΠΟΘΕΜΑΤΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Όσον αφορά τον προβληματισμό για την αιφορία των αποθεμάτων ενέργειας φαίνεται ότι το υδρογόνο κυριαρχεί ως λύση. Αποτελεί το πλέον διαδεδομένο στοιχείο στη φύση αποτελώντας το 90% του σύμπαντος. Στη γη βρίσκεται σε ενώσεις όπως το νερό και τους υδρογονάνθρακες ενώ σαν καθαρό στοιχείο υπάρχει μόνο σε ίχνη στην ατμόσφαιρα.

Συνεπώς το υδρογόνο αποτελεί καύσιμο ευρείας διάθεσης του οποίου ο ανεφοδιασμός να μην τελειώνει ποτέ, διότι εκλύοντας νερό και οι υδρατμούς, ως μοναδικά παραπροϊόντα από την καύση του υδρογόνου, αυτά υφίστανται ανακύκλωση μέσω βροχής, ποταμών, λιμνών και ωκεανών για να «επανορθώσουν» για το νερό που αρχικά χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του υδρογόνου. Τέλος, έχει την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα βάρους σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα γεγονός που καθιερώνει το υδρογόνο καύσιμο υψηλής δραστηριότητας οπότε και ενδείκνυται σε πλήθος εφαρμογών.

Μέσο	(Δισεκατομμύρια m ³)/Έτος	Ποσοστό
Φυσικό αέριο	240	48%
Πετρέλαιο	150	30%
Κάρβουνο	90	18%
Νερό (ηλεκτρόλυση)	20	4%
Συνολική ποσότητα	500	100%

Παγκόσμια παραγωγή υδρογόνου ανά μέσο παραγωγής (έτος αναφοράς:2003)

4. Αποθήκευση και Μεταφορά

Το υδρογόνο σε σχέση με το βάρος του έχει μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα. Αυτό το κάνει μοναδικό καύσιμο, για παράδειγμα για την διαστημική τεχνολογία.

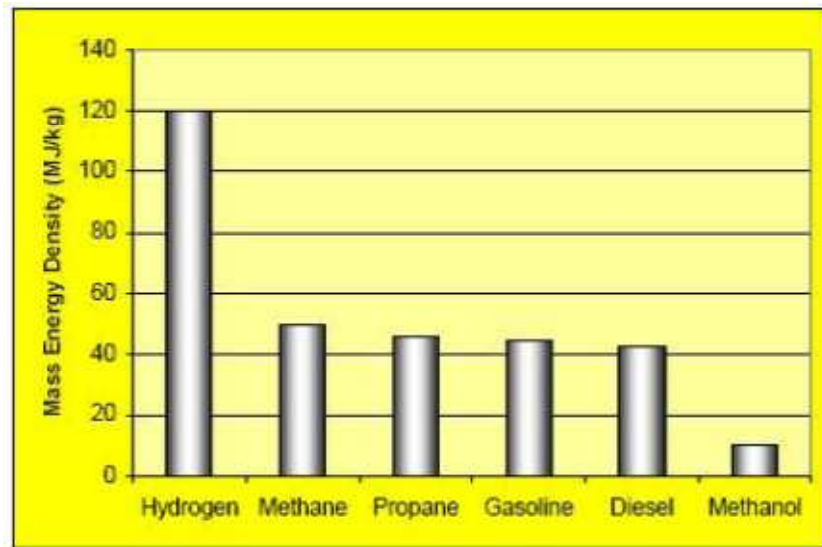


Figure 7 – Mass energy density of fuels (LHV)

Η αποθήκευση του υδρογόνου όμως ειδικά σε περιορισμένο όγκο αποτελεί ακόμα και τώρα μια πρόκληση.

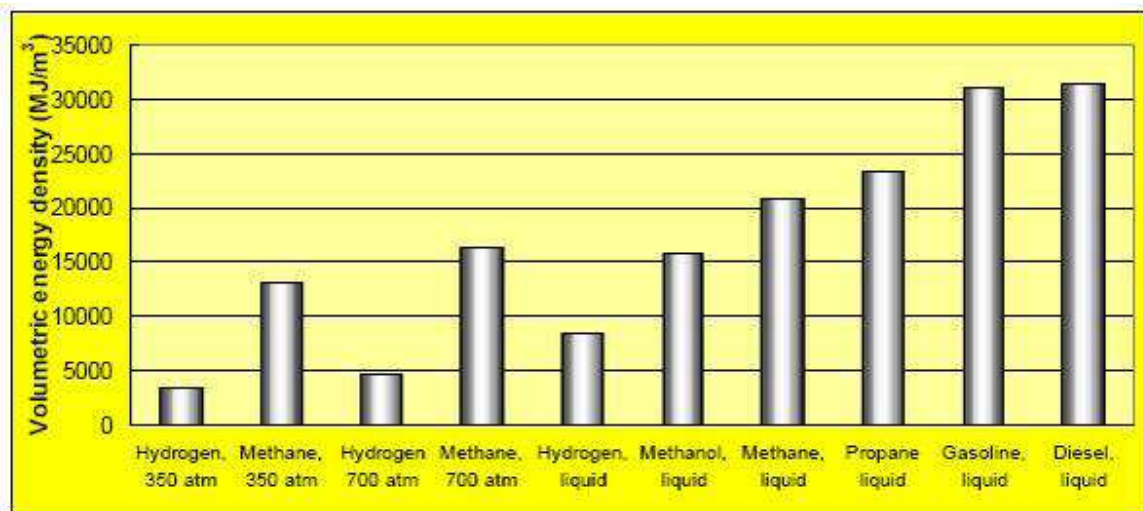


Figure 8 – Volumetric energy density of typical types of fuel (LHV)

Τόσο στην αποθήκευση όπως και στη μεταφορά του υδρογόνου εμφανίζονται πρακτικά προβλήματα. Το υδρογόνο είναι εκρηκτικό αέριο και επίσης εμφανίζει πολύ υψηλή ικανότητα διάχυσης, με αποτέλεσμα να διαφεύγει από τα μέσα αποθήκευσης ευκολότερα από τα υπόλοιπα αέρια και μπορεί εύκολα να οδηγήσει σε ατυχήματα. Έτσι χρειάζεται μεγάλη έμφαση στην ασφαλή και ολοκληρωμένη αποθήκευση και μεταφορά, κάτι που συνεπάγεται υψηλό οικονομικό κόστος. Για να αποθηκεύσουμε υδρογόνο οικονομικά, σε σχέση με τον όγκο του, υπάρχουν στην πράξη τρεις διαφορετικοί τρόποι:

- Συμπύκνωση,
- υγροποίηση,
- φυσική ή χημική ένωση σε αποθηκευτικά υλικά.

Συμπιεσμένο Υδρογόνο - Συμπύκνωση

Για να αποθηκεύσουμε το υδρογόνο αποτελεσματικά σε όγκο και βάρος, πρέπει να το συμπιέσουμε σε πίεση 20-100 MPa. Για πολλές χημικές διαδικασίες χρειαζόμαστε το υδρογόνο σε συμπυκνωμένη μορφή. Επειδή το υδρογόνο σε υψηλές πιέσεις δεν συμπεριφέρεται ως ιδανικό αέριο, αυτή η μορφή αποθήκευσης έχει φυσικούς περιορισμούς. Σε τεχνικές εφαρμογές χρησιμοποιείται ο λόγος συμπίεσης Z, ο οποίος περιγράφει την απόκλιση από το ιδανικό αέριο.

$$Z = \frac{pV}{RT}$$

Pressure (MPa)	0.1013	5	10	20	30	35	40	50	70	100
Z	1	1.032	1.065	1.132	1.201	1.236	1.272	1.344	1.489	1.702

Εικόνα 4-Παράγοντας συμπίεσης Z σε 20 βαθμούς C

Κάτω από 15 MPa οι αποκλίσεις από το ιδανικό αέριο είναι μικρές. Έως περίπου 40 MPa μπορούμε να περιγράψουμε το αέριο πολύ ικανοποιητικά σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα.

Στην τεχνική λύση του προβλήματος χρησιμοποιείται μια πολυεπίπεδη συμπύκνωση με ενδιάμεσες ψύξεις. Συνήθως τριεπίπεδη συμπύκνωση είναι η βέλτιστη και η πιο αποδοτική.

Συμπιεστής

Λόγω της μικρής μοριακής μάζας δεν χρησιμοποιούνται συμβατικοί συμπιεστές. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκαν ειδικοί συμπιεστές υδρογόνου. Για πολύ μεγάλο όγκο (> 50.000 Nm³/h) όπως χρησιμοποιείται στην χημική βιομηχανία, χρησιμοποιούνται κυρίως ακτινωτοί υψηλής πίεσης αεριοστροβιλικοί συμπιεστές. Λόγω των περιορισμένων συνθηκών πίεσης χρησιμοποιούνται πολυεπίπεδοι συμπιεστές. Για μικρότερη ροή όγκου χρησιμοποιούνται τρόμπες πιστονιού. Ανάλογα με τα στάνταρ καθαρότητας του υδρογόνου διαχωρίζουμε τρεις τύπους:

1. Συμπιεστές πιστονιού με λίπανση λαδιού

2. Συμπιεστές πιστονιού με λίπανση νερού για περιπτώσεις που δεν επιτρέπονται ούτε μικρά ποσοστά λαδιού
3. Συμπιεστές πιστονιού χωρίς λίπανση για χρήση υψηλής καθαρότητας υδρογόνου.

Μικρότερες ροές όγκου μπορούν να συμπιεστούν και με συμπιεστές βίδας. Αυτοί χρησιμοποιούνται συνήθως σε εγκαταστάσεις υγροποίησης. Μια συνήθως λιγότερο χρησιμοποιούμενη περίπτωση συμπύκνωσης είναι μέσω συμπίεσης της υγρής φάσης και στη συνέχεια εξάτμισή της. Αυτή η περίπτωση χρησιμοποιείται και σε μερικές μηχανές καύσης. Οι παραγόμενες πιέσεις κυμαίνονται περίπου στα 10 MPa.

Δοχεία Αποθήκευσης Συμπιεσμένου Υδρογόνου

Αυτή τη στιγμή η αποθήκευση του υδρογόνου ως συμπιεσμένο αέριο είναι η απλούστερη, η πιο διαδεδομένη και αποτελεσματική μέθοδος αποθήκευσης. Οι αποθηκευτές υδρογόνου είναι συνήθως κυλινδρικής μορφής κατασκευασμένοι από υψηλής αντοχής υλικά.



Εικόνα 5- Μεγάλες δεξαμενές συμπιεσμένου υδρογόνου 5-7 MPa για βιομηχανικές εφαρμογές

Διαφορετικά από ότι οι στάσιμοι αποθηκευτές υδρογόνου, αναπτύσσονται και βελτιστοποιούνται οι αποθηκευτές υδρογόνου για εφαρμογές τροφοδοσίας, πχ αποθηκευτής υδρογόνου σε αυτοκίνητο. Ανάλογα με την ανάπτυξη κάθε μεθόδου, έχουμε την διαχώρισή τους στους εξής τύπους:

- Τύπος 1: Φτιαγμένος αποκλειστικά από συμπαγές μέταλλο.

- Τύπος 2: Φτιαγμένος από μέταλλο μαζί με υλικό GRP/CFK.
- Τύπος 3: Μεταλλικό δοχείο με εξωτερικό στρώμα υλικού CFK.
- Τύπος 4: Το εσωτερικό δοχείο φτιαγμένο από συμπαγές πλαστικό και εξωτερικά CFK.



Εικόνα 6 - Τύποι αποθηκευτών

Η τωρινή έρευνα και ανάπτυξη των δοχείων αποθήκευσης υδρογόνου επικεντρώνεται κυρίως στην ασφάλεια, ιδιαίτερα των αποθηκευτικών τύπων 3 και 4. Αντίστοιχα επιλέγονται και τα κατάλληλα υλικά ώστε να ικανοποιούνται οι απαραίτητες προδιαγραφές. Οι κατασκευαστές των δοχείων αποθήκευσης υδρογόνου που συνέβαλλαν ιδιαίτερα στην τεχνογνωσία τους είναι: Dynetek GmbH, COMAT (Γερμανία), Composites Aquitaine, CEA, Ullit (Γαλλία), Faber (Ιταλία), Quantum (ΗΠΑ).

Για τις εφαρμογές στα αυτοκίνητα μέχρι τώρα επιτυγχάνεται συμπίεση στον αποθηκευτή, της τάξης των 35 MPa με περίπου 10-20% επιπλέον περιθώριο για περιπτώσεις ανεφοδιασμών. Ο ανεφοδιασμός του αποθηκευτή υδρογόνου στα αυτοκίνητα γίνεται περίπου σε 3 λεπτά. Το υδρογόνο ψύχεται και συμπιέζεται επιτόπου, μέσα στον αποθηκευτή. Αντίθετα για τον ανεφοδιασμό δοχείων αποθήκευσης σε πίεση 70-80 MPa το υδρογόνο πρέπει να έχει προψυχθεί, διαφορετικά δεν γίνεται να επιτευχθεί συμπίεση στην παραπάνω τιμή πίεσης, μέσα στον αποθηκευτή.

Υγρό Υδρογόνο LH2 - Υγροποίηση

Το σημείο βρασμού του υδρογόνου είναι 20,39K σε πίεση 101,3kPa για το ορθο-υδρογόνο και 20,26K για το παρα-υδρογόνο. Όπως άλλα αέρια(πχ άζωτο), το υδρογόνο σε υγροποιημένη μορφή έχει πλεονέκτημα σε αποτελεσματικότερη αποθήκευση και πιο εύχρηστη δυνατότητα τροφοδοσίας. Το υγρό υδρογόνο εκτός της αποθήκευσής του για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιείται ως προωθητικό πυραύλων, διαστημοπλοίων και σε ερευνητικά πειράματα.

Η υγροποίηση επιτυγχάνεται με ψύξη του υδρογόνου σε θερμοκρασία χαμηλότερη από αυτή του σημείου βρασμού και υπάρχουν διάφορες διαδικασίες για να επιτευχθεί. Είτε ψύχοντας το υδρογόνο σε εναλλάκτες θερμότητας, με τη βοήθεια ακόμα πιο ψυχρών μέσων (πχ υγρό ήλιο), είτε με μαγνητική ψύξη η οποία βασίζεται στο μαγνητοθερμικό φαινόμενο (Magnetocaloric Effect-MCE), είτε με εκτόνωση βάσει του φαινομένου Joule-Thomson.

Καθώς το υδρογόνο σε κανονικές συνθήκες έχει ένα αντίστροφο φαινόμενο Joule-Thomson (τα περισσότερα αέρια, σε κανονικές συνθήκες, ψύχονται όταν εκτονώνονται και θερμαίνονται όταν συμπιέζονται, αντίθετα από το υδρογόνο), πρέπει να ψυχθεί κάτω απ τη θερμοκρασία αντιστροφής του φαινομένου Joule-Thomson, περίπου στους 203K με τη βοήθεια ενός άλλου ψυκτικού μέσου (συνήθως του υγρού αζώτου). Η συνηθισμένη αρχική θερμοκρασία εκτόνωσης είναι το σημείο βρασμού του αζώτου στους 77K και σε πίεση 0,1 MPa. Μέσα σε αυτή την περιοχή του διαγράμματος T(θερμοκρασίας)- s(εντροπίας) η ισενθαλπική μεταβολή έχει απότομη ανοδική κλίση, το οποίο συνεπάγεται ότι η εκτόνωση προκαλεί μεγάλη ψύξη.

Το μαγνητοθερμικό φαινόμενο βασίζεται στο γεγονός ότι αν εφαρμοστεί ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο σε ένα μαγνητικό υλικό, τα μαγνητικά χαρακτηριστικά του υλικού τροποποιούνται και αυτό προκαλεί μια αλλαγή στη θερμοκρασία του μαγνητικού υλικού. Έτσι ένας απομαγνητισμός κοντά στη θερμοκρασία Curie, όπου ο φερρομαγνητισμός αλλάζει σε παραμαγνητισμό, προκαλεί μια απώλεια θερμότητας. Η θερμοκρασία μειώνει περίπου 1K για κάθε T(Tesla).

Στις μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις η αποδοτικότητα μπορεί να αυξηθεί από τα ακόλουθα μέτρα:

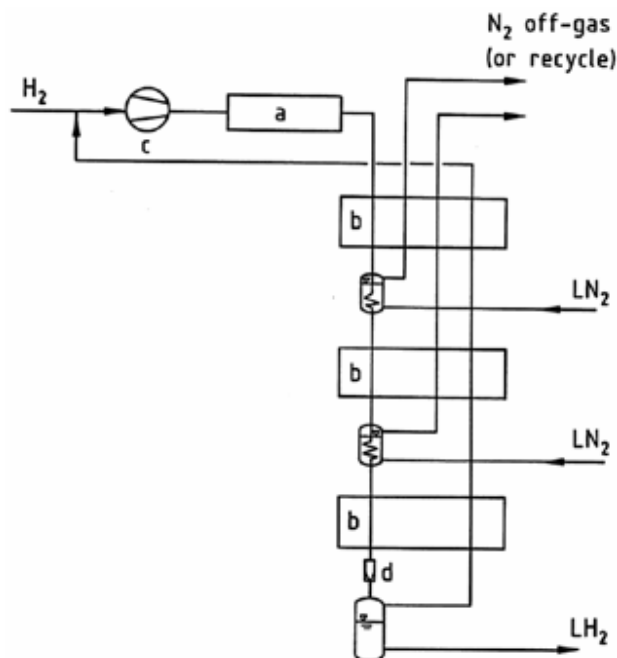
1. Χρησιμοποίηση υγρού αζώτου(LN2) για πρόψυξη
2. Υψηλής απόδοσης τουρμπίνες και συμπιεστές
3. Βελτίωση στη μόνωση του περιβλήματος του δοχείου αποθήκευσης
4. Εναλλάκτες θερμότητας και αντιδραστήρες με μεγαλύτερη απόδοση

Συστήματα Υγροποίησης

Αυτή τη στιγμή υπάρχουν λίγα συστήματα υγροποίησης υδρογόνου στον κόσμο. Το μεγαλύτερο σύστημα υγροποίησης με ικανότητα περίπου 60τόνους/μέρα λειτουργεί στις ΗΠΑ. Εξυπηρετεί κυρίως τις ανάγκες για τα καύσιμα των μηχανών των πυραύλων που χρησιμοποιούνται για τα διαστημικά ταξίδια.

Μερικά μικρότερα συστήματα υγροποίησης βρίσκονται στην Ευρώπη(πχ Ολλανδία). Εξυπηρετούν την τροφοδοσία βιομηχανιών υδρογόνου γενικά, την παραγωγή καυσίμων για τις μηχανές των πυραύλων για τα διαστημικά ταξίδια και κάποιες ερευνητικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο σύστημα υγροποίησης στην Ευρώπη έχει ικανότητα παραγωγής 5τόνους/μέρα.

Τα μεγάλα συστήματα χρησιμοποιούν τη διαδικασία Linde-Hampson, με την οποία στα ανώτερα επίπεδα το συμπιεσμένο υδρογόνο, εκτονώνεται στις τουρμπίνες. Τα μικρότερα συστήματα χρησιμοποιούν τη διαδικασία Linde με μικρότερα επίπεδα πίεσης γενικά.



Εικόνα 7- Διαδικασία Linde

- a) Προετοιμασία, προσρόφιση
- b) Εναλλάκτες θερμότητας
- c) Συμπιεστής υδρογόνου
- d) Βαλβίδες εκτόνωσης

Ψυγεία αποθήκευσης υγρού υδρογόνου

Υπάρχει μια διαφοροποίηση μεταξύ των αποθηκευτών υγρού υδρογόνου, σε αυτούς που είναι στάσιμοι και αυτούς που είναι κινητοί για απευθείας τροφοδοσία, συγκεκριμένα για τους κινητούς αποθηκευτές LH2 για τα αυτοκίνητα.



Εικόνα 8- Αποθηκευτής LH2 χωρητικότητας 3800m³ στο διαστημικό κέντρο απογείωσης Kennedy στη Φλόριδα

Μια τυπική δομή ενός αποθηκευτή LH2, που χρησιμοποιούν τα οχήματα 750h της BMW παρουσιάζεται παρακάτω:

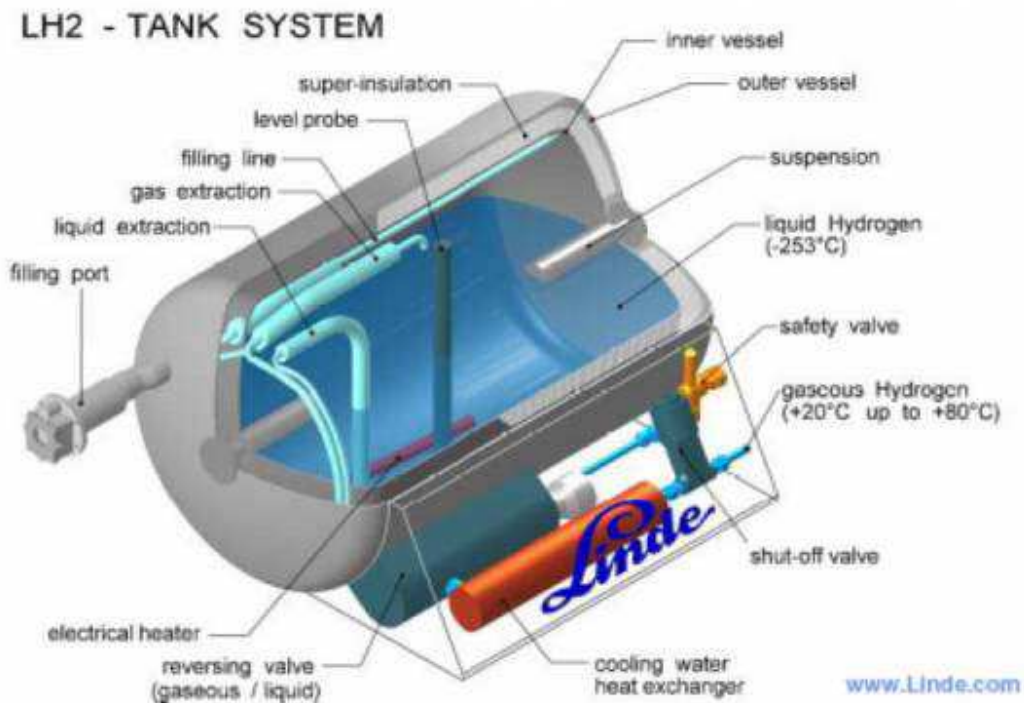


Figure 18 – Schematic representation of a cryogenic vessel – design and components
[Reference: Linde AG]

Η δεξαμενή αποθήκευσης του LH2 καλείται επίσης και κρυστάτης. Η δεξαμενή αποτελείται από μια φλοίδα διπλής επίστρωσης χάλυβα, άριστης ποιότητας. Μεταξύ της εσωτερικής και της εξωτερικής επίστρωσης υπάρχει αεροστεγές μονωτικό υλικό υψηλής ποιότητας. Αυτή η κατασκευαστική δομή περιορίζει τις απώλειες στο ελάχιστο, έτσι η δεξαμενή που παρουσιάζεται στο παραπάνω σχήμα, η οποία έχει χωρητικότητα 180λίτρα, έχει απώλειες περίπου 1,5% ανά μέρα, λόγω εξάτμισης και διαφυγής μέσω της βαλβίδας. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι τα 7kg υγρού υδρογόνου που δέχεται η δεξαμενή, θα διαφύγουν στο περιβάλλον μέσα σε δύο μήνες μη χρήσης της μηχανής.

Ο διαχειριστής της διαδικασίας εξάτμισης, προσπαθεί να περιορίσει αυτές τις απώλειες, ή να μεταφέρει το εξατμισμένο υδρογόνο ώστε να αποθηκευτεί αλλού, ή να χρησιμοποιήσει:

- ‘Θερμή ψύξη’ με τη χρήση ανασυνδυαστικού καταλύτη.
- Η δεξαμενή αποθήκευσης να βρίσκεται μέσα σε μια άλλη δεξαμενή με μεταλλικό υδρίδιο.
- Επαναυγροποίηση
- Απευθείας ενεργητική χρήση σε κυψέλες καυσίμου.

Οι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες τοποθετούν γενικά σε υψηλό επίπεδο τις απαιτήσεις στο σχεδιασμό των υπόλοιπων εξαρτημάτων(πχ βαλβίδες, σωλήνες εξόδου, συσκευές μέτρησης).

Αποθηκευτές Στερεού Υδρογόνου

Για την αποθήκευση στερεού υδρογόνου χρησιμοποιούμε δύο διαφορετικές διαδικασίες.

- Την φυσική προσρόφηση: Με τη φυσική προσρόφηση τα μόρια του υδρογόνου προσροφούνται, συνδεδεμένα λόγω των δυνάμεων Van der Waals και ανεβαίνουν στην επιφάνεια.
- Την χημική προσρόφηση: Η χημική προσρόφηση περιλαμβάνει τρία βήματα: Προσρόφηση των μορίων, διαχωρισμός των μορίων και τοποθέτηση των ατόμων στο δικτυωτό πλέγμα.

Η αποθήκευση του υδρογόνου σε στερεά κατάσταση εκτός από το πλεονέκτημα της εξοικονόμησης όγκου, προσφέρει και το πλεονέκτημα της ασφάλειας καθώς το στερεό υδρογόνο αποθηκεύεται σε χαμηλή πίεση και μέτρια θερμοκρασία.

Μεταλλικά Υδρίδια (MH)

Τα μεταλλικά υδρίδια έχουν βάση μεταλλικές ενώσεις, οι οποίες μπορούν μέσω χημειορρόφησης, να αποθηκεύσουν όπως ένα σφουγγάρι, υδρογόνο. Μέσω μιας

χημικής στερεής αντίδρασης αποθηκεύεται το υδρογόνο κάτω από πίεση και αποβολή θερμότητας.

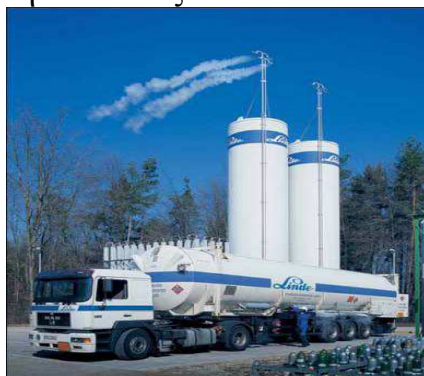
Αντιθέτως για την απελευθέρωση H₂, πρέπει να προσφέρουμε θερμότητα ή να μειώσουμε την πίεση. Αυτή η διαδικασία της φόρτωσης και εκφόρτωσης μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές, χωρίς να υπάρχει σημαντική απώλεια αποθήκευσης.

Μεταφορά

Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι μεταφοράς του υδρογόνου. Ο ένας είναι μέσω της μεταφοράς δεξαμενών αποθήκευσης σε μορφή LH₂ (υγρό υδρογόνο) και ο άλλος με απευθείας συνεχή τροφοδοσία μέσω δικτύων αγωγών και σωληνώσεων σε μορφή CGH₂ (συμπιεσμένο αέριο υδρογόνο).

Διακριτή Μεταφορά

Με διακριτό τρόπο το υδρογόνο μεταφέρεται στις καταστάσεις που περιγράψαμε πριν, δηλαδή είτε σε αποθηκευτές συμπιεσμένου υδρογόνου, είτε σε ψυγεία-αποθηκευτές υγρού υδρογόνου. Επειδή όμως οι ποσότητες μεταφοράς είναι σχετικά μικρές, η τροφοδοσία με αυτόν τον τρόπο είναι πολύ ακριβή. Οι εταιρίες μεταφοράς και διανομής για οικονομικούς λόγους, προτιμούν την μεταφορά του υδρογόνου σε υγρή μορφή. Έτσι χρησιμοποιείται η δεξαμενή αποθήκευσης υγρού υδρογόνου LKW, η οποία είναι εξοπλισμένη με υπερμονωτικό αεροστεγές υλικό. Έχει βάρος σχεδόν 3,5 τόνους και μπορεί να μεταφέρει κάτι λιγότερο από 40 τόνους υγρού 74 υδρογόνου. Αντίθετα οι συμβατικές δεξαμενές αποθήκευσης συμπιεσμένου αέριου υδρογόνου, εκτός του ότι είναι βαρύτερες, έχουν περίπου 10 φορές μικρότερη χωρητικότητα από τις LKW.



Εικόνα 9- Φορτηγό με δεξαμενή υγρού υδρογόνου

Στα πλαίσια της φάσης III.0-4 του EQHHPP κατασκευάστηκε ένα σύστημα μεταφοράς με Multi-Layer-Vacuum υπέρ-απομόνωση. Στα αρχικά στάδια έχουν σχεδιαστεί κοντέινερ μήκους 15m και εν συνεχεία προγραμματίζεται η σχεδίαση κοντέινερ, μήκους 25m(70-110 m³). Τα κοντέινερ αυτά έχουν σχεδιαστεί για μεταφορά πάνω σε φορτηγά και νοτιοαμερικανικούς και ιαπωνικούς σιδηροδρόμους. Η αυτονομία(μηδενική απώλεια προϊόντος λόγω απελευθέρωσης του υδρογόνου στην ατμόσφαιρα) του συστήματος κοντέινερ για ένα ποσοστό πληρότητας 90% υγρού προϊόντος, είναι σχεδιασμένη για 30 μέρες. Η μεταφορά με σύγχρονα κοντέινερ στο κατάστρωμα των πλοίων μπορεί να γίνει σε περιορισμένη ποσότητα αυτή τη στιγμή. Μακροπρόθεσμα για μεταφορά μεγαλύτερων όγκων θα χρειαστούν νέες τεχνολογίας κοντέινερ. Με το σχέδιο αυτό στόχος είναι η μείωση του κόστους μεταφοράς στο μισό του ήδη υπάρχοντος.



Εικόνα 10 - Δεξαμενόπλοιο LH2

Συνεχές Δίκτυο Τροφοδοσίας με Σωληνώσεις

Η τροφοδοσία υδρογόνου μέσω ειδικών σωλήνων υψηλής πίεσης, για αποστάσεις κάποιων εκατοντάδων km, είναι μια δοκιμασμένη διαδικασία για περισσότερο από 50 χρόνια. Για παράδειγμα το δίκτυο σωληνώσεων που χρησιμοποιούν τα χημικά εργοστάσια Huels στην περιοχή Ruhr, λειτουργεί από το 1938, έχει μήκος 215km, διάμετρο σωλήνων 168-273mm, με πίεση μεταφοράς 2,5MPa και δεν έχει προκληθεί ποτέ κανένα ατύχημα. Επίσης στη Leuna λειτουργεί ένα δίκτυο σωλήνων, νεότερης κατασκευής, βάσει της διαδικασίας Linde, με μήκος 50km και πίεση 2MPa. Στο Βέλγιο και στη Γαλλία υπάρχει ένα δίκτυο σωληνώσεων από το 1966, μήκους 290km, με πίεση 6,5-10MPa. Στο Ρότερνταμ επίσης υπάρχει δίκτυο σωληνώσεων μεταφοράς H₂, μήκους περίπου 50km. Στις ΗΠΑ υπάρχουν αρκετά δίκτυα σωληνώσεων. Στο Huston λειτουργεί ένα δίκτυο από το 1969, μήκους 232km, διάμετρο σωλήνων 114-220mm και πίεση μέχρι 5,8MPa. Στη Louisiana, στη Νέα Ορλεάνη λειτουργεί ένα δίκτυο 96km. Στον Καναδά, στην επαρχία Αλμπέρτα, υπάρχει ένα δίκτυο 22km μακριών σωληνώσεων, το οποίο αποτελεί το πρώτο βήμα για μεγαλύτερα δίκτυα σωληνώσεων με πολλαπλές συνδέσεις παραγωγών και καταναλωτών. Όλα αυτά τα συστήματα διαχείρισης υδρογόνου από απόσταση λειτουργούνε έως τώρα με ασφάλεια σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και ξηρή κατάσταση αερίου.

Έρευνες στην Ιαπωνία και τα πρώτα αποτελέσματα του ευρωπαϊκού πρότζεκτ NATURALHY έδειξαν ότι για την μεταφορά υδρογόνου σε μορφή αερίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το ήδη υπάρχον σύστημα σωληνώσεων υγραερίου της κάθε μία χώρας. Επειδή το υδρογόνο είναι ισχυρώς διαχεόμενο και διαπερνά ορισμένα μέταλλα, μπορούν σε μερικά μόνο τμήματα των σωληνώσεων να μεταφερθούν μείγματα από υγραέριο και υδρογόνο. Ειδικά οι πιο παλιές σωληνώσεις δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν των υψηλότερων απαιτήσεων. Επειδή οι σωληνώσεις αυτές στον επόμενο καιρό πρέπει να αντικατασταθούν, μπορούμε κατευθείαν με ένα λίγο μεγαλύτερο κόστος να τις εκσυγχρονίσουμε και να τις καταστήσουμε κατάλληλες και για μεταφορά υδρογόνου.



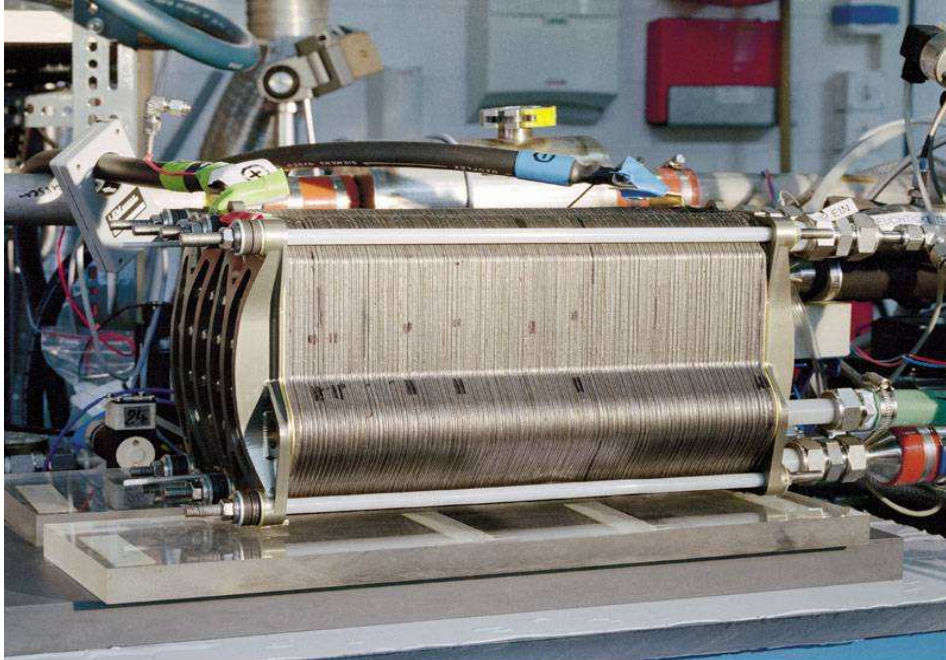
Εικόνα 11- Παράδειγμα γερμανικού δικτύου υγραερίου

Η μικρή πυκνότητα του υδρογόνου καθιστά αναγκαία μεγαλύτερη διάθεση όγκου, η οποία σε σύγκριση με το υγραέριο απαιτεί μεγαλύτερο έργο συμπύκνωσης. Οι απώλειες αθροίζονται περίπου στο 10% για ένα μήκος σωληνώσεως των 1000km. Στο διαστημικό κέντρο Kennedy χρησιμοποιούνται ήδη σωληνώσεις για LH2 παρότι είναι μόνο το πολύ μέχρι 100m μήκος. Σωληνώσεις για το LH2 είναι λόγω της πολύπλοκης μόνωσης κατάλληλες έως 50km.



Εικόνα 12- Δίκτυο σωληνώσεων υδρογόνου

5. Κυψέλες Καυσίμου και Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (Μ.Ε.Κ.)



Συστοιχίες κυψελών καυσίμου.

CO2 50001

Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πηγή ισχύος, τόσο σε μηχανές εσωτερικής καύσης, όσο και σε κυψέλες καυσίμου (fuel cells). Για να καταφέρουμε να μετατρέψουμε την κοινωνία μας σε μία κοινωνία που να τροφοδοτείται και ουσιαστικά να «ζει» από το υδρογόνο, θα πρέπει να εξασφαλίσουμε κατ' αρχάς ότι τα καλά χαρακτηριστικά της αυτόκίνησης του μέλλοντος μας θα συγκρίνονται άμεσα με αυτά που ξέρουμε σήμερα και θεωρούμε δεδομένα σαν καλά χαρακτηριστικά της αυτοκίνησης, δηλαδή επαρκή ισχύ και υψηλή απόδοση, «λογική» κατανάλωση καυσίμου, αξιοπιστία και ασφάλεια.

Ακόμα, είναι απόλυτα θεμιτό το ότι οι μέθοδοι βιομηχανικής παραγωγής είναι εκείνες που θα καθορίσουν τι είναι αυτό που θα μπορεί να παραχθεί εύκολα και οικονομικά σε μαζικό επίπεδο. Για να σχεδιάσουν το μέλλον λοιπόν της αυτοκίνησης, οι μηχανικοί που σήμερα πρέπει να σκεφτούν από τώρα σε βάθος το κόστος των υλικών και το κόστος ενσωμάτωσης νέων «μηχανών» αυτοκίνησης στις τεχνικές τις αλυσίδας παραγωγής αυτοκινήτων. Αυτή ακριβώς η αποτελεσματικότητα του κόστους είναι και ο κύριος παράγοντας που λαμβάνουν υπόψη τους οι εταιρίες, πριν αποφασίσουν τη στρατηγική τους για μελλοντικά σχέδια μαζικής παραγωγής κάποιου προϊόντος.

Κυψέλες, λοιπόν, ή μηχανές; Οι κυψέλες καυσίμου έχουν, στις μέρες μας, μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από τις μηχανές εσωτερικής καύσης, ακόμα και αν οι τελευταίες δουλεύουν με υδρογόνο. Αρκετές όμως είναι οι εταιρίες αυτοκινήτων που πιστεύουν ότι μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση των μηχανών εσωτερικής καύσης (κυρίως αυτών που καίνε υδρογόνο), σε επίπεδα που θα αγγίζουν ή ακόμα και θα ξεπερνούν αυτά της απόδοσης των κυψελών καυσίμου.

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την απόφαση της μαζικής παραγωγής κάποιου προϊόντος αυτοκίνησης είναι όχι μόνο το κόστος χρήσης του, αλλά και η επίτευξη της απαιτούμενης ισχύος και αυτονομίας από αυτό, για την ευχάριστη του καταναλωτή. Με αυτό το σκεπτικό, συγκρίνοντας τις κυψέλες υδρογόνου με τις μηχανές εσωτερικής καύσης, μπορούμε να πούμε ότι, αδιαμφισβήτητα, οι μηχανές εσωτερικής καύσης κερδίζουν με διαφορά αυτή τη στιγμή.

Έτσι, έχει επικρατήσει η άποψη ότι οι απαιτήσεις, τόσο των εταιριών αυτοκινήτου όσο και του καταναλωτή, θα εκπληρώνονται μαζικά για άλλα 20 με 30 χρόνια από μηχανές μηχανές εσωτερικής καύσης, πριν τελικά φτάσουμε να οδηγηθούμε σε μία κοινωνία όπου οι κυψέλες υδρογόνου θα έχουν το κόστος και την τεχνική ωριμότητα ώστε να καταβάλουν σοβαρό μερίδιο της αγοράς αυτοκινήτου.

Ταυτόχρονα, με τη χρήση μηχανών εσωτερικής καύσης υδρογόνου στα καθημερινά αυτοκίνητα, πιστεύεται ότι θα εξελιχθεί (σταδιακά, μέσα στα επόμενα 30 χρόνια) και η κατάλληλη υποδομή διαχείρισης του υδρογόνου σε παγκόσμιο επίπεδο, ώστε η μετάβαση σε μία κοινωνία τροφοδοτούμενη από κυψέλες υδρογόνου να γίνει εύκολα και γρήγορα, όταν πια η κατάλληλη στιγμή φτάσει. Η ιδέα λοιπόν σήμερα είναι ότι η χρήση μηχανών αυτοκινήτου με καύσιμο το υδρογόνο θα λειτουργήσει τελικά σαν μία ακόμα γέφυρα μεταξύ της παρούσας κατάστασης αυτοκίνησης, μέσω μηχανών εσωτερικής καύσης (βενζίνης και πετρελαίου), και της μελλοντικής αυτοκίνησης μέσω κυψελών υδρογόνου.

Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου (ή απλά κυψέλες καυσίμου – fuel cells) αποτελούν σήμερα τις σημαντικότερες διατάξεις παραγωγής ενέργειας μέσω υδρογόνου. Με τη χρήση αυτών, η αποθηκευμένη χημική ενέργεια του υδρογόνου μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρισμό και σε θερμότητα, μέσω της ηλεκτρόλυσης του υδρογόνου από το ατμοσφαιρικό οξυγόνο. Από τον ηλεκτρισμό και την θερμότητα που παράγεται από αυτές, μπορεί στη συνέχεια να προκύψει οποιαδήποτε άλλη μορφή ενέργειας που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος στις καθημερινές ενεργειακές του ανάγκες.

Κατά την παραγωγή ενέργειας (ηλεκτρισμού ή θερμότητας) από μία κυψέλη καυσίμου υδρογόνου, σημαντικότερο ρόλο στην απόδοσή της διαδραματίζει η διαδικασία της κατάλυσης. Η κατάλυση αυτή, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, αποτελεί μια διεργασία η οποία λαμβάνει χώρα κατεξοχήν στη διάσταση του

νανομέτρου. Για τον λόγο αυτό σήμερα, η έρευνα πάνω στους διάφορους τύπους κυψελών καυσίμου επικε-ντρώνεται κυρίως σ' αυτόν τον τομέα.

Όπως προείπαμε, οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου παράγουν ηλεκτρισμό και θερμότητα από την ηλεκτρόλυση του υδρογόνου με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο. Η βασική αυτή ηλεκτροχημική διαδικασία, λαμβάνει χώρα μέσα σε μία διάταξη ηλεκτρόλυσης του υδρογόνου που περιέχουν και η οποία καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του όγκου τους. Το κυριότερο προϊόν αυτής της διαδικασίας είναι προφανώς το νερό, ενώ παράγονται επίσης και ορισμένα οξείδια του αζώτου, αλλά σε πολύ μικρότερες ποσότητες σε σχέση μ' αυτό. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή μόνο ηλεκτρισμού, με τη μορφή συνεχούς ρεύματος, ή για τη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Παρόλο που οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν μια σχετικά νέα τεχνολογία, η πρώτη υποτυπώδης διάταξη παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας μέσω της ηλεκτρόλυσης του υδρογόνου τοποθετείται χρονικά αρκετά πιο παλιά. Συγκεκριμένα, το 1839 ο Άγγλος μηχανικός Sir William Grove κατάφερε να κατασκευάσει μια τέτοια διάταξη, η οποία χρησιμοποιούσε το υδρογόνο ως καύσιμο. Εξαιτίας όμως της έντονης τάσης που υπήρχε τότε να αξιοποιηθούν τα διάφορα ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή ενέργειας, το επίτευγμά του δεν μπόρεσε ποτέ να ορθοποδήσει. Έτσι, για έναν και πλέον αιώνα μετά, η δημιουργία διατάξεων παραγωγής ενέργειας μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού εγκαταλείφθηκε, μέχρι που την δεκαετία του 1950 το ενδιαφέρον γι' αυτές αναζωπυρώθηκε και πάλι. Αιτία γι' αυτό αποτέλεσαν τα διαστημικά προγράμματα Gemini και Apollo της NASA, με τα οποία μελετήθηκε η εφαρμογή των κυψελών καυσίμου για την κάλυψη των αυξημένων ενεργειακών αναγκών που παρουσίαζαν τα διαστημικά της σκάφη.

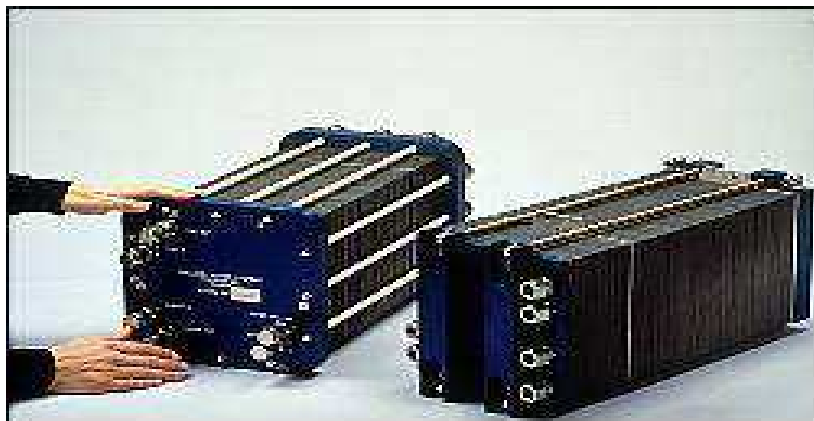
Έτσι, επιτεύχθηκε η κατασκευή της πρώτης πρακτικά αξιοποιήσιμης κυψέλης καυσίμου (η οποία ήταν τύπου AFC, όπως θα δούμε και στη συνέχεια) με τη βοήθεια της οποίας το διαστημικό όχημα Apollo 11 προσεδάφιστηκε το 1969 στη Σελήνη. Έκτοτε, οι κυψέλες καυσίμου έχουν εξελιχθεί αρκετά και γίνονται όλο και περισσότερο χρήσιμες στις καθημερινές ενεργειακές ανάγκες του ανθρώπου.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν σήμερα οι διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου, που έχουν κατασκευαστεί, αποτελεί το γεγονός, ότι σαν διατάξεις παραγωγής ενέργειας χαρακτηρίζονται από μια ιδιαίτερη πολυμορφία ως προς το είδος των καυσίμων που μπορούν να χρησιμοποιήσουν. Εκτός δηλαδή από το «καθαρό» υδρογόνο, οι περισσότεροι τύποι των κυψελών καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιήσουν πολυάριθμα άλλα υδρογονούχα καύσιμα, χωρίς να μειώνουν σημαντικά την απόδοσή τους σε ισχύ. Παραδείγματα άλλων υδρογονούχων καυσίμων, πλην του «καθαρού» υδρογόνου, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις κυψέλες καυσίμου είναι η μεθανόλη

(CH₃OH), η αιθανόλη (C₂H₆OH), το φυσικό αέριο, ακόμη και τα διάφορα υγρά ορυκτά καύσιμα που περιέχουν υδρογόνο, όπως το πετρέλαιο και η βενζίνη. Απαραίτητη πάντως προϋπόθεση για την χρησιμοποίηση των συγκεκριμένων καυσίμων σ' αυτές, είναι να υπάρχει μια διάταξη μετατροπής τους σε υδρογόνο, έτσι ώστε να μπορούν να διοχετευτούν στο εσωτερικό της κάθε κυψέλης καυσίμου. Η διάταξη αυτή, είναι γνωστή ως αναμορφωτής των υδρογονούχων καυσίμων.

Θα πρέπει επίσης να τονίσουμε, ότι οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου αποτελούν πολύ πλεονεκτικές διατάξεις παραγωγής ενέργειας όχι μόνο γι' αυτή την πολυπλοκότητα των διαφορετικών καυσίμων που μπορούν να χρησιμοποιήσουν, αλλά και για δύο άλλα σημαντικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν την λειτουργία τους: το πρώτο είναι η δυνατότητά τους να παράγουν μεγάλα ποσά ενέργειας από το καύσιμο που χρησιμοποιούν (το υδρογόνο) και το άλλο, ότι από περιβαλλοντική σκοπιά, η μαζική τους χρησιμοποίηση συμφέρει έναντι αυτής των συμβατικών διατάξεων παραγωγής ενέργειας (ΜΕΚ ορυκτών καυσίμων) μιας και το κύριο προϊόν από την ηλεκτρόλυση του υδρογόνου που επιτελείται στο εσωτερικό τους είναι, όπως αναφέραμε, το νερό.

Τέλος, στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται δυο χαρακτηριστικές διατάξεις (ή συστοιχίες) κυψελών καυσίμου τύπου PEMFC, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας διαφόρων καθημερινών αναγκών:



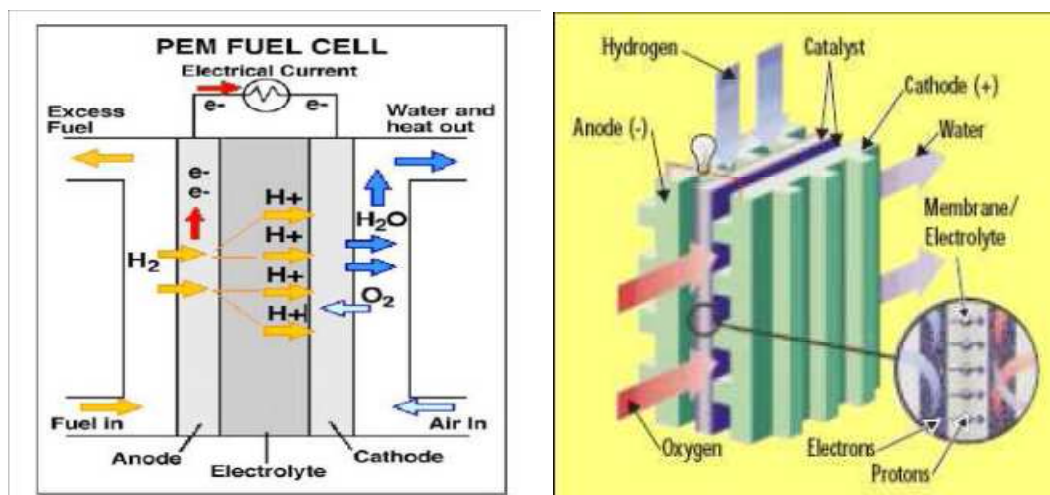
Συστοιχίες κυψελών καυσίμου PEMFC.

Αρχή Λειτουργίας των Κυψελών Καυσίμου

Σήμερα, υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί τύποι κυψελών καυσίμου οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά, προκειμένου να παραχθεί ενέργεια από το υδρογόνο. Το βασικότερο χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί αυτούς τους τύπους των κυψελών καυσίμου, αποτελεί το είδος του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιεί ο καθένας τους, προκειμένου να διευκολύνει την ένωση του

καυσίμου του υδρογόνου με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα και να παράγει έτσι τον ηλεκτρισμό ή τη θερμότητα. Ο πιο συχνά, σε πρακτικές εφαρμογές, χρησιμοποιούμενος τύπος κυψελών καυσίμου που εφαρμόζεται σήμερα, αποτελεί ο τύπος στον οποίο αναφερθήκαμε και στην προηγούμενη παράγραφο, δηλαδή η κυψέλη καυσίμου τύπου PEMFC (κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων ή proton exchange membrane fuel cell).

Στον συγκεκριμένο τύπο κυψέλης καυσίμου, η πολυμερής μεμβράνη της ανταλλαγής πρωτονίων, κατέχει τον ρόλο του ηλεκτρολύτη. Με βάση την λειτουργία του συγκεκριμένου τύπου κυψέλης καυσίμου, θα προσπαθήσουμε στη συνέχεια να δώσουμε μια συνοπτική εικόνα του γενικού τρόπου λειτουργίας μιας οποιασδήποτε κυψέλης καυσίμου, μιας και οι βασικές διαδικασίες παραγωγής ενέργειας για όλους τους διαφορετικούς τύπους κυψελών καυσίμου είναι οι ίδιες. Η λειτουργία του συγκεκριμένου τύπου κυψέλης καυσίμου PEMFC στον οποίο αναφερόμαστε, μπορεί σχηματικά να παρασταθεί ως εξής:



Απεικόνιση λειτουργίας κυψέλης καυσίμου PEMFC.

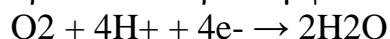
Όπως παρατηρούμε από την αριστερή εικόνα του παραπάνω σχήματος, το κυριότερο μέρος μιας κυψέλης καυσίμου PEMFC αποτελείται από την ηλεκτρολυτική διάταξη που αυτή περιέχει στο εσωτερικό της. Στην ηλεκτρολυτική αυτή διάταξη, τα δύο ηλεκτρόδιά της διαχωρίζονται μεταξύ τους από την μεμβράνη της κυψέλης καυσίμου PEMFC η οποία, όπως είπαμε, είναι κατασκευασμένη από πολυμερές υλικό. Η μεμβράνη αυτή αποτελεί τον ηλεκτρολύτη της κυψέλης.

Μεταξύ της πολυμερούς μεμβράνης της κυψέλης PEMFC και των ηλεκτροδίων της ηλεκτρολυτικής της διάταξης, υπάρχει ένα λεπτό στρώμα από μεταλλικό υλικό, το οποίο λειτουργεί σαν καταλύτης της. Ο καταλύτης και ο ηλεκτρολύτης (πολυμερής μεμβράνη) της κυψέλης καυσίμου PEMFC, αποτελούν

τα βασικότερα τμήματα της δομής, όχι μόνο της ίδιας, αλλά και γενικότερα όλων των γνωστών τύπων κυψελών καυσίμου που υπάρχουν σήμερα. Η κυψέλη καυσίμου PEMFC που εξετάζουμε επί του παρόντος, χρησιμοποιείται σήμερα κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη μορφή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο παράγεται από την οξείδωση του καυσίμου υδρογόνου της με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα. Αυτό επιτυγχάνεται με την αντίδραση των δύο αυτών υλικών, μέσα στην ηλεκτρολυτική διάταξη που, όπως αναφέραμε, περιέχει στο εσωτερικό της.

Η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος από μία κυψέλη PEMFC έχει ως εξής: Αρχικά, το υδρογόνο που εισέρχεται στην ηλεκτρολυτική της διάταξη, τροφοδοτεί την άνοδό της (το αρνητικό της ηλεκτρόδιο) και αφού έρθει εκεί σε επαφή με τον καταλύτη της, διαχωρίζεται στη συνέχεια σε πρωτόνια (θετικά ιόντα υδρογόνου (H⁺)) και σε αρνητικά σωματίδια (ηλεκτρόνια (e⁻)). Η άνοδος της ηλεκτρολυτικής διάταξης και ο μεταλλικός καταλύτης της κυψέλης PEMFC είναι κατασκευασμένοι έτσι, ώστε το υδρογόνο να διαχέεται στο εσωτερικό τους με ομοιογενή τρόπο. Η ομοιογενής αυτή διάχυση, συντελεί στην ομαλότερη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου PEMFC και επομένως και στην αποδοτικότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ηλεκτρόνια τα οποία, όπως αναφέραμε προηγουμένως, απελευθερώνονται από το υδρογόνο στην άνοδο της κυψέλης PEMFC, μεταφέρονται στη συνέχεια μέσω ενός εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος προς την κάθοδο αυτής (δηλαδή προς το θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιό της). Από την κίνηση αυτή των ηλεκτρονίων, δημιουργείται το συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα της κυψέλης PEMFC. Θα πρέπει να τονίσουμε, ότι η πολυμερής μεμβράνη που υπάρχει μεταξύ της ανόδου και της καθόδου κάθε κυψέλης PEMFC, διευκολύνει αυτή τη κίνηση των ηλεκτρονίων μέσα στο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα, με το να τα εμποδίζει να εισέλθουν στο εσωτερικό της μάζας της, επιτρέποντας παράλληλα μόνο στα θετικά ιόντα του υδρογόνου (H⁺) να εισέλθουν μέσα σ' αυτό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από τις κυψέλες PEMFC να είναι, όπως είπαμε, συνεχές και να έχει ικανοποιητική ισχύ. Επίσης, τόσο η άνοδος όσο και ο καταλύτης των κυψελών PEMFC, κατασκευάζονται πάντα από αγωγίμο υλικό, προκειμένου να διευκολύνουν την κίνηση των θετικών ιόντων υδρογόνου στην περιοχή τους.

Μετά τον διαχωρισμό του υδρογόνου, στην άνοδο των κυψελών PEMFC, σε πρωτόνια και σε ηλεκτρόνια, τα πρωτόνια του υδρογόνου διαπερνούν την εξωτερική επιφάνεια των πολυμερών μεμβρανών τους και εισέρχονται στο εσωτερικό της μάζας τους. Εξερχόμενα από αυτές, στη συνέχεια φτάνουν στην κάθοδο των PEMFC, όπου ενώνονται με το μοριακό οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα που έχει διοχετευτεί στο εσωτερικό των κυψελών. Από την ένωσή τους αυτή, προκύπτει νερό σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



Στον χώρο της καθόδου των κυψελών PEMFC, υπάρχει ένα δεύτερο στρώμα από μεταλλικό καταλύτη, όμοιο με το πρώτο μεταλλικό στρώμα της ανόδου τους, το οποίο συντελεί στον σχηματισμό του παραπάνω νερού. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από την παραπάνω αντίδραση σχηματισμού του νερού στην κάθοδο των κυψελών PEMFC, κατά την αντίδραση των πρωτονίων του υδρογόνου με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα, συμμετέχουν σ' αυτή και ορισμένα ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά δεν είναι άλλα, από τα ηλεκτρόνια που έχουν προκύψει στην άνοδο της κυψέλης, κατά τη διάσπαση του μοριακού της υδρογόνου σε πρωτόνια υδρογόνου (H⁺) και σε ηλεκτρόνια: $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$. Τα ηλεκτρόνια αυτά, έχουν διοχετευτεί μέσω του εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος της PEMFC, στην κάθοδο αυτής. Όπως αναφέραμε παραπάνω, ο μεταλλικός καταλύτης των κυψελών PEMFC επιταχύνει στην κάθοδο την ένωση των πρωτονίων υδρογόνου με το μοριακό οξυγόνο.

Εκτός από αυτό, ο μεταλλικός καταλύτης των κυψελών PEMFC επιταχύνει επίσης την διάσπαση του μοριακού υδρογόνου σε πρωτόνια υδρογόνου στην άνοδο αυτών. Το κάθε ένα από τα δύο παράλληλα στρώματα του μεταλλικού καταλύτη των κυψελών PEMFC, αποτελείται συνήθως από μία πολύ λεπτή επιφάνεια από λευκόχρυσο (Pt), η οποία βρίσκεται πάνω σε μία παχύτερη επιφάνεια από άνθρακα (C). Η λεπτή επιφάνεια του Pt είναι το μέρος εκείνο του μεταλλικού καταλύτη το οποίο σε επαφή με την μεμβράνη των κυψελών PEMFC. Ο μεταλλικός καταλύτης των κυψελών PEMFC χαρακτηρίζεται από τραχύτητα της εξωτερικής του επιφάνειας και από πορώδη διαμόρφωση της μάζας του, έτσι ώστε να μπορεί να μεγιστοποιεί την εκτεθειμένη επιφάνειά του στα υλικά με τα οποία έρχεται σε επαφή (πρωτόνια υδρογόνου, ηλεκτρόνια και μοριακό οξυγόνο). Η παραπάνω διαδικασία που μόλις περιγράψαμε, συνοψίζει σε γενικές γραμμές τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος από μια κυψέλη καυσίμου PEMFC.

Η τάση που παράγεται συνήθως στη πράξη, κατά τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης του υδρογόνου με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα, μέσα σε μία κυψέλη καυσίμου PEMFC, είναι της τάξης των 0,7 Volt. Επειδή όμως η παραγόμενη αυτή τάση είναι πολύ μικρή για τις περισσότερες εφαρμογές των κυψελών PEMFC, συνήθως χρησιμοποιούνται περισσότερες από μία κυψέλες καυσίμου PEMFC, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η συνολική τάση που παράγεται από αυτές κατά την ηλεκτρόλυση του υδρογόνου, να επαρκεί για τις πρακτικές εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται. Η συνδεσμολογία, περισσότερων από μία, κυψελών καυσίμου PEMFC σε σειρά για την παραγωγή επαρκούς και αξιοποιήσιμης ηλεκτρικής τάσης, αναφέρεται σαν συστοιχία κυψελών καυσίμου ή fuel cell stack. Ο ίδιος τρόπος συνδεσμολογίας χρησιμοποιείται στη πράξη και για τους υπόλοιπους τύπους κυψελών καυσίμου που θα δούμε στη συνέχεια, προκειμένου να παραχθεί η αναγκαία ηλεκτρική τάση για τις πρακτικές τους εφαρμογές. Στο παρακάτω

σχήμα απεικονίζεται μια συστοιχία κυψελών καυσίμου PEMFC συνδεδεμένων σε σειρά, η οποία χρησιμοποιείται για να κινήσει ένα αυτοκίνητο υδρογόνου:



Μηχανή αυτοκίνητου τροφοδοτούμενη από συστοιχία κυψελών καυσίμου PEMFC σε σειρά.

Βασικοί Τύποι Κυψελών Καυσίμου

Όπως έχουμε αναφέρει, οι κυψέλες καυσίμου PEMFC δεν αποτελούν το μοναδικό είδος κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιούνται σήμερα. Αντίθετα, πολυάριθμοι τύποι κυψελών καυσίμου έχουν κατασκευαστεί μέχρι σήμερα, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για πολλές και διαφορετικές εφαρμογές. Η βασική λειτουργία βέβαια όλων αυτών των διαφορετικών τύπων κυψελών καυσίμου, σχεδόν στο σύνολό της, είναι παρόμοια με αυτή των κυψελών καυσίμου PEMFC, αλλά τα διάφορα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους, καθώς επίσης και τα εσωτερικά μέρη που τις αποτελούν, παρουσιάζουν σημαντική διαφοροποίηση από αυτά των κυψελών PEMFC. Υπάρχουν πολλοί τρόποι κατηγοριοποίησης των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιούνται σήμερα για την παραγωγή ενέργειας μέσω υδρογόνου.

Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τρόπος γι' αυτό, αποτελεί η κατηγοριοποίησή τους βάσει του ηλεκτρολύτη που αυτοί περιέχουν στο εσωτερικό τους, προκειμένου να διοχετεύσουν το υδρογόνο τους (με τη μορφή των πρωτονίων του) προς την κάθοδό τους. Από τον συγκεκριμένο τρόπο κατηγοριοποίησής τους προκύπτουν οι εξής παρακάτω βασικοί τύποι τους (όπου μετά τον κάθε τύπο κυψέλης καυσίμου σημειώνεται και ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται):

- Κυψέλη καυσίμου PEMFC – Μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων
- Κυψέλη καυσίμου AFC – Αλκάλια
- Κυψέλη καυσίμου PAFC – Φωσφορικό οξύ
- Κυψέλη καυσίμου MCFC – Τηγμένα ανθρακικά άλατα

- Κυψέλη καυσίμου SOFC – Σταθεροποιημένα οξείδια

6. Κατάξη και χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων Κυψελών Καυσίμων FC

1) Κυψέλη Καυσίμου με Μembrάνη Ανταλλαγής Πρωτονίων (Η Κυψέλη Καυσίμου PEMFC)

Οι κυψέλες καυσίμου PEMFC, αποτελούν σήμερα τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες κυψέλες καυσίμου στη πράξη, όπως έχουμε αναφέρει. Η λειτουργία τους συμβαίνει σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (50 . 100.C) και η ισχύς που παράγουν είναι αρκετή για την εφαρμογή τους στις περισσότερες από τις καθημερινές ενεργειακές ανάγκες του ανθρώπου (π.χ κίνηση μεταφορικών οχημάτων, τροφοδότηση ηλεκτρικών συσκευών κ.τ.λ.). Σ' αυτό βοηθάει και η ικανότητα που παρουσιάζουν να προσαρμόζονται γρήγορα σε συχνές αυξομειώσεις της παραγόμενης ισχύος τους. Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από μία κυψέλη καυσίμου PEMFC, κυμαίνεται στην περιοχή των 50 με 250 kW. Η εκτεταμένη έρευνα που πραγματοποιείται σήμερα πάνω στην τροφοδότηση, από κυψέλες καυσίμου, των διαφόρων μεταφορικών οχημάτων και γενικότερα των ηλεκτρομηχανολογικών διατάξεων μέσης ισχύος, είναι επικεντρωμένη κυρίως σ' αυτόν τον τύπο των κυψελών καυσίμου. Το μοναδικό ίσως αδύναμο σημείο που παρουσιάζουν οι κυψέλες καυσίμου PEMFC, είναι η αρνητική τους συμπεριφορά στην λειτουργία τους με μη «καθαρό» υδρογόνο, δηλαδή με υδρογονούχα καύσιμα τα οποία δεν περιέχουν το υδρογόνο στη μάζα τους σε μεγάλες περιεκτικότητες.

2) Κυψέλη καυσίμου αλκαλίων (ή κυψέλη καυσίμου AFC)

Οι κυψέλες καυσίμου αλκαλίων (ή κυψέλες καυσίμου AFC), αποτελούν τις πρώτες κυψέλες καυσίμου υδρογόνου που εφαρμόστηκαν ποτέ στην πράξη για την παραγωγή ενέργειας. Η πρώτη εφαρμογή τους, έγινε στο διαστημικό πρόγραμμα των οχημάτων Gemini και Apollo τα οποία αναπτύχθηκαν από τη NASA για την προσεδάφιση στη Σελήνη τη δεκαετία του 60'. Οι κυψέλες καυσίμου AFC, έχουν πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης ηλεκτρικής ισχύος, ο οποίος μπορεί να φτάσει μέχρι το 70%. Ο υψηλός αυτός βαθμός της απόδοσής τους, οφείλεται κυρίως στον εξίσου υψηλό ρυθμό με τον οποίο πραγματοποιούνται οι διάφορες κατάλυτικές χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό τους.

Το κύριο μειονέκτημά που παρουσιάζουν οι κυψέλες καυσίμου AFC, είναι ότι είναι ιδιαίτερα ευπρόσβλητες, κατά την λειτουργία τους, από την παρουσία του CO₂ στο εσωτερικό τους, ακόμη και όταν αυτό υφίσταται σε πολύ μικρές

ποσότητες. Κατά την παρουσία του CO₂, η απόδοση των κυψελών καυσίμου πέφτει σημαντικά και η λειτουργία τους παρεμποδίζεται («δηλητηριάζεται»), με αποτέλεσμα να ελαττώνεται σημαντικά ο συνολικός χρόνος ζωής τους. Γι' αυτό και το μίγμα υδρογόνου – ατμοσφαιρικού οξυγόνου το οποίο καταναλώνουν, καθαρίζεται επιμελώς από οποιεσδήποτε ποσότητες CO₂, πριν αυτό διοχετευτεί στο εσωτερικό τους. Εξαιτίας της μεγάλης ευπροσβλητότητάς τους στο CO₂, οι κυψέλες καυσίμου AFC εμφανίζουν ως εκ τούτου αρκετά μεγάλο κόστος λειτουργίας και γι' αυτό δεν χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα. Η χρησιμοποίησή τους όμως σε διαστημικές εφαρμογές, στις οποίες το κόστος είναι δευτερεύον ζήτημα ενώ το πρωτεύον είναι η απόδοση, η χρησιμοποίησή των κυψελών καυσίμου AFC είναι ευρύτατη.

3) Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (ή κυψέλη καυσίμου PAFC)

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (phosphoric - acid fuel cells ή PAFC) αποτελούν σήμερα τις δεύτερες πιο διαδεδομένες κυψέλες καυσίμου στη πράξη, μετά τις κυψέλες καυσίμου PEMFC. Ο βαθμός απόδοσης ηλεκτρικής ισχύος των κυψελών καυσίμου PAFC, κυμαίνεται στην περιοχή των 40- 60%, ενώ η θερμοκρασία λειτουργίας τους κυμαίνεται μεταξύ των 150 .C και 200 .C. Για θερμοκρασία λειτουργίας μικρότερη των 150 .C και για κατανάλωση μη «καθαρού» υδρογόνου, ο ηλεκτρολύτης των κυψελών καυσίμου PAFC (φωσφορικό οξύ), γίνεται κακός ιοντικός αγωγός των πρωτονίων του υδρογόνου και το CO που σχηματίζεται πάνω στον καταλύτη τους από την διάσπαση των υδρογονούχων καυσίμων τους, δηλητηριάζει την άνοδό τους, μειώνοντας παράλληλα και τον βαθμό της απόδοσής τους. Για θερμοκρασία όμως λειτουργίας τους που βρίσκεται μεταξύ των 150 .C και 200 .C και για κατανάλωση υδρογονούχων καυσίμων, τα επίπεδα ανοχής τους σε συγκεντρώσεις CO είναι αρκετά υψηλές, με αποτέλεσμα να λειτουργούν φυσιολογικά. Η μόνη εξαίρεση σ' αυτό, αποτελεί η λειτουργία τους με υδρογονούχα καύσιμα που περιέχουν και ορισμένες ποσότητες από σουλφίδια στη μάζα τους (όπως είναι για παράδειγμα η λειτουργία τους με συμβατική βενζίνη). Στην περίπτωση αυτή, τα σουλφίδια των συγκεκριμένων υδρογονούχων καυσίμων θα πρέπει πρώτα να απομακρυνθούν πρώτου αυτά διοχετευτούν στο εσωτερικό τους. Τα σημαντικότερα αδύ-ναμα σημεία των κυψελών καυσίμου PAFC, είναι το σχετικά μεγάλο μέγεθος του όγκου τους και το επίσης αυξημένο βάρος της μάζας τους.

Επίσης, η τάση του ρεύματος που παράγουν είναι σχετικά χαμηλή. Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό των κυψελών καυσίμου PAFC κατά την παραγωγή ενέργειας από το υδρογόνο, είναι πανομοιότυπες με αυτές που συμβαίνουν στο εσωτερικό των κυψελών καυσίμου PEMFC.

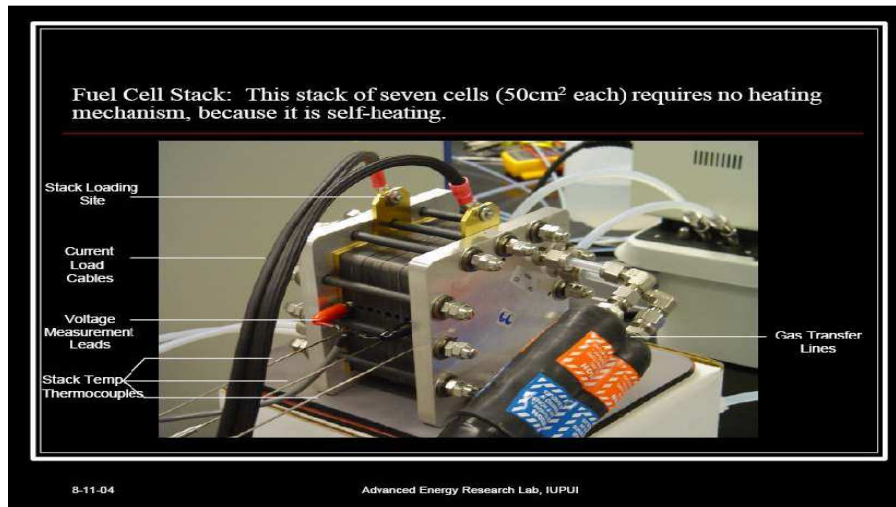
4) Κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (ή κυψέλη καυσίμου MCFC)

Οι κυψέλες καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (molten carbonate fuel cells, ή MCFC), χρησιμοποιούν τις ενώσεις των ανθρακικών ριζών, με στοιχεία όπως είναι το Li, το Na και το K σαν ηλεκτρολύτη τους. Οι ανθρακικές αυτές ενώσεις, βρίσκονται στο εσωτερικό τους σε υγρή μορφή και ενεργούν εμποτισμένες μέσα σε κατάλληλο υπόστρωμα.

Παρότι έχουν αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης ηλεκτρικής ισχύος (μεγαλύτερος του 60%), οι υψηλές θερμοκρασίες στις οποίες λειτουργούν κανονικά οι κυψέλες καυσίμου MCFC (620.C με 660.C) δεν προσφέρονται για την εφαρμογή τους σε καθημερινές ενεργειακές ανάγκες. Εκτός αυτού, οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας τους επιδρούν αρνητικά και στα υλικά με τα οποία είναι κατασκευασμένες, με αποτέλεσμα να μειώνουν σημαντικά τον συνολικό χρόνο ζωής τους. Η λειτουργία τους σε θερμοκρασίες άνω των 600.C, οφείλεται στην αδυναμία που έχει ο ηλεκτρολύτης τους (τηγμένο ανθρακικό άλας) να καθίσταται ιοντικά αγωγίμος σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Από την άλλη μεριά, η λειτουργία των κυψελών καυσίμου MCFC σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες, παρουσιάζει κι ένα θετικό για την λειτουργία τους σημείο, το οποίο απορρέει από την σημαντική επιτάχυνση των αντιδράσεων που συμβαίνουν στο εσωτερικό τους. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγεται και η χρήση ενός ιδιαίτερα δαπανηρού υλικού σαν καταλύτη τους, οπότε μειώνεται και το συνολικό κόστος λειτουργίας τους. Σαν καύσιμα, στις κυψέλες καυσίμου MCFC, μπορούν εκτός από το «καθαρό» υδρογόνο να χρησιμοποιηθούν και άλλα υλικά, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγεται και το CO, το οποίο ως γνωστόν δρα καταστρεπτικά για τους περισσότερους από τους υπόλοιπους τύπους των κυψελών καυσίμου. Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από τις κυψέλες καυσίμου MCFC, βρίσκεται μεταξύ των 10 kW και 2 MW, ανάλογα και με την διάταξη στην οποία βρίσκουν εφαρμογή.

5) Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (ή κυψέλη καυσίμου SOFC)

Όπως και οι κυψέλες καυσίμου MCFC, έτσι και οι κυψέλες καυσίμου SOFC (κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου ή solid oxide fuel cells), παρουσιάζουν ιδιαίτερα αυξημένη απόδοση ηλεκτρικής ισχύος, η οποία υπερβαίνει το 60%. Η παραγόμενη ισχύς που παράγουν οι κυψέλες καυσίμου SOFC, ανέρχεται στα 100kW περίπου. Οι κυψέλες καυσίμου SOFC, χρησιμοποιούν στερεά υλικά σαν ηλεκτρολύτες τους (σκληρά κεραμικά), τα οποία είναι κατασκευασμένα από κράμα οξειδίων του ζirkονίου και του νατρίου. Οι στερεοί αυτοί ηλεκτρολύτες τους, τους δίνουν τη δυνατότητα να λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (μέχρι και 1000.C).



Στήλη κυψέλων καυσίμου PEMFC σε σειρά.

Οι κυψέλες καυσίμου SOFC αποτελούν τον τελευταίο από τους πέντε σημαντικότερους τύπους κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιούνται σήμερα. Εκτός όμως από αυτούς, υπάρχουν και αρκετοί άλλοι διαφορετικού τύπου κυψελών καυσίμου οι οποίοι έχουν κατασκευαστεί και οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας μέσω υδρογόνου. Οι περισσότεροι όμως από αυτούς, παρουσιάζουν προς το παρόν σχετικά χαμηλές επιδόσεις στην λειτουργία τους ή και αρκετά μεγάλο κόστος στην κατασκευή τους, με αποτέλεσμα να είναι δευτερεύουσας σημασίας και να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πρακτικές εφαρμογές, τουλάχιστον μέχρι την παρούσα φάση της εξέλιξής τους. Ωστόσο, κάποιοι από αυτούς, παρόλο ότι βρίσκονται ακόμη σε πειραματικό στάδιο εξέλιξης, παρουσιάζουν ορισμένα αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά, τα οποία τους καθιστούν αρκετά ελπιδοφόρους ως προς την πρακτική χρήση τους στο μέλλον. Θα αναφέρουμε εν συντομία τρεις από αυτούς τους τύπους των κυψελών καυσίμου, οι οποίοι παρουσιάζουν και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Οι τύποι αυτοί είναι οι εξής:

1. Οι κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC).
2. Οι κυψέλες καυσίμου άμεσης αιθανόλης (DEFC).
3. Οι κυψέλες αναπαραγόμενου καυσίμου (RFC).

Οι δύο πρώτες, δηλαδή οι κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC) και οι κυψέλες καυσίμου άμεσης αιθανόλης (DEFC), παρουσιάζουν το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό, ότι μπορούν και λειτουργούν με υγρά καύσιμα (μεθανόλη και αιθανόλη αντίστοιχα), χωρίς να απαιτούν την παρουσία ενός «αναμορφωτή» καυσίμου, ο οποίος θα μετατρέπει το υγρό τους καύσιμο σε αέριο υδρογόνο. Το συγκεκριμένο τους χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, γιατί στην ουσία λύνει το μεγάλο πρόβλημα της αποθήκευσης του υδρογόνου που αντιμετωπίζουν σήμερα τα ενεργειακά συστήματα που τροφοδοτούνται από κυψέλες καυσίμου. Ο τρίτος σημαντικός τύπος κυψελών καυσίμου από τους παραπάνω τύπους που

αναφέραμε (οι κυψέλες καυσίμου RFC), έχουν κι αυτές ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό λειτουργίας, το οποίο συνίσταται στο γεγονός, ότι παρουσιάζουν τη δυνατότητα να αναπαράγουν σε σημαντικό βαθμό το υδρογόνο που καταναλώνουν, υδρολύοντας προς αυτού το νερό που παράγεται κατά την ηλεκτρόλυσή του. Αυτό βέβαια συμβαίνει με την προϋπόθεση, ότι κατά το χρονικό διάστημα στο οποίο αναπαράγουν το καύσιμό τους, το ενεργειακό σύστημα στο οποίο λειτουργούν δεν απαιτεί από αυτές μεγάλη ισχύ (λειτουργεί στο «ρελαντί»). Όπως καταλαβαίνουμε, οι συγκεκριμένες κυψέλες καυσίμου παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την χρησιμοποίησή τους σε μεταφορικά οχήματα, μιας και αυτά χαρακτηρίζονται από συχνές αυξομειώσεις της καταναλισκόμενης ισχύος τους (κατά την στάση τους και την κίνησή τους με πέδηση).

Τύπος κυψέλης καυσίμου	Πυκνότητα Ρεύματος (A/cm ²)	Ηλεκτρολύτης	Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	Απόδοση Ηλεκτρικής Ισχύος (%)	Ισχύς	Κυριότερες Εφαρμογές
Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)	0.12	Στερεά πολυμερής ιοντική μεμβράνη	50 – 100	40 – 50	50 – 250 kW	Μεταφορές, Ηλεκτροπαραγωγή, φορητές ηλεκτρονικές συσκευές
Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC)	0.2	Υδροξείδιο του καλίου	50 – 200	70	10 – 100 kW	Διάστημα
Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)	0.216	Φωσφορικό οξύ	180 – 200	40 – 60	Ως 10 MW (μελλοντικά)	Ηλεκτροπαραγωγή και συμπαραγωγή σε κτιριακές εγκαταστάσεις
Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC)	0.16	Τήγμα ανθρακικών αλάτων καλίου και λιθίου	620 – 660	>60	Ως 100 MW (μελλοντικά)	Κεντρικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, συμπαραγωγής
Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC)	0.2	Κεραμικό διοξείδιο του ζιρκονίου	800 – 1000	>60	Ως 100 MW (μελλοντικά)	Κεντρικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, συμπαραγωγής

Διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου μαζί με τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της λειτουργίας τους.

7. Πρακτική Προσέγγιση Απόδοσης των Κυψελών Καυσίμων

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε την απόδοση ισχύος που παρουσιάζουν οι διάφορες κυψέλες καυσίμου στην πράξη, κατά την εφαρμογή τους σε διάφορες

μηχανικές διατάξεις παραγωγής ενέργειας. Η απόδοσή τους αυτή θα συγκριθεί με την πραγματική απόδοση ισχύος που παρουσιάζουν οι διάφορες θερμικές μηχανές παραγωγής ενέργειας ορυκτών καυσίμων στη πράξη, όταν λειτουργούν στις ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος μ' αυτές.

Ας θεωρήσουμε έτσι ένα πραγματικό μεταφορικό όχημα υδρογόνου το οποίο τροφοδοτείται από κυψέλες καυσίμου υδρογόνου που ανήκουν σε κάποιο συνηθισμένο τύπο τους (π.χ. κυψέλες καυσίμου PEMFC). Όταν το όχημα αυτό καταναλώσει «καθαρό» υδρογόνο αποδεικνύεται, ότι ο βαθμός απόδοσης της ηλεκτρικής ισχύος των κυψελών καυσίμου του θα ανέλθει σε υψηλά ποσοστά, τα οποία κυμαίνονται μέχρι το 80% περίπου. Ο υψηλός όμως αυτός βαθμός απόδοσης της ισχύος στη συνέχεια θα μειωθεί αρκετά, κατά τη μετατροπή παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική, μέσα στα διάφορα εσωτερικά μέρη του οχήματος που εξετάζουμε. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται κυρίως στις υψηλές τριβές που αναπτύσσουν τα μέρη αυτά μεταξύ τους κατά τη λειτουργία τους και την μετατροπή της ισχύος. Εκτός όμως από αυτό, σε ένα πραγματικό όχημα κυψελών καυσίμου υδρογόνου, ο αρχικά υψηλός βαθμός απόδοσης της ηλεκτρικής ισχύος του μειώνεται περαιτέρω και λόγω της απαγωγής θερμότητας που παρατηρείται από το εσωτερικό του, εξαιτίας της μικρής θερμοκρασιακής διαφοράς που παρουσιάζει συνήθως με το εξωτερικό του περιβάλλον.

Η μείωση βέβαια αυτή είναι πολύ μικρότερη από αυτή εξαιτίας των τριβών, μιας και η θερμοκρασιακή διαφορά είναι, όπως είπαμε, σχετικά μικρή. Θα πρέπει επίσης να πούμε, ότι τα περισσότερα οχήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου που έχουν κατασκευαστεί μέχρι σήμερα και χρησιμοποιούνται, δεν έχουν την δυνατότητα να καταναλώνουν απευθείας «καθαρό» υδρογόνο (λόγω της αδυναμίας αποθήκευσής του με κάποια μέθοδο αποθήκευσης εκτός της αέριας και της υγρής), αλλά αντίθετα λειτουργούν με ορισμένα υδρογονούχα καύσιμα τα οποία απαιτούν έναν αναμορφωτή καυσίμου (reformer) για να μετατραπούν σε «καθαρό» υδρογόνο και να καταναλωθούν στη συνέχεια στις κυψέλες καυσίμου. Για τον λόγο αυτό, ο υψηλός βαθμός απόδοσης της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από τις κυψέλες καυσίμου τους αναμένεται ότι θα μειωθεί κι άλλο, εξαιτίας της ηλεκτρικής ενέργειας που δαπανάται στον αναμορφωτή τους προκειμένου να μετατρέψει τα υδρογονούχα τους καύσιμα σε «καθαρό» υδρογόνο. Όπως αποδεικνύεται στη πράξη, ο τελικός συνολικός βαθμός απόδοσης ισχύος ενός οποιουδήποτε μεταφορικού οχήματος κυψελών καυσίμου υδρογόνου με κυψέλες καυσίμου, δεν μπορεί να υπερβεί το 25% με 35% περίπου. Αυτό σημαίνει, ότι ο αρχικά πολύ υψηλός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης των κυψελών καυσίμου ενός μεταφορικού οχήματος υδρογόνου μειώνεται κατά 45% με 55% περίπου κατά την μετατροπή της ισχύος σε ωφέλιμη ενέργεια του οχήματος, γεγονός το οποίο οφείλεται κυρίως στις αυξημένες απώλειες ενέργειας που

παρατηρούνται μέσα στο όχημα αυτό, όταν αυτή μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική στα εσωτερικά μηχανικά του μέρη.

Ας θεωρήσουμε τώρα ένα άλλο ρεαλιστικό μεταφορικό όχημα, όμοιας κατασκευής με το μεταφορικό όχημα του υδρογόνου που εξετάσαμε, το οποίο όμως τροφοδοτείται από μία MEK ενός ορυκτού καυσίμου (π.χ. συμβατικής βενζίνης), δηλαδή από έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης αυτού. Το μεταφορικό αυτό όχημα λειτουργεί υπό τις ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος με το προηγούμενο όχημα (πίεση, θερμοκρασία, μορφολογία εδάφους κ.τ.λ.), έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκρισή του μ' αυτό. Στο δεύτερο αυτό όχημα εμφανίζονται, ως γνωστόν, αρκετά αυξημένες απώλειες ενέργειας λόγω της θερμότητας που εκλύεται από το εσωτερικό του προς το περιβάλλον και η οποία προέρχεται από την υψηλή θερμική ενέργεια που παράγεται κατά την καύση του ορυκτού του καυσίμου (της συμβατικής βενζίνης στη συγκεκριμένη περίπτωση). Οι αυξημένες αυτές απώλειες ενέργειας έχουν προφανώς σαν αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η αποδοτικότητά του σε παραγωγή ισχύος, όπως θα δούμε και παρακάτω. Στο δεύτερο αυτό όχημα παρατηρούνται επίσης και κάποιες απώλειες ενέργειας λόγω της τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ των διαφόρων μηχανικών μερών του κινητήρα του αλλά και λόγω της επιπλέον ενέργειας που δαπανάται σε διάφορα μέρη του κινητήρα του προκειμένου να μπορέσει να λειτουργήσει αποτελεσματικά (π.χ. ανεμιστήρες, αντλίες κ.τ.λ.). Όπως μπορεί να αποδειχτεί μετά από πειραματικές μετρήσεις, ένα οποιοδήποτε ρεαλιστικό μεταφορικό όχημα με MEK συμβατικής βενζίνης δεν μπορεί να παρουσιάσει τελικό συνολικό βαθμό απόδοσης ισχύος μεγαλύτερο από 20% περίπου, δηλαδή υπολείπεται σε αποδοτικότητα ισχύος σε σχέση με το μεταφορικό όχημα των κυψελών καυσίμου υδρογόνου κατά 5% με 15% περίπου.

Από τα δύο παραπάνω πρακτικά παραδείγματα των μεταφορικών οχημάτων που εκτέθηκαν μπορεί συγκεντρωτικά να εξαχθεί το συμπέρασμα, ότι το μεταφορικό όχημα κυψελών καυσίμου υδρογόνου εμφανίζει από τη μία ελαφρώς μεγαλύτερη αποδοτικότητα ισχύος σε σχέση με το μεταφορικό όχημα MEK συμβατικής βενζίνης, αλλά όχι τόσο μεγαλύτερη ώστε να δικαιολογείται η απευθείας χρησιμοποίησή του έναντι αυτού. Το συμπέρασμα αυτό ισχύει γενικότερα και για τα περισσότερα από τα υπόλοιπα ενεργειακά συστήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου, συγκρινόμενα με τα περισσότερα από τα υπόλοιπα ενεργειακά συστήματα με MEK, όχι μόνο συμβατικής βενζίνης, αλλά και των λοιπών ορυκτών καυσίμων (π.χ. πετρέλαιο, φυσικό αέριο, γαιάνθρακας (λιγότερο) κ.τ.λ.). Η διαφορά σε αποδοτικότητα ισχύος που παρατηρείται σ' αυτά, δεν είναι συνήθως τόσο μεγάλη ώστε να δικαιολογείται η απρόσκοπτη αντικατάστασή τους από ενεργειακά συστήματα με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου. Εξάλλου, δεδομένου ότι προς το παρόν η τιμή εμπορίας και χρήσης των διαφόρων ορυκτών καυσίμων είναι ακόμα σχετικά χαμηλή, η αντικατάσταση των ενεργειακών

συστημάτων αυτών από συστήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου δεν παρουσιάζει κάποια οικονομική ωφέλεια κατά την εμπορική τους χρήση (ας αναλογιστούμε εξάλλου και το γεγονός, ότι μέχρι στιγμής το κόστος εμπορίας και χρήσης του υδρογόνου είναι ακόμα αρκετά υψηλό και ότι οι διάφορες ενεργειακές τεχνολογίες του χρησιμοποιούν υλικά τα οποία δεν είναι ανταγωνιστικά ως προς την τιμή τους).

Παρολαυτά, αν λάβουμε υπόψη μας και κάποιους επιπλέον σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την μακροπρόθεσμη εξέλιξη των ενεργειακών συστημάτων κυψελών καυσίμου υδρογόνου στο μέλλον, μπορούμε με βεβαιότητα να πούμε, ότι η μερική ή και ολική αντικατάσταση των συστημάτων με ΜΕΚ ορυκτών καυσίμων είναι αφενός επιβεβλημένη και αφετέρου πολύ πιθανή. Κι αυτό γιατί, όπως έχουμε αναφέρει από την αρχή της παρούσας εργασίας, το μέλλον των διαφόρων ορυκτών καυσίμων σαν ενεργειακά υλικά και ιδιαίτερα αυτό του πετρελαίου, παρουσιάζει αποδεδειγμένα πλέον πολύ μικρό ακόμα χρόνο ζωής. Ακόμα και με τις πιο ελαστικές μετρήσεις και προβλέψεις, τα ικανά να αντληθούν και να αξιοποιηθούν αποδοτικά στο μέλλον υπάρχοντα ακόμα αποθέματα πετρελαίου στο υπέδαφος της Γης, δεν θα διαρκέσουν περισσότερο από 40 το πολύ χρόνια, γεγονός το οποίο καθιστά αναγκαία την αντικατάστασης των διαφόρων ενεργειακών συστημάτων που χρησιμοποιούν αυτό και τα διάφορα παράγωγά του (π.χ. βενζίνη) από κάποια άλλα εναλλακτικής μορφής ενεργειακά συστήματα μέσα στο συγκεκριμένο διάστημα. Τα ενεργειακά συστήματα με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου μπορούν πράγματι να αποτελέσουν αυτή την εναλλακτική μορφή μιας και, από πλευράς αποδοτικότητας τουλάχιστον, ανταποκρίνονται όπως είπαμε πλήρως σ' αυτό. Εκτός αυτού, είναι και γενικά παραδεκτό πλέον, ότι ο ανθρώπινος πολιτισμός σε παγκόσμιο επίπεδο δεν έχει την πολυτέλεια να συνεχίσει να εξελίσσεται πάνω στη γη βασιζόμενος στο τωρινό ενεργειακό μοντέλο ανάπτυξής του, το οποίο έχει διαμορφωθεί ήδη εδώ και 150 περίπου χρόνια (από την αρχή της χρησιμοποίησης της ατμομηχανής και του γαιάνθρακα) και το οποίο συνεχίζει να υπάρχει μέχρι και σήμερα.

Το ενεργειακό αυτό μοντέλο ανάπτυξής του έχει φτάσει το φυσικό περιβάλλον της γης στα όρια της ενεργειακής του αντοχής, γεγονός το οποίο αποδεικνύεται συνεχώς από την γενικότερη διατάραξη της οικολογικής ισορροπίας του και της εξάντλησης των φυσικών ενεργειακών του πόρων. Τα ενεργειακά συστήματα των κυψελών καυσίμου υδρογόνου και γενικότερα η τεχνολογία παραγωγής ενέργειας με πρώτη ύλη το υδρογόνο, προσφέρουν ριζική λύση στο πρόβλημα αυτό, μιας και, ως γνωστό, η εφαρμογή τους συνεπάγεται την σημαντική μείωση των ποσοτήτων του CO₂ και των υπολοίπων αέριων ρύπων που εκπέμπονται από τις συμβατικές τεχνολογίες των ορυκτών καυσίμων. Να επισημανθεί επίσης, ότι εκτός του ότι οι διάφορες ενεργειακές τεχνολογίες κυψελών καυσίμου υδρογόνου είναι ιδιαίτερα «φιλικές» προς το φυσικό

περιβάλλον της Γης, απαιτούν πολύ μικρότερες ποσότητες υδρογονούχων «καυσίμων» και υδρογόνου για να λειτουργήσουν, το μεγαλύτερο μέρος των οποίων μπορεί να ανακυκλωθεί και να ξαναχρησιμοποιηθεί στη διαδικασία παραγωγής ενέργειας από το υδρογόνο. Είναι δηλαδή αειφόρες ως προς τη λειτουργικότητά τους, συνδυάζοντας την πολύ μικρή επίδρασή τους στην οικολογική ισορροπία του φυσικού περιβάλλοντος με τις πολύ μικρές απαιτήσεις τους σε φυσικές πρώτες ύλες αυτού.

Καταλήγοντας, μπορούμε να πούμε, ότι οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου και τα ενεργειακά τους συστήματα αποτελούν πράγματι συμφέρουσα εναλλακτική λύση στο ενεργειακό πρόβλημα που αντιμετωπίζει σήμερα η ανθρωπότητα, λόγω της ολικής σχεδόν εξάρτησης αυτής από τα ορυκτά καύσιμα και τις ΜΕΚ. Υπάρχει ακόμα βεβαίως το πρόβλημα της οικονομικότητας της εφαρμογής τους σε μαζική και σε τοπική κλίμακα, αλλά κι αυτό αναμένεται ότι στο μέλλον θα λυθεί σίγουρα. Η συνεχής ανακάλυψη και ανάπτυξη συνθέτων υλικών αποθήκευσης του υδρογόνου σε «στερεά» κατάσταση και η βελτίωση της αποδοτικότητας των κυψελών καυσίμων του με τη χρήση νέων αποδοτικότερων μεμβρανών ηλεκτρόλυσης αυτών, είναι μερικά μόνο από τα επιτεύγματα τα οποία αναμένεται να μειώσουν σημαντικά το κόστος χρήσης και εκμετάλλευσης του υδρογόνου σαν ενεργειακό καύσιμο, καθιστώντας το ανταγωνιστικότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα ορυκτά καύσιμα και την χρησιμοποίηση αυτών για ενεργειακούς σκοπούς. Εκτός αυτού, η μαζική ανάπτυξη και επέκταση του δικτύου διανομής του υδρογόνου στο μέλλον, θα μειώσει αρκετά το κόστος χρήσης του, έτσι ώστε να μπορέσει να αποτελέσει ένα φτηνό και προσιτό ενεργειακό καύσιμο σε διατάξεις με κυψέλες καυσίμου του, όπως ακριβώς συμβαίνει και σήμερα με τα διάφορα ορυκτά καύσιμα. Σημαντική ώθηση σ' αυτό αναμένεται ότι θα δώσει και η ανάπτυξη των διαφόρων εναλλακτικών τεχνολογιών παραγωγής του μέσω ΑΠΕ (π.χ. μέσω της ηλιακής ή της αιολικής ενέργειας) οι οποίες με τη μαζική εφαρμογή τους θα μπορέσουν να το παράγουν φτηνά και χωρίς την κατανάλωση σημαντικών ποσοτήτων ενέργειας. Η βέλτιστη παροχή νερού στο εσωτερικό των διαφόρων κυψελών καυσίμου, παίζει καθοριστικό ρόλο στην αποδοτική τους λειτουργία και την παραγωγή από αυτές υψηλής τάσης και ισχύος. Οποιαδήποτε κυψέλη καυσίμου υδρογόνου, ανεξάρτητα από το είδος του υδρογονούχου καυσίμου που χρησιμοποιεί και από τον συγκεκριμένο τύπο στον οποίο ανήκει, θα πρέπει να παραμένει ένυδρη καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας της, προκειμένου έτσι ο ηλεκτρολύτης που υπάρχει στο εσωτερικό της να μπορεί να παραμένει συνεχώς ιοντικά αγωγίμος. Η παρουσία όμως του νερού στο εσωτερικό κάθε κυψέλης καυσίμου, θα πρέπει πάντα να υπάρχει και σε τέτοιο βαθμό, ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική ενυδάτωση των ηλεκτροδίων της, η οποία θα είχε σαν συνέπεια την παρεμπόδιση της λειτουργίας αυτών (παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος).

Επειδή όλοι οι τύποι των κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιούνται σήμερα, κατασκευάζονται στην εξωτερική τους επιφάνεια από μεταλλικά υλικά (προς μόνωση αυτών) τα οποία είναι αδιαφανή, η άμεση οπτική παρατήρηση των διεργασιών στο εσωτερικό τους από το εξωτερικό τους περιβάλλον δεν είναι δυνατή. Για το λόγο αυτό σήμερα έχει αναπτυχθεί μια ειδική τεχνική, η οποία ονομάζεται τεχνική της σκέδασης από νετρόνια, κατά την οποία η απεικόνιση των εσωτερικών διεργασιών που συμβαίνουν μέσα σε μία κυψέλη καυσίμου γίνεται πλέον εφικτή.

Συγκεκριμένα, κατά τη τεχνική αυτή, εκπέμπονται από τον εξωτερικό χώρο των διαφόρων κυψελών καυσίμου νετρόνια τα οποία, λόγω του μεγέθους τους, διαπερνούν τα εξωτερικά τους τοιχώματα και στη συνέχεια εισέρχονται στον εσωτερικό τους. Μετά την εισέλευσή τους στον εσωτερικό τους χώρο, τα νετρόνια αυτά συναντούν ένα φυσικό «φράγμα» στην περαιτέρω κίνησή τους, το οποίο αποτελείται στο υδρογόνο που υπάρχει στο εσωτερικό των κυψελών καυσίμου. Το φυσικό αυτό «φράγμα» του υδρογόνου προς την περαιτέρω κίνηση των νετρονίων, οφείλεται στην πολύ μικρή διάσταση που έχουν και τα άτομα του υδρογόνου σαν σωματίδια, όπως συμβαίνει και με τα νετρόνια.

Έτσι, τα νετρόνια που συναντάνε το «φυσικό» αυτό φράγμα των ατόμων του υδρογόνου, σκεδάζονται πάλι πίσω προς την κατεύθυνση από την οποία προήλθαν, δηλαδή προς το εξωτερικό των κυψελών καυσίμου. Προφανώς, όσο πυκνότερη είναι η διάταξη των ατόμων μέσα στις κυψέλες καυσίμου, τόσο μεγαλύτερη είναι η σκέδαση των νετρονίων που εκπέμπονται από το εξωτερικό αυτών προς το εσωτερικό τους.

Ανιχνεύοντας έτσι, μέσω ειδικών διατάξεων, τον αριθμό των νετρονίων που σκεδάστηκαν από μία κυψέλη καυσίμου, μπορούμε να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα για την πυκνότητα του υδρογόνου επομένως και του νερού που επικρατεί σε κάθε σημείο του εσωτερικού της χώρου και να καθορίσουμε την αποδοτικότητα του τρόπου λειτουργίας της (λόγω ανεπαρκούς παροχής νερού στο εσωτερικό της). Η χωρική ανάλυση (spatial resolution) που πετυχαίνεται μέσω της συγκεκριμένης μεθόδου είναι αρκετά μεγάλη και μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 100μm.

8. Χαρακτηριστικά Σχεδιασμού και Λειτουργίας των ΜΕΚ Υδρογόνου

1) 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.

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 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 εναπομείναντες ποσότητες υπέρθερμων αερίων από προηγούμενη καύση. Έτσι το φαινόμενο της ανάφλεξης στην εισαγωγή ήταν δύσκολο να ελεγχθεί ενώ ακόμα και αν δεν παρατηρούταν ανώμαλη καύση, η μετρούμενη απώλεια ισχύος της τάξης του 15% σε σύγκριση με την αντίστοιχη MEK βενζίνης, ήταν από μόνη της αποτρεπτική. Η υιοθέτηση συστημάτων έγχυσης του καυσίμου λοιπόν ήταν μονόδρομος, όχι μόνο διότι περιόριζε σημαντικά τις πιθανότητες ανώμαλης καύσης αλλά και επειδή αντιστάθμιζε την απώλεια ισχύος.

Αρχικά, η έγχυση του καυσίμου στην εισαγωγή (Timed Manifold Injection) έκανε δυνατή την αναρρόφηση του αέρα, με το καύσιμο να εγχύεται στα μετέπειτα στάδια του χρόνου εισαγωγής. Αυτή η πρωθύστερη παρουσία του αέρα στην πολλαπλή εισαγωγής προσφέρει δύο σημαντικά ευεργετήματα. Αφενός παρέχει συμπληρωματική ψύξη των επιφανειών καθιστώντας ανενεργά πιθανά σημεία προανάφλεξης και αφετέρου 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.

Άμεση έγχυση (DI) & Έγχυση στην θυρίδα εισαγωγής (PFI)

Τα τελευταία χρόνια έχει καθιερωθεί η χρήση συστημάτων άμεσης έγχυσης (Direct Injection) ή συστημάτων έγχυσης του καυσίμου στη θυρίδα εισαγωγής (Port Fuel Injection) καθώς οι άλλες μέθοδοι κρίθηκαν λιγότερο αποτελεσματικές ως προς τον έλεγχο των φαινομένων ανώμαλης καύσης. Τα φαινόμενα ανάφλεξης του καυσίμου μίγματος στην εισαγωγή

αποκλείονται εντελώς με την μέθοδο της άμεσης έγχυσης του καυσίμου απευθείας στο θάλαμο καύσης ή αποτρέπονται σημαντικά με την μέθοδο της έγχυσης του καυσίμου στη θυρίδα εισαγωγής. Φαίνεται πάντως ότι αν και η μέθοδος της άμεσης έγχυσης είναι η πλέον υποσχόμενη, η μέθοδος έγχυσης στη θυρίδα εισαγωγής είναι η πλέον αποδεκτή εφόσον απαιτούνται μικρότερες πιέσεις έγχυσης και επομένως ο τεχνολογικός εξοπλισμός που απαιτείται για την εφαρμογή της είναι πολύ απλούστερος και λιγότερο δαπανηρός. Επιπρόσθετα, η μέθοδος PFI επιτρέπει την καύση φτωχότερων μίγμάτων 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 μίγμάτων χωρίς την πιθανότητα ανάφλεξης του μίγματος στην εισαγωγή. Εντούτοις, η πιθανότητα προανάφλεξης παραμένει, εκτός και αν το καύσιμο εγχύεται στα τελευταία στάδια της φάσης συμπίεσης. Η λύση αυτή όμως, πέρα από το δυσθεώρητο κόστος, προϋποθέτει την υιοθέτηση συστημάτων έγχυσης υψηλής πίεσης, επιλογή που απαιτεί την υπερπήδηση σημαντικών τεχνικών δυσκολιών για την εφαρμογή της μερικές από τις οποίες είναι οι εξής:

- Το καύσιμο εγχύεται απευθείας στο θάλαμο καύσης με πίεση υψηλότερη των 110bar, δηλαδή περίπου 30 φορές μεγαλύτερη από αυτήν των συστημάτων PFI γεγονός που προϋποθέτει την αποθήκευση του υδρογόνου στο όχημα με τη μορφή κρυογονικού υγρού ή ενός προηγμένου συστήματος αποθήκευσης σε υδρίδια μετάλλων.
- Η πιθανότητα προανάφλεξης περιορίζεται μόνο στην περίπτωση που το υδρογόνο εγχύεται στα πολύ τελευταία στάδια του χρόνου συμπίεσης και άρα το χρονικό διάστημα που διατίθεται για την ομογενοποίηση του μίγματος είναι το ελάχιστο δυνατό. Έτσι απαιτούνται τεχνικές ταχύτατης ανάμιξης του υδρογόνου και του αέρα στο θάλαμο με στόχο ένα ικανοποιητικά ομοιογενές μίγμα.
- Η τοποθέτηση του εγχυτήρα μέσα στο θάλαμο καύσης μετά τη βαλβίδα εισαγωγής καθιστά αναγκαία την κατασκευή του από ειδικά υλικά ώστε να αντέχει τις δυσμενείς συνθήκες υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών που επικρατούν στο θάλαμο κατά την καύση του υδρογόνου.

Παρά τις παραπάνω τεχνικές δυσκολίες που απαιτούν την εφαρμογή καινοτόμων και δαπανηρών λύσεων είναι γενικά αποδεκτό ότι η έγχυση

υδρογόνου απευθείας στο θάλαμο καύσης υπό υψηλή πίεση στα τελευταία στάδια της συμπίεσης είναι ο πλέον ενδεδειγμένος τρόπος για τη βελτίωση της απόδοσης και συνάμα την ομαλή λειτουργία του κινητήρα απουσία φαινομένων ανώμαλης καύσης.

Φαίνεται λοιπόν από όλα τα παραπάνω ότι όταν ζητούμενο είναι η μέγιστη δυνατή ισχύς της μηχανής αδιαφορώντας για το κόστος και την πολυπλοκότητα της, η άμεση έγχυση είναι μονόδρομος. Έτσι για τη λειτουργία της μηχανής σε πλήρες φορτίο (μέγιστη ισχύς) η άμεση έγχυση (DI) είναι η ιδανική λύση, ενώ για τη λειτουργία της μηχανής υπό μερικό φορτίο (μέγιστη απόδοση) προτείνεται η έγχυση στη θυρίδα εισαγωγής (PFI). Εξάλλου η μέθοδος έγχυσης PFI επιτρέπει την ελεύθερη επιλογή του τρόπου αποθήκευσης του καυσίμου στο όχημα εφόσον για την τροφοδοσία απαιτούνται πολύ χαμηλότερες πιέσεις σε σχέση με τις αντίστοιχες της μεθόδου DI. Τέλος, η μέγιστη ισχύς μίας MEK υδρογόνου στην οποία το μίγμα σχηματίζεται εκτός του θαλάμου καύσης είναι μειωμένη κατά 18% περίπου σε σχέση με την ισχύ μίας αντίστοιχης MEK βενζίνης ενώ αντίθετα αν η ίδια μηχανή χρησιμοποιούσε άμεσο ψεκασμό θα παρατηρούταν αύξηση της ισχύος κατά 17%.

Είναι σαφές λοιπόν ότι κάθε τεχνολογία έγχυσης παρουσιάζει θετικά και αρνητικά στοιχεία τα οποία πρέπει να εξετάζονται ξεχωριστά για κάθε περίπτωση ανάλογα με τις συνθήκες στις οποίες θα λειτουργεί ο κινητήρας κατά το μεγαλύτερο μέρος της ζωής του. Έχει πάντως προταθεί και ως λύση η επιλογή ενός διττού συστήματος τροφοδοσίας καυσίμου το οποίο θα συνδυάζει τα θετικά χαρακτηριστικά της άμεσης έγχυσης εν πλήρες φορτίο και τα αντίστοιχα της έγχυσης στον αυλό εισαγωγής υπό μερικό φορτίο.

2) Τεχνολογικά Εμπόδια & Περιορισμοί στη Χρήση του Υδρογόνου ως Καύσιμο στις MEK

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 ιδίου όγκου.

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούν υδρογόνο για την παραγωγή ωφέλιμου μηχανικού έργου αποδίδουν συγκριτικά πολύ μικρότερη μέγιστη ισχύ από μία αντίστοιχης χωρητικότητας MEK βενζίνης. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ιδιαίτερος 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.

3) Χαρακτηριστικά Σχεδιασμού και Λειτουργίας των ΜΕΚ Υδρογόνου

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

Σύστημα τροφοδοσίας του καυσίμου

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

Όταν ζητούμενο είναι η απόλυτη ισχύς της μηχανής τότε η έγχυση του καυσίμου απευθείας στο θάλαμο καύσης είναι η μόνη ενδεδειγμένη λύση που αποκλείει την ανάφλεξη στην εισαγωγή. Επειδή όμως ο κίνδυνος της προανάφλεξης παραμένει, το καύσιμο πρέπει να εγχύεται στα τελευταία στάδια της φάσης συμπίεσης. Η μέθοδος άμεσης έγχυσης του καυσίμου προϋποθέτει την υιοθέτηση συστημάτων εγχύσεως υψηλής πίεσης, την κατασκευή των εγχυτήρων από ειδικά κράματα αλλά και την αποθήκευση του

υδρογόνου στη μορφή κρυογονικού υγρού.

Και οι δύο προτεινόμενες λύσεις για την τροφοδοσία του κινητήρα (PFI & DI) απαιτούν προσεκτικά μελετημένο χρονισμό 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.

Σύστημα ανάφλεξης και σπινθηριστές (μπουζί)

Ο σχεδιασμός του συστήματος ανάφλεξης όπως και των σπινθηριστών χρήζει ιδιαίτερης προσοχής διότι όπως έχει ήδη αναφερθεί, υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις μπορούν να αποτελέσουν αιτία ανάφλεξης του μίγματος πριν τον προκαθορισμένο χρόνο ανάφλεξης από τον σπινθήρα των μπουζί. Έτσι απαιτείται η σωστή χωροθέτηση των καλωδίων ανάφλεξης με στόχο την αποτροπή της ανεπιθύμητης και απρογραμματίστης ανάφλεξης σε έναν κύλινδρο από επαγωγή του καλωδίου διπλανού κυλίνδρου. Άλλη απαίτηση του σχεδιασμού είναι η σωστή γείωση του συστήματος ανάφλεξης καθώς και η μεταβολή της αντίστασης του καλωδίου ανάφλεξης με σκοπό την αποφυγή ανεξέλεγκτης ανάφλεξης του μίγματος από εναπομείνασα ενέργεια προηγούμενης ανάφλεξης στο καλώδιο της ανάφλεξης.

Απ' την άλλη μεριά οι σπινθηριστές που χρησιμοποιούνται στους κινητήρες βενζίνης κρίνονται μάλλον ακατάλληλοι για τους κινητήρες υδρογόνου διότι δεν παρουσιάζουν ικανοποιητική απόδοση στην αποβολή του θερμικού τους φορτίου με αποτέλεσμα η θερμοκρασία των ηλεκτροδίων τους εύκολα να υπερβαίνει την θερμοκρασία αυτανάφλεξης του υδρογόνου, αποτελώντας έτσι βασική εστία πυρανάφλεξης. Φαίνεται λοιπόν ότι απαιτούνται σπινθηριστές ακόμη πιο ψυχροί από τους ψυχρότερους των MEK βενζίνης για ταχύτερη απομάκρυνση της θερμότητας από το θάλαμο καύσης. Εξάλλου, είναι απαγορευτική η κατασκευή των ηλεκτροδίων των σπινθηριστών από πλατίνα (λευκόχρυσος) καθώς το υλικό αυτό αποτελεί γνωστό καταλύτη για την οξείδωση του υδρογόνου.

Το διάκενο των ηλεκτροδίων από 0,7 – 1,1mm που κυμαίνεται για τους σπινθηριστές των MEK βενζίνης μπορεί να επιλεγεί πολύ μικρότερο για εκείνους των MEK υδρογόνου, ακόμη και 0,25mm, εφόσον δεν υφίσταται το πρόβλημα των επικαθίσεων άνθρακα στα μέταλλα των MEK υδρογόνου. Η ιδανική πάντως απόσταση διάκενου των σπινθηριστών των MEK υδρογόνου

είναι γύρω στο μισό χιλιοστό και όχι χαμηλότερη, διότι διαφορετικά παρουσιάζεται δυσκολία στην κρύα εκκίνηση λόγω συμπύκνωσης ατμών στην ακίδα του σπινθηριστή κατά την ανάφλεξη με κρύο κινητήρα. Το μικρότερο διάκενο είναι ευεργετικό στην ηλεκτρική απόδοση των σπινθηριστών διότι μικρότερη τάση απαιτείται από το σύστημα ανάφλεξης για την αξιόπιστη παραγωγή σπινθήρα από το σπινθηριστή.

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

Λίπανση των MEK υδρογόνου

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

Άλλες απαιτούμενες ιδιότητες που η τεχνολογία λιπαντικών πρέπει να παράσχει στο λάδι για την αντοχή του στις αυξημένες θερμοκρασίες των MEK υδρογόνου είναι ο υψηλός δείκτης ιξώδους και η θερμική σταθερότητα. Έτσι το λάδι πρέπει να αντιστέκεται στη μεταβολή του ιξώδους του με την αύξηση της θερμοκρασίας αλλά και να μην καταλύεται η σύνθεσή του στις υψηλές

θερμοκρασίες των MEK υδρογόνου.

Τέλος, σημαντική προσοχή πρέπει να δοθεί στην αποφυγή δημιουργίας της ανεπιθύμητης τέφρας (sulfated ash) που σχηματίζεται από τα μεταλλικά στοιχεία των προσθέτων του λιπαντικού καθώς και από τα κατάλοιπα που δημιουργούνται κατά τη χρήση τους (οξειδία, σκόνη, ρινίσματα). Η τέφρα του λιπαντικού μπορεί να σχηματίσει επικαθίσεις στο χώρο καύσης οι οποίες με τη σειρά τους είναι πιθανό να αποτελέσουν υπέρθερμα σημεία κατά τη λειτουργία της μηχανής, και επομένως εστίες πυρανάφλεξης.

Τεχνικές ψύξης του θαλάμου καύσης

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

Σχεδιασμός του θαλάμου καύσης

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

Τέλος, τεχνικές ανάπτυξης τυρβώδους ροής στο θάλαμο καύσης και σχεδιασμού των αυλών εισαγωγής με στόχο την περιδίνηση του εισερχόμενου στο θάλαμο μίγματος για βελτιωμένη ανάμιξη και καλύτερη ομογενοποίηση του 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.

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.

Στρατηγική ελέγχου του φορτίου της μηχανής

Τα ευρέα όρια αναφλεξιμότητας του υδρογόνου (4-75% κατ' όγκο) επιτρέπουν τον έλεγχο του φορτίου της μηχανής με την υιοθέτηση συστήματος εισαγωγής χωρίς στραγγαλιστική δικλείδα (Wide Open Throttle). Έτσι το φορτίο της μηχανής ελέγχεται μεταβάλλοντας την αναλογία του μίγματος, με άλλα λόγια δηλαδή απλώς ρυθμίζοντας τον λόγο αέρα – καυσίμου όπως ισχύει στους κινητήρες Diesel. Ο τρόπος αυτός ελέγχου του φορτίου της μηχανής ονομάζεται ποιοτικός 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.

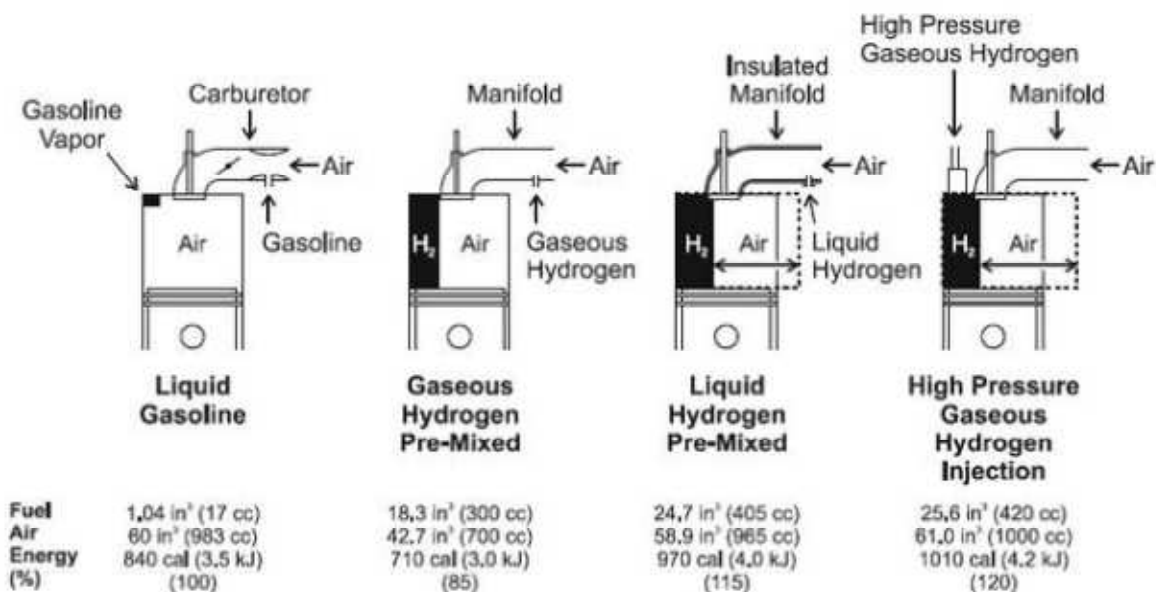
Η απουσία της στραγγαλιστικής δικλείδας είναι ιδιαίτερα επωφελής για τη λειτουργία του κινητήρα διότι μειώνει τις τριβές και τις απώλειες με συνέπεια

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

9. Καύση του Υδρογόνου στις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης



Εικόνα 13- Προϋποθέσεις αποστάσεων σε διαφορετικά μείγματα καυσίμων σε μια μηχανή εμβόλων

Το υδρογόνο, λοιπόν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν καύσιμο σε μία μηχανή αυτοκινήτου. Πώς και πόσο εύκολα όμως; Η αντίδραση καύσης του υδρογόνου δεν είναι τίποτε άλλο στην πράξη από την επανένωση του υδρογόνου με το οξυγόνο, η οποία οδηγεί στην παραγωγή νερού (ατμού) και ταυτόχρονα στην απελευθέρωση ενέργειας, που τελικά μετατρέπεται σε έργο από την παλινδρομική κίνηση του πιστονιού. Ο ατμός επιστρέφει από την εξάτμιση του αυτοκινήτου πίσω στο περιβάλλον και μπαίνει ξανά στον κύκλο ζωής του νερού του περιβάλλοντος, δηλαδή θα γίνει σύννεφο, θα συμπυκνωθεί και θα επιστρέψει πίσω στη γη πάλι σαν βροχή, όπου θα ηλεκτρολυθεί ξανά και ο κύκλος του θα ξαναρχίσει από την αρχή. Αυτό λοιπόν σημαίνει ότι το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μια πηγή ενέργειας, που είναι όχι μόνο απόλυτα ανανεώσιμη, αλλά και δεν οδηγεί σε καμία εκπομπή ρύπων του τύπου των άκαυτων υδρογονανθράκων, σωματιδίων καπνού, μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα. Όλα αυτά, σε θεωρητικό κατ' αρχήν επίπεδο.

Το υδρογόνο μελετάτε ως εν δυνάμει καύσιμο στις μηχανές εσωτερικής καύσης για πάνω από 150 χρόνια. Στην πραγματικότητα, ο ίδιος ο Nikolaus Otto (1832-1891) δούλεψε πάνω στην εφεύρεση και καταξίωση των μηχανών έναυσης με σπινθήρα, χρησιμοποιώντας συνθετικό αέριο ως καύσιμο, το οποίο λέγετε ότι περιείχε πάνω από 50% υδρογόνο!

Η χρήση του υδρογόνου άρχισε να γίνεται αρκετά δημοφιλείς στις αρχές του 20ου αιώνα και μάλιστα, λίγο πριν τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, το ενδιαφέρον για

τις εφαρμογές του υδρογόνου απογειώθηκε. Όμως, μετά την καταστροφή του δημοφιλούς γερμανικού υπερατλαντικού επιβατικού αερόπλοιου Hindenburg, κατά την προσγείωσή του στο New Jersey των ΗΠΑ το Μάιο του 1937, ο φόβος για την αποθήκευση και χρήση του υδρογόνου σε ευρεία κλίμακα οδήγησε στην εγκατάλειψη όλων των «εμπορικών» σχεδίων χρήσης του υδρογόνου, τόσο σαν αέριο άνωσης για αερόπλοια, όσο και σαν καύσιμο για μηχανές εσωτερικής καύσης.

Η ενεργειακή κρίση της δεκαετίας του 1970 οδήγησε τους μηχανικούς στο να θυμηθούν ξανά το υδρογόνο ως πηγή ενέργειας και να αρχίσουν να εξετάζουν την χρήση του σαν καύσιμο σε μηχανές αυτοκινήτων. Έτσι, πολλά πιλοτικά προγράμματα εξέλιξης μηχανών αυτοκινήτου, που να μπορούν να λειτουργήσουν με υδρογόνο, ξεκίνησαν εκείνη την εποχή σταδιακά, τόσο στην Αμερική, όσο και στην Γερμανία και την Ιαπωνία. Παρ' όλα αυτά όμως, μόλις τα τελευταία δέκα χρόνια, μεγάλες εταιρίες αυτοκινήτου έχουν αρχίσει να δημοσιεύουν κάποια μέρη της δουλειάς τους πάνω σε μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου. Για παράδειγμα, δημοσιευμένη δουλειά πάνω σε μηχανές υδρογόνου σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια, μπορούμε να βρούμε από τις Nissan, Hyundai, Toyota, Daimler Chrysler, Mazda, Ford και BMW. Μάλιστα, οι τρεις τελευταίες εταιρίες έχουν προχωρήσει πολύ την δουλειά τους και έχουν φτάσει μέχρι και τη επίσημη παρουσίαση πρωτοτύπων αυτοκινήτων που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το υδρογόνο σε μηχανές «στάνταρ» γεωμετρίας βενζίνης και έναυσης με μπουζί.

Ως γνωστόν, η αντίδραση καύσης του υδρογόνου με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο οδηγεί σε παραγωγή νερού (υπό μορφή ατμού) και σε ταυτόχρονη απελευθέρωση ενέργειας (υπό μορφή θερμότητας). Έτσι, στις ΜΕΚ υδρογόνου, η θερμότητα που εκλύεται κατά την καύση του υδρογόνου με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο, μπορεί να αξιοποιηθεί κατάλληλα από τα εσωτερικά μηχανικά μέρη, προκειμένου να μετατραπεί σε ωφέλιμο μηχανικό έργο. Επίσης, ο ατμός που παράγεται από την καύση αυτή μπορεί στη συνέχεια να εκλυθεί προς το περιβάλλον, επιστρέφοντας έτσι πάλι στον φυσικά ανανεώσιμο κύκλο ζωής του νερού. Αυτό σημαίνει ότι το υδρογόνο, αποτελεί θεωρητικά μια πλήρως ανανεώσιμη, χωρίς ρύπους, αποδοτική πηγή ενέργειας των ΜΕΚ, συγκαταλέγοντας πάντα σ' αυτό και την πολύ υψηλή απόδοση ενέργειας που μπορεί να αποδώσει.

Όπως όμως και κατά τη χρησιμοποίησή του στην πράξη σε κυψέλες καυσίμου, το υδρογόνο στις ΜΕΚ δεν εκτελεί «ιδανική» ενεργειακή μετατροπή (στη συγκεκριμένη περίπτωση καύση), αλλά παράγει και ορισμένες ποσότητες ρύπων, οι οποίες μάλιστα στη συγκεκριμένη περίπτωση των ΜΕΚ είναι μεγαλύτερες απ' ό,τι στις κυψέλες καυσίμου. Εκτός από αυτό, η πραγματική του καύση σε ΜΕΚ δεν είναι προφανώς 100% αποδοτική, με αποτέλεσμα το νερό που παράγεται κατ' αυτή να μην ανανεώνεται πλήρως. Στους διάφορους ρύπους που

εκπέμπονται κατά την πραγματική καύση του υδρογόνου μέσα σε MEK, ανήκουν κατά πρώτο λόγο τα διάφορα οξείδια του αζώτου που προκύπτουν από την ένωση του ατμοσφαιρικού οξυγόνου με το ατμοσφαιρικό άζωτο που περιέχεται στον ατμοσφαιρικό αέρα με τον οποίο αντιδρά. Επίσης, κατά την πραγματική του καύση σε MEK, προκύπτουν και ορισμένες ποσότητες από CO, CO₂ καθώς και άκαυτους υδρογονάνθρακες, οι οποίοι προέρχονται από την αντίδραση καύσης του ατμοσφαιρικού αέρα και του υδρογόνου αντίστοιχα με τις ποσότητες λιπαντικών και ελαίων που περιέχονται μέσα στις MEK.

Γενικά πάντως, θα πρέπει να αναφέρουμε, ότι οι παραπάνω ρύποι δεν είναι σίγουρα τόσο μεγάλοι σε ποσότητα όσο αυτοί που παράγονται κατά την καύση των διαφόρων ορυκτών καυσίμων σε MEK, αναφερόμενοι πάντα στις ίδιες στοιχειομετρικές ποσότητες και συνθήκες καύσης. Μάλιστα, μπορούμε να πούμε, ότι για τα οξείδια του αζώτου που παράγονται κατά την πραγματική καύση του υδρογόνου σε MEK, επειδή η καύση αυτού μπορεί να γίνει αρκετά αποδοτικά και με «φτωχά» μίγματα καύσης, με κατάλληλη ρύθμιση των MEK μπορούν να ελαττωθούν σημαντικά τα εκπεμπόμενα οξείδια του αζώτου, φτάνοντας έτσι σε αρκετά χαμηλά επίπεδα (τυπικά μέχρι και το 25% αυτών που εκπέμπονται στις MEK βενζίνης).

Εκτός από τα οξείδια του αζώτου που παράγονται κατά την πραγματική καύση του υδρογόνου σε MEK, από την καύση του, όπως αναφέραμε και πριν, παράγονται και ορισμένες ποσότητες CO, CO₂, καθώς και μικρές ποσότητες από άκαυτους υδρογονάνθρακες. Η εξήγηση γι' αυτό αποτελεί το γεγονός, ότι ένα μέρος του λιπαντικού που χρησιμοποιείται στις MEK υδρογόνου, λόγω του τρόπου λειτουργίας τους, αναπόφευκτα εισέρχεται μέσα στον θάλαμο καύσης τους, αντιδρώντας εκεί με το υδρογόνο και τον ατμοσφαιρικό αέρα που υπάρχει και δημιουργώντας αυτούς τους ρύπους. Και εδώ όμως, οι ποσότητες των συγκεκριμένων ρύπων είναι σαφώς μικρότερες από τις ποσότητες σε MEK ορυκτών καυσίμων. Έχει μετρηθεί όμως ότι χρειάζεται 300 μηχανές υδρογόνου να δουλεύουν μαζί για να εκλυθεί διοξείδιο του άνθρακα ίσο με αυτό που εκλύεται από μία μόνο μηχανή βενζίνης. Και όσον αφορά στη σχετική νομοθεσία, το ποσό εκπομπής άκαυτων υδρογονανθράκων και μονοξειδίου του άνθρακα από μια μηχανή υδρογόνου είναι κάπου το ένα δέκατο από το ποσό εκπομπής ρύπων που αντιστοιχεί στους αυστηρότατους κανονισμούς εκπομπής ρύπων με την επωνυμία SULEV (Super Ultra Low Emission Vehicle) που έχει θέσει η Πολιτεία της Καλιφόρνια.

Το φαινόμενο "Backfire" στις MEK υδρογόνου

Το σημαντικότερο μειονέκτημα που εμπόδισε ανέκαθεν (και εμποδίζει ακόμα και σήμερα) τη χρησιμοποίηση του υδρογόνου σε MEK, είναι ένα εν

δυνάμει επικίνδυνο θερμοχημικό φαινόμενο που παρατηρείται αρκετά συχνά κατά την καύση του σ' αυτές, το οποίο είναι γνωστό ως φαινόμενο αυθόρμητης αυτανάφλεξης ή φαινόμενο "backfire". Το φαινόμενο "backfire", χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά που παρουσιάζει το μίγμα του υδρογόνου και του ατμοσφαιρικού αέρα κατά την καύση του μέσα σε μία MEK, όταν η καύση αυτού δεν εξελίσσεται ομαλά, αλλά παρατηρούνται κάποιες μικροαναφλέξεις (ή αλλιώς «σκασίματα») στη μάζα του. Τα «σκασίματα» αυτά, παρουσιάζονται κατά την φάση που το μίγμα εισάγεται στον χώρο καύσης της MEK. Το φαινόμενο "backfire" είναι επικίνδυνο και ανεπιθύμητο, γιατί υπό κατάλληλες συνθήκες μπορεί να καταστρέψει πλήρως (με έκρηξη) μια MEK. Εξίσου βασικό με αυτό είναι και το γεγονός, ότι εφόσον παρουσιαστεί, δεν μπορεί πλέον εύκολα να ελεγχθεί και να σταματήσει πρωτού πάρει επικίνδυνες διαστάσεις. Θα πρέπει πάντως να αναφέρουμε, ότι το φαινόμενο "backfire" αποτελεί ένα επικίνδυνο φαινόμενο καύσης το οποίο μπορεί να παρουσιαστεί σε μία οποιαδήποτε MEK, είτε δηλαδή αυτή καταναλώνει υδρογόνο είτε κάποιο από τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα. Επίσης μπορεί να εκδηλωθεί σ' αυτή ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο καίγεται το μίγμα της καύσης της (είτε δηλαδή μέσω απευθείας ψεκασμό του μέσα στον χώρο της καύσης της είτε με προετοιμασία του πριν την καύση με τη χρήση «καρμπυλατέρ»).

Γενικά, το φαινόμενο "backfire" εμφανίζεται μέσα σε μία MEK, όταν το μίγμα αέρα – καυσίμου αναφλέγεται κατά την εισαγωγή του μέσα στον χώρο της καύσης και εφόσον οι βαλβίδες εισαγωγής προς τον χώρο καύσης της MEK είναι ακόμα ανοιχτές. Η εμφάνιση όμως του φαινομένου "backfire" αποκτά μεγαλύτερη βαρύτητα όταν αναφερόμαστε σε μία MEK υδρογόνου, αφού ως γνωστόν το υδρογόνο παρουσιάζει μεγαλύτερη αναφλεξιμότητα σε περιορισμένο χώρο σε σχέση με τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα. Μία από τις αιτίες που δημιουργούν την «απρόσμενη» εμφάνιση του φαινομένου "backfire" μέσα στον χώρο καύσης μιας οποιασδήποτε MEK (υδρογόνου ή συμβατικών ορυκτών καυσίμων) είναι η ύπαρξη ορισμένων «θερμών» σημείων στην εσωτερική του επιφάνεια, δηλαδή σημείων με θερμοκρασίες μεγαλύτερες από αυτή του μίγματος της καύσης. Η ύπαρξη των «θερμών» αυτών σημείων προκαλεί την αυτανάφλεξη του μίγματος καύσης, συνήθως δε απρόσμενα και ανεξέλεγκτα. Μία δεύτερη επίσης αιτία η οποία μπορεί να δημιουργήσει το φαινόμενο "backfire" σε μία MEK, είναι και η πιθανή υψηλή θερμοκρασία των ηλεκτροδίων ανάφλεξης που υπάρχουν μέσα στον χώρο της καύσης της, η οποία για διάφορους λόγους μπορεί να γίνει υψηλότερη από αυτήν του μίγματος καύσης που εισέρχεται εκεί.

Τέλος, κάποιο πολύ θερμό σημείο του καμένου μίγματος καύσης που έχει παραμείνει στους κυλίνδρους μετά τον κύκλο της καύσης του, κάποιο θερμό σημείο των βαλβίδων εξαγωγής του μίγματος καύσης και πιθανά υπέρθερμα κατάλοιπα του λιπαντικού που εισέρχεται μέσα στο χώρο της καύσης, μπορούν

επίσης να γίνουν δευτερεύουσας σημασίας αιτίες για την εμφάνιση του φαινομένου "backfire" σε μία MEK. Να σημειωθεί, ότι στην περίπτωση που αναφερόμαστε σε μία MEK υδρο-γόνου, το μίγμα υδρογόνου – αέρα της απαιτεί μόλις το 1/10 περίπου της ενέργειας που απαιτεί ένα ίδιας ποσότητας μίγμα βενζίνης – αέρα μέσα σε μία συμβατική MEK προκειμένου να αναφλεγεί.

Η εμφάνιση του φαινομένου "backfire" σε μία MEK υδρογόνου, έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός «κύματος καύσης», δηλαδή μιας αλυσιδωτής ανάφλεξης, μέσα στην MEK, η οποία συνήθως ξεκινάει από τον χώρο που το μίγμα της καύσης εισάγεται στους κυλίνδρους. Το «κύμα» αυτό στη συνέχεια μπορεί να επεκταθεί από τις ανοιχτές βαλβίδες εισαγωγής της MEK και να επηρεάσει την υπόλοιπη ποσότητα του μίγματος καύσης το οποίο υπάρχει μέσα στους αλούς εισαγωγής και το οποίο δεν έχει εισροφηθεί ακόμα από τους κυλίνδρους της. Στην καλύτερη περίπτωση, η αλυσιδωτή αυτή ανάφλεξη προκαλεί την ασταθή και θορυβώδη λειτουργία της MEK, η οποία συνήθως συνεπάγεται και τη διακοπή της λειτουργίας της. Στην χειρότερη όμως περίπτωση, η αλυσιδωτή αυτή ανάφλεξη μπορεί να οδηγηθεί σε τόσο μεγάλη κλιμάκωση, ώστε το μίγμα της καύσης να αναφλεγεί σε όλη την έκταση της μάζας του, με αποτέλεσμα την ολική καταστροφή της MEK μέσω έκρηξης.

Ένας τρόπος περιορισμού του φαινομένου "backfire" μέσα σε μία MEK υδρογόνου, είναι να ψεκαστεί το μίγμα της καύσης με ποσότητα νερού, κατά την φάση που εισάγεται μέσα στους κυλίνδρους. Τυπικά, ψεκάζοντας το μίγμα με νερό σε αναλογία (νερό / υδρογόνο μίγματος καύσης) = 4, οδηγούμαστε σε αρκετά αποδεκτά αποτελέσματα. Επειδή όμως η συγκεκριμένη μέθοδος είναι δύσκολο να εφαρμοστεί στη πράξη (λόγω της δυσκολίας που υπάρχει να ελεγχθεί η τελική περιεκτικότητα σε νερό του μίγματος της καύσης που ψεκάζεται), έχει αναπτυχθεί και εφαρμοστεί με αρκετή επιτυχία μια πιο πρακτική μέθοδος. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στο γεγονός, ότι όταν ο λόγος (υδρογόνου / αέρα) του μίγματος καύσης γίνει πολύ μικρός (περίπου υποδιπλάσιος του στοιχειομετρικού), το φαινόμενο "backfire" μπορεί να περιοριστεί αρκετά αποτελεσματικά και «εν τη γενέσει του». Βέβαια, αυτή η μέθοδος έχει και την αρνητική της πλευρά, μιας και παρόλο ότι η καύση του υδρογόνου σε MEK μπορεί να γίνει αποτελεσματικά και με «φτωχά» μίγματα καύσης, η ισχύς που παράγεται κατά την καύση των μιγμάτων αυτών είναι αναπόφευκτα μειωμένη σε σχέση με αυτή που θα είχε παραχθεί εάν αυτά καίγονταν στοιχειομετρικά. Υπάρχει όμως από την άλλη μεριά και η δυνατότητα, η χαμένη αυτή ισχύς να ανακτηθεί κατά ένα σημαντικό από την κατάλληλη αναπροσαρμογή του χρονισμού ψεκασμού του μίγματος καύσης και την αναπροσαρμογή του χρονισμού ανάφλεξης αυτού μέσα στον χώρο καύσης της MEK.

10. Συστήματα Ψεκασμού Υδρογόνου

Λόγω της αυξημένης πιθανότητας που παρουσιάζουν οι MEK υδρογόνου να εμφανίσουν το φαινόμενο "backfire" κατά την λειτουργία τους και της αναπόφευκτης, λόγω αυτού ρύθμισής τους με «φτωχά» μίγματα καύσης, οι διάφορες προσπάθειες που γίνονται σήμερα για την βελτίωση της κατασκευής τους, επικεντρώνονται κυρίως στην εξέλιξη των συστημάτων προετοιμασίας του μίγματος καύσης τους, έτσι ώστε να μην εμφανίζεται συχνά το φαινόμενο "backfire". Βασικό ρόλο στην ανάπτυξη των συγκεκριμένων συστημάτων διαδραματίζουν τα ακροφύσια ψεκασμού (injectors) του μίγματος καύσης τα οποία, όπως έχει διαπιστωθεί, θα πρέπει να έχουν διαφορετικό σχεδιασμό από αυτά που χρησιμοποιούνται στις συμβατικές MEK. Κι αυτό, γιατί στις MEK υδρογόνου το μίγμα της καύσης τους (υδρογόνο – αέρας) χαρακτηρίζεται από αισθητά μικρότερη πυκνότητα από το μίγμα καύσης των συμβα-τικών MEK, με αποτέλεσμα τα ακροφύσια ψεκασμού να πρέπει να το διοχετεύουν μέσα στους χώρους καύσης σε αρκετά μεγαλύτερους όγκους ανά κύκλο καύσης του.

Σήμερα δεν έχει ακόμα καταστεί δυνατό να αναπτυχθούν ειδικά σχεδιασμένα ακροφύσια ψεκασμού για τις διάφορες MEK υδρογόνου που χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές. Αντίθετα, σ' αυτές εφαρμόζονται κατά πλείστον τα ακροφύσια ψεκασμού που χρησιμοποιούνται στις MEK φυσικού αερίου. Τα ακροφύσια αυτά προσεγγίζουν αρκετά, αλλά όχι απόλυτα, τις αυξημένες απαιτήσεις των MEK υδρογόνου για παροχή καυσίμου, μιας και το φυσικό αέριο, ως γνωστόν είναι κι αυτό αρκετά αραιό σαν αέριο, αλλά όχι τόσο αραιό όσο το υδρογόνο. Η χρησιμοποίηση όμως των συγκεκριμένων ακροφυσίων σε MEK υδρογόνου έχει και ένα πιο σοβαρό μειονέκτημα, το οποίο συνίσταται στη μείωση του χρόνου ζωής τους, λόγω της ανεπαρκούς λίπανσής τους κατά τη λειτουργία τους. Κι αυτό γιατί, ενώ στις MEK φυσικού αερίου οι εσωτερικές τους επιφάνειες δέχονται πάντα κάποια ποσότητα λιπαντικού ελαίου από το φυσικό αέριο που ψεκάζουν, στις MEK υδρογόνου το υδρογόνο που ψεκάζουν είναι εντελώς «ξηρό». Το λιπαντικό έλαιο που δέχονται στις MEK φυσικού αερίου, προέρχεται από τις εσωτερικές μικροδιαρροές των συμπιεστών που υπάρχουν μέσα σ' αυτές και το οποίο χρησιμοποιείται για τη λίπανσή τους. Αντίθετα, στις MEK υδρογόνου, οι συμπιεστές είναι κατασκευασμένοι έτσι ώστε να είναι σχεδόν απόλυτα αεροστεγείς, μιας και υπάρχει ο φόβος διαρροής του υδρογόνου προς «θερμά» σημεία της MEK (εκδήλωση του φαινομένου "backfire"). Έτσι το λιπαντικό έλαιο που υπάρχει μέσα σ' αυτούς δεν μπορεί να διαρρεύσει προς τα ακροφύσια ψεκασμού τους, με αποτέλεσμα το μίγμα της καύσης να μην λιπαίνεται αρκετά.

Επιπλέον, μέχρι σήμερα δεν έχει ακόμα καταστεί δυνατό να αναπτυχθούν κατάλληλα αυτόματα συστήματα λίπανσης των μιγμάτων καύσης των MEK

υδρογόνου, με αποτέλεσμα τα ακροφύσια ψεκασμού τους να παρουσιάζουν το συγκεκριμένο πρόβλημα που αναφέραμε παραπάνω.

Ακρόφυσια

Γενικά στις MEK (υδρογόνου ή συμβατικών καυσίμων), τα διάφορα ακροφύσια ψεκασμού που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα είναι δύο βασικών κατηγοριών:

- Τα ακροφύσια «έμμεσου» ψεκασμού, τα οποία ψεκάζουν το μίγμα της καύσης μέσα στους αυλούς εισαγωγής των κυλίνδρων τους.
- Τα ακροφύσια «άμεσου» ψεκασμού, τα οποία ψεκάζουν το μίγμα της καύσης απευθείας μέσα στους κυλίνδρους τους.

Στις MEK υδρογόνου, ο ψεκασμός του μίγματος καύσης με «άμεσο» τρόπο δεν έχει εξελιχθεί ακόμα σε ικανοποιητικό βαθμό και ο «άμεσος» ψεκασμός δεν εφαρμόζεται ακόμα πρακτικά. Αντίθετα, ο ψεκασμός με «έμμεσο» τρόπο έχει εξελιχθεί περισσότερο και έτσι χρησιμοποιείται συνήθως στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές. Στο μέλλον πάντως, τα ακροφύσια «άμεσου» ψεκασμού φαίνεται τελικά ότι θα αντικαταστήσουν αυτά του «έμμεσου» ψεκασμού, μιας και η βελτίωσή τους προχωράει με ικανοποιητικούς ρυθμούς. Ο «άμεσος» τρόπος ψεκασμού του μίγματος καύσης μέσα σε μία MEK υδρογόνου (και γενικότερα μέσα σε μία οποιαδήποτε MEK) προσφέρει κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι του «έμμεσου» ψεκασμού. Τα πλεονεκτήματα αυτά μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Ο «άμεσος» ψεκασμού οδηγεί σε σχεδόν πλήρη εξαφάνιση του φαινομένου "backfire", αφού κατά τη χρησιμοποίησή του το μίγμα της καύσης ψεκάζεται απευθείας μέσα στους κυλίνδρους των MEK (και εφόσον οι βαλβίδες εισαγωγής εκεί έχουν κλείσει) με αποτέλεσμα να είναι σχεδόν μηδενική η πιθανότητα να δημιουργηθεί αλυσιδωτό κύμα καύσης στο σύνολο του εσωτερικού της MEK.
- Με τη χρήση του «άμεσου» ψεκασμού μπορούμε να πετύχουμε μέχρι και 15% μεγαλύτερη παραγωγή έργου ανά κυβικό εκατοστό από το μίγμα καύσης (το έργο αυτό εκφράζεται μέσω της ενδεικνυόμενης μέσης ενεργού πίεσής του – Indicated Mean Effective Pressure ή IMEP) συγκρινόμενο με το έργο που παράγεται κατά τη χρησιμοποίηση του «έμμεσου» ψεκασμού. Η μεγαλύτερη αυτή παραγωγή έργου οφείλεται κυρίως στον περιορισμό της ποσότητας του αέρα που χρησιμοποιείται στο μίγμα της καύσης μέσα στους κυλίνδρους των MEK, μιας και κατά τον «άμεσο» ψεκασμό ένα μέρος της ποσότητας αυτής αντικαθίσταται από το εκάστοτε καύσιμο (π.χ. υδρογόνο).

11. Βαθμός Απόδοσης Υδρογόνου

Αν κοιτάξουμε το βαθμό απόδοσης μιας μηχανής με χρήση διαφορετικών καυσίμων, αλλά με τον ίδιο λόγο συμπίεσης και ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος, οι τιμές που θα προκύψουν θα διαφέρουν πολύ λίγο μεταξύ τους για διάφορα καύσιμα – και μάλιστα, η απόδοση της μηχανής με χρήση υδρογόνου είναι μεγαλύτερη από αυτή που επιτυγχάνεται με άλλα καύσιμα. Όμως, αν «παίζουμε», τόσο με τον λόγο συμπίεσης όσο και με το λόγο αέρα – καυσίμου, μπορούμε να καταλάβουμε καλύτερα το πλεονέκτημα χρήσης υδρογόνου, κυρίως επειδή το υδρογόνο μπορεί να καεί σε εξαιρετικά φτωχά μίγματα και να «αντέξει» σημαντικά μεγαλύτερους λόγους συμπίεσης της μηχανής. Συγκρίνοντας, λοιπόν, την απόδοση μηχανών με μίγματα διαφορετικών καυσίμων, μπορούμε να πούμε τα ακόλουθα:

Ο βαθμός απόδοσης μιας «ιδανικής μηχανής Otto» που καίει φυσικό αέριο είναι λίγο μεγαλύτερος από αυτόν μιας μηχανής βενζίνης κυρίως λόγω του μεγαλύτερου λόγου συμπίεσης που μπορεί να «αντέξει» το μίγμα αέρα / φυσικού αερίου. Από την άλλη, η μηχανή φυσικού αερίου χρησιμοποιεί την ίδια μέθοδο μεταβολής του φορτίου με τη μηχανή βενζίνης: η τιμή του λόγου αέρα – καυσίμου διατηρείται στοιχειομετρική, με βάση το άνοιγμα της πεταλούδας του γκαζιού (έλεγχος μίγματος με βάση την ποσότητα). Έτσι, οι διαφορές παρασιτικές απώλειες της μηχανής φυσικού αερίου είναι ίδιες με αυτές της μηχανής βενζίνης και οφείλονται, ακριβώς, στην παρεμβολή μιας πεταλούδας στη ροή αέρα προς του κυλίνδρους.

Αν συγκρίνουμε, τώρα, το βενζινοκινητήρα με μια «ιδανική μηχανή Otto» όπου το καύσιμο είναι υδρογόνο, το οποίο αναμιγνύεται με τον αέρα μέσω εμμέσου ψεκασμού, θα διαπιστώσουμε ότι ο κινητήρας υδρογόνου, ακόμα κι αν έχει λίγο μικρότερο λόγο συμπίεσης, θα έχει ελαφρά μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από το βενζινοκινητήρα. Η αιτία γι' αυτό βρίσκεται στη δυνατότητα του κινητήρα υδρογόνου να λειτουργήσει με μεγαλύτερο λόγο αέρα – καυσίμου (δηλαδή, με «φτωχότερο» μίγμα).

Η λειτουργία με φτωχό μίγμα προκαλεί κάποιες απώλειες απόδοσης, οι οποίες προέρχονται κυρίως από το γεγονός ότι, λόγω της χαμηλής ταχύτητας διάδοσης του μετώπου της, η καύση δεν προλαβαίνει να ολοκληρωθεί κανονικά μέχρι το τέλος του χρόνου εκτόνωσης της μηχανής, ενώ υπάρχουν και κάποιες επιπρόσθετες απώλειες που σχετίζονται με τις «μη ιδανικές» συνθήκες καύσης των φτωχών μιγμάτων. Από την άλλη όμως, οι απώλειες θερμότητας μέσω των τοιχωμάτων της μηχανής είναι μικρότερες, λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας καύσης του φτωχότερου μίγματος

Ένα σημαντικό όμως πλεονέκτημα της μηχανής υδρογόνου (παραπλήσιο με αυτό των Diesel) είναι οι χαμηλότερες απώλειες κατά την εισρόφηση του μίγματος

αέρα-καυσίμου μέσα στον κύλινδρο. Κι αυτό, επειδή η μηχανή λειτουργεί με την πεταλούδα του γκαζιού τελείως ανοιχτή και ο εκάστοτε καθορισμός του λόγου αέρα-καυσίμου γίνεται με προσαρμογή της ποσότητας ψεκασμού του υδρογόνου για την εισαγωγή της μηχανής (έλεγχος μίγματος με βάση την ποιότητα).

Αν ανεβάσουμε, σε μία ιδανική μηχανή Otto, το λόγο συμπίεσης στο 13:1 και την τροφοδοτήσουμε με υδρογόνο μέσω άμεσου ψεκασμού μέσα στον κύλινδρο, η απόδοση της φτάνει να είναι σχεδόν ίδια με αυτή μιας μηχανής άμεσου ψεκασμού βενζίνης στρωματοποιημένου μίγματος. Παρά τον μεγαλύτερο λόγο αέρα καυσίμου (φτωχότερο μίγμα), το πλεονέκτημα της μηχανής υδρογόνου από αυτής της βενζίνης. Έτσι, οι απώλειες που σχετίζονται με την «πραγματική» ή «μη ιδανική» καύση της μηχανής υδρογόνου, αποδεικνύεται ότι, τελικά, είναι λιγότερες από αυτές της καύσης ενός βενζινοκινητήρα που λειτουργεί με άμεσο ψεκασμό και διαστρωμάτωση του μίγματος.

Αν τώρα πάμε σε ακόμα μεγαλύτερο λόγο συμπίεσης (18:1, ας πούμε), τότε ο βαθμός απόδοσης της ιδανικής μηχανής Otto που καίει υδρογόνο ξεπερνάει αυτόν μιας μηχανής Diesel με παρόμοιο λόγο συμπίεσης. Οι απώλειες που σχετίζονται με τη «μη ιδανική» καύση του υδρογόνου είναι, τώρα, μικρότερες από αυτές της καύσης Diesel. Βέβαια, υπάρχει και ο αντίλογος, λόγω της μεγαλύτερης ταχύτητα καύσης του υδρογόνου, η πίεση και η θερμοκρασία που επιτυγχάνονται μέσα στη μηχανή είναι μεγαλύτερες, γεγονός που, τελικά, οδηγεί σε μεγαλύτερες απώλειες θερμότητας. Η θερμική της απόδοση είναι όμως λίγο χαμηλότερη από αυτή της μηχανής πετρελαίου, αλλά, από την άλλη, η ενδεικνυόμενη απόδοση της είναι μεγαλύτερη. Αυτό συμβαίνει, κατά πρώτον, λόγω της γρηγορότερης ταχύτητας καύσης του υδρογόνου, που μειώνει τις απώλειες «μη ιδανικής» καύσης και κατά δεύτερο, λόγω των σημαντικά μικρότερων απωλειών κατά την εισαγωγή του μίγματος στη μηχανή, καθώς η πεταλούδα του γκαζιού παραμένει πάντα τελείως ανοιχτή. Η διαφορά της τάξης του 8%, μεταξύ της ενδεικνυόμενης απόδοσης της μηχανής βενζίνης και της ενδεικνυόμενης απόδοσης της μηχανής υδρογόνου, οδηγεί σε μία μικρότερη κατανάλωση καυσίμου από τη μηχανή υδρογόνου, της τάξης του 25%.

12. Μελέτη των Ρύπων

Η χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο με αντίδραση του με οξυγόνο παράγει ηλεκτρισμό και θερμότητα και μοναδικό υποπροϊόν υδρατμούς και καθαρό νερό. Έτσι η τεχνολογία του υδρογόνου μπορεί να συμβάλει στη μείωση των αερίων θερμοκηπίου και στη βελτίωση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, φαινόμενα που έχουν προκληθεί από τη χρήση των συμβατικών μορφών καυσίμων. Ωστόσο, για τη χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο απαιτείται η παραγωγή του, εφόσον δεν

απαντάται μόνο του στη φύση. Έχουν αναπτυχθεί ποικίλες τεχνολογίες, οι περισσότερες, όμως, από τις οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την εκπομπή ρυπογόνων αερίων. Για παράδειγμα, η πλέον διαδεδομένη και οικονομικά βιώσιμη μέθοδος παραγωγής είναι η αναμόρφωση υδρογονανθράκων (κυρίως φυσικού αερίου) με ατμό. Ποσότητα υδρογονανθράκων αναμιγνύεται αρχικά με υπέρθερμο ατμό υπό πίεση και παρουσία καταλύτη. Ο άνθρακας στο καύσιμο οξειδώνεται από το οξυγόνο του ατμού και παράγει μονοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο μέσα από τον ατμό ελευθερώνεται. Το μονοξείδιο του άνθρακα στη συνέχεια υφίσταται μία κατεργασία με υδρατμό σε θερμοκρασία ειδική για να παραχθεί επιπλέον υδρογόνο αλλά ταυτόχρονα παράγεται και διοξείδιο του άνθρακα αποτελώντας τελικά την περιβαλλοντική αδυναμία της μεθόδου.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναβιώσει η τεχνολογία των κυψελίδων καυσίμων με χρήση υδρογόνου. Οι κυψελίδες καυσίμου εφευρέθηκαν το 1839 και βασίζονται στην αντίστροφη ηλεκτρόλυση: παράγουν ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνοντας υδρογόνο ως καύσιμο το οποίο οξειδώνεται ηλεκτροχημικά με οξυγόνο, με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και μοναδική εκπομπή το νερό. Η τεχνολογία των κυψελίδων καυσίμου καθιστά το υδρογόνο παραγωγό ηλεκτρικής ενέργειας τελικής χρήσης χωρίς επιβλαβείς εκπομπές και με μηδενικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Δύναται να βρουν εφαρμογή στον τομέα των μεταφορών (οχήματα) αλλά και στην ηλεκτροπαραγωγή. Οι ερευνητικές προσπάθειες έχουν δώσει ενθαρρυντικά αποτελέσματα και οι πρώτες επιδεικτικές εφαρμογές βρίσκονται κοντά στην εμπορευματοποίηση. Από την άλλη πλευρά, δύναται η παραγωγή υδρογόνου από ΑΠΕ, κυρίως αιολική ενέργεια και φωτοβολταϊκά όπου δεν υπάρχει καμία περιβαλλοντική επιβάρυνση από την παραγωγή και χρήση του υδρογόνου οπότε και το καθιστά το πλέον φιλικό καύσιμο για το περιβάλλον. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή δεν είναι ακόμη οικονομικά ανταγωνιστική, απαιτεί μεγάλες εκτάσεις για την εγκατάσταση των συστημάτων ΑΠΕ ενώ μπορεί να χαρακτηριστούν ρυπογόνες οι διαδικασίες κατά την κατασκευή, μεταφορά και εγκατάσταση των τεχνολογιών μετατροπής της αιολικής (ανεμογεννήτριες) ή ηλιακής (φωτοβολταϊκά) ενέργειας και ίσως της ενέργειας για την μεταφορά του υδρογόνου.

12. Συστήματα Ανεφοδιασμού



Σωλήνας πλήρωσης για ανεφοδιασμό με υγρό υδρογόνο.

Τα περισσότερα καύσιμα έχουν υψηλή ενεργειακή περιεκτικότητα και πρέπει να χειρίζονται με ασφάλεια. Το υδρογόνο, λοιπόν, δεν διαφοροποιείται από τα άλλα καύσιμα. Δεν θεωρείται ούτε λιγότερο ούτε περισσότερο επικίνδυνο σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα. Ο σωστός και ασφαλής χειρισμός ενός καυσίμου εξαρτάται από την καλή γνώση των φυσικών, χημικών και θερμικών του ιδιοτήτων, οπότε διαθέτοντας τις γνώσεις αυτές, και ο χειρισμός του υδρογόνου ως καύσιμο μπορεί να επιτευχθεί με ασφάλεια. Μάλιστα, μελέτες που έχουν διεξαχθεί χαρακτηρίζοντας με έναν συντελεστή ασφαλείας τα καύσιμα ανά ιδιότητά τους, κατατάσσουν το υδρογόνο συνολικά ως το πιο ασφαλές καύσιμο. Τα επίπεδα ασφαλείας ενός καυσίμου καθορίζονται από την τοξικότητά τους αλλά και τους κινδύνους πυρκαγιάς (επίπεδα ανάφλεξης).

Γενικότερα, τα καύσιμα από μόνα τους είναι τοξικά. Η τοξικότητά τους αυξάνεται καθώς ο λόγος άνθρακα / υδρογόνου αυξάνεται. Το υδρογόνο καθώς και τα κύρια προϊόντα καύσης του, όπως το νερό ή οι υδρατμοί, δεν είναι τοξικά. Ωστόσο οξείδια του αζώτου μπορεί να παραχθούν από την καύση του με τον αέρα, τα οποία παρουσιάζουν τοξικότητα, όπως όμως, συμβαίνει και με την καύση των ορυκτών καυσίμων.



Σωλήνας ανεφοδιασμού με υγρό υδρογόνο στη πίστα δοκιμών της BMW.

Μικρότερη πυκνότητα αερίου το καθιστά ασφαλέστερο, εφόσον αυξάνει την άνωσή του και την ταχύτητα διάχυσης σε περίπτωση διαρροής. Η πυκνότητα του υδρογόνου είναι 14,4 φορές μικρότερη από αυτήν του αέρα καθιστώντας το ιδιαίτερα πτητικό. Έτσι, ανεβαίνει γρήγορα ψηλά στον αέρα σε αντίθεση με το προπάνιο ή τους ατμούς βενζίνης που παραμένουν στο έδαφος. Κατά συνέπεια η χρήση του ενδείκνυται για εξωτερικούς ή καλά αεριζόμενους χώρους. Για τον ίδιο λόγο, όσο πιο μεγάλος είναι ο συντελεστής διάχυσης του αερίου τόσο πιο ασφαλές είναι το αέριο. Έτσι, το υδρογόνο, με το μεγαλύτερο συντελεστή διάχυσης ($0,61\text{cm}^3/\text{sec}$ σε σχέση π.χ. με το φυσικό αέριο $0,15\text{cm}^3/\text{sec}$) καίγεται στον αέρα σε πολύ μεγαλύτερο εύρος συγκεντρώσεων από ότι το μεθάνιο και τα όρια έκρηξής του είναι επίσης μεγαλύτερα, ωστόσο διαχέεται πιο γρήγορα από το μεθάνιο και τις βενζίνες.



Μεταφορά και διανομή υγρού υδρογόνου.

Το υδρογόνο δεν έχει τις ιδιότητες που να προειδοποιούν την παρουσία του. Είναι διαυγές, άχρωμο, άοσμο, και άγευστο και καίγεται σε αόρατη φλόγα. Συνεπώς, είναι δύσκολο να εντοπιστεί η φλόγα, ωστόσο ακτινοβολεί ελάχιστη

ενέργεια ώστε οι πυροσβέστες να μπορούν να πλησιάσουν πολύ κοντά. Επίσης, δύναται να προστεθούν ορισμένα χημικά ώστε να παρέχουν την απαραίτητη φωτεινότητα. Αντίστοιχα, η χαμηλή εκπεμπτικότητα της φλόγας του, αποτρέπει τον κίνδυνο να αναφλεγούν παρακείμενα αντικείμενα. Επιπρόσθετα, το καύσιμο καίγεται γρήγορα και συνεπώς καταναλώνεται σε μικρό χρονικό διάστημα.



Βαλβίδα ασφαλείας σε ντεπόζιτο υγρού υδρογόνου.

Τέλος, το υδρογόνο είναι άμεσα συγκρίσιμο όσον αφορά θέματα ασφαλείας με το φυσικό αέριο το δίκτυο μεταφοράς του οποίου είναι 1000 φορές λιγότερο επικίνδυνο από τα τάνκερ μεταφοράς αργού πετρελαίου, ανά μονάδα ενέργειας.

13. Πρότυπα Οχήματα Υδρογονοκίνησης

- **FX Clarity**

Στην Ιαπωνία κυκλοφορούν 15 FCX Clarity, στην Καλιφόρνια 25 και εμείς βρεθήκαμε απέναντι σε 2. Ποιες είναι οι εντυπώσεις μας; Το FCX Clarity είναι ένα εντυπωσιακά ευκολοδήγητο αυτοκίνητο που δεν διαφέρει από ένα μεγάλο συμβατικό σεντάν. Έχει περίπου το ίδιο μήκος με ένα Ford Mondeo και είναι λιγάκι βαρύτερο καθώς το σύνολο του φτάνει τα 1.625 κιλά. Ένα σημαντικό

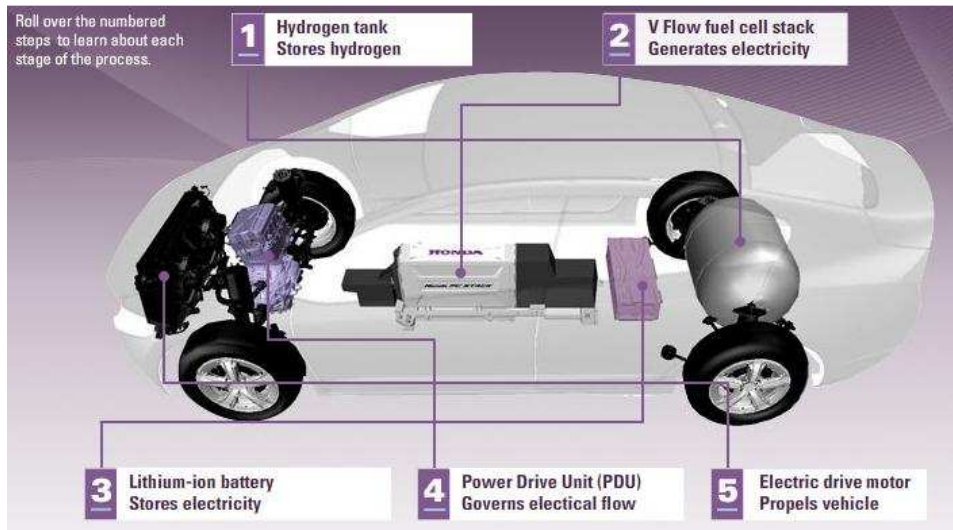


μειονέκτημα στα προηγούμενης τεχνολογίας οχήματα με ενεργειακές κυψέλες αφορούσε σε μία μικρή αδράνεια στο πάτημα του γκαζιού καθώς εκείνη την ώρα παράγεται η προς κατανάλωση ηλεκτρική ενέργεια. Η υστέρηση στο γκάζι επιλύεται με την προσθήκη ενός πυκνωτή ο οποίος καλύπτει το ενεργειακό “lag” του γκαζιού και το FCX Clarity κινείται με απόλυτα φυσιολογικό τρόπο. Τοποθετώντας τον επιλογέα στην θέση D, όπως σε ένα κλασικό αυτόματο κιβώτιο,

ξεκινάμε. Σε κάθε πάτημα του γκαζιού το FCX είναι αρκετά ζωηρό καθώς τα 256Nm δίνουν το παρόν σε οποιαδήποτε ταχύτητα κινείται το αυτοκίνητο (οι ηλεκτροκινητήρες προσφέρουν την μέγιστη ροπή τους σχεδόν από... το ρελαντί). Η καμπίνα είναι ιδιαίτερα ήσυχη θυμίζοντας λιμουζίνα, το πεντάλ των φρένων έχει εξαιρετική αίσθηση ενώ μέτρια είναι αυτή του τιμονιού καθώς στην ευθεία δεν υπάρχει επαρκής πληροφόρηση για την θέση των τροχών.

- Έγινε προσπάθεια για να μειωθεί όσο το δυνατόν το βάρος του οχήματος με τη μείωση σε επιμέρους σημεία, πλαίσιο, κυψέλες καυσίμου, ηλεκτροκινητήρας. Επίσης, με την τεχνική του «V Stack» μειώθηκαν οι διαστάσεις των κυψελών. Το βάρος των κυψελών καυσίμου είναι 67 κιλά. Συγκριτικά, το 1999 το βάρος των τότε κυψελών καυσίμου ήταν 202 κιλά και ο ηλεκτροκινητήρας απέδιδε ισχύ 60 kW.
- Ο τωρινός ηλεκτροκινητήρας αποδίδει 100 kW. Το όριο στροφών του είναι 12.500 σ.α.λ. Οι κυψέλες είναι τύπου ανταλλαγής πρωτονίων. Ο καταλύτης είναι πλατίνα. Υπάρχουν περίπου 500 στοιχεία στις κυψέλες καυσίμου. Οι μπαταρίες λιθίου-ιόντων είναι 288 V.

Διαστάσεις, Βάρος, αριθμός επιβατών	Συνολικό μήκος	4835 χλστ.	
	Συνολικό πλάτος	1845 χλστ.	
	Συνολικό ύψος	470 χλστ.	
	Μεταξόνιο	2800 χλστ.	
	Μετατρόχιο εμπρός/πίσω	1580/1595 χλστ.	
	Βάρος αμαξώματος	1625 κιλιά	
	Αριθμός επιβατών	4	
Επιδόσεις	Μέγιστη ταχύτητα	160 χλμ/ώρα	
Οικονομία/αυτονομία	Αυτονομία	460 χλμ.	
	Κατανάλωση υδρογόνου (Ισοδυναμία πετρελαίου)	2,8 λίτρα/100 χλμ.	
Powertrain	Κινητήριοι τροχοί	Κίνηση στους εμπρός τροχούς	
	Ηλεκτροκινητήρας	Τύπος	Σύγχρονος ηλεκτροκινητήρας AC (μόνιμου μαγνήτη)
		Μεγ. ιπποδύναμη	100 kW (134 ίπποι)
		Μέγ. ροπή	256 Nm (26,1 χλγμ)
	Συστοιχία κυψελών καυσίμου	Τύπος	PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
		Μέγιστη ισχύς	100 kW
Μπαταρία ιόντων λιθίου	Ισχύς	288 V	
Καύσιμο	Τύπος	Συμπιεσμένο αέριο υδρογόνο	
	Αποθήκευση	Ρεζερβουάρ υδρογόνου υψηλής πίεσης	
	Χωρητικότητα ρεζερβουάρ	171 λίτρα	
	Μέγιστη πίεση	35 MPa (350 bar)	



- **BMW**

Από το 2000 και μετά, έχουν αρχίσει να παρουσιάζονται επισήμως κάποια αυτοκίνητα με μηχανές υδρογόνου. Το πιο γνωστό, ίσως, από όλα αυτά είναι η BMW 750hL, που παρουσιάστηκε το 2000 και ήταν ουσιαστικά το αποτέλεσμα σχεδόν 30 ολόκληρων χρόνων έρευνας της BMW πάνω στην τεχνολογία χρήσης υδρογόνου.



Η BMW 750hL είναι ένα αυτοκίνητο με την καρότσα της στάνταρ BMW 750L, το οποίο χρησιμοποιεί μία μηχανή εσωτερικής καύσης που μπορεί να λειτουργήσει τόσο με βενζίνη όσο και με υδρογόνο, χρησιμοποιώντας δύο τελείως ανεξάρτητα συστήματα ψεκασμού για το κάθε καύσιμο, ξεχωριστά.



Το πρώτο τελειοποιημένο μοντέλο μικτών δυνατοτήτων
(κίνηση με βενζίνη ή/και υδρογόνο)
Sedan 750 hL της BMW.



Η καρδιά της 750 hL.

Η μηχανή αυτή είναι 12-κύλινδρη, 5.400 κυβικών εκατοστών, που αποδίδει με καύση υδρογόνου 200 ίππους. Η ιδέα πίσω από την ανάγκη ανάπτυξης τεχνολογίας γι' αυτή τη μηχανή βασίζεται στη χρήση υδρογόνου το οποίο έχει παραχθεί από ηλεκτρόλυση νερού και το οποίο υδρογόνο αποθηκεύεται σε ντεπόζιτο χωρητικότητας 140 λίτρων και σε θερμοκρασία -153°C .



Το ντεπόζιτο υδρογόνου της 750hL

Σε αυτή τη θερμοκρασία (μόλις 20,2 βαθμούς πάνω από το απόλυτο μηδέν), το υδρογόνο είναι σε υγρή μορφή και καταλαμβάνει μόλις το ένα χιλιοστό του αρχικού του όγκου. Για να διατηρηθεί όμως η θερμοκρασία του υδρογόνου σε τόσο χαμηλή τιμή, το ντεπόζιτο είναι μονωμένο από 70 επάλληλα στρώματα αλουμινίου και fibreglass μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού τοιχώματός του.



Τυπική διάταξη αποθήκευσης του υδρογόνου που χρησιμοποιεί η BMW.

Αντί για τη συμβατική μπαταρία, η BMW 750hL χρησιμοποιεί μία κυψέλη υδρογόνου, η οποία παράγει αρκετή ισχύ για να τροφοδοτεί πλήρως όλα τα ηλεκτρικά συστήματα του αυτοκινήτου (συμπεριλαμβανομένου του συστήματος κλιματισμού του αυτοκινήτου, για θέρμανση ή ψύξη του θαλάμου των επιβατών), ακόμα και όταν η μηχανή είναι τελείως σβηστή. Η αυτονομία του αυτοκινήτου είναι 400χλμ. και πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η λειτουργία του κλιματισμού μέσω της κυψέλης καυσίμου επιτρέπει στη μηχανή να καταναλώνει κάπου 1 λίτρο καυσίμου λιγότερο ανά 100 χλμ. Σε συνεργασία, μάλιστα, με την Shell, η BMW εξέλιξε μια νέα τεχνολογία για τον ανεφοδιασμό αυτοκινήτων υδρογόνου σε ειδικούς σταθμούς ανεφοδιασμού, σχεδιασμένους με βάση το πρωτοποριακό ντεπόζιτο της 750hL- ο πρώτος τέτοιος σταθμός ανεφοδιασμού υδρογόνου στον κόσμο άνοιξε στο Μόναχο το 1999.



Σταθμός ανεφοδιασμού υδρογόνου στο Μόναχο της Γερμανίας.

Η BMW δεν ησύχασε μετά την παρουσίαση της 750hL, αλλά εργάστηκε πυρετωδώς πάνω στην εξέλιξη και βελτιστοποίηση όλων των συστημάτων αυτού του αυτοκινήτου. Έτσι, όταν ήρθε η στιγμή να ανανεώσει τη σειρά 7, παρουσίασε ένα καινούργιο πειραματικό μοντέλο που μπορούσε να λειτουργήσει τόσο με βενζίνη όσο και με υδρογόνο: την BMW 745h. Το αυτοκίνητο αυτό έχει 8-κύλινδρη μηχανή σε διάταξη V, με χωρητικότητα 4.400 κυβικών εκατοστών.



Ο V8 κινητήρας καύσης τύπου "dual-mode" του εμπορικού μοντέλου Sedan 745h της BMW.

Η συγκεκριμένη V8 διαθέτει διπλό σύστημα μεταβλητού χρονισμού των βαλβίδων bi-VANOS, σύστημα Valvetronic, πλήρως μεταβαλλόμενης πολλαπλή εισαγωγής και αποδίδει 184 ίππους, επιτρέποντας στην BMW 745h να ξεπερνάει τα 200 χλμ./ώρα σε τελική ταχύτητα. η αυτονομία της να φτάνει τα 300 χλμ. με αποκλειστική χρήση υδρογόνου και τα κάπου 650 χλμ. με αποκλειστική χρήση βενζίνης. Και αυτό σημαίνει ότι, τελικά, με τα δύο καύσιμά του, το συγκεκριμένο αυτοκίνητο μπορεί να καλύψει σχεδόν 1000 χλμ. πριν χρειαστεί ανεφοδιασμό.

Με φιλοσοφία παρόμοια με αυτή της BMW ήταν και η εξέλιξη ενός αυτοκινήτου υδρογόνου τύπου Mini, που παρουσιάστηκε το 2001 και του οποίου η μηχανή υδρογόνου βασίστηκε στο βενζινοκινητήρα 1600 κυβικών εκατοστών του κανονικού Mini.



Το έκδοση υδρογόνου της Αγγλικής εταιρίας σε συνεργασία με τη BMW.

Με μία αξιοσημείωτη λεπτομέρεια. Το ντεπόζιτο υδρογόνου του συγκεκριμένου Mini καταλαμβάνει περίπου τον ίδιο χώρο με ένα στάνταρ ντεπόζιτο βενζίνης, χωρίς να περιορίζει το χώρο επιβατών ή το χώρο του πορτ μπαγκαζ. Ενώ όμως στην περίπτωση της BMW 750hL το υγρό υδρογόνο έπρεπε να θερμανθεί από τους -253oC ώστε να φτάσει θερμοκρασία περιβάλλοντος πριν από την καύση, στο Mini δοκιμάστηκε μία νέα τεχνολογία, που επιτρέπει στο υδρογόνο να ψεκάζεται σε υγρή μορφή στους αυλούς εισαγωγής και να ατμοποιείται εκεί καθώς αναμιγνύεται με τον αέρα, πριν εισαχθεί στους κυλίνδρους της μηχανής για ανάφλεξη και καύση. Έτσι, το μίγμα αέρα-υδρογόνου που δημιουργείται αντιστοιχεί (λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας και υψηλότερης πυκνότητας του), σε μεγαλύτερη μάζα ανά κύκλο, με αποτέλεσμα την παραγωγή μεγαλύτερης ισχύος από τη μηχανή και καλύτερο βαθμό απόδοσης.

- **Mazda**

Το πρώτο αυτοκίνητο υδρογόνου που εξέλιξε η Mazda ήταν το HR-X το 1991, με περιστροφική μηχανή Wankel. Δύο χρόνια αργότερα, το 1993, η Mazda εξέλιξε το Mazda MX-5 επίσης με μηχανή Wankel υδρογόνου σε πειραματική μορφή. Το υπόλοιπο της δεκαετίας του 1990, η Mazda ασχολήθηκε με την εξέλιξη αυτοκινήτων με



Εικόνα 14-Το engine bay του Mazda RX-8 Hydrogen RE

κυψέλες υδρογόνου, αλλά συνέχισε παράλληλα και την έρευνά της στις μηχανές υδρο-γόνου τύπου Wankel και τελικά, το 2003, στο Motor Show του Τόκιο, παρουσίασε το Mazda RX-8 με περιστροφικό κινητήρα υδρογόνου και το ονόμασε Mazda RX-8 Hydrogen RE.



Το Mazda RX-8 Hydrogen RE.

Ο κινητήρας του ονομάζεται Mazda RENESIS και λειτουργεί με απευθείας ψεκασμό του υδρογόνου (σε αέρια μορφή) μέσα στο θάλαμο του κάθε ρότορα. Για τον άμεσο αυτό ψεκασμό, χρησιμοποιούνται δύο injectors υδρογόνου ανά ρότορα, μία επιλογή που κρίθηκε απαραίτητη λόγω της πολύ χαμηλής πυκνότητας του υδρογόνου. Το καλό, στη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι ότι η γεωμετρία ενός

περιστροφικού κινητήρα Wankel επιτρέπει, έτσι κι αλλιώς, την «άνετη» τοποθέτηση δύο injectors ανά θάλαμο καύσης της μηχανής- κάτι που δεν θα ήταν εύκολο, για παράδειγμα, σε μία παλινδρομική μηχανή με πιστόνια, βαλβίδες και κυλίνδρους, λόγω του περιορισμένου διαθέσιμου χώρου. Εδώ, θα πρέπει να αναφερθεί, επιπροσθέτως, ότι επειδή οι κινητήρες με ρότορα προσφέρουν διαφορετικούς θαλάμους για την εισαγωγή του μίγματος και την καύση του, δεν μπορούν να παρουσιάσουν προβλήματα backfire σαν αυτά που εμφανίζονται σε μηχανές με πιστόνια.



Το υπερόζυτο αποθήκευσης υδρογόνου του Mazda RX-8 Hydrogen RE.

Φυσικά, στη συγκεκριμένη μηχανή υπάρχουν και injectors βενζίνης, ώστε το αυτοκίνητο να λειτουργεί και με την κλασσική μορφή ενέργειας, όποτε χρειαστεί. Η μετάβαση από καύση υδρογόνου σε καύση βενζίνης γίνεται πολύ απλά με τη χρήση ενός διακόπτη από τη θέση του οδηγού, φυσικά, υπάρχει διαφορά στην απόδοση ανάμεσα στα δύο καύσιμα: η συγκεκριμένη μηχανή RENESIS αποδίδει 210 ίππους με τη χρήση βενζίνης και μόλις 110 με τη χρήση υδρογόνου.

Κεφάλαιο 2^ο - Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα

1. Η αρχή της ιστορία των υβριδικών

Η πρώτη στροφή προς ένα υβριδικό όχημα πιστεύεται ότι είναι το **1665**, όταν ο ιησουίτης ιερέας Ferdinand Verbiest άρχισε να σχεδιάζει ένα απλό τροχοφόρο όχημα που θα μπορούσε να κινείται με ατμό ή να έλκεται από ένα άλογο. Δεκαπέντε χρόνια ο Verbiest εργάστηκε για την τελειοποίηση και την δημιουργία του οχήματος, αν και δεν υπάρχουν αποδείξεις ότι αυτό το υβριδικό όχημα τελικά χρησιμοποιήθηκε. Το **1769** ο Nicholas Cugnot κατασκεύασε μια μηχανή ατμού-powered για μεταφορά η οποία ήταν σε θέση να προχωρήσει με ταχύτητα μεγαλύτερη των έξι χιλιομέτρων την ώρα. Μεταξύ **1832** και **1839** (το ακριβές έτος δεν είναι αβέβαιο), ο Σκωτσέζος Robert Anderson εφηύρε το πρώτο ηλεκτροκίνητο όχημα. Το όχημα είχε περιορισμένες δυνατότητες και μια μπαταρία που ήταν δύσκολο να φορτιστεί. Το **1835** ένα μικρής κλίμακας ηλεκτρικό αυτοκίνητο σχεδιάστηκε από τον καθηγητή Stratingh του Γκρόνινγκεν (Ολλανδία), και κατασκευάστηκε από το βοηθό του Christopher Becker. Το **1870**, ο Sir David Solomon έφερε στο προσκήνιο έναν ελαφρύτερο κινητήρα για μεταφορά, αλλά εξακολουθούν να αντιμετωπίζονται προβλήματα σε σχέση με μια μπαταρία που δεν θα μπορούσε εύκολα και αξιόπιστα να φορτιστεί. Με ένα πολύ συγκεκριμένο τρόπο και μια δαπανηρή διαδικασία για την φόρτιση η ιδέα αυτή δεν πάει μακριά. Το **1891** κατασκευάστηκε ένα ηλεκτρικό τρίκυκλο από τους A. L. Ryker και William Morrison και ένα βαγόνι εμπορευμάτων έξι-επιβατών. Από το **1895** οι Αμερικανοί άρχισαν να αφιερώνουν την προσοχή τους στα ηλεκτρικά οχήματα. Το **1897** η πρώτη εμπορική εφαρμογή καθιερώθηκε ως στόλος των ταξί πόλης της Νέας Υόρκης που χτίστηκε από την ηλεκτρική επιχείρηση μεταφορών και βαγονιών εμπορευμάτων της Φιλαδέλφειας. Τη χρονιά εκείνη, το Λονδίνο Cab Electric Company άρχισε να παρέχει υπηρεσίες στην πόλη. Μετονομάζεται σε "Bersey Cab" μετά την εφεύρεση του Walter Bersey, η ταχύτητα της καμπίνας θα μπορούσε να φτάσει μέχρι και τα πενήντα μίλια πριν επαναφορτιστεί η μπαταρία. Το **1898** η Porsche ανέπτυξε τον πρώτο ηλεκτρικό κινητήρα εσωτερικής καύσης. Με αυτό το όχημα, το Lohner Electric Chaise, θα μπορούσαν να ταξιδέψουν σε απόσταση σαράντα μίλια με μπαταρίες και μόνο. Το **1899** ένας Βέλγος δημιούργησε το ηλεκτρικό αγωνιστικό αυτοκίνητο αποκαλούμενο «La Jamais Contente» και έθεσε ένα παγκόσμιο αρχείο για την ταχύτητα εδάφους (68 mph) που σχεδιάστηκε από τον Camill Jenatzy. Το **1900** η εταιρεία Lohner είχε παρουσιάσει στην Έκθεση του Παρισιού ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο βασισμένο στη ιδέα ενός 25χρονου τότε μηχανικού, του ιδρυτή της ομώνυμης μετέπειτα θρυλικής φίρμας Ferdinand Porsche. Το αυτοκίνητο αυτό διέθετε δύο

ηλεκτροκινητήρες ενσωματωμένους στις πλήμνες των μπροστινών τροχών, χωρίς να γίνεται χρήση κιβωτίου ταχυτήτων, ημιαξόνων ή διαφορικού. Το **1902** η Lohner παρουσίασε και υβριδική τετρακίνητη έκδοση του μοντέλου της με ηλεκτροκινητήρες σε όλους τους τροχούς, όπου ένας βενζινοκινητήρας κινούσε την απαραίτητη για την παραγωγή της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας γεννήτρια. Στην πορεία παρουσιάστηκαν διάφορα πρωτότυπα, όπως του Krieger το **1903**. Το **1905**, όταν ο H. Piper κατέθεσε αίτηση κατοχύρωσης ευρεσιτεχνίας για ένα υβριδικό αυτοκίνητο, το οποίο είχε έναν ηλεκτροκινητήρα ο οποίος θα λειτουργούσε επικουρικά στο βασικό μοτέρ (βενζινοκινητήρα), ώστε να επιτυγχάνεται επιτάχυνση 0-40 km/h σε χρόνο 10 sec. Δεδομένου ότι οι όροι “κατανάλωση” και “εκπομπές ρύπων” δεν είχαν ακόμα επινοηθεί, η κατασκευή του οχήματος του Piper επικεντρώθηκε στις επιδόσεις και όχι στην οικονομία ή στη φιλική προς το περιβάλλον λειτουργία. Η έλλειψη ηλεκτρικού δικτύου και το υπερβολικό διάστημα που χρειάστηκε για την έγκριση της πατέντας αποδείχθηκαν δυστυχώς καταδικαστικοί παράγοντες για την ιδέα του Piper. Το **1917** η Woods Motor Vehicle Company παρουσίασε το μοντέλο Dual Power, το οποίο διέθετε βενζινοκινητήρα και ηλεκτροκινητήρα οι οποίοι μπορούσαν να λειτουργήσουν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο. Ένας μαγνητικός συμπλέκτης που συνέδεε και απομόνωνε τους δύο κινητήρες με το σύστημα μετάδοσης μέσω δύο διακοπών στο τιμόνι, έδινε τη δυνατότητα στον οδηγό να επιλέξει μεταξύ του ηλεκτροκινητήρα και του βενζινοκινητήρα για την κίνηση του οχήματος, ή και τους δύο όταν ήθελε μέγιστη ισχύ. Επιπλέον, όταν το αυτοκίνητο επιβράδυνε, ο οδηγός μπορούσε να φορτίσει τις μπαταρίες του οχήματος εμπλέκοντας τον ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος σε αυτήν την περίπτωση λειτουργούσε ως γεννήτρια. Στα τέλη του **1916**, με τα ξύλα εφηύραν ένα υβριδικό αυτοκίνητο που είχε και μια εσωτερική μηχανή και μια ηλεκτρική μηχανή. Τα ηλεκτρικά οχήματα απόλαυσαν την επιτυχία στη δεκαετία του '20. Τα ηλεκτρικά οχήματα, εκτός από λίγα, εξαφανίστηκαν μέχρι το **1935**. Τα έτη μέχρι τη δεκαετία του '60 ήταν νεκρά έτη για την ηλεκτρική ανάπτυξη οχημάτων. Την δεκαετία του '60 και τη δεκαετία του '70 εμφανίστηκε ανάγκη για τα εναλλακτική τροφοδοσία οχημάτων. Τα προβλήματα των εκπομπών εξάτμισης από τις εσωτερικές μηχανές εμφανίζονται και πρέπει να μειωθεί η εξάρτηση από το ακατέργαστο πετρέλαιο. Το **1964** η Potomac Edison Company παραδίδει το πρώτο ηλεκτρικό φορτηγό Battronic. Αυτό το φορτηγό ήταν ικανό των ταχυτήτων 25 mph, και μιας σειράς 62 μιλίων. Το **1969** General Motors 512 σχεδιάστηκε για να τρέχει εξ ολοκλήρου σε ηλεκτρική ενέργεια με ταχύτητα μικρότερη από 10 μίλια ανά ώρα. Από 10 -13 μίλια ανά ώρα έτρεχε με συνδυασμό ηλεκτρικής ενέργειας και αερίου καύσης. Για ταχύτητα μεγαλύτερη από 13 μίλια ανά ώρα χρησιμοποιεί μόνο τον κινητήρα Φ.Α. Μετά το εμπάργκο πετρελαίου του **1973**, το ενδιαφέρον των υβριδικών αυτοκινήτων αυξήθηκε. Η Volkswagen ανέπτυξε ένα υβριδικό όχημα το οποίο είχε

δείξει εκτενώς σε όλη την αυτοκινητοβιομηχανία των Ηνωμένων Πολιτειών και σε άλλους χώρους. Το ταξί εκείνο είχε το υψηλότερο εύρος απόδοσης από οποιοδήποτε υβριδικό όχημα που είχε εκτεθεί ποτέ μέχρι τότε. Το Battronic λειτούργησε με γενικό ηλεκτρικό από το **1973** ως το **1983** για να παραγάγει 175 φορτηγά χρησιμότητας για τη χρήση στη βιομηχανία και για να καταδείξει τις ικανότητες των οχημάτων με μπαταρίες. Το Battronic ανέπτυξε επίσης και παρήγαγε περίπου 20 λεωφορεία επιβατών στα μέσα της δεκαετίας του '70. Δύο επιχειρήσεις ήταν ηγέτες στην ηλεκτρική παραγωγή αυτοκινήτων κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Η μία ήταν η Sebring η οποία παρήγαγε πάνω από 2.000 «αυτοκίνητα πόλης». Αυτά τα αυτοκίνητα είχαν μια μέγιστη ταχύτητα 44 mph, μια κανονική ταχύτητα 38 mph και μπορούσαν να διανύσουν 50 έως 60 μίλια. Η άλλη επιχείρηση ήταν η εταιρία Elcar, η οποία παρήγαγε το «**Elcar**». Το Elcar είχε μια μέγιστη ταχύτητα 45 mph, και μπορούσε να διανύσει 60 μίλια. Το **1975**, η Ηνωμένη ταχυδρομική υπηρεσία αγόρασε 350 ηλεκτρικά τζιπ παράδοσης από την αμερικανική επιχείρηση μηχανών «American Motors» σε ένα πρόγραμμα δοκιμής. Δυστυχώς, το έργο δεν είχε το επίπεδο της επιτυχίας που όλοι ήλπιζαν. Αυτά τα τζιπ είχαν μέγιστη ταχύτητα 50 mph και μπορούσαν να διανύσουν 40 μίλια με μια ταχύτητα 40 mph. Ο χρόνος επαναφορτίσεων ήταν 10 ώρες. Η Arthurs Dave ανέπτυξε ένα υβριδικό όχημα το **1979**, με τη χρήση του Opel GT, το οποίο είχε μια σειρά από έξι-volt μπαταρίες. Η Arthurs ήταν σε θέση να αποδείξει ότι το υβρίδιο θα μπορούσε να διανύσει απόσταση 75 μιλίων ανά γαλόνι. Η Audi το **1989** παρουσίασε ένα υβριδικό όχημα, με το όνομα «Audi Duo». Το υβριδικό χρησιμοποιούσε έναν ηλεκτροκινητήρα 12,6 ίππων, ο οποίος τροφοδοτείται από μια μπαταρία καδμίου νικελίου. Το **1994** η εταιρεία electricar στις ΗΠΑ κατασκεύασε το Chevrolet s-10 φορτηγό, το οποίο τροφοδοτήθηκε από διπλές μηχανές εναλλασσόμενων ρευμάτων και όξινες μπαταρίες μολύβδου. Μπορούσε να διανύσει περίπου 60 μίλια και θα μπορούσε να επαναφορτιστεί σε λιγότερο από 7 ώρες.

Ένα πρόωρο όχημα της δεκαετίας του '90 ήταν το φορτηγό Ecostar με τις μπαταρίες θείου και νατρίου και μηχανές εναλλασσόμενων ρευμάτων. Η μέγιστη ταχύτητα ήταν 70 mph και μέγιστη διανυόμενη απόσταση 80 έως 100 μίλια. Ενώ περίπου 100 Ecostars παρήχθησαν, δεν προσφέρθηκε ποτέ εμπορικά. Το αποκαλούμενο EV1, ήταν ένα αυτοκίνητο που τροφοδοτήθηκε από μια liquid-cooled μηχανή εναλλασσόμενων ρευμάτων και lead-acid μπαταρίες. Το EV1 είχε μια μέγιστη ταχύτητα 80 mph, και μπορούσε να διανύσει 80 μίλια, και θα μπορούσε να επιταχύνει από 0 έως 50 mph σε λιγότερο από 7 δευτερόλεπτα. Εκτός από EV1, η General Motors πρόσφερε ένα ηλεκτρικό όχημα το επανεκδομένο Chevrolet s-10. Αυτό το όχημα μπορούσε να διανύσει 45 μίλια και επιτάχυνε από 5 έως 50 mph σε 10 δευτερόλεπτα. Το TOYOTA RAV4 και το EPIC Chrysler

miniβαν ήταν ηλεκτρικά οχήματα που ήταν διαθέσιμα κατά τη διάρκεια του **1998**. Εξοπλίστηκαν με τα προηγμένα πακέτα μπαταριών υδρίδιων μετάλλων νικελίου. Το **1997**, κυκλοφόρησε το Toyota Prius αποκλειστικά για την ιαπωνική αγορά. Το Prius πώλησε 18.000 αυτοκίνητα και φαινόταν να είναι η πρώτη μαζική παραγωγή στην αγορά υβριδικών οχημάτων στον κόσμο. Η Honda παρουσίασε στην αμερικανική αγορά το **1999** το Insight, ένα ελαφρύ υβριδικό μοντέλο με δύο πόρτες. Στα υβριδικά αυτοκίνητα του 21^{ου} αιώνα θα αναφερθούμε εκτενέστερα στα επόμενα κεφάλαια αυτής της εργασίας και θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε την λειτουργία τους.

2. Υβριδική Τεχνολογία

1) Εισαγωγή

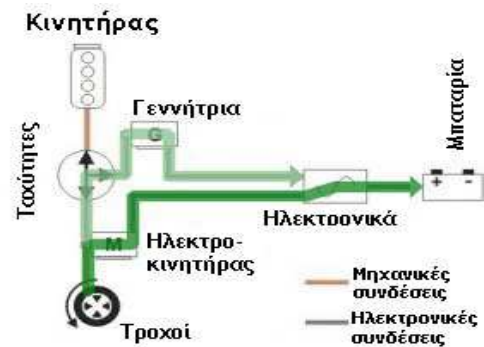
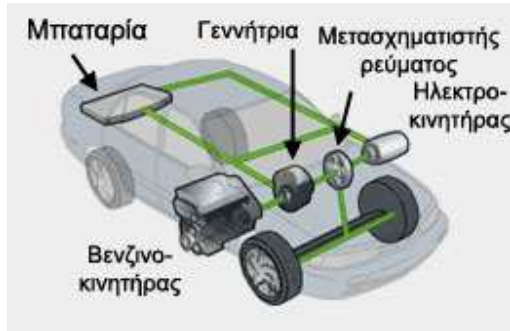
Η υβριδική τεχνολογία περιλαμβάνει τις συσκευές που αξιοποιούν δύο ή περισσότερες πηγές ενέργειας ώστε να πραγματοποιήσουν το έργο και το σκοπό για τον οποίο εφευρέθηκαν. Το σύστημα συσκευών, που χρησιμοποιεί το υβριδικό αυτοκίνητο, αξιοποιεί δύο πηγές ενέργειας για την εξαγωγή της κίνησης στους τροχούς. Την θερμοδυναμική που παράγεται από την καύση του καυσίμου στον κινητήρα και την ηλεκτρική η οποία παράγεται από το σύστημα του ηλεκτροκινητήρα.



Για την ομαλή λειτουργία και σωστή επικοινωνία του κινητήρα με τον ηλεκτροκινητήρα, συνδυάστηκαν με συγκεκριμένο τρόπο και άλλες συσκευές όπως η μπαταρία, ο συσσωρευτής και πολλές άλλες. Ένα πλήρως υβριδικό όχημα μπορεί να κινείται μόνο με τον βενζινοκινητήρα ή μόνο με τον ηλεκτροκινητήρα ή και τους δύο ταυτόχρονα. Τα «ήπια» και πλήρως υβριδικά οχήματα επιτυγχάνουν μεγάλα οφέλη στην εξοικονόμηση καυσίμου και στις εκπομπές CO₂. Παρά το γεγονός ότι τα παρόντα υβριδικά οχήματα δεν φορτίζονται με εξωτερικά μέσα, τα επόμενα χρόνια αναμένεται να κατασκευαστούν εξωτερικά φορτιζόμενα υβριδικά οχήματα (Plug-In hybrid). Μερικά από τα πιο σύγχρονα υβριδικά αυτοκίνητα πωλούνται ως υψηλού σχεδιασμού και επιδόσεων παραλλαγές των συμβατικών αυτοκινήτων.

2) Κύρια Μέρη του Υβριδικού αυτοκινήτου

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



- **Ο ηλεκτροκινητήρας** αναλαμβάνει εξ ολοκλήρου την κίνηση του αυτοκινήτου σε σταθερή, ομαλή πορεία και μη κεκλιμένο επίπεδο. Παρέχει επιπλέον ισχύ στο βενζινοκινητήρα μόνο στις υπόλοιπες περιπτώσεις όπως κατά την επιτάχυνση, στο κεκλιμένο επίπεδο (ανηφόρα). Είναι μόνιμα συνδεδεμένος με το πλανητικό κιβώτιο ταχυτήτων τύπου CVT όπου ρυθμίζεται η κατανομή ισχύος ανάμεσα στις δύο μονάδες (ηλεκτροκινητήρας - βενζινοκινητήρας) για τη μετάδοση της κίνησης στους τροχούς. Φυσικά ο ηλεκτροκινητήρας επικοινωνεί με τη γεννήτρια και τις μπαταρίες όπου δέχεται ενέργεια. Η μεγάλη επανάσταση στο συγκεκριμένο μέρος του οχήματος είναι ότι κατά το φρενάρισμα μετατρέπεται σε γεννήτρια η οποία επαναφορτίζει τις μπαταρίες.
- **Ο κινητήρας εσωτερικής καύσεως (βενζινοκινητήρας)** καταναλώνει αμόλυβδη βενζίνη, όπως και οι συμβατικοί κινητήρες. Το μπλοκ, όπως και η κυλινδροκεφαλή, είναι κατασκευασμένα από κράμα αλουμινίου, ενώ η εξαγωγή αποτελείται από ανοξείδωτο χάλυβα χαμηλής μάζας μειώνοντας το συνολικό βάρος κατασκευής. Αρχικά φαίνεται ότι η απόδοση του είναι μικρή αλλά είναι κατάλληλη για την αντιστάθμιση του φορτίου, προκειμένου να υπάρξει ομαλή συνεργασία με τον ηλεκτροκινητήρα. Το γκάτζι είναι ηλεκτρονικό για ακριβέστερη "πληροφόρηση" προς το σύστημα ψεκασμού, ενώ την ποιότητα των καυσαερίων "επιβλέπει" ένας τριοδικός καταλυτικός μετατροπέας υψηλής πυκνότητας και ταχείας προθέρμανσης για μέγιστη απόδοση.
- **Η γεννήτρια** λειτουργεί μέσω του βενζινοκινητήρα και χρησιμεύει, επαναφορτίζει την συστοιχία των μπαταριών και ενισχύει τον

ηλεκτροκινητήρα. Ως δευτερεύουσες λειτουργίες εκκινεί τον βενζινοκινητήρα (αφού δεν υπάρχει μίζα), και λειτουργεί όπως και μια απλή γεννήτρια στους συμβατικούς κινητήρες.

- **Ο μετασχηματιστής** αναλαμβάνει να μετατρέψει το συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα (DC) της μπαταρίας σε εναλλασσόμενο. Με αμφίδρομο όμως τρόπο μπορεί να μετατρέψει το εναλλασσόμενο σε συνεχές κατά τη διαδικασία επαναφόρτισης της μπαταρίας. Επίσης, μετατρέπει την υψηλή τάση σε συμβατική, 12V, για την τροφοδότηση των επιμέρους λειτουργιών του αυτοκινήτου (ηχοσύστημα, φώτα, κλιματισμός).

3) Λειτουργίες κατά την οδήγηση – Αναπαραγωγικό Φρενάρισμα

Η λειτουργία του συστήματος του υβριδικού κατά την οδήγηση, διαφοροποιείται σε πέντε περιπτώσεις.

Εκκίνηση	Οδήγηση	Προσπέραση	Φρενάρισμα	Τέρμα
Κινητήρας κλειστός EV drive	Κινητήρας ή EV drive ή Κινητήρας + Ηλεκ/τήρας	Κινητήρας + Ηλεκ/τήρας	Κινητήρας κλειστός + Ανα-παραγωγικό φρένο	Κινητήρας κλειστός
Μηδενική κατανάλωση	Καλύτερη θερμική απόδοση της μηχανής		Ενεργειακή ανάκτηση	Μηδενική κατανάλωση

"Examples of Toyota's approach on CO2reduction"

Nobuhiko KOGAToyota Motor Co.

Στην 1η περίπτωση: το αυτοκίνητό μας είναι σταματημένο, έτοιμο για εκκίνηση, και με ενεργοποιημένο το σύστημα EV.

Στην 2η περίπτωση: όταν το αυτοκίνητο κινείται με σταθερή πορεία τότε λειτουργεί ο κινητήρας, ή το σύστημα EV, ή ο κινητήρας μαζί με τον ηλεκτροκινητήρα.

Στην 3η περίπτωση: όπου θέλουμε ή να προσπεράσουμε ή να ανέβουμε κεκλιμένο επίπεδο, λειτουργεί ο κινητήρας μαζί με τον ηλεκτροκινητήρα.

Στην 4η περίπτωση: κατά το φρενάρισμα γίνεται απόσβεση της ενέργειας που δώσαμε για να προσπεράσουμε ή να ανέβουμε το κεκλιμένο επίπεδο, και αυτή ανάκτηση γίνεται από τα φρένα με συγκεκριμένη τεχνολογία.

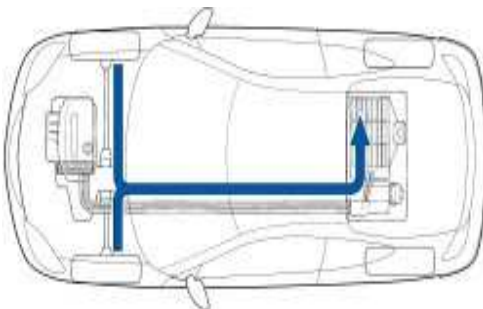
Στην 5η περίπτωση: το υβριδικό όχημά μας είναι ακινητοποιημένο, άρα κλειστός και ο κινητήρας και μηδενική η κατανάλωση.

Μερικά υβριδικά μοντέλα είναι εξοπλισμένα με το "EV Drive Mode" όπου επιτρέπουν στον οδηγό να επιλέξει την οδήγηση μόνο με τον ηλεκτροκινητήρα - με απλά λόγια, να οδηγήσει με κλειστό τον κινητήρα (υγρού καυσίμου). Ο τρόπος κίνησης EV ακυρώνεται αυτόματα εάν οποιοσδήποτε από τους ακόλουθους όρους εμφανίζεται:

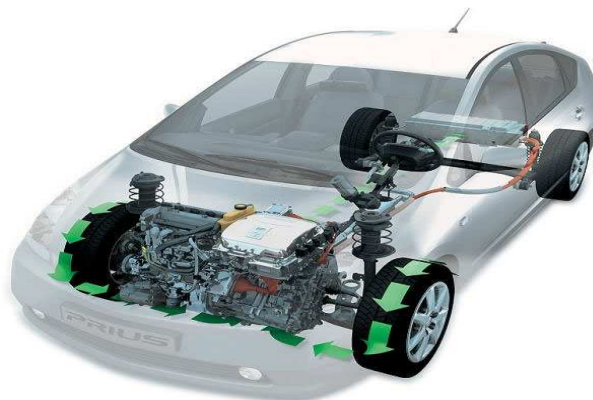
- Πτώσεις μπαταριών κάτω από το διευκρινισμένο επίπεδο,
- Η διακινούμενη ταχύτητα οχημάτων υπερβαίνει περίπου τα 55 km/h,
- Όταν τον πετάλι επιταχύνσεως (γκάζι), υπερβαίνει συγκεκριμένη γωνία.

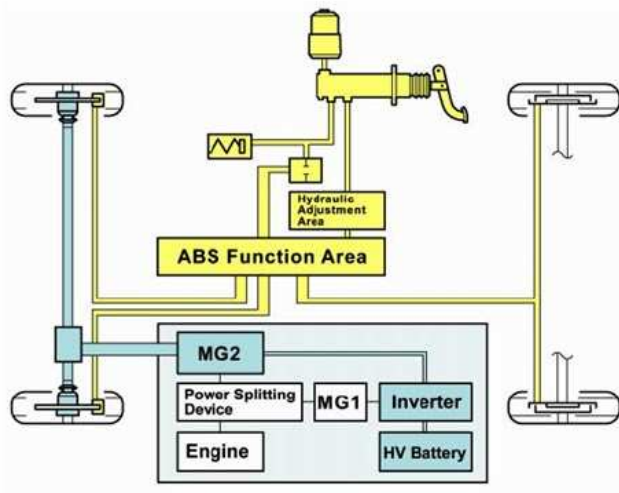
Φυσικά οι όροι αυτοί διαφέρουν από μοντέλο σε μοντέλο.

Αναπαραγωγικό Φρενάρισμα: Όταν χρησιμοποιούμε τα φρένα σε ένα συμβατικό αυτοκίνητο, η κινητική ενέργεια που έχει όταν μετακινείται μετατρέπεται σε θερμότητα. Σε ένα υβριδικό αυτοκίνητο, τα φρένα παίρνουν ένα ποσοστό από την ενέργεια αυτή και αντί να χαθεί στο περιβάλλον, χρησιμοποιώντας την ηλεκτρική μηχανή ως γεννήτρια την εναποθέτει πίσω στις μπαταρίες.



Το αναπαραγωγικό φρενάρισμα χρησιμοποιεί το γεγονός ότι μια ηλεκτρική μηχανή μπορεί επίσης να ενεργήσει ως γεννήτρια. Η ηλεκτρική μηχανή κίνησης του οχήματος επανασυνδέεται ως γεννήτρια κατά τη διάρκεια του φρεναρίσματος και η παραγωγή της συνδέεται με ένα ηλεκτρικό φορτίο. Συγκεκριμένα, αυτό είναι το φορτίο στη μηχανή που παρέχει το αποτέλεσμα του φρεναρίσματος.





Αναγεννητική πέδη - Διάγραμμα ροής

ABS Function area: Περιοχή λειτουργίας του ABS

MG1: Γεννήτρια 1

MG2: Γεννήτρια 2

Inverter: Αναστροφέας

HV Battery: Μπαταρία υψηλής τάσης

Engine: Κινητήρας

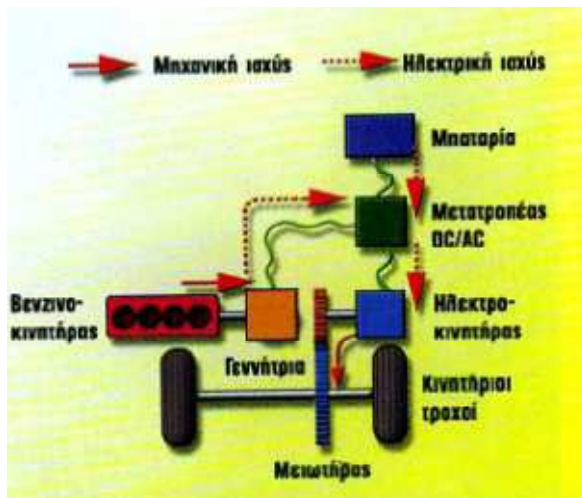
Στο παραπάνω διάγραμμα ροής παρατηρούμε ότι η γεννήτρια MG1 είναι συνδεδεμένη μηχανικά με τον εμπρόσθιο άξονα του οχήματος. Όταν πατάμε φρένο, η γεννήτρια 1 στέλνει πίσω στην μπαταρία υψηλής τάσης ένα ποσοστό ενέργειας. Ο αναστροφέας(inverter), μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές για να φορτιστεί η μπαταρία.

4) Μετάδοση Ισχύος Υβριδικών

Τα υβριδικά συστήματα μετάδοσης ισχύος μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κύριους τύπους ανάλογα με τη συνδεσμολογία:

- Σειριακά
- Παράλληλα
- Μικτά, που είναι ουσιαστικά συνδυασμός σειριακών και παράλληλων.

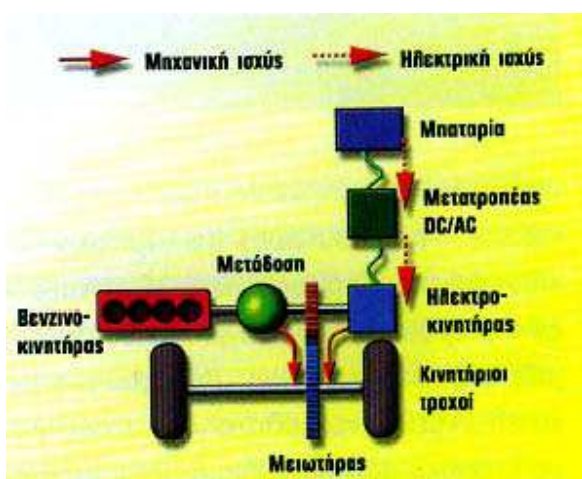
Σε ένα σειριακό υβριδικό σύστημα μετάδοσης ισχύος (Σχήμα 3.1) την κίνηση δίνει αποκλειστικά ο ηλεκτροκινητήρας ο οποίος δέχεται ηλεκτρική ενέργεια είτε από μια συστοιχία μπαταριών είτε από μια Μ.Ε.Κ. μέσω γεννήτριας. Ο κινητήρας είναι συνήθως μικρότερος σε ένα σειριακό σύστημα μετάδοσης ισχύος καθώς έχει να αντιμετωπίσει μέτριες σε ισχύ οδηγικές απαιτήσεις. Αφού δεν είναι συνδεδεμένος απευθείας στο κιβώτιο ταχυτήτων, λειτουργεί σε συγκεκριμένες



Εικόνα 16- Σειριακή συνδεσμολογία σε υβριδικό όχημα με βενζινοκινητήρα

προκειμένου να αποδώσει την απαιτούμενη ισχύ. Ένας τόσο ισχυρός κινητήρας απαιτεί, με τη σειρά του, μεγάλο μέγεθος και βάρος συσσωρευτών προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του σε ρεύμα, όταν ο οδηγός επιταχύνει – έστω κι αν υπάρχει δευτερεύουσα γραμμή που να μεταφέρει το ρεύμα της γεννήτριας απευθείας στον ηλεκτροκινητήρα, παρακάμπτοντας τους συσσωρευτές.

Σε έναν παράλληλο υβριδικό σχηματισμό και ο κινητήρας και ο ηλεκτροκινητήρας παράγουν την ισχύ για την κίνηση των τροχών όντας μόνιμα και ανεξάρτητα συνδεδεμένοι στο κιβώτιο ταχυτήτων. Αφού, σε αυτόν τον σχηματισμό, ο κινητήρας είναι συνδεδεμένος απευθείας στους τροχούς, εξαλείφεται η μείωση της απόδοσης κατά την μετατροπή της μηχανικής σε ηλεκτρική, ενέργειας που συμβαίνει στα σειριακά HEVs, κάτι που καθιστά αυτό το είδος των υβριδικών κατάλληλα για οδήγηση σε αυτοκινητοδρόμους. Σε αυτόν τον σχηματισμό, ο ηλεκτροκινητήρας έχει το ελάχιστο εκείνο μέγεθος που απαιτείται για τη μετακίνηση του αυτοκινήτου, με μικρή ταχύτητα, μέσα στην πόλη. Ο εμβολοφόρος κινητήρας από την άλλη έχει το ελάχιστο εκείνο μέγεθος που απαιτείται προκειμένου το αυτοκίνητο να μπορεί να κινείται με την επιθυμητή μέγιστη (σταθερή) ταχύτητα σε οριζόντιο επίπεδο, με άπνοια. Ταυτόχρονα, διοχετεύει ένα μικρό μέρος της ισχύος του στη γεννήτρια, προκειμένου να



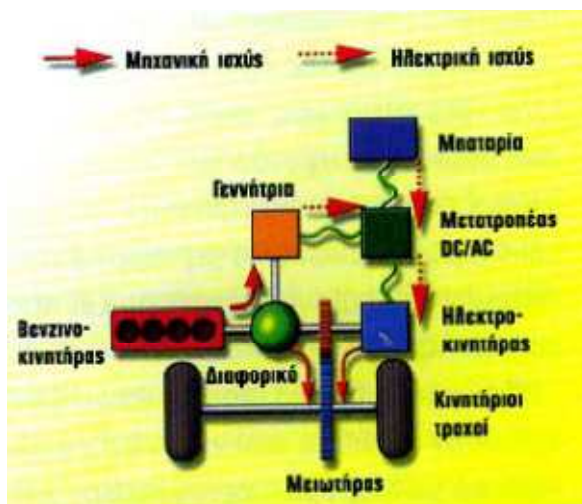
Εικόνα 15- Παράλληλη συνδεσμολογία σε υβριδικό όχημα

στροφές/φορτίο του πεδίου λειτουργίας όπου η απόδοση είναι υψηλή ή μπορεί να βρίσκεται προσωρινά ακόμα και εκτός λειτουργίας. Έτσι έχουμε ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης της βενζίνης. Η συστοιχία των μπαταριών είναι γενικά μεγάλης ισχύος με σκοπό να ικανοποιεί επιπλέον υψηλές οδηγικές ανάγκες, προσθέτοντας όμως βάρος και επιπλέον κόστος στο αυτοκίνητο. Οι επιδόσεις του αυτοκινήτου με αυτόν τον σχηματισμό εξαρτώνται άμεσα από την

ισχύ του ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος πρέπει να διαθέτει μεγάλο μέγεθος

προκειμένου να διαθέτει μεγάλο μέγεθος. Ένας τόσο ισχυρός κινητήρας απαιτεί, με τη σειρά του, μεγάλο μέγεθος και βάρος συσσωρευτών προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του σε ρεύμα, όταν ο οδηγός επιταχύνει – έστω κι αν υπάρχει δευτερεύουσα γραμμή που να μεταφέρει το ρεύμα της γεννήτριας απευθείας στον ηλεκτροκινητήρα, παρακάμπτοντας τους συσσωρευτές.

επαναφορτιστούν οι μπαταρίες του ηλεκτροκινητήρα. Τυπικά παραδείγματα πετρελαιο-κινητήρων ελαφριών φορτηγών HEVs με παράλληλη συνδεσμολογία είναι του DaimlerChrysler Dodge Ram (5.9 lt όγκος εμβολισμού με 242.5 kW κινητήρα diesel), το οποίο βγήκε στην παραγωγή στα τέλη του 2004, του Toyota – Hino Dutro (2,525 mm μεταξόνιο με 4 lt όγκο εμβολισμού, με σύστημα έγχυσης κοινού αυλού εισαγωγής, 4-κύλινδρος, σύστημα στροβίλο-υπερπλήρωσης με στρόβιλο μεταβλητής γεωμετρίας (VGT), 110 kW κινητήρα diesel σε σύνδεση με μια 23 kW, τριφασική AC σύγχρονη γεννήτρια/κινητήρα και μια 6.5 Ah NiMH συστοιχία μπαταριών), του Isuzu Elf (2,505 mm μεταξόνιο με 4.77 lt όγκο εμβολισμού, σύστημα έγχυσης 42 κοινού αυλού εισαγωγής, 4-κύλινδρος, 96 kW κινητήρα diesel σε σύνδεση με μια 25.5 kW, τριφασική AC σύγχρονη γεννήτρια και 346V συστοιχία μπαταριών ιόντων λιθίου). Το πλεονέκτημα της παράλληλης σύνδεσης εμβολοφόρου κινητήρα και ηλεκτροκινητήρα βρίσκεται στη δυνατότητα που υπάρχει να ‘αλληλοβοηθηθούν’ τα δυο συστήματα. Για παράδειγμα τι γίνεται στην περίπτωση που απαιτηθεί από τον κινητήρα να αποδώσει (π.χ. κατά τη διάρκεια μιας επιτάχυνσης ή ανωφέρειας) μεγαλύτερη ισχύ από αυτήν που αντιστοιχεί στις συνθήκες ιδανικής θερμικής απόδοσης; Η λύση που προτείνεται από την παράλληλη υβριδική συνδεσμολογία είναι να ενεργοποιηθεί ο ηλεκτροκινητήρας και να προσφέρει αυτός την επιπλέον ισχύ που χρειάζεται το αυτοκίνητο, χωρίς ο εμβολοφόρος κινητήρας να λειτουργήσει υπό συνθήκες που θα αύξαναν την κατανάλωση του και πιθανόν και τις εκπομπές καυσαερίου.



Εικόνα 17-Μικτή συνδεσμολογία σε υβριδικό όχημα

ακριβό από ένα παράλληλου σχηματισμού αφού απαιτεί γεννήτρια, μεγαλύτερη συστοιχία μπαταριών και ένα πιο σύνθετο και ανεπτυγμένο σύστημα ελέγχου. Ωστόσο, ο μικτός σχηματισμός έχει τη δυνατότητα καλύτερης απόδοσης απ’ ότι ο κάθε σχηματισμός ξεχωριστά.

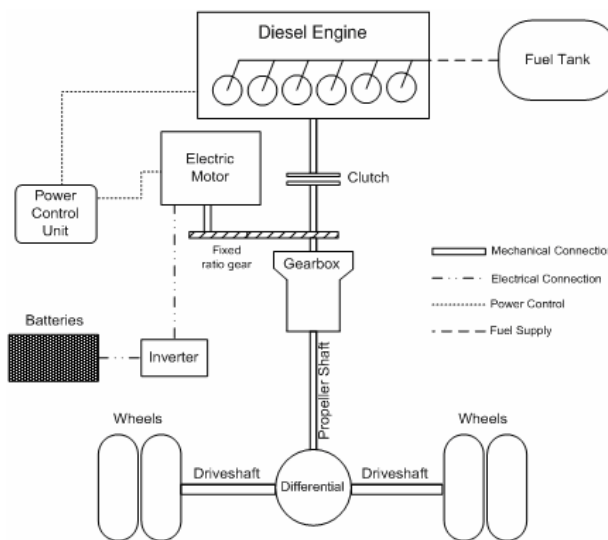
Ένας σειριακός/παράλληλος (μικτός) σχηματισμός εμφανίζει τα πλεονεκτήματα αλλά και τα προβλήματα των παράλληλων και των σειριακών σχηματισμών. Εδώ, ο κινητήρας μπορεί να κινεί τους τροχούς απευθείας αλλά μπορεί και να είναι αποσυνδεδεμένος από αυτούς έτσι ώστε να κινούνται μόνο από τον ηλεκτροκινητήρα. Το Toyota Prius έκανε αυτή τη διάταξη διάσημη και μια παρόμοια τεχνολογία χρησιμοποιείται και στο υβριδικό Ford Escape.

Το σύστημα αυτό είναι πιο

Συνοψίζοντας, τα πλεονεκτήματα της υβριδοποίησης των αυτοκινήτων είναι τα εξής:

1. Μικρότερο μέγεθος Μ.Ε.Κ.
2. Η Μ.Ε.Κ. τίθεται προσωρινά εκτός λειτουργίας, οπότε έχουμε μικρότερη κατανάλωση καυσίμου.
3. Η Μ.Ε.Κ. λειτουργεί σε σταθερή ταχύτητα/φορτίο του πεδίου λειτουργίας σε σχετικά υψηλή απόδοση
4. Ανάκτηση ισχύος και φόρτιση των μπαταριών κατά το φρενάρισμα

Στις σειριακές HEV συνδεσμολογίες ο κινητήρας πρακτικά 'προστατεύεται' από τη μεταβατική λειτουργία αφού δεν είναι απευθείας συνδεδεμένος στους τροχούς. Έτσι δεν χρειάζεται να ακολουθεί τον κύκλο λειτουργίας του οχήματος. Από την πλευρά πάντως της μεταβατικής λειτουργίας, ο πιο ενδιαφέρων σχηματισμός είναι ο παράλληλος, αφού σε αυτόν τον σχηματισμό ο κινητήρας diesel διατηρεί τον πρώτο ρόλο στην κίνηση του οχήματος έχοντας τον ηλεκτροκινητήρα και τις μπαταρίες για την περαιτέρω τροφοδότηση ισχύος όταν αυτή χρειαστεί. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η επέκταση του συμβατικού συστήματος μετάδοσης ισχύος, διαμορφωμένο τώρα ως παράλληλη συνδεσμολογία σε όχημα HEV.



Παράλληλη συνδεσμολογία σε diesel HEV

5) Τύποι Υβριδικών

Πλήρη Υβριδικά: Ένα πλήρως υβριδικό σύστημα, συμπεριλαμβανομένου και του συστήματος "Hybrid Synergy Drive" της Toyota που χρησιμοποιείται στο μοντέλο Prius, έχει την δυνατότητα να κινεί το όχημα μόνο με τον βενζινοκινητήρα ή μόνο με τον ηλεκτροκινητήρα ή και τους δύο ταυτόχρονα.

Το σύστημα της Toyota, το οποίο έχει παραχωρηθεί μερικώς και στην Ford και έχει εγκατασταθεί στο υβριδικό μοντέλο Escape, χρησιμοποιεί μια συσκευή «κατανομής ισχύος» που συνεχώς μεταβάλλει την κατανομή ισχύος που διατίθεται από τον κινητήρα για την κίνηση του οχήματος και την κίνηση της ηλεκτρογεννήτριας. Στην συνέχεια η γεννήτρια τροφοδοτεί τον ηλεκτροκινητήρα ο οποίος με την σειρά του κινεί και αυτός το όχημα όταν απαιτείται. Το σύστημα είναι πολύπλοκο, όμως με την χρήση του επιτυγχάνεται μεγάλη ενεργειακή αποδοτικότητα μέσω της συνεχούς λειτουργίας του βενζινοκινητήρα σε αποδοτικό αριθμό στροφών.

Όταν δεν απαιτείται όλη η παραγόμενη ισχύς του κινητήρα για την κίνηση του οχήματος, αυτή η περίσσεια ισχύος χρησιμοποιείται για την φόρτιση των μπαταριών. Οι μπαταρίες φορτίζονται επίσης και από την ανάκτηση ενέργειας κατά το φρενάρισμα του οχήματος. Σε συνθήκες κυκλοφοριακού φόρτου και σε χαμηλές ταχύτητες (όταν ο βενζινοκινητήρας είναι μη αποδοτικός), ο κινητήρας σβήνει και ο ηλεκτροκινητήρας τροφοδοτούμενος από τις μπαταρίες αναλαμβάνει να κινήσει το όχημα.

Το σύστημα που έχει εγκατασταθεί στο υβριδικό μοντέλο με κίνηση στους 4 τροχούς Lexus RX400h, είναι παρόμοιο αλλά διαθέτει δυο ηλεκτρικές μηχανές, μια για του εμπρός και μια για τους πίσω τροχούς.

Παρά το γεγονός ότι προς το παρόν κανένα από τα υβριδικά οχήματα παραγωγής δεν φορτίζεται με εξωτερικά μέσα, τα επόμενα χρόνια αναμένεται να κατασκευαστούν εξωτερικά φορτιζόμενα υβριδικά οχήματα που θα συνδέονται με την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Τα οχήματα αυτά θα έχουν μεγαλύτερες μπαταρίες από τα υπάρχοντα υβριδικά και θα εξασφαλίζουν μεγαλύτερη αυτονομία κίνησης του οχήματος με ηλεκτρική ενέργεια. Το Toyota Prius για παράδειγμα, μπορεί να διανύσει μόνο 2 έως 3 χιλιόμετρα χρησιμοποιώντας μόνο την μπαταρία χωρίς αυτή να φορτίζεται. Οι χρήστες των οχημάτων αυτών δεν θα χρειάζεται οπωσδήποτε να συνδέουν τις μπαταρίες με την παροχή ρεύματος, αλλά σε περίπτωση που επιλέξουν την δυνατότητα αυτή, θα έχουν σημαντική αυτονομία κίνησης του οχήματος με ηλεκτρική ενέργεια (πιθανόν 50 έως 65 χιλιόμετρα ανά

φόρτιση). Επομένως με τον τρόπο αυτό οι χρήστες θα επιτυγχάνουν περαιτέρω εξοικονόμηση καυσίμων και θα προστατεύουν το περιβάλλον, τουλάχιστον σε αστικό και τοπικό επίπεδο δεδομένου ότι με τον ηλεκτρισμό το όχημα δεν εκπέμπει ρύπους, όμως οι ρύποι αυτοί εκπέμπονται στην περιοχή που βρίσκεται η θερμική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η παρούσα έλλειψη εξωτερικά φορτιζόμενων υβριδικών οχημάτων στην αγορά, είναι πιθανό να οφείλεται εν μέρει στην επιδίωξη των κατασκευαστών να γίνει σαφής διαχωρισμός των υβριδικών οχημάτων και των κλασικών ηλεκτρικών οχημάτων στην αγοραστική συνείδηση των καταναλωτών.

Ήπια Υβριδικά: Τα «ήπια» υβριδικά οχήματα διαθέτουν λειτουργία «στάσης-εκκίνησης» όπως περιγράφηκε παραπάνω, αλλά συνήθως χρησιμοποιούν τον ηλεκτροκινητήρα τους και για να κινήσουν το όχημα. Παρόλα αυτά, τα «ήπια» υβριδικά δεν μπορούν να λειτουργήσουν αποκλειστικά με τον ηλεκτροκινητήρα αφού αυτός δεν είναι συνδεδεμένος με το σύστημα μετάδοσης της κίνησης. Αντί αυτού, προσφέρουν πρόσθετη ισχύ μέσω του ηλεκτρικού κινητήρα κατά την διάρκεια λειτουργίας του συμβατικού κινητήρα υπό υψηλό φορτίο, π.χ. κατά τις στιγμές μεγάλης επιτάχυνσης.

Τα «ήπια» υβριδικά έχουν επίσης το πλεονέκτημα της ανάκτησης ενέργειας μέσω του φρεναρίσματος: κατά την διάρκεια του φρεναρίσματος μετατρέπουν μέρος της πλεονάζουσας κινητικής ενέργειας του κινητήρα σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία χρησιμοποιείται για την φόρτιση των συσσωρευτών (μπαταριών).

Ένα παρόμοιο «ήπιο» υβριδικό σύστημα έχει εγκατασταθεί στα μοντέλα Insight και Civic (και Accord σε ορισμένες αγορές) της εταιρείας Honda (Integrated Motor Assist). Το σύστημα της Honda έχει επίσης την δυνατότητα απομόνωσης της λειτουργίας τριών από τους τέσσερις κυλίνδρους του κινητήρα για την αύξηση της απόδοσης. Το υβριδικό Honda Civic εκπέμπει σχεδόν 25% λιγότερο CO₂ σε σύγκριση με ένα όμοιο μη υβριδικό.

Υβριδικά στάσης – εκκίνησης: Τα υβριδικά «στάσης-εκκίνησης» ή μικρο-υβριδικά έχουν σχετικά μικρούς ηλεκτροκινητήρες οι οποίοι δεν κινούν το όχημα, αλλά έχουν την απαραίτητη ισχύ για την σχεδόν ακαριαία επανεκκίνηση του κινητήρα εσωτερικής καύσης.

Αυτό σημαίνει ότι ένα μικρο-υβριδικό βενζινοκίνητο όχημα μπορεί αυτόματα να σβήνει τον κινητήρα του όταν το όχημα ακινητοποιείται (π.χ. σε φωτεινούς σηματοδότες) και να επανεκκινεί μόλις ο οδηγός πατήσει το πεντάλ του γκαζιού

χωρίς να απαιτείται η χρήση της μίζας και πολλές φορές χωρίς καν ο οδηγός να γνωρίζει ότι ο κινητήρας έχει σταματήσει.

Τα συστήματα «στάσης-εκκίνησης» σε γενικές γραμμές δεν θεωρούνται ως πραγματικά υβριδικά συστήματα εφόσον δεν χρησιμοποιούνται για την κίνηση του οχήματος. Επιφέρουν ένα σχετικά μέτριο ποσοστό εξοικονόμησης καυσίμου-συνήθως περίπου 10%- όμως έχουν το πλεονέκτημα του χαμηλού κόστους. Ένα παράδειγμα ενός υβριδικού αυτοκινήτου «στάσης-εκκίνησης» είναι το Citroen C3.

Plug-In Υβριδικά: Ένα plug-in υβριδικό όχημα (plug-in hybrid electric vehicle - PHEV) είναι ένα υβριδικό όχημα με μπαταρίες που επαναφορτίζονται συνδέοντας το όχημα με μια πρίζα σε μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος. Τα plug-in υβριδικά έχουν χαρακτηριστικά και των συμβατικών υβριδικών ηλεκτρικών αλλά και των αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων. Ενώ τα PHEVs αναμένονται στη μορφή των επιβατικών οχημάτων, ωστόσο μπορούν να αποτελέσουν και εμπορικά ελαφρά φορτηγά, επιχειρησιακά φορτηγά, σχολικά λεωφορεία, scooters και στρατιωτικά οχήματα. Τα PHEVs αποκαλούνται και ως “οχήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο” ή GO-HEVs.



Εικόνα 18- Η πρίζα με την οποία ένα PHEV συνδέεται με εξωτερική πηγή ηλεκτρικού

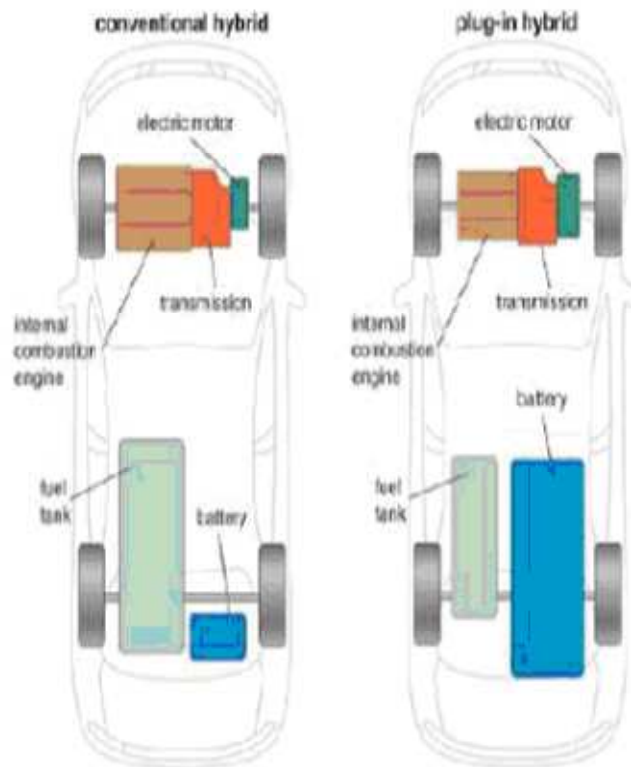
Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας για την τροφοδότηση των plug-in υβριδικών κατά τη διάρκεια της ηλεκτρικής τους λειτουργίας υπολογίστηκε στην California λιγότερο από το ένα τέταρτο του κόστους της βενζίνης που θα χρησιμοποιούσαν στη συμβατική τους μορφή. Σε σύγκριση με τα συμβατικά αυτοκίνητα, τα PHEVs μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση της ρύπανσης και της εξάρτησης από το πετρέλαιο και να ελαττώσουν τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου που οδηγούν στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Τα plug-in υβριδικά δεν χρησιμοποιούν κάποιο φυσικό καύσιμο κατά τη διάρκεια της ηλεκτρικής τους

λειτουργίας, εάν οι μπαταρίες τους φορτίζονται βέβαια από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα PHEVs δεν έχουν μπει ακόμα στη μαζική παραγωγή, ωστόσο η Toyota, η General Motors και η Ford ανακοίνωσαν την πρόθεση τους για την παραγωγή τέτοιων οχημάτων.

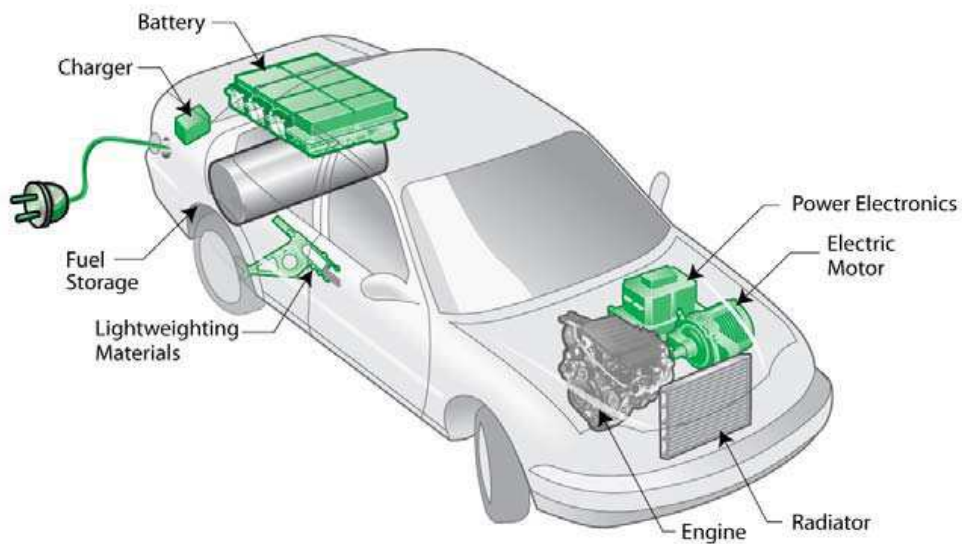
Η απόσταση που μπορεί να διανύσει ένα plug-in υβριδικό μόνο με την ηλεκτρική του ενέργεια αποτυπώνεται με τον όρο PHEV-(μίλια) ή PHEV(χιλιόμετρα) km. Για παράδειγμα, ένα PHEV-20 μπορεί να διανύσει 20 μίλια χωρίς να χρησιμοποιήσει την μηχανή εσωτερικής καύσης ή γύρω στα 32 χιλιόμετρα, οπότε και θα χαρακτηρίζεται από τον όρο PHEV32km.

Τα plug-in υβριδικά αποτελούν την εξέλιξη των σημερινών “πλήρως” υβριδικών οχημάτων. Ένα πλήρως υβριδικό αυτοκίνητο έχει τη δυνατότητα να εκκινεί και να επιταχύνει σε χαμηλές ταχύτητες χωρίς τη χρήση του κινητήρα, με την μπαταρία να φορτίζεται, ωστόσο, αποκλειστικά από τον κινητήρα και το σύστημα ανάκτησης ισχύος κατά το φρενάρισμα.

Ένα plug-in υβριδικό λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο αλλά έχει μεγαλύτερη μπαταρία και δίνει στον οδηγό την επιλογή να την φορτίζει στο σπίτι του χρησιμοποιώντας μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος και έτσι μπορεί να κινεί το όχημα του μόνο με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Συνήθως, η φόρτιση του αυτοκινήτου θα γίνεται τη νύχτα που θα είναι και ακινητοποιημένο για αρκετή ώρα. Έτσι και τα PHEVs και τα HEVs κάνουν χρήση ηλεκτροκινητήρων που τροφοδοτούνται από μπαταρίες και Μ.Ε.Κ., για την εξοικονόμηση καυσίμου, ωστόσο τα PHEVs μπορούν να αναβάλλουν ακόμη περισσότερο τη χρήση καυσίμου με τη φόρτιση του οχήματος από το σπίτι. Επίσης, τα plug-in υβριδικά έχουν πλεονέκτημα έναντι των αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων στο ότι οι οδηγοί τους δεν χρειάζεται να ανησυχούν για το ενδεχόμενο “αποφόρτισης” του οχήματος τους. Και αυτό διότι όταν η μπαταρία αποφορτίζεται, τα plug-in οχήματα λειτουργούν όπως και τα συμβατικά και κάνουν χρήση του κινητήρα τους και του συστήματος ανάκτησης ισχύος κατά το φρενάρισμα για τη φόρτιση της μπαταρίας και την προώθηση του οχήματος. Επειδή, λοιπόν, χρησιμοποιούν και κινητήρα και ηλεκτροκινητήρα, τα PHEVs διαθέτουν μικρότερες και φτηνότερες συστοιχίες μπαταριών απ’ ότι τα αντίστοιχα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα. Τα σημερινά εμπορικά υβριδικά οχήματα χρησιμοποιούν, όπως έχει αναφερθεί, μπαταρίες NiMH, οι οποίες μπορούν να προσφέρουν μικρές αποστάσεις με αποκλειστική χρήση ηλεκτρικής ενέργειας στα αντίστοιχα plug-in υβριδικά. Για τα PHEVs, λοιπόν, η μεγαλύτερη αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και οι μεγαλύτερες απαιτήσεις αυτής θα επιτευχθούν με την τεχνολογία των μπαταριών lithium-ion (Li ion), όπως αναμένεται.



Εικόνα 19- Σύγκριση συστήματος ενός HEV και ενός PHEV

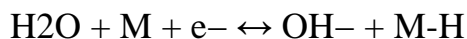


Εικόνα 20- Η ανατομία του συστήματος λειτουργίας ενός PHEV οχήματος

6) Συσσωρευτές Υβριδικών Συστημάτων

Μπαταρία NiMH:

Στα σύγχρονα εμπορικά υβριδικά οχήματα, η μπαταρία που χρησιμοποιείται κατά βάση είναι η μπαταρία Νικελίου – Μετάλλου Υδριδίου (NiMH). Πρόκειται για μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία, παρόμοια με την μπαταρία Νικελίου – Καδμίου (NiCd), με τη διαφορά ότι αντί για κάδμιο στην άνοδο της έχει ένα κράμα απορροφητικό σε υδρογόνο. Στην κάθοδο, όπως και στις NiCd μπαταρίες, χρησιμοποιεί νικέλιο. Μια NiMH μπαταρία έχει δυο με τρεις φορές τη χωρητικότητα μιας ισοδύναμου μεγέθους μπαταρίας NiCd και το “φαινόμενο μνήμης” (memory effect) της δεν είναι τόσο σημαντικό όπως στις NiCd. Ωστόσο, συγκρινόμενη με την μπαταρία ιόντων λιθίου (lithium-ion battery), η ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα είναι χαμηλότερη και η αυτοεκφόρτιση μεγαλύτερη. Η ειδική ενεργειακή πυκνότητα για την NiMH είναι περίπου 80 W·h/kg, με την ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα να είναι γύρω στις 200 W·h/L. Η αντίδραση που συμβαίνει στην άνοδο μιας μπαταρίας NiMH είναι η ακόλουθη:



Η μπαταρία φορτίζεται προς την δεξιά κατεύθυνση της εξίσωσης και αποφορτίζεται προς την αριστερή.

Το υδροξείδιο του νικελίου είναι αυτό που σχηματίζει την κάθοδο. Το “Μέταλλο” στην άνοδο μιας NiMH μπαταρίας είναι ουσιαστικά μια σύνθετη μεταλλική ένωση. Πολλές χημικές ενώσεις έχουν αναπτυχθεί για την εφαρμογή αυτή αλλά αυτές που εφαρμόζονται ανήκουν σε δυο κατηγορίες. Ο πιο κοινός χημικός τύπος είναι ο AB₅, όπου Α είναι ένα μίγμα σπάνιων γαιών, λανθανίου, δημητρίου, νεοδυμίου, πρασινοδυμίου και Β είναι νικέλιο, κοβάλτιο, μαγγάνιο, και αλουμίνιο. Μερικές άλλες μπαταρίες κάνουν χρήση αρνητικών ηλεκτροδίων υψηλότερης χωρητικότητας, βασισμένα σε χημικές ενώσεις τύπου AB₂, όπου Α είναι τιτάνιο ή βανάδιο και Β είναι ζιρκόνιο ή νικέλιο, τροποποιημένο με χρώμιο, κοβάλτιο, σίδηρο και μαγγάνιο, εξαιτίας της μειωμένης διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Οι μπαταρίες NiMH αποτελούνται από έναν αλκαλικό ηλεκτρολύτη συνήθως υδροξείδιο καλίου. Η τάση φόρτισης είναι 1.4 -1.6 V/στοιχείο. Ένα πλήρως φορτισμένο στοιχείο έχει τάση 1.35-1.4 V και παρέχει ονομαστική τάση 1.2V κατά μέσο όρο στη διάρκεια της αποφόρτισης και μέχρι 1.0V, διότι περαιτέρω αποφόρτιση μπορεί να προκαλέσει μόνιμη ζημιά στο στοιχείο της μπαταρίας. Το “φαινόμενο μνήμης” από την επαναλαμβανόμενη μερική αποφόρτιση μπορεί να συμβεί, κάτι όμως που είναι αναστρέψιμο μέσω του κύκλου φόρτισης. Ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης επηρεάζεται κατά πολύ από τη θερμοκρασία στην οποία οι

μπαταρίες είναι αποθηκευμένες με τις πιο ψυχρές θερμοκρασίες αποθήκευσης να έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερο ρυθμό αποφόρτισης και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Από την άλλη τα υψηλότερης χωρητικότητας στοιχεία που υπάρχουν στην αγορά (> 2700 mAh) φαίνονται να έχουν τους υψηλότερους ρυθμούς αποφόρτισης.

Όσον αφορά τις επιδράσεις των μπαταριών NiMH στο περιβάλλον, αυτές είναι τουλάχιστον πολύ πιο φιλικές από τις μπαταρίες NiCd που περιέχουν το δηλητηριώδες κάδμιο και άλλωστε υπάρχουν προγράμματα ανακύκλωσης τους. Το κόστος τους δεν είναι υψηλό και η τάση τους και η επίδοση τους είναι παρόμοιες με τις πρότυπες αλκαλικές μπαταρίες του ίδιου μεγέθους. Η ικανότητα τους να επαναφορτίζονται εκατοντάδες φορές οδηγεί στην εξοικονόμηση πόρων και χρημάτων. Οι μπαταρίες NiMH είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για εφαρμογές υψηλής εντάσεως ρεύματος λόγω της χαμηλής τους εσωτερικής αντίστασης. Οι αλκαλικές μπαταρίες, οι οποίες έχουν περίπου 3000mAh χωρητικότητα σε απαιτήσεις χαμηλής έντασης ρεύματος (200mA), θα έχουν λιγότερο από 1000mAh χωρητικότητα σε απαίτηση ρεύματος 1000mA, για παράδειγμα. Οι μπαταρίες NiMH από την άλλη μπορούν να διαχειριστούν αυτά τα υψηλής έντασης ρεύματα διατηρώντας την πλήρη χωρητικότητά τους. Επίσης στον κύκλο αποφόρτισης οι μπαταρίες NiMH, λόγω της μικρής τους εσωτερικής αντίστασης, μπορούν και τροφοδοτούν το σύστημα με σταθερή περίπου τάση μέχρι να αποφορτιστούν πλήρως. Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι τα υδρίδια μετάλλων είναι σχετικά ασφαλή υλικά για την αποθήκευση ενέργειας και έτσι η προτεινομένη λύση μέχρι τώρα στα υβριδικά οχήματα, της χρήσης ηλεκτροκινητήρων/ηλεκτρογεννητριών σε συνδυασμό με μια συστοιχία μπαταριών NiMH, παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, όσον αφορά την ευκολία διαχείρισης των αποθεμάτων ενέργειας κάτω από καθεστώς σχετικά αυξημένης ασφάλειας.



Εικόνα 21- Η μπαταρία Νικελίου – Υδριδίου Μετάλλου

Μπαταρία Li – ion:

Τα τελευταία χρόνια γίνεται μια έντονη προσπάθεια ανάπτυξης και χρησιμοποίησης στο χώρο των υβριδικών οχημάτων ενός άλλου είδους μπαταρίας, της μπαταρίας ιόντων Λιθίου (Lithium-ion). Οι Li-ion μπαταρίες είναι επαναφορτιζόμενες και χρησιμοποιούνται ευρέως στα κάθε είδους ηλεκτρονικά. Είναι από τις πιο διαδεδομένες μπαταρίες στα φορητά ηλεκτρονικά με μια από τις καλύτερες αναλογίες ενέργειας προς βάρος, χωρίς “φαινόμενο μνήμης” και με αργό ρυθμό αποφόρτισης όταν δεν χρησιμοποιούνται. Αν δεν γίνει σωστή διαχείριση τους μπορεί να αποβούν επικίνδυνες και να μειωθεί η διάρκεια ζωής τους. Εξαιτίας της υψηλής τους ενεργειακής πυκνότητας, οι μπαταρίες Li-ion άρχισαν να γίνονται αντικείμενο έρευνας για τη χρήση τους στην υβριδική αυτοκίνηση καθώς και στην βιομηχανία της άμυνας και του διαστήματος. Μια αρκετά ανεπτυγμένη μπαταρία Li-ion είναι η μπαταρία στοιχείων πολυμερούς λιθίου (lithium polymer cell). Οι πρώτες μπαταρίες ιόντων λιθίου εμφανίστηκαν το 1991.

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα μεγέθη και σχήματα αποτελεσματικά για την καλύτερη εξοικονόμηση χώρου της συσκευής που τροφοδοτούν. Είναι επίσης ελαφρύτερες από άλλες ισοδύναμες μπαταρίες. Η ενέργεια αποθηκεύεται σε αυτές τις μπαταρίες διαμέσου της κίνησης των ιόντων λιθίου. Το λίθιο είναι το τρίτο πιο ελαφρύ χημικό στοιχείο, προσφέροντας έτσι ένα συγκριτικό πλεονέκτημα σχετικά με άλλες μπαταρίες που χρησιμοποιούν βαρύτερα μέταλλα. Ένα ακόμα πλεονέκτημα που έχουν οι μπαταρίες Li-ion είναι η υψηλή τάση ανοιχτού κυκλώματος που επιτυγχάνουν σε σχέση με άλλες υδάτινες μπαταρίες όπως οι μπαταρίες μολύβδου, οι μπαταρίες Νικελίου-Υδριδίου Μετάλλου και οι μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου. Επιπλέον, οι Li-ion μπαταρίες δεν χαρακτηρίζονται από το “φαινόμενο μνήμης” (memory effect). Έχουν επίσης, χαμηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης.

Μοναδικό μειονέκτημα, ωστόσο, των μπαταριών Li-ion είναι ότι η διάρκεια ζωής τους εξαρτάται και από το χρόνο που έχει περάσει από τη στιγμή της κατασκευής τους, ανεξάρτητα από το αν αυτές έχουν φορτιστεί και ανεξάρτητα από τον αριθμό των κύκλων φόρτισης/αποφόρτισης. Έτσι, μια παλιότερη χρονολογικά μπαταρία θα διαρκέσει λιγότερο απ’ ότι μια καινούρια εξαιτίας της ηλικίας της και μόνο, κάτι που δεν συμβαίνει με τις άλλες μπαταρίες. Η μείωση της χωρητικότητας της μπαταρίας ξεκινά λοιπόν από τη στιγμή της κατασκευής της, ανεξάρτητα αν αυτή χρησιμοποιείται και εξαρτάται από τη θερμοκρασία αποθήκευσης. Διαφορετικές θερμοκρασίες αποθήκευσης μπορούν να προκαλέσουν διαφορετικές μειώσεις της χωρητικότητας της. Έτσι σε πλήρη φόρτιση της μπαταρίας (100%) έχουμε: 6% μείωση στους 0 °C (32°F), 20% μείωση στους 25 °C (77 °F) και 35% μείωση

στους 40 °C (104 °F). Όταν το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας είναι στο 40%, αυτές οι τιμές μειώνονται σε 2%, 4%, 15% στους 0, 25 και 40 βαθμούς οC αντίστοιχα. Όσο η διάρκεια ζωής των μπαταριών μεγαλώνει, η εσωτερική τους αντίσταση αυξάνει. Αυτό προκαλεί πτώση της τάσης στους πόλους κάτω από το απαιτούμενο φορτίο, μειώνοντας το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να πάρει το σύστημα από αυτούς. Σταδιακά λοιπόν φτάνουν σε ένα σημείο όπου η μπαταρία δεν μπορεί να λειτουργήσει άλλο. Οι μπαταρίες Li-ion αντιμετωπίζουν επίσης μια κατάσταση που ονομάζεται “πλήρης αποφόρτιση” (deep discharge). Σε αυτήν την κατάσταση, η μπαταρία μπορεί να κάνει πολύ καιρό να επαναφορτιστεί ή μπορεί και να μην επαναφορτιστεί. Η “πλήρης αποφόρτιση” λαμβάνει χώρα μόνο όταν τα συστήματα ή οι συσκευές των μπαταριών αυτών μείνουν για πολύ καιρό αχρησιμοποίητα (συνήθως 2 ή περισσότερα χρόνια) ή όταν επαναφορτίζονται τόσο συχνά με αποτέλεσμα να μην μπορούν να διατηρήσουν το φορτίο τους. Κάθε στοιχείο μπαταρίας Li-ion ξεχωριστά δεν πρέπει να αποφορτίζεται κάτω από μια συγκεκριμένη τάση για την αποφυγή μη αναστρέψιμης ζημιάς. Επομένως, όλα τα συστήματα μπαταριών Li-ion εξοπλίζονται με ένα κύκλωμα που κλείνει το σύστημα όταν η μπαταρία αποφορτιστεί κάτω από τη συγκεκριμένη αυτή τιμή τάσης. Έτσι, κατά τη διάρκεια κανονικής χρήσης σε ένα σωστά σχεδιασμένο σύστημα είναι αδύνατον να συμβεί η “πλήρης αποφόρτιση”. Όταν το συγκεκριμένο κύκλωμα ελέγχου είναι κατασκευασμένο μέσα στη μπαταρία (η επονομαζόμενη “έξυπνη” μπαταρία) και όχι στον εξοπλισμό, τότε αυτό αντλεί συνεχώς ένα μικρής εντάσεως ρεύμα από την μπαταρία, ακόμα και αν αυτή δεν χρησιμοποιείται. Επιπλέον, η μπαταρία δεν πρέπει να μένει πλήρως φορτισμένη για μεγάλα διαστήματα γιατί έτσι κινδυνεύει να οδηγηθεί στο φαινόμενο της “πλήρους αποφόρτισης” και να καταστραφεί.

Χημικά η μπαταρία Li-ion ενέχει πολλούς κινδύνους και έτσι ένα στοιχείο της μπαταρίας απαιτεί αρκετές υποχρεωτικές συσκευές ασφαλείας για να μπορεί να θεωρείται ασφαλές. Κάποιες από αυτές είναι: διαχωριστής κλεισίματος (για την υπερθέρμανση), στόμιο (για την αποκατάσταση της πίεσης) και θερμικός διακόπτης (για την υπερφόρτωση). Οι συσκευές αυτές καταλαμβάνουν αρκετό χώρο μέσα στο στοιχείο της μπαταρίας και αυξάνουν αρκετά το επίπεδο αναξιοπιστίας της μπαταρίας. Ωστόσο ολοένα και νέες έρευνες διεξάγονται για τη βελτίωση της τεχνολογίας αυτών των μπαταριών που θα αυξάνει το επίπεδο ασφάλειας. Οι μπαταρίες Lithium-ion έχουν ονομαστική τάση ανοιχτού κυκλώματος 3.6 V και τυπική τιμή τάσης φόρτισης 4.2 V. Η διαδικασία φόρτισης γίνεται υπό σταθερή τάση. Στο παρελθόν, οι μπαταρίες αυτές δεν μπορούσαν να φορτιστούν γρήγορα και συνήθως χρειάζονταν τουλάχιστον 2 ώρες για πλήρη φόρτιση. Τα σύγχρονα στοιχεία της μπαταρίας έχουν τη δυνατότητα πλήρους φόρτισης μέσα σε λιγότερο από 45 λεπτά. Μερικές μάλιστα φτάνουν το 90% της

φόρτισης τους μέσα σε 10 λεπτά. Η άνοδος ενός συμβατικού Li-ion στοιχείου κατασκευάζεται από άνθρακα, η κάθοδος είναι οξείδιο μετάλλου και ο ηλεκτρολύτης είναι άλας λιθίου σε οργανικό διαλύτη. Η χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα σε ένα στοιχείο Li-ion για την παραγωγή ηλεκτρισμού είναι:



Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι τα ιόντα λιθίου δεν οξειδώνονται. Αντιθέτως, σε μια μπαταρία Li-ion τα ιόντα λιθίου μεταφέρονται από και προς την κάθοδο ή την άνοδο με το μέταλλο Κοβάλτιο (Co) στην χημική ένωση Li_xCoO_2 να οξειδώνεται από Co^{3+} σε Co^{4+} κατά τη φόρτιση και να ανάγεται από Co^{4+} σε Co^{3+} κατά την αποφόρτιση.

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή, υπάρχει στην αγορά μια προοπτική αντικατάστασης των μπαταριών NiMH στα υβριδικά οχήματα από τις μπαταρίες Li-ion. Υπάρχει η πεποίθηση πως η ανάπτυξη της τεχνολογίας που οδηγεί σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και ασφάλεια της μπαταρίας, σε συνδυασμό με τη μείωση του κόστους της, θα έχουν ως αποτέλεσμα τη χρήση της μπαταρίας Li-ion στα υβριδικά συστήματα. Με τις μπαταρίες να αποτελούν το 33% του κόστους ενός υβριδικού συστήματος και την τιμή του νικελίου να αυξάνει σε παγκόσμια κλίμακα τα τελευταία χρόνια, αναμένονται βελτιώσεις στις επιδόσεις, στη λειτουργία και στην τιμή ενός HEV με τη χρήση των μπαταριών Li-ion. Επίσης, πολλοί μεγάλοι κατασκευαστές μπαταριών, επενδύουν αρκετά στην ανάπτυξη των μπαταριών Li-ion. Η εταιρεία CPI χρησιμοποιεί μια κάθοδο λιθίου βασισμένη στο μαγγάνιο αντί για το κοβάλτιο που χρησιμοποιείται στις μπαταρίες ιόντων λιθίου των φορητών υπολογιστών, των κινητών τηλεφώνων και των άλλων φορητών συσκευών. Το κοβάλτιο είναι ακριβότερο (\$40/kg) και σε περιπτώσεις υπερφόρτωσης και εσωτερικού βραχυκυκλώματος μπορεί να προκληθούν φωτιά και εκρήξεις. Αντιθέτως το υλικό του μαγγανίου προσφέρει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής κάτω από υψηλές θερμοκρασίες. Τα “επίπεδα” στοιχεία μπαταριών που έχει κατασκευάσει η CPI διαφέρουν από τα κυλινδρικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στις NiMH μπαταρίες, στο γεγονός ότι εξοικονομούν περισσότερο χώρο. Είναι επίσης λιγότερο ακριβές και λιγότερο επιρρεπείς στη διάβρωση, σύμφωνα με την εταιρεία. Το νέο αυτό σχέδιο, λόγω της μεγαλύτερης του επιφάνειας παρέχει μεγαλύτερη ισχύ ενώ ενισχύει περισσότερο τη θερμική διαχείριση. Από την άλλη, η ημιδιαπερατή του μεμβράνη που χωρίζει τα ηλεκτρόδια είναι μηχανικά και θερμικά ανώτερη από τους διαχωριστές που χρησιμοποιούνται σε άλλα στοιχεία Li-ion, κάτι που αυξάνει την ασφάλεια της μπαταρίας. Διάφοροι έλεγχοι στο πολυμερές αλουμινένιο λεπτό φύλλο που προστατεύει το στοιχείο κατέδειξαν προβλεπόμενη διάρκεια ζωής του στοιχείου, 15 έτη, σύμφωνα με την CPI. Η

εταιρεία έχει επίσης αναπτύξει και πρόκειται να προμηθεύσει το σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας που βασίζεται σε μικροεπεξεργαστές.



Εικόνα 22- Η μπαταρία Li – ion

7) Σύγχρονα Υβριδικά Οχήματα

Audi Q5 Hybrid Quattro



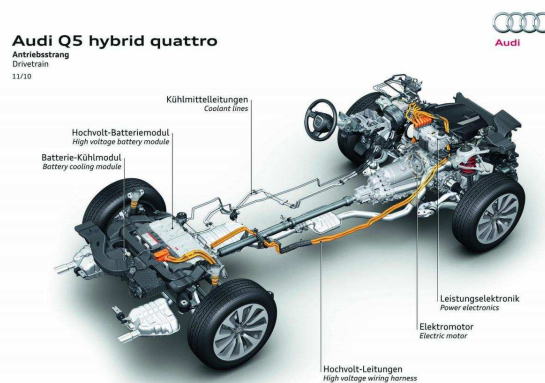
Η λύση που έχει επιλεγεί είναι η πιο απλή και συμφέρουσα κατασκευαστικά. Είναι η παράλληλη διάταξη που χρησιμοποιεί και στα υβριδικά της η Honda με την διαφορά πως η γερμανική εταιρία με το Q5 Hybrid μπορεί να κινηθεί αποκλειστικά με ηλεκτρική ενέργεια, δίχως να εμπλέκεται ο ΜΕΚ,

διανύοντας έως και 3 km αρκεί η μέση ταχύτητα να είναι περίπου 60 km/h και η μέγιστη να μην ξεπερνά τα 100 km/h. Το παράλληλο σύστημα του Q5 Hybrid συνθέτει ένας τετρακύλινδρος δίλιτρος TFSI απόδοσης 211 PS και ροπής 350 Nm ενώ εξοπλίζεται με σύστημα AVS (Audi Valve Lift). Έχουν γίνει αρκετές μεταποιήσεις (π.χ. επιπλέον σύστημα ψύξης για την κεφαλή, βολάν, διαχείριση turbo κ.α.) ώστε ο TFSI να συνεργαστεί με υβριδικό σύστημα ενώ την μετάδοση της κίνησης στους τέσσερις τροχούς (σύστημα Quattro) αναλαμβάνει ένα κιβώτιο Tiptronic με 8 σχέσεις που έχει δεχτεί διάφορες μετατροπές (δεν έχει

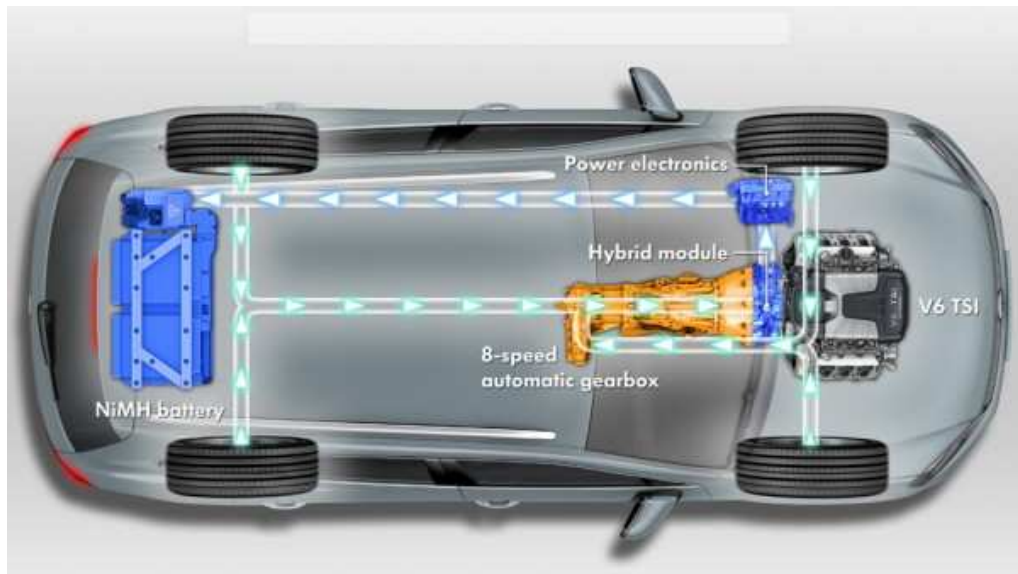


μετατροπέα ροπής αλλά πολύδισκο υγρό συμπλέκτη). Ορισμένα καθήκοντα του μετατροπέα ροπής αναλαμβάνει ο δισκοειδούς μορφής σύγχρονος υδρόψυκτος ηλεκτροκινητήρας που αποδίδει 45 PS και 211 Nm. Κατά την εκκίνηση ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί σαν μίζα ενώ κατά την επιβράδυνση σαν ηλεκτρογεννήτρια. Οι μπαταρίες λιθίου-

ιόντων ζυγίζουν 38 kg, καταλαμβάνουν 26 lt, βρίσκονται κάτω από το πορτμπαγκάζ ενώ υπάρχει σοφιστικέ σύστημα ψύξης για να τις δροσίξει (υπό νορμάλ θερμοκρασίες ένας ανεμιστήρας τραβά αέρα από την καμπίνα, σε περίπτωση υπερθέρμανσης συνδράμει το σύστημα κλιματισμού). Αποτελούνται από 72 στοιχεία και στα 266 V το ενεργειακό τους φορτίο είναι 1,3 kWh με έξοδο ισχύος 39 kW. Η μέγιστη συνδυασμένη ισχύς του Q5 Hybrid Quattro διαμορφώνεται στους 245 PS και στα 480 Nm. Η διαδικασία των 0-100 km/h επιτυγχάνεται σε 7,1" ενώ η τελική αγγίζει τα 222 km/h. Η μέση τυποποιημένη κατανάλωση κυμαίνεται κάτω από τα 7 lt/100km ενώ οι εκπομπές Co2 δεν ξεπερνούν τα 160 g/km. Συγκρίνοντας: η έκδοση Q5 2.0 TDI αποδίδει 170 PS, έχει μέση τυποποιημένη κατανάλωση 6,7 lt/100 km και εκπομπές CO2 175 g/km.



VW Touareg Hybrid



Η διάταξη του υβριδικού Touareg είναι παράλληλη με μία σημαντική διαφορά σε σχέση με το αντίστοιχο σύστημα της Honda. Ανάμεσα στον ηλεκτροκινητήρα και τον ΜΕΚ υπάρχει ένα μέσο σύμπλεξης/αποσύμπλεξης. Έτσι, σε συνθήκες χαμηλού φορτίου ο ΜΕΚ αποδεσμεύεται και ξεκουράζεται προς όφελος της κατανάλωσης καυσίμου.

Στο υβριδικό Touareg ο υπερτροφοδοτούμενος V6 TSI (που τοποθετείται και στο S4) συνεργάζεται με έναν ηλεκτροκινητήρα αποδίδοντας συνολικά 380 ίππους και 580 Nm ροπής με κατανάλωση 8,2 λίτρα/100 χλμ. Οι εκπομπές CO₂ φτάνουν τα 193 γραμμ./χλμ. ενώ πληρούνται οι προδιαγραφές Euro5.



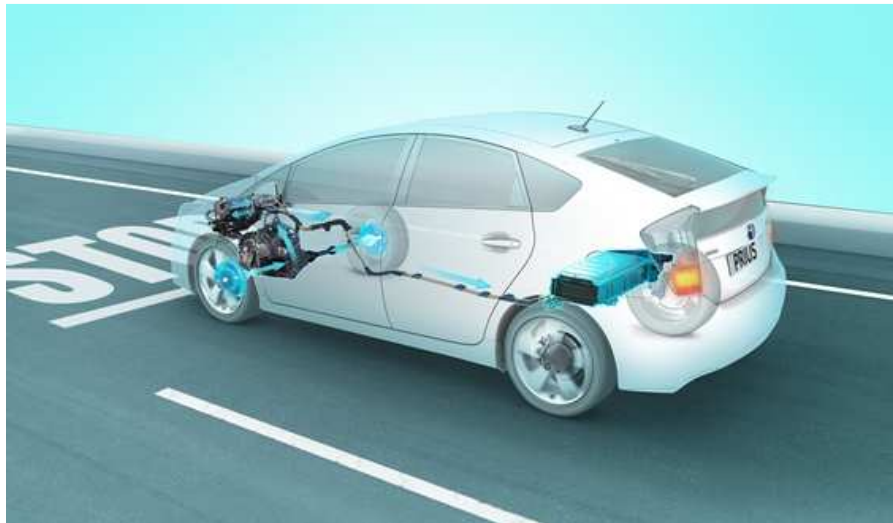
Ο V6 αποδίδει 333 ίππους και συνεργάζεται με ένα “υβριδοποιημένο” αυτόματο κιβώτιο με 8 σχέσεις με μετατροπέα ροπής. Ανάμεσα στο κιβώτιο και τον V6 βρίσκεται ο ηλεκτροκινητήρας ισχύος 46 ίππων στον οποίο ενσωματώνεται ο συμπλέκτης “αποδέσμευσης”. Το Hybrid Module, όπως ονομάζει η VW την

μονάδα με τον ηλεκτροκινητήρα, έχει διάμετρο 400 χιλιοστά, σε μήκος φτάνει τα 145 χιλιοστά ενώ ζυγίζει 55 κιλά.

Στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου βρίσκονται οι μπαταρίες Ni-MH (νικελίου μετάλλου-υδριδίου μετάλλου) με χωρητικότητα 1,7 kWh και μέγιστη ισχύ 38 kW. Η ηλεκτρική ενέργεια αρκεί ώστε το Touareg να μπορεί κινηθεί ως αμιγώς ηλεκτροκίνητο για περίπου 2 χλμ. και με ταχύτητα έως 50 χλμ/ώρα. Τα 0-100 χλμ/ώρα επιτυγχάνονται σε 6,5 δευτερόλεπτα και η τελική ταχύτητα φτάνει τα 240 χλμ/ώρα.



Toyota Prius



Η σημαντικότερη ίσως αλλαγή στο νέο Prius αφορά στην αναβάθμιση του συστήματος HSD (Hybrid Synergy drive) του οποίου η απόδοση έχει αυξηθεί κατά 24% φτάνοντας τους 136 ίππους (από 110). Έτσι, οι επιδόσεις παρουσιάζονται σημαντικά βελτιωμένες με τα 0-100 χλμ./ώρα να επιτυγχάνονται σε 10,4” και την τελική να φτάνει τα 180 χλμ./ώρα. Η μέση τυποποιημένη κατανάλωση μειώθηκε στα 3,9 λίτρα/100 χλμ. αυξάνοντας την θεωρητική αυτονομία στα 1.150 χλμ. ενώ οι εκπομπές CO₂ στα 89 γραμμ./χλμ. Οδηγώντας με σύνεση το νέο Prius η

κατανάλωση μπορεί σχετικά εύκολα να διατηρηθεί στα περίπου 4,0-4,5 λίτρα/100 χλμ.

Ο βενζινοκινητήρας του 1,5 λίτρου έχει αντικατασταθεί από μεγαλύτερο VVT-i χωρητικότητας 1.798 κ.εκ. που αποδίδει 98 ίππους και η ροπή του (142 Nm/4.000 σ.α.λ.) έχει βελτιωθεί κατά 30%. Εξακολουθεί να λειτουργεί σε κύκλο Atkinson ενώ την κατανάλωση βελτιώνει το νέο σύστημα επανακυκλοφορίας καυσαερίων (EGR ή Exhaust Gas recirculation). Σε έναν κινητήρα κύκλου Atkinson οι φάσεις συμπίεσης και εκτόνωσης δεν είναι «συμμετρικές» καθώς υπάρχει βραδυπορία στο κλείσιμο των βαλβίδων καθυστερώντας την συμπίεση. Άρα έχουμε μεγαλύτερη εκτόνωση -με μικρότερη συμπίεση- και η θερμοκρασία των καυσαερίων είναι μικρότερη σε σχέση με τους κινητήρες κύκλου Otto. Το σύστημα EGR αναλαμβάνει να επιστρέψει στο θάλαμο καύσης μέρος των καυσαερίων (από ένα ελεγχόμενο by pass αυλό που διακλαδώνεται με τον μεγαλύτερο της εξαγωγής) μειώνοντας την θερμοκρασία τους από τους 880 C στους 150 C.



Ο ηλεκτροκινητήρας μόνιμου μαγνήτη είναι σημαντικά μικρότερος σε μέγεθος και μεγαλύτερος σε ισχύ φτάνοντας τα 60 kW. Η αύξηση της ισχύος του προέρχεται από το διπλασιασμό του εύρους στροφών του (παράγει 207 Nm από τις 0-13.000 σ.α.λ.) καθώς και από την αλλαγή της σχέσης στο σύστημα μετάδοσης. Μπορεί να λειτουργεί παράλληλα με τον βενζινοκινητήρα ή ανεξάρτητα και, πλέον, δεν είναι υδρόψυκτος. Έως και 70 χλμ/ώρα και σε συνθήκες χαμηλού φορτίου το Prius μπορεί να εκκινήσει αμιγώς ως ηλεκτροκίνητο. Όταν ο οδηγός επιλέξει την κατάσταση EV το Prius κινείται μόνο με ηλεκτρική ενέργεια για περίπου 2 χλμ. ακόμη και όταν η ταχύτητα του αυτοκινήτου ξεπερνά τα 50 χλμ/ώρα. Κατά την επιβράδυνση ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί σαν γεννήτρια ανακτώντας την κινητική ενέργεια. Η γεννήτρια παράγει 42 kW και εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργεί ως start/stop σύστημα για τον βενζινοκινητήρα. Οι μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου των 200 V έχουν ισχύ 27 kW, 2kW περισσότερα από του προηγούμενου μοντέλου, και κατασκευάζονται από την Panasonic. Η αντλία νερού είναι ηλεκτρική μειώνοντας



τις απώλειες ενώ το σύστημα κλιματισμού μπορεί να λειτουργεί κανονικά ακόμη και όταν ο βενζινοκινητήρας δεν λειτουργεί.

Σύμφωνα με έναν από τους μηχανικούς που συμμετείχαν στην εξέλιξη του νέου Prius, ένα από τα σημαντικότερα και πιο πολύπλοκα στοιχεία του συστήματος HSD είναι η μονάδα ελέγχου PCU (Power Control Unit) που το μέγεθος της είναι όσο μίας 12βολτης μπαταρίας αυτοκινήτου. Ζυγίζει 13,5 κιλά και μετατρέπει το συνεχές ρεύμα (DC) της μπαταρίας σε εναλλασσόμενο (AC) ανεβάζοντας την τάση στα 650 V για να τροφοδοτηθεί ο ηλεκτροκινητήρας. Επίσης, λειτουργεί και ως μετασχηματιστής DC/DC μειώνοντας την τάση των 202 V της μπαταρίας στα 14 V για την λειτουργία δευτερευόντων συστημάτων. Αξίζει να σημειωθεί πως ο αεροδυναμικός του συντελεστής Cd έχει βελτιωθεί από 0,26 σε 0,25 ενώ τα φωτιστικά σώματα τεχνολογίας LED εξοικονομούν έως και 30% ηλεκτρικής ενέργειας.

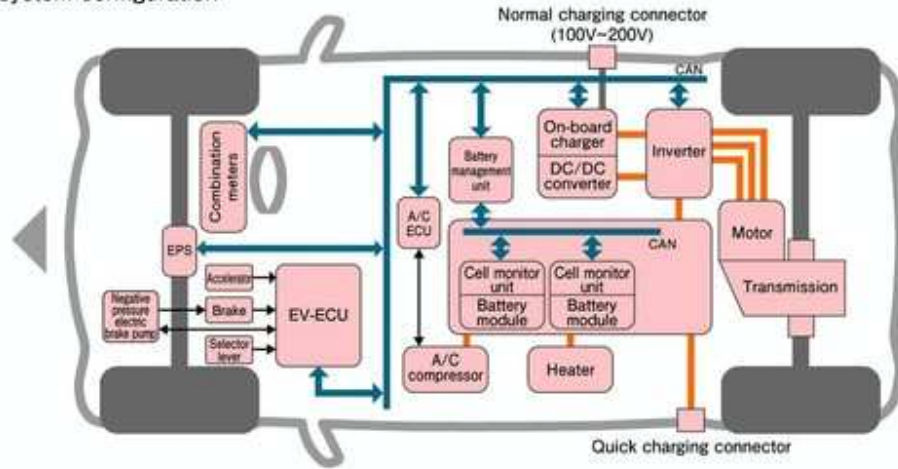
iMiEV Mitsubishi



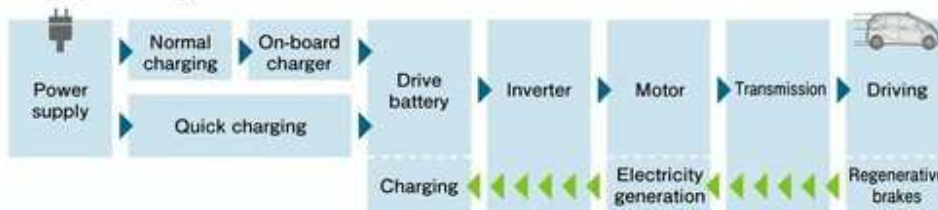
Υπενθυμίζεται πως το τετραθέσιο iMiEV εξοπλίζεται με μπαταρίες λιθίου (22 συστοιχίες από 4 στοιχεία η κάθε μία) που θα βρίσκονται κάτω από τα καθίσματα και θα προσφέρουν περισσότερα από 160 χλμ. αυτονομίας στην πόλη. Από την δεξιά πλευρά του αμαξώματος υπάρχει η υποδοχή για την πλήρη επαναφόρτιση του αυτοκινήτου με σπιτικό ρεύμα (Household Charging System) που διαρκεί περίπου 7 ώρες σε δίκτυο 200 V (14 ώρες σε δίκτυο 100 V). Για ταχεία φόρτιση (Quick Charger System) υπάρχει τριφασική υποδοχή που μπαίνει από την αριστερή πλευρά του αμαξώματος όπου το 80% των μπαταριών του iMiEV γεμίζει σε μόλις 30 λεπτά. Στην Ιαπωνία το iMiEV κοστίζει 1/3 λιγότερο από την κίνηση με ένα συμβατικό βενζινοκίνητο μικρό ενώ αν το φορτίζετε την περίοδο νυχτερινού τιμολογίου το όφελος μπορεί να είναι και δεκαπλάσιο.

Drive System		2WD (rear-wheel drive)
Vehicle Weight/Dimensions	L x W x H	3395mm x 1475mm x 1600mm
	Wheel base	2550mm
	Vehicle weight (kg)	1100kg
	Occupants	4
Performance	Power Consumption (10-15 mode driving pattern)	125Wh/km
	Cruising range/charge (10-15 mode driving pattern)	160km
Drive Battery	Type	Lithium-ion
	Rated voltage	330V
	Rated capacity	16 kWh
Motor	Type	Permanent magnet synchronous
	Model	Y4F1
	Max. output	47kW (64PS) / 3000 - 6000 rpm
	Max. torque	180 Nm (18.4 kgf-m) / 0 - 2000 rpm

■ EV system configuration



Charging-to-driving process



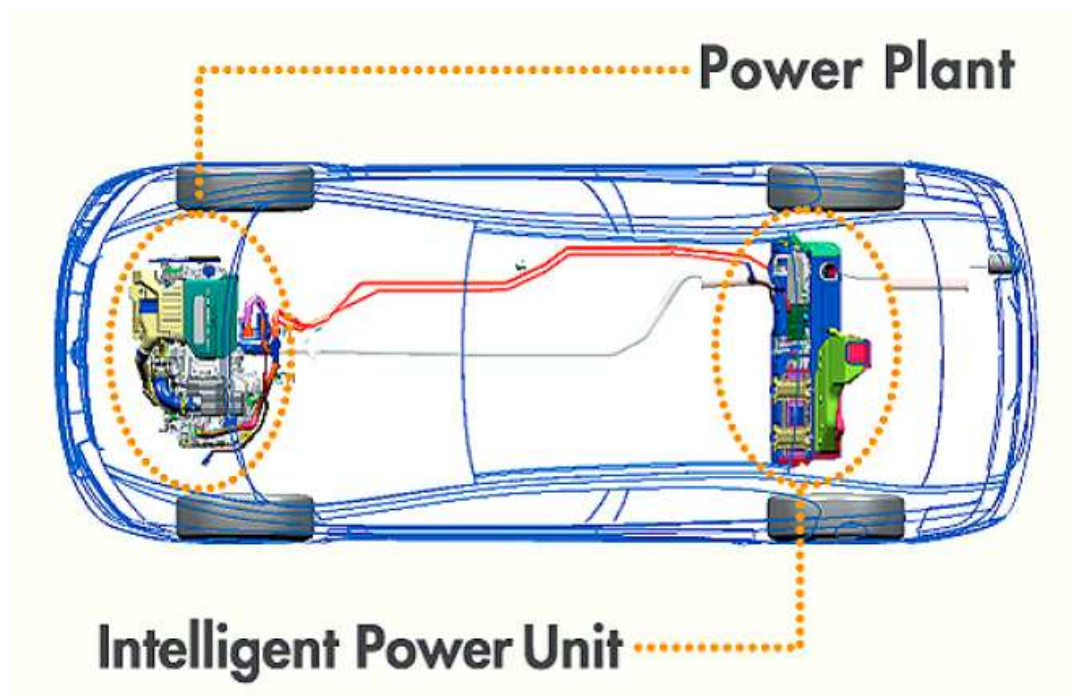
Honda Civic Hybrid

Η τεχνολογία IMA (Integrated Motor Assist) είναι τεχνολογία που υιοθετήθηκε από τη Honda για την κατασκευή των υβριδικών οχημάτων της και εισήχθη για πρώτη φορά το 1999 στο πρώτο υβριδικό μοντέλο της Honda, το Insight. Κάνει χρήση ενός ηλεκτροκινητήρα που είναι τοποθετημένος μεταξύ του κινητήρα και του κιβωτίου ταχυτήτων και ο οποίος ενεργεί σαν κινητήρας εκκίνησης, σαν κινητήρας εξισορρόπησης και σαν βοηθητικός κινητήρας προώθησης. Η πρώτη γενιά της τεχνολογίας IMA δεν μπορούσε να προωθήσει το όχημα μόνο με τον ηλεκτροκινητήρα αλλά έκανε χρήση του ηλεκτροκινητήρα για την υποβοήθηση του κινητήρα ή για την εκκίνηση του οχήματος. Το μοντέλο 2006 Civic Hybrid, ωστόσο, μπορεί σε μέσες ταχύτητες ταξιδιού να ενεργοποιεί τον ηλεκτροκινητήρα για την αποκλειστική προώθηση του οχήματος, όμως σε αντίθεση με το σύστημα Synergy της Toyota ή τα αντίστοιχα υβριδικά συστήματα των εταιριών General Motors και Daimler Chrysler, το IMA έχει ένα λιγότερο ισχυρό ηλεκτροκινητήρα /γεννήτρια που επιτρέπει στο όχημα να μειώνει το ρυθμό επιβράδυνσης του σε μικρότερο βαθμό. Η θεωρία πίσω από το IMA και ο στόχος ήταν να γίνει χρήση της ανάκτησης ισχύος κατά το φρενάρισμα για την αξιοποίηση της ενέργειας που χάνεται στην επιβράδυνση έτσι ώστε αυτή να χρησιμοποιείται εκ νέου για την

επιτάχυνση του οχήματος σε μεταγενέστερο χρόνο. Αυτό έχει δυο αποτελέσματα: αυξάνει το ρυθμό επιτάχυνσης του οχήματος και μειώνει το έργο του βενζινοκινητήρα. Αυτή η αύξηση στην επιτάχυνση είναι σημαντική διότι επιτρέπει την μείωση του μεγέθους του κινητήρα, ενός κινητήρα με καλύτερη οικονομία καυσίμου, χωρίς να καθιστά το αυτοκίνητο πιο αργό. Αυτός ο μικρότερος κινητήρας είναι ο πρωταρχικός λόγος γιατί τα αυτοκίνητα που είναι εξοπλισμένα με το σύστημα IMA έχουν καλύτερη επίδοση σε mpg (μίλια ανά γαλόνι) από τα αντίστοιχα συμβατικά. Επιπρόσθετα, οχήματα με τεχνολογία IMA μπορούν να σβήσουν τον βενζινοκινητήρα τους όταν το όχημα είναι ακινητοποιημένο και να χρησιμοποιήσουν τον ηλεκτροκινητήρα τους για μια γρήγορη εκκίνηση. Μπορούν επίσης να εκκινήσουν και με τον συμβατικό τρόπο, επιλέγοντας την απενεργοποίηση του ηλεκτρικού τους συστήματος και χρησιμοποιώντας μόνο τον κινητήρα, κάτι το οποίο λειτουργεί περισσότερο σαν εφεδρικό σύστημα σε περίπτωση ανάγκης.

Οι τρόποι λειτουργίας του νέου Civic Hybrid είναι :

- Όχημα σε στάση : Ο κινητήρας είναι σβηστός και η κατανάλωση καυσίμου είναι μηδενική.
- Εκκίνηση και επιτάχυνση : Ο κινητήρας λειτουργεί με χρονισμό βαλβίδων βελτιστοποιημένο για χαμηλές στροφές (low-speed valvetiming mode), με τη βοήθεια του ηλεκτροκινητήρα.
- Απότομη Επιτάχυνση: Ο κινητήρας λειτουργεί με χρονισμό βαλβίδων βελτιστοποιημένο για υψηλές στροφές (high-speed valve timing mode), με τη βοήθεια του ηλεκτροκινητήρα.
- Σταθερή πορεία χαμηλής ταχύτητας: Οι βαλβίδες και των τεσσάρων κυλίνδρων του κινητήρα κλείνουν και η καύση σταματάει. Ο ηλεκτροκινητήρας κινεί αποκλειστικά το όχημα.
- Ομαλή επιτάχυνση σε πορεία υψηλής ταχύτητας: Ο κινητήρας λειτουργώντας με χρονισμό βαλβίδων βελτιστοποιημένο για χαμηλές στροφές (low-speed valve timing mode) προωθεί το όχημα.
- Επιβράδυνση: Οι βαλβίδες και των τεσσάρων κυλίνδρων κλείνουν και η καύση σταματάει. Ο ηλεκτροκινητήρας δρα ως γεννήτρια και ανακτά μέρος της κινητικής ενέργειας από το φρενάρισμα, το οποίο το αποθηκεύει στις μπαταρίες.



Εικόνα 23- Το υβριδικό σύστημα του Honda Civic



Εικόνα 24 - Ο κινητήρας του Honda Civic Hybrid

Σύγκριση

1. Πλεονεκτήματα Υδρογόνου

Θετικά Υδρογόνου έναντι συμβατικών πηγών ενέργειας

Στη συνέχεια θα αναφέρουμε συνοπτικά τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το υδρογόνο σαν μέσο παραγωγής ενέργειας, έναντι των συμβατικών ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούνται σήμερα για το σκοπό αυτό: Σε σχέση με οποιοδήποτε συμβατικό καύσιμο, το υδρογόνο παρουσιάζει όπως έχουμε πει την μεγαλύτερη 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 οξείδια 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. Όπως αναφέραμε πριν, 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 ημιανανεώσι'Β5ο 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 ανάφλεξής του τους $585\text{ }^\circ\text{C}$ (αντίστοιχη θερμοκρασία αυθόρμητης ανάφλεξης της βενζίνης, απουσία ατμοσφαιρικού αέρα: $230 \text{ }^\circ\text{C}$. $480 \text{ }^\circ\text{C}$).

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 συμφέ-ρουσα οικονομικά μέθοδος παρασκευής του υδρογόνου αυτή τη στιγμή, βασίζεται στην αναμόρφωση του φυσικού αερίου. Το φυσικό αέριο είναι ένα ορυκτό, το οποίο είναι αρκετά φθηνό, 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 χρησιμοποίησή του πάντως, αποτελεί ένα καλό προσωρινό μέτρο για την παραγωγή υδρογόνου με περιβαλλοντικά φιλικούς τρόπους, μέχρις ότου η μαζική χρησιμοποίηση των διαφόρων ΑΠΕ γι' αυτόν τον σκοπό γίνει πραγματικότητα.

Ένα άλλο θετικό του υδρογόνου είναι ότι είναι το περισσότερο διαδεδομένο στοιχείο με αποτέλεσμα να παράγεται με διαφορετικούς τρόπους και αποκεντρωμένα και από τοπικές πηγές με αποτέλεσμα να εγγυάται έτσι για την προμήθειά του η παγκόσμια ασφάλεια και ειρήνη.

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 αποτέλεσμά της καθολική του κατάρρευση, μιας και τα διάφορα τμήματα που το αποτελούν είναι, λίγο ή περισσότερο ανεξάρτητα το ένα με το άλλο.

Πλεονεκτήματα Υδρογονοκίνησης

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης υδρογόνου ως καύσιμο είναι πολύ μεγάλα. Δεν θα υπάρχουν πλέον τα επικίνδυνα καυσαέρια, δεν θα εκπέμπεται διοξείδιο του άνθρακα το οποίο βοηθά εκτός των άλλων στην αύξηση της θερμοκρασίας στον πλανήτη και δεν θα υπάρχουν πλέον προβλήματα λόγω έλλειψης καυσίμων κάτι που θα έχει με τη σειρά του ευεργετικές συνέπειες στην οικονομία αλλά και στην τσέπη των καταναλωτών. Πιο συγκεκριμένα:

- Ελάχιστες εκπομπές ρύπων. Προστασία της ατμόσφαιρας, φιλικός προς το περιβάλλον ηλεκτρισμός
- Οι κυψέλες δεν έχουν κινητά μέρη. Ήσυχη λειτουργία και μικρή συντήρηση.
- Μεγάλη απόδοση στην μετατροπή ηλεκτρισμού της τάξης του 40-65% . Εξοικονόμηση ενέργειας.
- Προσαρμοζόμενος σχεδιασμός για εφαρμογές από watt μέχρι megawatt.
- Σαν αέριο ή υγρό, το υδρογόνο μπορεί εύκολα να μεταφερθεί, να φυλαχθεί και τελικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε εφαρμογή όπου χρησιμοποιούνται σήμερα τα καύσιμα.
- Κοστίζει λιγότερο για να μετακινηθεί το υδρογόνο σε άλλες ηπείρους ως συμπιεσμένο αέριο με τη βοήθεια σωλήνων, από ένα ίσο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας. Το υγρό υδρογόνο είναι η ασφαλέστερη και πιο οικονομική επιλογή για την κίνηση της ενέργειας από τους ωκεανούς.

- Το υδρογόνο είναι το πιο ασφαλές από όλα τα καύσιμα. Το αέριο υδρογόνο είναι 14 φορές ελαφρύτερο από τον αέρα και για αυτό διαχέεται ταχέως στην ατμόσφαιρα στην περίπτωση ενός ατυχήματος. Ενώ τα άλλα καύσιμα έχουν μεγάλο χρόνο επικινδυνότητας έως ότου αυτά ξεφύγουν από την θέση τους.

2. Αρνητικά Υδρογόνου

Αρνητικά Υδρογόνου έναντι των συμβατικών πηγών ενέργειας

Όσον αφορά τώρα 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: Το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίζει σήμερα το υδρογόνο σαν καύσιμο, αλλά και γενικότερα σαν 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 νανοδομημένα 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. Ένα τελευταίο πρόβλημα που αντιμετωπίζει σήμερα το υδρογόνο σαν 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 χρησιμοποίησή τους.

Για παράδειγμα, διάφορες κυψέλες καυσίμου υδρογόνου (π.χ. κυψέλες καυσίμου για οικιακή ή μεταφορική χρήση), εμφανίζουν ακόμα αρκετά προβλήματα μη ανοχής σε «μή 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 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 ολοένα 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.

Αρνητικά Υδρογονοκίνησης

- "Πράσινος" κίνδυνος Η χρήση του υδρογόνου ως πηγή ενέργειας τις επόμενες δεκαετίες ίσως βλάψει σημαντικά το στρώμα του όζοντος, σύμφωνα με έρευνα που δημοσιεύεται στο περιοδικό Science. Η ερευνητική ομάδα του Τεχνολογικού Ινστιτούτου της Καλιφόρνιας (CalTech) υποστηρίζει ότι το υδρογόνο που διαρρέει στο περιβάλλον θα ανεβαίνει πολύ γρήγορα στη στρατόσφαιρα - το υδρογόνο είναι το πιο ελαφρύ στοιχείο - όπου θα αντιδρά με το οξυγόνο για το σχηματισμό νερού.
- Άγνωστες παράμετροι. Σύμφωνα με υπολογισμούς, η διαρροή από τις μονάδες παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής του καυσίμου θα αντιστοιχεί στο 20% της ολικής ποσότητας υδρογόνου.
- Διάχυση τεχνογνωσίας. Προκύπτει ένα ερώτημα για την δημιουργία αυτοκινήτου με υδρογόνο το οποίο είναι αν θα μπορέσουν όλοι να διεξάγουν έρευνα και εξέλιξη πάνω στις κυψέλες υδρογόνου, με σχετικά μικρούς προϋπολογισμούς κι όχι τους τεράστιους που καθιστούν αναγκαίους οι ξαφνικές αλλαγές στη νομοθεσία περί εκπομπής ρύπων. Επίσης, ένας άλλος λόγος για τον οποίον μια τέτοια μετάβαση δείχνει βολική για τις εταιρείες είναι τό ότι θα μπορέσουν να συνεχίσουν να πουλάνε τα υπάρχοντα προϊόντα τους προβαίνοντας μόνο σε μικρές και σχετικά φθηνές αλλαγές στους κινητήρες τους.

3. Πλεονεκτήματα Υβριδικού Ηλεκτρικού Οχήματος

- Ένα πλήρως υβριδικό σύστημα έχει την δυνατότητα να κινεί το όχημα μόνο με τον βενζινοκινητήρα ή μόνο με τον ηλεκτροκινητήρα ή και τους δύο ταυτόχρονα.
- Καταναλώνουν πολύ λιγότερο καύσιμο. Σε ειδικές μετρήσεις που έχουν γίνει έχει αποδειχθεί ότι ένα υβριδικό καταναλώνει από 20%-40% λιγότερο από ένα αντίστοιχης ισχύος συμβατικό αυτοκίνητο, ανάλογα με το πού κινείται. Στην πόλη για παράδειγμα όπου ο ηλεκτροκινητήρας δουλεύει πιο πολύ μπορεί να φτάσει το 40%, ενώ στον αυτοκινητόδρομο που θέλουμε όλη την ισχύ η οικονομία «πέφτει» στο 20% .
- Με την απόκτησή τους να συνοδεύεται από αρκετά μπόνους από πλευράς κράτους όπως η απαλλαγή σε μεγάλο ποσοστό από τους δασμούς, δεν έχουν τέλη κυκλοφορίας για τα 5 πρώτα χρόνια και μπαίνουν ελεύθερα στο δακτύλιο.

- Όταν χρησιμοποιούμε τα φρένα σε ένα συμβατικό αυτοκίνητο, η κινητική ενέργεια που έχει όταν μετακινείται μετατρέπεται σε θερμότητα. Σε ένα υβριδικό αυτοκίνητο, τα φρένα παίρνουν ένα ποσοστό από την ενέργεια αυτή και αντί να χαθεί στο περιβάλλον, χρησιμοποιώντας την ηλεκτρική μηχανή ως γεννήτρια την εναποθέτει πίσω στις μπαταρίες.
- Τα υβριδικά οχήματα επιτυγχάνουν μεγάλα οφέλη στην εξοικονόμηση καυσίμου και στις εκπομπές CO₂.
- Οι κυβερνήσεις των ανεπτυγμένων χωρών φαίνεται να έχουν αντιληφθεί τα πλεονεκτήματα της υβριδικής τεχνολογίας και τα οικονομικά οφέλη στα οποία θα τις οδηγήσουν. Ήδη πολλές κυβερνήσεις, μεταξύ αυτών και η Ελληνική, κάνουν λόγο για ανάγκη αλλαγής των κυβερνητικών οχημάτων από άλλα, υβριδικής τεχνολογίας. Επίσης για τους κατόχους υβριδικών οχημάτων ισχύουν ειδικές φορολογικές ρυθμίσεις. Οι ρυθμίσεις αυτές ισχύουν ήδη στην Αμερική. Στην Ελλάδα οι κάτοχοι υβριδικών αυτοκινήτων δεν πληρώνουν τέλη κυκλοφορίας και ταξινόμησης. Αν αναλογιστεί κανείς το πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι κάτοικοι της Αθήνας με τον δακτύλιο είναι σημαντικό το πλεονέκτημα ότι στους κατόχους υβριδικών επιτρέπεται να κινούνται συνεχώς στον δακτύλιο. Ας δούμε ποια μέτρα ισχύουν για τους κατόχους υβριδικών οχημάτων σε άλλες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης:
 - Στην Αυστρία, ο Φόρος Προστιθεμένης Αξίας μειώνεται στο μισό. Επίσης, υπάρχει επιδότηση μέχρι 15%, απαλλαγή από το τέλος ταξινόμησης και τα τέλη κυκλοφορίας, κυκλοφοριακές διευκολύνσεις και μειωμένα ασφάλιστρα.
 - Στην Ιταλία επιδοτούνται μέχρι και το 65% της διαφοράς τιμής. Απαλλάσσονται επίσης από τα τέλη ταξινόμησης και κυκλοφορίας.
 - Στην Ολλανδία έχουν απαλλαγεί πλήρως από τη φορολογία, γεγονός που σημαίνει ότι είναι φθηνότερα περίπου 7.000 - 8.000 ευρώ. Επίσης, προβλέπεται επιπλέον μειωμένος ΦΠΑ και απαλλαγή από τέλη κυκλοφορίας.
 - Στο Βέλγιο, τα κίνητρα περιλαμβάνουν επιδότηση μέχρι 4.000 ευρώ και κυκλοφοριακές διευκολύνσεις.
 - Στη Γαλλία, τα κίνητρα περιλαμβάνουν επιδότηση μέχρι 3.800 ευρώ, απαλλαγή από τέλη κυκλοφορίας και κυκλοφοριακές διευκολύνσεις.
 - Στη Βρετανία πληρώνουν μειωμένους φόρους, ενώ παρέχεται δωρεάν πρόσβαση στο δακτύλιο του Λονδίνου.
 - Στη Σουηδία υπάρχει ολοκληρωμένο πενταετές πρόγραμμα προώθησης της τεχνολογίας, ενώ στις ΗΠΑ μείωση της φορολογίας κατά 2.000 δολάρια.

4. **Αρνητικά Υβριδικού Ηλεκτρικού Οχήματος**

- Τα υβριδικά αυτοκίνητα κοστίζουν ακριβότερα από τα αντίστοιχα συμβατικά αν και πολλές φορές έχουν καλύτερες επιδόσεις.
- Το αυξημένο βάρος, λόγω μπαταριών, που επιδρά στην οδική τους συμπεριφορά.
- Είναι άγνωστο προς το παρόν κόστος αντικατάστασης των μπαταριών μετά την παρέλευση 10ετίας από την αγορά τους .
- Τα περισσότερα έχουν μικρή χωρητικότητα στο πορτ-μπαγκάζ.
- Ένα σημαντικό πρόβλημα των υβριδικών αυτοκινήτων είναι οι μπαταρίες τους. Διότι ενώ υπάρχουν εναλλακτικοί τρόποι φόρτισης τους, αυτοί δεν είναι αρκετοί για να γεμίσουν γρήγορα τις μπαταρίες. Έτσι ο ηλεκτροκινητήρας δεν μπορεί να λειτουργήσει για πολύ χρόνο με αποτέλεσμα σε μεγάλες αποστάσεις να χρησιμοποιείται και ο βενζινοκινητήρας. Σ' αυτό το πρόβλημα οι υπεύθυνοι τεχνικοί και μηχανικοί ψάχνουν να βρουν μια λύση, αφού έτσι το υβριδικό αυτοκίνητο θα κάνει ένα ακόμα βήμα προς τη «τελειότητα».

Εκκίνηση	Οδήγηση	Προσπεράση	Φρενάρισμα	Τέρμα
Κινητήρας κλειστός	Κινητήρας ή	Κινητήρας	Κινητήρας κλειστός	Κινητήρας κλειστός
EV drive	EV drive	+	Ανά-πλάσμα	
	ή Κινητήρας + Ηλεκτήρας	Ηλεκτήρας	πλάσμα	
Μηδενική κατανάλωση	Μακύτερη θερμική απόδοση της μηχανής		Ενεργειακή απόδοση	Μηδενική κατανάλωση

- Ακόμα μέχρι πριν λίγο καιρό η τεχνολογική ανάπτυξη των υβριδίων δεν επέτρεπε την ύπαρξη 4x4 αυτοκινήτων. Ωστόσο πρόσφατα αυτό έγινε πραγματικότητα και τα 4x4 υβριδικά αυτοκίνητα βγήκαν στην αγορά. Αλλά παρότι βγήκαν χρειάζονται πολλές μελέτες για να μειωθεί η καύση τους, αφού είναι αρκετά υψηλή. Γι' αυτό το λόγο τα υβριδικά 4x4 έχουν πολλά περιθώρια βελτίωσης.
- Ένα σοβαρό μειονέκτημα των υβριδικών οχημάτων σε σχέση με τα αντίστοιχα συμβατικά είναι το ότι στην περίπτωση ατυχήματος είναι



αυξημένες οι πιθανότητες ηλεκτροπληξίας για τους επιβάτες. Τα υβριδικά αυτοκίνητα μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες τάσης που στην περίπτωση ατυχήματος τα καθιστούν επικίνδυνα .

- Πόση Ηλεκτρο-μαγνητική ακτινοβολία “τρώμε” την ημέρα; Ιδιαίτερα ενδιαφέροντα ήταν τα αποτελέσματα της έρευνας που πραγματοποίησε το Ινστιτούτο ΙΔΕΕΑ σχετικά με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που δέχεται ένας οδηγός υβριδικού ηλεκτρικού οχήματος. **Οι μετρήσεις στο υβριδικό όχημα:**



Μέτρηση κοντά στο τιμόνι του υβριδικού οχήματος με τον διακόπτη ON και τον κινητήρα σε λειτουργία.
Τιμή: 2,8 milligauss
(στην κλίμακα 0-100 milligauss)



Μέτρηση κοντά στον οδηγό του υβριδικού οχήματος με τον διακόπτη ON και τον κινητήρα σε λειτουργία.
Τιμή: 1,5 milligauss
(στην κλίμακα 0-3 milligauss)



Μέτρηση κοντά στον συνοδηγό του υβριδικού οχήματος με τον διακόπτη ON και τον κινητήρα σε λειτουργία.
Τιμή: 1,2 milligauss (στην κλίμακα 0-3 milligauss)



Μέτρηση στο πάτωμα του υβριδικού οχήματος, πλευρά συνοδηγού, με τον διακόπτη ON και τον κινητήρα σε λειτουργία, το όχημα σε κίνηση. Τιμή: 50 milligauss
(στην κλίμακα 0-100 milligauss)



Μέτρηση επάνω στο καπό του υβριδικού οχήματος, με τον διακόπτη ON και τον κινητήρα σβηστό, το όχημα σε στάση
Τιμή: 2 milligauss (στην κλίμακα 0-100 milligauss)



Μέτρηση στο πίσω μέρος των επιβατών του υβριδικού οχήματος με τον διακόπτη ON και τον κινητήρα σε λειτουργία.
Τιμή: 1,2 milligauss (στην κλίμακα 0-3 milligauss)



Μέτρηση κοντά στο ταμπλό του υβριδικού οχήματος με τον διακόπτη ON και τον κινητήρα σβηστό.
Τιμή: 1,3 milligauss (στην κλίμακα 0-3 milligauss)



Μέτρηση κοντά στο ταμπλό του υβριδικού οχήματος με τον διακόπτη ON και τον κινητήρα σε λειτουργία, το όχημα σε κίνηση.
Τιμή: 18 milligauss (στην κλίμακα 0-100 milligauss)

Συμπεράσματα

Συμπερασματικά φαίνεται ότι η μηχανή εσωτερικής καύσης υδρογόνου δεν αποτελεί ουτοπία ούτε όραμα για το μέλλον αλλά σύγχρονη πραγματικότητα. Ακόμα και η προσαρμογή μιας σύγχρονης MEK βενζίνης στην καύση του υδρογόνου υπό προϋποθέσεις, χωρίς υψηλές απαιτήσεις λειτουργίας, δεν είναι δύσκολο να επιτευχθεί. Το δύσκολο είναι η σωστή, ομαλή και αξιόπιστη λειτουργία της μηχανής, με βελτιστοποίηση της απόδοσης και επίτευξη ικανοποιητικής ισχύος απουσία φαινομένων ανώμαλης καύσης. Όλα τα παραπάνω είναι εφικτά, αρκεί να τηρηθούν βασικές αρχές σχεδιασμού των επιμέρους τμημάτων και υποσυστημάτων της μηχανής, με γνώμονα τις ιδιαιτερότητες του υδρογόνου και να υιοθετηθούν ρυθμίσεις με οδηγό τις τόσο διαφορετικές από την βενζίνη ιδιότητες καύσης του νέου καυσίμου.

Πράσινα αυτοκίνητα made in Greece

Το ελληνικό αυτοκίνητο υδρογόνου



- Αριθμός θέσεων: 4
- Αυτονομία: 75 - 90 χλμ.
- Με 1 ποτήρι νερό μπορεί να διανύσει 50 χλμ.
- Μέγιστη ταχύτητα: 45 χλμ. ώρα
- Ικανότητα αναρρίχησης: 20%
- Εκπομπές καυσαερίων: καμία (απελευθερώνει μόνο οξυγόνο)
- Κόστος κίνησης: 1 ευρώ/100 χλμ.
- Εκτιμώμενο κόστος αγοράς: 15.000 ευρώ

«Όταν στη δεκαετία του '90 μιλούσα για αυτοκίνητα υδρογόνου, με θεωρούσαν γραφικό. Ευτυχώς κάποιοι πίστεψαν στο όραμά μου και σε λίγα χρόνια θα είμαστε σε θέση να κυκλοφορήσουμε στους ελληνικούς δρόμους το πρώτο αυτοκίνητο υδρογόνου», λέει ο Γιώργος Λάγιος, ιδιοκτήτης της εταιρείας Tropical

Το ηλεκτρικό αυτοκίνητο REVA Phaedra



«Το ενδιαφέρον του κόσμου για ηλεκτρικά αυτοκίνητα θα είναι από 'δω και στο εξής αυξημένο, καθώς βλέποντας την τιμή της βενζίνης να εκτοξεύεται στα ύψη θα ψάχνει εναλλακτικούς τρόπους ακόμη και στο αυτοκίνητο», υποστηρίζει ο Γιάννης Δήμου, αποκλειστικός εισαγωγέας στη χώρα μας του ηλεκτρικού αυτοκινήτου REVA Phaedra

- Αριθμός θέσεων: 2 (και 2 μικρά καθίσματα ανάγκης)
- Κόστος: 12.500 ευρώ
- Μέγιστη ταχύτητα: 75 χλμ./ώρα
- Με φόρτιση 6 - 8 ωρών διανύει έως 100 χλμ.
- Κόστος επίσης κατανάλωσης ρεύματος: 87 ευρώ
- Ρύπανση: Δεν εκπέμπει ρύπους όταν κινείται
- Κυκλοφορεί καθημερινά στον δακτύλιο
- Δεν έχει τέλη ταξινόμησης
- Τέλη κυκλοφορίας 13 ευρώ τον χρόνο



Με αφορμή την δημοσίευση αυτή μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το υδρογονοκίνητο όχημα σε σύγκριση με το καθαρά ηλεκτρικό plug-in είναι σαφώς πιο οικονομικό σε θέμα κατανάλωσης αφού το υδρογονοκίνητο χρειάζεται ένα ευρώ περίπου για να διανύσει 100 χλμ ενώ το ηλεκτρικό όχημα χρειάζεται περισσότερα χρήματα διότι παίρνει ενέργεια από το ηλεκτρικό δίκτυο της τάξεως 6 έως 8 ώρες φόρτιση για 100 χλμ.

Επίσης, ένα άλλο συμπέρασμα που προκύπτει από την παραπάνω σύγκριση είναι ότι το ηλεκτρικό όχημα είναι πιο βαρύ σε σχέση με αυτό του υδρογόνου και αυτό γιατί το ηλεκτρικό χρησιμοποιεί συστοιχίες μπαταριών.

Επιπρόσθετα, το κόστος αντικατάστασης των μπαταριών λόγω βλάβης είναι αρκετά μεγάλο για το ηλεκτρικό όχημα σε σχέση με το υδρογόνο το οποίο χρειάζεται μία μικρή και οικονομική συντήρηση μετά από κάποιο χρονικό διάστημα (καθαρισμός των κυψελών καυσίμων από άλατα).

Επειδή το υδρογόνο είναι το περισσότερο διαδεδομένο στοιχείο με αποτέλεσμα αυτό να παράγεται με διάφορους τρόπους και αποκεντρωμένα και από τοπικές πηγές τα οχήματα που κινούνται με υδρογόνο έχουν εξασφαλίσει συνεχές καύσιμο ακόμα και στο σπίτι τους σαφώς πιο φθηνό από αυτό του ηλεκτρικού.

Τέλος, θα κλείσω με μια φράση του Ιούλιου Βέρν από το έργο του «*Η μυστηριώδης νήσος*», 1874,

«Πιστεύω ότι μια μέρα το νερό θα χρησιμοποιηθεί σαν καύσιμο, το υδρογόνο και το οξυγόνο που το αποτελούν θα αποτελέσουν μια ανεξάντλητη πηγή θερμότητας και φωτός»

Βιβλιογραφία

1. «Υδρογόνο – Τεχνολογία και Ανάπτυξη – Το μέλλον της αυτοκίνησης»,
Ενεργειακός τομέας Τ.Ε.Ι. Πειραιά
2. www.caroto.gr
3. www.physics4u.gr
4. www.fuelcellmarkets.com
5. www.tropical.gr
6. www.h2mobility.org/
7. www.h2stations.org
8. <http://www.carshybrid.gr/>
9. <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A5%CE%B2%CF%81%CE%B9%CE%B4%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CE%B1%CF%85%CF%84%CE%BF%CE%BA%CE%AF%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%BF>
10. <http://www.openscience.gr/el/%CF%85%CE%B2%CF%81%CE%B9%CE%B4%CE%B9%CE%BA%CE%AC-%CE%B1%CF%85%CF%84%CE%BF%CE%BA%CE%AF%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%B1%3A-%CE%B7-%CF%80%CF%81%CE%AC%CF%83%CE%B9%CE%BD%CE%B7-%CE%B5%CF%80%CE%B9%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AE-%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BD-%CE%B1%CF%85%CF%84%CE%BF%CE%BA%CE%AF%CE%BD%CE%B7%CF%83%CE%B7-%CF%84%CE%BF%CF%85-%CF%83%CE%AE%CE%BC%CE%B5%CF%81%CE%B1>
11. <http://efhbos.wordpress.com/2008/11/23/hybric/>
12. <http://hybridcarsgr.blogspot.com/>