

# ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

**ΘΕΜΑ:** «Τεχνολογίες υδρογόνου για χρήση σε οχήματα με έμφαση στις κυψέλες καυσίμου»



The Hydrogen Society and Energy Sources of the Future

**H<sub>2</sub> O P E**

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

*Ιούλιος Βερν, 1874, «Το μυστηριώδες νησί»*

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΙΩΑΝΝΗΣ ΒΛΑΧΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΡ. ΓΚΕΪΒΑΝΙΔΗΣ ΣΑΒΒΑΣ**

## Περιεχόμενα

<b>Αντικείμενο :</b> .....	5
1. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	6
1.1. ΓΙΑΤΙ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ;.....	7
2. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	8
3. ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΜΙΑ ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ;.....	11
3.1. ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	12
(ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ) .....	12
4. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟ .....	16
4.1. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ.....	16
4.2. ΠΕΡΕΤΑΙΡΩ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	18
5. ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΟΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ.....	21
5.1. ΤΑ ΟΡΙΑ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΤΙΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ .....	24
5.2. ΣΥΝΔΕΟΝΤΑΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΣΤΗ ΣΕΙΡΑ .....	26
5.3. ΠΑΡΟΧΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΨΥΞΗ .....	30
6. ΤΥΠΟΙ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	33
6.1. ΚΑΠΟΙΕΣ ΑΛΛΕΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ .....	40
7. ΚΟΜΜΑΤΙΑ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ .....	43
7.1. ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΜΙΑ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	44
7.2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ .....	45
7.3. ΑΝΑΜΟΡΦΩΤΕΣ .....	46
7.4. ΚΑΤΩΤΕΡΟΣ ΚΥΚΛΟΣ.....	47
7.5. ΡΥΘΜΙΣΗ ΙΣΧΥΟΣ .....	49
7.6. ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	50
7.7. ΨΥΞΗ.....	50
7.8. ΑΕΡΟΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ .....	51
7.9. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΙΟΥ .....	53
7.10. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΓΙΑ ΝΑ ΣΥΓΚΡΙΝΟΥΝ ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	54
8. Πλεονεκτήματα και Εφαρμογές.....	56
9. ΚΑΥΣΙΜΑ ΓΙΑ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ – ΟΧΗΜΑΤΑ.....	57
9.1. ΦΤΙΑΧΝΟΝΤΑΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΓΙΑ ΤΙΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ .....	58
9.2. Τι είναι ένας μεταρρυθμιστής καυσίμων;.....	59
10. ΑΝΑΦΟΡΑ ΤΡΟΠΟΥ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΕΠΙ ΤΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	62
10.1. ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΥΓΡΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	62
10.2. Συμπιεσμένο υδρογόνο.....	63
10.3. Ρευστοποιημένο υδρογόνο.....	63
10.4. ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΥΔΡΙΔΙΑ.....	65

10.5.	Άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης υδρογόνου .....	66
11.	ΚΟΣΤΟΣ .....	68
11.1.	Είναι το υδρογόνο πραγματικά ανταγωνιστικό ? .....	70
11.2.	Το υδρογόνο σαν εναλλακτικό καύσιμο κίνησης.....	71
11.3.	ΚΑΠΟΙΑ ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ.....	71
11.4.	ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ.....	72
11.5.	ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ .....	73
12.	ΜΕΤΕΤΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ .....	74
12.1.	Ο ΦΟΒΟΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ , ΤΑ ΑΤΥΧΙΜΑΤΑ ΚΑΙ Η ΑΣΦΑΛΕΙΑ.....	76
12.2.	ΟΙ ΣΥΝΘΙΚΕΣ ΓΙΑ ΑΣΦΑΛΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΕ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ 77	77
13.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΕΣ.....	78
14.	ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ .....	79
14.1.	ΑΡΧΙΚΗ ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΟΚΙΕΣ .....	80
15.	ΕΠΙΛΟΓΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	81
16.	ΤΑ ΛΕΩΦΟΡΕΙΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	82
16.1.	ΟΙ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΑ ΛΕΩΦΟΡΕΙΑ.....	83
16.2.	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥΧΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ .....	84
16.3.	ΡΥΘΜΟΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ .....	87
16.4.	ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑ .....	87
16.5.	ΡΥΘΜΟΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ .....	88
16.6.	ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕ ΚΑΥΣΙΜΑ .....	89
16.7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ .....	90
17.	ΗΛΕΚΤΡΟΝΥΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ (ιστορικά στοιχεία) .....	91
17.1.	ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ .....	93
17.2.	Η ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	94
17.3.	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ .....	94
17.4.	ΑΛΚΑΛΙΚΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΕΣ.....	95
17.5.	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	96
17.6.	ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ .....	97
17.7.	ΚΥΨΕΛΕΣ , ΗΛΕΚΤΡΟΛΗΣΕΙΣ , ΣΧΕΔΙΑ .....	99
17.8.	ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΑΚΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ.....	100
17.9.	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ.....	104
17.10.	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΣΚΕΛΟΣ.....	105
17.11.	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΟΣΤΟΥΣ.....	105
17.12.	ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	107
17.13.	Ενέργεια Gibbs: .....	107

17.14.	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ / ΚΟΣΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	110
17.15.	ΕΠΕΝΔΥΣΕΙΣ /ΚΟΣΤΟΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ .....	111
17.16.	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΛΛΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΕΙΣ.....	112
18.	ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΙΚΗ .....	113
18.1.	ΑΕΡΟΣΤΑΤΑ.....	113
18.2.	ΑΕΡΟΠΛΟΙΑ .....	114
18.3.	ΑΕΡΟΠΛΑΝΑ .....	117
18.4.	πρώιμες μελέτες - τα υπερηχητικά αεροσκάφη μεταφοράς.....	118
19.	ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ , ΜΕΛΕΤΕΣ ΣΤΗΝ ΠΡΩΗΝ ΣΟΒΙΕΤΙΚΗ ΕΝΩΣΗ .....	123
20.	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΝΟΣ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	124
20.1.	ΤΟ ΣΩΜΑ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ.....	126
20.2.	ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΚΤΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	127
20.3.	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ .....	127
20.4.	ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΙΣΧΥΟΣ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ .....	128
20.5.	ΣΥΣΤΟΙΧΙΕΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ .....	129
20.6.	ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ .....	130
20.7.	προδιαγραφές κυψελών καυσίμου .....	131
20.8.	Επιδόσεις του αυτοκινήτου.....	131
20.9.	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ.....	132
21.	ΤΟΥΤΟ ΜΙΡΑΙ : ΤΟ ΝΕΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟΚΙΝΗΤΟ ΤΟΥ 2016!.....	134
21.1.	ΠΩΣ ΕΙΝΑΙ ΣΤΗΝ ΟΔΗΓΗΣΗ;.....	137
21.2.	ΝΑ ΤΟ ΑΓΟΡΑΣΩ; .....	139
21.3.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΑ... .....	139
21.4.	ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ .....	139
22.	ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	140
22.1.	ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ .....	140
23.	ΤΟ ΤΕΛΙΚΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ!.....	142
23.1.	ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΕΝΟΥΜΕ.....	143
23.2.	ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ .....	144
24.	ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	146
25.	ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	148
26.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	149



Εικόνα 0-1

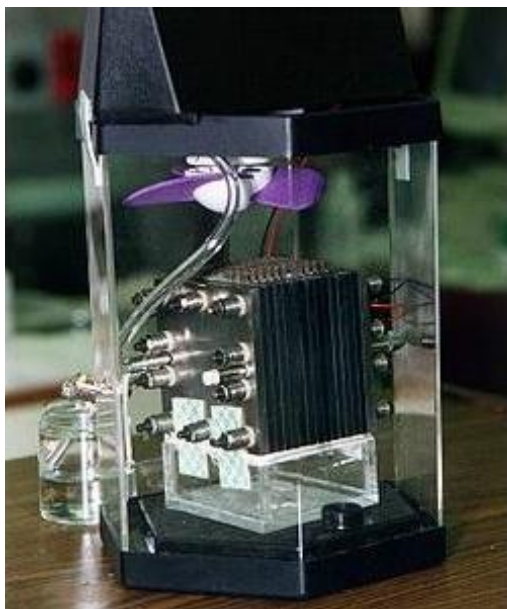
## ΤΕΙ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ (ΣΕΡΡΕΣ) ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

### **Αντικείμενο :**

Αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση των τεχνολογιών υδρογόνου που είναι κατάλληλες για χρήση του υδρογόνου σε οχήματα. Έμφαση θα δοθεί στις κυψέλες καυσίμου σε συνδυασμό με τον υπό εξέλιξη εξηλεκτρισμό των οχημάτων σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι διαφορετικές τεχνολογίες θα εξεταστούν ως προς τον τρόπο εφαρμογής τους, την ωριμότητά τους, την οικονομική τους βιωσιμότητα και τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον.

## 1. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.

Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν τα κέντρα ενός συστήματος τα οποία εμπεριέχουν το υδρογόνο ως καύσιμο το οποίο το μετατρέπουν σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Ακριβέστερα, Η κυψέλη καυσίμου αποτελεί ένα μηχανισμό για την ηλεκτροχημική μετατροπή της ενέργειας μετατρέποντας υδρογόνο και οξυγόνο σε νερό, παράγοντας ταυτόχρονα με τη διαδικασία αυτή, ηλεκτρισμό και θερμότητα. Ο ηλεκτρισμός παράγεται με τη μορφή συνεχούς ρεύματος. Η όλη διαδικασία είναι βασισμένη σε τεχνολογία η οποία δεν προκαλεί περιβαλλοντική επιβάρυνση. Παρόλα αυτά δεν θεωρείτε ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, αλλά είναι μια μέθοδος μετατροπής ενέργειας αποθηκευμένης υπό τη μορφή καυσίμου σε ηλεκτρισμό και θερμότητα.



*Εικόνα 1-1* μοντέλο επίδειξης μιας κυψέλης καυσίμου άμεσης μεθανόλης. Η πραγματική συστοιχία κυψελών καυσίμου είναι το στρωματοποιημένο σχήμα κύβου στο κέντρο της εικόνας

Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell)

### 1.1. ΓΙΑΤΙ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ;

Η εντατική χρήση των ορυκτών καυσίμων (γαιάνθρακες, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) και της πυρηνικής ενέργειας τα τελευταία χρόνια, ευθύνεται σε μεγάλο βαθμό για τα σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα που αντιμετωπίζει ο πλανήτης μας και τα οποία έχουν άμεσο αντίκτυπο στις κλιματικές συνθήκες και γενικά στις συνθήκες ζωής πάνω στον πλανήτη.

Είναι φανερό ότι οι ενεργειακές ανάγκες συνεχώς θα αυξάνονται, αφού ο πληθυσμός της γης αυξάνεται με γοργούς ρυθμούς αλλά και η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου του ανθρώπου πολλαπλασιάζει τις δραστηριότητές του, οι οποίες τελικά απαιτούν κατανάλωση ενέργειας.

Η ανθρωπότητα καλείται να απαντήσει στο βασικό ερώτημα, αν θα συνεχίσει να καλύπτει τις ενεργειακές της ανάγκες κυρίως με τα ορυκτά καύσιμα (μέχρι αυτά να εξαντληθούν) με την επακόλουθη περιβαλλοντική επιβάρυνση ή θα αναζητήσει σύντομα άλλες λύσεις. Οι παγκόσμιες συνδιασκέψεις του Ρίο, του Κιότο και της Χάγης δυστυχώς δεν κατάφεραν να δώσουν ουσιαστική λύση στο πρόβλημα αυτό.



*Εικόνα 1-2 ατμοσφαιρική ρύπανση στο Λονδίνο*

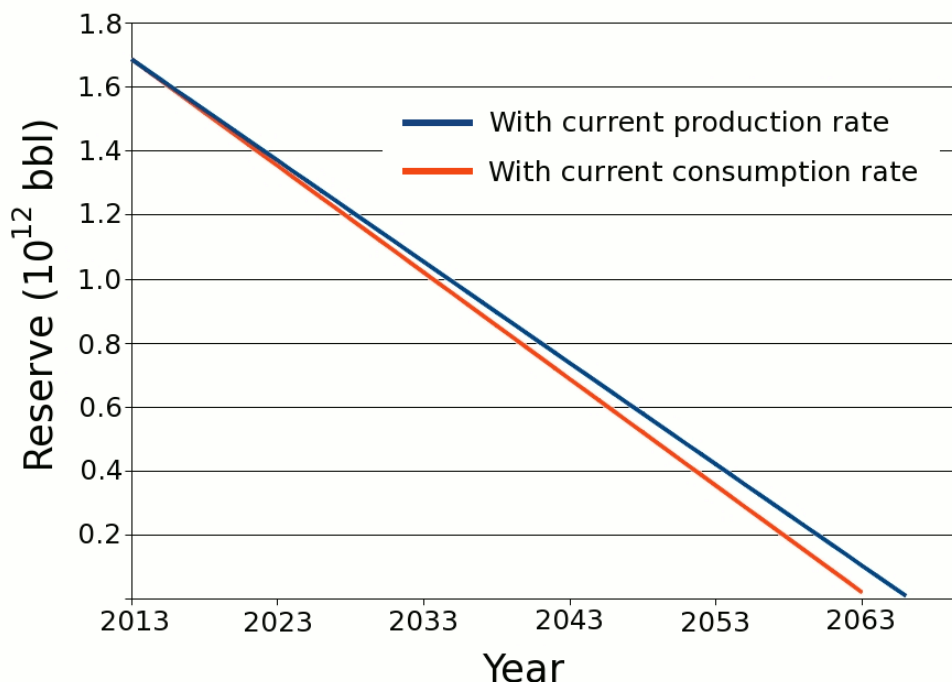
Πηγή: <http://www.medicalland.gr/2014-04-02-13-53-23/>

Η μόνη απάντηση που προς το παρόν διαφαίνεται ότι θα περιορίσει δραστικά τα περιβαλλοντικά προβλήματα είναι η χρήση των διαφορετικών πηγών ενέργειας. Αν και η τεχνολογία έχει κάνει σημαντικά βήματα προς τον τομέα αυτό, η εφαρμογή τους βρίσκεται σε αρχικό ακόμη στάδιο. Η εκμετάλλευση τους μπορούν και πρέπει να γίνουν οικονομικά εκμεταλλεύσιμες ώστε να συμβάλλουν στην αειφόρο ανάπτυξη, εφόσον είναι ανανεώσιμες και ρυπαίνουν ελάχιστα ή καθόλου.

Η ρύπανση της ατμόσφαιρας αποτελεί σοβαρό υγειονομικό, περιβαλλοντικό, κοινωνικό και οικονομικό πρόβλημα, γιατί τα αέρια που τη ρυπαίνουν, όπως το διοξείδιο του άνθρακα έχουν σοβαρές συνέπειες, όπως την υπερθέρμανση της γης, αναπνευστικά προβλήματα και άλλα προβλήματα υγείας. Η ατμοσφαιρική ρύπανση βλάπτει την υγεία του ανθρώπου και το περιβάλλον. Στην Ευρώπη, οι εκπομπές πολλών ατμοσφαιρικών ρύπων έχουν μειωθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες με αποτέλεσμα τη βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας στην περιοχή. Ωστόσο, οι συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών

ρύπων παραμένουν σε υπερβολικά υψηλό επίπεδο και τα προβλήματα ποιότητας του αέρα εξακολουθούν να υπάρχουν. Σημαντικό ποσοστό του ευρωπαϊκού πληθυσμού κατοικεί σε περιοχές, ιδιαίτερα σε πόλεις, όπου παρουσιάζονται υπερβάσεις στα πρότυπα ποιότητας του αέρα: το όζον, το διοξείδιο του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια (ΑΣ) ενέχουν σοβαρούς κινδύνους για την υγεία. Πολλές χώρες έχουν υπερβεί ένα ή περισσότερα από τα όρια εκπομπών του 2010 για τέσσερις σημαντικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους. Ως εκ τούτου, το θέμα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης παραμένει σημαντικό.

Τα αποθέματα πετρελαίου και φυσικού αερίου παγκοσμίως φτάνουν μόνο για μερικές δεκαετίες. Αυτή είναι η πρόγνωση των αναλυτών της BP, την οποία κατέθεσαν στη Μόσχα στη διάρκεια του 21ου Παγκοσμίου συνεδρίου πετρελαίου.



Εικόνα 1-3 τα αποθέματα πετρελαίου και ο χρόνος εξάντλησής τους

Πηγή: <http://large.stanford.edu/courses/2014/ph240/cui1/>

Το πετρέλαιο παραμένει το βασικό καύσιμο στον κόσμο, αλλά τα τελευταία 14 χρόνια το μερίδιό του μεταξύ των ενεργειακών πηγών μειώνεται, φτάνοντας πέρυσι σε ποσοστό μικρότερο του 33%. Τα παγκόσμια αποθέματα του μαύρου χρυσού φτάνουν για 53 χρόνια, ενώ του φυσικού αερίου σχεδόν για 55, αν διατηρηθούν οι σημερινές ποσότητες εξόρυξης, υπολόγισαν οι ξένοι ειδικοί.

## 2. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η πρώτη κυψέλη καυσίμου φτιάχτηκε από τον Ουαλό δικηγόρο και επιστήμονα SirWilliamGrove το 1839. Επιπλέον το 1842 ο Grove κατασκεύασε την πρώτη κυψέλη καυσίμου που την ονόμασε μπαταρία βολταϊκού αερίου, η οποία παρήγαγε ηλεκτρικό



ρεύμα συνδέοντας υδρογόνο και οξυγόνο και το περιέγραψε χρησιμοποιώντας θεωρία συσχετισμού. Αναπτύσσοντας το κελί καυσίμου έδειξε ότι ο ατμός μπορεί να διαχωριστεί σε οξυγόνο και υδρογόνο και η διαδικασία μπορεί να αντιστραφεί. Ήταν , επίσης, ο πρώτος που έδειξε το θερμικό διαχωρισμό των μορίων στα δομικά τους άτομα.



*Εικόνα 2-1 Sir William Grove*

Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/William\\_Robert\\_Grove](https://en.wikipedia.org/wiki/William_Robert_Grove)

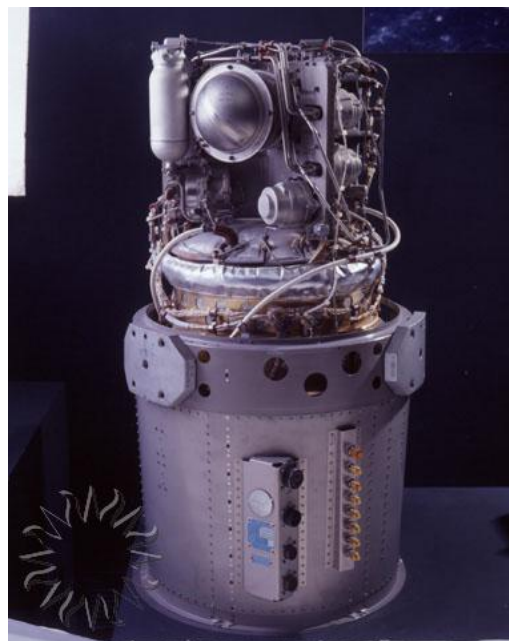
Το 1955 ο W. Thomas Grubb, ένας μηχανικός που δούλευε για την General Electric, τροποποίησε την πρωταρχική κυψέλη καυσίμου. Χρησιμοποίησε ως ηλεκτρολύτη μια μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων από πολυστυρένιο. Το 1958 ένας άλλος μηχανικός της General Electric, ο Leonard Niedrach, επινόησε έναν τρόπο καταχώρισης πλατίνας στη μεμβράνη, το οποίο εξυπηρετούσε σαν καταλύτης για την οξείδωση του υδρογόνου. Το 1959 ο βρετανός μηχανικός Francis Thomas Bacon, ανέπτυξε με επιτυχία έναν σταθμό ηλεκτροπαραγωγής 5 KW βασισμένο σε κυψέλες καυσίμου υψηλής πίεσης, όπως και μια μηχανή συγκόλλησης 5 KW.



*Εικόνα 2-2 FrancisThomasBacon*

Πηγή: [http://ethw.org/Bacon's\\_Fuel\\_Cell](http://ethw.org/Bacon's_Fuel_Cell)

Ωστόσο η πιο συστηματική έρευνα μόλις τη δεκαετία του '60. Τότε η NASA εκμεταλλεύτηκε αυτή την τεχνολογία μαζί με την General Electric και την εταιρία McDonnell Aircraft και χρησιμοποίησε τις κυψέλες καυσίμου στα διαστημικά σκάφη Τζέμινι και Απόλλων ως φτηνότερη λύση από την ηλιακή ενέργεια.



*Εικόνα 2-3 Κυψέλη καυσίμου της NASA*

Αν και μετά από αυτά τα γεγονότα υπήρξε ένας αρχικός ενθουσιασμό από την επιστημονική κοινότητα, γρήγορα το ενδιαφέρον χάθηκε (τη δεκαετία τού '70) λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής, έτσι οι κυψέλες καυσίμου έμελε να χρησιμοποιούνται μόνο για στρατιωτικούς ή διαστημικούς σκοπούς.

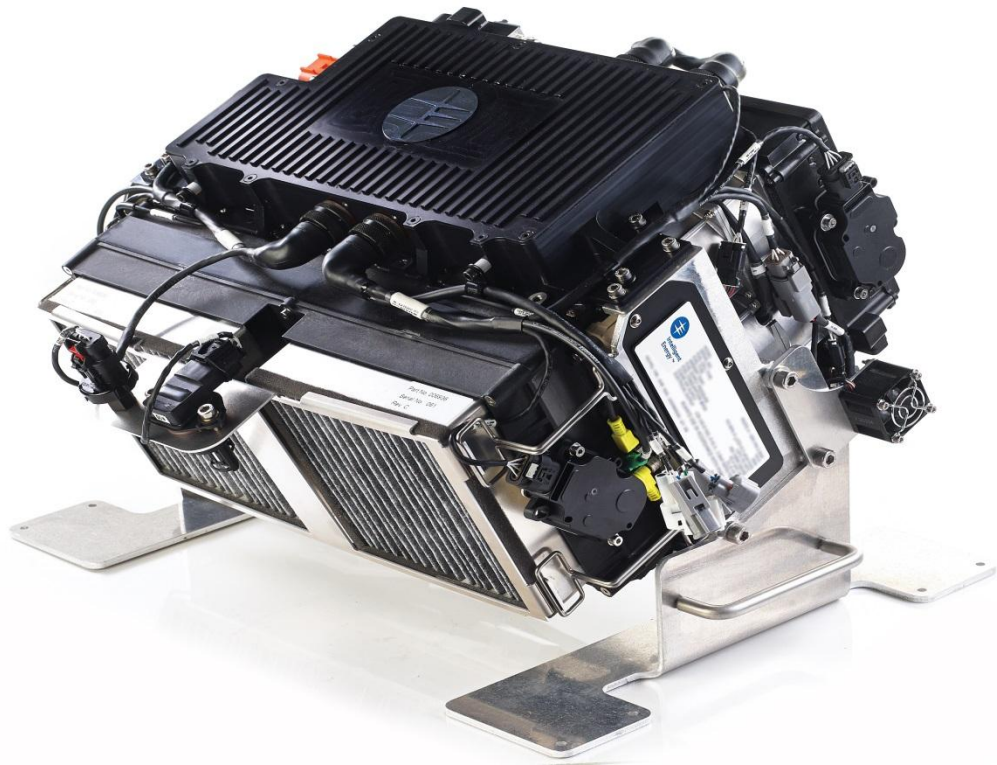
Σε παγκόσμιο επίπεδο, τουλάχιστον 600 εκατ. Ευρώ επενδύονται στην τεχνολογία των κυψελών καυσίμου για την επίτευξη ενός πιο «καθαρού» μέλλοντος. Τα τελευταία χρόνια, κάποιες αυτοκινητοβιομηχανίες κινητοποιήθηκαν και θεώρησαν τις κυψέλες καυσίμου ως εναλλακτικό σύστημα καύσης, έναντι των μηχανών εσωτερικής καύσης λόγω τις περιβαλλοντικής ευαισθησίας. Πλέον οι βιομηχανίες οχημάτων έχουν εξελιχθεί και αποτελούν ανταγωνιστές των συμβατικών οχημάτων, διότι, εκτός των άλλων έχουν και σημαντικά πλεονεκτήματα όπως υψηλή απόδοση, υψηλή παραγωγή πυκνότητας, και φυσικά μηδενική εκπομπή ρύπων.

### 3. ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΜΙΑ ΚΥΨΈΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ;

Μια κυψέλη καυσίμου είναι μια γαλβανική κυψέλη (δηλαδή μία μπαταρία) η οποία μετατρέπει τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας ηλεκτροχημικής διαδικασίας. Όπως και με μία μπαταρία μια κυψέλη καυσίμου είναι μία συσκευή στην οποία τα ηλεκτρόνια είναι αναγκασμένα να μεταφέρονται μέσω μιας εξωτερικής διαδρομής και όχι απευθείας διαμέσου της αντίδρασης. Μια κυψέλη καυσίμου λειτουργεί με τη λήψη σε καύσιμα και ένα οξειδωτικό (συνήθως καθαρό οξυγόνο ή οξυγόνο απ τον αέρα) σε ξεχωριστά ηλεκτρόδια και μετατρέπει την χημική ενέργεια σε συνεχές ρεύμα (DC). Η πηγή του καυσίμου πρέπει να είναι το υδρογόνο ή κάποιος φορέας υδρογόνου όπως το φυσικό αέριο ή η μεθανόλη. Οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ελάχιστη μόλυνση όταν λειτουργούν με τους φορείς υδρογόνου ή καθόλου μόλυνση όταν λειτουργούν με καθαρό υδρογόνο. Σε περίπτωση μιας  $H_2/O_2$  κυψέλης καυσίμου, το νερό και η θερμότητα είναι τα μόνα παράγωγα.

Σε αντίθεση με τις συμβατικές μπαταρίες, η κυψέλη καυσίμου δεν χρησιμοποιεί υλικά που απαρτίζουν την πηγή του καυσίμου. Η κυψέλη καυσίμου λαμβάνει το καύσιμο από εξωτερική πηγή και το μετατρέπει σε ηλεκτρισμό. Έτσι οι κυψέλες καυσίμου δεν υποφέρουν από περιορισμούς όπως οι κοινές μπαταρίες οπότε και δεν χρειάζεται να

πετιούνται , όπως συμβαίνει με τις μη επαναφορτιζόμενες μπαταρίες ή να φορτίζονται όπως συμβαίνει με της επαναφορτιζόμενες μπαταρίες .

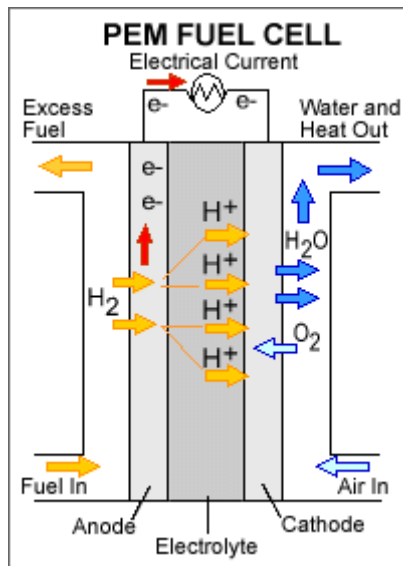


*Εικόνα 3-1 η intelligent energy παρουσιάζει την επόμενη γενιά κυψέλης καυσίμου μονάδας ισχύος την JSAE 2014*

Πηγή: (<http://www.businesswire.com/news/home/20140520006704/en/Intelligent-Energy-Unveils-Generation-Integrated-Compact-Fuel>)

### 3.1. ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ)

- **Κυψέλη καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης (PEM)**



Εικόνα 3-2 Διάγραμμα Κυψέλη καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης

Πηγή:

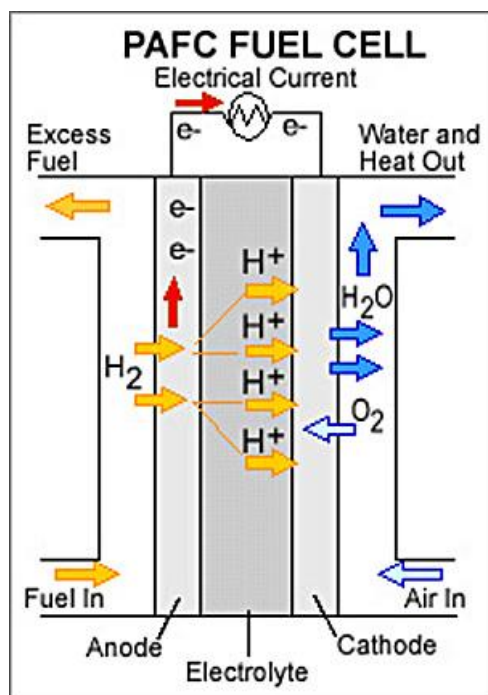
[http://www.fuelcellmarkets.com/fuel\\_cell\\_markets/proton\\_exchange\\_membrane\\_fuel\\_cells\\_pemfc/4,1,1,2502.html](http://www.fuelcellmarkets.com/fuel_cell_markets/proton_exchange_membrane_fuel_cells_pemfc/4,1,1,2502.html)

Είναι κυψέλες καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων, λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και παράγουν ισχύ αρκετή για την εφαρμογή τους για την ικανοποίηση καθημερινών ενεργειακών αναγκών, όπως αυτή για την κίνηση ενός οχήματος. Οι συγκεκριμένες κυψέλες έχουν τη δυνατότητα γρήγορης αυξομείωσης της ισχύος τους η οποία κυμαίνεται μεταξύ 50 και 250 kW. Λόγο των παραπάνω η έρευνα όσον αφορά εφαρμογές τους στην τροφοδότηση οχημάτων επικεντρώνεται σε αυτόν τον τύπο κυψελών καυσίμου.

Ανοδικό:  $2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$

Καθόδου:  $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

- **Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)**



Εικόνα 3-3 Διάγραμμα Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος

Πηγή:

[http://www.fuelcellmarkets.com/fuel\\_cell\\_markets/phosphoric\\_acid\\_fuel\\_cells\\_pafc/4,1,1,2507.html](http://www.fuelcellmarkets.com/fuel_cell_markets/phosphoric_acid_fuel_cells_pafc/4,1,1,2507.html)

Οι κυψέλες φωσφορικού οξέος είναι αυτές που είναι διαθέσιμες στο εμπόριο και έχουν πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης και οι θερμοκρασίες λειτουργίας είναι 150 με 200°C. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες η απόδοση της κυψέλης πέφτει πάρα πολύ. Η συγκεκριμένη κυψέλη έχει αρκετά ανεβασμένα επίπεδα ανοχής CO και αυτό της επιτρέπει να δέχεται περισσότερα είδη τροφοδοσίας καυσίμου.

Τα μειονεκτήματα αυτών των κυψέλων καυσίμου, είναι το μεγάλο μέγεθος και βάρος, ο ακριβός καταλύτης όπου χρησιμοποιείται (λευκόχρυσος) ενώ το ρεύμα το οποίο παράγεται είναι χαμηλό και η ισχύς συγκρίσιμη με αυτή άλλων τύπων κυψέλων καυσίμου. Τέλος οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που χαρακτηρίζουν αυτόν τον τύπο είναι ίδιες με αυτής της PEM κυψέλης. Η ηλεκτρική απόδοση κυμαίνεται μεταξύ 37% και 42%.

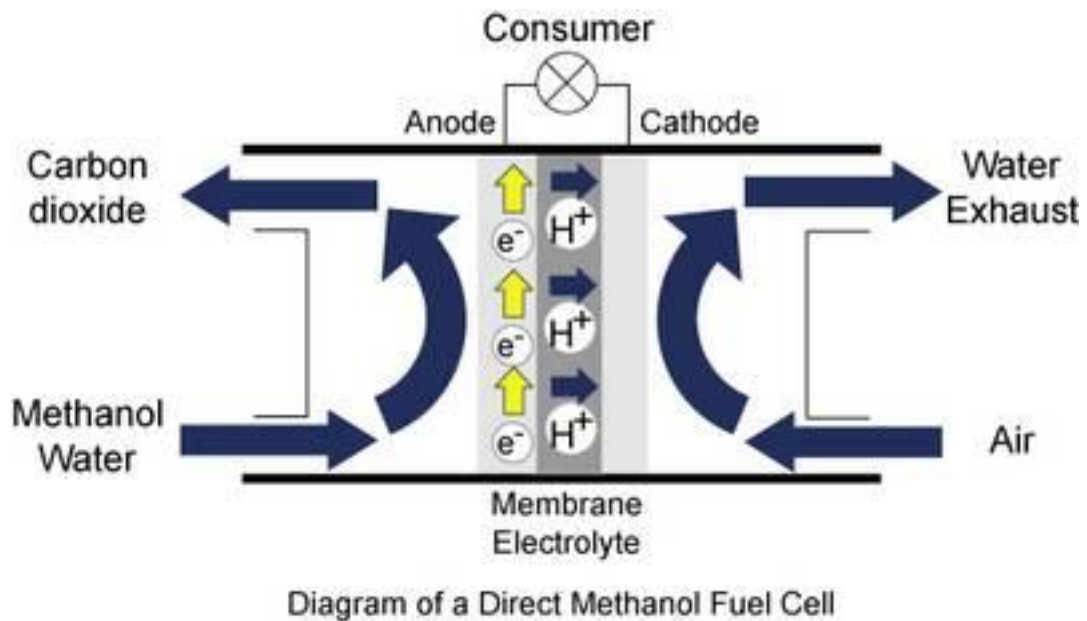
Χημικές εξισώσεις:

Ανοδική Αντίδραση:  $2 \text{H}_2 \rightarrow 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^-$

Καθόδου Αντίδραση:  $\text{O}_2(\text{g}) + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$

Συνολική αντίδραση της κυψέλης:  $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$

- **Κυψέλη καυσίμου μεθανόλης (DMFC)**



*Εικόνα 3-4 Διάγραμμα μια Κυψέλης καυσίμου μεθανόλης*

Πηγή:

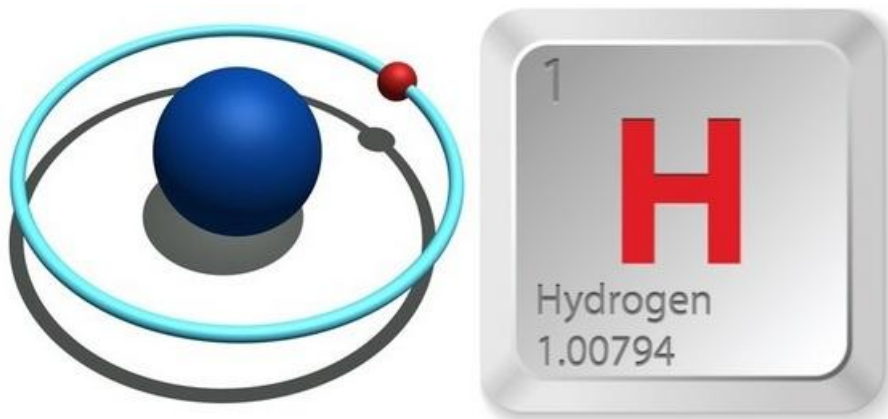
[http://www.campervanstuff.com/shop\\_stuff/index.php?mod=product&id\\_prd=1068](http://www.campervanstuff.com/shop_stuff/index.php?mod=product&id_prd=1068)

Σε όλες τις παραπάνω κυψέλες ως καύσιμο χρησιμοποιείται το υδρογόνο. Ωστόσο, ο συγκεκριμένος τύπος κυψελών χρησιμοποιεί ως καύσιμο μεθανόλη χωρίς να απαιτεί τη μετατροπή της σε υδρογόνο. Η συγκεκριμένη κυψέλη είναι σχετικά πρόσφατη και υπάρχουν ακόμα κάποια προβλήματα προς επίλυση, όπως η μεγάλη ποσότητα καταλύτη όπου απαιτείται.

Ωστόσο, εάν η τεχνολογία αυτή επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί στη θέση των PEM κυψελών δε θα υπήρχε η ανάγκη αναζήτησης εναλλακτικών τρόπων αποθήκευσης του καυσίμου, όπως γίνεται στην περίπτωση με το υδρογόνο, ενώ δε θα ήταν αναγκαία και η ανάπτυξη αναμορφωτών.



## 4. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟ



Εικόνα 4-1

Πηγή:

<https://newenergytreasure.com/2014/06/28/hydrogen-production-in-the-new-hydrogen-economy/>

Το υδρογόνο είναι το αμέταλλο χημικό στοιχείο με χημικό σύμβολο **H** και ατομικό αριθμό 1. Με ατομική μάζα 1,00794(7)amu, το υδρογόνο είναι το ελαφρύτερο χημικό στοιχείο του περιοδικού πίνακα. Είναι η πιο άφθονη χημική ουσία στο σύμπαν, του οποίου θεωρείται ότι αποτελεί το 75% της συνολικής βαρυονικής του μάζας, αν και η περισσότερη μάζα του σύμπαντος δεν βρίσκεται με τη μορφή της ύλης τύπου χημικών στοιχείων, αλλά μάλλον υποστηρίζεται ότι βρίσκεται σε μη ανιχνευμένες ακόμη μορφές μάζας, όπως η σκοτεινή ύλη και η σκοτεινή ενέργεια. Στις «συνηθισμένες συνθήκες», δηλαδή σε θερμοκρασία 25°C και υπό πίεση 1 atm, το (χημικά καθαρό) υδρογόνο είναι ένα άχρωμο, άοσμο, άγευστο, μη τοξικό, αμέταλλο και πολύ εύφλεκτο διατομικό αέριο, με χημικό τύπο  $H_2$ . Εφόσον το υδρογόνο γρήγορα σχηματίζει ομοιοπολικές ενώσεις, και μάλιστα με τα περισσότερα αμέταλλα και πολλά χημικά στοιχεία, το περισσότερο από το υδρογόνο στη Γη υπάρχει σε μοριακές μορφές, όπως η μορφή του νερού ή σε διάφορες οργανικές ενώσεις.

### 4.1. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ

Το στοιχειακό υδρογόνο (γνωστό και ως «διυδρογόνο»,  $H_2$ ) παράχθηκε για πρώτη φορά τεχνητά στις αρχές του 16<sup>ου</sup> αιώνα, με ανάμειξη μετάλλων και ισχυρών οξέων<sup>[4]</sup>. Τη χρονική περίοδο 1766 - 1781, ο (*Henry Cavendish*) αναγνώρισε πρώτος ότι το αέριο υδρογόνο είναι μια διακριτή (διαφορετική από τις ήδη γνωστές) χημική ουσία, και ότι παρήγαγε νερό όταν καίγονταν. Συνήθως του πιστώνεται την ανακάλυψη του υδρογόνου ως χημικό στοιχείο.





*H. Cavendish*

*Εικόνα 4-2 Χένρι Κάβεντις, (Henry Cavendish) (10 Οκτωβρίου 1731 – 24 Φεβρουαρίου 1810) ήταν Βρετανός επιστήμονας, που διακρίθηκε για τη συνεισφορά του στη Φυσική και στη Χημεία.*

Πηγή:

[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A7%CE%AD%CE%BD%CF%81%CE%B9\\_%CE%9A%CE%AC%CE%B2%CE%B5%CE%BD%CF%84%CE%B9%CF%82](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A7%CE%AD%CE%BD%CF%81%CE%B9_%CE%9A%CE%AC%CE%B2%CE%B5%CE%BD%CF%84%CE%B9%CF%82)

Το 1783, ο Αντουάν Λαβουαζιέ ονόμασε το νέο χημικό στοιχείο «υδρογόνο» (από τις ελληνικές λέξεις «ὔδρω» και «γενῆς»)<sup>[60]</sup>, όταν αυτός και ο Λαπλάνς ανακάλυψαν εκ νέου το εύρημα του Κάβεντις, ότι δηλαδή το υδρογόνο καίγεται σχηματίζοντας νερό με βάση αυτή τη βασική του ιδιότητα το ονόμασε «υδρογόνο», συνενώνοντας τις ελληνικές λέξεις «ὔδρω» και «γεννῶ».

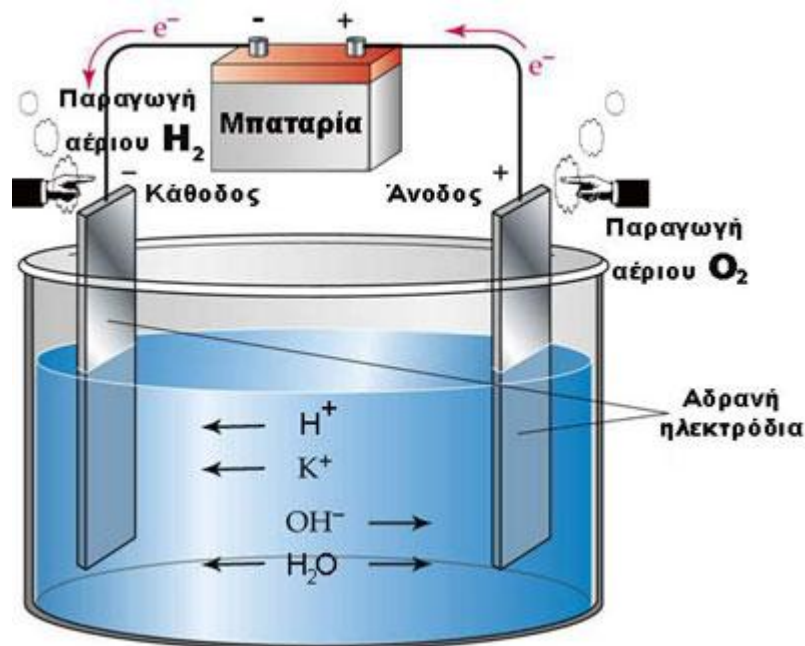
Το υδρογόνο παράγεται σε χημικά και βιολογικά εργαστήρια, συχνά ως ένα παραπροϊόν άλλων αντιδράσεων. Στη βιομηχανία παράγεται (κυρίως) για την υδρογόνωση ακόρεστων ουσιών, και στη φύση παράγεται ως ένα μέσο εξουδετέρωσης αναγόμενων ισοδύναμων σε βιοχημικές αντιδράσεις.

Η βιομηχανική του παραγωγή γίνεται κυρίως με επίδραση ατμού σε φυσικό αέριο, και λιγότερο συχνά, με την περισσότερο ενεργοβόρα μέθοδο της λεγόμενης «ηλεκτρόλυσης του νερού» .

## 4.2. ΠΕΡΕΤΑΙΡΩ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Το  $^1\text{H}$  είναι το πιο συνηθισμένο ισότοπο του υδρογόνου, με μια αφθονία πάνω από 99,98%. Επειδή ο πυρήνας αυτού του ισότοπου αποτελείται μόνο από πρωτόνιο, του δίνεται το περιγραφικό αλλά σχετικά σπάνια χρησιμοποιούμενο τυπικό όνομα πρώτιο.

Η ηλεκτρόλυση νερού είναι μια άλλη απλή μέθοδος παραγωγής υδρογόνου. Ένα ηλεκτρικό ρεύμα χαμηλής τάσης περνά μέσω αραιού διαλύματος υδροξειδίου του νατρίου, οπότε αέριο οξυγόνο εκλύεται στην άνοδο και αέριο υδρογόνο σχηματίζεται στην κάθοδο. Τυπικά ως κάθοδος χρησιμοποιείται λευκόχρυσος (ή κάποιο άλλο ευγενές μέταλλο), όταν παράγεται υδρογόνο για αποθήκευση. Αν όμως το αέριο υδρογόνο παράγεται για να καεί επιτόπου, το οξυγόνο είναι επίσης επιθυμητό για να βοηθήσει την καύση, οπότε θα πρέπει και τα δυο ηλεκτρόδια να είναι φτιαγμένα από ευγενή μέταλλα, γιατί αν για παράδειγμα χρησιμοποιηθεί σίδηρος στην άνοδο θα οξειδωθεί και θα μειώσει την ποσότητα διαθέσιμου οξυγόνου που δίνεται από την ηλεκτρόλυση. Η θεωρητική μέγιστη απόδοση της ηλεκτρόλυσης (δηλαδή ηλεκτρική αξία του υδρογόνου που παράχθηκε προς ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώθηκε για την παραγωγή του) κυμαίνεται στο εύρος 80-94%.



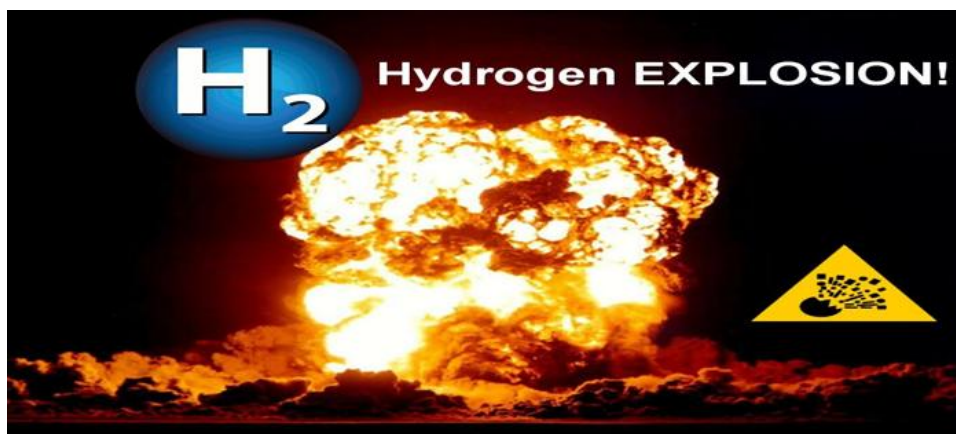
Εικόνα 4-3 ηλεκτρόλυση

Πηγή:

[http://amfipolinews.blogspot.gr/2015/11/10\\_27.html](http://amfipolinews.blogspot.gr/2015/11/10_27.html)

ο υδρογόνο κατέχει έναν αριθμό από κινδύνους για την ανθρώπινη ασφάλεια, από εν δυνάμει εκτονώσεις του και πυρκαγιές όταν αναμιγνύεται με τον αέρα ως την πρόκληση ασφυξίας, αν έχει μεγάλη καθαρότητα ή και αν είναι σε μίγματα χωρίς οξυγόνο. Επιπλέον,

το υγρό υδρογόνο είναι ένα κρυογόνιο και παρουσιάζει κινδύνους (όπως κρυσπαγήματα) που σχετίζονται με πολύ ψυχρά υγρά. Το υδρογόνο διαλύεται σε πολλά μέταλλα, και επιπρόσθετα στις τυχόν διαρροές του, ενδέχεται να έχει αρνητικές συνέπειες για αυτά, όπως ευθραυστότητα από υδρογόνο, οδηγώντας σε σπασίματα και εκρήξεις. Μια διαρροή αερίου υδρογόνου στον εξωτερικό αέρα μπορεί να αναφλεγεί αυθόρμητα. Επιπλέον, η φλόγα υδρογόνου, ενώ είναι εξαιρετικά θερμή, είναι σχεδόν αόρατη, και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ατυχήματα με εγκαύματα. Οι παράμετροι εκτόνωσης του υδρογόνου, όπως κρίσιμη πίεση και κρίσιμη θερμοκρασία, εξαρτώνται πολύ από τη γεωμετρία των δοχείων που περιέχουν το υδρογόνο.



Εικόνα 4-4 Έκρηξη βόμβας υδρογόνου

Πηγή

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF> - cite\_note-120

Πίνακας 4-1 Ιδιότητες του Υδρογόνου

ΥΔΡΟΓΟΝΟ	
Ταυτότητα του στοιχείου	
Όνομα, σύμβολο	Υδρογόνο (H)
Ατομικός αριθμός (Z)	1
Κατηγορία	αμέταλλα
ομάδα, περίοδος, τομέας	1, 1, s
Σχετική ατομική	1,00794

<b>μάζα (<math>A_r</math>)</b>	
<b>Ηλεκτρονική διαμόρφωση</b>	1s
<b>Ατομικές ιδιότητες</b>	
<b>Ατομική ακτίνα</b>	25 (53,5) pm
<b>Ομοιοπολική ακτίνα</b>	31,(5) pm
<b>Ακτίνα vanderWaals</b>	120 pm
<b>Ηλεκτραρνητικότητα</b>	2,20 (Κλίμακα Pauling)
<b>Κυριότεροι αριθμοί οξείδωσης</b>	0, ±1
<b>Ενέργειες ιονισμού</b>	1η:1312.0 kJ·mol <sup>-1</sup>
<b>Φυσικά χαρακτηριστικά</b>	
<b>Κρυσταλλικό σύστημα</b>	εξαγωνικό
<b>Σημείο τήξης</b>	-259,14(°C) (14,02 K)
<b>Σημείο βρασμού</b>	-252,87 °C (20,29 K)
<b>Τριπλό σημείο</b>	-259,36 °C (13,8 K), 7,042 kPa
<b>Κρίσιμο σημείο</b>	-240,19 °C (32,97 K), 1,293 MPa
<b>Πυκνότητα</b>	0,08988 kg/m <sup>3</sup>
<b>Ενθαλπία τήξης</b>	0,117 kJ/mol
<b>Ταχύτητα του ήχου</b>	1310 m/s
<b>Η κατάσταση αναφοράς είναι η πρότυπη κατάσταση (25°C, 1 Atm) εκτός αν σημειώνεται διαφορετικά</b>	

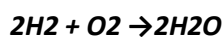
Η μονατομική αλλομορφή του ( $H_1$ ), είναι η πιο άφθονη χημική ουσία στο σύμπαν, του οποίου θεωρείται ότι αποτελεί το 75% της συνολικής του μάζας.

Πηγή:

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF>

## 5. ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΟΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ

Η βασική λειτουργία των κυψελών καυσίμου υδρογόνου είναι εξαιρετικά απλή. Όπως προαναφέρθηκε πρώτος ο William Grove έκανε ένα πείραμα στο οποίο ηλεκτρόλυσε το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο, με ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο περνούσε μέσα απ το νερό. Η παροχή ισχύος είχε αντικατασταθεί με ένα αμπερόμετρο και μια μικρή ποσότητα ρεύματος άρχισε να διαρρέεται. Έπειτα η ηλεκτρόλυση αντιστρέφεται και το υδρογόνο και οξυγόνο που αρχικά διαχωρίστηκαν, τώρα ξαναενώνονται. Με αυτόν τον τρόπο μια ποσότητα ρεύματος παράγεται. Διαφορετικά μπορούμε να πούμε ότι το υδρογόνο καίγεται σε μια απλή αντίδραση.



Παρ' όλα αυτά, αντί να απελευθερώνεται θερμότητα, παράγεται ηλεκτρική ενέργεια, το οποίο είναι και το ζητούμενο της όλης διαδικασίας.

Στο πείραμα του επιστήμονα το οποίο φαίνεται παρακάτω, κάνει μια στοιχειώδη παρουσίαση των αρχών των κυψελών καυσίμου, αλλά το ρεύμα που παράγεται είναι ελάχιστο και οι βασικοί λόγοι για αυτό είναι οι εξής:

- Η μικρή επιφάνεια επαφής του καυσίμου, του ηλεκτροδίου και του ηλεκτρολύτη. Βασικά μέσα σε ένα μικρό σωλήνα είναι όπου το ηλεκτρόδιο αναδύεται από τον ηλεκτρολύτη.
- Η μεγάλη απόσταση ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και τον ηλεκτρολύτη προκαλεί την αντίσταση στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος.

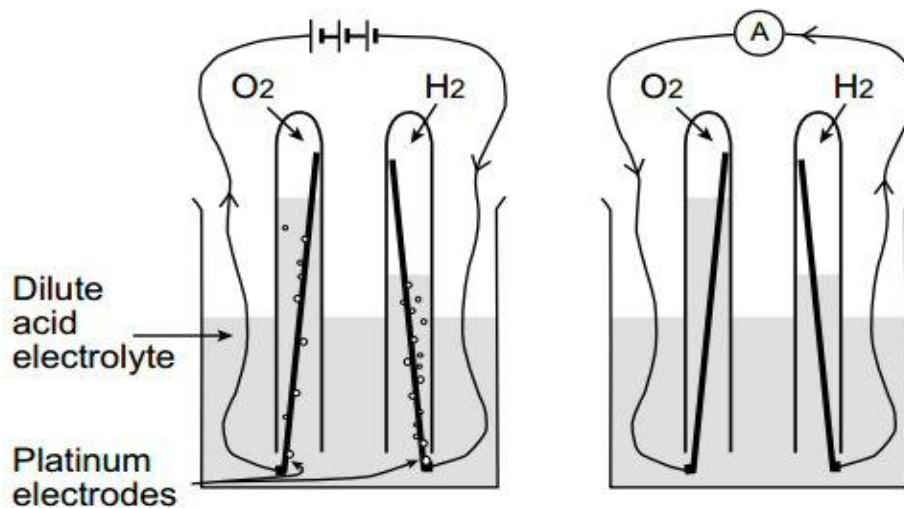


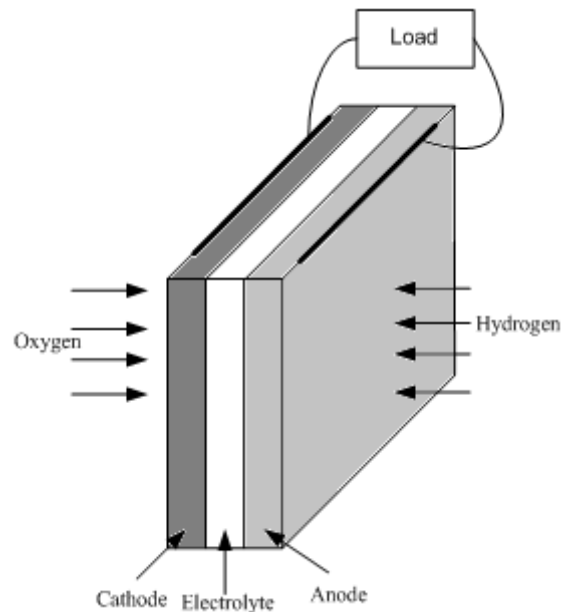
Figure 2. The principle of an electrolyzer, shown left; of a fuel cell, shown right. (Larminie, 2000).

Εικόνα 5-1: Η αρχή του ηλεκτρολύτη

Πηγή:

από το βιβλίο: Fuel Cell Systems Explained, J. Larminie, A. Dicks

Για να ξεπεράσουμε αυτά τα προβλήματα πρέπει να χρησιμοποιούμε ένα πλατύ ηλεκτρόδιο με ένα λεπτό στρώμα ηλεκτρολύτη όπως στην παρακάτω εικόνα. Η δομή του ηλεκτροδίου είναι πορώδης έτσι ώστε ο ηλεκτρολύτης από τη μια πλευρά και το καύσιμο από την άλλη να μπορούν να το διαπεράσουν. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η μέγιστη δυνατή επαφή μεταξύ του ηλεκτροδίου, του ηλεκτρολύτη και του καυσίμου.



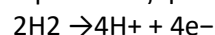
Εικόνα 5-2 δομή κυψέλης καυσίμου

Πηγή:

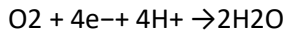
Εικόνα από το βιβλίο: Fuel Cell Systems Explained, J. Larminie, A. Dicks

Για την καλύτερα ανάλυση και κατανόηση της παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος πρέπει να αναλύσουμε ξεχωριστά την αντίδραση που λαμβάνει χώρα σε κάθε ηλεκτρόδιο ξεχωριστά. Υπάρχουν σημαντικές διαφορές από διαφορετικούς τύπους κυψελών καυσίμου αλλά , αρχικά, θα δούμε μια κυψέλη στην οποία υπάρχει ένας οξύς ηλεκτρολύτης, έτσι όπως αρχικά τον κατασκεύασε ο Grove και εξακολουθεί να είναι ένας από τους πιο κοινούς τύπους.

- ✓ Κατά την άνοδο ενός ηλεκτρολύτη οξέων κυψέλης καυσίμου, το υδρογόνο ιονίζεται, απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια και δημιουργώντας ιόντα H<sup>+</sup> ή πρωτόνια.

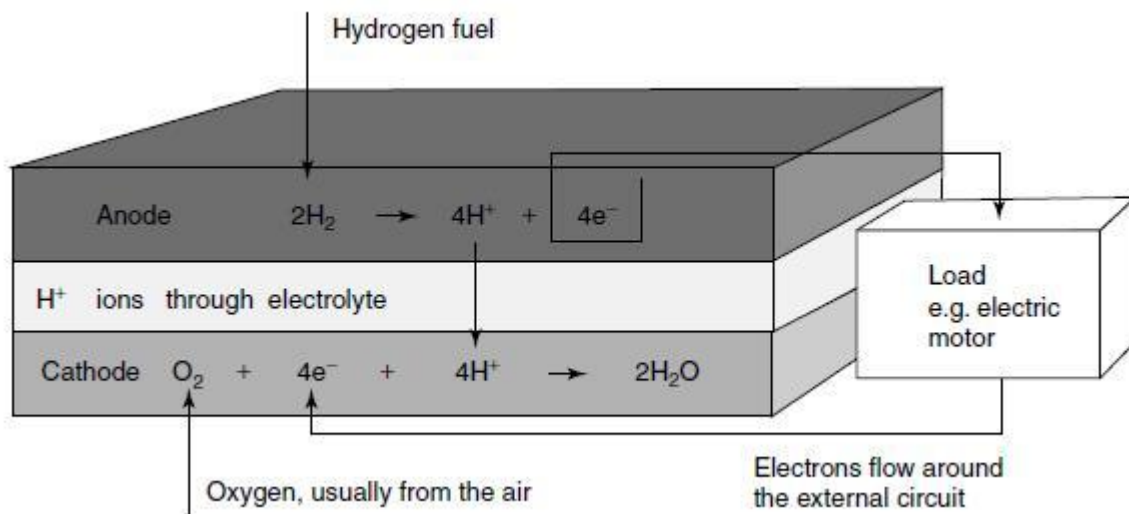


- ✓ Η αντίδραση απελευθερώνει ενέργεια. Κατά την κάθοδο, το οξυγόνο αντιδρά με τα ηλεκτρόνια που παίρνει από τον ηλεκτρόδιο, και ιόντα H<sup>+</sup> από τον ηλεκτρολύτη, και δημιουργεί νερό.



Για να προχωράνε συνεχώς και οι δύο αντιδράσεις, τα ηλεκτρόνια που παράγονται στην άνοδο πρέπει να περάσουν μέσα από ένα ηλεκτρικό κύκλωμα στην κάθοδο. Επιπλέον, ιόντα  $\text{H}^+$  πρέπει να περάσουν μέσα από τον ηλεκτρολύτη. Το οξύ είναι ένα ρευστό με ελεύθερα ιόντα  $\text{H}^+$ , και έτσι εξυπηρετεί το σκοπό αυτό πολύ καλά. Ορισμένα πολυμερή μπορούν επίσης να δημιουργηθούν για να περιέχουν κινητά ιόντα  $\text{H}^+$ . Τα υλικά αυτά ονομάζονται μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων, όπως ένα ιόν  $\text{H}^+$  είναι επίσης ένα πρωτόνιο.

Συγκρίνοντας τους δυο παραπάνω τύπους, διαπιστώνουμε ότι δύο μόρια υδρογόνου χρειάζονται για κάθε μόριο οξυγόνου για να διατηρείται το σύστημα σε ισορροπία. Αυτό φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Να σημειωθεί ότι ο ηλεκτρολύτης πρέπει να επιτρέπει μόνο τα ιόντα  $\text{H}^+$  να περνάνε απ αυτών, και όχι τα ηλεκτρόνια. Σε διαφορετική περίπτωση, αν τα ηλεκτρόνια πήγαιναν μέσα απ τον ηλεκτρολύτη και όχι από γύρο, στο εξωτερικό κύκλωμα, όλη η διαδικασία θα καταστρεφόταν και δεν θα υπήρχε καμία παραγωγή ρεύματος !

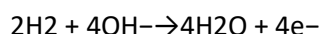


Εικόνα 5-3 αντίδραση ηλεκτροδίου και φόρτιση ροής για μια κυψέλη καυσίμου ηλεκτρολύτη οξέων. τα αρνητικά ηλεκτρόνια ρέουν από άνοδο στην κάθοδο, το «συμβατικό ρεύμα» ρέει από την κάθοδο προς την άνοδο.

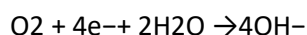
Πηγή:

από το βιβλίο: Fuel Cell Systems Explained, J. Larminie, A. Dicks

Σε έναν αλκαλικό ηλεκτρολύτη κυψέλης καυσίμου η αντίδραση είναι η ίδια αλλά οι αντιδράσεις του κάθε ηλεκτροδίου ξεχωριστά είναι διαφορετικές. Σε ένα αλκάλιο, ιόντα υδροξυλίου (OH<sup>-</sup>) μπορούν και κινούνται. Στην άνοδο αντιδρούν με το υδρογόνο, και απελευθερώνουν ενέργεια και ηλεκτρόνια, παράγοντας νερό.



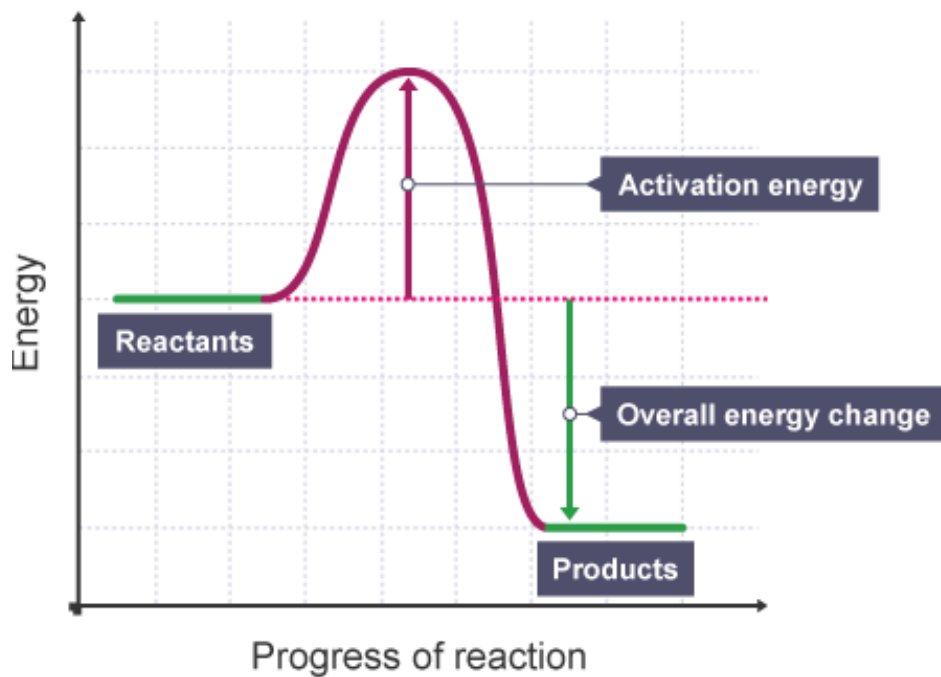
Στην κάθοδο, οξυγόνο αντιδρά με ηλεκτρόνια τα οποία παίρνει από τον ηλεκτρόδιο, και νερό από τον ηλεκτρολύτη, δημιουργώντας νέα ιόντα υδροξυλίου OH<sup>-</sup>.



Για την συνεχή αντίδραση, τα ιόντα υδροξυλίου πρέπει να περνάνε μέσα από τον ηλεκτρολύτη και επιπλέον να υπάρχει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα για να επιτρέπει τα ηλεκτρόνια να περάσουν από την άνοδο στην κάθοδο. Όπως και με το ηλεκτρολύτη οξέων, διπλάσιο υδρογόνο απαιτείται ως οξυγόνο. Το νερό καταναλώνεται στην κάθοδο, και δημιουργείται με διπλάσια ταχύτητα στην άνοδο.

## 5.1.ΤΑ ΟΡΙΑ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΤΙΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ





Εικόνα 5-4 Στην άνοδο, το υδρογόνο αντιδρά, απελευθερώνοντας ενέργεια. Η αντίδραση έχει την κλασική ενεργειακή μορφή όπως αυτή φαίνεται παρακάτω.

Πηγή:

<http://knowyourmeme.com/forums/serious-debate/topics/39252-not-in-the-news-mit-climate-scientistprinceton-physicist-host-climate-conference-in-texas>

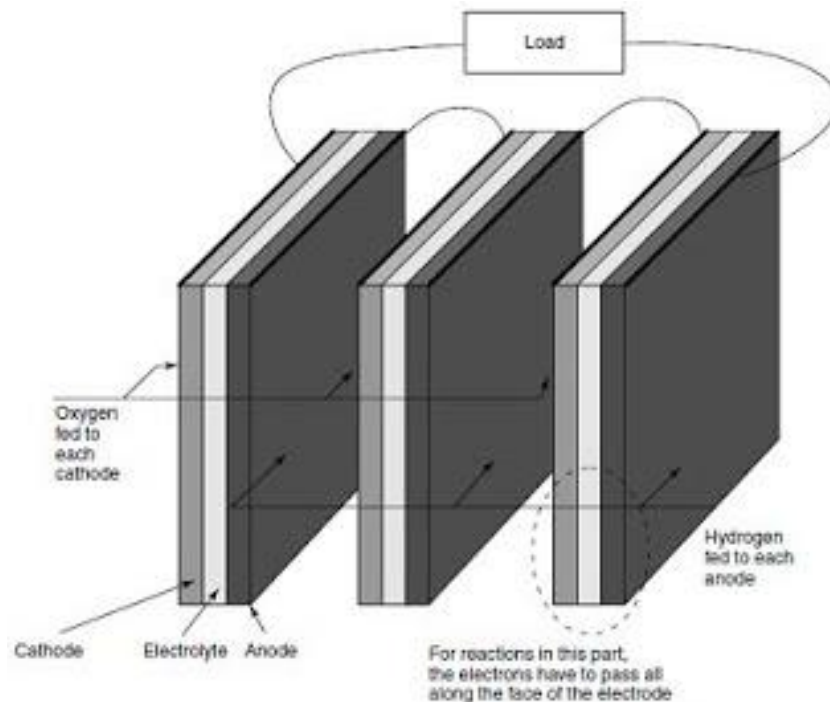
Παρ' όλο που η ενέργεια απελευθερώνεται, η «activation energy» που φαίνεται στο σχήμα, πρέπει να παρέχεται για να ξεπεράσει την ενεργειακή καμπύλη. Αν τα μόρια έχουν χαμηλή ενέργεια τότε η αντίδραση θα γίνεται πολύ αργά.

Οι τρεις τρόποι αντιμετώπισης των αργών ρυθμών αντίδρασης είναι:

- Η χρήση καταλυτών
- Την αύξηση της θερμοκρασίας,
- αύξηση της επιφάνειας του ηλεκτροδίου.

## 5.2.ΣΥΝΔΕΟΝΤΑΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΣΤΗ ΣΕΙΡΑ

Η τάση των κυψελών καυσίμου είναι της τάξης των 0,7 V . Αυτό σημαίνει ότι για την παραγωγή της συγκεκριμένης τάσης είναι απαραίτητο πολλές κυψέλες να συνδεθούν στη σειρά. Ο πιο απλός τρόπος για να γίνει αυτό είναι να συνδεθεί η άκρη κάθε ανόδου με την κάθοδο της επόμενης κυψέλης, όπως φαίνεται στο σχήμα.



Εικόνα 5-5 Κυψέλες στη σειρά

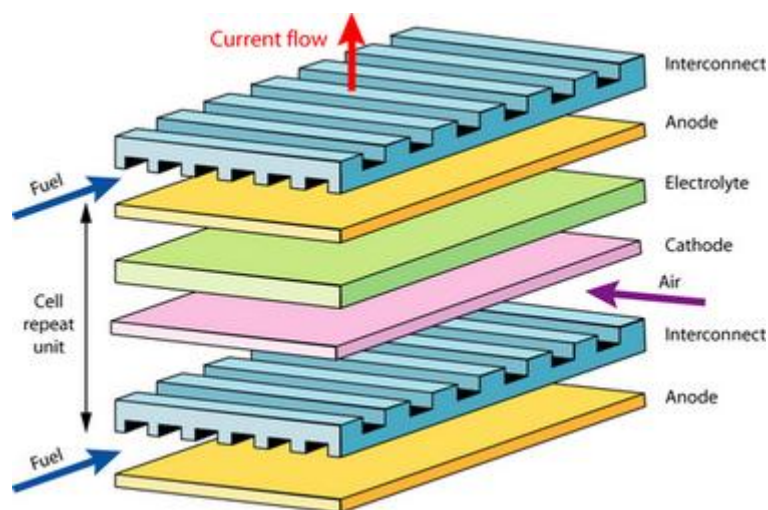
Πηγή:

από το βιβλίο: Fuel Cell Systems Explained, J. Larminie, A. Dicks

Βέβαια το πρόβλημα με αυτή τη μέθοδο είναι ότι τα ηλεκτρόνια πρέπει να διασχίσουν την επιφάνεια του ηλεκτροδίου έως το προσωρινό σημείο συλλογής στην άκρη. Αν και τα ηλεκτρόνια έχουν καλές επαφές, αλλά επειδή κάθε κυψέλη λειτουργεί με 0.7V, ακόμη και μια πτώση μικρή τάση είναι σπουδαία. Ειδικά όταν η ροή ρεύματος είναι πολύ μικρή και τα ηλεκτρόδια είναι πολύ μικρά αυτή η μέθοδος δεν χρησιμοποιείται

Ένας ακόμα καλύτερος τρόπος για σύνδεση των κυψελών είναι η διπολική πλάκα. Αυτή συνδέει ολόκληρη την επιφάνεια της καθόδου και της ανόδου της επόμενης κυψέλης. Την ίδια στιγμή χρησιμεύει ως μέσο τροφοδοσίας οξυγόνου στην κάθοδο και καυσίμου

στην άνοδο. Επιπλέον, είναι απαραίτητη η καλή σύνδεση μεταξύ των ηλεκτροδίων, αλλά τα δύο καύσιμα πρέπει να χωρισμένα πολύ προσεκτικά.



Εικόνα 5-6 ΔΙΠΟΛΙΚΕΣ ΠΛΑΚΕΣ

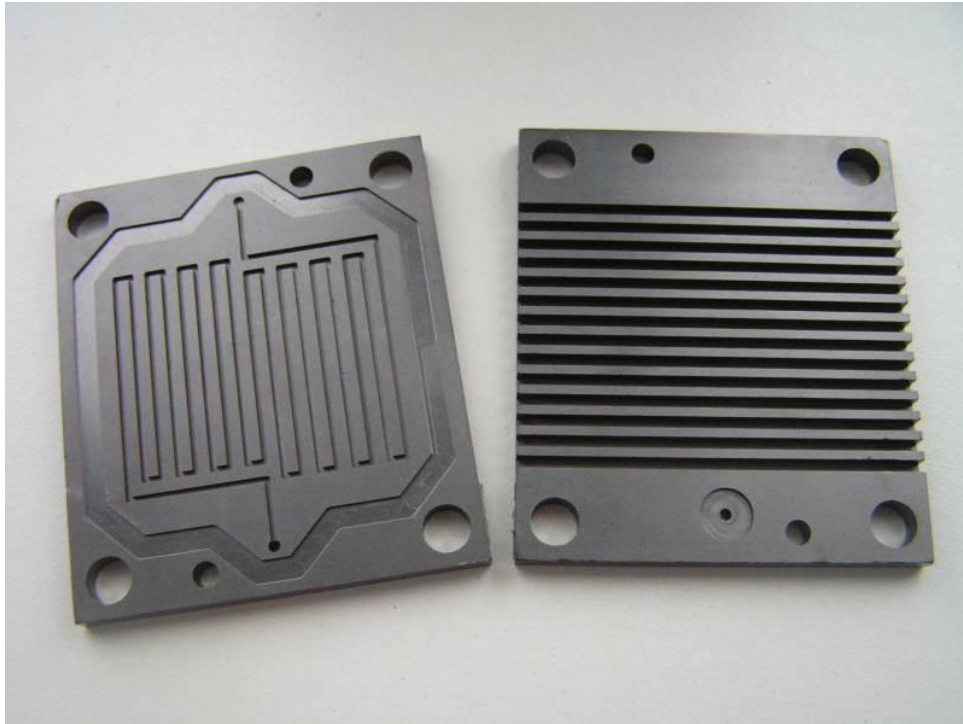
(μπλε χρώμα)

Και τα ενδιάμεσα μέρη τους

Πηγή:

[http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fuel-cells/low\\_temp\\_pem.php?printable=1](http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fuel-cells/low_temp_pem.php?printable=1)

Αυτές οι διπολικές πλάκες έχουν «σκαμμένα» κανάλια έτσι ώστε το καύσιμα να ρέουν πάνω από τα ηλεκτρόδια. Την ίδια ώρα, είναι κατασκευασμένοι με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να κάνουν καλή ηλεκτρική επαφή με την επιφάνεια του κάθε εναλλασσόμενου ηλεκτροδίου. Παρακάτω φαίνονται δυο διαφορετικές διπολικές πλάκες.

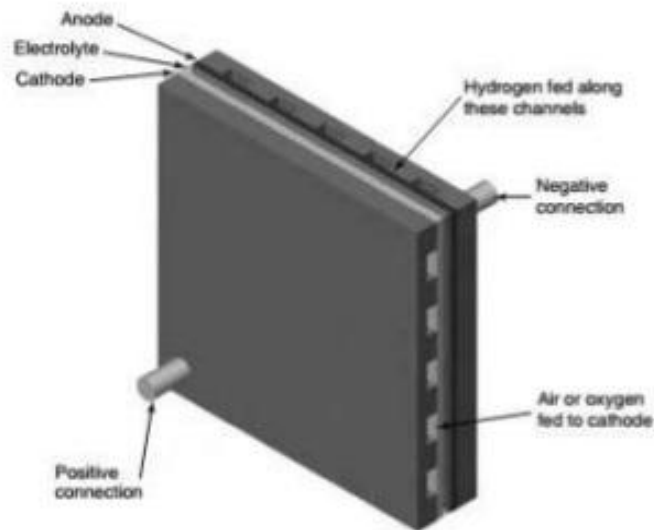


*Εικόνα 5-7 Διπολικές πλάκες (2 είδη)*

Πηγή:

<http://www.tek-sis.com/index.php?sayfa=urunler&urunGrupId=13>

Οι πλάκες είναι κατασκευασμένες από ένα καλό αγωγό όπως ο γραφίτης, ή ανοξείδωτο ατσάλι. Παρακάτω φαίνεται η λειτουργία και η μέθοδος σύνδεσης ενός μονού κελιού με μία διπολική πλάκα η οποία τροφοδοτεί με υδρογόνο την άνοδο και με οξυγόνο την κάθοδο .



Εικόνα 5-8 Πλάκες κυψέλης καυσίμου και τα μέρη αυτής

Πηγή:

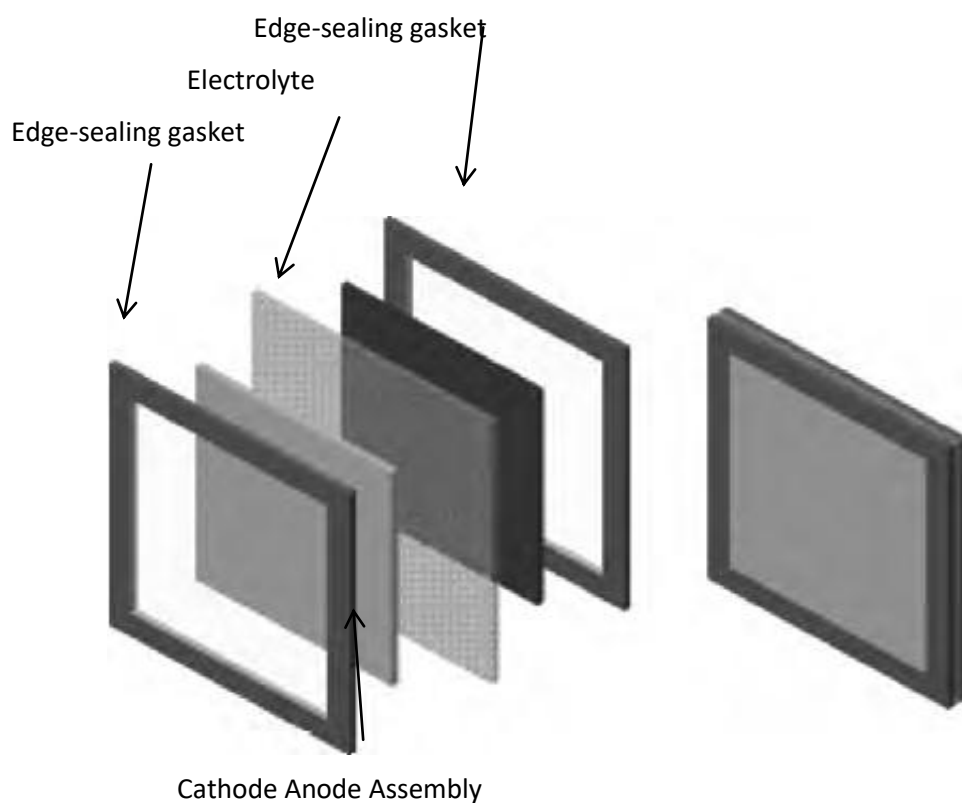
από το βιβλίο: Fuel Cell Systems Explained, J. Larminie, A. Dicks

Για τη σωστή λειτουργία των πλακών, αυτές πρέπει να είναι πακτωμένες μαζί, και αυτό για να δημιουργηθούν να κάθετα κανάλια για την τροφοδοσία του υδρογόνου αλλά και τα οριζόντια κανάλια για το οξυγόνο κατά την κάθοδο. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείτε ένα συμπαγές και ανθεκτική δομή που υποστηρίζει τα ηλεκτρόδια και επιπλέον επιτρέπει την διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από αυτές τις πλάκες πολύ πιο αποτελεσματικά από ότι αν περνούσε από την μια στην άλλη επιφάνεια ενός ηλεκτροδίου.

Η σχεδίαση των διπολικών πλακών δεν είναι απλή υπόθεση. Τα σημεία των ηλεκτροδίων πρέπει να είναι όσο γίνεται καλύτερη και να είναι όσο το δυνατόν πιο μεγάλα, αλλά το γεγονός αυτό θα μετριάσει την καλή ροή των καυσίμων. Εάν η τα σημεία επαφής είναι μικρά τότε οι πλάκες θα είναι περίπλοκες, δύσκολες στην κατασκευή όσο και ακριβές αλλά και εύθραυστες. Ιδανικά η διπολική πλάκα θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν λεπτό, για να ελαχιστοποιηθεί ηλεκτρική αντίσταση. Βέβαια αυτό σημαίνει ότι το κανάλι μέσα από το οποίο θα περνάει το αέριο θα είναι στενό το οποίο σημαίνει είναι πιο δύσκολη η άντληση του αερίου, και η άντληση του αερίου είναι σημαντική ειδικά όταν έχουμε αέρα αντί καθαρού οξυγόνου κατά την κάθοδο. Στην περίπτωση των κυψελών καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας ο αέρας εξατμίζεται και έτσι απομακρύνεται το νερό. επιπλέον, πρέπει να υπάρχει και κανάλια για την μεταφορά ρευστού για την ψύξη.

### 5.3.ΠΑΡΟΧΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΨΥΞΗ

Επειδή τα ηλεκτρόδια πρέπει να είναι πορώδη για να επιτρέπουν το αέριο να περνάει από μέσα, το αέριο θα μπορεί να διαφύγει από τα άκρα τους. Για το λόγο αυτό τα άκρα του ηλεκτροδίου πρέπει να σφραγίζονται με κάποιο τρόπο. Αυτό γίνεται με το κάνουμε τον ηλεκτρολύτη κάπως μεγαλύτερο από τον ένα ή και τα δυο ηλεκτρόδια και την τοποθέτηση μιας τσιμούχας σε κάθε ηλεκτρόδιο.

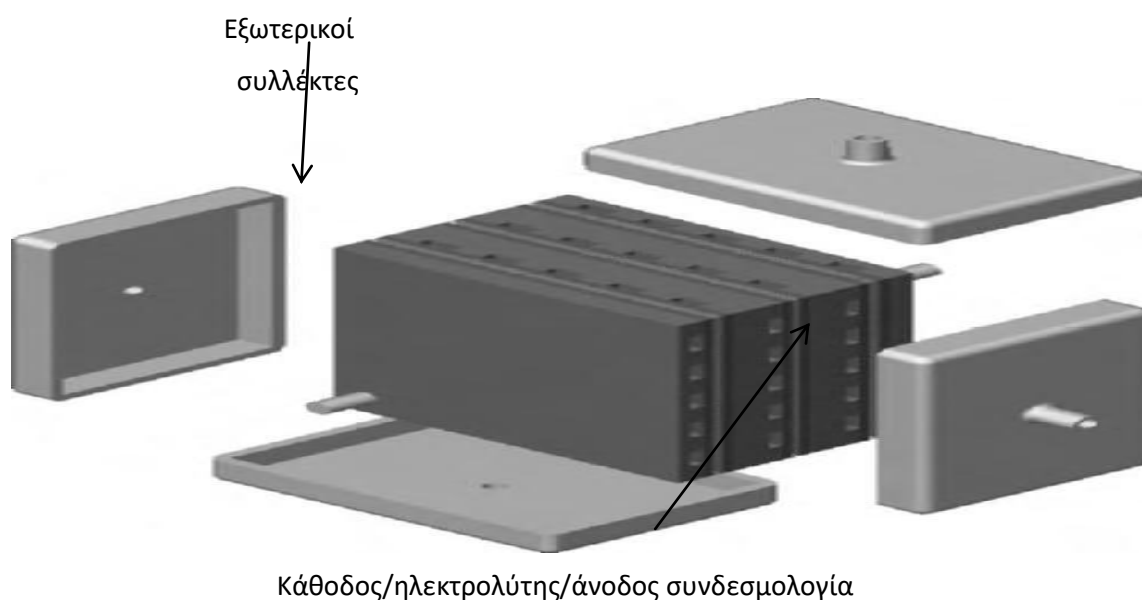


Εικόνα 5-9 Μέρη της κυψέλης καυσίμου

Πηγή:

από το βιβλίο: Fuel Cell Systems Explained, J. Larminie, A. Dicks

Το καύσιμο και το υδρογόνο μπορεί να τροφοδοτείται στα ηλεκτρόδια χρησιμοποιώντας τους εξωτερικούς συλλέκτες.



*Εικόνα 5-10 Μέρη της κυψέλης καυσίμου*

Πηγή:

από το βιβλίο: Fuel Cell Systems Explained, J. Larminie, A. Dicks

Λόγω των σφραγίδων γύρω από την άκρη των ηλεκτροδίων, το υδρογόνο θα πρέπει να έρθει σε επαφή μόνο με τις άνοδοι καθώς τροφοδοτείται κατακόρυφα διαμέσου του συστοιχία κυψελών καυσίμου. Ομοίως, το οξυγόνο (ή τα αέρια) που τροφοδοτείται οριζόντια μέσω της στοίβας θα πρέπει να επικοινωνήσουν μόνο τις καθόδους και όχι με τις άκρες των ανόδων. Η διάταξη της παραπάνω εικόνας χρησιμοποιείται σε μερικά συστήματα, έχει όμως και μερικά μειονεκτήματα :

- είναι δύσκολο να ψύξεις το σύστημα
- είναι αρκετά μακριά από το 100% της απόδοσης
- δημιουργούνται μεγάλες ποσότητες θερμικές ενέργεια αλλά και ηλεκτρικής
- Γενικώς, είναι δύσκολο να ψυχθεί η κυψέλη. Στην πραγματικότητα η ψύξη γίνεται με την αντίδραση του αέρα που περνάει πάνω από την κάθοδο. Αυτό μπορεί να γίνει προμηθεύοντας μεγαλύτερη ποσότητα απ ότι απαιτεί η χημεία της κυψέλης. Μερικές φορές αυτό επαρκεί αλλά σπαταλάτε πολύ ενέργεια.
- Οι τσιμούχες δεν πιέζονται επαρκώς στις άκρες των ηλεκτροδίων και αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα διαρροή των αντιδρώντων αερίων

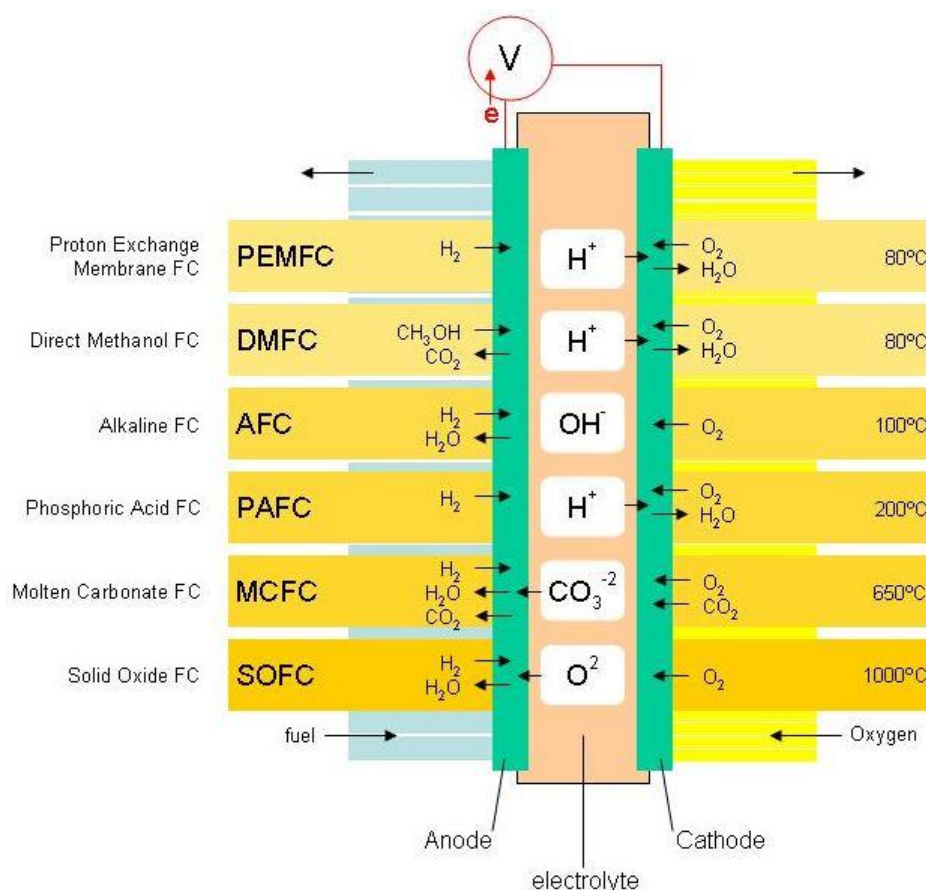
Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος ψύξης των διπολικών πλακών με τους εξωτερικούς συλλέκτες είναι η δημιουργία στενών καναλιών ανάμεσα στις πλάκες για να διέρχεται κρύος αέρας ή νερό.

Για τις διπολικές πλάκες συνήθως χρησιμοποιείται γραφίτης αλλά είναι δύσκολος στην επεξεργασία αλλά και εύθραυστος. Ανοξειδωτο ατσάλι, αλλά και αυτό σε ορισμένους τύπους κυψελών μπορεί να οξειδωθεί. Κεραμικά υλικά χρησιμοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες. Γενικά οι διπολικές πλάκες συνεισφέρουν στη μείωση του κόστους σε μια κυψέλη καυσίμων.

Ένα από τα πιο συχνά προβλήματα σε μια κυψέλη καυσίμου είναι οι διαρροές. Μέσα από τους εξωτερικούς συλλέκτες στους οποίους κινείται το υδρογόνο υπάρχουν πολλές πιθανότητες να διαρρεύσει. Το αέριο πρέπει να φτάσει σε κάθε άκρη από κάθε πορώδες ηλεκτρόδιο , αλλά τα άκρα αυτά είναι μια πιθανή οδός διαρροής του αερίου. Ένα άλλο πιθανό σημείο διαρροής είναι η α αρθρώσεις μεταξύ των διπολικών πλακών. Τέλος αν υπάρχει κάποια μικρή τρύπα σε οποιονδήποτε απ τους ηλεκτρολύτες , τότε μια σοβαρή διαρροή είναι βέβαιη.



## 6. ΤΥΠΟΙ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ



Εικόνα 6-1 Διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου και η λειτουργία τους

Πηγή:

<http://www.jobsinfuelcells.com/fctypes.htm>

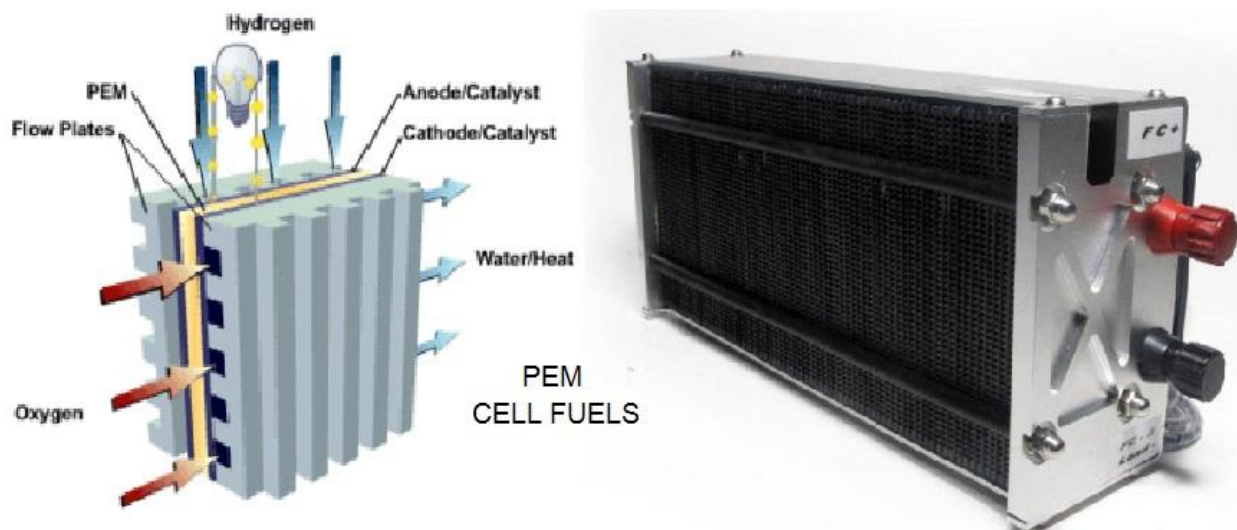
Αφήνοντας στην άκρη κάποια πρακτικά ζητήματα όπως το κόστος κατασκευής και το κόστος των υλικών, τα άλλα δυο βασικά τεχνικά προβλήματα των κυψελών καυσίμου είναι:

- Η αργή ταχύτητα αντίδρασης, που οδηγεί σε χαμηλά ρεύματα και τη δύναμη,
- Το υδρογόνο δεν είναι εύκολα διαθέσιμο καύσιμο, αλλά πρέπει να το παράγουμε.

Για να λυθούν όσο το δυνατόν καλύτερα αυτά τα ζητήματα έχουν δημιουργηθεί έξι διαφορετικοί τύποι κυψελών που αναδείχθηκαν ως βιώσιμα συστήματα. Αυτοί οι

διαφορετικοί τύποι διακρίνονται κυρίως από τους ηλεκτρολύτες που χρησιμοποιούν , αν και πάντα υπάρχουν και άλλες διαφορές μεταξύ τους.

Η **μεμβράνη ανταλλαγής πρωτόνιο (PEM)** είναι σύμφυτη με τη ουσιαστική απλότητα της κυψέλης καυσίμου. Ο ηλεκτρολύτης είναι ένα στερεό πολυμερές στο οποίο τα πρωτόνια κινούνται. Η χημεία είναι η ίδια με αυτή του ηλεκτρολύτη οξέων. Με μια σταθερή και ακίνητη ηλεκτρολύτη, αυτός ο τύπος κυττάρου είναι εγγενώς πολύ απλός. Αυτές οι κυψέλες λειτουργούν σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες έτσι τα προβλήματα της αργής αντίδρασης αντιμετωπίζονται με εξελιγμένους καταλύτες και ηλεκτρόδια. Ο καταλύτης είναι από πλατίνα και το κόστος του είναι σχετικά μικρό σε σχέση με αυτό ολόκληρης της κυψέλης. Το πρόβλημα του ανεφοδιασμού με καθαρό υδρογόνο είναι μία πραγματικά δύσκολη διαδικασία. Μια θεωρητικά πύ ελκυστική λύση στο πρόβλημα παροχής υδρογόνου είναι η χρήση μεθανόλης ως καύσιμο. Αυτό μπορεί να γίνει στις κυψέλες καυσίμου (PEM) και αυτές οι κυψέλες ονομάζονται «άμεσες» κυψέλες καυσίμου μεθανόλης επειδή χρησιμοποιούν την μεθανόλη όπως είναι σε υγρή μορφή σε αντίθεση με το υδρογόνο. Δυστυχώς αυτές οι κυψέλες έχουν πολύ χαμηλή ισχύ, αλλά παρ' όλα αυτά , υπάρχουν πολλές εφαρμογές στο χώρο των ηλεκτρονικών συσκευών, και στο μέλλον θα χρησιμοποιούνται , γενικά, σε εφαρμογές που απαιτούν αργή και σταθερή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για μεγάλες χρονικές περιόδους.



Εικόνα 6-2 Κυψέλες καυσίμου PEM (γράφημα και πραγματική εικόνα)

Πηγές:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Proton\\_exchange\\_membrane\\_fuel\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Proton_exchange_membrane_fuel_cell)

<http://fuelcellstore.com/horizon-200watt-fuel-cell-h-200>

Αν και οι κυψέλες καυσίμου PEM χρησιμοποιήθηκαν στα πρώτα επανδρωμένα διαστημόπλοια, **οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου** χρησιμοποιήθηκαν στα διαστημόπλοια Apollo και Shuttle Orbiter. Το πρόβλημα του αργού ρυθμού αντίδρασης το ξεπερνάμε χρησιμοποιώντας εξαιρετικά πορώδη ηλεκτρόδια με καταλύτες από πλατίνα και μερικές φορές λειτουργώντας σε αρκετά υψηλές πιέσεις. Κάποιες αλκαλικές κυψέλες λειτουργούν στους 200°C, αλλά το πιο συνηθισμένο είναι να λειτουργούν κάτω από τους 100°C. ο αέρας και το καύσιμο δεν πρέπει να περιέχουν CO<sub>2</sub>, διαφορετικά πρέπει να χρησιμοποιηθούν καθαρό οξυγόνο και υδρογόνο.



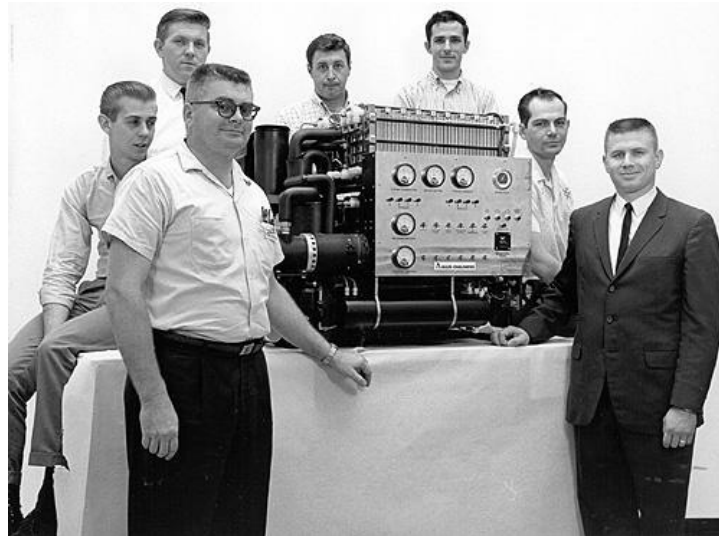
Εικόνα 6-3 Αλκαλική κυψέλη καυσίμου

Πηγή:

<http://www.apolloenergysystems.com/prod-FuelCell.html>

Η **κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)** ήταν η πρώτη που παράχθηκε σε εμπορικές ποσότητες και απολαμβάνει ευρείας επίγεια χρήση. Τα πορώδη ηλεκτρόδια, καταλύτες λευκόχρυσου και μια αρκετά υψηλή θερμοκρασία (~220°C) που χρησιμοποιείται να ενισχύσει την ταχύτητα αντίδρασης σε ένα λογικό επίπεδο. Το πρόβλημα του ανεφοδιασμού με υδρογόνο λύνεται με «αναμόρφωση» του φυσικού αερίου (κυρίως μεθάνιο) με υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα, αλλά ο εξοπλισμός που απαιτείται για να γίνει αυτό αυξάνει σημαντικά το κόστος, την πολυπλοκότητα, και το μέγεθος του συστήματος κυψελών καυσίμου. Παρ'όλα αυτά, τα συστήματα PAFC χρησιμοποιούν την έμφυτη απλότητα μιας κυψέλης καυσίμου για να παρέχει μια εξαιρετικά αξιόπιστη και χωρίς απαιτήσεις συντήρησης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Πολλά συστήματα PAFC έχουν λειτουργεί συνεχώς για περίοδο ενός έτους ή και περισσότερο με ελάχιστη

συντήρησης που απαιτεί να διακοπεί η λειτουργία της ή την ανθρώπινη παρέμβαση.



Εικόνα 6-4 A photo of phosphoric acid fuel cell and development team, about 1965.

Πηγή:

<http://americanhistory.si.edu/fuelcells/phos/pho1.htm>



Εικόνα 6-5 Μια πιο σύγχρονη κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος

Πηγή:

<http://www.interstatetraveler.us/Reference-Bibliography/Bellona-HydrogenReport.html>

Η **κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)** λειτουργεί στην περιοχή των 600 έως 1000°C. Αυτό σημαίνει ότι τα υψηλά ποσοστά αντίδρασης μπορεί να επιτευχθούν χωρίς ακριβούς καταλύτες, και ότι τα αέρια όπως το φυσικό αέριο μπορεί να χρησιμοποιηθούν άμεσα, χωρίς την ανάγκη για μια ξεχωριστή μονάδα. Έτσι αυτός ο τύπος κυψέλης καυσίμου απευθύνεται στο να λύσει πολλά απ τα προβλήματα και εκμεταλλεύεται πλήρως την εγγενή απλότητα των κυψελών καυσίμου. Παρ' όλα αυτά, τα κεραμικά υλικά απ τα οποία είναι φτιαγμένες οι κυψέλες είναι δύσκολα στην κατεργασία τους, οπότε είναι και ακριβή η κατασκευή τους. Επίσης υπάρχει αρκετός επιπλέον εξοπλισμός που απαιτείται για την



πλήρη κατασκευή ολόκληρου του συστήματος. Αυτό το επιπλέον εγκατάσταση περιλαμβάνει αέρα και προθερμαντήρες καυσίμων , Επίσης, το σύστημα ψύξης είναι αρκετά πολύπλοκο, και δεν είναι εύκολο να ξεκίνα.



*Εικόνα 6-6 μονάδα επίδειξης 5kWκυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου. Η μονάδα λειτουργήσει για 7000 ώρες με 5 kW(SOFC)*

Πηγή:

<http://mfame.guru/solid-oxide-fuel-cell-ideal-for-lng-vessels/>

Παρά το γεγονός ότι οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου λειτουργούν σε θερμοκρασίες έως και 1000°C παραμένουν σε στερεή κατάσταση. Αυτό δεν ισχύει και για τις **κυψέλες καυσίμου λιωμένου ανθρακικού άλατος (MCFC)**. Το οποίο έχει ότι ακριβώς χρειάζεται το διοξείδιο του άνθρακα για να λειτουργήσει. Η υψηλή θερμοκρασία σημαίνει ότι μία καλή αντίδραση επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός καταλύτη Νικελίου, συγκριτικά φθηνού. Το νικέλιο επίσης σχηματίζει την ηλεκτρική βάση του ηλεκτροδίου. Όπως και το SOFC μπορεί να χρησιμοποιήσει αέρια όπως το μεθάνιο και το μονοξείδιο του άνθρακα (H<sub>2</sub> και CO) απευθείας, χωρίς εξωτερικό αναμορφωτή. Ωστόσο, αυτή η σχετική απλότητα κάπως αντισταθμίζεται από τη φύση του ηλεκτρολύτη, ένα θερμό και διαβρωτικό μείγμα ανθρακικών αλάτων λιθίου, καλίου και νατρίου.



Εικόνα 6-7 photo of molten carbonate fuel cell, 1964, for the U.S. Army

Πηγή: <http://americanhistory.si.edu/fuelcells/mc/mcfc2.htm>



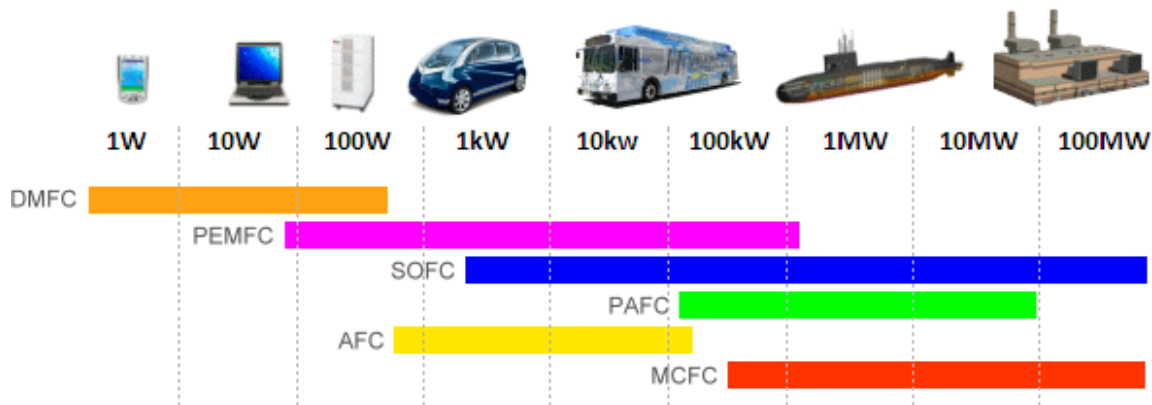
Εικόνα 6-8 Modern Molten Carbonate Fuel Cell in a T-Mobile data center in Munich

Πηγή:

[http://supply925.rssing.com/chan-14631549/all\\_p2.html](http://supply925.rssing.com/chan-14631549/all_p2.html)

Πίνακας 6-1 Δεδομένα για διαφορετικούς τύπους κυψελών καυσίμου

Τύποι κυψελών καυσίμου	Κινητό ιόν	Θερμοκρασίες λειτουργίας	εφαρμογές και σημειώσεις
Αλκαλικές (AFC)	OH <sup>-</sup>	50–200°C	Σε διαστημόπλοια όπως το Apollo, και το Shuttle
Πρωτονίων (PEMFC)	H <sup>+</sup>	30–100°C	Οχήματα και κινητές συσκευές, για συστήματα CHP χαμηλής ενέργειας
Άμεση μεθανόλη (DMFC)	H <sup>+</sup>	20-90°C	Φορητά ηλεκτρονικά συστήματα χαμηλής ενέργεια για πολλές ώρες
Φωσφορικό οξέων (PAFC)	H <sup>+</sup>	~220°C	Συστήματα CHP 200kW υψηλής ενέργειας
λιωμένου ανθρακικού άλατος (MCFC)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	~650°C	Μέση και υψηλή κλίμακα σε CHP συστήματα, χωρητικότητας άνω του MW
στερεού οξειδίου (SOFC)	O <sup>2-</sup>	500-1000°C	Για όλα τα μεγέθη CHP συστημάτων, από 2KW έως πολλά MW



Εικόνα 6-9 Οι διάφοροι τύποι των κυψελών καυσίμου, και οι εφαρμογές τους ανά είδος

## 6.1. ΚΑΠΟΙΕΣ ΑΛΛΕΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Σε αντίθεση με τα παραπάνω υπάρχουν και κάποιες άλλες κυψέλες καυσίμου, ή τουλάχιστον έτσι αναφέρονται σε ορισμένα δημοσιεύματα και επιστημονικά περιοδικά, αλλά στην πραγματικότητα δεν είναι. η κυψέλη καυσίμου συχνά αναγράφεται ως ηλεκτροχημική συσκευή που μετατρέπει ένα καύσιμο σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα διαρκώς, όσο η αντίδραση παρέχεται στο ηλεκτρόδιο. Τα ηλεκτρόδια και οι ηλεκτρολύτες, φυσικά, υπόκεινται σε φθορά κατά την λειτουργία τους αλλά δεν καταναλώνονται όπως συμβαίνει με τις παρακάτω κυψέλες καυσίμου.

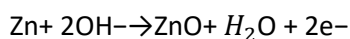
### 6.1.1. Βιολογικές κυψέλες καυσίμου

Αυτός ο τύπος κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιούν οργανικά καύσιμα όπως μεθανόλη ή αιθανόλη. Ωστόσο τα ενζυμα είναι αυτά που προάγουν τις αντιδράσεις ηλεκτροδίου. Τέτοια κύτταρα αναπαράγονται με τέτοιο τρόπο που η ενέργεια που προέρχεται από οργανικά καύσιμα. Ωστόσο, αυτός ο τύπος κυττάρου δεν είναι ακόμα κοντά σε εμπορική εφαρμογή

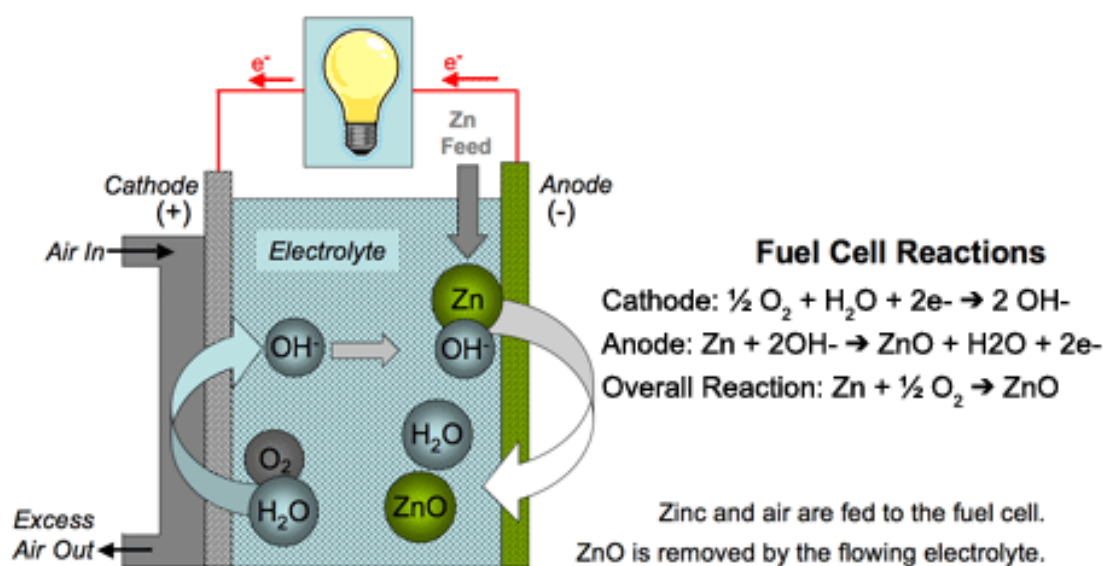
### 6.1.2. Κυψέλες καυσίμου μετάλλου/αέρα

Ο πιο κοινός τύπος των κυττάρων σε αυτή την κατηγορία είναι η μπαταρία ψευδαργύρου αέρα, αν και τα κύτταρα από αλουμίνιο / αέρα και μαγνήσιο / αέρα έχουν παραχθεί εμπορικά. Σε όλες τις περιπτώσεις η βάση του λειτουργία είναι η ίδια. Τέτοιες κυψέλες ονομάζονται μερικές φορές κυψέλες καυσίμου ψευδαργύρου. Στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, το μέταλλο αντιδρά με ένα αλκαλικό ηλεκτρολύτη για να σχηματιστεί το μεταλλικό οξείδιο ή υδροξείδιο. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του ψευδαργύρου η αντίδραση είναι:





Τα ηλεκτρόνια απελευθερώνονται στο πέρασμα γύρω από το εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα και πάνε στην κάθοδο αέρα όπου είναι διαθέσιμα για την αντίδραση μεταξύ του νερού και οξυγόνου για να σχηματίσουν περισσότερα ιόντα υδροξυλίου. Το μεταλλικό οξείδιο ή υδροξείδιο θα πρέπει να παραμένει διαλυμένο εντός του ηλεκτρολύτη. Οι κυψέλες που χρησιμοποιούν ένα ηλεκτρολύτη με θαλασσινό νερό λειτουργούν αρκετά καλά όταν χρησιμοποιούν αλουμίνιο ή μαγνήσιο, ως «καύσιμο». Κάποιες εταιρίες αναπτύσσουν υψηλές μονάδες ισχύος για εφαρμογές σε ηλεκτρικά οχήματα.



Εικόνα 6-10 Power Air έχει αναπτύξει μια κυψέλη καυσίμου ψευδαργύρου-αέρα, η οποία προσφέρει πλεονεκτήματα σε σχέση με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου και τις μπαταρίες λιθίου-ιόντων.

Πηγή:

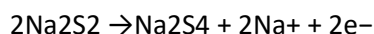
<http://www.cnet.com/news/zinc-fuel-cell-maker-readies-portable-power-pack/>

### 6.1.3. Οξειδοαναγωγής κυψέλες ροής για την αναγεννητική κυψέλες καυσίμου

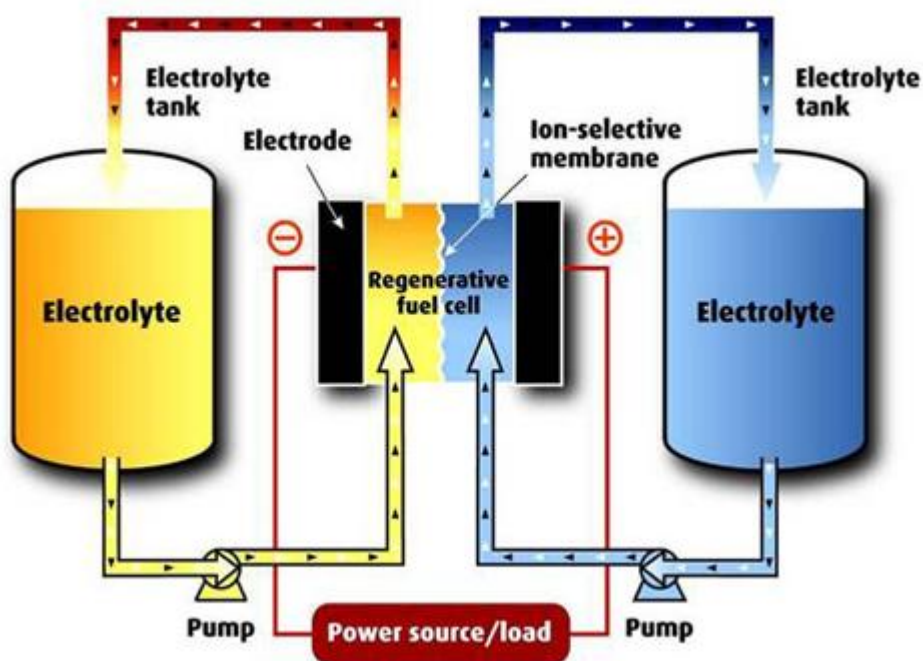
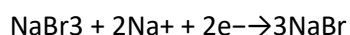
Σε αυτόν τον τύπο κυψελών, τα αντιδρώντα απομακρύνονται από τα ηλεκτρόδια κατά τη διάρκεια τη φόρτιση και αποθηκεύονται σε δεξαμενές. Η χωρητικότητα αυτών των δεξαμενών μπορεί να είναι πολύ μεγάλη. Αυτές αποφορτίζονται με το να παρέχουν τα αντιδρώντα στα ηλεκτρόδια. Επειδή η λειτουργία της κυψέλης περιλαμβάνει χημικές ουσίες στα ηλεκτρόδια, οι συσκευές αυτές μερικές φορές λέγονται κυψέλες καυσίμων, αλλά αυτό δεν είναι σωστό. Αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται για να κάνει πολύ μεγάλη τη χωρητικότητα των επαναφορτιζόμενων μπαταριών και ίσος χρησιμοποιείται στις

επιχειρήσεις κοινής ωφελείας ηλεκτρικής ενέργειας για να εξισορροπήσει την προσφορά με τη ζήτηση .

Η αντίδραση στα αρνητικά ηλεκτρόδια είναι :



Τα ηλεκτρόνια ρέουν γύρω από το κύκλωμα, και τα ιόντα νάτριου περνούν απ τη μεμβράνη στο θετικό ηλεκτρολύτη, η αντίδραση είναι :



Εικόνα 6-11 Οξειδοαναγωγής κυψέλες ροής

#### Πλεονεκτήματα

- Αυτή είναι ένα από τις λίγες τεχνολογίες που μπορούν να διαχωρίσουν τις απαιτήσεις σε ενέργεια και ισχύ. Η ισχύς καθορίζεται από το μέγεθος του ηλεκτροχημικού στοιχείου, ενώ η ενέργεια είναι ανάλογη με το μέγεθος των δεξαμενών αποθήκευσης.
- Μεγάλες ποσότητες ενέργειας (έως εκατοντάδες MWh) μπορούν να αποθηκευτούν έως ότου χρειασθεί με μικρή απώλεια.
- μετατροπής υψηλής απόδοσης από ηλεκτρική σε χημική ενέργεια
- Μεγάλος κύκλος ζωής με γρήγορους χρόνους απόκρισης.

#### Εφαρμογές

- ◆ Μεγάλες (1 kWh - πολλές MWh) με σταθερές εφαρμογές.
- ◆ αποθήκη ενέργειας σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της ώρα αιχμής.

- ◆ Αποθήκευση της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως η αιολική ή ηλιακή για την παροχή ρεύματος κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής παραγωγής.
- ◆ Αδιάλειπτης τροφοδοσίας (UPS), για την παροχή ρεύματος σε περίπτωση διακοπής ρεύματος.
- ◆ τροφοδοσία σε απομακρυσμένη περιοχή
- ◆ υποστήριξη τάσης και σταθεροποίηση της συχνότητας.

Πηγή: <https://electrosynthesis.com/energy-storage/>

## 7. ΚΟΜΜΑΤΙΑ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Ο πυρήνας του συστήματος κυψελών καυσίμου ισχύος είναι τα ηλεκτρόδια, ο ηλεκτρολύτης, και η διπολική πλάκα που έχουμε ήδη εξετάσει. Ωστόσο, άλλα τμήματα συχνά αποτελούν μεγάλη αναλογία της μηχανικής του συστήματος κυψελών καυσίμου. Αυτά τα «extras» ονομάζονται μερικές φορές ο υπόλοιπο των εγκαταστάσεων (BOP). Στις κυψέλες καυσίμου υψηλότερης θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται, σε συστήματα CHP, η συστοιχία κυψελών καυσίμου συχνά φαίνεται να είναι αρκετά μικρό και ασήμαντο τμήμα του συνόλου συστήματος. Τα πρόσθετα στοιχεία που απαιτούνται εξαρτώνται κατά πολύ από τον τύπο της κυψέλης καυσίμου, και σε μεγάλο βαθμό από τον χρησιμοποιούμενο καύσιμο. Σε όλες όμως τις μικρότερες κυψέλες καυσίμου ο αέρας και τα καύσιμα θα πρέπει να κυκλοφορούν μέσω της μιας συστοιχίας χρησιμοποιώντας αντλίες ή φυσητήρες. Συχνά συμπιεστές θα χρησιμοποιηθούν, η οποία μερικές φορές να συνοδεύεται από τη χρήση του intercoolers, όπως και σε μηχανές εσωτερικής καύσης. Το συνεχές ρεύμα (DC) έξοδο μιας συστοιχίας κυψελών καυσίμου σπανίως θα είναι κατάλληλο για άμεση σύνδεση με ένα ηλεκτρικό φορτίο, και έτσι κάποιου είδους ρύθμισης της ισχύος είναι σχεδόν πάντα απαιτείται. Αυτό μπορεί να είναι τόσο απλό όσο ένα ρυθμιστή τάσης, ή έναν μετατροπέα DC / DC σε CHP συστήματα, ένα DC σε AC inverter είναι απαραίτητο, το οποίο είναι ένα σημαντικό μέρος του κόστους της όλης συστήματος.

Ηλεκτρικοί κινητήρες, οι οποίοι κινούν τις αντλίες, φυσητήρες και συμπιεστές που αναφέρονται παραπάνω, θα είναι σχεδόν πάντοτε ένα ζωτικό μέρος ενός συστήματος κυψελών καυσίμου. Συχνά επίσης, η ηλεκτρική

ενέργεια που παράγεται θα προορίζεται για έναν ηλεκτρικό κινητήρα - για παράδειγμα, σε οχήματα με κινητήρα. Η προμήθεια και την αποθήκευση του υδρογόνου είναι ένα πολύ κρίσιμο πρόβλημα για τις κυψέλες καυσίμου. Καύσιμα

αποθήκευσης θα είναι σαφώς ένα μέρος των πολλών συστημάτων. Εάν η κυψέλη καυσίμου δεν χρησιμοποιεί υδρογόνο, στη συνέχεια θα χρειαστεί κάποια μορφή συστήματος επεξεργασίας καυσίμων. Αυτά είναι συχνά πολύ μεγάλες και πολύπλοκες κατασκευές, για παράδειγμα, κατά τη λήψη του υδρογόνου από τη βενζίνη σε ένα αυτοκίνητο. Σε πολλές περιπτώσεις αποθείωση του καυσίμου θα είναι αναγκαία. Διάφορα βαλβίδες ελέγχου, καθώς και ρυθμιστές πίεσης, συνήθως χρειάζονται. Στις περισσότερες περιπτώσεις θα χρειαστούν έναν ελεγκτή για τον συντονισμό των τμημάτων του συστήματος.

Ένα ιδιαίτερο πρόβλημα ο ελεγκτής πρέπει να αντιμετωπίσουμε είναι η εκκίνηση και ο τερματισμός του συστήματος κυψελών καυσίμου, καθώς αυτό μπορεί να είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, ειδικά για τις κυψέλες σε υψηλή θερμοκρασία. Για όλα, αλλά ειδικά

για τις μικρότερες κυψέλες καυσίμου θα χρειαστεί ένα σύστημα ψύξης. Στην περίπτωση των CHERSUστημάτων, αυτό συνήθως ονομάζεται εναλλάκτης θερμότητας, καθώς η ιδέα δεν είναι να χάσει τη θερμότητα, αλλά να το χρησιμοποιήσει κάπου αλλού. Κάποιες φορές στην περίπτωση των κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας κάποια απ τη θερμότητας που παράγεται στην κυψέλη καυσίμου θα χρησιμοποιηθούν σε καύσιμα ή / και προθερμαντήρες αέρα.

Στην περίπτωση της κυψέλης καυσίμου PEM, υπάρχει συχνά η ανάγκη να υγραίνει ένα ή δύο από τα αντιδρώντα αέρια.

Βλέπουμε ότι η μονάδα κυψελών καυσίμου είναι, όσον αφορά το μέγεθος, ένα μικρό μέρος της συνολικού συστήματος, το οποίο κυριαρχείται από τα συστήματα επεξεργασίας των καυσίμων και τη θερμότητα. Αυτό συμβαίνει σχεδόν πάντα στα συνδυασμένα συστήματα θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας που λειτουργούν με απλά καύσιμα όπως το φυσικό αέριο. κινητήρας κυψελών καυσίμου από ένα αυτοκίνητο χρησιμοποιεί υδρογόνο καυσίμου, και η απορριπτόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται μόνο για να θερμάνει το εσωτερικό του αυτοκινήτου. Η συστοιχία κυψελών καυσίμου είναι ένα ορθογώνιο μπλοκ. Το υπόλοιπο της μονάδας (αντλίες, υγραντήρα, ηλεκτρονικά, συμπιεστής) είναι πολύ λιγότερο ογκώδη από εκείνη, αλλά εξακολουθούν να καταλαμβάνει πάνω από το μισό του όγκου του όλου συστήματος.

## 7.1.ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΜΙΑ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

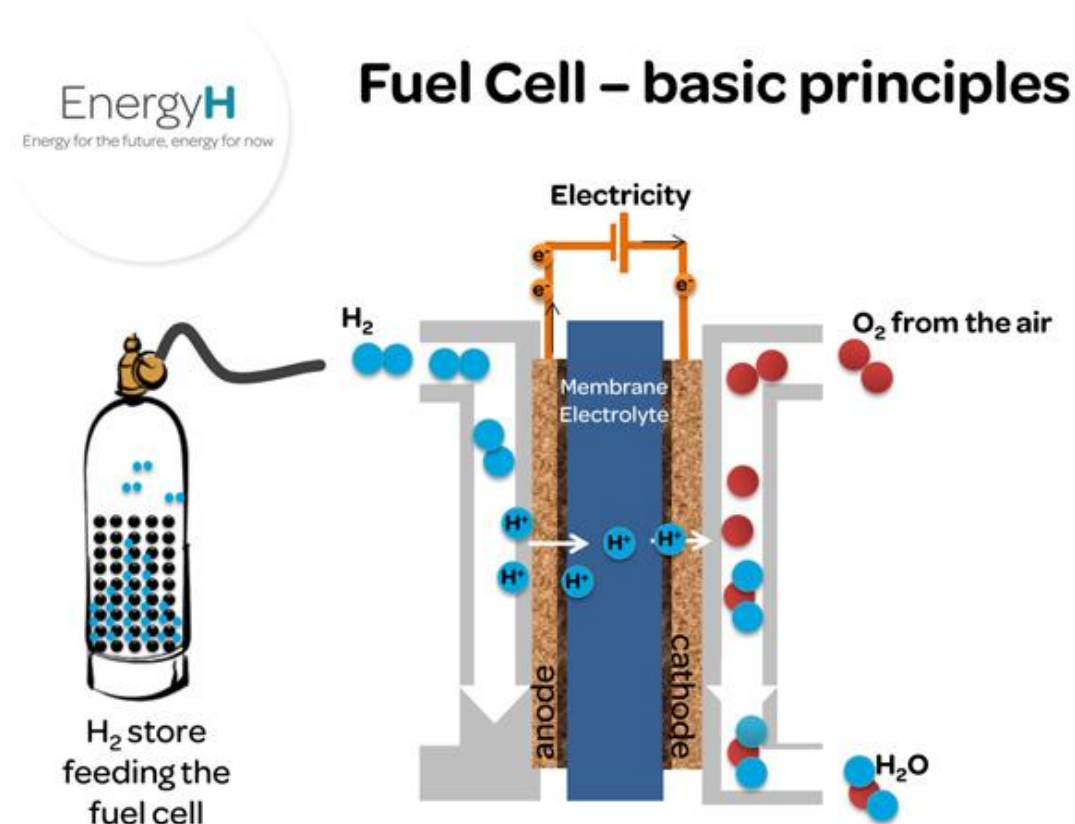
Ένα ολοκληρωμένο σύστημα κυψέλης καυσίμου περιέχει μια ποσότητα από διαφορετικά εξαρτήματα, συμπεριλαμβανομένου : τη συστοιχία κυψελών καυσίμου, ένα μέρος για αποθήκευση του καυσίμου ( υδρογόνου ή μεθανόλης) έναν συμπιεστή αέρος, ένα σύστημα ψύξης, ένα σύστημα διαχείρισης του νερού για να διατηρεί την κυψέλη καυσίμου κορεσμένη, και να απομακρύνει τα παραγόμενα στοιχεία και τέλος έναν ηλεκτρικό κινητήρα και ένα ελεγκτή. Εάν το όχημα χρησιμοποιεί μεθανόλη αντί για υδρογόνο ένας μεταρρυθμιστής είναι απαραίτητος, για να μετατρέπει την μεθανόλη σε υδρογόνο με σκοπό να χρησιμοποιηθεί από την κυψέλη καυσίμου. Μία μπαταρία υψηλής τάσης είναι πιθανό να χρειαστεί για να προμηθεύει με ενέργεια στις περιπτώσεις όπου η λειτουργία της κυψέλης δεν θα επαρκεί. Ενώ τα γενικά χαρακτηριστικά όλων των κυψελών καυσίμου των οχημάτων είναι παρόμοια , ο σχεδιασμός των επιμέρους συστημάτων εξαρτάται από τις ειδικές απαιτήσεις των εκάστοτε συστημάτων, όπως :

- Ο τύπος της κυψέλης καυσίμου και ο επεξεργαστής καυσίμων καθορίζεται από τα πρωτογενή καύσιμα ( υδρογόνο, φυσικό αέριο, γαιάνθρακας, αλκοόλη, πετρέλαιο ) .
- Η μέθοδος απομάκρυνσης υποπροϊόντων όπως τη θερμότητα και το νερό, καθορίζεται , εν μέρη, από της θερμοκρασία λειτουργίας.
- η ονομαστική ισχύς και η ανάγκη της ρύθμισης της ισχύος ή ενός κατώτερου κύκλου (οι τελευταίοι δύο όροι θα εξηγηθούν παρακάτω) εξαρτώνται από την συσκευή.

- Ο χρόνος εκκίνησης και ο χρόνος ανεφοδιασμού είναι και τα δύο σημαντικά ζητήματα για εφαρμογές στον κλάδο της μεταφοράς.

## 7.2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

Το ηλεκτρικό σύστημα αποθήκευσης καυσίμων σε μια κυψέλη καυσίμου σε οχήματα αποτελείται από μια συστοιχία μπαταριών που μπορούν να φορτιστούν απ την κυψέλη καυσίμου υπό συνθήκες χαμηλού φορτίου, ή με ενέργεια από το φρενάρισμα που σε άλλες περιπτώσεις θα ήταν χαμένη, χρησιμοποιώντας ένα αναγεννητικό σύστημα πέδησης. Το απαιτούμενο ηλεκτρικό σύστημα αποθήκευσης για ένα αυτοκίνητο με κυψέλη καυσίμου θα είναι μεγαλύτερο από την μπαταρία που χρησιμοποιείτε στα συμβατικά αυτοκίνητα, αλλά μικρότερη από την μπαταρία που χρειάζονται τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα (Battery Powered Electrical Vehicles)



Εικόνα 7-1 Ο τρόπος με τον οποίο το υδρογόνο «πηγαίνει» από την δεξαμενή αποθήκευσης στην κυψέλη καυσίμου και παράγεται ηλεκτρική ενέργεια

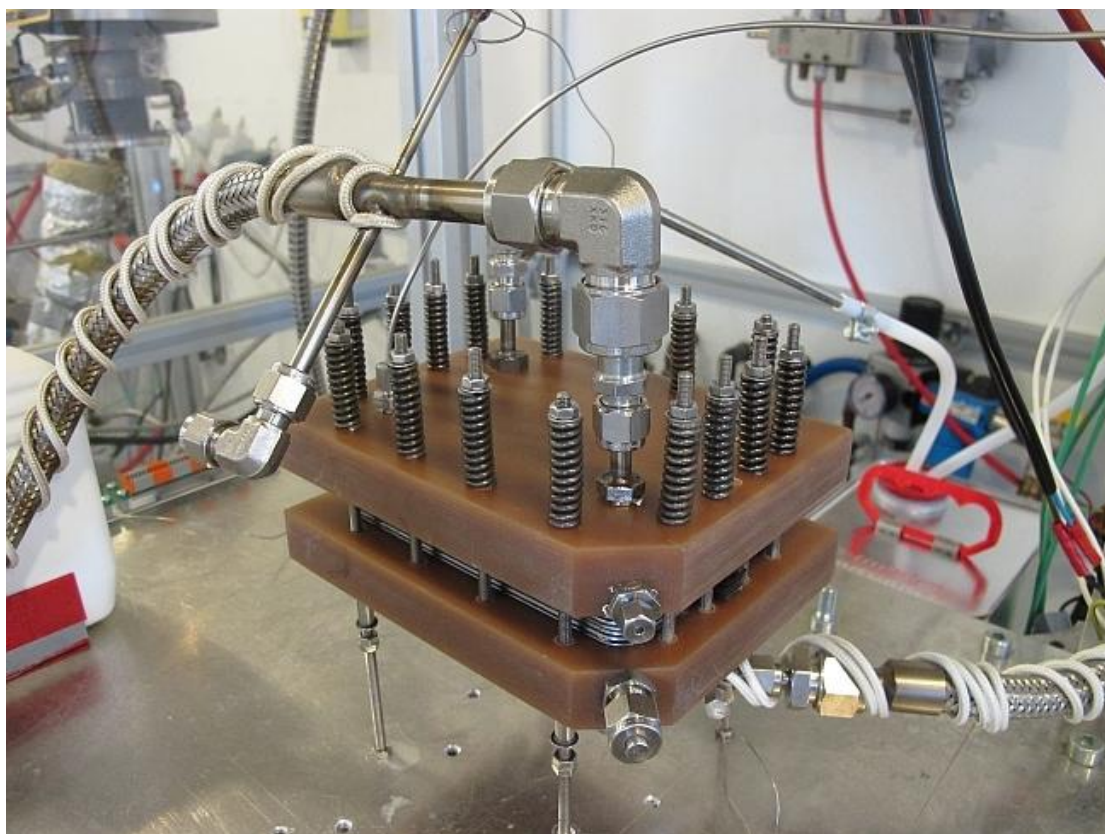
### 7.3.ΑΝΑΜΟΡΦΩΤΕΣ

Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί επί του οχήματος σε μορφή υδρογονανθράκων και στη συνέχεια υποβάλλονται σε επεξεργασία με ένα πλούσιο σε υδρογόνο αέριο από ένα αναμορφωτές. Το πλεονέκτημα με αυτή τη μέθοδο λειτουργίας είναι ότι το πρόβλημα της αποθήκευσης καθαρού υδρογόνου επί του οχήματος, αποφεύγεται. Η μεθανόλη είναι μακράν η καλύτερη επιλογή υδρογονάνθρακα για τη λειτουργία της διαδικασίας μεταρρυθμισμού επειδή αυτή μπορεί να μετατραπεί καταλυτικά σε υδρογόνο και νερού σε μόνο 200°C έως 300°C.

Ένα από τα προβλήματα που έχουν οι μεταρρυθμιστές μεθανόλης είναι ότι έχουν σχετικά μεγάλους χρόνους προθέρμανσης και δεν μπορεί να αλλάξει την ισχύ του αρκετά γρήγορα για να ανταποκριθούν στις μεταβαλλόμενες ανάγκες κατά την οδήγηση. Το Los Alamos National Laboratory έχει αναπτύξει ένα καταλύτη που να μπορεί να παρέχει καλύτερη απόδοση στα προαναφερθέντα σημεία. Αυτός ο σχεδιασμός χρησιμοποιεί έναν εσωτερικό ανεμιστήρα για να κυκλοφορήσει το μείγμα μέσω της κλίνης του καταλυτικής. Αυτό διατηρεί την κλίνης του καταλύτη σε βέλτιστη θερμοκρασία. Η θερμότητα μπορεί επίσης να εισφέρει στο να αυξηθεί ο ρυθμός της μεταρρυθμισμού.

Ένα άλλο πρόβλημα με το σύστημα του μεταρρυθμιστή είναι ότι η αντίδραση από υδρογονάνθρακα σε υδρογόνο συχνά δεν ολοκληρώνεται πλήρως, αφήνοντας μονοξείδιο του άνθρακα στα καυσαέρια. Δυστυχώς, οι PAFCs αλλά και οι SPFCs είναι ευαίσθητοι στη μόλυνση από CO. Η ανώτατη επιτρεπτή περιεκτικότητα μονοξειδίου του άνθρακα για ένα αέριο καύσιμο σε κυψέλες με χαμηλή θερμοκρασία είναι για τις PAFCs 3% και ακόμα χαμηλότερα για τις SPFCs, περίπου 100 ppmv (parts per million by volume) (Μέρη ανά εκατομμύριο κατ 'όγκο). Αυτή η μικρή συγκέντρωση CO μπορεί να δηλητηριάσει την κυψέλη και να μειώσει την απόδοσή της, παρ'όλα αυτά έχουν αναπτυχθεί κάποιες τεχνικές για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος.





Εικόνα 7-2

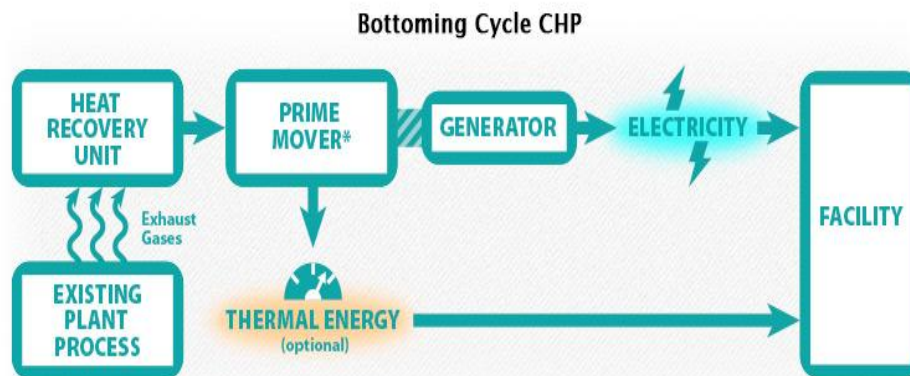
Το σύστημα, το οποίο είναι ακόμα υπό ανάπτυξη, δημιουργεί ένα πλούσιο σε υδρογόνο καύσιμο από ένα μίγμα μεθανόλη-νερό για την λειτουργία μία κυψέλης HT-PEM-καυσίμου (υψηλή θερμοκρασία Proton Exchange Membrane). Ωστόσο, μεθανόλη-αναμόρφωσης περιέχει επίσης μικρές ποσότητες μονοξειδίου του άνθρακα, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια απόδοσης και υποβάθμιση του MEA. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η ποιότητα του MEA είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αντοχή του συστήματος.

\*(MEA)= (Membrane Electrode Assemblies) (σύνδεση μεμβράνης και ηλεκτροδίου)

<http://www.owi-aachen.de/en/brennstoffzellen-und-reformer-kombisystem/>

#### 7.4.ΚΑΤΩΤΕΡΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

Ο κατώτερος κύκλος χρησιμοποιείται στα μεγάλα , υψηλής θερμοκρασίας , συστήματα κυψελών καυσίμου. Η λειτουργία τους είναι να αυξάνουν την απόδοση της μονάδας παραγωγής ενέργειας μετατρέποντας την απορριπτόμενη θερμότητα που παράγεται από τη συστοιχία κυψελών καυσίμου σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Οι τουρμπίνες αερίου και ατμού είναι και οι δύο χρήσιμες για τον πυθμενικό κύκλο.



\*Organic Rankine Cycle Turbine/Steam Turbine

Εικόνα 7-3 Συμπαράγωγή Ηλεκτρικής & Θερμικής Ενέργειας

Συστήματα ΣΗΘ\* προσφέρουν πολλά οφέλη για το Δήμο, βιομηχανικές, εμπορικές, θεσμικές και ακόμη και κατοικημένες εγκαταστάσεις.

Οφέλη των συστημάτων ΣΗΘ:

- Μειώνει το κόστος χρήσης και βελτιώνει την ανταγωνιστικότητα της οικονομίας
- Αυξάνει την αξιοπιστία δύναμης και της αυτάρκειας
- Μειώνει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και άλλων ρύπων
- Μειώνει τη ζήτηση για εισαγόμενα ενεργειακού εφοδιασμού
- Μπορούν να λειτουργούν με ανανεώσιμες ή μη ανανεώσιμες πηγές
- Αποδεδειγμένα, εμπορικά διαθέσιμες τεχνολογίες για διάφορες εφαρμογές
- Πρόσθετα οικονομικά κίνητρα μέσω του feed-in-tariff, Self-Generation πρόγραμμα κινήτρων (SGIP) και φορολογικά κίνητρα των επενδύσεων που διατίθενται για τους επιλέξιμους πελάτες

\*ΣΗΘ= Συμπαράγωγή Ηλεκτρικής & Θερμικής Ενέργειας

Πηγή:

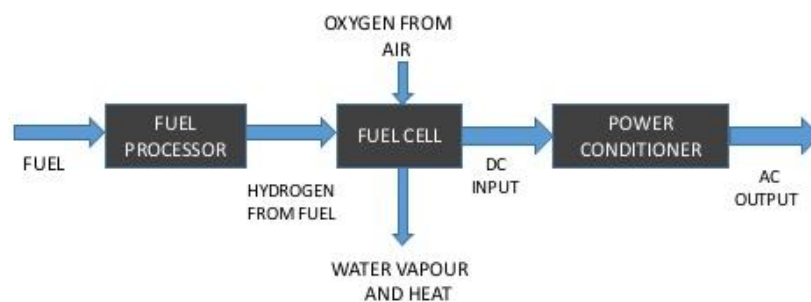
<https://energycenter.org/self-generation-incentive-program/business/technologies/chp>



## 7.5.ΡΥΘΜΙΣΗ ΙΣΧΥΟΣ

Ένας ρυθμιστής ισχύος χρειάζεται για τα συστήματα κυψελών καυσίμου καθώς χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές βοηθητικού προγράμματος. Ο ρυθμιστής ισχύος χρησιμοποιείται για να διατηρείται ένα σταθερό εναλλασσόμενο ρεύμα εξόδου παρά την διακύμανση της τάσης συνεχούς ρεύματος συστοιχία κυψελών ως συνάρτηση του φορτίου.

### ENERGY FLOW DIAGRAM

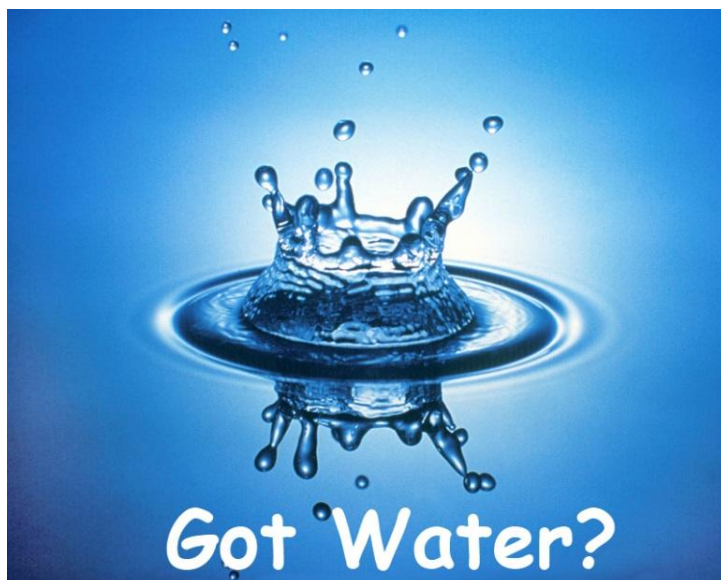


Εικόνα 7-4 Διάγραμμα ροής της ενέργειας και η θέση του ρυθμιστή ισχύος σε αυτό

Πηγή:

<http://www.slideshare.net/QuadeerFahad/fuel-26142643>

## 7.6.ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

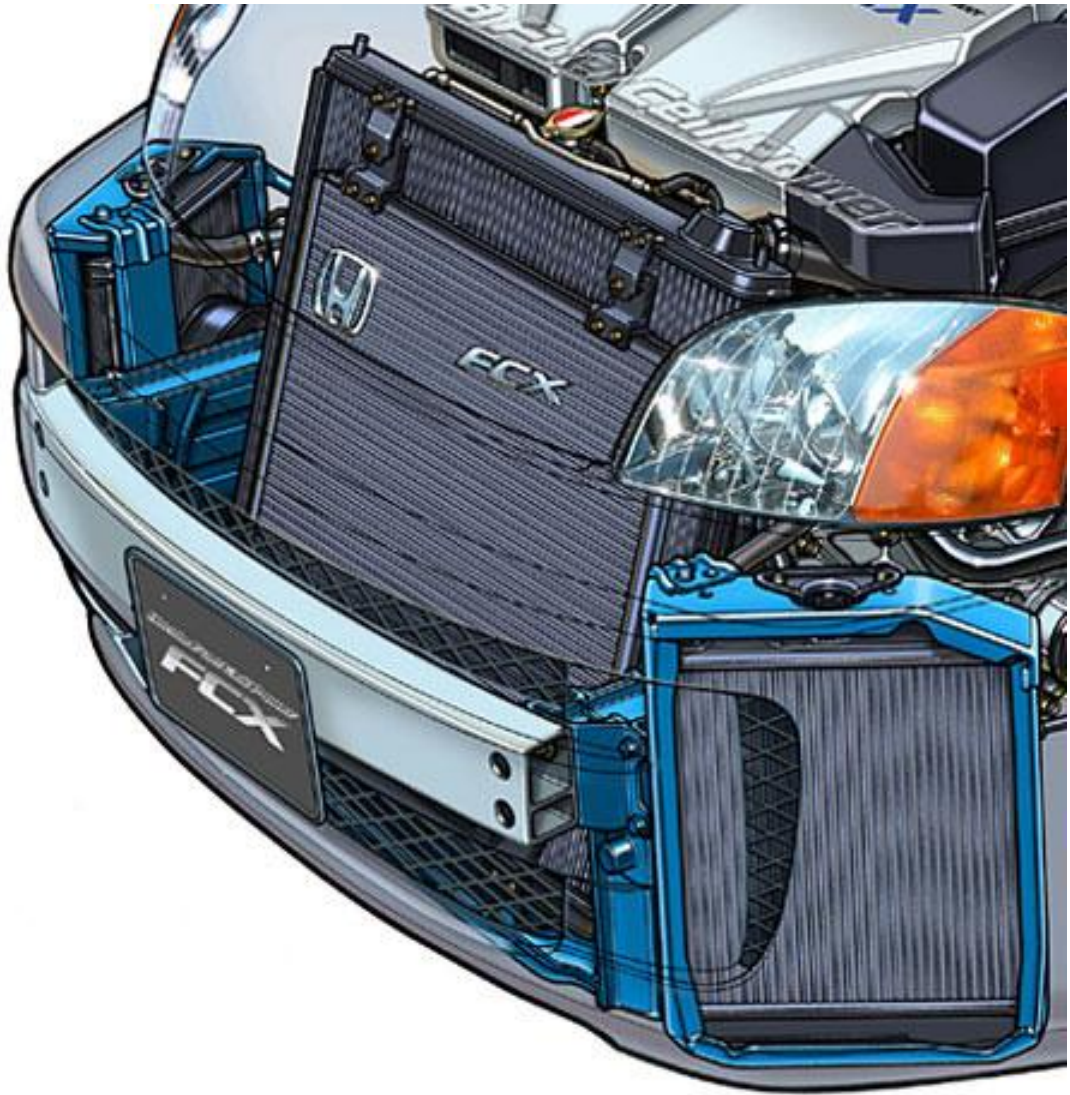


Εικόνα 7-5

Το νερό είναι ένα υποπροϊόν σε κάθε σύστημα κυψέλης καυσίμου  $H_2/O_2$  και η μετακίνηση του είναι απαραίτητη για την πρόληψη των ηλεκτρόδιων από τις πλημμύρες ή της ροής του αερίου από το να μπλοκαριστεί. Υπάρχουν δυο συστήματα απομάκρυνσης του νερού: τα ενεργητικά και τα παθητικά. Τα ενεργητικά συστήματα χρησιμοποιούν τους ατμούς του καυσίμου για να μεταφέρει υδρατμούς μακριά από τα ηλεκτρόδια, ενώ τα παθητικά συστήματα χρησιμοποιούν διάχυση ή φυσική συναγωγή για να απομακρύνουν το νερό. Τα ενεργητικά συστήματα προτιμούνται για μεγάλες κυψέλες καυσίμου επειδή είναι ικανό τα διαχειριστεί πολύ μεγάλες ροές μάζας.

## 7.7.ΨΥΞΗ

Ο έλεγχος της θερμοκρασίας στην οποία λειτουργεί η κυψέλη είναι πολύ σημαντικός καθώς η θερμοκρασία επηρεάζει την ενυδάτωση των υλικών της κυψέλης και την απόδοσή της. Η θερμοκρασία έξω από το επιθυμητό εύρος μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική απώλεια στην απόδοση. Όπως και με το σύστημα απομάκρυνσης του νερού, υπάρχουν δυο είδη συστημάτων ψύξης: το ενεργητικό και το παθητικό. Στο παθητικό σύστημα υπερβολική θερμότητα του συστήματος απομακρύνεται καθοδηγώντας τη μακριά από τα ηλεκτρόδια και ακτινοβολείτε στο περιβάλλον. Το ενεργητικό σύστημα συχνά χρησιμοποιεί αέριο ή υγρό σαν ρευστό ψύξης.



*Εικόνα 7-6 Το αυτοκίνητο έχει μια αντλία ψύξης που βρίσκεται κοντά στις συστοιχίες κυψελών καυσίμου για τη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας εντός των συστοιχιών.*

Πηγή:

<http://www.pbs.org/wgbh/nova/sciencenow/3210/01-car-02.html>

## 7.8. ΑΕΡΟΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ

Για πρακτικά συστήματα, οι κυψέλες καυσίμου πρέπει να χρησιμοποιούν τον αέρα ως οξειδωτικό. Ενώ είναι απλούστερο να χρησιμοποιείς αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση σε μια κυψέλη καυσίμου, η απόδοση της αυξάνεται, αυξάνοντας την πίεση του αέρα. Έτσι αν πίεση λειτουργίας μπορεί να αυξηθεί, το κόστος και το μέγεθος της κυψέλης καυσίμου που απαιτείται για να επιτευχθεί ένα ορισμένο επίπεδο ισχύος μειώνεται. Παρ όλα αυτά η

ενσωμάτωση ενός αεροσυμπιεστή μέσα σε ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος και ο συμπιεστής ο ίδιος προσθέτει επιπλέον βάρος στο σύστημα.



*Εικόνα 7-7 ηλεκτρική τεχνολογία συμπίεση*

η ηλεκτρική τεχνολογία συμπίεσης του αέρα θα μπορούσε να διπλασιάσει την ισχύ των κυψελών καυσίμου υδρογόνου, σύμφωνα με τον ιδρυτή της εταιρίας. «Η ισχύς εξόδου μιας κυψέλης καυσίμου περιορίζεται από το ρυθμό με τον οποίο μπορεί να τροφοδοτηθεί αέρας για να διατηρηθεί η αντίδραση μεταξύ υδρογόνου και οξυγόνου. Το υδρογόνο είναι ήδη σε υψηλή πίεση, έχοντας εξατμίζεται από την υγρή κατάσταση, αλλά ο αέρας συνήθως υπό πίεση χρησιμοποιώντας ένα φουσητήρα. Με ιδιόκτητο κινητήρα και τον έλεγχο της τεχνολογίας υψηλής ταχύτητας μας, μας επιτρέπει να παρέχει αέρα με μια πολύ υψηλότερη πίεση αυξάνοντας το ρυθμό με τον οποίο το οξυγόνο περνάει μέσα από την διαπερατή μεμβράνη. Καμία άλλη διάταξη ελέγχου του κινητήρα είναι σε θέση να παραδώσει σε αυτή την πίεση με μια τέτοια υψηλή απόδοση.»

Πηγή:

<http://www.greencarcongress.com/2015/10/20151027-aeristech.html>



*Εικόνα 7-8 Η θέση του αεροσυμπιεστή σε ένα αυτοκίνητο με κυψέλη καυσίμου*

Πηγή:

<http://www.liebherr.com/en/deu/products/aerospace-and-transportation-systems/aerospace/technologies-for-the-future/technologies-for-the-future.html>

## 7.9.ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

Εκτός απ το όχημα το ίδιο , ο κύριος καταναλωτής ενέργειας είναι το σύστημα συμπίεσης αερίου. Δίνεται από ένα ηλεκτροκίνητο συμπιεστή , εφοδιασμός με 40g αερίου ανά δευτερόλεπτο με πίεση 3 bar, συμπεριλαμβάνοντας αποδοτικότητα συμπίεσης, μια κατανάλωση ισχύς με 6kW από ρεύμα που περιέχεται σε μία κυψέλη καυσίμου των 30 kW. Εναλλάκτης θερμότητας ικανός να αυξήσει τη θερμοκρασία ύγρανσης του νερού έως την βέλτιστη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου.





Εικόνα 7-9 Αεροσυμπιεστής για τις κυψέλες καυσίμου που είναι 20kW

Πηγή:

<http://www.aeristech.co.uk/air-compressor-for-automotive-fuel-cell-systems/>

## 7.10. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΓΙΑ ΝΑ ΣΥΓΚΡΙΝΟΥΝ ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Όταν συγκρίνουμε κυψέλες καυσίμων μεταξύ τους, αλλά και με άλλες γεννήτριες ηλεκτρικού ρεύματος υπάρχουν ορισμένα standard στοιχεία που χρησιμοποιούνται πάντα. Για τη σύγκριση των κυψελών καυσίμου και των ηλεκτρολυτών, βασικό στοιχείο είναι η πυκνότητα ρεύματος και συνήθως δίνεται σε mA cm<sup>-2</sup> αν και μερικοί Αμερικανοί χρησιμοποιούν A ft<sup>-2</sup> (Και οι δύο αριθμοί είναι στην πραγματικότητα αρκετά παρόμοια: 1.0mA cm<sup>-2</sup> = 0.8A ft<sup>-2</sup>). Το ποσό αυτό θα πρέπει να δοθεί σε συγκεκριμένη τάση λειτουργίας, συνήθως περίπου 0,6 ή 0,7 V. Αυτοί οι δύο αριθμοί μπορούν στη συνέχεια να πολλαπλασιαστούν για να δώσει τη δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας, συνήθως δίνεται σε mW cm<sup>-2</sup>.

$$\text{Ισχύς Πυκνότητα} = \frac{\text{δύναμη}}{\text{όγκος}}$$

Η πιο κοινή μονάδα είναι kW m-3. Το μέτρο της δύναμης ανά μονάδα μάζας ονομάζεται η ειδική ισχύς.

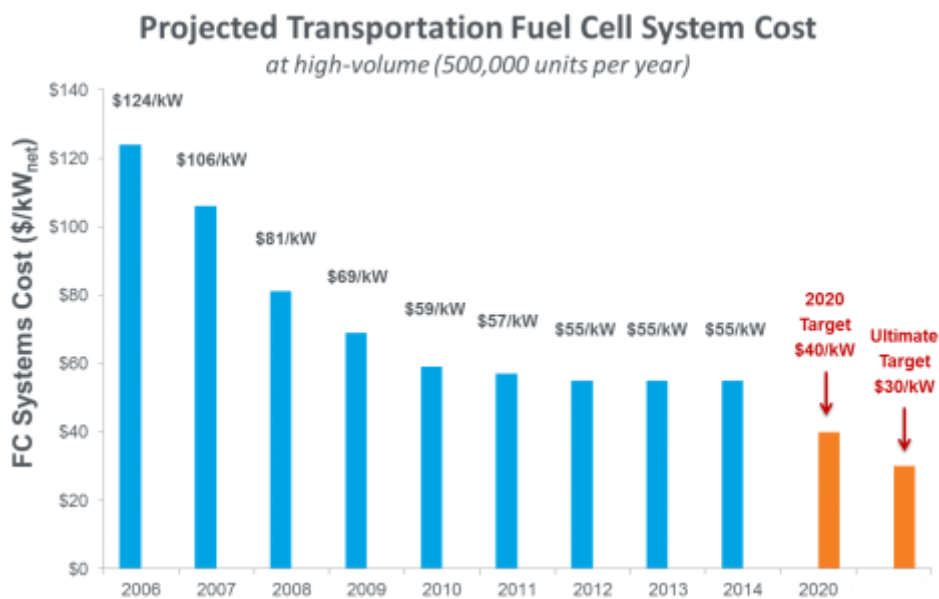
$$\text{ειδική ισχύς} = \frac{\text{δύναμη}}{\text{μάζα}}$$

Η μονάδα SI του W kg-1 χρησιμοποιείται για ειδική ισχύ.

Το κόστος ενός συστήματος κυψελών καυσίμου είναι προφανώς ζωτικής σημασίας, και αυτό συνήθως αναφέρεται σε US δολάρια ανά κιλοβάτ, για ευκολία σύγκρισης. Η διάρκεια ζωής μιας κυψέλης καυσίμου είναι αρκετά δύσκολο να διευκρινιστούν, και ο MTBF δηλαδή (μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών) στην πραγματικότητα δεν ισχύει. Επιπλέον η απόδοση του ηλεκτρολύτη και των ηλεκτροδίων πέφτει σταδιακά με τη χρήση και όσο περνάει η ώρα. Αυτό είναι μερικές φορές δίνεται ως «ποσοστό επιδείνωση ανά ώρα». Η σταδιακή μείωση της τάσης επίσης μερικές φορές δίνεται σε μονάδες millivolts ανά 1000 ώρες. Επισήμως, η ζωή ενός κυττάρου καυσίμου τελειώνει όταν δεν μπορεί πλέον να παραδώσει την ονομαστική ισχύ, δηλαδή, όταν μια κυψέλη καυσίμου 10 kW δεν μπορεί πλέον να παραδώσει 10 kW.

Η απόδοση δεν είναι καθόλου μια απλή υπόθεση το να δοθεί, και κάθε πληροφορία πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσοχή. Στην αυτοκινητοβιομηχανία, τα δύο βασικά στοιχεία είναι το κόστος ανά κιλοβάτ και τη δύναμη

πυκνότητα. Σε στρογγυλούς αριθμούς, η τρέχουσα τεχνολογία κινητήρα εσωτερικής καύσης είναι περίπου 1kWL-1 με 10\$ ανά kW. Ένα τέτοιο σύστημα θα πρέπει να διαρκέσει περίπου 4000 h (δηλαδή περίπου 1 ώρα να χρησιμοποιείτε κάθε μέρα για πάνω από 10 χρόνια). Για τα συστήματα συμπαγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, το κόστος εξακολουθεί να είναι σημαντικό, αλλά ο στόχος είναι τα 1000\$ ανά kW. Το κόστος αυξάνεται με την επιπλέον θερμότητα του εναλλάκτη και του συστήματος σύνδεσης στο δίκτυο τα οποία είναι απαραίτητα και επιπλέον το σύστημα πρέπει να αντέχει για 40.000h κατ' ελάχιστον.



Εικόνα 7-10 Κόστος συστήματος κυψελών καυσίμου ανά kW ανά έτη

Πηγή:

<http://cleantechnica.com/2014/12/01/fuel-cell-economics-vs-batteries/>

## 8. Πλεονεκτήματα και Εφαρμογές

Το σημαντικότερο μειονέκτημα των κυψελών καυσίμου κατά την παρούσα στιγμή είναι το ίδιο για όλους τύπους - το κόστος. Ωστόσο, υπάρχουν ποικίλα πλεονεκτήματα, τα οποία είναι περισσότερο ή λιγότερο έντονα για διαφορετικούς τύπους και αυτά οδηγούν σε διαφορετικές εφαρμογές. Αυτά περιλαμβάνουν τα εξής:

- **Αποδοτικότητα.** Οι κυψέλες καυσίμου είναι γενικά πιο αποδοτική από τους κινητήρες εσωτερικής καύσης, του εμβόλου ή του στροβίλου. Ένα περαιτέρω χαρακτηριστικό της είναι ότι τα μικρά συστήματα μπορούν να είναι εξίσου αποτελεσματικές με τα μεγάλα. Αυτό είναι πολύ σημαντικό στην περίπτωση των μικρών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται η συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και συστημάτων ισχύος.
- **Απλότητα.** Το βασικό στοιχείο μιας κυψέλης καυσίμου είναι ότι είναι πολύ απλή, με λίγα, εάν υπάρχουν κινούμενα μέρη. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε εξαιρετικά αξιόπιστη και μεγάλης διάρκειας συστήματα.
- **Χαμηλές εκπομπές ρύπων.** Το παραπροϊόν της κύριας αντίδρασης της κυψέλης καυσίμου, όταν το υδρογόνο είναι το καύσιμο, είναι καθαρό νερό, το οποίο σημαίνει ότι μια κυψέλη καυσίμου μπορεί να είναι ουσιαστικά «μηδενικών εκπομπών». Αυτό είναι το κύριο πλεονέκτημά τους όταν χρησιμοποιούνται σε



οχήματα, καθώς υπάρχει η απαίτηση για τη μείωση των εκπομπών των οχημάτων, ακόμη και την εξάλειψή τους εντός των πόλεων. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι σήμερα, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> σχεδόν πάντοτε εμπλέκονται στην παραγωγή του υδρογόνου για τη χρήση ως καύσιμο.

- **Ησυχία** . Οι κυψέλες καυσίμου είναι πολύ ήσυχες, ακόμη και εκείνες με εξοπλισμό για εκτεταμένη επεξεργασία καυσίμων. Αυτό είναι πολύ σημαντικό σε αμφότερες τις φορητές εφαρμογές ισχύος και για την τοπική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε συστήματα συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας.

Το γεγονός ότι το υδρογόνο είναι το προτιμώμενο καύσιμο σε κυψέλες καυσίμου είναι, κατά κύριο λόγο, ένα από τους κύρια μειονεκτήματα. Ωστόσο, υπάρχουν και εκείνοι που υποστηρίζουν ότι αυτό είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα. Προβλέπεται ότι τα ορυκτά καύσιμα θα εξαντληθούν, το υδρογόνο θα γίνει η σημαντικό παγκόσμιο καύσιμο και φορέας ενέργειας. Θα παραχθεί, για παράδειγμα, από μαζικές συστοιχίες ηλιακών κυψελών ηλεκτρόλυσης του νερού.

Τα πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου έχουν ιδιαίτερα έντονο αντίκτυπο στη συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και στα συστήματα ισχύος μεγάλης αλλά και μικρής κλίμακας, στα κινητά συστήματα ισχύος ειδικά για οχήματα και ηλεκτρονικό εξοπλισμό, όπως φορητούς υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα, και εξοπλισμό για στρατιωτικές επικοινωνίες. Αυτές οι εφαρμογές είναι τα σημαντικότερα πεδία στην οποία οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούνται. Ένα βασικό πλεονέκτημα είναι το ευρύ φάσμα των εφαρμογών των κυψελών καυσίμου ισχύος, από τα συστήματα των λίγων watts έως αυτά των μεγαβάτ. Από την άποψη αυτή, οι κυψέλες καυσίμου είναι αρκετά μοναδική ως μετατροπείς ενέργειας. Το φάσμα της εφαρμογής της ξεπερνά κατά πολύ όλους τους άλλους τύπους μηχανών.

## 9. ΚΑΥΣΙΜΑ ΓΙΑ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ – ΟΧΗΜΑΤΑ

Ο διαταγμός στην επιλογή ενός συγκεκριμένου καυσίμου έχει οδηγήσει την βιομηχανία στο να επιλέξει τις κυψέλες καυσίμου PEM λόγω των εφαρμογών στην αυτοκινητοβιομηχανία, της υπεροχής της στην παραγωγή υψηλής ισχύος, της χαμηλής θερμοκρασίας, του γρήγορου ξεκινήματος της μηχανής, και το δυνητικό χαμηλό κόστος παραγωγής. Για τους παραπάνω λόγους η συγκεκριμένη κυψέλη καυσίμου προτιμάται έναντι των άλλων.

Παρ όλα αυτά η αδιαλλαξία την PEM ιδιαιτέρως στο μονοξείδιο θέτει κάποιους περιορισμούς στην χρησιμοποίηση ορισμένων καυσίμων, έτσι υπάρχει η επιλογή μεταξύ δυο συστημάτων, τα οποία έχουν διαφορετικές αποδόσεις και τεχνικά χαρακτηριστικά:

ένα επί της συσκευής μεταρρυθμιστής παροχή ενός μίγματος διαμόρφωσης με αμελητέο μονοξείδιο του άνθρακα, χρησιμοποιώντας ένα ευρέως διαθέσιμο υγρό καύσιμο όπως τη μεθανόλη.

Ένα μεταρρυθμιστή ο οποίος θα βρίσκεται στο κέντρο του σημείου που αναπληρώνουμε το καύσιμο, το οποίο θα είναι το φυσικό αέριο, και αξιοποιώντας το για την ανάγκες κίνησης των οχημάτων

## 9.1.ΦΤΙΑΧΝΟΝΤΑΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΓΙΑ ΤΙΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Το υδρογόνο δημιουργείται από αρκετές διαφορετικές τεχνικές αλλά και από διαφορετικές πηγές καυσίμων

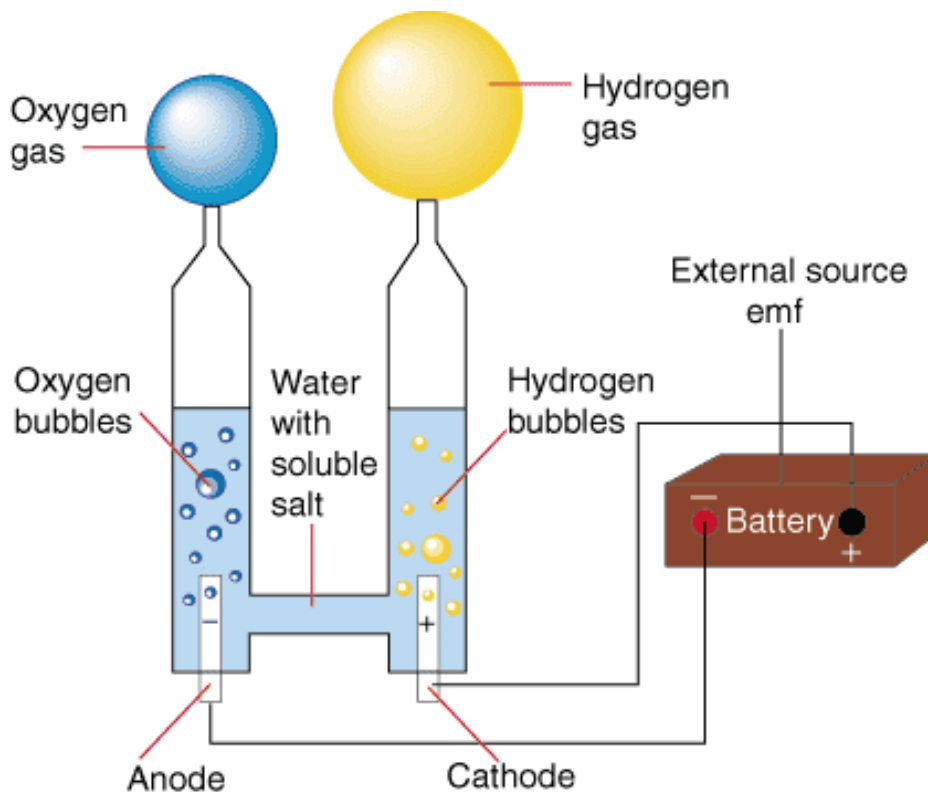
- επί της συσκευής μεταρρύθμιση. Ένα καύσιμο πλούσιο σε υδρογόνο παράγεται από υγρά καύσιμα επί του οχήματος με μερική οξείδωση, αναμόρφωση ατμού και αυτό-θερμική τεχνική.
- Κεντρικός έμπορος υδρογόνου. Χρησιμοποιείται μεγάλη ποσότητα αναμόρφωσης ατμού από φυσικό αέριο που παράγει υδρογόνο το οποίο μεταφέρεται στους τοπικούς σταθμούς διανομής.
- Τοπικός μεταρρυθμιστής/σταθμοί καυσίμων. Ένας σταθμός καυσίμων με μια αποθήκη υδρογόνου, (συμπίεσης και διανομής) με εξοπλισμού με τον οποίο το υδρογόνο παράγεται με μία μεταρρύθμιση του φυσικού αερίου.
- Τοπική ηλεκτρόλυση/ σταθμοί καυσίμων. Της σταθμός καυσίμων με μια αποθήκη υδρογόνου, (συμπίεσης και διανομής) με εξοπλισμού με τον οποίο το υδρογόνο παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης

Από αυτές της μεθόδους μπορούμε να απορρίψουμε την 2<sup>η</sup> και 4<sup>η</sup> μέθοδο ως μη πρακτική με λιγότερο διαδεδομένη για την παραγωγή υδρογόνου.

Παρ'όλα αυτά, η ηλεκτρόλυση μπορεί να είναι ανταγωνιστική στις παρακάτω περιπτώσεις :

- ✓ χονδρικής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας είναι αρκετά χαμηλή, όπως εάν παραγόταν από πυρηνική ενέργεια ή από ανανεώσιμες πηγές.
- ✓ Όταν υπάρχει διαφορές μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής της ενέργειας και η ελάχιστη τιμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά την διάρκεια της μέρας για την παραγωγή του υδρογόνου.

Αυτά τα στοιχεία μπορεί να φαίνονται αρκετά ελκυστικά , αλλά δεν υπάρχουν ακόμα επαρκή δεδομένα για να δικαιολογούν την παραγωγή οχημάτων βασισμένα στην ηλεκτρόλυση.



Εικόνα 9-1 Εικόνα παρουσίαση της ηλεκτρόλυσης, διαχωρισμός του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο

Πηγή:

<http://www.instructables.com/id/Separate-Hydrogen-and-Oxygen-from-Water-Through-EI/>

## 9.2. Τι είναι ένας μεταρρυθμιστής καυσίμων;

Ένας μεταρρυθμιστής καυσίμου είναι μια συσκευή που μετατρέπει ένα καύσιμο, π.χ. φυσικό αέριο, μεθανόλη ή ντίζελ, σε μια άλλη μορφή καύσιμο (συνήθως υδρογόνο πλούσιο αέριο).

Ο μεταρρυθμιστής καύσιμο χρησιμοποιείται για να παραχθεί ένα αέριο πλούσιο σε υδρογόνο, το οποίο τροφοδοτείται σε μια συστοιχία κυψελών καυσίμου για τη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας.

### 9.2.1. Ο αναμορφωτής επί της συσκευής

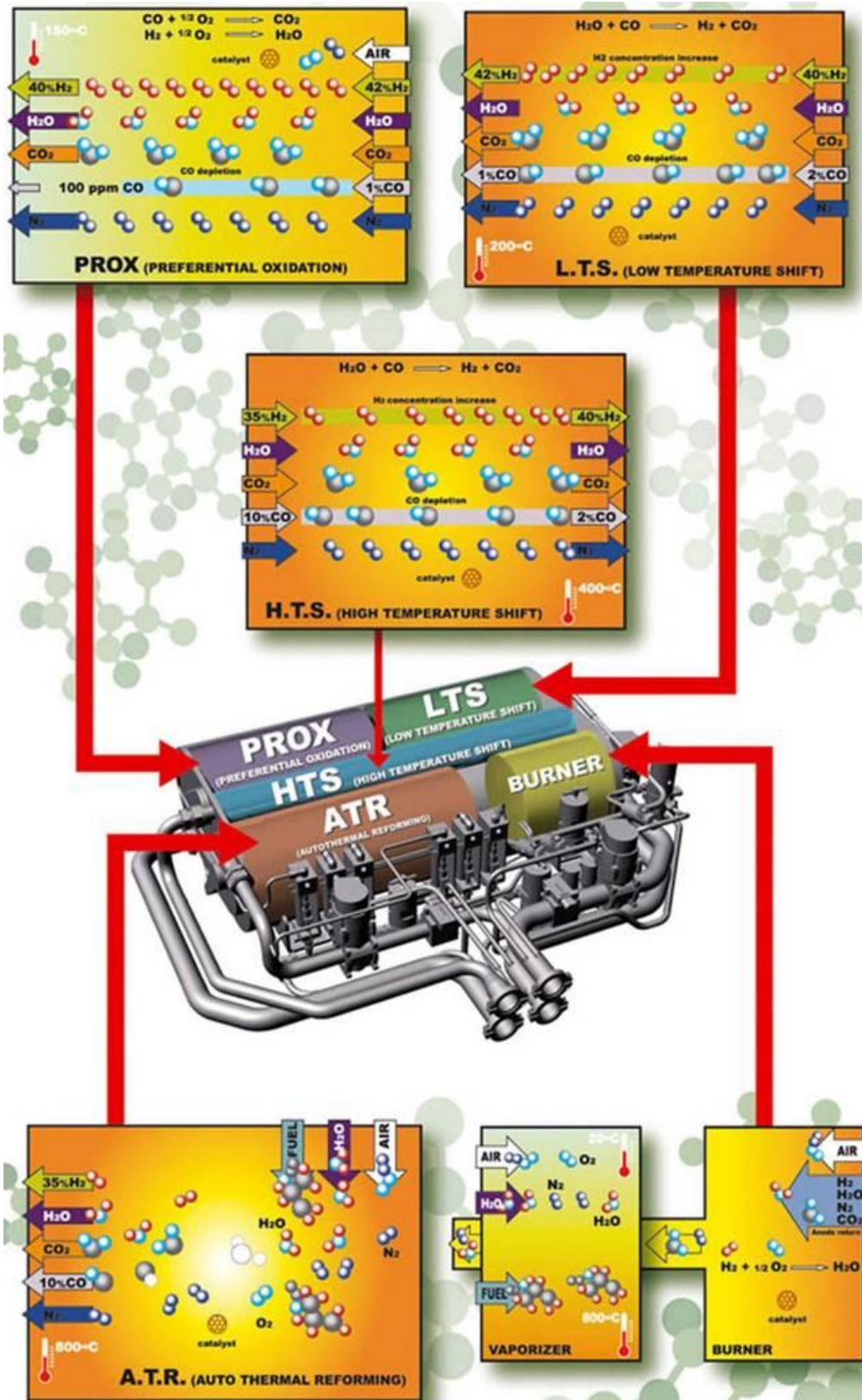
Υπάρχουν αρκετές ανταγωνιστικές συσκευές με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους η κάθε μια. Για το λόγο αυτό παρουσιάζονται οι παρακάτω αναφορές:

- Διαφορές στην απόδοση και το κόστος υπάρχουν μεταξύ των κάθε διαφορετικών τεχνολογιών, αλλά οι διαφορές αυτές δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλες
- Όλες οι μεταρρυθμίσεις συμπεριλαμβανομένου των περίπλοκων υποσυστημάτων για την αντίδραση, η ανάκτηση νερού, η διαχείριση της θερμότητας προσθέτουν κόστος, βάρος και κάνουν πιο σύνθετο το όχημα.
- Χρησιμοποιώντας αραιωμένο υδρογόνο σαν καύσιμο απαιτείται ο επανασχεδιασμός των πεδίων ροής ( οι στοιβάδες δεν μπορεί να έχουν αδιέξοδο) τα οποία απαραίτητως υποδηλώνει μειωμένη χρησιμοποίηση υδρογόνου δε σύγκριση με τις “direct hydrogen” κυψέλες καυσίμου, αλλά μειώνεται η αποδοτικότητα και αυξάνεται το μέγεθος και το κόστος της κυψέλης καυσίμου.
- Χρησιμοποιώντας καύσιμα που περιέχουν άνθρακα είναι απαραίτητη τη τοποθέτηση ελεγκτή μονοξειδίου στον επεξεργαστή καυσίμου για την προστασία την κυψέλης καυσίμου.

### 9.2.2. Ο αναμορφωτής εκτός συσκευής

Το πιο συναρπαστικό πλεονέκτημα που υπάρχει όταν ο μεταρρυθμιστής βρίσκεται εκτός οχήματος είναι το γεγονός ότι η πολυπλοκότητα δεν υπάρχει πλέον στο όχημα και μαζί με αυτή όλοι οι αυστηροί περιορισμοί όσον αναφορά τον θόρυβο, το βάρος και το κόστος σε οποιοδήποτε διεργασία κάνουμε εντός της κυψέλης. Επίσης οι η παραγωγή καθαρού υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα, απαιτεί σταθερές χημικές εγκαταστάσεις που είναι εγκατεστημένες εκτός οχημάτων, κάτι που στις τεχνολογίες μεταρρυθμιστών στα οχήματα είναι ακόμα σε εξέλιξη. Έτσι όταν μεταφέρουμε τους μεταρρυθμιστές εκτός οχημάτων μειώνουμε το τεχνολογικό ρίσκο και τις πιθανές βλάβες στις κυψέλες.

Παρ όλα αυτά η υπάρχουν τρεις τρόποι αποθήκευσης του υδρογόνου στα οχήματα κα αυτοί θα αναφερθούν παρακάτω.



Εικόνα 9-2 Οι χημικές διεργασίες του ενσωματωμένου μετατροπέα (μεταρρυθμιστή)

Πηγή:

[http://www.greencarcongress.com/2006/06/renault\\_to\\_show.html](http://www.greencarcongress.com/2006/06/renault_to_show.html)



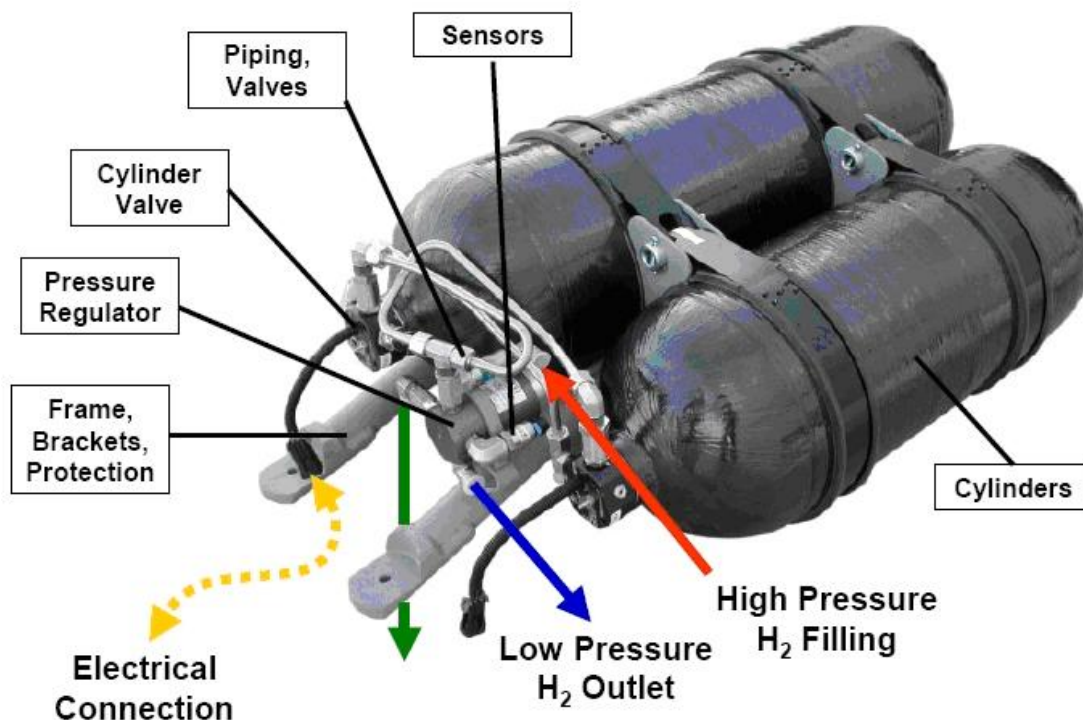
## 10. ΑΝΑΦΟΡΑ ΤΡΟΠΟΥ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΕΠΙ ΤΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

### 10.1. ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΥΓΡΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Η κρυογονική δεξαμενή είχε πραγματοποιηθεί από την Air Liquide (France). Αυτή η δεξαμενή είχε βάρος 100kg και περιείχε 120 λίτρα υδρογόνου στα 20K , που σημαίνει 8,05 kg καυσίμου. Απαρτιζόταν από δυο λεπτά ανοξείδωτα που καλύπτουν της κατασκευής, η θερμική μόνωση έχει βελτιωθεί τόσο που μειώνει την παραγωγή θερμότητας στα 0,7 Watts. Η κυλινδρική του μορφή δεν του επιτρέπει να λυγίσει απ τα 8 bar απόλυτης πίεσης, σε αυτό το επίπεδο η βαλβίδα ασφαλείας απελευθερώνει μια μικρή ποσότητα υδρογόνου, προκαλώντας ανακούφιση της εσωτερικής πίεσης.

Η αριθμητική προσομοίωση προβλέπει ότι μια γεμάτη δεξαμενή μπορεί να παραμείνει αχρησιμοποίητη για 13 μέρες πριν την πρώτη απελευθέρωση αερίου. Αυτή η απελευθέρωση αερίου θα εξουδετερωθεί από ένα καταλύτη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (20°C) και μετατρέπει το αέριο σε ατμό. Αυτός ο καταλύτης δημιουργήθηκε από το Royal Institute of Technology, της Σουηδίας.

Μια εσωτερική θερμική αντίσταση επιτρέπει την παρακολούθηση της διανομής αερίου σύμφωνα με τη ζήτηση της κυψέλης καυσίμου. Το αέριο αναθερμαίνεται στους 30°C από έναν εναλλάκτη υδρογόνου-νερού πριν να ρυθμιστεί σε πίεση 2,5 bar .



Εικόνα 10-1 Δεξαμενές υδρογόνου και παρουσίαση των εξαρτημάτων της

Πηγή:

<http://www.hysafe.net/wiki/BRHS/OFD-Chapter2>

## 10.2. Συμπιεσμένο υδρογόνο

Είναι μια προέκταση του συμπιεσμένου φυσικού αερίου και μέσω των νέων τεχνολογιών μπορεί να μεταφέρεται και να αποθηκεύεται σε οχήματα. Αποθηκεύοντας συμπιεσμένο υδρογόνο στα 5000 psi επιτρέπεται η απελευθέρωση ενέργεια με πυκνότητα περίπου 4 MJ/liter και παρόλο που η πυκνότητα αυτή είναι αρκετά μικρότερη από αυτή της βενζίνης ( περίπου 30 MJ/liter) μπορεί να αποδεχτεί μια φορά πιο οικονομικό στα αυτοκίνητα με κυψέλες καυσίμων.

Οι προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι οι εξής:

- Το υδρογόνο είναι ένα διάχυτο καύσιμο το οποίο έχει την τριπλάσια αποδοτικότητα από αυτή που κάποιος θα περίμενε από ένα αυτοκίνητο με κυψέλες καυσίμου. Το υδρογόνο αποθηκεύεται με πίεση στα 5000 psi η' και μεγαλύτερη και απαιτείται η μείωση του όγκου που καταλαμβάνει το καύσιμο.
- Στο υδρογόνο είναι πολύ πιθανό να υπάρχουν μεγάλες διαρροές ακόμα και από κάποιο άνοιγμα διαμέτρου ενός μορίου. Για το λόγο αυτό είναι καλό να επανασχεδιαστούν οι βαλβίδες και οι τσιμούχες για να αποθηκεύεται ασφαλέστερα το συμπιεσμένο υδρογόνο.
- Η απαίτηση ισχύς για τον συμπιεστή είναι μεγάλη, το τίμημα της λειτουργίας του σε ενέργεια είναι μεγάλο.

Φάση των παραπάνω μπορούν να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις:

Η ηλεκτρικά κατανάλωση του συμπιεστή έχει ως αποτέλεσμα το να μπορεί να είναι αξιοπρόσεκτα μειωμένη η συνολική απόδοση. Παρόλο που αυτό έχει να κάνει μόνο με την κατανάλωση του ρεύματος, το πρόβλημα μπορεί να μεγεθύνεται ένα το καύσιμο που χρησιμοποιείται για την παράγωγή του ρεύματος είναι κάποιο ορυκτό καύσιμο. Καθώς η πίεση στο αποθηκευμένο καύσιμο στο όχημα μειώνεται, αυτό έχει ως συνέπεια την εκθετική πτώση της απόδοσης. Ένα άλλο θέμα το οποίο πρέπει να ληφθεί υπ όψη είναι αυτό της ασφάλειας. Συγκεκριμένα είναι αναγκαίο να μελετηθεί περαιτέρω η αποθήκευση συμπιεσμένου υδρογόνου στα οχήματα, πριν την εμπορική τους χρήση.

## 10.3. Ρευστοποιημένο υδρογόνο

Το σύστημα αποθήκευσης ρευστοποιημένου υδρογόνου πιέζει το συμπιεσμένο υδρογόνο ως τα θερμοδυναμικά του όρια έως να αγγίξει την ογκομετρική του ενεργειακή πυκνότητα η οποία είναι περίπου 8,5 MJ/liter. Αυτό το σύστημα έχει παρουσιαστεί σε αρκετά οχήματα, ένα εκ των οποίων είναι και το daimlerchryslerneocar 4.





*Εικόνα 10-2 το daimlerchryslerneocar 4με κυψέλη καυσίμου*

Αυτονομία, κατανάλωση: 450 χμ, η οικονομία στα καύσιμα έχει βελτιωθεί κατά 50% από την προηγούμενη έκδοση, καταναλώνει το ισοδύναμο υδρογόνου περίπου 3,2 λίτρα ντίζελ ανά 100 χμ.

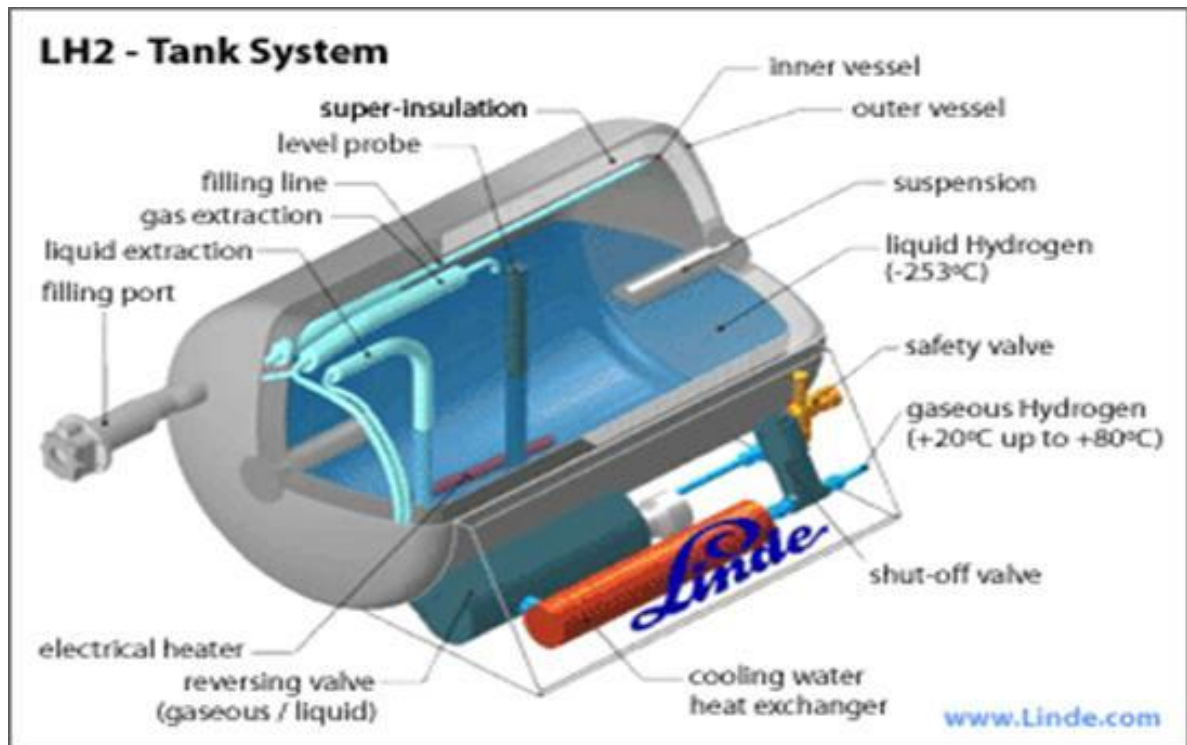
Η τελική ταχύτητα, επιτάχυνση: 145 χλμ/ώρα, επιτάχυνση 0 - 100 χλμ/ώρα στην 26.3s

Πηγή:

<http://www.netinform.net/h2/h2mobility/Detail.aspx?ID=185>

Παρ όλα αυτά τα οχήματα ρευστοποιημένου υδρογόνου έχουν τα ίδια προβλήματα ασφαλείας με τα οχήματα συμπιεσμένου υδρογόνου. Το ρίσκο για ολόκληρο το σύστημα μπορεί να επιδεινωθεί από το φαινόμενο “boil-off” απ το οποίο μια πεπερασμένη ποσότητα υδρογόνου εξατμίζεται και φεύγει απ τη δεξαμενή . αυτό μπορεί να προκαλέσει αρκετά επικίνδυνες καταστάσεις , όπως στην περίπτωση που το όχημα βρίσκεται μέσα σε ένα γκαράζ. Τότε το συσσωρευμένο υδρογόνο που διέφυγε μπορεί να δημιουργήσει έκρηξη αφού έχει αναμιχθεί με τον αέρα.

Επιπλέον η ενέργεια που απαιτείται για την υγροποίηση του υδρογόνου είναι πολύ σημαντική. Η ενέργεια αυτή που είναι περίπου 9kWh/Kg υδρογόνου ή το 23% της ενέργεια που περιέχεται στην καύση του υγροποιημένου υδρογόνου.



Εικόνα 10-3 Παρουσίαση του εσωτερικού / εξωτερικού μια δεξαμενής υδρογόνου και των εξαρτημάτων της

Πηγή: <http://www.hydrogencarsnow.com/index.php/hydrogen-fuel-tanks/>

#### 10.4. ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΥΔΡΙΔΙΑ

Τα μεταλλικά υβρίδια προσφέρουν ουσιώδη ασφάλεια και αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα προηγούμενα είδη. Αποθηκεύοντας το υδρογόνο σε μια σύνθεση υδρογόνου και μετάλλου υπάρχει η δυνατότητα να απελευθερωθεί μεγάλη ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα 9-12 MJ/liter, που υπερβαίνει αυτή των προηγούμενων, αλλά όπως και οι προηγούμενες έχει ορισμένα εμπόδια τα οποία πρέπει να υπερπηδήσει.

- Το βάρος της πυκνότητας κυμαίνεται στα 1-3 MJ/Kg το οποίο αυξάνει το βάρος του οχήματος .
- Κάποια από τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται είναι αρκετά ακριβά, μεταξύ άλλων τα (La, Ti, MN, Ni, Zr,) αυξάνοντας συνολικά το κόστος κατασκευής των μεταλλικών υβριδίων σε απαγορευτικά επίπεδα.
- Ενώ κάποια μέταλλα χαμηλού κόστους προσφέρουν υψηλή σταθμική πυκνότητα ( 9MJ/Kg) και χαμηλό κόστος , αυτά τείνουν να χρησιμοποιούν ενώσεις μαγνησίου , έχουν σχηματισμούς υψηλής θερμότητας , και απαιτούν θερμοκρασίες >200°C για να απελευθερώσουν το υδρογόνο. Αυτοί οι θερμοδυναμικοί περιορισμοί κάνουν μη πρακτικές τις κυψέλες καυσίμου PEM.
- Απαιτείτε μια σύνθετη κατασκευή για τη ροή ρευστού στα καύσιμα υδρογόνου και υγρά υλικά μεταφοράς θερμότητας, υποσυστήματα μεταφοράς θερμότητας, και ανοχή στην θερμική διαστολή



Εικόνα 10-4 Δεξαμενή αποθήκευσης για μεταλλικά υβρίδια

Πηγή:

[http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fuel-cells/metal\\_hydrides.php](http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fuel-cells/metal_hydrides.php)

Αυτοί οι περιορισμοί προκαλούν κάποιες δυσκολίες στον να χρησιμοποιηθούν τα υβρίδια μετάλλου στα οχήματα, παρ' όλα αυτά μπορεί να είναι πολύ χρήσιμα σε άλλες εφαρμογές που απαιτούν αποθήκευση υδρογόνου.

## 10.5. Άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης υδρογόνου

Υπάρχουν και άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης υδρογόνου που αναπτύσσονται αλλά δεν έχουν ακόμα εμπορικές χρήσεις. Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα υλικά για αποθήκευση υδρογόνου που είναι σε ανάπτυξη είναι αυτά με βάση τον άνθρακα σε νανοσωλίνες ή νανοϊνες. Σε εργαστηριακό επίπεδο έχουν παρατηρηθεί υλικά με ενεργειακή πυκνότητα μεγαλύτερη ακόμα και απ' αυτή του στερεού υδρογόνου. Επιπλέον, ο άνθρακας είναι σχετικά φθηνός, κάτι που επιτρέπει το συνδυασμό του με τα υβρίδια μετάλλου. Αν και υπάρχουν, επί του παρόντος, κάποια ερωτήματα για τον τρόπο απελευθέρωσης την ενεργειακής πυκνότητάς τους ή την ιδανική

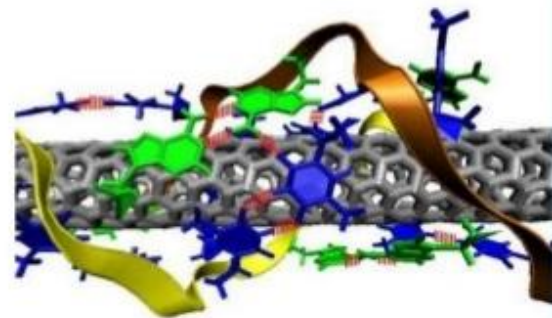
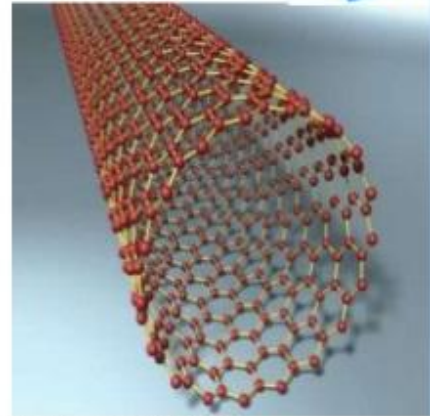
κατασκευή του άνθρακα για να ταιριάζει με το υβρίδια. Παρ'όλα αυτά οι μέχρι τώρα δοκιμές είναι θετικές και απαιτείται στενότερη επαφή με το θέμα.

## WHY CARBON NANOTUBES FOR H<sub>2</sub> STORAGE



Available techniques for hydrogen storage-

- As cryogenic liquid
- As pressurized gas
- As physical combination with metal hydrides/complex hydrides on board production
- By reform of methanol
- Carbon nanotubes



*Εικόνα 10-5 Διαφορετικές τεχνικές αποθήκευσης υδρογόνου*

Πηγή:

[http://www.slideshare.net/nithya\\_nair/an-introduction-to-synthesis-applications-of-carbon-2](http://www.slideshare.net/nithya_nair/an-introduction-to-synthesis-applications-of-carbon-2)

## 11. ΚΟΣΤΟΣ



*Εικόνα 11-1*

Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι το να παράγεις υδρογόνο είναι πιο ακριβό απ τη βενζίνη, όπως και το κόστος μετασκευής της μεθανόλης αλλά και της διανομής της θα την καταστήσει ακριβότερη της βενζίνης. Βάση των παραπάνω είναι εμφανές ότι οι τιμές των εναλλακτικών καυσίμων πρέπει να μειωθούν αισθητά για να γίνουν πιο ανταγωνιστικά. Επιπλέον πρέπει να σημειωθεί ότι η μονάδα μέτρησης δεν πρέπει να είναι αυτή των €/λίτρο αλλά αυτή των €/km η οποία είναι η πραγματική της αξία, και αυτή που ενδιαφέρει του καταναλωτές.

Το θετικό είναι ότι τα οχήματα που λειτουργούν με κυψέλες καυσίμου είναι εξαιρετικά αποδοτικά. Παρ όλα αυτά υπάρχουν και κάποιες δυσκολίες όπως η κατασκευή πρατηρίων καυσίμου τα οποία είναι αρκετά ακριβά και χρήζουν μεγάλων επενδύσεων που αγγίζουν τα 1 εκατομμύριο δολάρια ανά πρατήριο, και πρέπει να διερευνηθεί εάν το εγχείρημα είναι οικονομικά βιώσιμο.

Σε όλο αυτό το εγχείρημα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα παρακάτω ρίσκα και να αξιολογηθούν οι προοπτικές που υπάρχουν για τους παρόχους καυσίμων και τους κατασκευαστές αυτών των οχημάτων.



1. Οι τεχνικοί κίνδυνοι. Η πιθανότητα ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία μα μην μπορέσει να καλύψει τις απαιτήσεις για υψηλές επιδόσεις των καταναλωτών.
2. Οι οικονομικοί κίνδυνοι. Η πιθανότητα ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία μα μην μπορέσει να καλύψει τις οικονομικές απαιτήσεις των καταναλωτών.
3. Οι εμπορικοί κίνδυνοι. Η πιθανότητα να μην βρεθούν διαθέσιμες αγορές που να χρησιμοποιήσουν την εν λόγω τεχνολογία



Εικόνα 11-2 Το Toyota Mirai ανεφοδιάζεται σε πρατήριο υδρογόνου

Πηγή:

<http://gas2.org/2014/11/18/toyota-mirai-priced-57900-set-december-2015-delivery/>

Ένα πρατήριο υγρών καυσίμων κοστίζει περίπου 1εκατομμύριο δολάρια το οποίο είναι ο κύριος λόγος που υπάρχουν λίγα και μακριά το ένα απ το άλλο.

Να σημειωθεί ότι οι 2 πρώτες κατηγορίες βρίσκονται υπό τον έλεγχο μιας βιομηχανίας. Εάν αυτή πετύχει να παράξει οχήματα με υψηλή απόδοση και χαμηλό κόστος τότε δεν θα υπάρχουν οι τεχνικοί και οικονομικοί κίνδυνοι, όπως επίσης αν οι βιομηχανίες καυσίμων παράξουν καύσιμα αντιστοίχως υψηλής απόδοσης και χαμηλού κόστους, τα προβλήματα και οι κίνδυνοι θα εκλείψουν. Αντιθέτως ακόμα και εάν γίνουν τα παραπάνω, δεν υπάρχει η εγγύηση της εμπορικής επιτυχίας, γιατί αυτή δεν βρίσκεται στα χέρια μιας βιομηχανίας, αλλά αποτελεί συνδυασμό, πολλών άλλων παραγόντων όπως η ευρεία διαθεσιμότητα του υδρογόνου ως καύσιμο.

Παρά την σημαντική πρόοδο σε άλλους τομείς της αυτοκίνησης, είναι το συμπιεσμένο υδρογόνο που θα προσφέρει οχήματα χαμηλού κόστους και μετακίνησης στο εγγύς μέλλον.

Πίνακας 11-11-1: Κόστος μετακίνησης [\$/km]

Αναμορφωτής επί του οχήματος	/250 km
Δεξαμενή καυσίμων	33\$
μεταρρυθμιστής	900\$-1500\$
Κυψέλη καυσίμου	1750\$-5000\$
<b>Σύνολο</b>	<b>2700\$-6500\$</b>
Συμπιεσμένο υδρογόνο	/250km
Δεξαμενή	900\$
Κυψέλη καυσίμου	1750\$-5000\$
<b>Σύνολο</b>	<b>2650\$-5900\$</b>
Μεταλλικά υβρίδια	/250 km
Υβριδικό σύστημα	2300\$-3600\$
Κυψέλη καυσίμου	1750\$-5000\$
<b>Σύνολο</b>	<b>4000\$-8600\$</b>

### 11.1. Είναι το υδρογόνο πραγματικά ανταγωνιστικό ?

Όταν το υδρογόνο χρησιμοποιείται απευθείας ως καύσιμο, δεν υπάρχει αμφιβολία ότι η αποτελεσματικότητα αυξάνεται και οι εξαγωγές καυσαερίων είναι μηδενικές. Παρόλα αυτά υπάρχουν κάποια καυσαέρια όταν το υδρογόνο προέρχεται από το φυσικό αέριο και υπάρχουν εύλογα ερωτήματα για τα οφέλη του συγκεκριμένου καυσίμου. Αυτό συμπεραίνεται απ την έρευνα το Arthur D. Little που απέδειξε ότι υπάρχουν εκπομπές CO2 όταν το υδρογόνο προέρχεται από το φυσικό αέριο. Επιπλέον τα οξείδια του αζώτου είναι παρόμοια σε όλους τους τύπους καυσίμων, όσο αφορά τις κυψέλες καυσίμου, αλλά είναι 75% μειωμένα από τα κοινά καύσιμα , όπως είναι η βενζίνη!



## 11.2. Το υδρογόνο σαν εναλλακτικό καύσιμο κίνησης

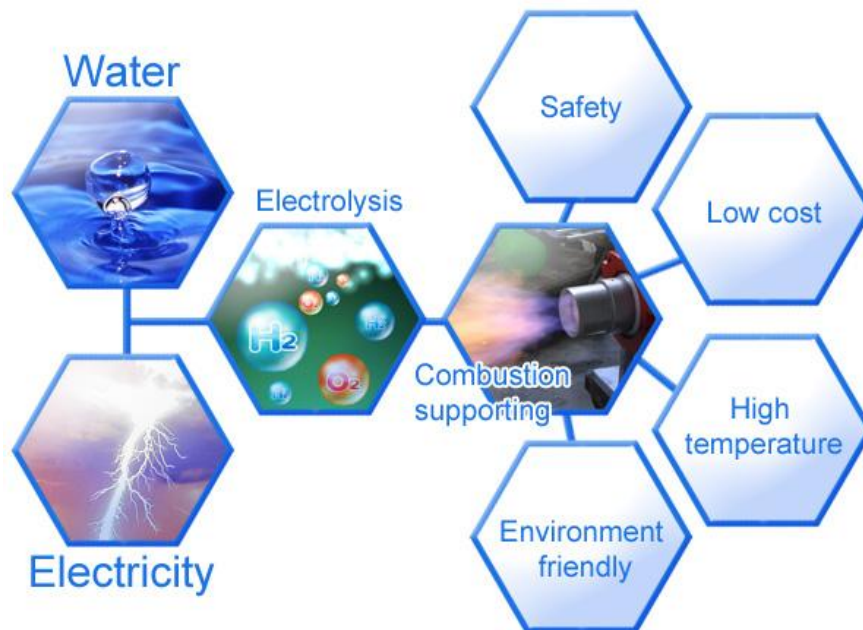
Μια κυψέλη καυσίμου συνδυάζει υδρογόνο και οξυγόνο για να παράγει ηλεκτρισμό. Μια μικρή κυψέλη είναι αρκετή για δώσει ενέργεια σε ένα αυτοκίνητο. Εκτός από τις μηδενικές εκπομπές ρύπων έχουν και πολύ υψηλή απόδοση, της τάξης το 70%-90% και είναι πολύ μεγαλύτερη αυτής του κύκλου Carnot που θεωρητικά κυμαίνεται στο 40%-50%. Το υδρογόνο δεν καίγεται στον αέρα έτσι δεν παράγει, NOx, CO ή υδρογονάνθρακες. Αρχικά, σύμφωνα με μελέτες, 5 λίτρα βενζίνης περιέχουν την ενέργεια 1,3 kg υδρογόνου.

## 11.3. ΚΑΠΟΙΑ ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

- 1) **Αποτελεσματικότητα:** σε μια κυψέλη καυσίμου η χημική ενέργεια μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρισμό χωρίς να παρεμβαίνει η θερμότητα σε αυτή τη μετατροπή. Η διαδικασία γίνεται δίχως του περιορισμούς του κύκλου Carnot. Καθώς δεν υπάρχουν κινητά μέρη στην μηχανή, οι απώλειες λόγω μηχανικής συναγωγής είναι απών και τα επίπεδα του θορύβου είναι εξαιρετικά χαμηλά. Η ισχύς ανά βάρος και όγκο είναι υψηλή.
- 2) **Δυναμικό συμπαραγωγής :** τα τελικά προϊόντα της κυψέλης καυσίμου περιέχουν 40% θερμική ενέργεια σε μορφή ατμού και καυτού νερού. Αυτά μπορεί να είναι χρήσιμα για μια βιομηχανία που απαιτεί καυτό νερό και ατμό για τη λειτουργία της, εφόσον η κυψέλη καυσίμου δεν βρίσκεται σε αυτοκίνητο, αλλά σε βιομηχανία.
- 3) **Ευελιξία στο σχεδιασμό:** για να αποκτήσουμε την επιθυμητή τάση, ένας αριθμός από κυψέλες είναι συνδεδεμένος σε σειρά. Αυτές οι μεμονωμένες κυψέλες δεν πρέπει να είναι εδραιωμένες σε μια συγκεκριμένη περιοχή, αλλά πρέπει να μπορούν αν μετακινούνται. Το γεγονός αυτό δίνει σημαντική ευελιξία στην κατανομή του βάρους και στη χρησιμοποίηση του χώρου. Οι κυψέλες μπορούν να προστεθούν όταν αυτό απαιτείται, και δεν είναι απαραίτητο να κατασκευάζονται μεγάλες και πολλές κυψέλες, και μεγάλη χωρητικότητα για πιθανές μελλοντικές ανάγκες.
- 4) **Εύκολη συντήρηση:** απ τη στιγμή που δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη, τα προβλήματα στεγανοποίησης είναι ελάχιστα, και δεν υπάρχουν καθόλου προβλήματα τριβής. Η παλαιώση, οι ρωγμές, και η φθορές των κυψελών είναι μικρές. Επιπλέον η διάβρωση δεν είναι πρόβλημα, εάν η κυψέλη δεν λειτουργεί σε

πολλή υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι το καύσιμο μπορεί να παρέχει μακρά και χωρίς προβλήματα λειτουργία.

- 5) **Χαμηλή μόλυνση** : τα επίπεδα θορύβου είναι στα 30 db. Αν συγκριθεί με τα 300 db μιας συμβατικής γεννήτριας. Δεν υπάρχουν καθόλου επιβλαβής αναθυμιάσεις ή παράγωγα καύσης . αυτές οι ιδιότητες είναι άκρος σημαντικές για στρατιωτικούς σκοπούς και συσκευές επικοινωνίας.
- 6) **Χαμηλά έξοδα όταν δεν λειτουργεί**: η ικανότητα υπερφόρτισης για σύντομη περίοδο είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή μιας συμβατικής γεννήτριας. Οι κυψέλες καυσίμων καταναλώνουν καύσιμα και οξειδώνονται μόνο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Δεν υπάρχει κατανάλωση καυσίμου την περίοδο που δεν απαιτείται ενέργεια



Εικόνα 11-3 Γραφική παρουσίαση νερού/ηλεκτρόλυσης

Πηγή:

[https://www.alibaba.com/product-detail/hho-kit-hydrogen-generator-fuel-saver\\_1866585311.html](https://www.alibaba.com/product-detail/hho-kit-hydrogen-generator-fuel-saver_1866585311.html)

#### 11.4. ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

- I. **Κοινωνικό –οικονομικοί παράγοντες:** καθώς η τεχνολογία και τη χρησιμοποίηση του υδρογονάνθρακα ως καύσιμο είναι καλά ανεπτυγμένη και έχει αντέξει στο πέρασμα του χρόνου και μέχρι τώρα είναι διαθέσιμες και φθηνές οι πηγές καυσίμου , οι οικονομικές ανησυχίες δεν είναι ακόμα επαρκείς για τη γενικευμένη χρήση του υδρογόνου.
- II. **Τεχνικοί παράγοντες :** οι φυσιο-χημικές ιδιότητες των καταλυτών δεν είναι ακόμα πλήρως κατανοητοί . η πραγματική κατασκευή και η συνεχής λειτουργία είναι ακόμα στα αρχικά στάδια ανάπτυξής. Οι καταλύτες που χρησιμοποιούνται είναι ακριβοί και μη ανεκτικοί σε ορισμένες προσμίξεις .
- III. **Διαθεσιμότητα και υδρογόνο:** μόνο κυψέλες καυσίμου που υδρογόνου είναι διαθέσιμες . δεν υπάρχουν φυσικές πηγές υδρογόνου , έτσι όλες οι μέχρι τώρα ανεπτυγμένες κυψέλες καυσίμου χρειάζονται και εξαρτώνται από έναν επεξεργαστή καυσίμου.

Συμπερασματικά, οι κυψέλες καυσίμου υπόσχονται ένα υπέροχη επιλογή ως μια δυνητική πηγή ενέργειας, αλλά υπάρχει ακόμα αρκετός δρόμος μέχρι να φτάσουμε στο σημείο να τις χρησιμοποιούμε ευρύτερα και να αποκτήσουν καθοριστικό ρόλο στην καθημερινή μας ζωή.



Εικόνα 11-4

## 11.5. ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ

Η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου η οποία χρησιμοποιεί το υδρογόνο ως βασικό καύσιμο , σημειώνει ταχύτατη πρόοδο και οι κυψέλες πρόκειται να είναι ευρύτερα διαθέσιμες στην αγορά στο προσεχές μέλλον, ένα λάβουμε υπ' όψιν και τη συνεχή μείωση ορυκτών καυσίμων. Τα προβλήματα , βέβαια, δεν σταματάνε εδώ καθώς η αποθήκευση είναι από αυτά που πρέπει να λυθούν. Εάν έχουν κυψέλες που να χρησιμοποιούν οργανικά καύσιμα όπως , μεθανόλη , αιθανόλης απευθείας και έχει βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα

των ηλεκτρονίων να μεταφέρονται κάτω από φυσιολογικό ΡΗ θερμοκρασία περιβάλλοντος. αυτό μπορεί να γίνει αναπτύσσοντας κατάλληλη επιφάνεια στον καταλύτη, ο οποίος να είναι ικανός να καταλύει την οξείδωση των καυσίμων που είναι πλούσια σε υδρογόνο. Η περιοχή της ανομοιογενής κατάλυσης μπορεί να συμβάλει προς την ανάπτυξη μελλοντικής τεχνολογίας στις κυψέλες καυσίμου.



Εικόνα 11-5

Η βιοτεχνολογία προσφέρει μια εναλλακτική συμβατική μη οργανική κυψέλη καυσίμων. Είναι γνωστό ότι τα ζωντανά κύτταρα εκτελούν τις λειτουργίες τους μέσω της συμπληρωματικής τους ενέργειας από την αντίδραση της οξείδωσης. Οι οξειδώσεις βιολογικής αντίδρασης καταλύεται από τα ένζυμα, τα συνένζυμα, τη χημική ενέργεια, τα πρωτόνια και τις ροές ηλεκτρονίων σε αυτή την αντίδραση παράγεται ATP (Τριφωσφορική αδενοσίνη). Είναι δυνατό να μιμηθούν τις αντιδράσεις στο μέλλον, χρησιμοποιώντας τες με τρόπο ώστε να παράγουν ηλεκτρισμό.

## 12. ΜΕΤΕΤΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Χρησιμοποιώντας το υδρογόνο ως καύσιμο σε ένα όχημα, ένα καινούριο στοιχείο, το οποίο εμπεριέχει κίνδυνο για την ασφάλεια εισαγωγής του υδρογόνου στο αυτοκίνητο. Το υδρογόνο, αραιωμένο στον αέρα, γίνεται εκρηκτικό σε ποσότητες από 4 έως 76%. Στον

βιομηχανικό τομέα, αυτό το αέριο το διαχειρίζονται σύμφωνα με την διαδικασία ασφαλείας που απαιτείται. Παρ' όλα αυτά όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε αυτοκίνητα με επιβάτες ειδικές παράγοντες και παράμετροι πρέπει να ληφθούν υπόψη. Τα νέα μέτρα ασφαλείας πρέπει να είναι υπερβολικά ακριβή. Για την αντιμετώπιση προβλημάτων και για τα νέα μέτρα ασφαλείας, μια νέα μελέτη παρουσιάστηκε από το Royal Institute of Technology, της Σουηδίας.

Σε αυτή τη μελέτη, τα αποτυχημένα μοντέλα από τα κύρια εξαρτήματα που έθεσαν σε κίνδυνο την ασφάλεια την ασφάλεια όλου του συστήματος, εντοπίστηκαν. Αυτά τα αποτυχημένα μοντέλα έφτιαξαν το έδαφος για την κατανόηση της υπαιτιότητας στην κατασκευή εσφαλμένων εξαρτημάτων. Μια διάταξη με ένα καταλύτη, που εξουδετερώνει το βρασμό από τη δεξαμενή του υγρού υδρογόνου αναπτύχθηκε απ' αυτές τις μελέτες. Επιπλέον, όταν το όχημα μείνει ακίνητο για περίοδο μεγαλύτερη από 13 μέρες η πίεση μέσα στην κρυογονική δεξαμενή αυξάνεται στην ονομαστική τιμή της πίεσης ασφαλείας, τότε μία βαλβίδα ασφαλείας ανοίγει και απελευθερώνει το αέριο προς τον καταλύτη εξουδετέρωσης, που είναι οξειδωμένος μέσα στο νερό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η κυψέλη καυσίμου πρέπει περιοδικά να καθαρίζεται για να λειτουργεί κανονικά, έτσι απελευθερώνεται λίγο υδρογόνο. Σε αυτό το σημείο, η πραγματική εκροή του αερίου προς τα έξω είναι στιγμιαία μεγαλύτερη από της δεξαμενής βρασμού. Έτσι για να αποφύγουμε την υπερθέρμανση του καταλύτη εξουδετέρωσης, σχεδιάστηκε ένα μπαλόνι ρυθμιστής, ο οποίος αποσβένει αυτήν την εκροή σε αποδεκτά επίπεδα.



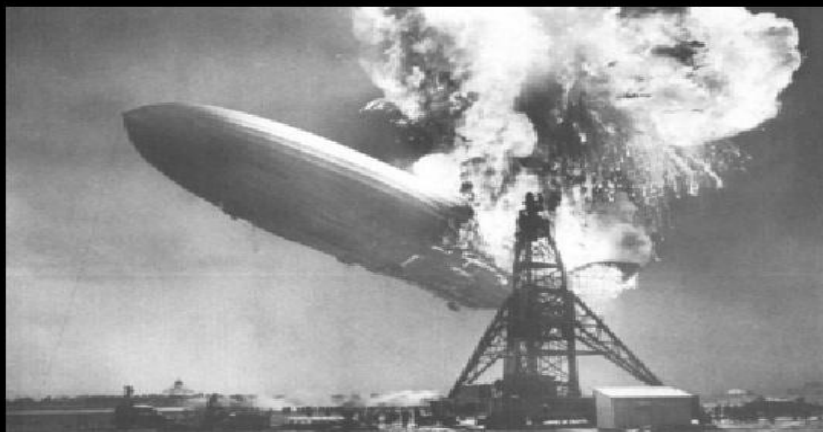
*Εικόνα 12-1*

## 12.1. Ο ΦΟΒΟΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ , ΤΑ ΑΤΥΧΙΜΑΤΑ ΚΑΙ Η ΑΣΦΑΛΕΙΑ

Μέχρι και μισό αιώνα πριν το καύσιμο του υδρογόνου ήταν αποδεκτό χωρίς κανένα μεγάλο φόβο. Το αέριο της πόλης είναι σε περίπου ίσες μερίδες και (όγκου) υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα, παραγόταν από την δράση του ατμού του ημίκαυστου άνθρακα. Το αέριο διανέμονταν μέσω αγωγού στα σπίτια σε γραφεία σε εμπορικές εγκαταστάσεις για φωτισμό , ζεστό νερό και για μαγειρική. Εξαιτίας της τοξικότητας του μονοξειδίου του άνθρακα το αέριο παρουσιάστηκε πιο επιβλαβές απ' ίδιο το υδρογόνο, καθώς υπήρχαν ακούσιοι και εκούσιοι θάνατοι. Σε κάθε περίπτωση δεν υπήρξε ευρεία εξάπλωση του φόβου και έγινε αποδεκτό σε παγκόσμιο επίπεδο.

Παρ' όλα αυτά ένα τραγικό ατύχημα σημειώθηκε με το αερόπλοιο Hindenburg. Όμως, πιο πρόσφατη έρευνα έδειξε ότι το υδρογόνο δεν ήταν η κύρια αιτία για το δυστύχημα , πάραυτα το φόβος παρέμεινε. Η δημοσιότητα που πήρε το θέμα σε συνδυασμό με τις αναφορές στην βόμβα υδρογόνου , έχουν οδηγήσει σε μια γενική δημόσια συζήτηση για τη χρησιμοποίηση υδρογόνου ως καύσιμο. Οι συζητήσεις αυτές γίνονται ακόμα και τώρα όταν παρουσιάζονται εξελίξεις στο χώρο των οχημάτων με καύσιμο το υδρογόνο.

**The famous picture of the airship Hindenburg as it exploded and crashed spectacularly while docking at Lakehurst, NJ on May 6, 1937 and 35 people died**



*Εικόνα 12-2 Δυστύχημα με το αερόπλοιο Hindenburg που ήταν γεμάτο με υδρογόνο.*

Πηγή:

<https://www.pinterest.com/pin/141159769542297104/>

Ένα παρόμοιο ατύχημα με υγρό φυσικό αέριο (LNG) στο Cleveland, Ohio το 1944 κατηγορείται για 20 με 40 χρόνια αναβάλλοντας την εξέλιξη του για την αποθήκευση και τη μεταφορά του. Αν η ανάπτυξη της χρήσης υδρογόνου ως καύσιμο είχε συμβεί εγκαίρως , θα είχε ελάχιστα περιθώρια για περεταίρω αναβολή από την αντίδραση του λαού για κάποιο μελλοντικό ατύχημα. Η ασφάλεια ή τουλάχιστον η αντίληψη για την ασφάλεια πρέπει να



θεωρηθεί ως εμπόδιο για την δημιουργία ενός πετυχημένου προγράμματος καυσίμων υδρογόνου. Βέβαια η ασφάλεια πρέπει να είναι πρωταρχικό μέλημα σε όλες τις περιπτώσεις για την ανάπτυξη ενός project υδρογόνου. Η συνεχής αναφορές ότι το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με απόλυτη ασφάλεια είναι απαραίτητες έτσι ώστε ο κόσμος να αποδεχτεί το καύσιμο υδρογόνου σαν κάτι ευεργετικό παρά το επικίνδυνο.

## 12.2. ΟΙ ΣΥΝΘΙΚΕΣ ΓΙΑ ΑΣΦΑΛΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΕ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Για να επιτευχθεί ο μεγαλύτερος δυνατός βαθμός ασφαλείας στη λειτουργία του υδρογόνου υπάρχουν τέσσερις βασικές προϋποθέσεις που πρέπει να ληφθούν υπ όψιν.

1. Θεμελιώδες κατανόηση των απαιτήσεων που υπάρχουν για ασφάλεια
2. Κανονισμοί
3. Σχεδιασμός συστημάτων και κατασκευές
4. Εκμάθηση και εκπαίδευση.



Εικόνα 12-3

1. Για κάθε καινούρια συσκευή που θα βγει στο εμπόριο, πρέπει να συνοπολογίζονται όλοι οι πιθανοί κίνδυνοι που μπορεί να υπάρξουν κατά την παραγωγή , τη μεταφορά , την αποθήκευση , και τη χρήση του καυσίμου. Σε μερικές περιπτώσεις η πειραματική έρευνα είναι αναγκαία όταν υπάρχουν αλλαγές ή νέες συσκευές. Οι μη ολοκληρωμένες γνώσεις για τη λειτουργία ενός συστήματος είναι η συνταγή της καταστροφής.
2. Για την ασφαλή λειτουργία εμπλέκονται διαφορετικοί οργανισμοί και έθνη και θα ήταν απαραίτητο να έχουν διεθνείς κανονισμούς ούτως ώστε να δύνονται κατευθυντήριες οδοί για τον κατάλληλο σχεδιασμό και λειτουργία. Τα συστήματα πρέπει να είναι φτιαγμένα έτσι ώστε και να είναι ασφαλή στην

λειτουργία αλλά και να ταιριάζουν με άλλα συστήματα που θα πρέπει να αλληλεπιδράσουν.

3. Όπως προαναφέρθηκε η ασφάλεια είναι βασικό στοιχείο και πρέπει να λαμβάνεται υπ όψιν από τα αρχικά στάδια σχεδιασμού και καθ όλη τη διάρκεια του σχεδιασμού έως την κατασκευή και την δοκιμή του τελικού προϊόντος. Η κριτική του σχεδιασμού πρέπει να γίνεται από ανθρώπους με γνώση των πιθανών κινδύνων που μπορεί να συνοδεύει η ευρεία χρήση υδρογόνου και δεν εμπλέκεται απευθείας με την προώθηση επιμέρους έργων.
4. Υπάρχουν αρκετές ασφαλής κατευθυντήριες γραμμές , κώδικες, standards, και κανονισμοί για να υπάρχει ασφαλής διαχείριση του υδρογόνου.

### 13. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΕΣ

Αν κανείς αναλογιστεί την αποτελεσματικότητα από την ροή καυσίμου (στα βαρέα οχήματα είναι 120 MJ/kg) η παγκόσμια κατάσταση είναι αποτέλεσμα της αποτελεσματικότητας που έχει το κάθε υποσύστημα , όσο αναφορά τις εκπομπές.

Για μια κατανάλωση της τάξης των 0,40 g/sec υδρογόνου , η θεωρητική διαθέσιμη ισχύς πρέπει να είναι 52,6 kW. Αν το καύσιμο δουλεύεις σε φυσιολογικές συνθήκες η αποτελεσματικότητα της μονάδας ισχύος είναι  $(30-5)/52,6=47,5\%$ . Αν ο μετατροπέας είναι 0,92 και η αλυσίδα κίνησης 0,9 η αποτελεσματικότητα θα είναι συνολικά 39% αφού. Οι εκπομπές καυσαερίων είναι μηδενικές , καθώς το όχημα παράγει μόνο νερό (περίπου 144 g/km) , από την ηλεκτροχημική αντίδραση σε χαμηλές θερμοκρασίες.

**Operating characteristics of conventional fuel cells vs. DCFCs.**

	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC	DCFC
Electrolyte	Polymer	Phosphoric acid	Molten carbonate salt	Ceramic	Fused $\text{KNO}_3$
Operating Temperature	80 °C (175 °F)	190 °C (375 °F)	650 °C (1200 °F)	1000 °C (1830 °F)	700 °C (1110 °F)
Fuel(s)	$\text{H}_2$ reformat	$\text{H}_2$ reformat	$\text{H}_2/\text{CO}/$ reformat	$\text{H}_2/\text{CO}_2/\text{CH}_4$ reformat	Solid carbon
Reforming	External	External	External / internal	External / internal	Not necessary
Oxidant	$\text{O}_2/\text{air}$	$\text{O}_2/\text{air}$	$\text{CO}_2/\text{O}_2/\text{air}$	$\text{O}_2/\text{air}$	Humidified air
Efficiency (HHV)	30-35%	40-50%	50-60%	45-55%	80%

## 14. ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ

Οι δυσκολίες είναι υπαρκτές και πρέπει να ξεπεραστούν για την ευρεία ανάπτυξη και εξάπλωση των κυψελών καυσίμου. Αυτές οι δυσκολίες είναι πρωτίστως υποδομής, δευτερευόντως οικονομικής και τρίτον τεχνικής φύσεως.

Οι δυσκολίες στις υποδομές είναι 2 ειδών. Σήμερα, ούτε ένα δίκτυο διανομής υγρού υδρογόνου υπάρχει αλλά ούτε και ένα καθορισμένο πλαίσιο με αναγνωρισμένες συνθήκες για τα οχήματα που χρησιμοποιούν υδρογόνο. Σε αυτό το σημείο μια διεθνής συνεργασία είναι απαραίτητη για να ξεπεραστούν τα εμπόρια. Η επιλογή για την δημιουργία πλάνου παραγωγής και διανομής είναι και πολιτική καθώς τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων εξαντλούνται μια ευνομούμενη πολιτεία πρέπει να μεριμνήσει για την επίλυση αυτού του προβλήματος.

Τα οικονομικά και τεχνικά προβλήματα είναι στενά συνδεδεμένα και πρέπει να προσανατολιστεί η έρευνα και σε αυτό τον τομέα. Η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου έχει αφήσει μερικώς τις συσκευές διαστήματος και πλησιάζει το πεδίο της βιομηχανίας, αλλά υπάρχει ακόμα αρκετή πρόοδος που πρέπει να γίνει.

- Το βάρος και ο όγκος των κυψελών καυσίμου έχουν μειωθεί σημαντικά. Η DE NORA έφτιαξε κυψέλες καυσίμου των 108 kg και 75 dm<sup>3</sup> για 10 kW. Τώρα η υπάρχει ο στόχος για τη δημιουργία κυψέλης με 20 kg 13 cm<sup>3</sup> και την ίδια ισχύ.
- Το να τροφοδοτείς την κυψέλη καυσίμων με πεπιεσμένο αέρα στα 3 bar εμπεριέχει τρία μειονεκτήματα. Αρχικά έχει αισθητή κατανάλωση ρεύματος, επιπλέον είναι απαραίτητο να ψυχρανθεί ο υπέρθερμος αέρας απ την

συμπύεση, και η μόλυνση του αέρα από το λιπαντικό λάδι το οποίο οδηγεί σε αποικοδόμηση της απόδοσης του ηλεκτροδίου. Αυτή η αποικοδόμηση γίνεται αμέσως μόλις η περιεκτικότητα είναι  $0,9 \cdot 10^{-6}$  του λαδιού απ την ανάλυση της ECOLE des MINES. Αυτά τα μειονεκτήματα προσανατολίζουν την έρευνα στο σχεδιασμό κυψελών καυσίμου που να προσφέρουν την ίδια απόδοση με όσο το δυνατόν λιγότερη πίεση αέρα.

- Η τιμή της πολυμερούς μεμβράνης (NAFION) είναι  $700\$/m^2$  δηλαδή,  $270\$/kW$ . Η έρευνα πρέπει να στραφεί στις προσπάθειες για την απόκτηση φθηνότερων μεμβρανών, βιομηχανικά παραγόμενων, και η πραγματοποίηση συγκεκριμένης λειτουργίας ισχύος με αέρα.
- Η τιμή των καλών καταλυτών είναι μια σημαντική συνιστώσα του κόστους όλης της κυψέλης. Σε ποσότητα  $1mg/cm^2$  το κόστος είναι  $71\$/kw$ . Στις συμβατικές μηχανές με τους καταλύτες, τα μέταλλα των καταλυτών είναι  $3,5g$  πλατίνα για  $50 kw$  που σημαίνει  $1,4\$/kw$ . Ένα σημαντικό βήμα θα ήταν η απόκτηση αποτελεσματικών ηλεκτροδίων σε ένα ποσοστό εμποτισμού  $0,1mg/cm^2$  (ανόδου και καθόδου)



Εικόνα 14-1

#### 14.1. ΑΡΧΙΚΗ ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΟΚΙΕΣ

Βάση όλων των παραπάνω ένα όχημα με κυψέλες καυσίμου δημιουργήθηκε από τη RENAULT και του Ευρωπαίους συνεργάτες από το πρόγραμμα FEVER είναι μια παρουσίαση τεχνολογικής επιτυχίας. Τροφοδοτούμενο από μια τριπλή συστοιχία κυψελών καυσίμου με ηλεκτρική ισχύς των  $30 kw$ , με μια κρυογονική δεξαμενή περιεκτικότητας  $8 kg$  υγρού υδρογόνου. Οι προσομοιώσεις έδειξαν όταν η πρόβλεψη είναι για αυτονομία  $500km$  με μέση ταχύτητα τα  $100km/h$ . Η παρουσίαση του οχήματος είχε γίνει το 1997.

Αυτό το βήμα της τεχνολογικής επίδειξης χρησιμοποιήθηκε σαν βάση για ένα πρόγραμμα τεχνικής και οικονομικής βελτιστοποίησης το οποίο έχει ως στόχο την βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας και τη μείωση του βάρους του όγκου και

Είναι σαφές ότι η χρήση του υδρογόνου αποτελεί την κατεξοχήν λύση για την αντιμετώπιση του της μόλυνσης που προέρχεται από τα καυσαέρια : CO, CO<sub>2</sub> και HC. Επίσης περιορίζεται και ο σχηματισμός οξειδίων του αζώτου NO<sub>x</sub>. Αυτή η πολύ φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογία θα έχει σημαντικές προοπτικές ανάπτυξης μόνο αν τα τεχνολογικά και οικονομικά μειονεκτήματα με τα οποία είναι συνδεδεμένα με αυτή λυθούν κατά κύριο λόγο αν παρθούν οι πολιτικές αποφάσεις , προωθήσουν τη σχετική βιομηχανία και αλλά και τις υποδομές που είναι απαραίτητες. Για να επιτευχθούν όλα αυτά είναι αναγκαίοι οι πολιτικές δυνάμεις να απαγκιστρωθούν από τα ιδιωτικά συμφέροντα της εγχώρια αλλά και διεθνής αγορά ορυκτών καυσίμων, και να προσανατολιστούν σε μια βιώσιμο τεχνολογία η οποία ούτος ή άλλος θα είναι πραγματικότητα σε μερικές δεκαετίες.

it's all **politics**

Εικόνα 14-2

## 15. ΕΠΙΛΟΓΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Όλα τα συστήματα αποθήκευσης υδρογόνου απαιτούν τρία βασικά στοιχεία:

- 1) Ένα πρωταρχικό σύστημα μετατροπής σε υδρογόνου ( παραγωγή υδρογόνου)
- 2) Σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου ( αποθήκευση)
- 3) Ένα σύστημα μετατροπής υδρογόνου σε ηλεκτρισμό ( παραγωγή υδρογόνου)

Για την παραγωγή υδρογόνου:

Ο ηλεκτρολύτης υδροξειδίου του καλίου (KOH) είναι εμπορικά διαθέσιμος σε χαμηλή πίεση, μονοπολική , διπολική και μέσης πίεσης. Αυτοί είναι ελκυστικοί τρόποι παραγωγής υδρογόνου για μεμονωμένα συστήματα ισχύος. Το διπολικό σύστημα μπορεί να παρέχει υδρογόνο σε αυξημένη πίεση, μειώνοντας τις απαιτήσεις του συμπιεστή.

Η ηλεκτρόλυση στερεού πολυμερές είναι αναδυόμενη πρακτική, η μέθοδος στερεάς κατάστασης παραγωγής υδρογόνου είναι άμεσα εξελισσόμενη σε κόστος με τις κυψέλες καυσίμου PEM. Καθώς το κόστος μειώνεται θα γίνεται όλο και πιο ελπιστική μέθοδος παραγωγής ενέργειας.

Για την αποθήκευση υδρογόνου, το μέγεθος για το απαιτούμενο δοχείο είναι ακριβώς ανάλογο με το μέγιστη περίοδο ηρεμίας της ανανεώσιμης πηγής και το μέσω φορτίο. Αυτό κάνει πιο ελκυστικό την αποθήκευση υδρογόνου από τις μπαταρίες, οι ανανεώσιμες συσκευές με μακρά περίοδο ηρεμίας, επειδή η μετατροπή ισχύος και αποθήκευση ενέργειας είναι χωριστά, απαιτώντας μόνο το μέγεθος της συσκευής αποθήκευσης υδρογόνου για να τροφοδοτούν την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.

Η μέση πίεση, 100-500 psi, τα δοχεία αερίου είναι μια καλή επιλογή για τις πιο μικρές συστήματα ενέργειας όπου το κόστος και ο όγκος του συστήματος είναι λογικά.

Τρεις κυψέλες καυσίμου υδρογόνου είναι επίσης μια επιλογή για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η κυψέλη καυσίμου με φωσφορικό οξύ (PAFC) είναι διαθέσιμη στα 200kw με αναμορφωτή φυσικού αερίου. λειτουργεί με θερμοκρασία σε περίσσεια των 150°C επιτρέπει την παραγωγή θερμότητας, αλλά επίσης απαιτεί πολύ χρόνο για να ξεκινήσει, που σημαίνει ότι πρέπει να μείνει στο ρεζερβουάρ ακόμα και όταν αποθηκευμένος ηλεκτρισμός δεν είναι διαθέσιμος

Η κυψέλη καυσίμου μεμβράνης εναλλαγής πρωτονίου (PEMFC) στα 205kw έχουν να ενσωματωθούν σε λεωφορεία για χρήση με υδρογόνο. Μια τέτοια κυψέλη μπορεί να λειτουργεί με σύντομα (ια λίγα δευτερόλεπτα) ξεκινήματα και σταματήματα. Το μόνο ζήτημα σε αυτή την περίπτωση είναι το κόστος.

Οι στερεές πολυμερείς κυψέλες καυσίμου (RFC) είναι συσκευές που ηλεκτρολύουν το νερό όταν ρεύμα εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια, και παράγουν ηλεκτρισμό όταν το υδρογόνο και ο αέρας εφαρμοστούν στα ηλεκτρόδια. Για το ρεύμα, το κόστος είναι υψηλό και το μέγεθος του μικρό, αλλά αν η RFC μπορεί να κατασκευαστεί με συνδυασμένο χαμηλότερο κόστος απ την ηλεκτρόλυση και τις συμβατικές κυψέλες καυσίμου, και τότε αυτή θα είναι η προνομιούχος τεχνολογία.

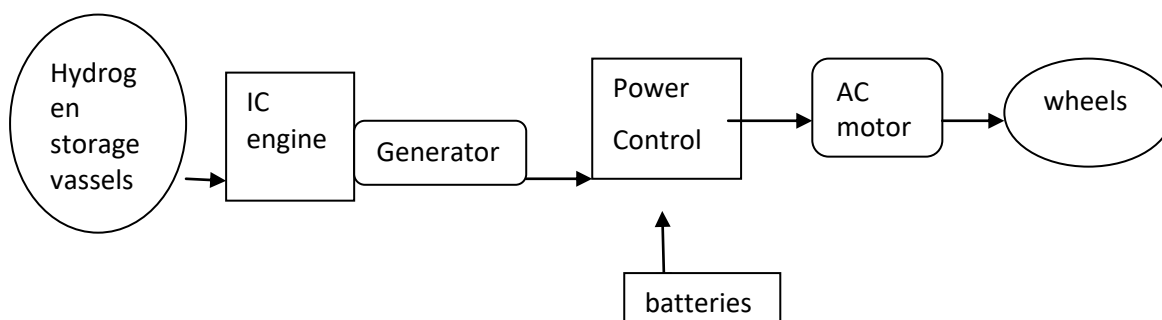
## 16. ΤΑ ΛΕΩΦΟΡΕΙΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

### H2FUEL BUSES

Το αρχικό ηλεκτρικό λεωφορείο παίρνει ισχύ από τέσσερα “πακέτα” 28-μπαταριών και είχαν αυτονομία για 130 km. 2 από τα 4 “πακέτα” μπαταριών ( περίπου 1000kg το “πακέτο” ) αντικαταστάθηκαν με υδρογονούχες δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου. Μία μηχανή εσωτερικής καύσης και μία ηλεκτρική γεννήτρια προστέθηκαν. Το υδρογονούχο σύστημα δεξαμενών αποθηκεύει και τροφοδοτεί τις μηχανές καύσης. Η μηχανή-γεννήτρια



παράγει ηλεκτρισμό για να δίνει ισχύ στο μοτέρ κίνησης και να φορτίζει τις μπαταρίες . οι μπαταρίες δουλεύουν ως δεξαμενή αποθήκευσης ενέργειας της γεννήτριας όταν αυτή περισσεύει , για να τη δαπανάει όταν η ισχύς που απαιτείται είναι υψηλή και να περιορίζεται όταν οι απατήσεις μειώνονται. Αυτό επιτρέπει τη χρήση μιας μικρής γεννήτριας των 70 kw και μια μεγάλη ηλεκτρική μηχανή κίνησης των 170 kw. Αυτό το υβριδικό σύστημα επιτρέπει να λειτουργεί πιο αποτελεσματικά και αναμένεται να επεκταθεί η αυτονομία των αρχικών ηλεκτρικών λεωφορείων από τα 130 km στα 200 km . παρακάτω υπάρχει ένα σχήμα ενός υβριδικού συστήματος :



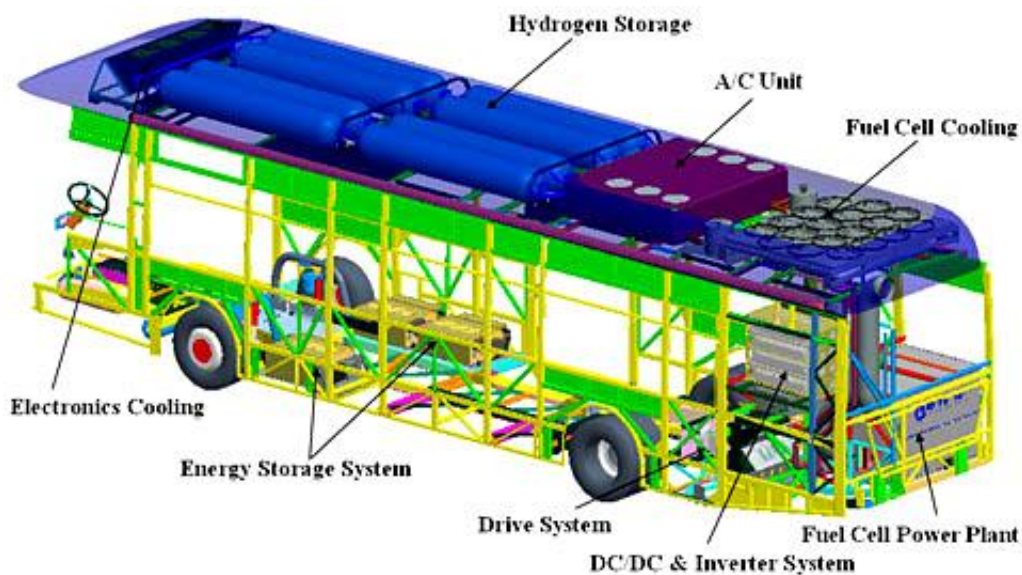
### 16.1. ΟΙ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΑ ΛΕΩΦΟΡΕΙΑ

Τα λεωφορεία προσδοκείται να ξεκινούν το πρωί και να λειτουργούν για ολόκληρη τη μέρα , όπου στο τέλος της μέρας θα ξαναγεμίζει με καύσιμα. Για να εκπληρωθεί η συγκεκριμένη λειτουργία , το σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου πρέπει να ακολουθεί τις παρακάτω σχεδιάστηκες απαιτήσεις:

- Η χωρητικότητα αποθήκευσης υδρογόνου, πρέπει να είναι προγραμματισμένη για τη λειτουργία του λεωφορείου καθ' όλη τη διάρκεια της μέρας .

- Τα σύστημα αποθήκευσης δεν προσθέτει περισσότερο βάρος στο αρχικό ηλεκτρικό λεωφορείο.
- Η πίεση του υδρογόνου και ο ρυθμός ροής πρέπει να πληρούν της προϋποθέσεις που απαιτούν τα καύσιμα της μηχανής.
- Ο χρόνος ανεφοδιασμού καυσίμου πρέπει να είναι σύμφωνος με την προγραμματισμένη λειτουργία.
- Το ψυκτικό της μηχανής χρησιμοποιείται για να παρέχει θερμότητα για την εκρόφιση υδρογόνου.
- Το νερό χρησιμοποιείται για ψύξη κατά την διάρκεια της ανατροφοδότησης με καύσιμα, μέσω ενός εξωτερικού εναλλάκτη θερμότητας.
- Ανεφοδιασμός με καύσιμα υδρογόνου γίνεται από ένα ρυμουλκούμενο σωλήνα ή μια συσκευή ηλεκτρόλυσης.

Για την κάλυψη των παραπάνω απαιτήσεων , διαφορετικά μεταλλικά υδρίδια ή υδρίδια δεξαμενών πρέπει να σχεδιαστούν.



*Εικόνα 16-1 Λεωφορείο που λειτουργεί με κυψέλες υδρογόνου, παρουσίαση των συστημάτων και των εξαρτημάτων*

Πηγή:

<http://www.alternative-energy-news.info/technology/transportation/public-transit/>

## 16.2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥΧΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ

Γενικά τεχνικά θέματα που συναντάμε στο σχεδιασμό υδρογονούχων δεξαμενών για αποθήκευση υδρογόνου επί του οχήματος :

- Τα σωματίδια υδριδίου διαστέλλονται κατά την απορρόφηση υδρογόνου και συστέλλονται κατά την εκρόφηση. Αυτό μπορεί να προκαλέσει συμπίεση , οίδημα, και σοβαρές ζημιές στη δεξαμενή.
- Η σκόνη μετάλλων υδριδίου είναι μια κακή μεταφορά θερμότητας προκαλώντας αργή απορρόφηση και εκρόφηση υδρογόνου
- Τα φίλτρα χρησιμοποιούνται για να περιορίζουν τη σκόνη υδριδίου που μπορεί να εμποδίσει τη ροή του υδρογόνου.
- Τα υδρίδια μετάλλου είναι βαριά και απαιτούν δεξαμενές χαμηλού βάρους.

Αν λάβουμε τα παραπάνω υπ όψιν το τελικό σχέδιο για την το σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου περιέχει 2 «κουτιά» με δεξαμενές μεταλλικών υδριδίων. Κάθε ένα «κουτί» περιέχει 24 εγκατεστημένα οριζόντια κυλινδρικές δεξαμενές . οι δεξαμενές είναι 9 cm στη διάμετρο και 152 cm στο μήκος. Αυτά είναι συναρμολογημένα μέσα σε ένα αλουμινένιο κουτί για να σχηματίσουν μια στοίβα με 6 δεξαμενές στο φάρδος και 5 επίπεδα κατά ύψος. Τα αλουμινένια κουτιά είναι 66cm φαρδιά , 53 cm στο ύψος και 173 cm στο πλάτος. Και οι 24 δεξαμενές μέσα στο κουτί είναι συνδεδεμένες παράλληλα. Οι δεξαμενές , συνήθως τοποθετούνται κάτω απ το πάτωμα του λεωφορείου και στις 2 πλευρές του σασί.



*Εικόνα 16-2 Δεξαμενή υδρογόνου*

Πηγή:

<http://hsecoc.srs.gov/models.html>

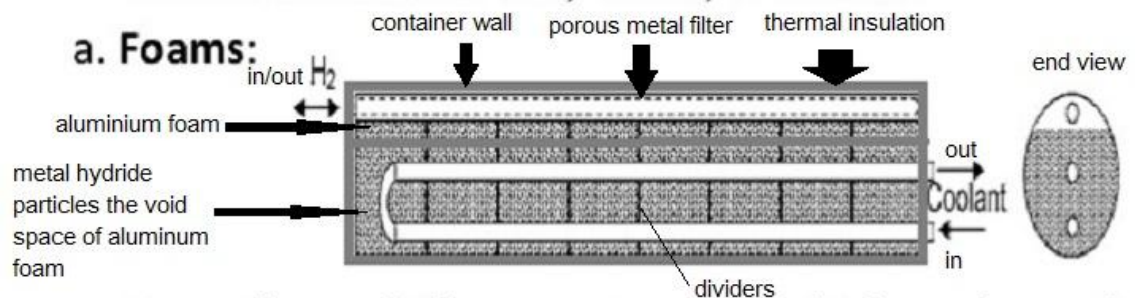
Οι κυλινδρικές δεξαμενές υδριδίου είναι φτιαγμένες από λεπτό τοίχωμα, σωλήνες από ανοξείδωτο ατσάλι. Τα εξαρτήματα μέσα σε κάθε δεξαμενή συμπεριλαμβανομένου και ενός πορώδους φίλτρου από ανοξείδωτο ατσάλι, αλουμινένιες διαχωριστικές πλάκες, κυλινδρικά κομμάτια αφρού αλουμινίου, και ένα σωλήνα νερού σχήματος U. Το φίλτρο επιτρέπει το υδρογόνο να ρέει ελεύθερα μέσα και έξω απ τη δεξαμενή αλλά περιορίζει την ελεύθερη ροή σκόνης μετάλλων υδριδίου στη δεξαμενή. Οι διαχωριστικές πλάκες διαχωρίζουν την δεξαμενή σε μικρούς τομείς αποτρέποντας τη σκόνη μετάλλων υδριδίου από το να μετακινείται ανάμεσα στους τομείς. Τα κομμάτια αφρού αλουμινίου με τα με τα σωματίδια μετάλλου υδριδίου στους πόρους τους βελτιώνουν την μεταφορά θερμότητας μεταξύ των αγωγών νερού και υδρογόνου. Το ψυκτικό της μηχανής ρέει διαμέσου του σωλήνα νερού για να παρέχει θερμότητα κατά την εκρόφηση και την απομακρύνει κατά την απορρόφηση υδρογόνου.

:

## Heat transfer enhancement methods

- Extended areas like fins, foams, or meshes

### a. Foams:



- Normally used Al, support metal hydride, enhance heat transfer
- Vessel divided into compartments & each compartment is filled with a metal form

Εικόνα 16-3 Ένα σχήμα μιας δεξαμενής αποθήκευσης υδριδίου του υδρογόνου

Πηγή:

<http://www.slideshare.net/MOHAMEDALIJAHAR/heat-transfer-in-metallic-hydrides-55579392>

Περιορισμένο από το βάρος, μόνο 2 κουτιά από δεξαμενές, ή 48 από το αρχικό πλάνο των 80 εγκαταστάθηκαν στο λεωφορείο. Το συνολικό βάρος των 2 κουτιών από δεξαμενές

υδριδίου είναι 1900 kg το ίδιο με τα 2 πακέτα μπαταριών που αντικατέστησαν. Τα υδρίδια μετάλλου έχουν βάρος 1250 kg ή το 66% του συνολικού βάρους. Η χωρητικότητα υδρογόνου είναι 15 kg συγκρινόμενα με το συνολικό βάρος του λεωφορείου που είναι 15000 kg.

### 16.3. ΡΥΘΜΟΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Όταν λειτουργεί σε πλήρη ισχύ η μηχανή υδρογόνου απαιτεί τροφοδοσία υδρογόνου με ρυθμό 6 kg/hr σε 10 atm πίεση. Με αυτό το ρυθμό η θερμότητα που απαιτείται για την εκρόφιση υδρογόνου είναι 19800 kcal/hr. Το υδρογονικό σύστημα αποθήκευσης πρέπει να είναι ικανό να μεταφέρει αυτή τη θερμότητα από την ψυκτική ουσία στα υδρίδια μετάλλου κατά την λειτουργία. Η κύρια αντίσταση για την μεταφορά της θερμότητας είναι η σκόννη μετάλλου υδριδίων. Ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς των μετάλλων υδριδίου εξαρτάται αποκλειστικά από την πίεση υδρογόνου και είναι  $72 \text{ kcal/hr/m}^2 / ^\circ\text{C}$  στις 10 atm πίεσης υδρογόνου. Με το συντελεστή θερμικής μεταφοράς, η ψυκτική ουσία μπορεί να μεταφέρει 8003 kcal/hr στα μέταλλα υδριδίου, τα οποία είναι μόνο 0,4 απ αυτό που απαιτείται. Ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς πρέπει να αυξηθεί στο  $180 \text{ kcal/hr/m}^2 / ^\circ\text{C}$  για να φτάσει τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας.

Τα κομμάτια αφρού αλουμινίου προστέθηκαν στη δεξαμενή για να βελτιώσουν τη μεταφορά θερμότητας μέσα από τα μέταλλα υδριδίου. Υπάρχει η δημιουργία ενός συνολικού συντελεστή θερμικής μεταφοράς των  $360 \text{ kcal/hr/m}^2 / ^\circ\text{C}$ , το οποίο είναι 2 φορές η απαιτούμενη τιμή των  $180 \text{ kcal/hr/m}^2 / ^\circ\text{C}$ . Με αυτόν τον υψηλότερο συντελεστή θερμικής μεταφοράς, ένα απλό κουτί με 24 δεξαμενές μπορεί να υποστηρίξει την απαιτούμενη τροφοδοσία υδρογόνου των 6 kg/hr. 2 κουτιά μαζί μπορεί να διπλασιάσουν τον στόχο που είχαμε βάλει.

### 16.4. ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑ

Η λειτουργία των, επί του οχήματος, μετάλλων υβριδίου έχει επιτευχθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος χρησιμοποιώντας νερό για την ψύξη. Οι υβριδικές δεξαμενές εκκενώνονται και καθαρίζονται από το υδρογόνο όταν εκτίθενται σε 20 atm υδρογόνου. Η υβρίδιο αρχίζει να απορροφάει υδρογόνο μετά από 15 λεπτά. Όταν αρχίσει, το υδρογόνο απορροφάται τόσο γρήγορα όσο αυτό μπορεί να ρέει μέσα στη δεξαμενή.

## 16.5. ΡΥΘΜΟΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Η λειτουργία συλλογής δεδομένων έδειξε ότι το σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου μπορεί να προμηθεύει με υδρογόνο τη μηχανή με ρυθμούς που υπερβαίνουν τους στόχους που είχαν τεθεί σχεδιαστικά. Αυτό παρουσιάστηκε από κάποια δομένα τα οποία συλλέχτηκαν από μια δοκιμή λειτουργίας κατά το οποίο ένα μόνο κουτί από 24 υβριδικές δεξαμενές χρησιμοποιήθηκαν για να τροφοδοτήσει τη μηχανή. Χρησιμοποιώντας τη μέση θερμοκρασία ψύξης, τη υβριδική θερμοκρασία και το ρυθμός κατανάλωσης υδρογόνου, και την επιφάνεια του σωλήνα ψύξης με νερό, μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας. Ο υπολογισμός απέδωσε ένα συντελεστή μεταφοράς θερμότητας των  $426 \text{ kcal/h/m}^2/^{\circ}\text{C}$ . Αυτό που υπολογίστηκε από ένα 14 cm σωλήνα ήταν  $360 \text{ kcal/h/m}^2/^{\circ}\text{C}$ . Και η απαιτούμενη για τα 6 kg/hr τροφοδοσίας υδρογόνου ήταν  $178 \text{ kcal/h/m}^2/^{\circ}\text{C}$ . Ο πραγματικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι ο υψηλότερος ανάμεσα στους 3. Αυτό το υψηλό νούμερο επιτρέπει τη μηχανή να λειτουργεί με μόνο ένα κουτί υβριδικής δεξαμενής.

Πίνακας 16-1 Πίνακας μεταφοράς θερμότητας και δεδομένα ρυθμού τροφοδοσίας υδρογόνου:

Θερμοκρασία ψύξης στο σωλήνα ψύξης	Εισαγωγή=65,5 °C    εξαγωγή=54,4 °C Μέση = 60°C
Μέσος ρυθμός τροφοδοσίας υδρογόνου από ένα κουτί 24 <sup>ων</sup> δεξαμενών πάνω από μία ώρα λειτουργία της μηχανής	3,4 kg/hr
Θερμοκρασία υβριδίου σε ισορροπία με 10 atm πίεσης υδρογόνου (η μέση)	51 °C
Μέσος ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από το ψυκτικό στο υβριδικό = 3,4 kg/hr*6,6 kcal/mole*(1000 mole/2 kg)	12540 kcal/hr
Συνολικός συντελεστής θερμότητας =12540 kcal/hr/(60°C-51°C)/2,93m <sup>2</sup>	426 kcal/h/m <sup>2</sup> /°C





Εικόνα 16-4 Ανεφοδιασμός με υδρογόνο

Πηγή: <http://www.windpowerengineering.com/featured/business-news-projects/hydrogen-bus-lets-lab-visitors-ride-the-future/>

## 16.6. ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕ ΚΑΥΣΙΜΑ

Έως τώρα, υδρογόνο από ριμουλκούμενο σωλήνα χρησιμοποιείται για τον ανεφοδιασμό των λεωφορείο. Σύνδεση μεταξύ της προμήθειας υδρογόνου και του υβριδικού συστήματος αποθήκευσης έχει γίνει χρησιμοποιώντας Sherex τροφοδοτεί το ακροφύσιο και το δοχείο. Η θερμότητα της εκρόφησης κατά τη διάρκεια του ανεφοδιασμού μετακινείται μέσω ενός ψυκτικού με νερό με εξωτερικό εναλλάκτη. Με μια πίεση υδρογόνου στις 18 atm , το υβρίδιο μπορεί να ανεφοδιαστεί στο 75% μέσα σε 60 λεπτά και άλλα 60 λεπτά για το υπόλοιπο 25%. Ο χρόνος ανεφοδιασμού είναι ίδιος με τον αρχικό στόχο των 2 ωρών.



*Εικόνα 16-5 Ανεφοδιασμός λεωφορείου με υδρογόνο*

Πηγή: <http://www.weh.us/refueling-systems-hydrogen/h2-bus-truck-dispensers.html>

## 16.7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Ένα επί του οχήματος σύστημα αποθήκευση υδρογόνου χρησιμοποιεί μέταλλα υβριδίου έχει αναπτυχτεί επιτυχώς , έχει κατασκευαστεί και παρουσιαστεί σε ένα αστικό λεωφορείο. Οι δοκιμές που έχουν γίνει στο δρόμο απέδειξαν ότι οι αρχικοί στόχοι που είχαν μπει επιτεύχθηκαν και με το παραπάνω. Η χρήση των μετάλλων υβριδίου για επί του οχήματος αποθήκευση υδρογόνου προσφέρει πλεονεκτήματα ασφαλείας και υπάρχουν δυνατότητες να χρησιμοποιηθεί επιτυχημένα σε περιπτώσει που το βάρος δεν είναι απαγορευτικός παράγοντας. Το σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου σε αυτή την περίπτωση κατασκευάστηκε για μια μηχανή εσωτερικής καύσης αλλά μπορεί να εφαρμοστεί και σε σύστημα κυψέλων καυσίμου. Όταν η τεχνολογία κυψέλων καυσίμου γίνει πιο οικονομικά προσιτή , οι μηχανές εσωτερικής καύσης μπορούν να αντικατασταθούν με τις κυψέλες καυσίμου για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα.

## 17. ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ (ιστορικά στοιχεία)

Η ιστορία της ηλεκτρόλυσης του νερού είναι τόσο παλαιά όσο και η πρώτη βιομηχανική επανάσταση. Το 1800 ο Carlisle και Nicholson παρουσίασαν τη διάσπαση του νερού με ηλεκτρόλυση.



Εικόνα 17-1 Carlisle και Nicholson κατά την ηλεκτρόλυση

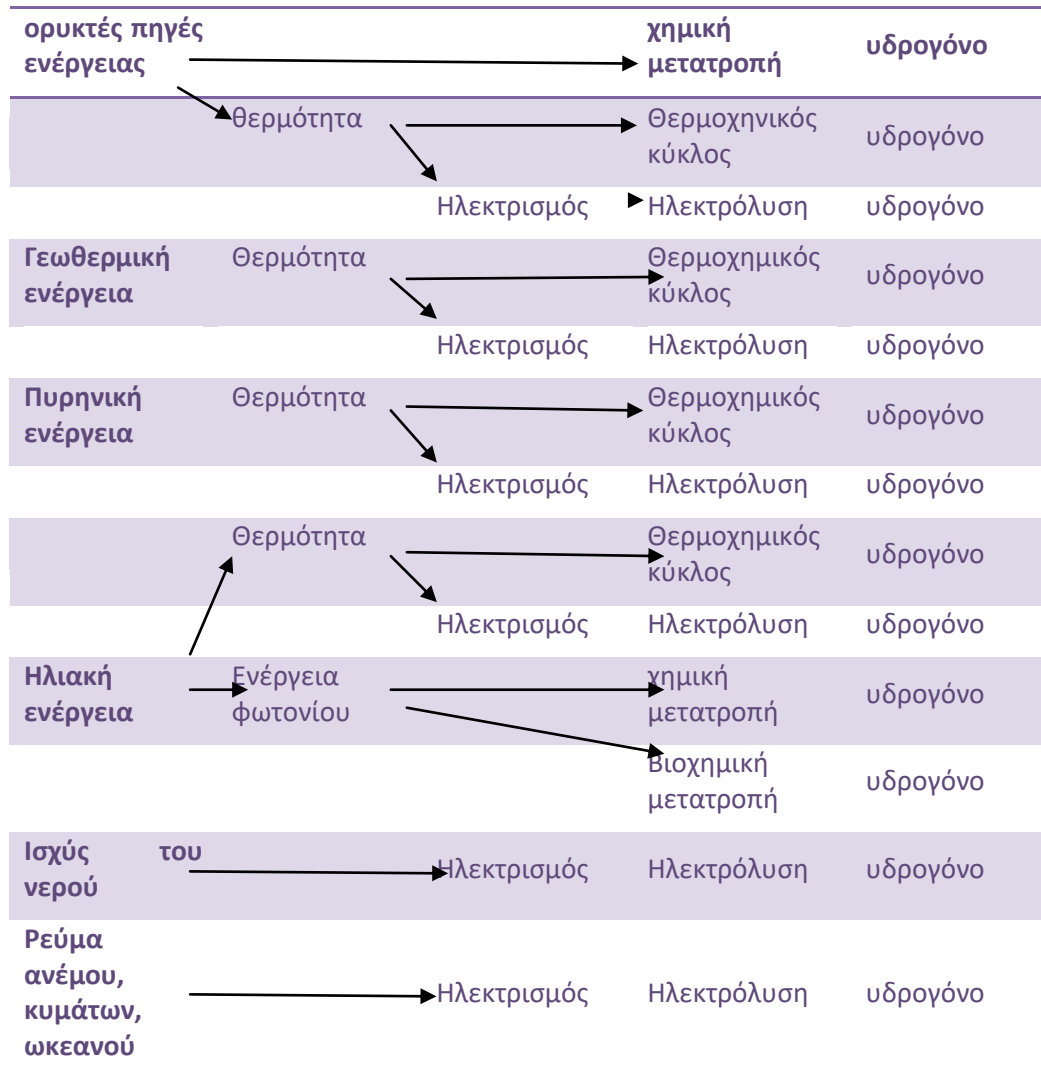
Πηγή:

[http://www.daviddarling.info/encyclopedia/H/history\\_of\\_electricity.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/H/history_of_electricity.html)

Στην πραγματικότητα αυτή είναι η παλαιότερα ηλεκτροχημική διαδικασία που είναι γνωστή. Παρ' όλα αυτά χρειάστηκε να περάσουν περίπου 100 χρόνια για να χρησιμοποιηθεί για βιομηχανικούς σκοπούς για παραγωγή υδρογόνου και οξυγόνου. Το 1902 λειτουργούσαν περίπου 400 ηλεκτρολύτες. Norsk Hydro ξεκίνησε το πρώτο πλάνο ηλεκτρόλυσης το 1928 και η παραγωγή του ήταν η κύρια εργασία της εταιρίας για 50 χρόνια. Η παραγωγή έφτασε στο υψηλότερο σημείο της η δεκαετία του '60 με 100.000 Nm<sup>3</sup>/h.

Σήμερα μόνο το 0,5% της συνολικής παραγωγής υδρογόνου γίνεται από την ηλεκτρόλυση του νερού. Παρ όλα αυτά στο μέλλον όταν η χρήση υδρογονανθράκων περιοριστεί σαν αποτέλεσμα των μειωμένων αποθεμάτων και της περιβατολογικής μόλυνσης, η ηλεκτρόλυση του νερού θα κυριαρχήσει.

Πίνακας 17-1 Πορεία παραγωγής υδρογόνου

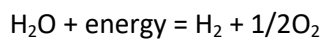


Πηγή:

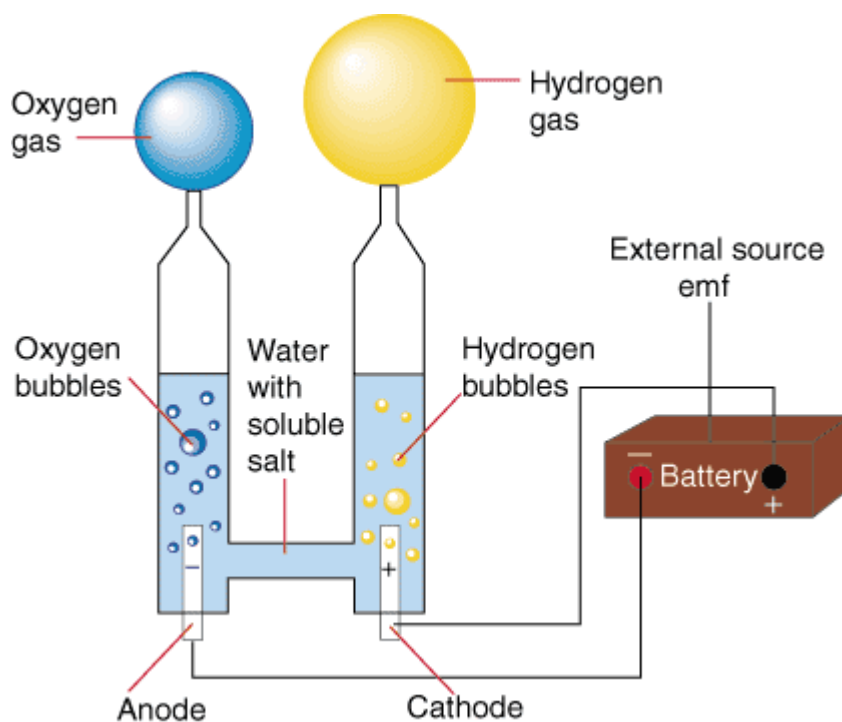
(βιβλίο hydrogen power: theoretical and engineering solutions, edited by T.O. Saetre)

## 17.1. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ

Μια κυψέλη ηλεκτρόλυσης απαρτίζεται από 2 ηλεκτρικούς αγωγούς, ηλεκτρόδια σε επαφή με ένα ιοντικό αγωγό, ηλεκτρολύτη. Όταν το ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσα από την κυψέλη που περιέχει νερό, τα μόρια του νερού διασπώνται σε υδρογόνο και οξυγόνο.



Το νερό είναι πολλή φτωχός ιοντικός αγωγός, και ο ηλεκτρολύτης πρέπει να περιέχει και άλλα συστατικά για να εξασφαλίσει φυσιολογική αγωγιμότητα. Αυτά τα συστατικά δεν πρέπει να υφίστανται αλλαγές κατά της διάρκειας της ηλεκτρόλυσης.



Εικόνα 17-2Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί με τη διάσπαση του νερού με ηλεκτρισμό, έτσι έχουμε:

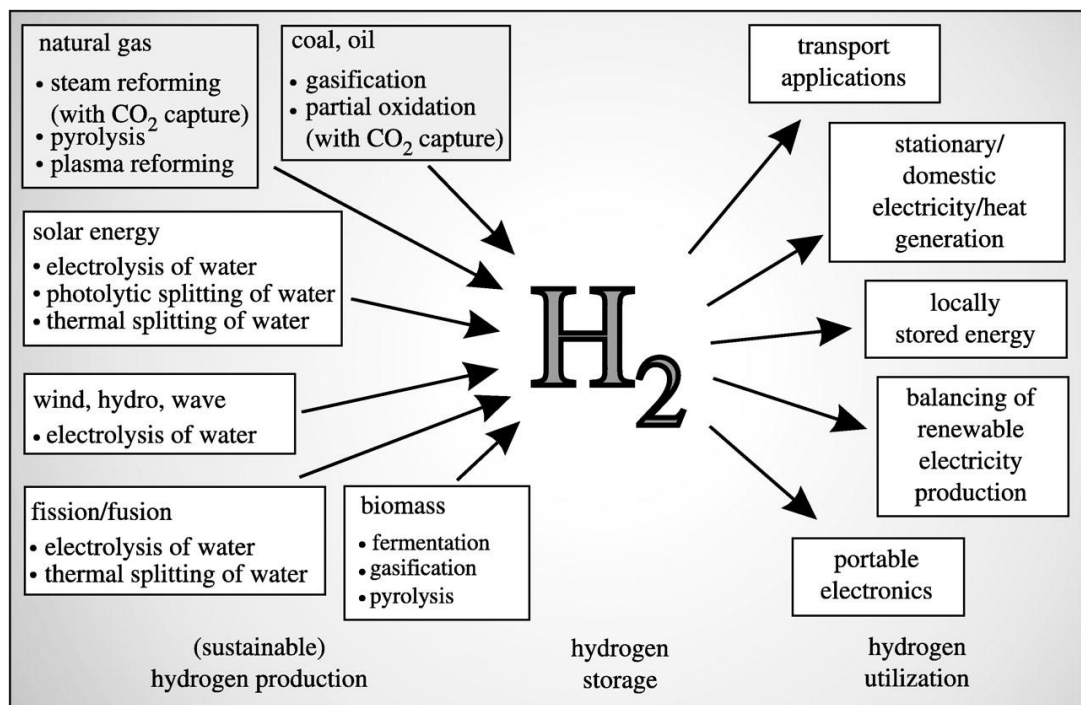
Πηγή:

<http://www.st-andrews.ac.uk/supergen/projectwork/hydrogenfromelectricity/>

## 17.2. Η ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Υπάρχουν σε διάφορες πηγές ενέργειας το υδρογόνο, για τη μετατροπή του οποίου χρησιμοποιούνται διαδικασίες όπως χημική, θερμοχημική, ηλεκτρική και φωτοχημική. Σήμερα χρησιμοποιείται αναμόρφωση/πυρόλυση ατμού για τους υδρογονάνθρακες και ηλεκτρόλυση του νερού σε μεγάλη κλίμακα στις βιομηχανίες.

Με τα ορυκτά υδρογονανθράκων ως κύρια πηγή ενέργειας και πρώτων υλών, χρησιμοποιείται χημική διαδικασία μετατροπής, με το 30-50% του υδρογόνου να προέρχεται από τους υδρογονάνθρακες και το υπόλοιπο απ το νερό. Το νερό είναι η κύρια πρώτη ύλη παραγωγής υδρογόνου με αυτό το νέο τρόπο. Πρακτικά αυτοί είναι οι βασικοί τρόποι παραγωγής ηλεκτρισμού καθώς και η ηλεκτρόλυση με διάσπαση του νερού.



Εικόνα 17-3 Τρόποι παραγωγής υδρογόνου, και τι γίνεται μετά

Πηγή:

<http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/365/1853/1043>

## 17.3. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ



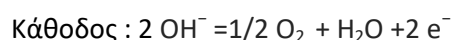
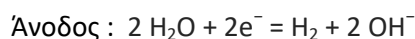
Υπάρχουν πολλοί τρόποι παραγωγής υδρογόνου, ένας εκ των οποίων είναι και η ηλεκτρόλυση. Για τις βιομηχανικές ηλεκτρολύσεις συνήθως χρησιμοποιείται αλκαλικοί ηλεκτρολύτες και λειτουργούν στους 80°C και τα 1-3 bar. Οι κυψέλες βασίζονται σε στερεούς ηλεκτρολύτες, πολυμερή ή κεραμικά αλλά ως τώρα δεν έχει εμπορική σημασία. Ως σήμερα η καλύτερη διαθέσιμη τεχνολογία έχει αποτέλεσμα ηλεκτρικής ενέργειας της τάξης του 80%. Δύο κύριοι τύποι ηλεκτρολύσεων χρησιμοποιούνται, οι «tank cells» με ηλεκτρόδια συνδεδεμένα παράλληλα και η «filterpress cells» με ηλεκτρολύτες στη σειρά. Το κόστος παραγωγής υδρογόνου είναι υπό ορισμένες περιπτώσεις 1,40 NOK/Nm<sup>3</sup> ή 0,40 NOK/kWh.

1 NOK=0,107 ευρώ

#### 17.4. ΑΛΚΑΛΙΚΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΕΣ

Η ανακάλυψη της ηλεκτρολυτικής διάσπαση του νερού έγινε σε όξινο περιβάλλον . παρά το γεγονός αυτό οι βιομηχανίες προτείνουν το αλκαλικό περιβάλλον , κυρίως λόγω των προβλημάτων της μικρότερης διάβρωσης.

Η βασική αντίδραση των δύο ηλεκτροδίων είναι :



Μεταξύ των ηλεκτροδίων υπάρχει ένα διαχωριστικό, ένα διάφραγμα ή μια μεμβράνη, για να διατηρούνται τα παράγωγα της αντίδρασης ξεχωριστά. Τα ιόντα υδροξυλίου κινούνται μέσω του διαχωριστή κατά τη διάρκεια της ηλεκτρόλυσης. KOH συνήθως χρησιμοποιούνται αλκαλικά στοιχεία λόγω της καλής αγωγιμότητας, και η συγκέντρωση πρέπει να είναι περίπου 25-30% κατά βάρος. Η θερμοκρασία λειτουργίας πρέπει να είναι μικρότερη των 100°C , περίπου στους 80°C, και η πίεση μπορεί να είναι από 1 με 30 bar. Η άνοδος και η κάθοδος πρέπει να είναι ανθεκτικοί στη διάβρωση από τον ηλεκτρολύτη, πρέπει να είναι καλοί ηλεκτρικοί αγωγοί και να έχουν κατασκευαστικοί ακεραιότητα.

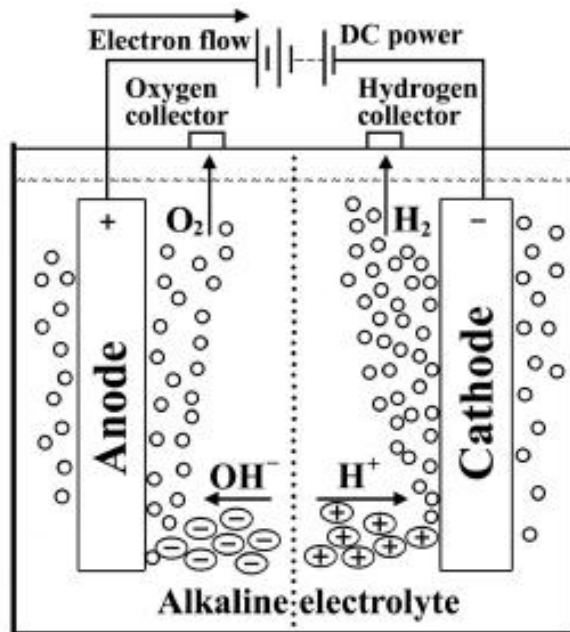


Figure 3. Basic scheme of a water electrolysis system

Εικόνα 17-4

Πηγή:

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422013000800017](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422013000800017)

## 17.5. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η κατανάλωση ενέργεια κατά τη διάρκεια της παραγωγής υδρογόνου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

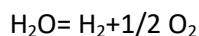
$$E_{H_2} = 2 \cdot f \cdot p_{H_2} / (3600 \cdot M_{H_2}) \cdot U/c$$

Όπου F είναι η σταθερά faraday, c είναι η αποτελεσματικότητα του ρεύματος, ρ είναι η πυκνότητα, M η μοριακή μάζα του υδρογόνου. Τοποθετώντας τα νούμερα του παραδείγματος του βιβλίου (hydrogen power: theoretical and engineering solutions) έχουμε τα εξής :

$$E_{H_2} = 2 \cdot 26,80 \cdot 0,08988 / 2,016 \cdot U/c = 2,39 \cdot 1,735 / 0,98 = 4,23 \text{ kWh/m}^3$$

## 17.6. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

Η αντίδραση διαχωρισμού του νερού είναι , όπως προαναφέρθηκε



Σε κανονικές συνθήκες ( συστατικό δραστηριότητας 1, θερμοκρασία 273,15 K , πίεση 1 bar) η αντίδραση της ενθαλπίας (Helmholtz) βασίζεται στο υγρό νερό και είναι

$$\Delta H_{273,L}^0 = 285,9 \text{ KJ/mol}$$

Αυτό αντιστοιχεί στη λεγόμενη υψηλή θερμική αξία του υδρογόνου. Όταν ο διαχωρισμός γίνεται με την ηλεκτρόλυση, το κύριο μέρος της συνολικής ενέργειας της αντίδρασης , πρέπει να παρέχεται σαν ηλεκτρική ενέργεια , σύμφωνα με τον Gibbs, υπό κανονικές συνθήκες έχουμε:

$$\Delta G_{273,L}^0 = 237,2 \text{ KJ/mol}$$

Η σχέση μεταξύ Gibbs και Helmholtz είναι :

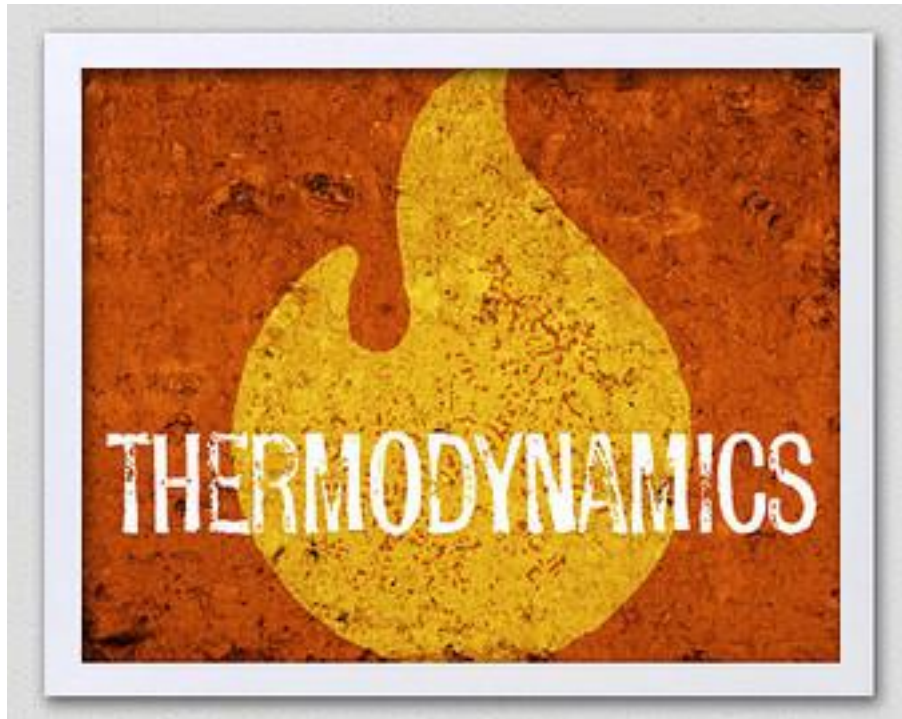
$$\Delta H = \Delta G + T * \Delta S$$

Η ενέργεια  $T * \Delta S$  μπορεί θερμοδυναμικά να καλυφθεί από θερμική ενέργεια

Οι κυψέλες τάσης αντίστοιχα με τις 2 θερμοδυναμικές ενέργειες είναι:

$$\text{Θερμοκρασιακή τάση κυψελών: } U_{\text{th}} = \Delta H / (2F)$$

$$\text{Αντιστρέψιμη τάση κυψελών: } U_{\text{rev}} = \Delta G / (2F)$$



Εικόνα 17-5

http Πηγή:

[p://quotesgram.com/thermodynamics-quotes/](http://quotesgram.com/thermodynamics-quotes/)

Οι  $\Delta H$  και  $\Delta G$  και μετά οι  $U_{τη}$  και  $U_{rev}$  είναι λειτουργίες της σύνθεσης του ηλεκτρολύτη, της θερμοκρασίας και της πίεσης. Στο διάγραμμα (θερμοκρασίας – τάση κυψελών) η διακοπή της καμπύλης στους  $100^{\circ}\text{C}$  γίνεται λόγω της μετάβασης του νερού από την υγρά κατάσταση σε ατμό. Αυτό αντιστοιχεί στην εξάτμιση της ενέργειας.

Η ενέργεια απαραίτητως θερμαίνει το νερό από τα  $25^{\circ}\text{C}$  στην θερμοκρασία αντίδρασης, να αυξηθεί η πίεση από το 1 bar στην πίεση αντίδρασης, να εξατμιστεί το νερό και για να ισοφαριστούν οι θερμικές απώλειες θα μπορούσαν θερμοδυναμικά να καλυφθούν από θερμική ενέργεια. Στην βιομηχανική ηλεκτρόλυση το σημαντικότερο κομμάτι καλύπτεται από ηλεκτρική ενέργεια.

Η αποτελεσματικότητα της ηλεκτρικής ενέργειας από την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης μπορεί να οριστεί από την ισότητα :

$$e = U_{m,273,L} / U$$

## 17.7. ΚΥΨΈΛΕΣ , ΗΛΕΚΤΡΟΛΗΣΕΙΣ , ΣΧΕΔΙΑ

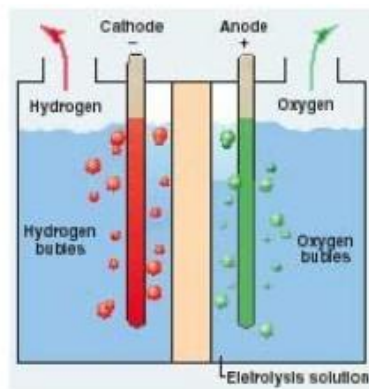
Ένα παράδειγμα βιομηχανικών κυψελών είναι αυτό της Norsk Hydro design η οποία διαθέτει 2 ηλεκτρόδια, η φλάντζες και 1 πλαίσιο που φέρει το διαχωριστικό. Στον πάτο των κυψελών υπάρχουν ανοίγματα τα οποία χρησιμοποιούνται για την παροχή του ηλεκτρολύτη και τους αγωγούς διανομής. Το υδρογόνο και το οξυγόνο αντίστοιχα ρέουν προς το άνοιγμα στην κορυφή της κυψέλης , σχηματίζοντας αγωγούς για μετακίνηση αερίων και ηλεκτρολύτη. Η κυψέλη λειτουργεί με το 25% KOH στους 80°C και στα 1 bar.

Τα αέρια εμπλέκονται με τα ηλεκτρόδια και διαφεύγουν σαν φούσκες. Υπάρχουν στροβιλισμοί στον ηλεκτρολύτη και μπλοκάρουν το διαδρομή του ρεύματος ανάμεσα στα ηλεκτρόδια. Η αναλογία όγκου αερίων/ηλεκτρολύτη πρέπει να είναι χαμηλή. Απ την άλλη πλευρά το κενό ανάμεσα στα ηλεκτρόδια πρέπει να είναι μικρό για να ελαχιστοποιεί την ωμική αντίσταση. Αν και η έκλυση αερίου γίνεται συνήθως στο μπροστινό μέρος του ηλεκτροδίου το σημαντικότερο μέρος των φουσκών αερίου ανεβαίνει από το πίσω μέρος. Σε άλλα είδη κυψελών που σχεδιάζονται , διαμορφώνεται μηδενικό κενό. Τα ηλεκτρόδια γίνονται από πορώδες ή τεταμένα φύλλα λαμαρίνας.

Το διάφραγμα , στο παράδειγμα, είναι ένα υφαντό από πολυμερές μίγμα υλικών σε ένα σκελετό κατασκευής. Για να δράσει σαν ένας αποτελεσματικός διαχωριστής αερίων με χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση , πρέπει να υγρανθεί με τον ηλεκτρολύτη έτσι ώστε οι πόροι να είναι γεμάτοι. Ο σκελετός κατασκευής και τα ηλεκτρόδια φτιάχνονται από επινικελωμένο χάλυβα. Τα ηλεκτρόδια επίσης αντιδρούν με καταλυτική επίστρωση για τη μείωση των υπερτάσεων.

# Electrolysis: Fuel Cell in Reverse

- Same reaction as hydrogen fuel cell, only in reverse:
  - Supply water and electricity
  - Generate hydrogen & oxygen
- Perfect match for hydrogen fuel cells
- Issue:
  - Have to supply electricity
- Solution:
  - Use solar panels or other renewable sources



This project is funded by  
NSF-1004083

Εικόνα 17-6 Ηλεκτρόλυση, η κυψέλη καυσίμου σε αντίστροφη όψη

Πηγή:

<http://www.slideshare.net/orau/tnscore-fuel-cell-electrolysis-technology>

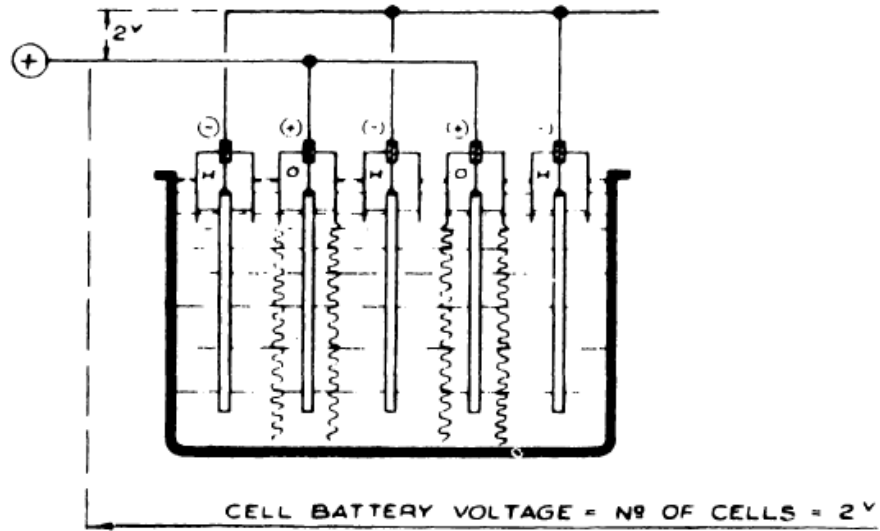
## 17.8. ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΑΚΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ

ηλεκτρόλυση του νερού είναι κατ' αρχήν μια αντίστροφη κυψελών καυσίμου. Από το νερό και την ηλεκτρική ενέργεια που παίρνουμε το υδρογόνο και το οξυγόνο.

Οι βιομηχανικές ηλεκτρολύσεις αποτελούνται από πολλές κυψέλες ή ζευγάρια ηλεκτροδίων. Αυτά μπορεί να είναι παράλληλα ή και σε σειρά. Στην παράλληλη σύνδεση τα ηλεκτρόδια τροφοδοτούνται με ρεύμα από την έξω πλευρά και έχει μόνο μια πόλωση, είναι μονοπολικά δηλαδή είτε άνοδος είτε κάθοδος. Στην σύνδεση στη σειρά, μόνο οι άκρες των ηλεκτροδίων τροφοδοτούνται με ρεύμα και είναι μονοπολικά. Τα ηλεκτρόδια στο ενδιάμεσο είναι διπολικά, κάθοδος στη μια πλευρά και άνοδος στην άλλη. Οι ηλεκτρολύσεις έχουν μόνο μονοπολικά ηλεκτρόδια και συχνά λέγονται « tank cells» ενώ οι ηλεκτρολύσεις με διπολικούς ηλεκτρολύτες λέγονται «filterpress cells».



FIGURE 3.2: SCHEMATIC DIAGRAM OF A UNIPOLAR (TANK-TYPE) ELECTROLYZER (3)



Εικόνα 17-7 Σχέδιο Ηλεκτρόλυσης με τύπο «tank cell»

Πηγή:

[http://www.knowledgepublications.com/978-1-60322-032-3\\_detail\\_page.htm](http://www.knowledgepublications.com/978-1-60322-032-3_detail_page.htm)

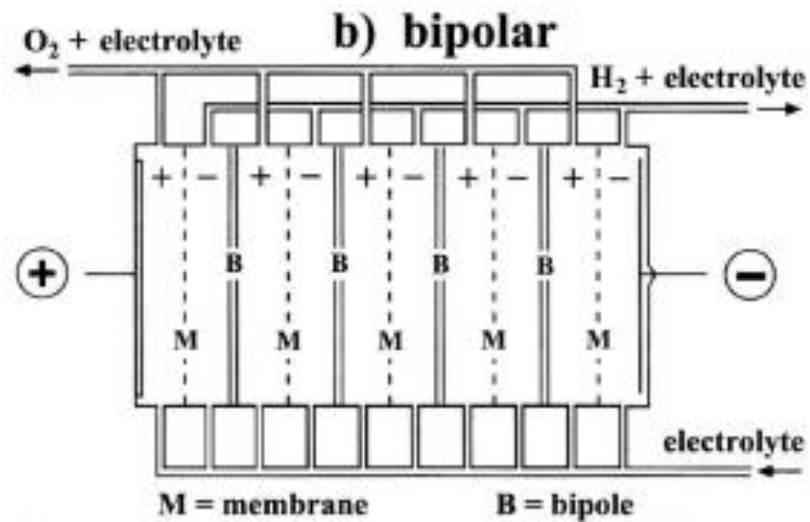


Figure 8. Electrolyzer modules with a) unipolar and b) bipolar cell configurations

Εικόνα 17-8 Σχέδιο Ηλεκτρόλυσης με τύπο «filter-press cell»

Πηγή:

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422013000800017](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422013000800017)



*Εικόνα 17-9 Ηλεκτρόλυσης με τύπο «filter-press cell» , η εξωτερική όψη*

Πηγή:

[http://elektrolyse.de/wordpress/?page\\_id=36](http://elektrolyse.de/wordpress/?page_id=36)

Ένα σχέδιο ηλεκτρόλυσης έχει γενικά αρκετές ηλεκτρολύσεις, συνδέοντας σε σειρά ή σε σειρά και παράλληλα. Κάθε μια από τις δυο ηλεκτρολύσεις που σχεδιάστηκαν έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Η «tank cell» είναι απλή και ισχυρή ενώ η «filterpress cell» έχει πολλές φλάντζες. Υπάρχουν τα εξωτερικά καλώδια λόγω της απώλεια τάσης της «tank cell» ενώ η «filterpress cell» διαθέτει κανάλια για την παροχή ηλεκτρολύτη , σχηματίζουν διακλαδώσεις στη κυψέλη και μετά προκαλείται απώλεια ρεύματος. Η «cell tank» έχει χαμηλή τάση και εξαρτάται από το υψηλό ρεύμα για να δώσει μια λογικά παραγωγή. Η «filterpress cell» έχει υψηλή τάση και λειτουργεί με χαμηλό ρεύμα. Παρ όλα αυτά και τα 2 είδη είναι εγκατεστημένα σε ένα σχέδιο με αρκετές ηλεκτρολύσεις .

Σαν παράδειγμα της «filterpress cell» υπάρχει η παρακάτω εικόνα που είναι της Norsk Hydro. Η κυψέλης είναι σφισμένη ανάμεσα σε άκαμπτο πλαίσιο από χάλυβα. Οι ζυγοί συνδέονται με τα εμπρόσθια και οπίσθια άκρα.



*Εικόνα 17-10 Μονάδα ηλεκτρόλυσης νερού από την Norsk Hydro*

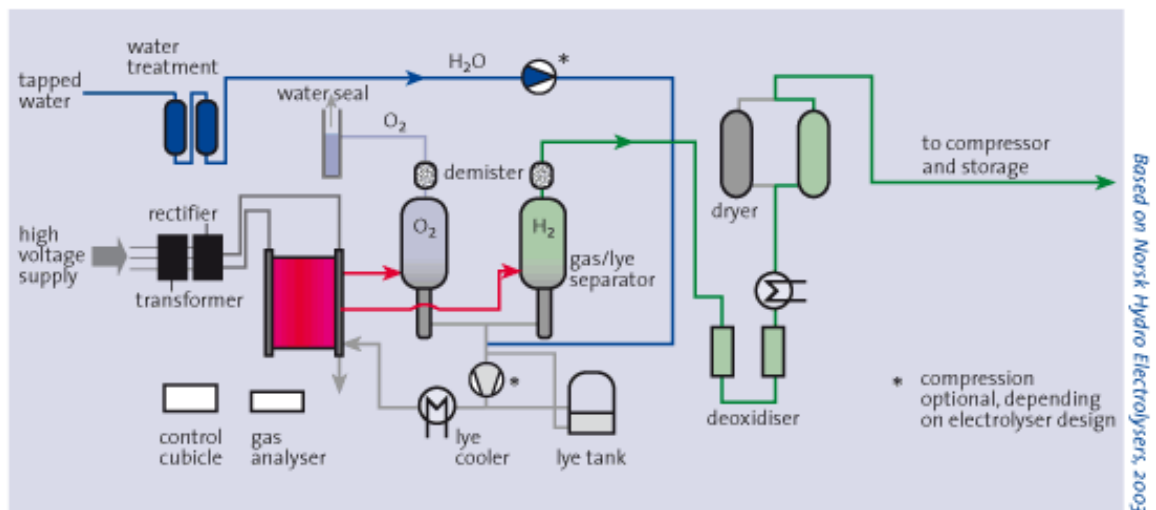
Ακριβώς όπως στις κυψέλες καυσίμου αναγωγή και οξείδωση λαμβάνει χώρα στα ξεχωριστά ηλεκτρόδια. Υδρογόνο παράγεται στην κάθοδο και υδρογόνο στην άνοδο. Ο ηλεκτρολύτης είναι ιοντικά αγώγιμος συνήθως είτε με πρωτόνια ( $H^+$ ) ή ιόντα υδροξυλίου ( $OH^-$ ). Πιο συνηθισμένη είναι η διαδικασία των αλκαλίων ( $OH^-$ ) το οποίο χρησιμοποιείτε από τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Άλλοι τύποι βασίζονται επί ενός στερεού πολυμερούς ηλεκτρολύτη ή λειτουργούν σε υψηλές πιέσεις και / ή θερμοκρασίες. Η ηλεκτρόλυση του νερού αντιπροσωπεύει περίπου το 2-3% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου.

Πηγή:

[http://www.fuelcell.no/hydrogen\\_production\\_eng.htm](http://www.fuelcell.no/hydrogen_production_eng.htm)

## 17.9. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Ο εξοπλισμός σχετικά με τον σχεδιασμό της ηλεκτρόλυσης μπορεί να διαφέρει πολύ από μέρος σε μέρος και από προμηθευτή σε προμηθευτή, ακόμα και αν στην αρχή δεν ήταν και τόσο διαφορετικά τα πράγματα μεταξύ τους.



Flow Chart of an Electrolyser Unit

Εικόνα 17-11 διάγραμμα ροής μιας συσκευής ηλεκτρόλυσης, βασίζεται στα σχέδια της Norsk Hydro

Πηγή:

<http://www.making-hydrogen.com/PLgkbdAg.xml>

Το παραγόμενο αέριο του υδρογόνου και οξυγόνου μαζί με λίγο ηλεκτρολύτη, ρέουν μέσω των αγωγών απομάκρυνσης στον διαχωριστή αερίου/ ηλεκτρολύτη. Το υδρογόνο είναι καθαρισμένο, ψυχρό και αποξηραμένο και τελικά συμπιεσμένο. Η υπερβολική θερμότητα από την ηλεκτρόλυση μετακινείται από τον κυκλοφορούντος ηλεκτρολύτη στον ψύκτη. Το νερό τροφοδοσίας είναι καθαρισμένο μέσα σε ένα ιοντισμένο εναλλάκτη και προστίθεται στον ηλεκτρολύτη πριν την από την είσοδό της στον αγωγό τροφοδοσίας για την ηλεκτρόλυση.

## 17.10. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΣΚΕΛΟΣ

Η οικονομία της παραγωγής υδρογόνου με εγκαταστάσεις ηλεκτρόλυσης είναι συνήθως εξαρτώμενη από τις επενδύσεις, τη συντήρηση, κόστος λειτουργίας και όλα τα σχετικά με τον ρυθμό παραγωγής.

## 17.11. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΟΣΤΟΥΣ

Παρακάτω φαίνονται χαρακτηριστικά στοιχεία για ένα πλάνο που έχει ως στόχο παραγωγή χωρητικότητας 4000 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> / h

Πίνακας 17-2

<b>Συνολικό επένδυσης κόστος</b>	<b>90.000.000 NOK</b>	<b>9.777.240 €</b>
<b>Ετήσιο κόστος κεφαλαίου</b>	10.500.000 NOK	1.140.680 €
<b>Ετήσιο συντήρησης και λειτουργίας κόστος</b>	5.000.000 NOK	543,180 €
<b>Κόστος ηλεκτρισμού</b>	31.500.000 NOK	3.422.030 €
<b>Συνολικό ετήσιο κόστος</b>	47.000.000 NOK	5.105.890 €
<b>Ειδικό κόστος</b>	1,42 NOK per Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub>	0.154 € per Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub>
	0.40 NOK per kWh (HHV of H <sub>2</sub> )	0.043 € per kWh (HHV of H <sub>2</sub> )



*Εικόνα 17-12*

Ο υπολογισμός του κόστους βασίζεται στις ειδικές συνθήκες, απαιτήσεις και περιορισμούς, οι πιο καθοριστικοί παράγοντες είναι :

- το εργοστάσιο λειτουργεί αυτόνομα ,είναι εξοπλισμένα με δική του διοίκηση, τη συντήρηση, τις εγκαταστάσεις ελέγχου των εγκαταστάσεων και των υποδομών.
- Η παροχή ισχύος υψηλής τάσης και άλλα χρήσιμα προϊόντα όπως του επεξεργασμένου και μη επεξεργασμένου νερού είναι ήδη διαθέσιμα σε λογικές τιμές.
- Το υδρογόνο πρέπει να διανέμεται στα 30 bar σε ένα
- Η θερμότητα που σπαταλιέται δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί εμπορικά
- Το οικονομικό πλάνο έχει οριστεί για 15 χρόνια και το επιτόκιο είναι 8%.
- Το υδρογόνο παράγεται 8,300 h/year, και η διαθεσιμότητά του αγγίζει το 95%.



- Η απενεργοποίηση των ηλεκτροδίων γίνεται κάθε 7 χρόνια.
- Η συνολική ειδική κατανάλωση ενέργεια είναι 4,75 kWh/Nm<sup>3</sup>H<sub>2</sub>. Αυτό συμπεριλαμβάνει την κατανάλωση κατά την ηλεκτρόλυση, ένα σύστημα ηλεκτρικών αγωγών σε ένα σταθμό παραγωγής, τους μετασχηματιστές, του συμπιεστές και άλλος βοηθητικός εξοπλισμός.
- Η τιμή του ηλεκτρισμού έχει οριστεί στα 0,20 NOK ή (0.022) per kWh

Ο πίνακας δείχνει ότι σε αυτή την περίπτωση το κόστος του κεφαλαίου είναι 22% του συνολικού κόστους παραγωγής, το κόστος συντήρησης και λειτουργίας ανέρχεται στα 11%, και το κόστος ηλεκτρισμού στο 67%.

## 17.12. ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Στο παραπάνω παράδειγμα το κόστος του ηλεκτρισμού είναι το κυρίαρχο συστατικό τις συνολικής εικόνας του κόστους κόστος. Πρέπει να τονιστεί ότι γύρο στο 60% της κατανάλωσης ενέργειας οφείλεται στην ενέργεια Gibbs. Η μείωση αυτού του στοιχείου μπορεί πρακτικά να γίνει μόνο αυξάνοντας τη θερμοκρασία λειτουργίας. Η κύρια διαμάχη για την ανάπτυξη λειτουργία υψηλής θερμοκρασίας ηλεκτρόλυση, είναι να επιτευχθεί στην θερμοδυναμική μέρος της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Παρ όλα αυτά στο κοντινό μέλλον η έρευνα και η ανάπτυξη φαίνεται να επικεντρώνεται στην ηλεκτρόλυση σε μεσαίες και χαμηλές θερμοκρασίες.

## 17.13. Ενέργεια Gibbs:

Η ελεύθερη ενέργεια Γκιμπς, αρχικά λεγόταν *διαθέσιμη ενέργεια*, αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1870 από τον Αμερικανό μαθηματικό Τζοσία Γουίλαρντ Γκιμπς (Josiah Willard Gibbs). Το 1873, ο Γκιμπς περιέγραψε αυτήν τη "διαθέσιμη ενέργεια" ως

η μέγιστη ποσότητα του μηχανικού έργου που μπορεί να ληφθεί από μια δεδομένη ποσότητα μιας συγκεκριμένης ουσίας σε μια δεδομένη αρχική κατάσταση, χωρίς αύξηση του συνολικού όγκου του ή χωρίς να επιτρέπει στη θερμότητα να περάσει προς ή από εξωτερικά σώματα, εκτός από αυτά που στο κλείσιμο των διεργασιών αφήνονται στην αρχική τους κατάσταση

Πηγή:

[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CE%BB%CE%B5%CF%8D%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%B7\\_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1\\_%CE%93%CE%BA%CE%B9%CE%BC%CF%80%CF%82\\_](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CE%BB%CE%B5%CF%8D%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%B7_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1_%CE%93%CE%BA%CE%B9%CE%BC%CF%80%CF%82_)

Στη θερμοδυναμική, η ελεύθερη ενέργεια Γκιμπς (Gibbs) (η IUPAC συνιστά το όνομα: ενέργεια Γκιμπς ή συνάρτηση Γκιμπς· γνωστή επίσης ως ελεύθερη ενθαλπία[1] για να διαφοροποιηθεί από την ελεύθερη ενέργεια Χέλμχολτς) είναι ένα θερμοδυναμικό δυναμικό που μετρά τη "χρησιμότητα" ή την αρχικοποίηση της διεργασίας του έργου που λαμβάνεται από ένα θερμοδυναμικό σύστημα σε μια σταθερή θερμοκρασία και πίεση (ισόθερμη και ισοβαρής διεργασία). Ακριβώς όπως στη μηχανική, όπου η δυναμική ενέργεια ορίζεται ως η δυνατότητα παραγωγής έργου, παρομοίως διαφορετικά δυναμικά έχουν διαφορετικές έννοιες. Η ελεύθερη ενέργεια Γκιμπς (σε μονάδες SI μετριέται σε J/mol) είναι η μέγιστη ποσότητα του μη εκτατού έργου που μπορεί να εξαχθεί από ένα κλειστό σύστημα (ένα σύστημα που μπορεί να ανταλλάξει θερμότητα και έργο με το περιβάλλον του, αλλά όχι ύλη)· αυτό το μέγιστο μπορεί να επιτευχθεί μόνο με μια πλήρως αντιστρεπτή μεταβολή. Όταν ένα σύστημα αλλάζει από μια σαφώς ορισμένη αρχική κατάσταση σε μια σαφώς ορισμένη τελική κατάσταση, η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Γκιμπς  $\Delta G$  ισούται με το ανταλλασσόμενο έργο από το σύστημα με το περιβάλλον του, μείον το έργο των δυνάμεων πίεσης, κατά τη διάρκεια ενός αντιστρεπτού μετασχηματισμού του συστήματος από την αρχική στην τελική κατάσταση.[2]

Η ελευθέρα ενέργεια,  $G$ , ορίζεται :

$$G = H - TS$$

και είναι συνάρτηση κατάστασης, όπως οι άλλες θερμοδυναμικές συναρτήσεις ( $U$ ,  $H$ ,  $S$ ). Η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας για μια αντίδραση που διεξάγεται σε σταθερή θερμοκρασία και πίεση είναι:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Η τελευταία εξίσωση οδηγεί σ' ένα τελικό κριτήριο για αυθόρμητες αντιδράσεις, σύμφωνα με το οποίο, **σε κάθε αυθόρμητη μεταβολή η ελεύθερη ενέργεια του συστήματος μειώνεται.** Δηλαδή,

Αν  $\Delta G$

Αν  $\Delta G > 0$  τότε η αντίδραση δε γίνεται αυθόρμητα

Αν  $\Delta G = 0$  η αντίδραση βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας

Η διαφορά  $\Delta G$ , όπως και οι διαφορές  $\Delta H$  και η  $\Delta S$  εξαρτώνται μόνο από την αρχική και τελική κατάσταση του συστήματος και όχι από την πορεία που ακολουθούμε (καταστατική

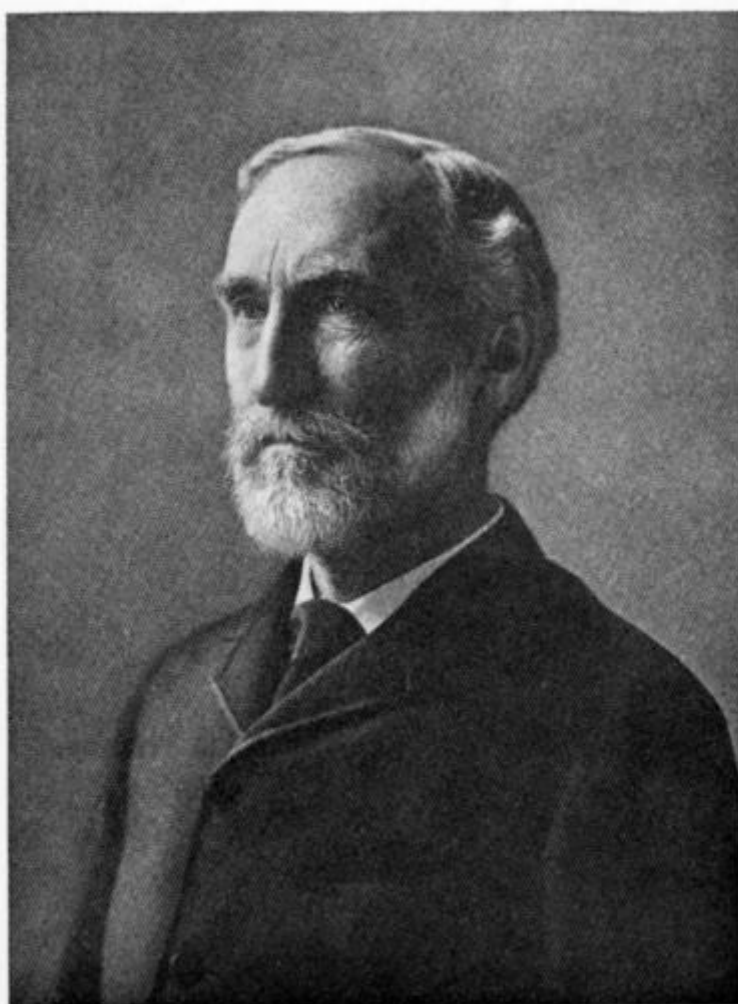
ιδιότητα).

Προφανώς η τιμή του  $\Delta G$  διαμορφώνεται με βάση τις τιμές των  $\Delta H$  και  $\Delta S$ . Έτσι διακρίνουμε τις παρακάτω περιπτώσεις:

1. Αν  $\Delta H < 0$  τότε ισχύει  $\Delta G < 0$   
Συνεπώς σ' όλες αυτές τις περιπτώσεις, ανεξαρτήτου θερμοκρασίας, το  $\Delta G < 0$  και  $\Delta S > 0$

Πηγή:

(<http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-C135/128/934,3423/>)



*J. Willard Gibbs*

Πηγή:

<http://www.ub.uni-heidelberg.de/helios/fachinfo/www/math/htm/gibbs-bumstead.htm>

## 17.14. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ / ΚΟΣΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να μειωθεί χαμηλώνοντας την ωμική πτώση τάσης, πρωταρχικά στις ίδιες τις κυψέλες. Οι ακόλουθες δυνατότητες θα πρέπει να αποτιμώνται:

- Τροποποίηση των συνθηκών ηλεκτρόλυσης ( χαμηλώνοντας την πυκνότητα, αυξάνοντας την πίεση , αυξάνοντας την θερμοκρασία, αλλάζοντας την συγκέντρωση των ηλεκτρολυτών)
- Μείωση της αντίστασης στα στρώματα του ηλεκτρολύτη μεταξύ των ηλεκτροδίων ( ελαττώνοντας το κενό, μειώνοντας την αναλογία όγκου αερίου/ ηλεκτρολύτη, διασφάλιση της κυκλοφορίας των ηλεκτρολυτών)
- Μείωση της αντίστασης στο διάφραγμα( διαλέγοντας ένα άλλο τύπο διαφράγματος)
- Μείωση της αντίστασης των ηλεκτροδίων (τα μπροστινά και πίσω ηλεκτρόδια)

Η κατανάλωση ενέργειας μπορεί επίσης να μειωθεί χαμηλώνοντας ή σταθεροποιώντας τις υπερτάσεις. . Οι ακόλουθες δυνατότητες θα πρέπει να αποτιμώνται:

- Τροποποίηση των συνθηκών ηλεκτρόλυσης ( χαμηλώνοντας την πυκνότητα, αυξάνοντας την θερμοκρασία)
- Βελτιώνοντας/ σταθεροποιώντας την δραστηριότητα των ηλεκτροκαταλυτών / ενεργές επιστρώσεις.

## 17.15. ΕΠΕΝΔΥΣΕΙΣ /ΚΟΣΤΟΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Το συνολικό κόστος των επενδύσεων μπορεί να μειωθεί , μειώνοντας το κόστος κατασκευής των κυψελών, της ηλεκτρολύσεως, και το συνολικό κόστος του πλάνου. Οι ακόλουθες δυνατότητες θα πρέπει να αποτιμώνται:

- απλούστερο σχέδιο κυψελών και ηλεκτρολύσεων
- φτηνότερα υλικά κατασκευής
- ποιο αποδοτική κατασκευή
- απλούστερος σχεδιασμός ολόκληρου του πλάνου

κάποιες δυνατότητες μπορούν να συνδυαστούν καλύτερα μαζί και άλλες λιγότερο καλά, αλλά το σημαντικότερο κομμάτι στο οποίο πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή είναι η κυψέλες, οι οποίες είναι το κυριότερο κόστος της κατασκευής. Χρησιμοποιώντας άλλα υλικά κατασκευής πρέπει να είναι δυνατό να αλλάξει ολόκληρο το σχέδιο και ο κατασκευή.

Το κόστος επένδυσης μπορεί επίσης να μειωθεί αυξάνοντας τον ρυθμό παραγωγής των κυψελών και των ηλεκτρολύσεων, δηλαδή του ρεύματος. Οι ακόλουθες δυνατότητες θα πρέπει να αποτιμώνται:

- μεγέθυνση των διαστάσεων των κυψελών
- αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος



Εικόνα 17-14

Πηγή:

<http://www.nineoclock.ro/fdi-in-romania-jan-aug-2015-eur-2-3-bl/>

## 17.16. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΛΛΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

Πολλές από τις προσπάθειες μείωσης του κόστους ενέργεια μπορεί να επηρεάσουν τις επενδύσεις και αντίστροφα. Ως συνήθως μια οικονομική βελτιστοποίηση στον συγκεκριμένο τομέα είναι απαραίτητο να γίνει.

Όσον αναφορά τις ηλεκτρολύσεις με αλκαλικό ηλεκτρολύτη, θα ήταν δυνατό να μειώσει το κόστος των επενδύσεων από 30% και την κατανάλωση ενέργειας 10-15%. Βασιζόμενοι σε στοιχεία του παρουσιάστηκαν παραπάνω το κόστος παραγωγής υδρογόνου μπορεί να μειωθεί κατά 15%. Το ειδικό κόστος μειώνεται τότε στις 1,20 NOK ή 0,13€/Nm<sup>3</sup> & 0,34 NOK ή 0,037€/kWh.



## 18. ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΙΚΗ

### 18.1. ΑΕΡΟΣΤΑΤΑ

Η πρώτη χρήση του υδρογόνου στην αεροναυπηγική ήταν για το φούσκωμα των αερόστατων. Το υδρογόνο το χρησιμοποίησαν για πρώτη φορά ως τότε στη Γαλλία όταν ένα μικρό μεταξένιο αερόστατο κατασκευάστηκε από τα αδέρφια Roberts, υπό τις οδηγίες του φυσικού J.A.C. Charles. Είχε πετάξει στο Παρίσι στις 27 Αυγούστου του 1783. Έφτασε στο ύψος των 3000 ποδιών (ή 914.4 μέτρα) και ταξίδεψε σε μια απόσταση 15 μιλίων (ή 24.14 km) παρά τη βροχή.



Εικόνα 18-1 Jacques Alexandre Césaire Charles: (12 Νοεμβρίου, 1746 - 7 Απρίλη του 1823) ήταν ένας Γάλλος εφευρέτης, επιστήμονας, μαθηματικός, και αεροναύτης

Πηγή:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Jacques\\_Charles](https://en.wikipedia.org/wiki/Jacques_Charles)



Εικόνα 18-2 πρώτη επανδρωμένη πτήση μπαλόνι υδρογόνου στον κόσμο το 1783.

Πηγή:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Robert\\_brothers](https://en.wikipedia.org/wiki/Robert_brothers)

Έκτοτε τα αερόστατα υδρογόνου έχουν χρησιμοποιηθεί για επιστημονικές έρευνες όπως για την μελέτη της φυσικής και της χημείας της ατμόσφαιρας και της στρατόσφαιρας, για παροχή μετεωρολογικών στοιχείων, να συγκεντρώσει αποδεικτικά στοιχεία για την επίδραση του μεγάλου υψομέτρου στην ανθρώπινη απόδοση, για στρατιωτικούς σκοπούς όπως αναγνώρισης και κατασκοπία, αλλά και για αθλητικές δραστηριότητες. Η χρήση του υδρογόνου, σήμερα, έχει αντικατασταθεί από το ήλιο για λόγους ασφαλείας.

## 18.2. ΑΕΡΟΠΛΟΙΑ

Τα αερόπλοια δημιουργήθηκαν σαν αποτέλεσμα της επιθυμίας του ανθρώπου να ελέγξει την κατεύθυνση και την ταχύτητα της πτήσης. Το 1852 ένας Γάλλος, ο Henri Giffard, κατασκεύασε ένα αερόπλοιο 144 ποδιών (43.89 μέτρων) μακρύ και 40 ποδιών (12.19 μέτρων) στη διάμετρο, στο οποίο τοποθέτησε μια ατμομηχανή δικού του σχεδιασμού. Η ατμομηχανή ζύγιζε 350 λίβρες (158.75 κιλά) με 3 hr. Τοποθετήθηκε και μια έλικα 11 πόδια (3.35 μέτρα) σε διάμετρο. Ο Giffard πέταξε αυτό το γεμάτο με υδρογόνο αερόπλοιο από το

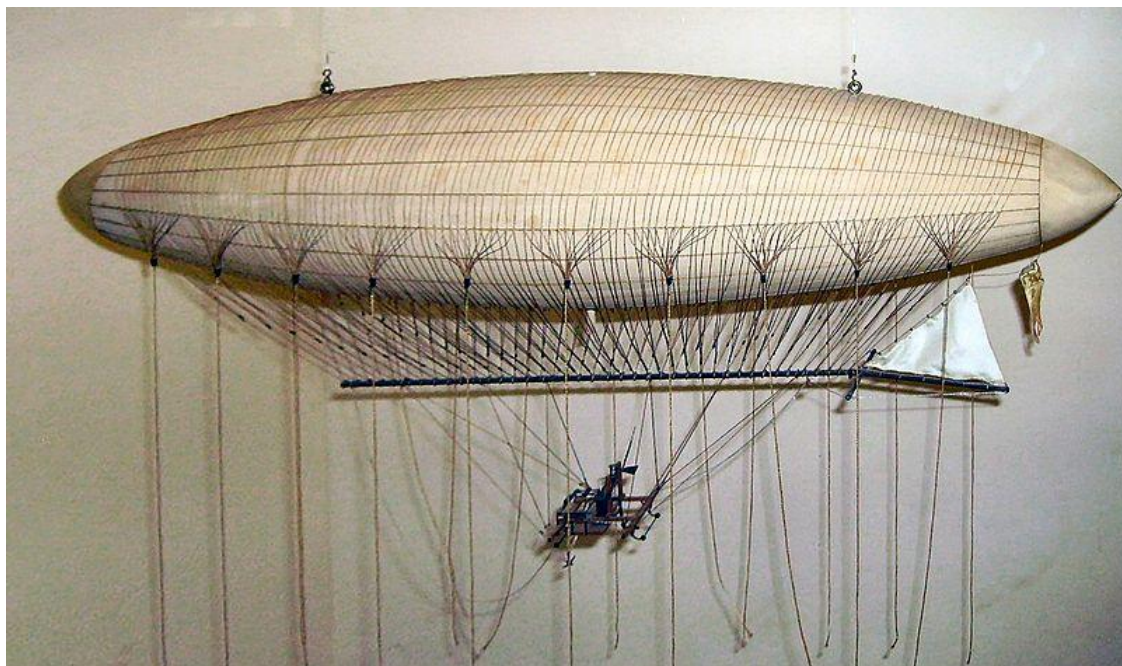
ιποδρόμιο στο Παρίσι στις 24 Σεπτεμβρίου του 1852 , όπου και επιτεύχθηκε μια υπολογισμένη ταχύτητα των 6mph (9.65kph) και παρουσιάστηκε ο πρώτος αξιόλογος έλεγχος του σκάφους ελαφρύτερο από τον αέρα.



*Εικόνα 18-3 Ο Ανρί Ζιφάρ (Henri Giffard, 8 Φεβρουαρίου 1825 - 15 Απριλίου 1882) ήταν Γάλλος μηχανικός. Το 1852, εφηύρε τον εγχυτήρα ατμού και το τροφοδοτούμενο αερόπλοιο.*

Πηγή:

[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CF%81%CE%AF\\_%CE%96%CE%B9%CF%86%CE%AC%CF%81](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CF%81%CE%AF_%CE%96%CE%B9%CF%86%CE%AC%CF%81)





*Εικόνα 18-4 ένα αερόπλοιο που κατασκευάστηκε στη Γαλλία το 1852 από τον Henri Giffard, το πρώτο αερόπλοιο τροφοδοτείται και διευθύνεται για να πετάξει.*

Πηγή:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Giffard\\_dirigible](https://en.wikipedia.org/wiki/Giffard_dirigible)

αργότερα την πρώτη δεκαετία του 20<sup>ου</sup> αιώνα μερικές από τις μεγαλύτερες χώρες του κόσμου δραστηριοποιούνταν στην ανάπτυξη και κατασκευή αερόπλοιων και κυρίως ήταν οι Μεγάλη Βρετανία, η Γαλλία, και η Η.Π.Α. Η Ιταλία, η Ισπανία, η Πολωνία, η Ελβετία και η Ιαπωνία ασχολούνταν ενεργά στις επιχειρήσεις αερόπλοιων. Επίσης στον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο υπήρξε τρομερή ανάπτυξη και κατασκευή των αερόπλοιων και απ τις δύο πλευρές. Σε αντίθεση με αυτό στον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο τα αερόπλοια τύπου GRAF ZEPPELINS αποσυναρμολογούνταν το 1940 από τους Ναζί για να χρησιμοποιούν το αλουμίνιο με το οποίο ήταν κατασκευασμένα και να το χρησιμοποιούν για πολεμικούς σκοπούς.



*Εικόνα 18-5 το πιο επιτυχημένο Zeppelin που κατασκευάστηκε ποτέ, ήταν το LZ-127 Graf Zeppelin που πέταξε πάνω από ένα εκατομμύριο μίλια σε 590 πτήσεις, μεταφέροντας 34.000 επιβάτες, χωρίς κανένα τραυματισμό. Ήταν γερμανικής προέλευσης και σχεδιάστηκε από τον Ludwig Durr.*

Πηγή:

<http://the-lothians.blogspot.gr/2012/05/ich-wollte-einmal-um-die-welt-fliegen.html>

### 18.3. ΑΕΡΟΠΛΑΝΑ

Το 1955, μια αναφορά από το εργαστήριο προώθησης της πτήσης, δημοσιεύτηκε, στην οποία το δυναμικό του υγρού υδρογόνου ως καύσιμο για τη χρήση σε υποηχητικά και υπερηχητικά αεροσκάφη είχε εξερευνηθεί. Ανάμεσα σε άλλα πλεονεκτήματα παρατηρήθηκε η σημαντική βελτίωση της μέγιστης απόστασης η οποία θεωρητικά μπορεί να διανύσει το αεροσκάφος με τη χρήση του υδρογόνου.

Σαν αποτέλεσμα αυτής της μελέτης, ένα πειραματικό πρόγραμμα ξεκίνησε ώστε να παρουσιαστούν οι δυνατότητες της καύσης υδρογόνου σε μία μηχανή με στροβιλοκινητήρα σε υψηλό υψόμετρο. Ένα μεσαίο βομβαρδιστικό της U.S. Air Force με διπλό κινητήρα το B-57 τροποποιήθηκε και πέταξε για πρώτη φορά το 1956. Το υγρό υδρογόνο ( $H_2$ ) τοποθετήθηκε σε μια δεξαμενή που ήταν κάτω από το αριστερό άκρο του φτερού. Αέριων ηλίου υπήρχε σε μία παρόμοια δεξαμενή σε μέγεθος και σχήμα κάτω από το άκρο του δεξιού φτερού το οποίο χρησιμοποιούνταν ως αέριων ηλίου ένα αέριο που χρησιμοποιείται για την οδήγηση ενός ρευστού μέσω ενός συστήματος ρευστού.

Αρχικά στο πρόγραμμα, η δεξαμενή του υδρογόνου βρισκόταν υπό πίεση 55 psi (3.74 atm) με το αέριο του ηλίου να γίνεται η αιτία της ροής του  $H_2$  προς τον εναλλάκτη θερμότητας όπου και εξατμιζόταν. Ο εναλλάκτης θερμότητας ήταν ένας απλός σχεδιαστικά εναλλάκτης αερίου-υδρογόνου όπου ο αέρας κάτω από συνθήκες πτήσης παρέχεται εφοδιάζει την ψήκτρα έτσι ώστε να μετατρέψει το  $H_2$  σε αέρια κατάσταση.

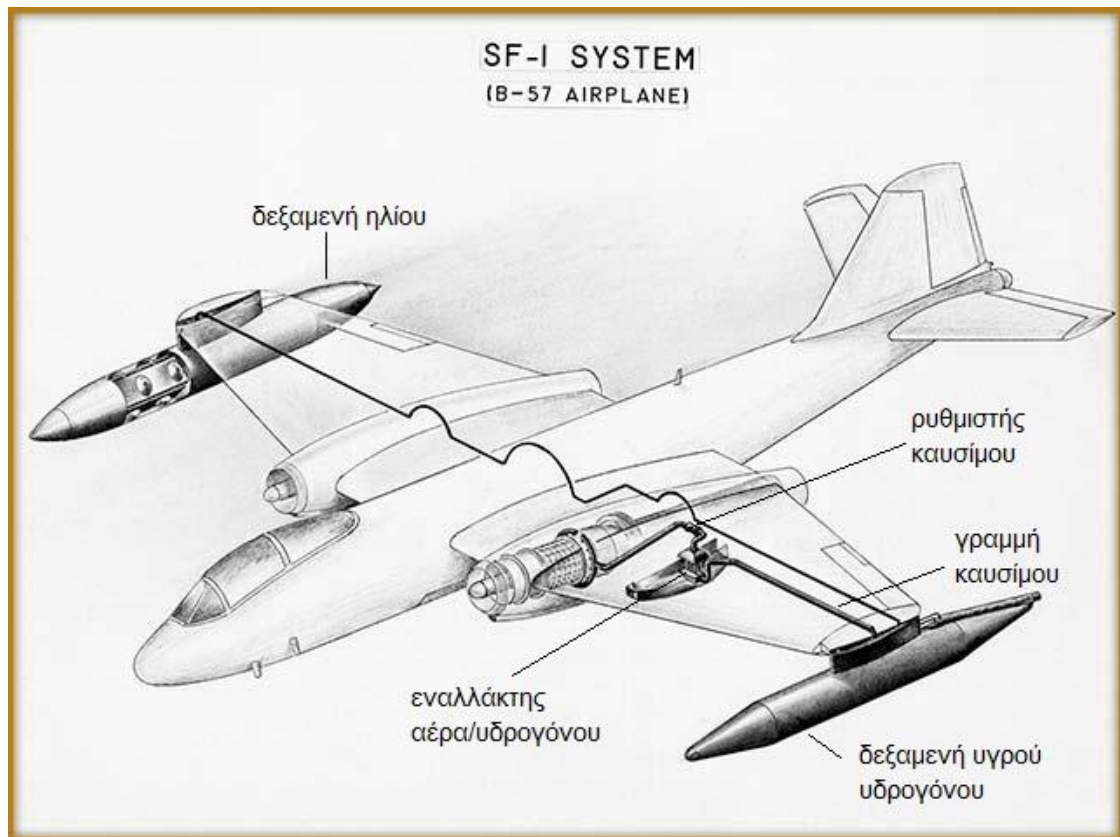
Ο ρυθμιστής ο οποίος ελέγχει το ρυθμό ροής του αερίου υδρογόνου ( $H_2$ ) στη μηχανή βρισκόταν μετά τον εναλλάκτη θερμότητα. Ήταν ένας ελεγκτής αναλογίας ο οποίος χρησιμοποιούνταν για να μετράει την ροή καυσίμων JP (jet propulsion - αεριοπροώθησης) από το συμβατικό ελεγκτή στροφών του κινητήρα στην προσαρμογή της ροής υδρογόνου από τον εναλλάκτη θερμότητας. Οι ρυθμοί ροής βάρους ρυθμίστηκαν να είναι αντιστρόφως ανάλογη προς την θερμότητων καύσης των δύο καυσίμων:

$$\frac{LH_2(51.590 \frac{Btu}{lb})}{JP(18.400 \frac{Btu}{lb})} = 2.8$$

Ή

$$\frac{LH_2(119.998,34 \frac{kilojoule}{kilogram})}{JP(42.798,4 \frac{kilojoule}{kilogram})} = 2.8$$

Όταν η μηχανή λειτουργούσε με υδρογόνο, η ροή του καυσίμου JP επανακυκλοφορούσε πίσω στην δεξαμενή.



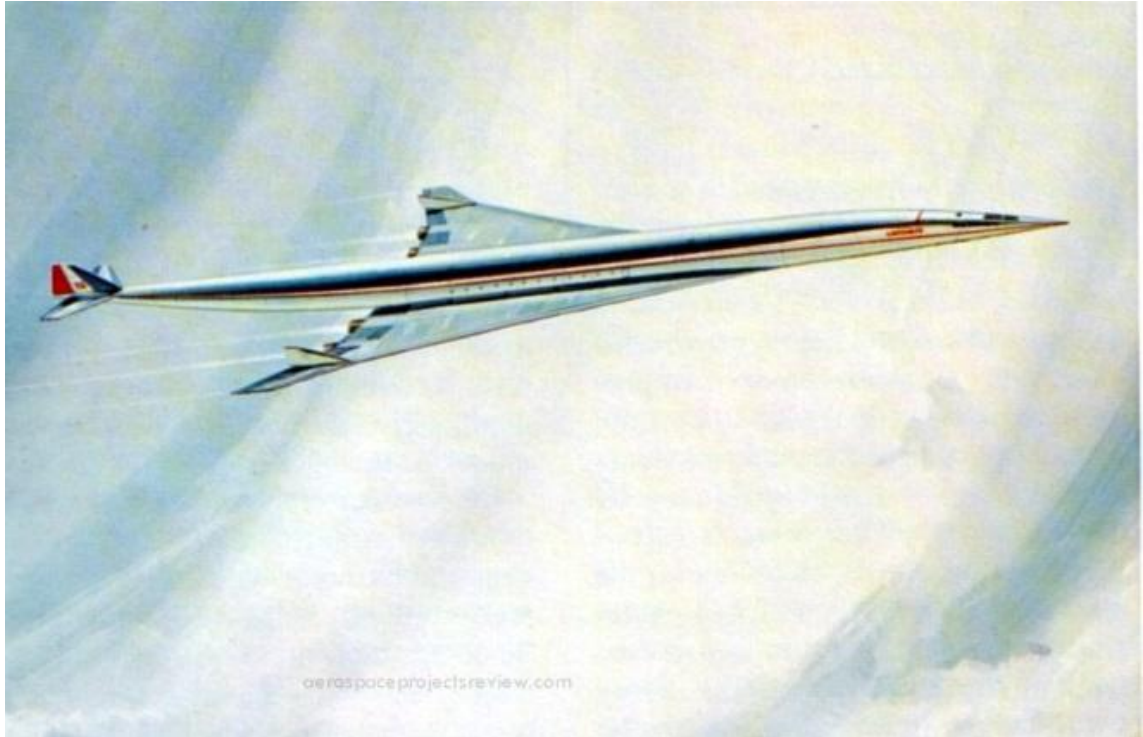
Εικόνα 18-6 Το πειραματικό πολεμικό αεροπλάνο B-57 με υδρογόνο

Πηγή:

<http://www.nasa.gov/externalflash/NACA/>

#### 18.4. πρώιμες μελέτες - τα υπερηχητικά αεροσκάφη μεταφοράς

Παρακάτω φαίνεται μια αναπαράσταση ενός υπερηχητικού μεταφορικού αεροσκάφους με  $\text{LH}_2$  καύσιμα, που προέκυψαν από τις προκαταρκτικές μελέτες που εκτελούνταν από την Lockheed California Co για το Nasa Ames Center. Το αεροσκάφος σχεδιάστηκε για να μεταφέρει 234 επιβάτες σε απόσταση 4200 Nautical Miles (Nm). = 7778.4 Kilometers (km) με ταχύτητα πτήσης τα 2,7 mach ή 3307.6 kph. Θα πρέπει να έχουμε κατά νου ότι οι σχεδιασμοί αεροσκαφών που συζητούνται προέκυψαν το 1974 και το 1975 για ένα τζετ Α και ένα  $\text{LH}_2$  αεροσκάφος.



*Εικόνα 18-7 Supersonic transport Mach 2.7*

Πηγή:

<http://www.aerospaceprojectsreview.com/blog/?p=1068>

Μια σύνοψη της χρήσης του υδρογόνου στην αεροναυπηγική δεν θα ήταν ολοκληρωμένη χωρίς τη μνεία των μελετών οι οποίες παρουσιάστηκαν στα μέσα της δεκαετίας το '60 για να ερευνηθούν οι δυνατότητες στα υπερηχητικά αεροσκάφη. Το 1965 θεωρητικές μελέτες σχεδιασμού οδήγησαν στο να γίνει κατανοητό ότι το σώμα ανύψωσης και ο συνδυασμός διαμορφώσεις πτερύγων-ατράκτου θα προσέφεραν σημαντικά πλεονεκτήματα για τα υπερηχητικά αεροσκάφη με υδρογόνο. Ενώ οι ομοσπονδιακές μειώσεις του προϋπολογισμού το 1968 οδήγησαν στον εικονικό τερματισμό για την περαιτέρω ουσιαστική ανάπτυξη του σχεδιασμού αυτής της κατηγορίας οχημάτων, το έργο στη συνέχεια απενεργοποιήθηκε στις αρχές της δεκαετίας του '80 και η τελευταία εργασία παρείχε χρήσιμες αναφορές.



Η χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο για τα υπερηχητικά αεροσκάφη είναι απαραίτητη για ταχύτητες άνω των 5 Mach (6125.22 kph) για δύο λόγους:

- ✓ η απαίτηση για διαθεσιμότητα πιο δραστικών καυσίμων
- ✓ η ανάγκη για την τεράστια ικανότητα ψύξης

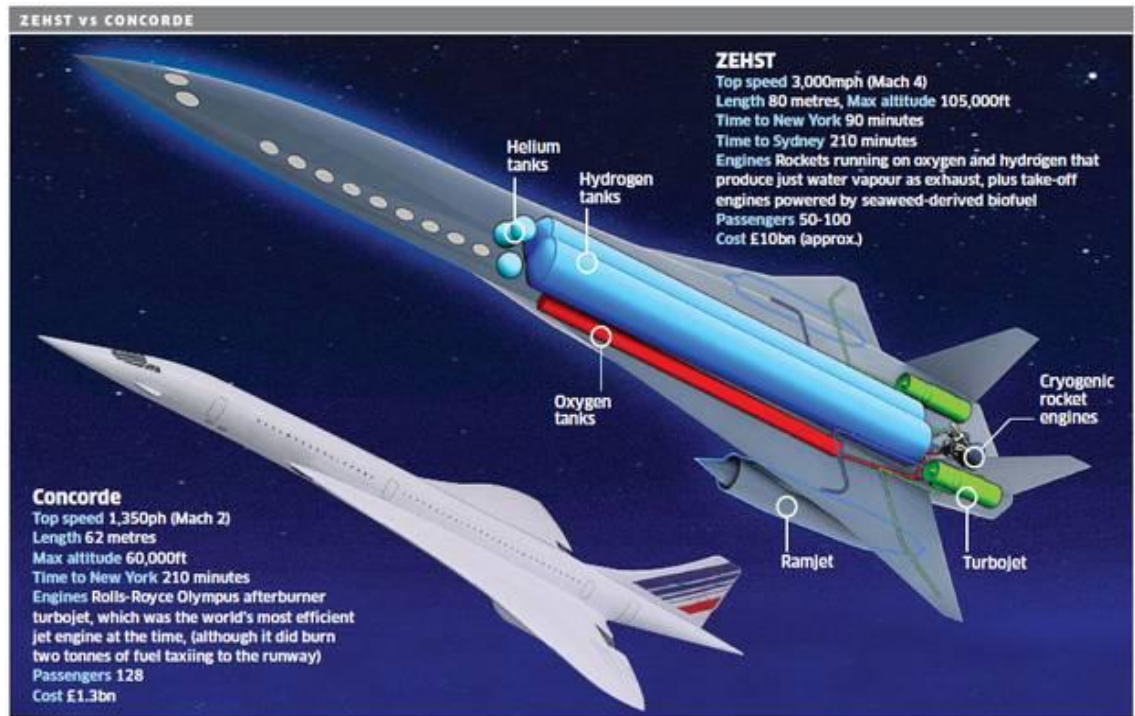
Το πλεονέκτημα του υδρογόνου σε θερμότητα της καύσης, ειδική θερμότητα, και η θερμοκρασία είναι προφανές. Το πλεονέκτημα στη θερμότητα καύσης σημαίνει ότι λιγότερα κιλά καυσίμου απαιτούνται για την προώθηση του οχήματος. Η πολύ μεγαλύτερη ειδική θερμότητα του  $\text{LH}_2$ , και η κρυογονική της θερμοκρασία σημαίνει ότι προσφέρει σημαντικά μεγαλύτερη ικανότητα ψύξης από τα υπόλοιπα καύσιμα.

*Πίνακας 18-1Η λίστα παρουσιάζει μερικές από τις φυσικές ιδιότητες των καυσίμων που έχουν θεωρηθεί κύριοι υποψήφιοι για χρήση σε υπερηχητικά οχήματα:*

	<b>Υδρογόνο</b>	<b>Μεθάνιο</b>	<b>Jet A</b>
<b>κανονική σύνθεση</b>	$\text{H}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{CH}_{1.93}$
<b>Μοριακό βάρος</b>	2,016	16,04	168 <sup>9</sup>
<b>θερμότητα καύσης (χαμηλή) KJ/g</b>	120	50	42.8
<b>Πυκνότητα του υγρού <math>\text{g/cm}^3</math> σε 283K</b>	0.071	0.423	0.811
<b>Ειδική θερμότητα J/g-K</b>	969	3,50	1,98 <sup>10</sup>
<b>Σημείο βρασμού στην 1 atm σε K</b>	20.27	112	440-539
<b>σημείο πήξης K</b>	14,4	91	233
<b>Θερμότητα της εξάτμισης στη 1 atm J/g</b>	446	510	360 <sup>10</sup>

\*για λόγους ευκολίας, το jet A και το JP-4 όπως αναφέρεται εδώ θεωρείται ότι έχουν πανομοιότυπες ιδιότητες. Στην πραγματικότητα, ο jet A είναι ένας τύπος κηροζίνης που χρησιμοποιείται παγκόσμιος από τις εμπορικές αερογραμμές. Το JP-4 είναι μία διαδεδομένη βενζίνη που χρησιμοποιείται ως καύσιμα για τζετ από της U.S. Air Force.

\*Το Μαχ (Mach) είναι μια μονάδα μέτρησης της ταχύτητας με βάση την ταχύτητα του ήχου. Δεδομένου ότι ο ήχος ταξιδεύει με διαφορετικές ταχύτητες σε διαφορετικές συνθήκες, οι υπολογισμοί εδώ δίνονται για 20 °C σε ξηρό αέρα στο επίπεδο της θάλασσας. Το Μαχ χρησιμοποιείται συνήθως στον τομέα των αερομεταφορών και στην εξερεύνηση του διαστήματος.



Εικόνα 18-8 Σύγκριση Concorde με Zehst (που χρησιμοποιεί το υδρογόνο)

Πηγή:

<http://www.gatefans.net/gforums/threads/bluce-has-been-vindicated-take-that-haters.27223/page-2>

Η πιο πρόσφατες μελέτες έχουν επιβεβαιώσει, ότι η κηροζίνη, το συμβατικό καύσιμο αεροσκαφών υδρογονανθράκων, δεν διαθέτει επαρκή ικανότητα ψύξης για την επαρκή προστασία των αεροσκαφών σε ταχύτητες πτήσης περίπου στα 4 Mach. Το υγρό μεθάνιο, το κρυογονική καύσιμο υδρογονανθράκων προσφέρει ικανοποιητική προστασία μόνο πάνω από τα 5 Mach. Για πτήση με ταχύτητες πάνω από τα 5 Mach, με την παρούσα τεχνολογία υλικών, φαίνεται υποχρεωτικό ότι το LH2 προστατεύει την άτρακτο του αεροσκάφους από τη δράση της αεροδυναμικής θερμότητας, καθώς και τα εξαρτήματα του κινητήρα που απαιτούν ενεργή ψύξη.

Ένα άλλο δυνητικό πλεονέκτημα για τα υπερηχητικά αεροσκάφη είναι ότι από τη στιγμή που πετάν σε υψηλότερο υψόμετρο από τα μόλις υπερηχητικά αεροσκάφη, υπάρχει η πιθανότητα ότι η ένταση της ηχητική έκρηξη μπορεί να μειωθεί σε ένα επίπεδο το οποίο θα καταστεί δυνατό για να πετάξει σε όλη κατοικημένες περιοχές χωρίς να προκαλούν υπερβολική ενόχληση. Αυτό μπορεί να εξαλείψει ένα σημαντικό μειονέκτημα η οποία έχει αμβλύνει τη γενική αποδοχή των μόλις υπερηχητικών αεροσκαφών φια εκτενή χρήση. Επί του παρόντος, τα μόλις υπερηχητικά αεροσκάφη έχει απαγορευτεί να πετούν υπερηχητικά

πάνω από το έδαφος , ένας περιορισμός που περιορίζει σημαντικά το πλεονέκτημα της ταχύτητας από τα υποηχητικά αεροσκάφη σε πτήσεις δημοφιλείς εμπορικούς δρόμους.

Για τη στρατιωτική χρήση των υπερηχητικών αεροσκαφών έχει δοθεί ιδιαίτερη προσοχή. Στην πραγματικότητα οι τελευταίες μελέτες οι οποίες σχεδόν εξ ολοκλήρου χρηματοδοτήθηκαν από το στρατό (της Αμερικής). Μερικά από τα προφανή αποστολές για τα οχήματα αυτά περιλαμβάνουν την αναγνώριση, εκτίμηση των ζημιών, και την απελευθέρωση των υψηλών φορτίων προτεραιότητας ή επιβατών.



## Mach Number

Glenn  
Research  
Center

$$\text{ratio} = \frac{\text{Object Speed}}{\text{Speed of Sound}} = \text{Mach Number}$$

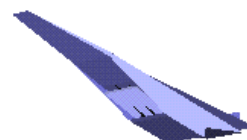


**Subsonic**  
Mach < 1.0

**Transonic**  
Mach = 1.0



**Supersonic**  
Mach > 1.0



**Hypersonic**  
Mach > 5.0

*Εικόνα 18-9 Οι ταχύτητες και οι ονομασίες των αεροσκαφών βάση αυτής.*

Πηγή:

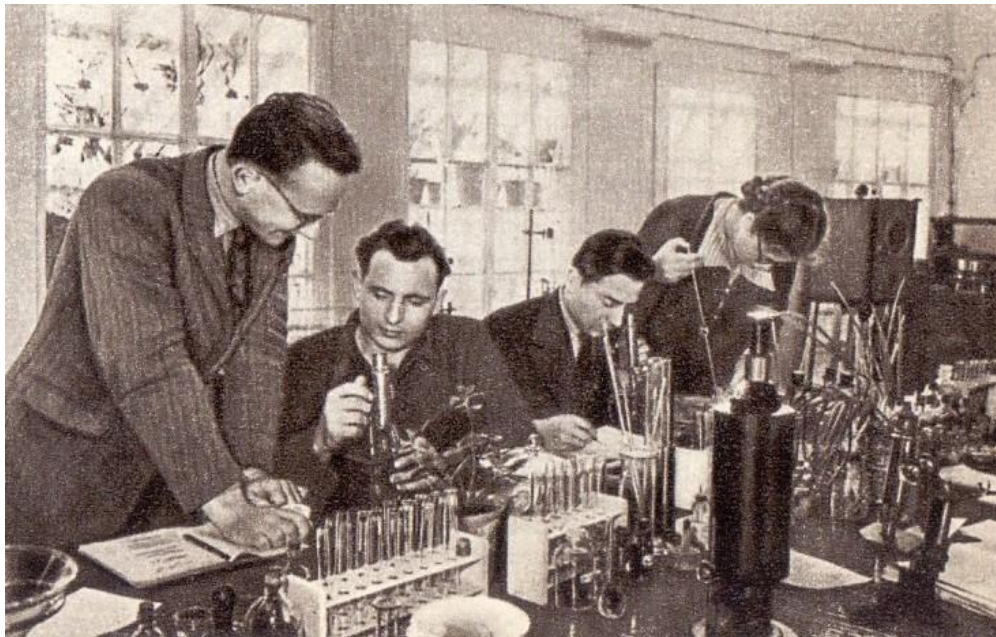
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/mach.html>

\*hypersonic= σχετικά με ταχύτητες πάνω από πέντε φορές την ταχύτητα του ήχου (Mach 5).

\*supersonic= που αφορούν ή που δηλώνει μια ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή του ήχου. (μόλις υπερηχητικά)

## 19. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ , ΜΕΛΕΤΕΣ ΣΤΗΝ ΠΡΩΗΝ ΣΟΒΙΕΤΙΚΗ ΕΝΩΣΗ

Δυο μεγάλα ιδρύματα είχαν γίνει τα κύρια κέντρα έρευνας του υδρογόνου στην πρώην Σοβιετική Ένωση: το ίδρυμα για προβλήματα στα μηχανήματα, της Ουκρανικής ακαδημίας της επιστήμης και το ερευνητικό ινστιτούτο των αυτοκινήτων, του υπουργείου των μεταφορών. Οι ερευνητές σε αυτά τα ιδρύματα πειραματίστηκαν με τα διπλά καύσιμα, υδρογόνου/βενζίνης για λειτουργία σε επιβατικά αυτοκίνητα και vans, μεσαία και βαριά φορτηγά και φορτωτές φορτηγό. Οι δοκιμές στα οχήματα σχεδιάστηκαν να προσομοιάζουν την κίνηση της πόλης και βρέθηκε ότι η κατανάλωση στην βενζίνης μειώθηκε κατά 38% και η οικονομία των καυσίμων παρουσιάζει αύξηση κατά 21% όταν τα οχήματα λειτουργούσαν με διπλά καύσιμα σε σύγκριση με αυτά που λειτουργούσαν με καθαρή βενζίνη. Σημαντική μείωση των εκπομπών του μονοξειδίου CO, HC και NOx τα οποία βρέθηκαν σε μείωση στα διπλά καύσιμα. Μειωμένες εκπομπές και πιο αποτελεσματική λειτουργία παρατηρήθηκε στα φορτηγά πετρελαίου/υδρογόνου. Επίσης το ίδρυμα γεωργίας του Λένινγκραντ είχε επίσης αναφέρει τη μετατροπή ενός τρακτέρ σε λειτουργία διπλού καυσίμου diesel / υδρογόνου



Εικόνα 19-1 Πρακτική εκπαίδευση σε σχολή της φυσιολογίας στο Ινστιτούτο Γεωργίας στο Λένινγκραντ.

Πηγή:

<http://www.oldpicz.com/leningrad-in-the-middle-of-the-20th-century/>



*Εικόνα 19-2 Το Tupolev Tu-155 είναι ένα τροποποιημένο Tu-154 (СССР-85035), το οποίο είχε χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική λύση πλατφόρμα δοκιμών καυσίμων. Αυτό είναι το πρώτο πειραματικό αεροσκάφος στον κόσμο που λειτουργεί με υγρό υδρογόνο!*

Χώρα προέλευσης : Σοβιετική Ένωση

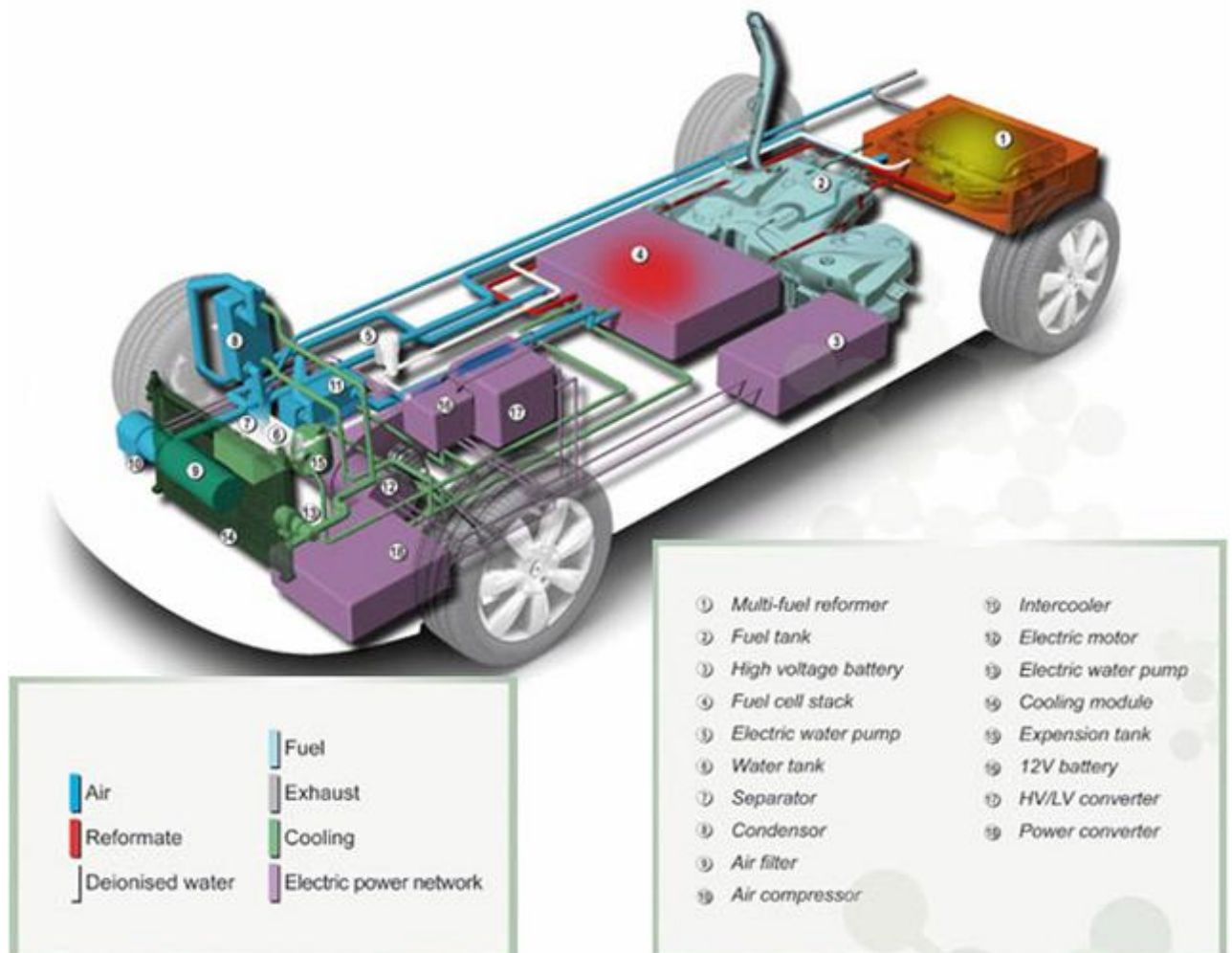
Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Tupolev\\_Tu-155](https://en.wikipedia.org/wiki/Tupolev_Tu-155)

## 20. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΝΟΣ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Παρακάτω γίνεται η περιγραφή και η παρουσίαση ενός πρωτότυπου ηλεκτρικού οχήματος με μηδενικές εκπομπές ρύπων το οποίο τροφοδοτείται από μια κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane) η οποία χρησιμοποιεί αέριο υδρογόνο. Το σύστημα κυψέλης καυσίμου περιλαμβάνει μια συστοιχία κυψέλης καυσίμου, μια δεξαμενή υδρογόνου, έναν αεροσυμπιεστή, σωληνοειδείς βαλβίδες, ρυθμιστές πίεσης, αντλία νερού, δεξαμενή νερού, εναλλάκτης θερμότητας,



αισθητήρες, προγραμματιζόμενο ελεγκτή και ρυθμιστή τάσης. Το σύστημα μπαταρίας παρέχει ισχύ στο σύστημα κατά τις περιόδους αιχμής της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας όπως η επιτάχυνση του οχήματος ή το να ταξιδεύεις με συνεχή υψηλή ταχύτητα. Η μπαταρία επίσης παρέχει ισχύ στην κυψέλη καυσίμου για να ξεκινήσει. Το όχημα έχει σχεδιαστεί, συναρμολογηθεί, δοκιμαστεί και ταξιδέψει για πάνω από 100 μίλια ( 160,93 χμ) μόνο με την κυψέλη καυσίμου με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Περαιτέρω αναβαθμίσεις θα βελτιώσουν την αύξηση στις ταχύτητας, την επιτάχυνση, την αποτελεσματικότητα του καυσίμου, την απόσταση και την αξιοπιστία.



Εικόνα 20-1 Η ξεχωριστή διάταξη των διαφορετικών συστημάτων που απαρτίζουν το υβριδικό αυτοκίνητο .

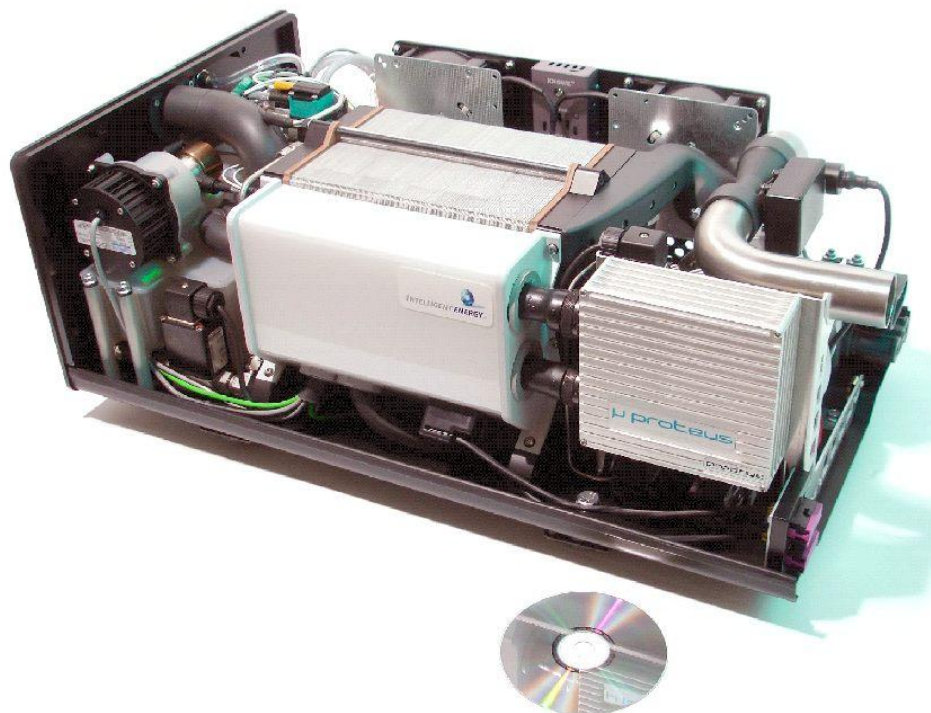
Πηγή:

<http://ssj3gohan.tweakblogs.net/blog/11556/why-fuel-cell-cars-dont-work-part-3>

Εξαιτίας της εκτεταμένης μόλυνσης του ατμοσφαιρικού αέρα σε αστικές κατά κύριο λόγο περιοχές, ο στόχος του εγχειρήματος ήταν να σχεδιάσουν και να αναπτύξουν ένα μοντέλο με μηδενικές εκπομπές ρύπων το οποίο αναφέρεται ως «πράσινο αυτοκίνητο». Η



PEM κυψέλη καυσίμου είναι πολύ αποτελεσματική, συμπαγής και με χαμηλό βάρος, λειτουργεί σε σχεδόν ατμοσφαιρική θερμοκρασία και χρησιμοποιεί το υδρογόνο – το καθαρότερο καύσιμο. Ως τέτοια η PEM υποσχεται ότι θα είναι ο καλύτερος αντικαταστάτης για τις μηχανές εσωτερικής καύσης στο πεδίο των μεταφορών.



*Εικόνα 20-2 Μια τυπική κυψέλη καυσίμου PEM από την Intelligent Energy , Ηνωμένο Βασίλειο.*

Πηγή:

<http://www.contactmagazine.com/Issue82/Future-3.html>

παρόλο που η κυψέλη καυσίμου εφευρέθηκε πριν από 150 χρόνια , δεν έχει αφήσει ακόμα πλήρως τις αίθουσες των εργαστηρίων εκτός ειδικών εφαρμογών όπως τα διαστημικά προγράμματα. Μόνο πρόσφατα κυρίως λόγω περιβατολογικών ανησυχιών, οι κυψέλες καυσίμου γενικά, και ειδικότερα οι PEM , έχουν έρθει πιο κοντά στην εμπορική τους εκμετάλλευση. Η τεχνολογία υπάρχει παρότι χρειάζεται ακόμα κάποιες βελτιώσεις, αλλά κατά κύριο λόγο απαιτείται ανάπτυξη της αγοράς και των υποδομών. Ο απόλυτος στόχος του εγχειρήματος είναι να βγάλει τις κυψέλες καυσίμου από τα εργαστήρια και να τις φέρει στην αγορά για χρήση στις μεταφορές καθώς και για καταναμημένη στατική παραγωγή ενέργειας .

## 20.1. ΤΟ ΣΩΜΑ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

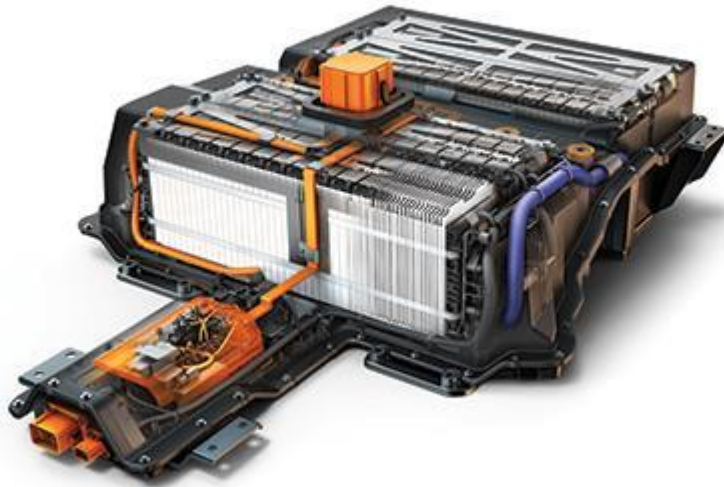
Το υψηλής αντοχής, χαμηλού βάρους, όπου το όχημα στο οποίο σασί είναι ενιαίο με το σώμα είναι κατασκευασμένο από πυρήνα πολυανθρακικό αφρού και προηγμένα σύνθετα υλικά. Το υλικό είναι αδιαπέραστο στη διάβρωση, δεν σκουριάζει, και θα διαρκέσει επ' αόριστον. προηγμένα σύνθετα υλικά είναι πλήρως ανακυκλώσιμα μπορεί πραγματικά να αλέθονται και να επαναχρησιμοποιηθούν. Το βάρος του σώματος το οποίο χρησιμοποιεί το «πράσινο αυτοκίνητο» είναι περίπου 185 λίβρες (83,91 κιλά).

## 20.2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΚΤΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.

Ο 35 ίππων κινητήρας είναι αερόψυκτος, DC, χωρίς ψήκτρες και μπορεί να προσφέρει μια σταθερή ροπή των 650 λιβρών (294.83 κιλά) από τα 0 στα 3,300 rpm. Η μέγιστη ταχύτητα είναι 4,000 rpm και η μέγιστη απόδοση 95%. Αυτός ο κινητήρας επιλέχτηκε λόγω ότι είναι ελαφρύς 40 λίβρες ( 18,14 κιλά) και συμπαγές. Επιπλέον ο ελεγκτής του κινητήρα ζυγίζει άλλες 40 λίβρες ( 18,14 κιλά) .

## 20.3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ

Το σύστημα μπαταριών αποτελείται από δέκα 12V μπαταρίες που είναι εγκατεστημένες για να παρέχουν ισχύ εκκίνησης στην κυψέλη καυσίμου και βοηθητική ισχύ για επιτάχυνση. Οι μπαταρίες είναι οξέος μολύβδου, σφραγισμένες, χωρίς συντήρηση, πηγμένο τύπο ηλεκτρολύτη. Κάθε μπαταρία ζυγίζει 66 λίβρες (30 κιλά) και σύμφωνα με τον κατασκευαστή μπορεί να δώσει 25 Amps για 200 min (1 kW-hr ενέργειας) όταν φορτιστούν πλήρως.



*Εικόνα 20-3 Σύστημα μπαταριών για οχήματα με κυψέλη καυσίμου*

Πηγή:

<http://www.compositesworld.com/articles/the-markets-fuels-cells-and-batteries-2016>

#### 20.4. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΙΣΧΥΟΣ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Το «πράσινο αυτοκίνητο» περιέχει τις συστοιχίες της κυψέλης καυσίμου και τα υποσυστήματά του, τα οποία είναι :

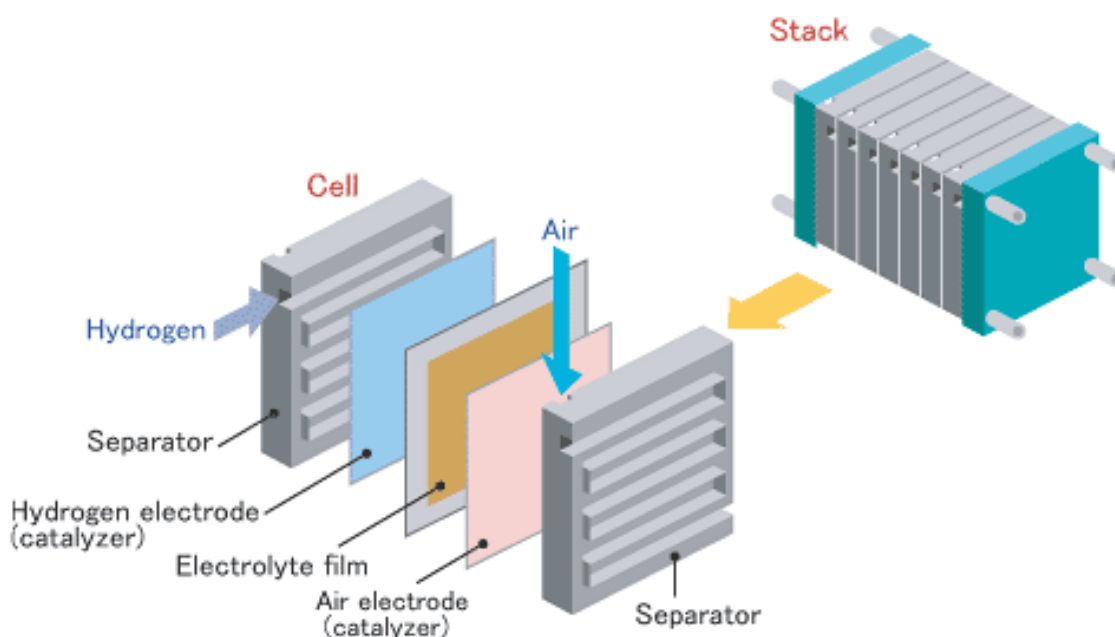
- Αποθήκευση καυσίμου και διαχείριση υποσυστήματος
- οξειδωτικό υποσύστημα διαχείρισης
- υποσύστημα διαχείρισης νερού
- υποσύστημα ρύθμισης της τάσης
- υποσυστήματος ελέγχου και παρακολούθησης

οι συστοιχίες κυψέλης καυσίμου είναι συνδεδεμένες ηλεκτρικά στη σειρά και μηχανικά είναι συνδεδεμένες παράλληλα.

## 20.5. ΣΥΣΤΟΙΧΙΕΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Η PEM κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιεί ένα στερεό, επιδιορθώσιμο ηλεκτρολύτη και εκθέματα χαμηλή θερμοκρασία και πίεσης λειτουργίας, ταχεία εκκίνηση και ταχείας απόκριση ανεφοδιασμού. Μια συστοιχία κυψέλης καυσίμου απαρτίζεται από μια σειρά κυψελών διαχωρισμένων από διπολικές πλάτες που είναι 0,84 ft<sup>2</sup> (0.078 m<sup>2</sup>) και είναι φτιαγμένες από γρανίτη με ένα πολυμερές συνδετικό το οποίο παράγει ένα ανθεκτικό στη διάβρωση υλικό.

Κάθε συστοιχία στο «πράσινο αυτοκίνητο» περιέχει 60 κυψέλες από το σύνολο των 180 κυψελών. Αρχικά, το σύστημα κυψέλης καυσίμου σχεδιάστηκε να περιέχει 2 συστοιχίες, 86 κυψελών η κάθε μία. Παρόλα αυτά δυσκολίες στην κατασκευή συστοιχίας με περισσότερες από 60 κυψέλες και έτσι αποφασίστηκε να κατασκευάσουν 3 συστοιχίες με 60 κυψέλες η κάθε μια.



Εικόνα 20-4 Η σύνθεση μιας Κυψέλης καυσίμου και μια συστοιχία

Πηγή:

[http://www.jari.or.jp/Portals/0/jhfc/e/beginner/about\\_fc/index.html](http://www.jari.or.jp/Portals/0/jhfc/e/beginner/about_fc/index.html)

## 20.6. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ

Η κυψέλη καυσίμου απαιτεί καθαρό υδρογόνο (καθαρότητας τουλάχιστον 99,9%). Το σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου είναι συμπιεσμένο αέριο υδρογόνου σε μέτρια πίεση αποθήκευση των 3.000 psig (206.8 bar) σε ένα σύνθετο δοχείο πίεσης.

Η κατανάλωση καυσίμου στην συστοιχία των κυψελών καυσίμου ( σε κυβικά πόδια ανά ώρα) σε συνάρτηση με το ρεύμα σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση, προέρχεται από τον νόμο του Faraday:

$$FC=0.0159 (I+ I_d) N_{cell}$$

όπου:

I= ρεύμα (Amps)

$I_d$ = απώλεια ρεύματος λόγω διάχυσης του υδρογόνου και του οξυγόνου διαμέσου της μεμβράνης \*  $I_d=6,5$  Amps (υπολογισμένο από το νόμο του Faraday βασισμένο σε πειραματικά καθορισμένα ποσοστά διάχυσης

$$N_{cell}= \text{αριθμός των κυψελών} * N_{cell}=180$$

Σχεδόν 10 kW χρειαζόμαστε για την συνεχή κίνηση του αυτοκινήτου με 30 mph (48.28 kph) μόνο με την ισχύ της κυψέλης καυσίμου, υποθέτοντας ότι η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη, η ισχύς από την κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιείται μόνο για να λειτουργήσει ο κύριος ηλεκτρικός κινητήρας. Οι συστοιχίες κυψέλης καυσίμου παράγει 10 kW στα 77 amps και 130 V. Επιπλέον η υπολογισμένη κατανάλωση καυσίμου είναι 239 ft<sup>3</sup> ή 6.768 (m<sup>3</sup>/hour). Η κατανάλωση καυσίμου ανά μίλι ταξιδιού είναι με σταθερή ταχύτητα 30 mph (48.28 kph) 8scf/mile ή 0.2265 (m<sup>3</sup>/hour). Από την άποψη της ενέργειας σχεδόν 56 mprg ή 0.042 l / km για βενζινοκίνητο όχημα. Από τότε που η αποθήκευση υδρογόνου στο όχημα είναι 413 scf ή 11,69 (m<sup>3</sup>) ή μεγαλύτερη απόσταση που μπορεί να διανύσει το όχημα με ταχύτητα 30 mph (48.28 kph) είναι 51,5 μίλια ή 82.88 χμ αν το όχημα κινείται μόνο με τις κυψέλες καυσίμου. Επιπλέον μια συστοιχία μπαταριών έχει δυνατότητα χωρητικότητας 35 Ah τα οποία προσθέτουν 18,5 μίλια ή 30 χμ και έτσι κάνει το όχημα να έχει αυτονομία 70 μίλια ή 112,65 χμ με 30 mph (48.28 kph). Για οδήγηση στην πόλη η προβλεπόμενη απόσταση η οποία πάρηκε από ένα μοντέλο σε υπολογιστή είναι 60 μίλια ή 96,56 χμ.

## 20.7. προδιαγραφές κυψελών καυσίμου

Πίνακας 20-1 προδιαγραφές

Κατασκευαστής	energy partners
Τύπος	PEM
Μεμβράνη	Nafion 115
υλικό συλλέκτη	γραφίτη, με συνδετικό υλικό
Αντίδραση	Υδρογόνο/αέρας
ονομαστική ισχύς εξόδου	21kW
ονομαστική ισχύ τάσης εξόδου	126 volts
ονομαστική πυκνότητας εξόδου ρεύματος	200 amps/ft <sup>2</sup>
Ονομαστική τάση κυψέλης	0,7 V
Αποτελεσματικότητα συστοιχίας εξόδου	54% LHV
Περιοχή δράσης	0,078 m <sup>2</sup>
Μέση θερμοκρασία λειτουργίας	51,6 degrees Celsius
πίεσης αντιδρώντων	20 psig (1.37 bar)
Αριθμός κυψελών	60 ( η στιβάδα)
Αριθμός στιβάδων	3
Διαστάσεις στιβάδων	35,59*35,56*60,96 cm
Βάρος στιβάδων	104,32 kg η κάθε μία (312,97 kg συνολικά)

## 20.8. Επιδόσεις του αυτοκινήτου

Πίνακας 20-2 επιδόσεις

Μέση ταχύτητα ταξιδιού	30 miles - 48,28 χμ
Ηλεκτρική ισχύς που απαιτείται για την ταχύτητα ταξιδιού	10 kW
Μέγιστη ταχύτητα	60 miles - 96,56 χμ/ω
Επιτάχυνση 0-30miles - 48,28 χμ	10 sec
Κατανάλωση καυσίμου σε ταχύτητα ταξιδιού	0,14 m <sup>3</sup> / km



Αυτονομία με κανονική ταχύτητα	112,65 χμ
Αυτονομία στο αστικό οδικό κύκλο	96,56 χμ.
Χρόνος ανεφοδιασμού	5-10 λεπτά
Χρόνος εκκίνησης/σβησίματος	15sec/1sec
εκπομπές αέριων	11%O <sub>2</sub> , 84%N <sub>2</sub> , 5%H <sub>2</sub> O
Εκπομπές υγρών	H <sub>2</sub> O: 0.15 lit/mile
Θόρυβος	85db στο 1 μέτρο
Ασφάλεια	Κανένα ατύχημα ή επικίνδυνη κατάσταση

Η πρώτη φάση έχει ολοκληρωθεί και η δεύτερη φάση είναι έτοιμη να ξεκινήσει. Πρωταρχικός στόχος της θα είναι να βελτιωθεί η κυψέλη καυσίμου και όλα τα υποστηρικτικά συστήματα. Ο τελικός στόχος είναι να προάγει την τεχνολογία της PEM κυψέλης καυσίμου και να επιταχύνει την εμπορευματοποίηση, καθιστώντας το προσιτό σε όλες τις εφαρμογές που απαιτούν μια καθαρή και αποδοτική πηγή ενέργειας.

## 20.9. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ

Παρ' όλο που τα «πράσινα» αυτοκίνητα έχουν αποδείξει επιτυχώς την ιδέα μιας κυψέλης καυσίμου με μηδενικές εκπομπές, η απόδοση και η παρουσίασή τους μπορεί να ενισχυθεί περαιτέρω. Η ακόλουθη είναι μία λίστα με τα πεδία στα οποία υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης:

- ❖ στοιβάδες κυψελών καυσίμου: πιο αποδοτικές, πιο αξιόπιστες, βελτίωση της θερμότητας και της διαχείρισης του νερού, χαμηλότερη πτώση πίεσης, ικανότητα να λειτουργεί με χαμηλή πίεση του αέρα.
- ❖ Μοτέρ κίνησης: μεγαλύτερη ισχύ, υψηλότερες rpm (σ.α.λ.), καλύτερη αποτελεσματικότητα.
- ❖ Αεροσυμπιεστής: πιο αποτελεσματικός, μεταβλητή ταχύτητα κινητήρα, χαμηλότερο επίπεδο θορύβου.

- ❖ Μείωση του βάρους του οχήματος: μείωση των αριθμών των στοιβάδων, μείωση του αριθμού των μπαταριών, εξάλειψη απαίτηση μετάδοσης, τη βελτιστοποίηση του εξοπλισμού υποστήριξης.
- ❖ Αποθήκευση υδρογόνου: αύξηση του μεγέθους και βελτίωση της πυκνότητας αποθήκευσης (Χωρίς να διακυβεύεται η ασφάλεια).
- ❖ MPC: πιο αξιόπιστος, απομόνωση όλων των ενδείξεων αναλογική τάση κυψελών καυσίμου από τον ελεγκτή, μείωση της πολυπλοκότητας μειώνοντας τον αριθμό των σημάτων παρακολούθησης (εισόδου) χωρίς να θυσιάζεται η ασφάλεια.



Εικόνα 20-5

\*MPC= βασισμένο σε μικροεπεξεργαστή προγραμματιζόμενου ελεγκτή

Ο οποίος παρουσιάζει τρεις βασικές λειτουργίες:

- Ξεκινάει το σύστημα ισχύος κυψέλης καυσίμου
- Παρακολουθεί το σύστημα ισχύος κυψέλης καυσίμου για να εξασφαλιστεί ότι είναι εντός ενός προκαθορισμένου λειτουργικού πλαισίου
- Κλείνει το σύστημα ισχύος κυψέλης καυσίμου σε περίπτωση οποιασδήποτε αστοχίας του συστήματος

Μια ασφαλής λειτουργία τερματισμού είναι το αποτέλεσμα της υψηλής θερμοκρασίας της συστοιχίας, υψηλή ή χαμηλή πίεση στις συστοιχίες, χαμηλής τάσης στις συστοιχίες , χαμηλή τάση στην κυψέλη, υψηλή διαφορά τάσης ανάμεσα στις γειτονικές κυψέλες, χαμηλή ροή ρευστού, χαμηλής στάθμης του νερού ψύξης. Η εκκίνηση και το σταμάτημα περιλαμβάνει την ενεργοποίηση / απενεργοποίηση των αντλιών και των πηνίων.



Εικόνα 20-6 Τύπος ενός MPC (Microprocessor-based programmable controller)

Πηγή:

<http://www.indiamart.com/columbuselectronics/controllers.html#microprocessor-based-pid-controllers>

## 21. ΤΟΥΤΑ ΜΙΡΑΙ : ΤΟ ΝΕΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟΚΙΝΗΤΟ ΤΟΥ 2016!

Το Toyota Mirai (που σημαίνει μέλλον στα ιαπωνικά) είναι ένα από τα πρώτα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με κυψέλη υδρογόνου που μπαίνει σε εν σειρά παραγωγή και θα πωλείται κανονικά σε ιδιώτες πελάτες – αντί να παρέχεται με βραχυχρόνια μίσθωση και οι πελάτες να πρέπει να το επιστρέψουν, όπως γινόταν μέχρι τώρα.



*Εικόνα 21-1 Το Toyota mirai κέρδισε το βραβείο πράσινου αυτοκίνητου του 2016*

Πηγή:

<http://www.motortrend.com/cars/toyota/mirai/2016/>

Όταν οι πωλήσεις ξεκινήσουν στην Ευρώπη τον επόμενο μήνα, το ξεχωριστό σε εμφάνιση σεντάν θα διατίθεται σε περίπου διπλάσια τιμή από το υβριδικό Prius Plug-In (66.000 ευρώ χωρίς ΦΠΑ).

Η τιμή αυτή δείχνει υψηλή, αλλά το Mirai είναι ίσως το πιο προηγμένο τεχνολογικά αυτοκίνητο δρόμου σήμερα στην αγορά. Επιπλέον οι υποψήφιοι πελάτες θα πρέπει να υπολογίζουν και τις εκάστοτε κρατικές επιδοτήσεις καθώς την εργοστασιακή εγγύηση 5 ετών/100.000 km που περιλαμβάνει και οδική βοήθεια.

Επίσης η Toyota προσφέρει το Mirai έναντι μηνιαίου μισθώματος για 4 χρόνια και 100.000 km, πράγμα που το καθιστά ενδιαφέρουσα πρόταση, ειδικά για όσους ζουν κοντά σε πρατήριο διάθεσης υδρογόνου (στη Γερμανία, Δανία ή Μ. Βρετανία κυρίως).

Μην περιμένετε βέβαια το Mirai να πάρει αντίστοιχο μερίδιο αγοράς με το Prius. Με την ετήσια παραγωγή να μην ξεπερνά συνολικά τα 700 αυτοκίνητα, οι μεγάλες ευρωπαϊκές αγορές το πολύ να πάρουν 10-20 κομμάτια η κάθε μία (στην Ευρώπη θα διατεθούν αρχικά 50-100 αυτοκίνητα το χρόνο).

Το σημείο εκκίνησης για το Mirai είναι το Prius Plus. Τα δύο μοντέλα έχουν την ίδια πλατφόρμα από ασάλι υψηλής αντοχής, το ίδιο μεταξόνιο των 2.780 mm και την ίδια ανάρτηση με γόνατα McPherson μπροστά και διπλά ψαλίδια πίσω.

Με τα υπερβολικά εξωτερικά χαρακτηριστικά του, όπως οι δύο μεγάλοι αεραγωγοί που δεσπόζουν στο εμπρός μέρος και τα ίδια σχήματος και μεγέθους

πίσω φανάρια, το Mirai δείχνει σίγουρα ξεχωριστό. Είναι και αρκετά μεγάλο σε διαστάσεις, με μήκος 4.890, πλάτος 1.815 και ύψος 1.535 mm. Καθώς δεν υπάρχουν καυτές εξατμίσεις για να χωροθετηθούν, η Toyota έχει καλύψει όλο το κάτω μέρος με μια επίπεδη ποδιά. Παρ' όλα αυτά, ο αεροδυναμικός συντελεστής  $Cd=0,29$  είναι μέτριος.

Το Mirai κινείται από ένα ηλεκτρικό μοτέρ 154 ίππων και 34,1 kgm ροπής. Πρόκειται στην ουσία για τον ηλεκτροκινητήρα του Lexus 450h τοποθετημένο εγκάρσια στο εμπρός μέρος μαζί με τα ηλεκτρονικά ισχύος του. Η κίνηση μεταδίδεται στους εμπρός τροχούς μέσω ενός κιβωτίου μιας μόνο σχέσης.

Η ενεργειακή κυψέλη, που χρησιμοποιεί οξυγόνο από την ατμόσφαιρα και υδρογόνο από το ρεζερβουάρ για να δημιουργήσει ρεύμα για τον ηλεκτροκινητήρα, είναι τοποθετημένη κάτω από τα μπροστινά καθίσματα. Είναι κατασκευασμένη από την Toyota που λέει ότι έχει ειδική απόδοση 2,0 kW/kg – 50% παραπάνω από την πρώτη ενεργειακή κυψέλη της εταιρείας, που παρουσιάστηκε το 2008.

Βασικός παράγοντας για την υψηλή απόδοση είναι η πατενταρισμένη 3D σχεδίαση των κυψελών, που λέγεται ότι απομακρύνει το παραγόμενο νερό από την επιφάνεια του ηλεκτροδίου ταχύτερα απ' ό,τι στις παλιότερες κυψέλες. Έτσι, βελτιώνεται η ροή του οξυγόνου προς την επιφάνεια του καταλύτη και αυξάνεται η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Η ενεργειακή κυψέλη, που βρίσκεται μέσα σε μια θήκη από τιτάνιο και ζυγίζει μόνο 57 kg, μπορεί να ξεκινάει σε θερμοκρασίες μέχρι και -30 βαθμών Κελσίου. Η Toyota υποστηρίζει επίσης ότι έχει διάρκεια ζωής αντίστοιχη με εκείνη ενός συμβατικού κινητήρα εσωτερικής καύσης. Θα μπορεί να λειτουργεί έως και για 500.000 km πριν χρειαστεί γενική επισκευή.

Δύο ξεχωριστές κυλινδρικές δεξαμενές, από ανθρακόνημα με εξωτερική προστατευτική επίστρωση από πολυεστέρα, χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση του υδρογόνου. Η μία είναι τοποθετημένη κάτω από τα πίσω καθίσματα και η άλλη πίσω από αυτά. Και οι δύο μαζί έχουν συνολική χωρητικότητα 122,4 λίτρων ή 4,9 kg υδρογόνου υπό πίεση 700 bar. Η ποσότητα αυτή φτάνει θεωρητικά για να καλυφθούν 550 km, ενώ για το γέμισμα των δεξαμενών αρκούν 3-5 λεπτά.

Η σχετικά μικρή μπαταρία νικελίου-υδριδίου μετάλλου (NiMH) των 1,6 kWh χρησιμοποιείται κυρίως ως buffer καθώς η ενεργειακή κυψέλη δεν έχει άμεση απόκριση στο γκάζι. Η μπαταρία αποθηκεύει ενέργεια που ανακτάται κατά το φρενάρισμα ή παράγεται από την κυψέλη, και βρίσκεται τοποθετημένη πάνω από την πίσω δεξαμενή υδρογόνου.



Εικόνα 21-2 Το εσωτερικό του Toyota mirai

Πηγή:

<https://ssl.toyota.com/mirai/fcv.html>

### 21.1. ΠΩΣ ΕΙΝΑΙ ΣΤΗΝ ΟΔΗΓΗΣΗ;

Η εντυπωσιακή εξωτερική σχεδίαση συνεχίζεται και στο εσωτερικό του Mirai. Το μοντέρνο ταμπλό φιλοξενεί δύο οθόνες TFT: μία κάτω από το πλαίσιο του παρμπρίζ, με το ταχύμετρο και τις ενδείξεις κατανομής της ισχύος, και μία στο κέντρο, ίδια με του Prius, για τον έλεγχο του συστήματος infotainment. Οι υπόλοιποι διακόπτες (και το «κλειδί» εκκίνησης) προέρχονται από άλλα, φθηνότερα Toyota.

Η ποιότητα υλικών της καμπίνας είναι επίσης παρόμοια με του Prius 3ης γενιάς, με ποικιλία σκληρών και μαλακών πλαστικών. Η συναρμογή είναι προσεγγμένη και στιβαρή, αλλά η γενική εντύπωση δεν είναι απόλυτα ανάλογη με την τιμή του αυτοκινήτου.

Με τη δεξαμενή υδρογόνου κάτω από το κάθισμα, κάθεσαι σχετικά ψηλά, αλλά αυτό σου παρέχει καλή ορατότητα διευκολύνοντας τους ελιγμούς. Χάρη στο μακρύ μεταξόνιο, όλα τα στοιχεία του συστήματος κίνησης έχουν βολευτεί αφήνοντας επαρκή χώρο στα πίσω καθίσματα, που είναι μόνο δύο αλλά πολύ αναπαυτικά με μεγάλο υποβραχιόνιο ανάμεσά τους. Η πίσω δεξαμενή υδρογόνου όμως και η μπαταρία έχουν περιορίσει το χώρο αποσκευών στα 361 λίτρα, στο επίπεδο δηλαδή ενός Auris.

Δεδομένης της πολυπλοκότητας της τεχνολογίας του, το Mirai είναι εξαιρετικά εύκολο στην οδήγηση. Όπως σε όλα τα σύγχρονα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, πατάς το μπουτόν εκκίνησης, βάζεις τον κοντό λεβιέ πίσω στη θέση D και ξεκινάς με ένα χάιδεμα στο γκάζι.



Η επιτάχυνση είναι ιδιαίτερα ομαλή και σχεδόν αθόρυβη, αν εξαιρέσουμε έναν ελαφρό συνθετικό ήχο «τετρακύλινδρης μοτοσυκλέτας» από τα μεγάφωνα του ηχοσυστήματος όταν πατάς πολύ γκάζι. Παρότι το Mirai ζυγίζει 1.850 kg, πετάγεται γρήγορα στα ξεκινήματα, πράγμα χρήσιμο κι ευχάριστο μέσα στην πόλη. Για τα 0-100 km/h χρειάζεται 9,6", αλλά ο ρυθμός επιτάχυνσης μειώνεται σταδιακά στη συνέχεια και η τελική ταχύτητα δεν ξεπερνά τα 178 km/h.

Με τα περισσότερα βαριά μέρη του συστήματος κίνησης τοποθετημένα χαμηλά, το Mirai έχει μεγαλύτερη ευελιξία και σταθερότητα απ' ό,τι θα περίμενες. Το τιμόνι δεν έχει πολλή αίσθηση, αλλά είναι άμεσο σε απόκριση και η ανάρτηση ελέγχει αποτελεσματικά το αμάξωμα ώστε το αυτοκίνητο να έχει προοδευτικές αντιδράσεις. Αναμενόμενα, λόγω του μεγάλου φερόμενου βάρους, το Mirai είναι και άνετο, απορροφώντας μεγάλες και μικρές ανωμαλίες του δρόμου πολύ πιο αποτελεσματικά από το Prius.

Η Toyota θεωρεί ότι η τεχνολογία των ενεργειακών κυψελών ταιριάζει πιο πολύ σε μεγαλύτερα αυτοκίνητα και μακρύτερα ταξίδια, παρά για την κίνηση μέσα σε πόλη, για την οποία πιο κατάλληλα είναι τα επαναφορτιζόμενα υβριδικά.

Η θεωρία αυτή επαληθεύεται εδώ στην πράξη. Με διπλά τζάμια στα πλευρικά του παράθυρα και μια ηλεκτρονική συσκευή που εξουδετερώνει το θόρυβο κύλισης, το Mirai απομονώνει αποτελεσματικά τους επιβάτες του από τις ηχητικές ενοχλήσεις και χάρη στον ελαστικό χαρακτήρα του συστήματος κίνησης είναι πραγματικά χαλαρωτικό στην οδήγηση.

Αυτό που του λείπει είναι ο ξεχωριστός χαρακτήρας. Όπως όλα σχεδόν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, το νέο Toyota είναι πολύ μονοδιάστατο για να συναρπάσει τον οδηγό του. Σίγουρα είναι εξαιρετικά αποτελεσματικό, αλλά δεν είναι το αυτοκίνητο που λαχταράς να οδηγήσεις απλά για τη χαρά της οδήγησης. Αυτό που έχει σημασία όμως είναι ότι, καθώς η εξάτμισή του εκπέμπει μόνο νερό (που το... βλέπεις όταν το ακολουθείς ενώ γκαζώνει), το Mirai αποτελεί μια θαρραλέα περιβαλλοντική πρόταση που πολλοί θα σπεύσουν να μιμηθούν, ιδίως μετά το κλίμα που δημιούργησε το "dieselgate".



*Εικόνα 21-3 Η κυψέλη καυσίμου , το μηχανικό τμήμα του Toyota mirai*

Πηγή:

<http://www.caradvice.com.au/387078/toyota-mirai-hydrogen-fuel-cell-vehicle-lands-on-australian-roads/>

## 21.2. ΝΑ ΤΟ ΑΓΟΡΑΣΩ;

Το Mirai είναι ένα επίτευγμα που αποτελεί ορόσημο και σίγουρα θα επηρεάσει τον τρόπο που οι ανταγωνιστές της Toyota θα σχεδιάσουν το ηλεκτροκίνητο μέλλον τους. Προσφέρει όλα τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου με μπαταρία, χωρίς την ανάγκη να το φορτίζεις επί ώρες. Από την άλλη βέβαια, αν εξαιρέσουμε τη Γερμανία με τα 50 πρατήριά της (που θα γίνουν 400 μέχρι το 2023), η υποδομή διανομής υδρογόνου είναι σε βρεφικό στάδιο στην Ευρώπη και εντελώς ανύπαρκτη στην Ελλάδα.

Όπως και το πρώτο Prius λοιπόν, έτσι και το Mirai θα απευθυνθεί στους εραστές της πρωτοποριακής τεχνολογίας και σε εταιρείες και κρατικές υπηρεσίες που θέλουν να προβάλουν μια φιλική προς το περιβάλλον εικόνα. Πάντως, καθώς η αρχική παραγωγή του θα είναι πολύ περιορισμένη, θα παραμείνει ένα σπάνιο θέαμα στους δρόμους, μια βιτρίνα για την προηγμένη τεχνολογία της Toyota.

## 21.3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΑ...

Ένα απόλυτα λειτουργικό, εύκολο κι ευχάριστο στην οδήγηση αυτοκίνητο, που περιορίζεται όμως από την υψηλή τιμή του και την έλλειψη υποδομής διάθεσης υδρογόνου. Τιμή € 66.000 (στην Ευρώπη, χωρίς ΦΠΑ) Τεχνολογία Ενεργειακή κυψέλη υδρογόνου και ηλεκτροκινητήρας 154 PS, 34,1 kgm, μπαταρία NiMH 1,6 kWh, κιβώτιο 1 σχέσης, κίνηση στους εμπρός τροχούς το αυτοκίνητο να έχει αυτονομία 300 μιλίων (483 χλμ), με τον ανεφοδιασμό του ντεπόζιτου με υδρογόνο, να διαρκεί λιγότερο από 5λεπτά.

## 21.4. ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ

Πίνακας 21-1 επιδόσεις Toyota mirai

<b>0-100 km/h = 9,6"</b>
<b>Τελική ταχύτητα = 178 km/h</b>
<b>Μέση κατανάλωση = 0,76 kg H2/100km</b>
<b>Αυτονομία = 550 km</b>
<b>Εκπομπές CO2 = 0 g/km</b>

<b>Διαστάσεις = 4.890 x 1.815 x 1.535 mm</b>
<b>Μεταξόνιο = 2.780 mm</b>
<b>Χώρος αποσκευών = 361 lt</b>
<b>Βάρος = 1.850 kg</b>

Πηγή:

Πληροφορίες από το [drive.gr](http://www.drive.gr)

<http://www.drive.gr/test-drives/apostoli/odigoyme-neo-toyota-mirai>

## 22. ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Μετρολογία είναι η επιστήμη της μέτρησης. Μετρολογία περιλαμβάνει όλες τις θεωρητικές και πρακτικές πτυχές της μέτρησης.

Οι κυψέλες καυσίμου προσφέρουν μεγάλες προσδοκίες ως πιθανοί αντικαταστάτες ή υβριδικούς εταίρους για αεριοστροβίλους, κινητήρα εσωτερικής καύσης και μπαταρία τεχνολογίες, αλλά η εμπορευματοποίηση παρεμποδίζεται από έναν αριθμό παραγόντων τεχνολογικών και πολιτικών.

### 22.1. ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ

Πάντα θα πρέπει να γίνονται οι απαιτούμενοι έλεγχοι στις νέες εφαρμογές και τεχνολογίες γύρω από τις κυψέλες καυσίμου. Ωστόσο, όταν αυτό δεν είναι εφικτό (δηλαδή λόγω του προϋπολογισμού ή επιστημονική / τεχνικούς περιορισμούς), αυτό θα πρέπει σαφώς αναφέρεται στο πρωτόκολλο JRP ( Κοινά Ερευνητικά Προγράμματα).

Σκοπός των JRP είναι :

1) Η ανάπτυξη και επικύρωση μεθόδων μέτρησης για τον προσδιορισμό της απόδοσης των κυψελών καυσίμου. Αυτές οι μέθοδοι θα πρέπει να είναι κατάλληλες για διάφορα σχέδια των κυψελών καυσίμου και τα είδη καυσίμων, και θα πρέπει να περιλαμβάνουν και την πλήρη αβεβαιότητα στους προϋπολογισμούς.

2) Οι μετρήσεις για την υποστήριξη της τυποποίησης και την ανάπτυξη καλύτερων κυψελών καυσίμου: Ανάπτυξη και επικύρωση τεχνικών μέτρησης οι οποίες δίνονται παρακάτω.

Τα Κοινά Ερευνητικά Προγράμματα (JRPs) που υποβλήθηκαν για το θέμα αυτό θα πρέπει να αναπτύξουν ανιχνεύσιμες μετρήσεις των κυψελών καυσίμου για τις ακόλουθες παραμέτρους: θερμοκρασία, σύνθεση αερίου, ποσοστό της ροής (συμπεριλαμβανομένων μικροροϊκή ροής), υγρασία, ηλεκτρικό δυναμικό, την αντίσταση, τις τρέχουσες πυκνότητες, και την ακεραιότητα υλικού. Η JRP πρέπει επίσης να αναπτύξει επί τόπου ή / και εντοπισμένη μέτρηση των κρίσιμων παραμέτρων κυψελών καυσίμου για να βελτιωθεί το μοντέλο προσομοιώσεις που βελτιστοποιούν τα σχέδια των καυσίμων κυττάρων. Η ανάπτυξη τυποποιημένων τεχνικών κατάλληλων για την πραγματική λειτουργίας προϋποθέσεων θα επιτρέψει την απόδοση να αυξηθεί και να συμβάλει στη βελτίωση της, τις επιδόσεις και την ασφάλεια των κυψελών καυσίμου. JRPs θα πρέπει να αναπτύξουν διαδικασίες μέτρησης και υλικά αναφοράς με μειωμένη αβεβαιότητα για τη σύνθεση του καυσίμου και την ποιότητα. Ειδικό βάρος θα πρέπει να δοθεί στο υδρογόνο ως καύσιμο, δεδομένου ότι ακαθαρσίες στα καύσιμα υδρογόνου μπορούν να οδηγήσουν σε μια μείωση στη διάρκεια της ζωής και την απόδοση της κυψέλης καυσίμου. Η JRP πρέπει επίσης να έχει υπόψη πώς η γνώσεις που θα προκύψουν θα πρέπει να κοινοποιούνται σε οργανισμούς τυποποίησης όπως η ISO και η ASTM.



*Εικόνα 22-1*

Πηγή: Στοιχεία από την : Ευρωπαϊκή Ένωση των εθνικών ιδρυμάτων μετρολογίας

ENERGY 2009 – TOPIC 6

## 23. ΤΟ ΤΕΛΙΚΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ!



Εικόνα 23-1

Αυτό που απορρέει από αυτή την έρευνα για τις κυψέλες καυσίμου και το υδρογόνο που το κύριο καύσιμο τους είναι ότι αποτελεί αναμφισβήτητη την αναπόφευκτη εξέλιξη στο πεδίο των μεταφορών τόσο λόγω της όλο και αυξανόμενης ατμοσφαιρικής ρύπανσης των κλασικών μηχανών εσωτερικής καύσης όσο και λόγω της δεδομένης εξάντληση των ορυκτών πόρων που χρειάζονται αυτές για να λειτουργήσουν. Είναι ξεκάθαρο ότι ο συνδυασμός του σύγχρονου τρόπου ζωής, η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας όπου εντείνουν το απειλητικό φαινόμενο του θερμοκηπίου, μας έχουν αναγκάσει να στραφούμε τα τελευταία χρόνια σε άλλες, περισσότερο ήπιες μορφές ενέργειας. Ανάμεσά τους εντάσσεται και το υδρογόνο, το οποίο αντιμετωπίζεται ως η κορυφαία εναλλακτική πηγή ενέργειας.

Τόσο στην Ευρώπη, όσο και στις υπόλοιπες ανεπτυγμένες χώρες, έχουν εντατικοποιηθεί οι προσπάθειες για την εδραίωση της «οικονομίας του υδρογόνου», με σημαντικότερα ποσά να επενδύονται στην έρευνα και την ανάπτυξη προς αυτή την κατεύθυνση.

Οι αλλεπάλληλες αυξήσεις στη τιμή της βενζίνης έχουν φέρει σε απόγνωση τους οδηγούς ΙΧ, που πλέον αναζητούν ολοένα και περισσότερους τρόπους οικονομικότερης μετακίνησης. Δεν είναι τυχαίο ότι μέχρι πρότινος άνθιζε η αγορά των συστημάτων υγραεριοκίνησης, λόγω της χαμηλής τιμής του υγραερίου ως καύσιμο. Όμως, αυτή η μορφή κίνησης δεν κατάφερε να κερδίσει την πλειοψηφία των οδηγών, λόγω της ψυχολογικής σύνδεσης του υγραερίου με κάτι εύφλεκτο και εκρηκτικό, καθώς και κάποιων καίριων ερωτημάτων που ποτέ δεν αποσαφηνίστηκαν: Είναι ασφαλές το υγραέριο και αν ναι, πόσο ασφαλές είναι; Θα αυξηθεί η τιμή του υγραερίου κίνησης ακολουθώντας την αύξηση της

τιμής της βενζίνης και του πετρελαίου; Επειδή οι απαντήσεις σε αυτά τα ερωτήματα δεν είναι και τόσο ξεκάθαρες, η απάντηση στις συνεχιζόμενες αυξήσεις της τιμής της βενζίνης μπορεί να δοθεί μέσω της νέας εναλλακτικής μορφής υβριδικής κίνησης, την λεγόμενη «υδρογονοκίνηση».

Η υδρογονοκίνηση αποτελεί μία σχετικά πρόσφατη τεχνολογία υβριδικής κίνησης, η οποία συντελεί στην μείωση κατανάλωσης καυσίμου, με καθαρότερα παράγωγα για το περιβάλλον. Μέσω ενός σχετικά απλού στη λειτουργία συστήματος, το οποίο τροφοδοτείται με απλό αποσταγμένο νερό, επιτυγχάνεται η παραγωγή καθαρού υδρογόνου.

### 23.1. ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΕΝΟΥΜΕ...

*Η κίνηση με υδρογονοκίνηση εξασφαλίζει ότι:*

- ✓ Η καύση είναι καθαρότερη και επομένως έχουμε μείωση της κατανάλωσης.
- ✓ Έχουμε αύξηση της ιπποδύναμης και καλύτερη ανάφλεξη του βασικού καυσίμου, μέσω της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου και αύξησης του επιπέδου των οκτανίων.
- ✓ Εξασφαλίζουμε περισσότερα χιλιόμετρα ανά λίτρο, μειώνοντας παράλληλα την ποσότητα των ρύπων που απελευθερώνονται στην εξάτμιση.
- ✓ Απομακρύνονται τα υπολείμματα του άνθρακα από το εσωτερικό της μηχανής και αποτρέπεται παράλληλα η δημιουργία νέων. Εξίσου σημαντικό είναι πως τα υπολείμματα της καύσης του υδρογόνου είναι καθαρό νερό!
- ✓ Μπορεί να γίνει χρήση του Υδρογόνου σε κινητήρες βενζίνης, πετρελαίου, ακόμη και υγραερίου, χωρίς καμία απολύτως παρενέργεια στην αξιοπιστία του κινητήρα.
- ✓ Κάνουμε οικονομία στην κατανάλωση καυσίμου υψηλού επιπέδου, από 25-40%.
- ✓ Έχουμε 100% αξιοπιστία και ασφάλεια για το αυτοκίνητο.
- ✓ Έχουμε καλύτερη και οικολογικότερη απόδοση, καθώς αυξάνει τη ροπή και την ιπποδύναμη ενώ παράλληλα μειώνει τους βλαβερούς υδρογονάνθρακες που απελευθερώνονται μέσω της εξάτμισης.
- ✓ Χαμηλότερος θόρυβος του κινητήρα 25% - 30%. Το υδρογόνο επιδρά στον κύκλο καύσης. Ο κινητήρας θα ακούγεται πολύ πιο ήσυχα από ότι πριν. Αυτό οφείλεται στην λιγότερη καύση του αυτοκινήτου σας.
- ✓ Είναι το τρίτο πιο άφθονο στοιχείο στη Γη, κυρίως υπό τη μορφή νερού και υδρογονάνθρακων τύπου  $CxHy$ , έχει την υψηλότερη αναλογία ενέργειας προς βάρος από όλα τα καύσιμα. Συγκεκριμένα, 1 kg υδρογόνου περιέχει την ίδια ποσότητα ενέργειας με 2,1 kg φυσικού αερίου ή 2,8 kg βενζίνης, ενώ κατά την καύση του παράγεται απλά και μόνο ...νερό(!)





Εικόνα 23-2

## 23.2. ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Η Ελλάδα θα μπορούσε να γίνει η νέα παγκόσμια δύναμη στην διαμορφούμενη «Οικονομία του Υδρογόνου», η οποία αλλάζει τους κανόνες του ενεργειακού παγκόσμιου χάρτη. Αποτελεί την μεγάλη ευκαιρία της Ελλάδας, καθώς το νερό, ο αέρας και ο ήλιος που υπάρχουν σε αυτήν βρίσκονται σε αφθονία. Όταν έχεις ήλιο, νερό και αέρα, τότε έχεις τα πάντα.. και καθώς διαθέτουμε όλα αυτά τα πλεονεκτήματα, οφείλουν οι πολιτικοί μας κατά τη δύσκολη τούτη κατάσταση στην οποία έχει περιέλθει η χώρα μας, να δώσουν κίνητρα και κατευθύνσεις για την πράσινη ενέργεια ώστε να «πάμε μπροστά». Για παράδειγμα, μπορούν να δώσουν οικονομικά (και όχι μόνο) κίνητρα για την ίδρυση κοινωνικών συνεταιριστικών επιχειρήσεων, που θα αξιοποιήσουν τις δυνατότητες του υδρογόνου και των άλλων ήπιων μορφών ενέργειας, εξασφαλίζοντας τοπική ανάπτυξη, δημιουργία πολλών θέσεων εργασίας, μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης και ως ένα σημείο μία διέξοδο από την πολύπλευρη κρίση την οποία αντιμετωπίζουμε. Και τούτο διότι πολύ σύντομα θα έρθει η ώρα που το νερό θα μπορέσει να αντικαταστήσει πλήρως τα ορυκτά καύσιμα τα οποία καταστρέφουν τον πλανήτη μας. Εάν γίνουν αυτά το επόμενο βήμα (το οποίο έχει πραγματοποιηθεί στην Νορβηγία) θα ήταν να δημιουργηθούν εγκαταστάσεις διανομής υδρογόνου, ανά τακτά διαστήματα τα οποία να έχουν τη δυνατότητα να κατασκευάζουν μόνα τους, αυτοματοποιημένα το υδρογόνο, εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη επεξεργασίας του σε άλλο μέρος και απαλείφοντας το κόστος μεταφοράς του. Στην ιδανική περίπτωση θα ήταν άκρος ευεργετική η τοποθέτηση φωτοβολταϊκών, ανεμογεννητριών ή σε περίπτωση που το πρατήριο βρίσκεται σε παράκτια περιοχή ακόμα και εγκατάσταση κυματικής ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό η απόκτηση των μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας που απαιτούνται για την ηλεκτρόλυση του νερού θα είναι στην ουσία δωρεάν αφού την ενέργεια θα μας την δίνει απλόχερα η φύση. Το μόνο κόστος που θα υπάρχει σε μια τέτοια εγκατάσταση θα είναι το αρχικό κόστος κατασκευής η περιοδική συντήρηση των μηχανημάτων, λειτουργώντας από εκεί και πέρα δίχως άλλη οικονομική ή περιβαλλοντική επιβάρυνση. Το ίδιο μπορεί να συμβεί και σε μη αυτοκινούμενες εφαρμογές όπως η ηλεκτρόλυση του νερού στις οικίες με ενέργεια από τα προαναφερθέντα μέσα, δηλαδή από ανανεώσιμες πηγές. Εν συνεχεία το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο στο αυτοκίνητα ή ακόμα και για οικιακή χρήση όπως τη θέρμανση του σπιτιού.

# Παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας



Εικόνα 23-3 <http://chimikoergastirio.blogspot.gr/2011/12/blog-post.html>

Ευτυχώς, στη χώρα μας υπάρχουν μεγάλα μυαλά με πολλές ιδέες σε όλα τα επίπεδα. Υπάρχει όμως και η αναγκαία πολιτική βούληση προς αυτή την κατεύθυνση; Για να πραγματοποιηθούν όλα τα παραπάνω προϋπόθεση είναι να ζούμε σε μια ευνομούμενη πολιτεία που να σέβεται τους πολίτες της και να έχει στο επίκεντρο της, όχι το κέρδος των λίγων και την αλόγιστη εκμετάλλευση των πόρων, αλλά τον ίδιο τον άνθρωπο και τις ανάγκες του, οι οποίες θα πρέπει να αποτελούν δείκτη για την κατεύθυνση και την πορεία όχι μόνο της Ελλάδας αλλά και ολόκληρης της ανθρωπότητας!



Εικόνα 23-4

## 24. ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 0-1 .....	5
Εικόνα 1-1 μοντέλο επίδειξης μιας κυψέλης καυσίμου άμεσης μεθανόλης. Η πραγματική συστοιχία κυψελών καυσίμου είναι το στρωματοποιημένο σχήμα κύβου στο κέντρο της εικόνας .....	6
Εικόνα 1-2 ατμοσφαιρική ρύπανση στο Λονδίνο .....	7
Εικόνα 1-3 τα αποθέματα πετρελαίου και ο χρόνος εξάντλησής τους .....	8
Εικόνα 2-1 Sir William Grove.....	9
Εικόνα 2-2 Francis Thomas Bacon .....	10
Εικόνα 2-3 Κυψέλη καυσίμου της NASA.....	10
Εικόνα 3-1 η intelligent energy παρουσιάζει την επόμενη γενιά κυψέλης καυσίμου μονάδας ισχύος την JSAE 2014 .....	12
Εικόνα 3-2 Διάγραμμα Κυψέλη καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης.....	13
Εικόνα 3-3 Διάγραμμα Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος .....	14
Εικόνα 3-4 Διάγραμμα μια Κυψέλης καυσίμου μεθανόλης .....	15
Εικόνα 4-1 .....	16
Εικόνα 4-2 Χένρι Κάβεντις, (Henry Cavendish) (10 Οκτωβρίου 1731 – 24 Φεβρουαρίου 1810) ήταν Βρετανός επιστήμονας, που διακρίθηκε για τη συνεισφορά του στη Φυσική και στη Χημεία.....	17
Εικόνα 4-3 ηλεκτρόλυση .....	18
Εικόνα 4-4 Έκρηξη βόμβας υδρογόνου .....	19
Εικόνα 5-1: Η αρχή του ηλεκτρολύτη .....	21
Εικόνα 5-2 δομή κυψέλης καυσίμου .....	22
Εικόνα 5-3 αντίδραση ηλεκτροδίου και φόρτιση ροής για μια κυψέλη καυσίμου ηλεκτρολύτη οξέων. τα αρνητικά ηλεκτρόνια ρέουν από άνοδο στην κάθοδο, το «συμβατικό ρεύμα» ρέει από την κάθοδο προς την άνοδο.....	23
Εικόνα 5-4 Στην άνοδο, το υδρογόνο αντιδρά, απελευθερώνοντας ενέργεια. Η αντίδραση έχει την κλασική ενεργειακή μορφή όπως αυτή φαίνεται παρακάτω.....	25
Εικόνα 5-5 Κυψέλες στη σειρά .....	26
Εικόνα 5-6 ΔΙΠΟΛΙΚΕΣ ΠΛΑΚΕΣ .....	27
Εικόνα 5-7 Διπολικές πλάκες (2 είδη) .....	28
Εικόνα 5-8 Πλάκες κυψέλης καυσίμου και τα μέρη αυτής .....	29
Εικόνα 5-9 Μέρη της κυψέλης καυσίμου .....	30
Εικόνα 5-10 Μέρη της κυψέλης καυσίμου .....	31
Εικόνα 6-1 Διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου και η λειτουργία τους .....	33
Εικόνα 6-2 Κυψέλες καυσίμου PEM (γράφημα και πραγματική εικόνα).....	34
Εικόνα 6-3 <b>Αλκαλική κυψέλη καυσίμου</b> .....	35
Εικόνα 6-4 A photo of phosphoric acid fuel cell and development team, about 1965. 36	
Εικόνα 6-5 Μια πιο σύγχρονη κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος .....	36
Εικόνα 6-6 μονάδα επίδειξης 5kWκυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου. Η μονάδα λειτούργησε για 7000 ώρες με 5 kW(SOFC) .....	37
Εικόνα 6-7 photo of molten carbonate fuel cell, 1964, for the U.S. Army .....	38
Εικόνα 6-8 Modern Molten Carbonate Fuel Cell in a T-Mobile data center in Munich 38	
Εικόνα 6-9 Οι διάφοροι τύποι των κυψελών καυσίμου, και οι εφαρμογές τους ανά είδος .....	40
Εικόνα 6-10 Power Air έχει αναπτύξει μια κυψέλη καυσίμου ψευδαργύρου-αέρα, η οποία προσφέρει πλεονεκτήματα σε σχέση με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου και τις μπαταρίες λιθίου-ιόντων. ....	41
Εικόνα 6-11 Οξειδοαναγωγής κυψέλες ροής .....	42
Εικόνα 7-1 Ο τρόπος με τον οποίο το υδρογόνο «πηγαίνει» από την δεξαμενή αποθήκευσης στην κυψέλη καυσίμου και παράγεται ηλεκτρική ενέργεια .....	45

Εικόνα 7-2 .....	47
Εικόνα 7-3 Συμπαραγωγή Ηλεκτρικής & Θερμικής Ενέργειας .....	48
Εικόνα 7-4 Διάγραμμα ροής της ενέργεια και η θέση του ρυθμιστή ισχύος σε αυτό .	49
Εικόνα 7-5 .....	50
Εικόνα 7-6 Το αυτοκίνητο έχει μια αντλία ψύξης που βρίσκεται κοντά στις συστοιχίες κυψελών καυσίμου για τη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας εντός των συστοιχιών. ....	51
Εικόνα 7-7 ηλεκτρική τεχνολογία συμπίεση.....	52
Εικόνα 7-8 Η θέση του αεροσυμπιεστή σε ένα αυτοκίνητο με κυψέλη καυσίμου.....	53
Εικόνα 7-9 Αεροσυμπιεστής για τις κυψέλες καυσίμου που είναι 20kW .....	54
Εικόνα 7-10 Κόστος συστήματος κυψελών καυσίμου ανά kW ανά έτη .....	56
Εικόνα 9-1 Εικόνα παρουσίαση της ηλεκτρόλυσης, διαχωρισμός του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο .....	59
Εικόνα 9-2 Οι χημικές διεργασίες του ενσωματωμένου μετατροπέα (μεταρρυθμιστή) .....	61
Εικόνα 10-1 Δεξαμενές υδρογόνου και παρουσίαση των εξαρτημάτων της.....	62
Εικόνα 10-2 το daimlerchryslernecar 4με κυψέλη καυσίμου.....	64
Εικόνα 10-3 Παρουσίαση του εσωτερικού / εξωτερικού μια δεξαμενής υδρογόνου και των εξαρτημάτων της.....	65
Εικόνα 10-4 Δεξαμενή αποθήκευσης για μεταλλικά υβρίδια .....	66
Εικόνα 10-5 Διαφορετικές τεχνικές αποθήκευσης υδρογόνου .....	67
Εικόνα 11-1 .....	68
Εικόνα 11-2 Το Toyota Mirai ανεφοδιάζεται σε πρατήριο υδρογόνου .....	69
Εικόνα 11-3 Γραφική παρουσίαση νερού/ηλεκτρόλυσης .....	72
Εικόνα 11-4 .....	73
Εικόνα 11-5 .....	74
Εικόνα 12-1 .....	75
Εικόνα 12-2 Δυστύχημα με το αερόπλοιο Hindenburg που ήταν γεμάτο με υδρογόνο. .....	76
Εικόνα 12-3 .....	77
Εικόνα 14-1 .....	80
Εικόνα 14-2 .....	81
Εικόνα 16-1 Λεωφορείο που λειτουργεί με κυψέλες υδρογόνου, παρουσίαση των συστημάτων και των εξαρτημάτων .....	84
Εικόνα 16-2 Δεξαμενή υδρογόνου.....	85
Εικόνα 16-3 Ένα σχήμα μιας δεξαμενής αποθήκευσης υδριδίου του υδρογόνου .....	86
Εικόνα 16-4 Ανεφοδιασμός με υδρογόνο.....	89
Εικόνα 16-5 Ανεφοδιασμός λεωφορείου με υδρογόνο .....	90
Εικόνα 17-1 Carlisle και Nicholson κατά την ηλεκτρόλυση .....	91
Εικόνα 17-2 Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί με τι διάσπαση του νερού με ηλεκτρισμό, έτσι έχουμε: .....	93
Εικόνα 17-3 Τρόποι παραγωγής υδρογόνου , και τι γίνεται μετά.....	94
Εικόνα 17-4 .....	96
Εικόνα 17-5 .....	98
Εικόνα 17-6 Ηλεκτρόλυση, η κυψέλη καυσίμου σε αντίστροφη όψη .....	100
Εικόνα 17-7 Σχέδιο Ηλεκτρόλυσης με τύπο «tank cell» .....	101
Εικόνα 17-8 Σχέδιο Ηλεκτρόλυσης με τύπο «filter-press cell» .....	101
Εικόνα 17-9 Ηλεκτρόλυσης με τύπο «filter-press cell» , η εξωτερική όψη .....	102
Εικόνα 17-10 Μονάδα ηλεκτρόλυσης νερού από την Norsk Hydro .....	103
Εικόνα 17-11 διάγραμμα ροής μιας συσκευής ηλεκτρόλυσης, βασίζεται στα σχέδια της Norsk Hydro .....	104
Εικόνα 17-12 .....	106

Εικόνα 17-13 Josiah Willard Gibbs (1839 – 1903) Αμερικάνος Θεωρητικός Φυσικός και Χημικός.....	110
Εικόνα 17-14 .....	112
Εικόνα 18-1 Jacques Alexandre César Charles: (12 Νοεμβρίου, 1746 - 7 Απρίλη του 1823) ήταν ένας Γάλλος εφευρέτης, επιστήμονας, μαθηματικός, και αεροναύτης .....	113
Εικόνα 18-2 πρώτη επανδρωμένη πτήση μπαλόνι υδρογόνου στον κόσμο το 1783. 114	
Εικόνα 18-3 Ο <b>Ανρί Ζιφάρ</b> (Henri Giffard, 8 Φεβρουαρίου 1825 - 15 Απριλίου 1882) ήταν Γάλλος μηχανικός. Το 1852, εφηύρε τον εγχυτήρα ατμού και το τροφοδοτούμενο αερόπλοιο. ....	115
Εικόνα 18-4 ένα αερόπλοιο που κατασκευάστηκε στη Γαλλία το 1852 από τον Henri Giffard, το πρώτο αερόπλοιο τροφοδοτείται και διευθύνεται για να πετάξει. ....	116
Εικόνα 18-5 το πιο επιτυχημένο Zeppelin που κατασκευάστηκε ποτέ, ήταν το LZ-127 Graf Zeppelin που πέταξε πάνω από ένα εκατομμύριο μίλια σε 590 πτήσεις, μεταφέροντας 34.000 επιβάτες, χωρίς κανένα τραυματισμό. Ήταν γερμανικής προέλευσης και σχεδιάστηκε από τον Ludwig Durr. ....	116
Εικόνα 18-6 Το πειραματικό πολεμική αεροπλάνο B-57 με υδρογόνο.....	118
Εικόνα 18-7 Supersonic transport Mach 2.7 .....	119
Εικόνα 18-8 Σύγκριση Concorde με Zehst (που χρησιμοποιεί το υδρογόνο).....	121
Εικόνα 18-9 Οι ταχύτητες και οι ονομασίες των αεροσκαφών βάση αυτής.....	122
Εικόνα 19-1 Πρακτική εκπαίδευση σε σχολή της φυσιολογίας στο Ινστιτούτο Γεωργίας στο Λένινγκραντ. ....	123
Εικόνα 19-2 Το Tupolev Tu-155 είναι ένα τροποποιημένο Tu-154 (СССР-85035), το οποίο είχε χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική λύση πλατφόρμα δοκιμών καυσίμων. Αυτό είναι το πρώτο πειραματικό αεροσκάφος στον κόσμο που λειτουργεί με υγρό υδρογόνο! .....	124
Εικόνα 20-1 Η ξεχωριστή διάταξη των διαφορετικών συστημάτων που απαρτίζουν το υβριδικό αυτοκίνητο . ....	125
Εικόνα 20-2 Μια τυπική κυψέλη καυσίμου PEM από την Intelligent Energy , Ηνωμένο Βασίλειο. ....	126
Εικόνα 20-3 Σύστημα μπαταριών για οχήματα με κυψέλη καυσίμου .....	128
Εικόνα 20-4 Η σύνθεση μιας Κυψέλης καυσίμου και μια συστοιχία .....	129
Εικόνα 20-5 .....	133
Εικόνα 20-6 Τύπος ενός MPC (Microprocessor-based programmable controller) ....	134
Εικόνα 21-1 Το Toyota mirai κέρδισε το βραβείο πράσινου αυτοκινήτου του 2016. 135	
Εικόνα 21-2 Το εσωτερικό του Toyota mirai .....	137
Εικόνα 21-3 Η κυψέλη καυσίμου , το μηχανικό τμήμα του Toyota mirai .....	138
Εικόνα 22-1 .....	141
Εικόνα 23-1 .....	142
Εικόνα 23-2 .....	144
Εικόνα 23-3 <a href="http://chimikoergastirio.blogspot.gr/2011/12/blog-post.html">http://chimikoergastirio.blogspot.gr/2011/12/blog-post.html</a> .....	145
Εικόνα 23-4 .....	145

## 25. ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4-1 Ιδιότητες του Υδρογόνου.....	19
Πίνακας 6-1 Δεδομένα για διαφορετικούς τύπους κυψελών καυσίμου .....	39
Πίνακας 11-11-1: Κόστος μετακίνησης [\$/km].....	70
Πίνακας 16-1 Πίνακας μεταφοράς θερμότητας και δεδομένα ρυθμού τροφοδοσίας υδρογόνου:.....	88
Πίνακας 17-1 Πορεία παραγωγής υδρογόνου .....	92
Πίνακας 17-2 .....	105

Πίνακας 18-1Η λίστα παρουσιάζει μερικές από τις φυσικές ιδιότητες των καυσίμων που έχουν θεωρηθεί κύριοι υποψήφιοι για χρήση σε υπερηχητικά οχήματα: .....	120
Πίνακας 20-1 προδιαγραφές .....	131
Πίνακας 20-2 επιδόσεις .....	131
Πίνακας 21-1 επιδόσεις Toyota mirai .....	139

## 26. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Hydrogen fuel for surface transportation Joseph M. Norbeck ... [et al.] Warrendale, Pa. : Society of Automotive Engineers, 1996
2. State of alternative fuel technologies, 2001 Warrendale, PA : Society of Automotive Engineers, 2001
3. Fuel cell power for transportation 2000 Warrendale, PA : Society of Automotive Engineers, 2000
4. Fuel cell technology for vehicles edited by Richard Stobart Warrendale, PA : Society of Automotive Engineers, 2001. - (Progress in technology series)
5. Fuel cell power for transportation 2001 Warrendale, PA : Society of Automotive Engineers, 2001
6. Fuel cell powered vehicles : automotive technology of the future Daniel J. Holt Warrendale, PA : Society of Automotive Engineers, 2001
7. Fuel cell systems explained James Larminie, Andrew Dicks. - 2nd ed. Chichester, West Sussex : Wiley, 2003
8. Powering the future : the Ballard fuel cell and the race to change the world Tom Koppel Toronto New York : Wiley, 1999
9. Hydrogen as an energy carrier : technologies, systems, economy Carl-Jochen Winter, Joachim Nitsch (eds.) Berlin New York : Springer-Verlag, 1988
10. The solar-hydrogen energy economy : beyond the age of fire Luther W. Skelton New York : Van Nostrand Reinhold, c1984
11. Hydrogen power : theoretical and engineering solutions proceedings of the HYPOTHESIS II Symposium, held in Grimstad, Norway, 18-22 August 1997 / edited by T.O. Saetre Dordrecht Boston London : Kluwer Academic, 1998
12. Advances in hydrogen energy edited by Catherine E. Gregoire Padro and Francis Lau New York : Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2000
13. Hydrogen energy system : production and utilization of hydrogen and future aspects edited by Yuda Yurum Dordrecht Boston : Kluwer Academic, 1995. - (NATO ASI Series, 295)
14. Hydrogen as a fuel : learning from nature edited by Richard Cammack, Michel Frey, Robert Robson London New York : Taylor & Francis, 2001
15. Progress in hydrogen energy proceedings of the National Workshop on Hydrogen Energy, New Delhi, July 4-6, 1985 / edited by R.P. Dahiya Dordrecht [Holland] Norwell, MA, U.S.A. : D. Reidel ; : Sold and distributed in the U.S.A. and Canada by Kluwer Academic Publishers, 1987
16. Hydrogen aircraft technology G. Daniel Brewer Boca Raton : CRC Press, 1991