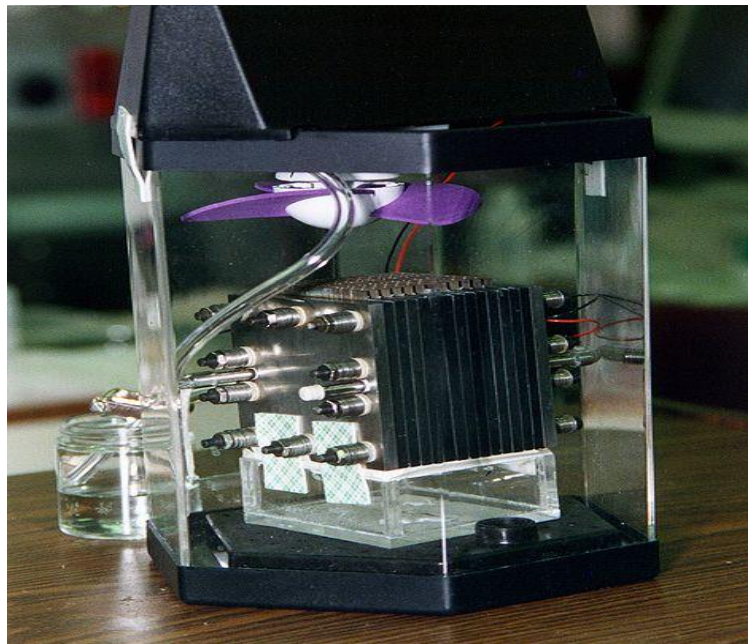


## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ: Μελέτη και έλεγχος συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με αποθήκευση και χρήση υδρογόνου για οικιακή χρήση.  
“ Study and control of system of renewable sources of energy with storage and use of hydrogen for domestic use.”**



Σπουδαστές:  
ΣΦΑΕΛΟΣ ΕΠΑΜΕΙΝΩΝΔΑΣ  
ΤΟΡΝΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: ΣΤΑΘΑΤΟΣ ΗΛΙΑΣ

ΠΑΤΡΑ 2013



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	7
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	8
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	10
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup></b> .....	11
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	11
1.2 Βασικό σύστημα κυψέλης καυσίμου.....	12
1.3 Αρχή Λειτουργίας κυψέλης καυσίμων.....	15
1.4 Κυψέλη καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης (PEM).....	18
1.5 Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων.....	19
1.6 Κυψέλη καυσίμου SOFC.....	22
1.7 Κυψέλες καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη.....	22
1.8 Κυψέλη καυσίμου τηγμένου άνθρακα (MCFC).....	26
1.9 Κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων.....	26
1.10 Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC).....	28
1.11 Οι κυψέλες του τύπου PAFC.....	29
1.12 Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος.....	31
1.13 Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου.....	33
1.14 Κυψέλη καυσίμου μεθανόλης (DMFC).....	35
1.15 Μεμβράνη κυψέλης PEM.....	35
1.16 Ηλεκτρόδια κυψέλης.....	37
1.17 Καταλύτης κυψέλης.....	38
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup></b> .....	41
2.1 Διαχείριση νερού.....	41
2.2 Ροή αερίων και συλλογή ρεύματος.....	41
2.3 Υπολογισμός τάσης ιδανικής κυψέλης καυσίμου.....	42

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup></b> .....	44
3.1 Αναμορφωτές .....	44
3.2 Στήλη κυψελών καυσίμου .....	44
3.3 Λειτουργία και απόδοση .....	46
3.4 Τεχνο-οικονομική αξιολόγηση των κυψελών καυσίμου .....	52
3.5 Κόστος των κυψελών καυσίμου .....	52
3.6 Τεχνολογική πρόοδος και εμπειρία .....	56
3.7 Ανταγωνιστικό κόστος των συστημάτων κυψελών καυσίμου .....	59
3.8 Ανάπτυξη της αγοράς των κυψελών καυσίμου .....	62
3.9 Εφαρμογές των κυψελών καυσίμων .....	64
3.10 Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα .....	65
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup></b> .....	 66
4.1 Φωτοβολταϊκά .....	66
4.1.1 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο .....	66
4.1.2 Φωτοβολταϊκή Διάταξη .....	66
4.1.3 Τεχνολογίες Φ/Β Στοιχείων .....	66
4.1.4 Δομή ενός φωτοβολταϊκού συστήματος .....	68
4.1.5 Φωτοβολταϊκές γεννήτριες .....	68
4.2 Μονοκρυσταλλικές γεννήτριες .....	69
4.3 Πολυκρυσταλλικές γεννήτριες .....	69
4.4 Γεννήτριες λεπτού υμενίου (thinfilm) .....	70
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup></b> .....	 71
5.1 Ηλεκρόλυση .....	71
5.2 Το πρόβλημα της ηλεκτρόλυσης .....	72
5.2.1 Το φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης .....	72
5.2.2 Η ηλεκτρολυτική διάβρωση .....	72
5.2.3 Παράγοντες που ενισχύουν το φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης .....	72
5.2.4 Παραδείγματα ηλεκτρολυτικής διάβρωσης .....	73
5.2.5 Οι αρνητικές συνέπειες της ηλεκτρολυτικής διάβρωσης .....	73
5.2.6 Μέθοδοι αντιμετώπισης του προβλήματος .....	74
5.3 Στήλες (κριτήρια αξιολόγησης των μεθόδων) .....	75

**5.4 Παρατηρήσεις & συμπεράσματα πάνω στον πίνακα...76**

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> .....79**

**6.1 Γιατί προτείνεται το υδρογόνο ως φορέας ενέργειας...79**

**6.2 Στατικές εφαρμογές παραγωγής ισχύος.....83**

**6.3 Εφαρμογές ΚΚ τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC).....83**

**6.4 Εφαρμογές ΚΚ φωσφορικού οξέος.....84**

**6.5 Εφαρμογές ΚΚ στερεού οξειδίου.....84**

**6.6 Εφαρμογές ΚΚ πολυμερικής μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων.....85**

**6.7 Υβριδικά συστήματα ΚΚ και στροβίλων φυσικού αερίου.....85**

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup> .....87**

**7.1 Παραγωγή και διανομή καυσίμου (Well-to-Tank).....87**

**7.2 Μικροσυστήματα παραγωγής ενέργειας.....88**

**7.3 Οικιακά συστήματα ενέργειας.....90**

**7.4 Τα Πλεονεκτήματα και οι Στρατηγικές της Ανάπτυξης του Υδρογόνου.....91**

**7.5 Προβληματισμοί για τη χρήση του υδρογόνου ως ενεργειακό καύσιμο.....93**

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup> .....99**

**8.1 Παραγωγή του υδρογόνου.....99**

**8.2 Θερμοχημικές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου.....100**

**8.2.1 Παραγωγή του υδρογόνου από τα ορυκτά καύσιμα.....100**

**8.2.2 Παραγωγή του υδρογόνου από τη βιομάζα.....103**

**8.3 Ηλεκτρολυτικές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου.....103**

**8.3.1 Παραγωγή του υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού.....103**

**8.4 Φωτολυτικές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου.....106**

**8.5 Φωτοβιολογική Παραγωγή.....106**

**8.6 Φωτοηλεκτρόλυση.....107**

**8.7 Διανομή του υδρογόνου.....107**

**8.8 Πλεονεκτήματα–Μειονεκτήματα**

των συστημάτων διανομής του υδρογόνου.....	109
<b>8.9 Σύνοψη και Συμπεράσματα.....</b>	<b>110</b>
<b>8.9.1 Ενεργειακή θεώρηση και η συμμετοχή του H<sub>2</sub>.....</b>	<b>110</b>
<b>8.9.2 Παραγωγή.....</b>	<b>111</b>
<b>8.9.3 Χρήση και εφαρμογές.....</b>	<b>112</b>
<b>8.9.4 Σενάρια διείσδυσης H<sub>2</sub>.....</b>	<b>113</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>116</b>

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους γονείς μας για την υπομονή τους και την αμέριστη ηθική και υλική συμπαράσταση τους μας στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μας.

Επίσης, ευχαριστούμε θερμά το τμήμα Ηλεκτρολογίας του Τ.Ε.Ι. Πάτρας και τους καθηγητές του για τις γνώσεις που αποκομίσαμε κατά τη φοίτησή μας.

Ιδιαίτερα, ευχαριστούμε τον εισηγητή της πτυχιακής μας εργασίας, καθηγητή κ. Σταθάτο Ηλία, για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε στην ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, καθώς και για τη συνεχή και πολύτιμη συμπαράσταση του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής.

## Περίληψη

Είναι γνωστό ότι οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια συνεχώς αυξάνονται, όπως αυξάνεται και η ανάγκη για παραγωγή όσο το δυνατόν οικονομικότερης και καθαρότερης ενέργειας. Γι' αυτό τα συστήματα κατανεμημένης παραγωγής διαδραματίζουν όλο και σημαντικότερο ρόλο για τον ενεργειακό μηχανισμό. Μια τεχνολογία που συνεχώς κερδίζει έδαφος είναι αυτή των κυψελών καυσίμου.

Γι' αυτά τα συστήματα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας με την μορφή υδρογόνου, δηλαδή τη χρήση της ενέργειας αυτής για ηλεκτρόλυση νερού και η μετέπειτα χρησιμοποίηση του υδρογόνου σε διάταξη Κυψέλης Καυσίμου για παραγωγή εκ νέου ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι κυψέλες καυσίμου ως εναλλακτική πηγή ενέργειας παρουσιάζουν πολλές υποσχέσεις για τη δυναμική εισχώρηση τους στη διανεμημένη παραγωγή. Τα βασικά πλεονεκτήματά τους είναι η υψηλή απόδοση, η εκπομπή μηδενικών ή ελάχιστων ρύπων, η αθόρυβη λειτουργία και η ευελιξία στη δομή και στην παραγόμενη ισχύ.

Σκοπός της πτυχιακής αυτής είναι η μελέτη των απαιτήσεων διαχείρισης και ελέγχου ενός συστήματος το οποίο αποτελείται από ανεμογεννήτρια, φωτοβολταϊκά, μπαταρίες και διάταξη ηλεκτρόλυσης/ Κυψέλης Καυσίμου.



## Summary

It is well known that the demands for electrical power are constantly increasing as well as the need for cheap and clean energy sources. This is why Distributed Generation has become a very important field of electric engineering. Fuel Cells, as a part of Distributed Generation technologies, are constantly gaining ground and have known great development through the last two decades.

For this system, it presents particular interest the storage of excess energy with the form of hydrogen, that is to say the use of this energy for electrolysis of water and the later utilization of hydrogen in provision of Fuel Cell on production of electric energy again.

Aim of this project is the study of requirements of management and control of system which is constituted by wind generator, solar photovoltaic cells, batteries and provision of electrolysis of Fuel Cell.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κυψέλη καυσίμου (fuel cell) είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρισμό χωρίς τη μεσολάβηση της καύσης.

Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χαρακτηριστούν σαν κέντρα ενός συστήματος το οποίο χρησιμοποιεί το υδρογόνο ως καύσιμο. Είναι αυτές οι οποίες αναλαμβάνουν τη μετατροπή του καυσίμου σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Η έννοια της κατάλυσης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη λειτουργία μιας κυψέλης καυσίμου και η έρευνα για τη βελτίωση των αποδόσεων γίνεται κυρίως σε αυτόν τον τομέα, τομέας εξ ορισμού μελετώμενος στην κλίμακα του νανομέτρου.

Στη βασική της μορφή, λειτουργεί ως εξής: υδρογόνο και οξυγόνο αντιδρούν με την παρουσία καταλύτη και παράγεται νερό, ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσεται ένα ηλεκτροχημικό δυναμικό που προκαλεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο εξωτερικό κύκλωμα (φορτίο). Η έννοια της κατάλυσης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη λειτουργία μιας κυψέλης καυσίμου, όπως θα δούμε παρακάτω και η έρευνα για τη βελτίωση των αποδόσεων γίνεται κυρίως σε αυτόν τον τομέα. Καθώς η αντίδραση είναι εξώθερμη, παράγεται θερμότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## 1.1 Ιστορική αναδρομή

Η πρώτη κυψέλη καυσίμων φτιάχτηκε το 1839 από τον Sir William Grove, έναν Ουαλλέζο δικαστή και πειραματικό επιστήμονα.

Το επόμενο μεγάλο κεφάλαιο στην ιστορία των κυψελών καυσίμου γράφτηκε από το μηχανικό, Δρ Thomas Francis Bacon, στο Πανεπιστήμιο του Cambridge της Αγγλίας. Το 1932, ο Bacon επανέφερε στο προσκήνιο την κυψέλη που είχαν αναπτύξει οι Mond και Langer, εφαρμόζοντας διάφορες τροποποιήσεις στο αρχικό σχέδιο. Αυτές συμπεριλάμβαναν την αντικατάσταση των ηλεκτροδίων πλατίνας με νικελίου γάζας που είναι λιγότερο δαπανηρά. Επίσης, αντικατέστησε τους ηλεκτρολύτες θειικού οξέως με αλκαλικό υδροξείδιο του καλίου, μια ουσία λιγότερο διαβρωτική για τα ηλεκτρόδια. Αυτή η συσκευή η οποία ονομάστηκε «Κυψέλη Bacon», ήταν στην ουσία η πρώτη αλκαλική κυψέλη καυσίμου(AFC). Θα περάσουν άλλα 27 χρόνια έως ότου ο Bacon θα μπορέσει να υλοποιήσει μια πραγματικά λειτουργική κυψέλη καυσίμου. Το 1959, ο Bacon θα παρουσιάσει μια κυψέλη καυσίμου ικανή να παράγει 6 kW ηλεκτρική ισχύ(σχήμα 2.2). Επίσης, στο τέλος του 1959 ο Harry Karl Ihrig κατασκεύασε το πρώτο όχημα-κυψελών καυσίμου με ικανότητα ιπποδύναμης 20 hp(15kW).

Στο πιο πρόσφατο παρελθόν και ξεκινώντας από τα μέσα της δεκαετίας του 50 και τις αρχές της δεκαετίας του '60 έχουμε την εμφάνιση ενός ζωηρού ενδιαφέροντος για την κυψέλη καυσίμου. Η NASA έψαχνε έναν τρόπο για να τροφοδοτήσει μια σειρά από επικείμενες διαστημικές πτήσεις. Η χρησιμοποίηση μπαταριών για την τροφοδοσία είχε ήδη αποκλειστεί λόγω του πολύ μεγάλου βάρους. Η ηλιακή ενέργεια ήταν υπερβολικά ακριβή για εκείνη την εποχή και η πυρηνική ενέργεια ήταν αρκετά επικίνδυνη. Έτσι, στην αναζήτηση της NASA για εναλλακτικό τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η κυψέλη καυσίμου κρίνεται ως μια πιθανή λύση. Η NASA ξεκινάει την χρηματοδότηση ερευνών για την ανάπτυξη πρακτικά εφαρμόσιμων κυψελών καυσίμου που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια των διαστημικών πτήσεων. Οι κυψέλες καυσίμων εφοδίασαν με ενέργεια το διαστημικό σκάφος Gemini και Apollo, και παρείχαν ακόμα ηλεκτρική ενέργεια και νερό για το Διαστημικό Λεωφορείο.



Σχήμα 1: Ο Bacon με την κυψέλη καυσίμου των 6kW.

Καθ' όλη τη δεκαετία του 1970 και του 1980, όλη η ερευνητική προσπάθεια ήταν αφοσιωμένη στην ανάπτυξη των υλικών που χρειάζονται, προσδιορίζοντας τη βέλτιστη πηγή καυσίμου και μειώνοντας δραστικά το κόστος της τεχνολογίας αυτής. Κατά τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει μεγάλα τεχνικά άλματα με αποτέλεσμα οι κυψέλες καυσίμου να αρχίζουν να έχουν εφαρμογή σε ένα μεγάλο πλέον εύρος.

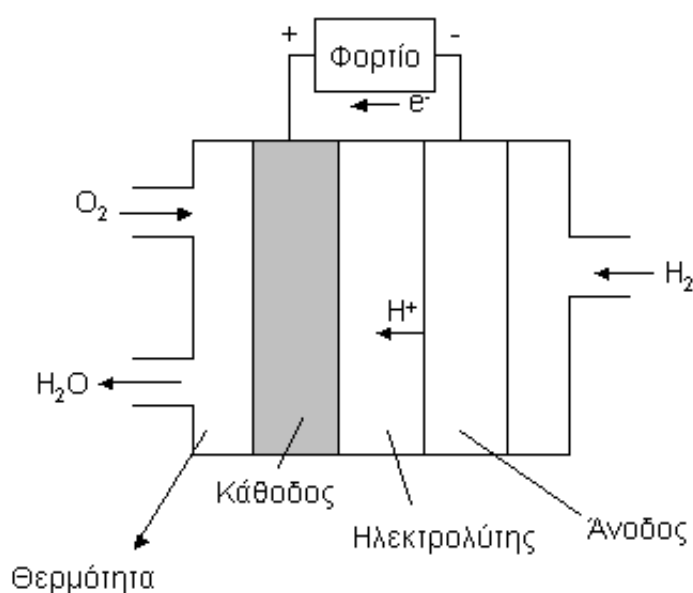
## 1.2 Βασικό σύστημα κυψέλης καυσίμου

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.

Το απαιτούμενο υδρογόνο παράγεται από ορυκτά καύσιμα και συνήθως μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) που αποτελεί το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου.

Ορισμένοι τύποι κυψελών μπορούν να λειτουργήσουν επίσης και με μονοξείδιο του άνθρακα ή υδρογονάνθρακες.

Επιδεικτικές μονάδες ισχύος έχουν κατασκευασθεί σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες, στις Η.Π.Α. και στην Ιαπωνία. Η συνήθης θερμοκρασία λειτουργίας τους (περίπου 200 °C) περιορίζει τη θερμοκρασία της ανακτώμενης θερμότητας. Υπάρχουν σήμερα τυποποιημένες μονάδες συμπαραγωγής με θερμότητα που είναι διαθέσιμη σε θερμοκρασία 80-90 °C, αλλά και πειραματικές διατάξεις υψηλότερων θερμοκρασιών.

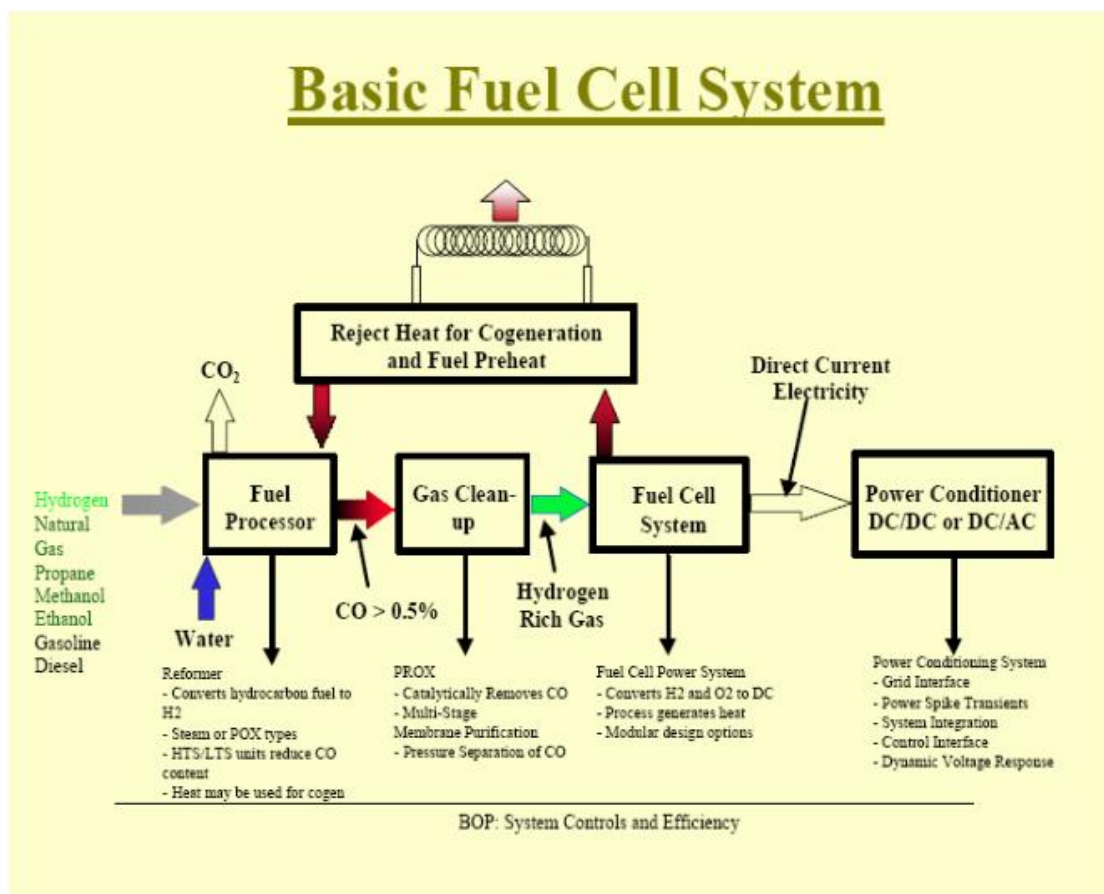


Σχήμα 2: Μηχανισμός κυψέλης καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου είναι κατάλληλες για συμπαραγωγή στο βιομηχανικό και εμπορικό-κτιριακό τομέα (ιδιαίτερα σε συνδυασμό με το φυσικό αέριο). Κύρια πλεονεκτήματά τους είναι τα ακόλουθα:

- Ø Αρθρωτή (modular) δομή, που διευκολύνει την κατασκευή μονάδων με την επιθυμητή ισχύ,
- Ø Διατήρηση υψηλού ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης ακόμη και σε μερικό φορτίο (δηλ. φορτίο μικρότερο του ονομαστικού),
- Ø Ευκολία αυτοματισμού,
- Ø Χαμηλές εκπομπές ρύπων,
- Ø Χαμηλή στάθμη θορύβου.

Χάρη στον υψηλό βαθμό απόδοσης και τα καθαρά καύσιμα που χρησιμοποιούνται, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> και SO<sub>2</sub> είναι κατά 10-100 φορές χαμηλότερες από εκείνες άλλων συστημάτων. Ειδικότερα, επειδή οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι σημαντικά μικρότερες από εκείνες της καύσης, οι εκπομπές NO<sub>x</sub> είναι μικρότερες κατά μία τάξη μεγέθους από τις εκπομπές των συστημάτων που στηρίζονται στην καύση. Οι χαμηλές εκπομπές ρύπων και η χαμηλή στάθμη θορύβου κάνουν τις κυψέλες καυσίμου πιο κατάλληλες από άλλα συστήματα για εγκατάσταση και λειτουργία σε κατοικημένες περιοχές και σε κτίρια

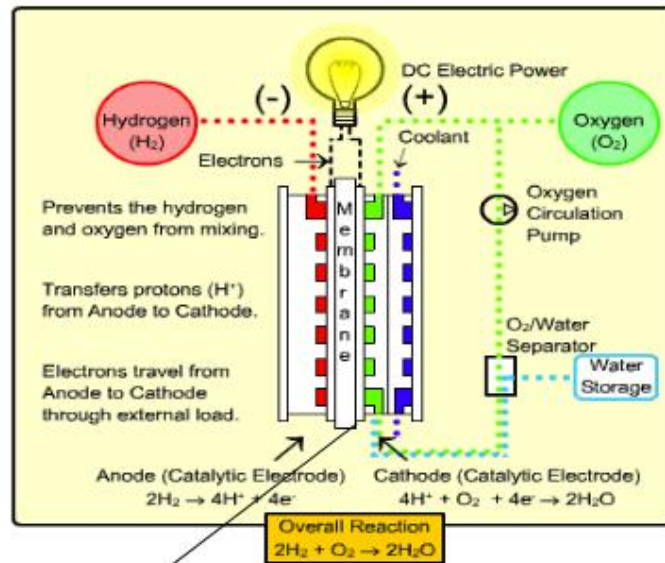


Σχήμα 3: Βασικό σύστημα κυψελών καυσίμου

όπως ξενοδοχεία, νοσοκομεία, κ.λ.π. Μειονεκτήματα, που εμποδίζουν προς το παρόν την πλατιά διάδοσή τους, είναι:

- Ø Το υψηλό κόστος κατασκευής, και
- Ø Η σχετικά μικρή διάρκεια ζωής.

Οι προσπάθειες για αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών συνεχίζονται με προγράμματα έρευνας και ανάπτυξης καθώς και με την κατασκευή επιδεικτικών μονάδων.



Εδώ μπορούμε να διακρίνουμε τη μεμβράνη μιας κυψέλης καυσίμου.

Σχήμα 4: Μεμβράνη κυψέλης καυσίμου

### 1.3 Αρχή Λειτουργίας κυψέλης καυσίμων

Οι κυψέλες καυσίμων λειτουργούν παρόμοια με μια μπαταρία. Μπορούν να ταξινομηθούν βάσει του τύπου του ηλεκτρολύτη τον οποίο χρησιμοποιούν. Το πιο γνωστό είδος είναι η κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίου (PEM). Η δομή και η αρχή λειτουργίας του αντιπροσωπευτικού αυτού τύπου κυψέλης καυσίμου έχει ως εξής:

Δύο ηλεκτρόδια διαχωρίζονται από μία μεμβράνη η οποία έχει το ρόλο του ηλεκτρολύτη. Μεταξύ αυτής της πολυμερισμένης μεμβράνης και των ηλεκτροδίων υπάρχει ένα στρώμα καταλύτη. Αργότερα θα μελετήσουμε τα μέρη μιας κυψέλης αναλυτικότερα. Συνοπτικά, η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρισμού περιγράφεται από τα παρακάτω επιμέρους στάδια.

Το υδρογόνο τροφοδοτεί την άνοδο της κυψέλης, το αρνητικό ηλεκτρόδιο, το οποίο ερχόμενο σε επαφή με τον καταλύτη διαχωρίζεται σε θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια. Η άνοδος και ο καταλύτης είναι τέτοιας κατασκευής ώστε η διάχυση των ατόμων του υδρογόνου να γίνεται με ομογενή τρόπο. Τα ηλεκτρόνια τα οποία απελευθερώθηκαν μεταφέρονται μέσω εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος προς την άνοδο δημιουργώντας ηλεκτρισμό αφού η μεμβράνη αποτρέπει τη διέλευση τους μέσω αυτής. Για αυτό το λόγο άνοδος και καταλύτης διαλέγονται αγωγιμα υλικά.

Τα θετικά φορτισμένα ιόντα του υδρογόνου (στην ουσία αναφερόμαστε σε μεμονωμένα πρωτόνια) διαπερνούν τη μεμβράνη και ενώνονται με το οξυγόνο το οποίο τροφοδοτεί την κάθοδο, το θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο, και παράγεται νερό. Όπως και πριν, την ομογενή διάχυση του οξυγόνου στον καταλύτη εξασφαλίζει η κατασκευή του ηλεκτροδίου. Ο καταλύτης αναλαμβάνει την επιτάχυνση της δημιουργίας του νερού από τα συστατικά του.

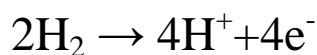
Στο σχηματισμό του νερού συμμετέχουν εκτός των μορίων του οξυγόνου και των ιόντων του υδρογόνου, τα ηλεκτρόνια τα οποία διοχετεύτηκαν μέσω του εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος στην κάθοδο, στην αρχή της διαδικασίας.

Τα δύο στρώματα (στηριζόμενου) καταλύτη χρησιμεύουν στην αύξηση της ταχύτητας των αντιδράσεων διάσπασης του μορίου του υδρογόνου και της ένωσης υδρογόνου οξυγόνου για τη δημιουργία νερού, στην άνοδο και στην κάθοδο αντίστοιχα. Συνήθως αποτελείται από ένα πολύ λεπτό στρώμα λευκόχρυσου (Pt) πάνω σε επιφάνεια άνθρακα. Το στρώμα αυτό είναι και το μέρος του καταλύτη το οποίο βρίσκεται σε επαφή με τη μεμβράνη. Ο καταλύτης είναι τραχύς και πορώδης ώστε να μεγιστοποιεί η εκτεθειμένη επιφάνεια του.

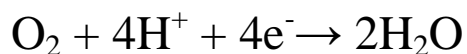
Οι χημικές αντιδράσεις οι οποίες χαρακτηρίζουν τα παραπάνω βήματα, συνοψίζονται παρακάτω.



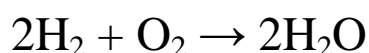
Στην άνοδο:



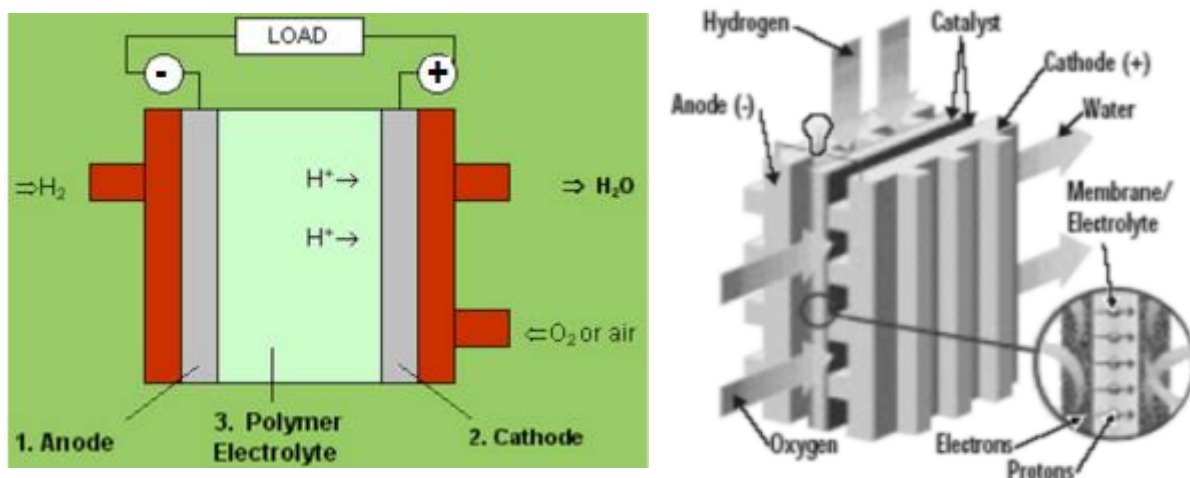
Στην κάθοδο:



Ολική αντίδραση:



Οι παραπάνω αντιδράσεις σε μία απλή κυψέλη καυσίμου παράγει περίπου στα 0,7 Volts . Προκειμένου να παραχθούν μεγαλύτερες (και πρακτικά αξιοποιήσιμες) τάσεις, χρησιμοποιούνται περισσότερες κυψέλες σε σειρά (fuel cell stack). Τα κυριότερα μέρη της κυψέλης καυσίμου καθώς και μία ιδέα του τρόπου λειτουργίας τους παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 5: Είδη κυψελών καυσίμου

Ένας καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή του τύπου της κυψέλης καυσίμου που θα χρησιμοποιηθεί είναι η καθαρότητα του υδρογόνου. Οι κυψέλες καυσίμου χαμηλών θερμοκρασιών απαιτούν καθαρό υδρογόνο, επειδή η απόδοση των αντίστοιχων καταλυτών/ηλεκτροδίων υποβαθμίζεται κατά την παρουσία ξένων προσμίξεων/ακαθαρσιών (π.χ. θειούχων ενώσεων) καθώς και του μονοξειδίου του άνθρακα. Αντίθετα, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας στις κυψέλες καυσίμου SOFCs και MCFCs, οι ηλεκτροκαταλύτες είναι περισσότερο ανθεκτικοί

στην παρουσία ξένων προσμίξεων/ακαθαρσιών, ενώ επιπλέον το CO μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως καύσιμο. Οι κυψέλες καυσίμου PAFCs, SOFCs και MCFCs θεωρούνται ιδανικές για σταθερές εφαρμογές. Οι κυψέλες καυσίμου τύπου PEM παράγουν υψηλές πυκνότητες ισχύος σε πυκνότητες ρεύματος που προσεγγίζουν τα  $4 \text{ A/cm}^2$ , σε αντίθεση με τους άλλους τύπους κυψελών καυσίμου όπου με δυσκολία φθάνουν το  $1 \text{ A/cm}^2$ . Αυτό το χαρακτηριστικό, σε συνδυασμό με τα πλεονεκτήματα του βάρους, του όγκου και του κόστους, καθιστά αυτόν τον τύπο κυψελών καυσίμου τον ελκυστικότερο τόσο για κινητές όσο και για σταθερές εφαρμογές. Εντούτοις, τόσο τα SOFCs όσο και τα MCFCs θεωρούνται ότι στο άμεσο μέλλον έχουν τις προοπτικές να εδραιωθούν στην συγκεκριμένη αγορά (US DOE, 2002; IEA, 2005; Larminie *et al.*, 2003; Srinivasan, 2006; Hawkes *et al.*, 2005).

FUEL CELL/POWER GEN TECHNOLOGIES					
Technology	Electrolyte	Temperature	Efficiency (%)		Power Range (kW)
			Electrical	Overall	
PEMFC	Ion exchange membrane	50 °C	30-35	50-65	<1 - 250
AFC	KOH	80 °C	Low	Low	<1 - 50
PAFC	Phosphoric Acid	200 °C	36	80	200 - 1000
MCFC	Alkali Carbonates	650 °C	45-55	75-80	250 - 5000
SOFC High Temp.	Solid metal oxide	980 °C	45-47	75-80	250 - 5000
SOFC Low Temp.	Solid metal oxide	660 °C	42-45	60-70	3 - 250
Diesel Engine	N/A	980 °C	33-36		50 - 6000
Gasoline Engine	N/A	980 °C	30-35		5 - 2000
Turbine	N/A	1,000 °C +	30-45		1000 - 100 MW
Microturbine	N/A	1,000 °C +	26-30		25 - 100

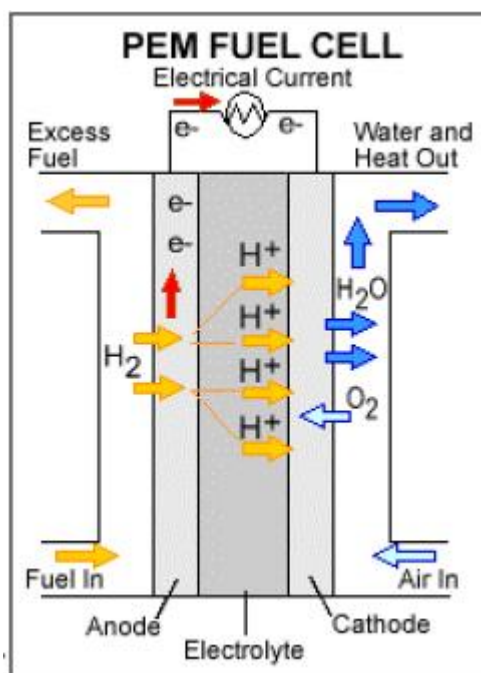
**Πίνακας 1: Πίνακας με τύπους κυψελών καυσίμου**

#### 1.4 Κυψέλη καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης (PEM)

Αυτές οι κυψέλες (κυψέλες καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων, proton exchange membrane fuel cells, PEM) 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. Σε αυτό βοηθά η ικανότητα τους να προσαρμόζονται σε γρήγορες αυξομειώσεις στην απαίτηση ισχύος. Η ισχύς που παράγει μια τέτοια κυψέλη κυμαίνεται μεταξύ των 50 και 250

kW . Ο συγκεκριμένος τύπος κυψέλης είναι αρκετά ευαίσθητος σε μη καθαρά καύσιμα.

Η έρευνα πάνω στις κυψέλες καυσίμου όσων αφορά εφαρμογές τους στην τροφοδότηση οχημάτων αυτή τη στιγμή είναι επικεντρωμένη κυρίως σε αυτόν τον τύπο.



Σχήμα 6: Κυψέλη καυσίμου PEM

## 1.5 Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων

Μια χαρακτηριστική διάταξη κυψέλης καυσίμου PEM περιλαμβάνει την πολυμερική μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων, στις αντίθετες πλευρές της οποίας έχουν εναποτεθεί δύο πορώδη ηλεκτροκαταλυτικά στρώματα (ηλεκτρόδια). Δύο αγωγίμοι και πορώδεις συλλέκτες ρεύματος τοποθετούνται στα ηλεκτρόδια σε επαφή με τους δίσκους ηλεκτρικής διασύνδεσης των μοναδιαίων κυψελών καυσίμου, οι οποίοι διαμορφώνουν τα κανάλια ροής των αντιδρώντων και των προϊόντων.

Η μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων αποτελείται από πολυτετραφθοροαιθυλένιο στο οποίο συνδέονται ομάδες σουλφονικών οξέων. Αυτά τα υλικά είναι ηλεκτρικοί μονωτές, στους οποίους η ιοντική μεταφορά εξαρτάται από το δεσμευμένο και ελεύθερο νερό που υφίσταται στην πολυμερική δομή. Η πολυμερική μεμβράνη Nafion®, η οποία παρασκευάστηκε για πρώτη φορά από την εταιρεία DuPont, είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιημένο υλικό ως στερεός ηλεκτρολύτης σε

κυψέλες καυσίμου PEMFCs. Οι μεμβράνες Nafion® διακρίνονται για την υψηλή θερμική σταθερότητα και χημική αντοχή ως προς το Cl<sub>2</sub>, το H<sub>2</sub> και το O<sub>2</sub> σε θερμοκρασίες μέχρι 125°C (Wilkinson *et al.*, 1997; Ralph, 1997), και η διάρκεια λειτουργίας τους έχει αποδειχθεί και επιβεβαιωθεί για περισσότερες από 50000 h λειτουργίας. Πρόσφατα, η έρευνα έχει εστιαστεί στους πολυμερικούς ηλεκτρολύτες που βασίζονται στην πολύ-βενζιμενταζόλη (PBI) (Ma *et al.*, 2004), οι οποίοι μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 160°C και ουσιαστικά να αντιπαρέλθουν τη δηλητηρίαση που οφείλεται στην παρουσία του CO (Ernst *et al.*, 2000; Hogarth *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2006; Collier *et al.*, 2006; Smith *et al.*, 2005). Το ηλεκτρόδιο/καταλύτης, τόσο στην περίπτωση της ανόδου όσο και της καθόδου, βρίσκεται σε επαφή με την πολυμερική μεμβράνη και αποτελείται από μικρής κοκκομετρίας διασπαρμένα σωματίδια Λευκόχρυσου. Για την παρασκευή ηλεκτροδίων επιθυμητής μορφολογίας και αρχιτεκτονικής χρησιμοποιείται και ένα υλικό διασύνδεσης (binder) (Yu *et al.*, 2007; Bezerra *et al.*, 2007; Wee *et al.*, 2006; Wang, 2005; Antolini, 2007; Zhang *et al.*, 2006). Ο βαθμός συνεκτικότητας της μεμβράνης με το ηλεκτρόδιο αποτελεί τον κρισιμότερο παράγοντα για την επίτευξη υψηλών τιμών πρωτονιακής αγωγιμότητας. Το υλικό διασύνδεσης που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του ηλεκτροδίου σταθεροποιεί τα καταλυτικά σωματίδια του Λευκόχρυσου στη δομή του ηλεκτροδίου και είναι δυνατό να είναι είτε υδρόφοβο (συνήθως πολυτετραφθοροαιθυλένιο) είτε υδρόφιλο (συνήθως υπερφθοροθειϊκό οξύ). Με την χρήση καινοτόμων τεχνολογιών έχουν επιτευχθεί σημαντικές βελτιστοποιήσεις στην απόδοση των ηλεκτροδίων, με αποτέλεσμα για την ίδια παραγωγή πυκνότητας ισχύος να απαιτείται μικρότερη ποσότητα Λευκόχρυσου, γεγονός που συμβάλει ουσιαστικά στην ελάττωση του συνολικού κόστους. Η ποσότητα του Λευκόχρυσου έχει μειωθεί σε 1.0 mg Pt/cm<sup>2</sup> της μεμβράνης (συνολικά στην άνοδο και την κάθοδο) – από 2.0–4.0 mg Pt/cm<sup>2</sup> (US DOE, 2002; IEA, 2005; Larminie *et al.*, 2003; Srinivasan, 2006; Haile, 2003; Sopian *et al.*, 2006; Costamagna *et al.*, 2001; Mehta *et al.*, 2003).

Η μεμβράνη Nafion® τοποθετείται μεταξύ δύο πορωδών και αγωγικών υφασμάτων άνθρακα (carbon cloth), τα οποία στηρίζουν τη μεμβράνη, διαχέουν τα αέρια αντιδρώντα και προϊόντα και συλλέγουν ή παρέχουν τα ηλεκτρόνια. Αυτό το στρώμα περιλαμβάνει ένα υδρόφοβο υλικό (συνήθως πολυτετραφθοροαιθυλένιο) για να αποτρέψει αφενός την κατακράτηση του νερού μέσα στους πόρους και αφετέρου για να διευκολύνει την απομάκρυνση του παραγόμενου νερού στην κάθοδο, ιδιαίτερα σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος. Οι συλλέκτες ρεύματος που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή του ρεύματος, τη επίτευξη στεγανότητας, τη διάχυση των αερίων τροφοδοσίας και τη διαχείριση της θερμότητας, βρίσκονται σε πολύ καλή επαφή με τους δίσκους ηλεκτρικής

διασύνδεσης των μοναδιαίων κυψελών καυσίμου, οι οποίοι επίσης αποτελούνται από άνθρακα. Τα κανάλια ροής των αντιδρώντων, των προϊόντων ή/και του ψυκτικού (αν απαιτείται) χαράσσονται και στις δύο πλευρές αυτών των δίσκων. Στα περισσότερα συστήματα PEFCs, η ψύξη πραγματοποιείται από την κυκλοφορία του νερού μέσω κατάλληλων σπείρων ψύξης που υφίστανται στην συστοιχία, έτσι ώστε η πτώση θερμοκρασίας σε ολόκληρη την κυψέλη καυσίμου να είναι μικρότερη από 10 °C (Hermann *et al.*, 2005; Tawfik *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2005).

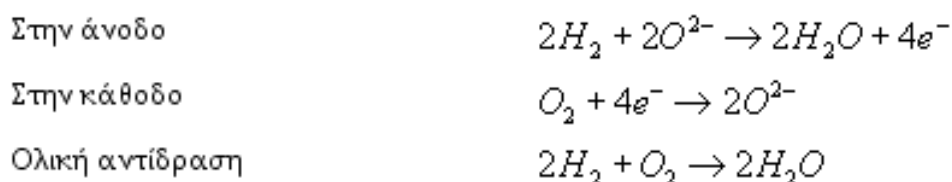
Λόγω των μεμβρανών Nafion®, οι κυψέλες καυσίμου PEFCs λειτουργούν σε θερμοκρασίες μεταξύ 60-80°C. Σε αυτές τις θερμοκρασίες το CO χημειοροφάται έντονα στο Λευκόχρυσο, υποβαθμίζοντας την καταλυτική του ενεργότητα, μειώνοντας την συνολική απόδοση της κυψέλης καυσίμου. Αυτή η αρνητική επίδραση θεωρείται αναστρέψιμη για συγκεντρώσεις CO χαμηλότερες από 50 ppm CO (η διεργασία αναμόρφωσης των υδρογονανθράκων συμπεριλαμβανομένου και της αντίδρασης μετατόπισης του υδραερίου παράγει αέρια μίγματα που περιέχουν περισσότερο από 10000 ppm CO (Cheng, 2007). Αν και το H<sub>2</sub> θεωρείται ως το ιδανικότερο καύσιμο για εφαρμογές σε κυψέλες καυσίμου PEFC, στα συνδυασμένα συστήματα PEFC-αναμορφωτή αυτές οι υψηλές συγκεντρώσεις του CO μπορούν να μειωθούν σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα χρησιμοποιώντας την διεργασία της εκλεκτικής οξειδωσης (μια διεργασία που οξειδώνει εκλεκτικά το CO έναντι του υδρογόνου σε αέρια μίγματα πλούσια σε H<sub>2</sub>). Πρόσφατα, η έρευνα στα PEFC έχει εστιαστεί στην αύξηση των θερμοκρασιών λειτουργίας άνω των 160 °C χρησιμοποιώντας ηλεκτρολύτες PBI (Ma *et al.*, 2004; US DOE, 2002; Larminie *et al.*, 2003; Srinivasan, 2006). Σε αυτές τις θερμοκρασίες όχι μόνο αντιμετωπίζεται επιτυχώς η δηλητηρίαση από το CO, αλλά επειδή η μεμβράνη PBI απαιτεί χαμηλότερη περιεκτικότητα σε νερό για να λειτουργήσει, απλοποιούνται και τα θέματα που σχετίζονται με την διαχείριση του νερού (Ernst, 2000). Με δυναμικά λειτουργίας της τάξης των 0,7–0,75 V, η μέγιστη απόδοση των PEFCs μπορεί να φτάσει μέχρι και 64%. Στις σημερινές εφαρμογές, ορισμένες απώλειες λόγω των υπερτάσεων και η χρήση επιπλέον βοηθητικού εξοπλισμού είναι δυνατό να μειώσουν περαιτέρω την απόδοση (US DOE, 2002; Gasteiger, 2005). Η σχετική βιβλιογραφία αναφέρεται ότι για επίτευξη ισχύος 5 kW<sub>e</sub> σε κυψέλες καυσίμου PEMFC, το δυναμικό λειτουργίας κυμαίνεται από 0,5-0,76 V/μοναδιαία κυψέλη για πυκνότητες ρεύματος 0,55-1 A/cm<sup>2</sup> και πυκνότητες ισχύος 0,22-0,57 We/cm<sup>2</sup> (Staffell, 2007b). Η θερμοκρασία λειτουργίας επηρεάζει σημαντικά την απόδοση (μείωση της ωμικής αντίστασης του ηλεκτρολύτη και αντιστάσεις στην μεταφορά μάζας), έχοντας ως αποτέλεσμα ένα κέρδος σε δυναμικό 1,1–2,5 mV/°C (US DOE, 2002). Η βελτίωση της απόδοσης της κυψέλης μέσω της θερμοκρασίας, εντούτοις,

περιορίζεται από ζητήματα που αφορούν τη διαχείριση του νερού. Ο στόχος της διάρκειας ζωής για σταθερές εφαρμογές είναι 40000–60000 ώρες ή 5-8 έτη (Knights *et al.*, 2004). Αυτή η διάρκεια εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες λειτουργίας, όπως η εξωτερική θερμοκρασία - στο ξεκίνημα, η υπερβολική ή ανεπαρκής ενυδάτωση και την καθαρότητα του καυσίμου. Οι κύριοι τομείς της ανάπτυξης στον τομέα των κυψελών καυσίμου PEMFC αφορούν στην ανάπτυξη νέων μεθόδων παρασκευής βελτιωμένων μεμβρανών και ηλεκτροδίων με στόχο την περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης και την επακόλουθη μείωση του συνολικού κόστους (US DOE, 2002; Larminie *et al.*, 2003; Srinivasan, 2006).

## 1.6 Κυψέλη καυσίμου SOFC

Ο συγκεκριμένος τύπος κυψελών (solid oxide fuel cells, SOFC), όπως και ο προηγούμενος, ενδείκνυται για αυξημένες ενεργειακές ανάγκες, με απόδοση στο 60% και παραγόμενη ισχύ μέχρι και 100kW. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν συνήθως ως ηλεκτρολύτη ένα σκληρό κεραμικό υλικό στερεού οξειδίου ζirkονίου και μια μικρή ποσότητα νατρίου, αντί για ηλεκτρολύτη υγρής μορφής, επιτρέποντας έτσι θερμοκρασίες μέχρι και 1000°C.

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που χαρακτηρίζουν αυτόν τον τύπο κυψέλης είναι



## 1.7 Κυψέλες καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη

Το οξείδιο του ζirkονίου σταθεροποιημένο με 8-9% οξείδιο του υτρίου (Yttria Stabilized Zirconia - YSZ) είναι ο πλέον συνήθης στερεός ηλεκτρολύτης για κυψέλες καυσίμου SOFCs επειδή παρουσιάζει υψηλή ιοντική αγωγιμότητα (αριθμός μεταφοράς  $O^{2-}$  κοντά στη μονάδα) σε ένα ευρύ φάσμα μερικών πιέσεων οξυγόνου (1 έως 10-20 ατμόσφαιρες). Η YSZ εμφανίζει επίσης ικανοποιητική ιοντική αγωγιμότητα σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (900-1000°C). Για το λόγο αυτό, για την κατασκευή της συνολικής διάταξης της συστοιχίας SOFCs απαιτούνται ακριβά κράματα που να αντέχουν τις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας,

αυξάνοντας κατ' αυτό τον τρόπο αισθητά το κόστος. Αυτό το συγκεκριμένο κόστος θα ήταν δυνατό να μειωθεί εάν ελαττωνόταν η απαιτούμενη θερμοκρασία λειτουργίας στους 600-800°C, επιτρέποντας τη χρήση λιγότερο ακριβών υλικών, όπως π.χ. ο ανοξείδωτος χάλυβας. Για να μειωθεί η θερμοκρασία λειτουργίας, πρέπει είτε να βελτιωθεί η αγωγιμότητα της YSZ παρασκευάζοντας λεπτότερους στερεούς ηλεκτρολύτες, είτε να αναπτυχθούν και να εξεταστούν εναλλακτικά υλικά ως στερεοί ηλεκτρολύτες (π.χ. οξείδιο του ζirkονίου ενισχυμένο με οξείδιο του σκανδίου, SDZ, οξείδιο του δημητρίου ενισχυμένο με οξείδιο του γαδολινίου, GDC) που θα επιτυγχάνουν υψηλές τιμές ιοντικής αγωγιμότητας σε χαμηλές θερμοκρασίες. Για να μειωθεί η αντίσταση του ηλεκτρολύτη, η έρευνα έχει επικεντρωθεί κυρίως στη μείωση του πάχους του ηλεκτρολύτη από 150 μm σε λιγότερο από 20 μm, χρησιμοποιώντας διάφορες εναλλακτικές τεχνικές και μεθόδους (US DOE, 2002; Larminie *et al.*, 2003; Srinivasan, 2006; Haile, 2003).

Τα ανοδικά ηλεκτρόδια των κυψελών καυσίμου SOFC παρασκευάζονται από σύνθετα κονιοποιημένα μίγματα κεραμικών υλικών στερεών ηλεκτρολυτών, όπως οι YSZ, GDC ή SDC και οξειδίου του νικελίου (κεραμομεταλλικά μίγματα). Το οξείδιο του νικελίου ανάγεται στην μεταλλική του μορφή πριν από τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου. Η δομή του στερεού ηλεκτρολύτη παρεμποδίζει τη συσσωμάτωση των σωματιδίων του μετάλλου (Ni), ενώ ταυτόχρονα καθιστά το ηλεκτρόδιο θερμικά συμβατό με τον στερεό ηλεκτρολύτη. Τα ανοδικά ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές SOFCs αποτελούνται από νικέλιο σε ποσοστό περίπου 40%, μετά την αναγωγή του νικελίου. Η δομή της ανόδου παρασκευάζεται συνήθως με ένα πορώδες 20–40% (ειδική επιφάνεια 5-20 m<sup>2</sup>/g) για να διευκολύνεται η διάχυση των αντιδρώντων και προϊόντων χημικών ειδών. Όσον αφορά στην κάθοδο, ως ηλεκτρόδιο χρησιμοποιείται συνήθως το μικτό οξείδιο τύπου περοβσκίτη Λανθανίου, Στροντίου, Μαγνησίου (LSM), το οποίο έχει παρεμφερή συντελεστή θερμικής διαστολής με τη YSZ και εμφανίζει ικανοποιητική απόδοση σε θερμοκρασίες άνω των 800°C. Για λειτουργία σε χαμηλότερες θερμοκρασίες έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία μία ευρεία γκάμα περοβσκιτικών υλικών που θα ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθούν ως ηλεκτρόδια καθόδου (π.χ. περοβσκιτικά οξείδια Λανθανίου-Στροντίου-Σιδήρου (LSF), Λανθανίου-Στροντίου-Κοβαλτίου-Σιδήρου (LSCF), Λανθανίου-Στροντίου-Μαγνησίου-Σιδήρου (LSMF) κ.α.) (US DOE, 2002; Larminie *et al.*, 2003; Sun *et al.*, 2007; Fergus, 2006; Athanasiou *et al.*, 2007).

Οι ηλεκτρικές διασυνδέσεις (συνήθως οξείδιο του Χρωμίου ενισχυμένο με οξείδιο του Λανθανίου) που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την διασύνδεση των μοναδιαίων κυψελών καυσίμου σε μία συστοιχία SOFC θα πρέπει να είναι χημικά και μορφολογικά σταθερές τόσο σε

οξειδωτικές όσο και σε αναγωγικές συνθήκες, ενώ θα πρέπει ο συντελεστής θερμικής διαστολής να είναι παρεμφερής με τα υπόλοιπα υλικά που απαρτίζουν την κυψέλη καυσίμου. Το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί για την στεγανότητα των θαλάμων της ανόδου και της καθόδου τόσο μεταξύ τους όσο και με το ατμοσφαιρικό περιβάλλον θα πρέπει επίσης να διαθέτει παρόμοιο συντελεστή θερμικής διαστολής με τα υπόλοιπα υλικά και χημική συμβατότητα με τα υπόλοιπα τμήματα της συστοιχίας και των αέριων μιγμάτων. Επιπλέον θα πρέπει να είναι ηλεκτρικά μονωμένο για να αποτραπεί οποιαδήποτε πιθανότητα βραχυκυκλώματος (US DOE, 2002; Larminie *et al.*, 2003).

Οι κυψέλες καυσίμου SOFCs επίπεδης γεωμετρίας (planar SOFCs) αποτελούνται από επίπεδα, πολύ λεπτά κεραμικά δισκία, επιτρέποντας την επίτευξη εξαιρετικά υψηλών πυκνοτήτων ισχύος σε θερμοκρασίες των 800°C ή και σε ακόμη χαμηλότερες θερμοκρασίες. Οι κυψέλες καυσίμου SOFCs επίπεδης γεωμετρίας μπορούν να είναι υποστηριγμένες είτε στο ηλεκτρόδιο είτε στον ηλεκτρολύτη. Οι υποστηριγμένες στον στερεό ηλεκτρολύτη κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν μεμβράνες YSZ πάχους περίπου 100 μm, όπου η συνεισφορά τους στην συνολική ωμική αντίσταση του συστήματος εξακολουθεί να είναι ιδιαίτερα σημαντική ακόμα και στην θερμοκρασία των 900°C. Στις υποστηριγμένες στο ηλεκτρόδιο κυψέλες καυσίμου, το υπόστρωμα μπορεί να είναι είτε η άνοδος είτε η κάθοδος. Σε αυτές τις διατάξεις, ο στερεός ηλεκτρολύτης έχει πάχος 5-30 μm, ενώ το πάχος του ηλεκτροδίου μπορεί να είναι μεταξύ 250 μm - 2 mm. Στην περίπτωση των κυψελών καυσίμου υποστηριγμένων στο ηλεκτρόδιο της καθόδου, οι συντελεστές θερμικής διαστολής του ηλεκτρολύτη YSZ και του περοβσκίτη LSM είναι παρόμοιοι και συνεπώς δεν υπάρχει κανένας περιορισμός όσον αφορά στην παρασκευή πολύ λεπτών υμενίων στερεού ηλεκτρολύτη. Αντίθετα στις περιπτώσεις των υποστηριγμένων στην άνοδο κυψελών καυσίμου, όπου ο συντελεστής θερμικής διαστολής των κεραμομεταλλικών μιγμάτων Ni-YSZ είναι μεγαλύτερος από αυτόν του ηλεκτρολύτη YSZ, το λεπτότερο πάχος ηλεκτρολύτη που μπορεί να παρασκευαστεί δεν δύναται να είναι μικρότερο των 30 μm (US DOE, 2002; Larminie *et al.*, 2003).

Οι κυψέλες καυσίμου SOFCs κυλινδρικής γεωμετρίας έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτούν ιδιαίτερες διατάξεις για την στεγανοποίηση των θαλάμων της ανόδου και της καθόδου, επιτρέποντας την λειτουργία σε ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες και κατά συνέπεια την επίτευξη υψηλών πυκνοτήτων ισχύος. Ο κλειστός από τη μία πλευρά σωλήνας του στερεού ηλεκτρολύτη, ο οποίος βρίσκεται υποστηριγμένος στο ηλεκτρόδιο της καθόδου, κατασκευάζεται αρχικά με εξώθηση (extrusion) και στη συνέχεια με πυροσυσσωμάτωση σε υψηλή θερμοκρασία. Το υλικό ηλεκτρικής διασύνδεσης των μοναδιαίων



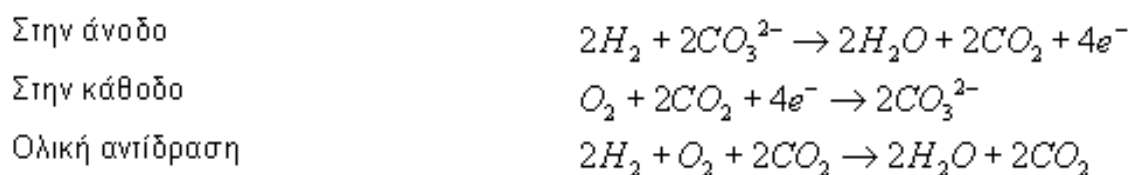
κυψελών καυσίμου τοποθετείται στο σωλήνα της καθόδου ως ένα λεπτό υμένιο πριν από την εναπόθεση του στερεού ηλεκτρολύτη. Με χρήση συμβατικών τεχνικών όπως η ηλεκτροχημική εναπόθεση ατμών (EVD), η επίστρωση ταινίας (tape casting) ή άλλες καινοτόμες τεχνικές επεξεργασίας και διαμόρφωσης κεραμικών είναι δυνατό να παρασκευαστούν σωλήνες στερεού ηλεκτρολύτη με πάχος περίπου 40μm. Το υλικό της ανόδου στην συνέχεια εναποτίθεται με χρήση κατάλληλων αιωρημάτων και τεχνικών (US DOE, 2002; Larminie *et al.*, 2003).

Το δυναμικό λειτουργίας μίας κυψέλης καυσίμου SOFC μειώνεται γραμμικά με την πυκνότητα ρεύματος, από έναν ενδεικτικό συντελεστή 0.73 mV/mA/cm<sup>2</sup> στους 1000oC και για τα συνήθη υλικά και πάχη αυτών των υλικών. Οι απώλειες δυναμικού στις κυψέλες καυσίμου SOFCs οφείλονται πρώτιστα στις ωμικές απώλειες (45, 18, 12 και 25% από την κάθοδο, την άνοδο, τον ηλεκτρολύτη, και το υλικό ηλεκτρικής διασύνδεσης, αντίστοιχα). Η απώλεια δυναμικού επίσης εξαρτάται ισχυρά και από τη θερμοκρασία λειτουργίας. Η απόδοση βελτιώνεται με τη χρήση καθαρού O<sub>2</sub> παρά του αέρα ως οξειδωτικό μίγμα, από το οποίο συμπεραίνεται ότι η υπέρταση συγκέντρωσης είναι σημαντική κατά τη διάρκεια της αναγωγής του O<sub>2</sub> του αέρα στο ηλεκτρόδιο της καθόδου. Αν και τόσο το H<sub>2</sub> όσο και το CO μπορούν να θεωρηθούν ως καύσιμα, το θεωρητικό δυναμικό για το H<sub>2</sub> υπερβαίνει αυτό του CO σε θερμοκρασίες πάνω από 800°C. Συνεπώς, αύξηση του περιεχόμενου H<sub>2</sub> στο μίγμα τροφοδοσίας συνεπάγεται υψηλότερο δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος και κατά συνέπεια υψηλότερες αποδόσεις. Επιπλέον, χαμηλές συγκεντρώσεις H<sub>2</sub> ή/και CO αυξάνουν την υπέρταση συγκέντρωσης, και κατ' αυτό τον τρόπο το δυναμικό της κυψέλης καυσίμου μειώνεται με την αξιοποίηση του καυσίμου. Ο παράγοντας χρήσης του καυσίμου και του οξειδωτικού είναι συνήθως της τάξης του 85 και 25%, αντίστοιχα. Τα τυπικά χαρακτηριστικά λειτουργίας των μικρής κλίμακας (μέχρι 5 kWe) κυψελών καυσίμου SOFCs κυμαίνονται μεταξύ 0.6-0.79 V, στα 0.2-0.8 A/cm<sup>2</sup> στους 750-800 oC, επιτυγχάνοντας πυκνότητες ισχύος της τάξης των 0.16-0.55 W/cm<sup>2</sup>. Όταν οι συγκεκριμένες διατάξεις συνδυάζονται με αεριοστρόβιλους, αναμένεται να επιτυγχάνονται ηλεκτρικές αποδόσεις της τάξης των 60–70% ενώ η απόδοση συμπαραγωγής είναι δυνατό να κυμανθεί μεταξύ 80–85%. Η ανθεκτικότητα των κυψελών καυσίμου SOFCs εξαρτάται από την επιλεγόμενη γεωμετρία και τις συνθήκες λειτουργίας. Σε εργαστηριακές ή/και πιλοτικές δοκιμές έχει επιτευχθεί διάρκεια ζωής μέχρι 8 ετών σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης. Όμως περισσότεροι από 50 on/off κύκλοι μπορούν να προκαλέσουν ανεπανόρθωτη ζημία στα συστήματα SOFCs λόγω των επικείμενων θερμικών εντάσεων (US DOE, 2002; Larminie *et al.*, 2003; Staffell, 2007c; Williams *et al.*, 2004; Bujalski *et al.*, 2007; Zink *et al.*, 2007).

## 1.8 Κυψέλη καυσίμου τηγμένου άνθρακα (MCFC)

Αυτές οι κυψέλες (molten carbonate fuel cells, MCFC) χρησιμοποιούνται για ηλεκτρολύτη ενώσεις του άνθρακα με λίθιο, νάτριο και κάλιο σε υγρή μορφή εμποτισμένες σε κατάλληλο υλικό. Ενώ χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλά επίπεδα απόδοσης λόγω των θερμοκρασιών όπου λειτουργούν (περίπου 650° C) δεν προσφέρονται για καθημερινή χρήση.

Ωστόσο, αυτή η υψηλή θερμοκρασία, η οποία απαιτείται προκειμένου ο ηλεκτρολύτης να γίνει ιοντικά αγώγιμος, επιτρέπει τη χρήση φτηνών καταλυτών αφού οι χημικοί δεσμοί καταστρέφονται και δημιουργούνται πολύ πιο εύκολα σε τέτοιες θερμοκρασίες. Η ίδια όμως υψηλή θερμοκρασία ευθύνεται για την αυξημένη διάβρωση και καταστροφή των μελών της κυψέλης. Ως καύσιμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα, φυσικό αέριο, προπάνιο και άλλα. Η ισχύς η οποία χαρακτηρίζει αυτόν τον τύπο κυψέλης κυμαίνεται ανάλογα τη χρήση από 10 kW μέχρι και 2 MW.



Παραπάνω φαίνονται οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που χαρακτηρίζουν αυτόν τον τύπο κυψέλης (το CO<sub>2</sub> παράγεται στην άνοδο και καταναλώνεται στην κάθοδο).

## 1.9 Κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων

Οι κυψέλες καυσίμου MCFCs τηγμένων ανθρακικών αλάτων μπορούν να λειτουργούν αποτελεσματικά με μίγματα καυσίμων που περιέχουν CO<sub>2</sub>, δηλαδή με μίγματα που μπορούν να προέρχονται είτε από την αναμόρφωση των υδρογονανθράκων είτε από την αεριοποίηση του άνθρακα/λιγνίτη και της βιομάζας, μολονότι η ανάγκη για CO<sub>2</sub> στην κάθοδο απαιτεί είτε τη μεταφορά του από την έξοδο της ανόδου (συνήθης πρακτική) είτε την παραγωγή του από την καύση των απαερίων της ανόδου. Ο ηλεκτρολύτης των κυψελών καυσίμου MCFCs αποτελεί

έναν συνδυασμό αλκαλικών ανθρακικών αλάτων, που διατηρούνται σε μια κεραμική μήτρα από  $\text{LiAlO}_2$ . Η μήτρα του ηλεκτρολύτη μπορεί να είναι είτε  $\alpha$ - ή  $\gamma$ - $\text{LiAlO}_2$ . Οι κυψέλες καυσίμου MCFCs τηγμένων ανθρακικών αλάτων λειτουργούν σε θερμοκρασίες μεταξύ  $600\text{-}700^\circ\text{C}$ , όπου τα ανθρακικά άλατα σχηματίζουν ένα τηγμένο άλας, το οποίο είναι αγωγός ιόντων  $\text{CO}_3^{2-}$ . Η σύνθεση του ηλεκτρολύτη επιδρά σημαντικά στην απόδοση και την αντοχή των κυψελών καυσίμου MCFCs, καθώς ευθύνεται για το μεγαλύτερο ποσοστό ( $>70\%$ ) των ωμικών απωλειών στην κυψέλη καυσίμου. Το  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  παρουσιάζει υψηλότερη ιοντική αγωγιμότητα από το  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  και το  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , εντούτοις, η διαλυτότητα και η διαχυτότητα του αερίου μίγματος είναι σχετικά χαμηλή. Οι ηλεκτρολύτες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι μίγματα ανθρακικών αλάτων καλίου/λίθιου ( $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{K}_2\text{CO}_3 - 62:38 \text{ mol } \%$ ) για λειτουργία σε ατμοσφαιρική πίεση και ανθρακικά άλατα νατρίου/λίθιου ( $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{Na}_2\text{CO}_3 - 52:48$  έως  $60:40 \text{ mol } \%$ ), για λειτουργία σε υψηλότερες πιέσεις (US DOE, 2002; Larminie *et al.*, 2003; Yuh *et al.*, 2002; Haile, 2003; Farooque *et al.*, 2006).

Οι προηγμένοι άνοδοι Ni περιέχουν Cr για να εξαλείψουν το πρόβλημα της συσσωμάτωσης. Εντούτοις, οι διμεταλλικοί άνοδοι Ni-Cr παρουσιάζουν ευαισθησία σε μηχανικές καταπονήσεις, ενώ το χρώμιο μπορεί να διαβρωθεί από το Li που υφίσταται στον ηλεκτρολύτη και να καταναλώσει το συγκεκριμένο ανθρακικό άλας. Βάσει των παραπάνω οι ερευνητικές προσπάθειες έχουν εστιαστεί στην μείωση του ποσοστού του Cr από το ηλεκτρόδιο της ανόδου. Οι τεχνολογικά προηγμένες κάθοδοι αποτελούνται από lithiated-NiO. Η διάλυση της καθόδου πιθανώς είναι ο κυριότερος παράγοντας που περιορίζει τη διάρκεια ζωής των κυψελών καυσίμου MCFCs, ιδιαίτερα σε συνθήκες λειτουργίας υπό πίεση. Οι διπολικοί δίσκοι αποτελούνται από τον διαχωριστή, τους συλλέκτες ρεύματος και το υλικό στεγανοποίησης. Οι διπολικοί δίσκοι κατασκευάζονται συνήθως από λεπτά φύλλα κράματος ανοξειδώτου χάλυβα που επικαλύπτεται από τη μια πλευρά με επίστρωση Ni, υμένιο το οποίο παραμένει σταθερό και αναλλοίωτο στο αναγωγικό περιβάλλον της ανόδου (US DOE, 2002; Larminie *et al.*, 2003; Yuh *et al.*, 2002).

Για να επιτευχθεί ικανοποιητική αγωγιμότητα απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Οι περισσότερες συστοιχίες κυψελών καυσίμου MCFCs λειτουργούν στους  $650^\circ\text{C}$ , έτσι ώστε να επιτυγχάνονται υψηλές αποδόσεις και να αυξάνεται η διάρκεια ζωής της συστοιχίας. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των  $650^\circ\text{C}$  αυξάνονται οι απώλειες του ηλεκτρολύτη, λόγω της εξάτμισης του και της έντονης διάβρωσης των υλικών. Το δυναμικό των κυψελών καυσίμου MCFCs ποικίλλει ανάλογα με τη σύσταση των αερίων μιγμάτων τροφοδοσίας. Αυξάνοντας την μετατροπή των αντιδρώντων μειώνεται γενικά η απόδοση της κυψέλης καυσίμου. Τυπικά επιλέγεται ένας παράγοντας

χρήσης του καυσίμου της τάξης του 75 έως 85%. Η ηλεκτροχημική αντίδραση στην κάθοδο περιλαμβάνει την κατανάλωση δύο moles CO<sub>2</sub> για κάθε mol O<sub>2</sub>, και αυτή η αναλογία παρέχει τη βέλτιστη απόδοση της καθόδου (US DOE, 2002; Larminie *et al.*, 2003; Yuh *et al.*, 2002).

Η σταθερότητα των κυψελών καυσίμου MCFCs αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα το οποίο θα πρέπει να αντιμετωπιστεί για την επιτυχή εμπορευματοποίηση των συγκεκριμένων διατάξεων. Ως στόχος θεωρείται ότι η υποβάθμιση του δυναμικού της κυψέλης καυσίμου δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 15 mV/A για διάρκεια λειτουργίας 5 ετών. Οι σημερινές διατάξεις MCFCs εμφανίζουν μια μέση υποβάθμιση του δυναμικού τους λειτουργίας των 40 mV/A. Σε πλήρη λειτουργία, μία κυψέλη καυσίμου MCFC μπορεί να επιτύχει απόδοση μέχρι 55%, η οποία μειώνεται σε μικρά φορτία. Οι συμβατικές κυψέλες καυσίμου MCFCs τηγμένων ανθρακικών αλάτων λειτουργούν σε ένα εύρος 100-200 mA/cm<sup>2</sup> και σε δυναμικό 750-900 mV/μοναδιαία κυψέλη, επιτυγχάνοντας πυκνότητες ισχύος μεγαλύτερες από 150 mW/cm<sup>2</sup>. (US DOE, 2002; Larminie *et al.*, 2003; Yuh *et al.*, 2002).

## 1.10 Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)

Οι κυψέλες φωσφορικού οξέος (phosphoric - acid fuel cells, PAFC) είναι αυτές όπου είναι διαθέσιμες σήμερα στο εμπόριο. Η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος κυμαίνεται σε αρκετά υψηλά επίπεδα.

Οι θερμοκρασίες λειτουργίας του βρίσκονται στην περιοχή των 150 με 200°C. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες το φωσφορικό οξύ γίνεται κακός ιοντικός αγωγός και το μονοξείδιο του άνθρακα CO το οποίο σχηματίζεται πάνω στον καταλύτη δηλητηριάζει την άνοδο ρίχνοντας πάρα πολύ την απόδοση. Ωστόσο τα επίπεδα ανοχής της συγκέντρωσης του CO είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει περισσότερα είδη καυσίμων για τη τροφοδότηση του. Στην περίπτωση της συμβατικής βενζίνης ωστόσο πρέπει να απομακρυνθούν τα σουλφίδια. Τα μειονεκτήματα των PA κυψελών 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 κυψελών καυσίμου.

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που χαρακτηρίζουν αυτόν τον τύπο είναι ίδιες με αυτής της PEM κυψέλης.

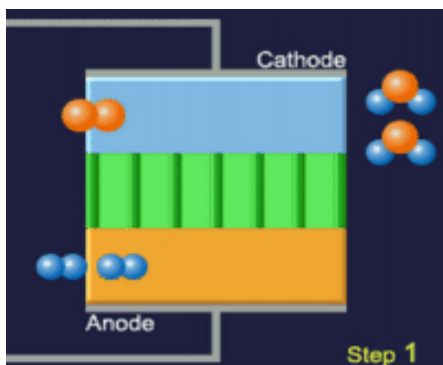
## 1.11 Οι κυψέλες του τύπου PAFC

Οι κυψέλες του τύπου φωσφορικού οξέος -PAFC, είναι από τις πιο προηγμένες τεχνολογικά και εμπορικά.

Μπορούν να λειτουργούν σε υψηλή θερμοκρασία και ταιριάζουν έτσι με τις συνθήκες που επικρατούν συνήθως. Το φωσφορικό οξύ είναι σε υψηλή συγκέντρωση το οποίο ενώνεται με ένα ζελ που παίζει το ρόλο του καταλύτη.

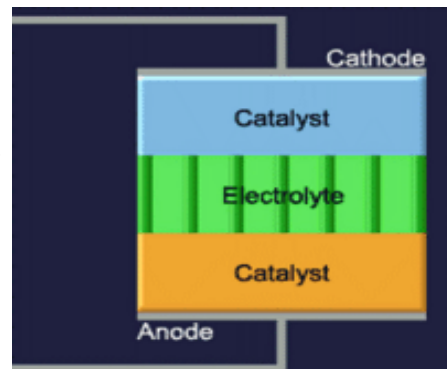
Το PAFC θέλει ατμοσφαιρικό οξυγόνο και υδρογόνο σαν αέρια αναγωγής. Υπάρχει όμως ένα μειονέκτημα. Το φωσφορικό οξύ χαλάει όταν η θερμοκρασία βρίσκεται κάτω από τους 42°. Τότε δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ενεργειακή κυψέλη.

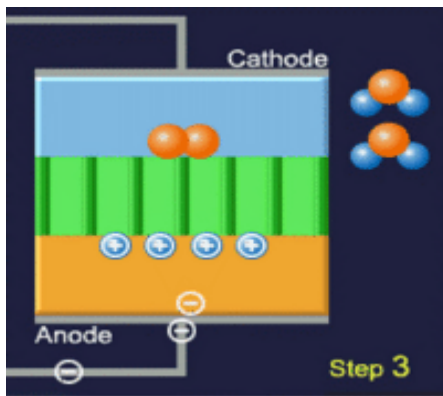
Η ενεργειακή κυψέλη στην παρακάτω μορφή αποτελείται από δύο ξεχωριστά τμήματα --τους δύο καταλύτες-- ανάμεσα στα οποία υπάρχει ένας ηλεκτρολύτης (διάλυμα υδροξειδίου του καλίου). Οι καταλύτες περιέχουν πλατίνα, για την διευκόλυνση των χημικών αντιδράσεων που ακολουθούν. Το τμήμα που εισάγεται το υδρογόνο θα αποτελέσει την άνοδο και στο τμήμα που εισάγεται το οξυγόνο θα αποτελεί την κάθοδο. Στους δύο πόλους συνδέεται η συσκευή που θέλουμε να λειτουργήσει.



**1<sup>η</sup> φάση:** Αρχίζει και ρέει αέριο οξυγόνο ( $O_2$ ) --πορτοκαλί χρώμα-- και αέριο υδρογόνο ( $H_2$ ) --μπλε χρώμα-- στα δύο ξεχωριστά τμήματα. Έτσι έχουμε 2 άτομα οξυγόνου πάνω και 4 άτομα υδρογόνου κάτω.

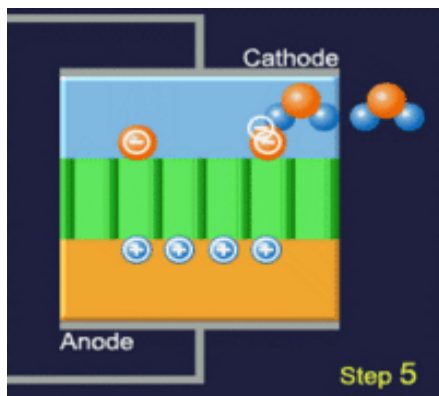
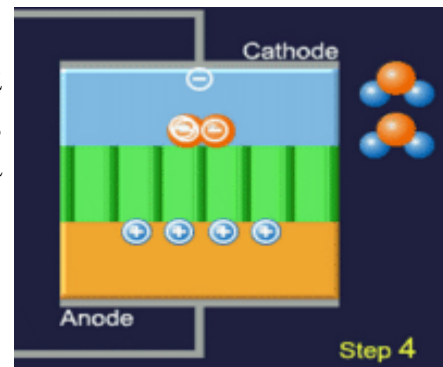
**2<sup>η</sup> φάση:** Όταν έρθουν σε επαφή τα δύο μόρια  $H_2$  με τον καταλύτη ιονίζονται προς τέσσερα πρωτόνια και τέσσερα ηλεκτρόνια. Την ίδια στιγμή τα 4 ελεύθερα ηλεκτρόνια φεύγουν προς το εξωτερικό κύκλωμα, μέσω του οποίου έρχονται προς την κάθοδο.





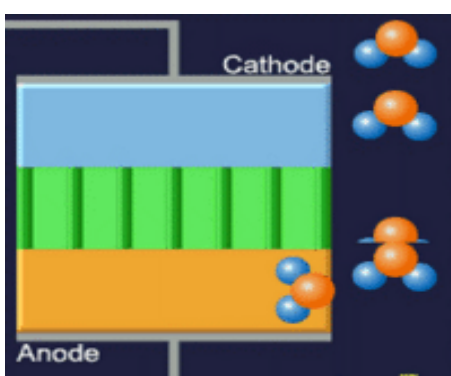
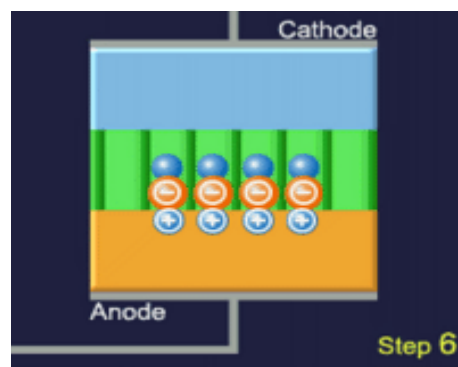
**3<sup>η</sup> φάση:** Τα 4 ηλεκτρόνια κινούνται από την άνοδο προς την κάθοδο και δημιουργούν έτσι ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Το κάτω μέρος έχει έλλειμμα ηλεκτρονίων (θετικός πόλος) ενώ το πάνω μέρος έχει περίσσεια ηλεκτρονίων (αρνητικός πόλος). Αυτό το ηλεκτρικό κύκλωμα μπορεί να τροφοδοτήσει μια ηλεκτρική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

**4<sup>η</sup> φάση:** Εν συνεχεία τα τέσσερα ηλεκτρόνια, που βρίσκονται στην κάθοδο, ενώνονται με τα δύο άτομα οξυγόνου και τα φορτίζουν αρνητικά.



**5<sup>η</sup> φάση:** Τα δύο μόρια του νερού, που βρίσκονται ήδη στην κάθοδο (στο δεξί μέρος) ενώνονται με τα δύο ιόντα οξυγόνου (πορτοκαλί σφαίρα) σχηματίζοντας 4 ιόντα υδροξυλίου  $\text{OH}^-$ .

**6<sup>η</sup> φάση:** Αυτά τα 4 ιόντα του  $\text{OH}^-$  κινούνται μέσω του ηλεκτρολύτη (διάλυμα υδροξειδίου του καλίου) προς την άνοδο.



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

### **1.12 Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος**

Οι κυψέλες καυσίμου PAFCs φωσφορικού οξέος αποτελούν την πρώτη ουσιαστικά τεχνολογία κυψελών καυσίμου που εμπορευματοποιήθηκε. Η συγκεκριμένη κατηγορία κυψελών καυσίμου αντιπροσώπευε σχεδόν το 40% των εγκατεστημένων μονάδων κυψελών καυσίμου το 2004 (Sammes *et al.*, 2004).

Η δυναμικότητα των περισσότερων επιδεικτικών μονάδων PAFCs κυμαινόταν μεταξύ 50-200 kW, αλλά πρέπει να επισημανθεί ότι έχουν κατασκευαστεί τόσο μεγαλύτερες μονάδες (1-10 MW) όσο και μικρότερα συστήματα PAFCs (1-10 kW) (Ghouse *et al.*, 2000 Yang *et al.*, 2002). Η διάρκεια ζωής των κυψελών καυσίμου PAFCs έχει αποδειχθεί ότι προσεγγίζει τα 5 έτη, στα οποία η υποβάθμιση της απόδοσης του δεν ξεπερνά το 5%. Η τεχνολογία παρασκευής των ηλεκτροδίων/ηλεκτρολυτών φωσφορικού οξέος που χρησιμοποιούνται στα PAFCs θεωρείται ότι βρίσκεται σε στάδιο ωρίμανσης. Εντούτοις, απαιτείται περαιτέρω αύξηση στην πυκνότητα ισχύος και μείωση του κόστους, ώστε να είναι από οικονομικής απόψεως ανταγωνιστικές (US DOE, 2002; Larminie *et al.*, 2003; Haile, 2003).

Ο ηλεκτρολύτης στις κυψέλες καυσίμου PAFCs αποτελείται από ένα πυκνό (μέχρι και 100%) διάλυμα  $H_3PO_4$  το οποίο τοποθετείται σε μήτρα από καρβίδιο του πυριτίου. Ο συγκεκριμένος ηλεκτρολύτης είναι αγωγός πρωτονίων. Η σχετική σταθερότητα του πυκνού διαλύματος  $H_3PO_4$  είναι υψηλή, επιτρέποντας στις κυψέλες καυσίμου PAFCs να λειτουργούν σε θερμοκρασίες μέχρι τους 220°C. Τα συμβατικά συστήματα PAFCs λειτουργούν μεταξύ 150 και 220°C, επειδή σε χαμηλότερες θερμοκρασίες η αγωγιμότητα του διαλύματος  $H_3PO_4$  είναι χαμηλή. Επιπλέον σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι πιθανή η δηλητηρίαση του ανοδικού ηλεκτροδίου (Pt) από το μονοξείδιο του άνθρακα, όπως σημειώθηκε και στην περίπτωση των PEMFCs. Το ηλεκτρόδιο της ανόδου αποτελείται από Λευκόχρυσο, Pt, ο οποίος υποστηρίζεται σε άνθρακα (carbon black). Η περιεκτικότητα σε Pt είναι περίπου ίση με 0,1 mg/cm<sup>2</sup> στην περίπτωση του ανοδικού ηλεκτροδίου και 0,50 mg Pt/cm<sup>2</sup> στο ηλεκτρόδιο της καθόδου. Επίσης, ως καθοδικά ηλεκτρόδια έχουν εξεταστεί μέταλλα μετάπτωσης (π.χ. σίδηρος, κοβάλτιο), οργανικά

μακροκυκλικά μόρια (τετραμεθοξυφαινολοπορφυρίνες, φθαλοκυανίδια, κ.α.) και κράματα Pt με μέταλλα μετάπτωσης, όπως τα Ti, Cr, V και Zr.

Τα ηλεκτρόδια εκτός του ηλεκτροκαταλύτη περιέχουν και 30-50% κ.β. πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE), το οποίο αποτελεί υλικό σύνδεσης (binder) που χρησιμοποιείται για την διαμόρφωση και διατήρηση της δομής του ηλεκτροδίου. Οι διπολικοί δίσκοι διαχωρίζουν τις μοναδιαίες κυψέλες καυσίμου και τις συνδέουν ηλεκτρικά, διαμορφώνοντας ταυτόχρονα τα απαραίτητα κανάλια διάχυσης των αερίων μιγμάτων (US DOE, 2002; Larminie *et al.*, 2003).

Μια από τις σημαντικότερες αιτίες υποβάθμισης της απόδοσης των κυψελών καυσίμου PAFCs, είναι η πλημμύριση και ξήρανση των ηλεκτροδίων λόγω της μετακίνησης του H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> μεταξύ της μήτρας και των ηλεκτροδίων κατά τη διάρκεια του κύκλου πλήρωσης της κυψέλης καυσίμου. Η χημειορόφηση του μονοξειδίου του άνθρακα επηρεάζει τα ηλεκτρόδια Pt που δρουν και ως οι καταλύτες των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Τόσο η θερμοκρασία όσο και η συγκέντρωση του CO επιδρούν σημαντικά σε αυτό το φαινόμενο, ενώ τόσο το H<sub>2</sub>S όσο και το CO μειώνουν δραματικά την ενεργότητα των χρησιμοποιούμενων καταλυτικών συστημάτων. Η αύξηση της πίεσης ενισχύει την απόδοση των κυψελών καυσίμου PAFCs, λόγω της χαμηλότερης υπέρτασης συγκέντρωσης στην κάθοδο και κατά συνέπεια της αύξησης του αντιστρεπτού δυναμικού της κυψέλης καυσίμου. Η αύξηση στη θερμοκρασία έχει επίσης ευεργετική επίδραση στην απόδοση (0.55-1.15 mV/°C), επειδή μειώνονται συνολικά οι υπερτάσεις ενώ ταυτόχρονα η κινητική της αναγωγής του οξυγόνου βελτιώνεται (US DOE, 2002; Larminie *et al.*, 2003).

Το δυναμικό που είναι δυνατό να επιτευχθεί στις κυψέλες καυσίμου PAFCs μειώνεται λόγω των ωμικών αντιστάσεων και των υπερτάσεων ενεργοποίησης και συγκέντρωσης, οι οποίες αυξάνονται με την πυκνότητα ρεύματος κατά έναν παράγοντα 0.45-0.75 mV/mA/cm<sup>2</sup>, για ατμοσφαιρική πίεση, και 0.4-0.5 mV/mA/cm<sup>2</sup>, για λειτουργία σε υψηλές πιέσεις (μέχρι 8 bar). Το μεγαλύτερο ποσοστό της υπέρτασης οφείλεται στην κάθοδο και είναι μεγαλύτερο χρησιμοποιώντας αέρα (560 mV σε 300 mA/cm<sup>2</sup>) αντί για καθαρό οξυγόνο (480 mV σε 300 mA/cm<sup>2</sup>). Η υπέρταση λόγω της ανόδου είναι πολύ χαμηλή (-4 mV/100 mA/cm<sup>2</sup>) χρησιμοποιώντας καθαρό H<sub>2</sub> ως καύσιμο. Οι ωμικές απώλειες είναι επίσης σχετικά μικρές, οι οποίες ανέρχονται περίπου σε 12mV για 100mA/cm<sup>2</sup> πυκνότητα ρεύματος. Οι κυψέλες καυσίμου PAFCs φωσφορικού οξέος λειτουργούν συνήθως σε πυκνότητες ρεύματος μεταξύ 100-450 mA/cm<sup>2</sup> και σε δυναμικά 600-800 mV/μοναδιαία κυψέλη, επιτυγχάνοντας πυκνότητες ισχύος 100-330 mW/cm<sup>2</sup>, και ηλεκτρικές αποδόσεις 40-55% ως προς την ανώτερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου, HHV. Ένας από τους κυριότερους τομείς, στους οποίους



εστιάζεται η έρευνα στα PAFCs αφορά στην επέκταση της ωφέλιμης ζωής τους σε περισσότερες από 40000 h συνεχούς λειτουργίας χωρίς να υποβαθμίζεται η απόδοσή τους (US DOE, 2002; Larminie *et al.*, 2003; Staffell *et al.*, 2007).

### 1.13 Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου

Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου AFCs ήταν η πρώτη τεχνολογία κυψελών καυσίμου που εφαρμόστηκε στην πράξη και συγκεκριμένα στις διαστημικές αποστολές της NASA από τις αρχές της δεκαετίας του '60 (US DOE, 2002). Το κυριότερο πλεονέκτημα των κυψελών καυσίμου AFCs είναι η ταχεία κινητική των αντιδράσεων, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλότερων δυναμικών και κατά συνέπεια υψηλότερων αποδόσεων σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους κυψελών καυσίμου (Gouirec *et al.*, 2004). Εντούτοις, αυτά τα πλεονεκτήματα εξαλείφονται όταν οι AFCs τροφοδοτούνται με καύσιμο φυσικό αέριο (Staffell *et al.*, 2007). Ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται αποτελείται από πυκνό (85 wt%) διάλυμα KOH στις υψηλών θερμοκρασιών κυψέλες καυσίμου AFCs (~250°C), ή από αραιό (35-50 wt%) διάλυμα KOH στις αλκαλικές κυψέλες καυσίμου χαμηλών θερμοκρασιών (< 120°C). Το διάλυμα KOH διατηρείται και αυτό, όπως στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, σε μια μήτρα αμιάντου. Το CO αποτελεί και στην συγκεκριμένη περίπτωση δηλητήριο, ενώ επιπλέον το CO<sub>2</sub> αντιδρά με KOH παράγοντας K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Συνεπώς ακόμη και οι μικροποσότητες του περιβαλλοντικού CO<sub>2</sub> μπορούν να αποβούν καταστρεπτικές για την απόδοση και την διάρκεια ζωής της κυψέλης καυσίμου. Η περιορισμένη διάρκεια ζωής, η οποία οφείλεται κυρίως στην παρουσία ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> και το κόστος απομάκρυνσης του CO<sub>2</sub> τόσο στον αέρα όσο και στα καύσιμα, δικαιολογούν τις περιορισμένες εφαρμογές των κυψελών καυσίμου AFCs (US DOE, 2002 Staffell *et al.*, 2007; Price Waterhouse Coopers, 2006; Worldwide Fuel Cell Industry Survey, 2006). Εντούτοις, το κόστος των AFCs μπορεί να μειωθεί σημαντικά, ιδιαίτερα στην περίπτωση που μειωθεί το κόστος και βελτιστοποιηθούν οι μέθοδοι παρασκευής των υλικών, από τα οποία απαρτίζεται (Staffell *et al.*, 2007; McLean *et al.*, 2001; Gülzow *et al.*, 2004).

Ο ηλεκτρολύτης στις κυψέλες καυσίμου AFCs αποτελείται από ένα υδατικό διάλυμα KOH, συγκέντρωσης 6-12 N. Ο ηλεκτρολύτης με 35% περιεκτικότητα σε KOH (περίπτωση χαμηλών θερμοκρασιών AFCs) ανατροφοδοτείται συνήθως από μια δεξαμενή που τοποθετείται στην πλευρά της ανόδου. Η μήτρα του ηλεκτρολύτη, η οποία αποτελείται από

αμίαντο, ουσιαστικά λειτουργεί και ως διαχωριστής των αερίων μιγμάτων του καυσίμου και του οξειδωτικού. Επίσης όμως για τη μήτρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο διαχωριστής των μιγμάτων του καυσίμου και του οξειδωτικού (μήτρα ηλεκτρολύτη) των AFCs που είναι συνήθως αμίαντος, αλλά χρησιμοποιούνται επίσης τιτανικό κάλιο, φωσφορική δημητρία ή ζirkονία. Στις περισσότερες περιπτώσεις ως ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται ευγενή μέταλλα σε υψηλές περιεκτικότητες (δηλ. 80% Pt - 20% Pd). Επίσης, στοχεύοντας στην περαιτέρω μείωση του κόστους έχουν δοκιμαστεί ως ηλεκτροκαταλύτες και μη ευγενή μέταλλα, όπως Ni και Ag με ιδιαίτερα υψηλή ειδική επιφάνεια καθώς και μικτά οξειδία τύπου σπινελίου και περοβσκίτη. Οι περιεκτικότητες σε ευγενή μέταλλα είναι της τάξης των 5 g/m<sup>2</sup>. Ο ηλεκτροκαταλύτης είναι διεσπαρμένος σε πορώδη ηλεκτρόδια άνθρακα. Μια τυπική διάταξη AFC επίσης περιλαμβάνει τους συλλέκτες ρεύματος από νικέλιο καθώς και τους διπολικούς δίσκους, οι οποίοι αποτελούνται από μαγνήσιο με επίστρωση χρυσού (US DOE, 2002; Larminie *et al.*, 2003).

Στην άνοδο ως καύσιμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε καθαρό H<sub>2</sub> ή αμμωνία υπό τη μορφή των προϊόντων διάσπασής της, δηλαδή μίγμα με 25% N<sub>2</sub>, 75% H<sub>2</sub> και μικρές ποσότητες NH<sub>3</sub>. Λόγω του υψηλού ποσοστού διάχυσης του υδρογόνου, στην περίπτωση της τροφοδοσίας με NH<sub>3</sub>, το δυναμικό της κυψέλης μειώνεται σε μικρό βαθμό σε μέσες πυκνότητες ρεύματος. Ο καθαρισμός του αερίου από τα ανθρακούχα υπολείμματα θεωρείται απαραίτητος στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο το H<sub>2</sub> (US DOE, 2002; Larminie *et al.*, 2003).

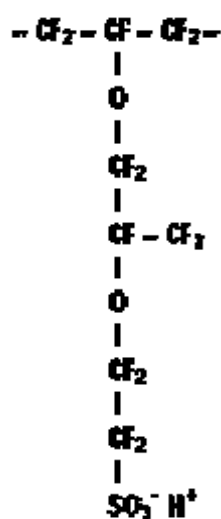
Το δυναμικό λειτουργίας των αλκαλικών κυψελών καυσίμου AFC κυμαίνεται μεταξύ 0.6-0.85 V σε πυκνότητες ρεύματος 100-250 mA/cm<sup>2</sup>, όπου επιτυγχάνονται πυκνότητες ισχύος της τάξεως των 60-180 mW/cm<sup>2</sup>. Η εταιρεία UTC fuel cells έχει κατασκευάσει κυψέλες καυσίμου AFCs, οι οποίες επιτυγχάνουν πυκνότητα ισχύος ίση με 3.4 W/cm<sup>2</sup> σε δυναμικό 0.8V και για πυκνότητα ρεύματος 4.3 A/cm<sup>2</sup> (Staffell *et al.*, 2007; McLean *et al.*, 2001; Staffell, 2007a). Οι κυψέλες καυσίμου AFCs δεν έχουν εμπορευματοποιηθεί έως σήμερα, γεγονός που αποδίδεται στα προβλήματα που σχετίζονται με τη διάρκεια ζωής και την υποβάθμιση της απόδοσης λόγω της παρουσίας του CO<sub>2</sub> (McLean *et al.*, 2001; Gólzow *et al.*, 2004). Ο βαθμός υποβάθμισης κυμαίνεται μεταξύ 160-200 mV/a και η διάρκεια ζωής μεταξύ 4000-10000 ώρες λειτουργίας (περίπου μισό με ένα έτος) (Staffell *et al.*, 2007; Staffell, 2007a). Εντούτοις, η μέση διάρκεια ζωής της συστοιχίας δεν υπερβαίνει τις 4000 h. Για την εμπορευματοποίηση των κυψελών καυσίμου AFCs σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας και λαμβάνοντας υπόψη τα σχετιζόμενα οικονομικά μεγέθη, θα πρέπει η διάρκεια ζωής των συγκεκριμένων διατάξεων να υπερβεί τις 40000 h (US DOE, 2002; Larminie *et al.*, 2003).

## 1.14 Κυψέλη καυσίμου μεθανόλης (DMFC)

Σε όλες τις παραπάνω κυψέλες ως καύσιμο χρησιμοποιείται το υδρογόνο. Ωστόσο, ο συγκεκριμένος τύπος κυψελών (direct methanol fuel cells, DMFC) χρησιμοποιεί ως καύσιμο μεθανόλη χωρίς να απαιτεί τη μετατροπή της σε υδρογόνο. Σε αυτή την περίπτωση η μεθανόλη είναι αυτή που οξειδώνεται στην άνοδο. Η κατηγορία αυτή είναι πιο πρόσφατη των κυψελίδων PEM με αρκετά ακόμα προβλήματα προς επίλυση όπως η μεγάλη ποσότητα καταλύτη που απαιτείται. Ωστόσο, εάν η συγκεκριμένη τεχνολογία επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί στη θέση των PEM κυψελών δε θα υπήρχε η ανάγκη αναζήτησης εναλλακτικών τρόπων αποθήκευσης του καυσίμου όπως γίνεται στη δεύτερη περίπτωση με το υδρογόνο ενώ δε θα ήταν αναγκαία και η ανάπτυξη αναμορφωτών.

## 1.15 Μεμβράνη κυψέλης PEM

Μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων της κυψέλης καυσίμου βρίσκεται ο ηλεκτρολύτης. Ο ηλεκτρολύτης ονομάζεται έτσι λόγω της ιδιότητας του να δίσταται σε θετικά και αρνητικά ιόντα. Στην περίπτωση μιας PEM κυψέλης ο ηλεκτρολύτης είναι πλαστικό οργανικό πολυμερές και συνηθέστερα ονομάζεται μεμβράνη ( membrane ). Μία τυπική τέτοια μεμβράνη, όπως το Nafion ( polyperfluorosulfonic acid ), αποτελείται από τρεις ομάδες ατόμων.

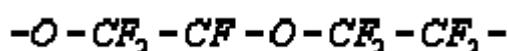


### Σχήμα 7: Ομάδες ατόμων υδρογόνου

Μίας ομάδας, παρόμοιας δομής με αυτή του Teflon (πολυτετραφθοροαιθυλένιο), με εκατοντάδες επαναλαμβανόμενες μονάδες τύπου :



Μίας δεύτερης, τύπου:



στο ρόλο πλαϊνής αλυσίδας η οποία ενώνει τις προηγούμενες μονάδες με μια τρίτη, με τύπο  $SO_3^- H^+$ .

Τα αρνητικά ιόντα του  $SO_3^-$  είναι μόνιμα ενωμένα στις πλαϊνές αλυσίδες. Ωστόσο, όταν η μεμβράνη βρεθεί σε ένυδρο περιβάλλον, απορροφώντας νερό, τα ιόντα υδρογόνου αποκτούν την ικανότητα να κινηθούν ελεύθερα. Η κίνηση αυτή γίνεται, καθώς προσκολλώνται στα πολικά μόρια του νερού, όπως περιγράφεται από τον τύπο  $H(H_2O)_n^+$ , και μεταπηδούν μεταξύ των  $SO_3^-$  ιόντων μέσα στη μεμβράνη. Αυτός είναι και ο λόγος όπου ο συγκεκριμένος τύπος ηλεκτρολύτη σε ένυδρη μορφή αποτελεί πολύ καλό αγωγό πρωτονίων.

Αυτό από την άλλη μεριά, τίθεται ένας περιορισμός ως προς τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας των PEM κυψέλων καυσίμου, αφού το νερό θα πρέπει να παραμένει σε υγρή κατάσταση. Σε συνθήκες λειτουργίας οι οποίες χαρακτηρίζονται από αυξημένες πιέσεις το όριο των 100 αίρεται αλλά ταυτόχρονα μειώνεται και ο χρόνος ζωής της κυψέλης. Για αυτό το λόγο έρευνα γίνεται σήμερα προς αναζήτηση συν τοις άλλοις και για μεμβράνες όπου μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλότερες των 100°C θερμοκρασίες.

Το πάχος αυτής της μεμβράνης κυμαίνεται μεταξύ των 25-175 μm. Συγκρινόμενο δηλαδή, με ένα φύλλο χαρτί, είναι 2 με 7 φορές πιο παχύ. Για τη λειτουργία της κυψέλης απαιτείται όπως είδαμε παραπάνω, η μεμβράνη να είναι ένυδρη. Η ιδιαιτερότητα των PEM μεμβρανών ως ηλεκτρολύτες είναι ότι παρουσία νερού, τα αρνητικά ιόντα παραμένουν σταθερά τη θέση του ενώ μπορούν να κινηθούν μόνο τα θετικά. Η κίνηση αυτή πρέπει να γίνεται προς μία κατεύθυνση μόνο. Επίσης η μεμβράνη εκ κατασκευής εμποδίζει το αέριο υδρογόνο να αναμειχθεί με το αέριο

οξυγόνο διότι σε αντίθετη περίπτωση δεν θα ήταν δυνατή η λειτουργία της κυψέλης.

Τέλος η μεμβράνη αυτή ανήκει στην κατηγορία των ηλεκτρικών μονωτών κι έτσι παρεμποδίζεται η διέλευση ηλεκτρονίων διαμέσου αυτής και αυτά αναγκάζονται να ακολουθήσουν το δρόμο ενός εξωτερικού κυκλώματος.

## 1.16 Ηλεκτρόδια κυψέλης

Τα ηλεκτρόδια της κυψέλης αποτελούν πολύπλοκες νανοδομές και περιέχουν καταλύτη, πόρους και ηλεκτρικά αγωγά υλικά. Όλες οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε μία κυψέλη καυσίμου αποτελούνται από δύο επιμέρους ημι-αντιδράσεις. Την **οξείδωση** (Αγγλ. *Oxidation*) του υδρογόνου η οποία πραγματοποιείται στην άνοδο και την **αναγωγή** (Αγγλ. *Reduction*) του οξυγόνου στην κάθοδο.

Με την οξείδωση του υδρογόνου παράγονται ιόντα υδρογόνου (πρωτόνια), τα οποία μεταφέρονται μέσω της ιοντικά αγωγιμης μεμβράνης στην κάθοδο και ηλεκτρόνια τα οποία διοχετεύονται στο εξωτερικό κύκλωμα καθώς η διέλευση τους μέσα από τη μεμβράνη δεν είναι δυνατή.

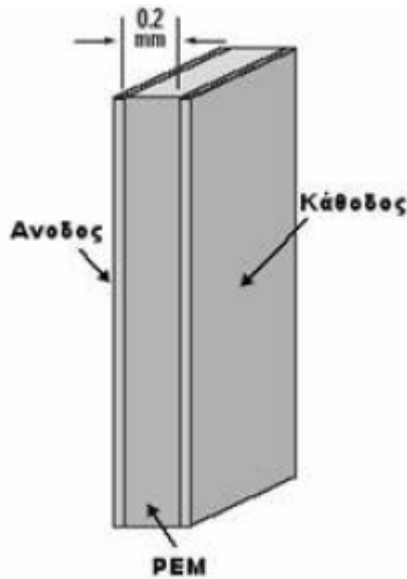
Η αναγωγή του οξυγόνου γίνεται καθώς το οξυγόνο το οποίο παρέχεται από τον αέρα έρχεται σε επαφή με τα ιόντα υδρογόνου και παράγεται νερό και θερμότητα. Αντίθετα με τη διαδικασία της οξείδωσης, στη διαδικασία της αναγωγής δεν έχει ακόμα κατανοηθεί ο μηχανισμός της αντίδρασης πλήρως.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ταχύτητα της καθοδικής αντίδρασης είναι 100 φορές μικρότερη από αυτή της ανόδου και αυτό δημιουργεί ένα σημαντικό όριο στην απόδοση της κυψέλης. Η χαμηλή ταχύτητα αναγωγής του οξυγόνου οφείλεται σε 3 παράγοντες:

Στη μεγάλη ισχύ του δεσμού του μοριακού οξυγόνου και στην αυξημένη σταθερότητα του δεσμού Pt - O ή Pt - OH.

Στο ότι είναι αντίδραση μεταφοράς 4 ηλεκτρονίων.

Στην δημιουργία παραπροϊόντων όπως το H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (OH-OH).

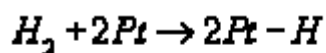


Σχήμα 8: Ηλεκτρόδια PEM κυψέλης

### 1.17 Καταλύτης κυψέλης

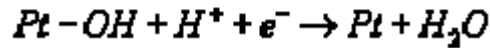
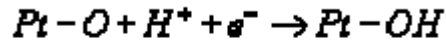
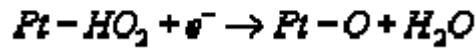
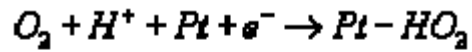
Οι δύο ημιαντιδράσεις, η οξείδωση δηλαδή του υδρογόνου και η αναγωγή του οξυγόνου, χαρακτηρίζονται από χαμηλές ταχύτητες στις χαμηλές θερμοκρασίες όπου λειτουργεί μια PEM κυψέλη καυσίμου και αυτό είναι που κάνει απαραίτητη την παρουσία καταλύτη. Ο καταλύτης όπου έχει μελετηθεί περισσότερο μέχρι στιγμής και για τις δύο αυτές αντιδράσεις είναι ο λευκόχρυσος, ένα αρκετά ακριβό υλικό.

Στην άνοδο ο καταλύτης δρα σε δύο στάδια, μέσω μίας διασπαστικής χημειορρόφησης και μίας αντίδρασης μεταφοράς ηλεκτρονίων, ως εξής:



Το ρυθμορυθμιστικό στάδιο της ολικής αντίδρασης αποτελεί η χημειορρόφηση.

Στην κάθοδο, αν και ο μηχανισμός αντίδρασης δε μπορεί ακόμα να περιγραφεί πλήρως, ένα μοντέλο είναι το εξής:



Στην κάθοδο εκτός από καθαρό ενεργό καταλύτη Pt γίνεται χρήση και κράμα Pt - Ru .

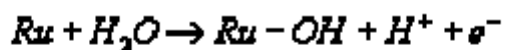
Ο δεσμός μεταξύ και Pt και H είναι ούτε αρκετά ασθενής έτσι ώστε να γίνεται εύκολη η διάσπαση του μοριακού υδρογόνου, ούτε αρκετά ισχυρή έτσι ώστε το ατομικό υδρογόνο να διατίθεται άμεσα για χρήση στην κυψέλη. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι που ξεχωρίζει το λευκόχρυσο ως καταλύτη. Ωστόσο επειδή πρόκειται για ακριβό υλικό απαιτείται η μεγιστοποίηση της καταλυτικά ενεργής επιφάνειας του καταλύτη. Έτσι κάθε ηλεκτρόδιο αποτελείται από πορώδες άνθρακα πάνω στο οποίο βρίσκονται σωματίδια Pt . Το πορώδες του ηλεκτροδίου βοηθάει στην ομοιογενή διάχυση του αερίου. Τόσο ο άνθρακας όσο και ο λευκόχρυσος αποτελούν ηλεκτρικά αγωγικά υλικά έτσι ώστε τα ηλεκτρόνια να κινούνται ελεύθερα μέσα στο ηλεκτρόδιο. Το μέγεθος των σωματιδίων του Pt είναι της τάξης των 2 νανομέτρων, κάτι το οποίο συνεπάγεται μεγάλη ολική επιφάνεια Pt προσβάσιμη από τα αέρια ακόμα και σε μικρή μάζα καταλύτη. Αυτά τα σωματίδια βρίσκονται διεσπαρμένα πάνω σε άλλα μεγαλύτερα σωματίδια άνθρακα μεγέθους περίπου 30 nm όπου με τη σειρά τους αποτελούν μέρη της μακροδομής του καταλύτη.

Η οξειδωση του υδρογόνου λαμβάνει χώρα σε όλη την έκταση του καταλύτη, σε παραπάνω από ένα ενεργό κέντρο του δηλαδή ταυτόχρονα. Στη μεγάλη αυτή διασπορά στην ουσία οφείλεται η ύπαρξη αξιόλογης ροής ρεύματος.

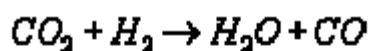
Μειονέκτημα στη χρήση του Pt ως καταλύτη αποτελεί, εκτός το μεγάλο κόστος του, η μείωση της καταλυτικής του δράσης του ως συνέπεια της παρουσίας διαφόρων προσμίξεων όπως το CO στο καύσιμο του υδρογόνου αν αυτό προέρχεται από αναμόρφωση άλλων καυσίμων ακόμα και στις χαμηλές συγκεντρώσεις όπου αυτό συναντάται της τάξεως του 1%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ισχύς του δεσμού Pt - CO είναι μεγαλύτερη του δεσμού Pt - H μειώνοντας τα καταλυτικά ενεργά κέντρα αφού για το σπάσιμο του πρώτου χρειάζονται θερμοκρασίες κοντά στους 150<sup>0</sup> C. Αυτός είναι και ο λόγος όπου

δικαιολογεί την έρευνα για μεμβράνες ικανές να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες μεταξύ των 120 °C και 200 °C αφού σε αυτήν την περιοχή η δηλητηρίαση είναι ελάχιστη και μειώνει παρά ελάχιστα την ολική απόδοση της κυψέλης.

Κράμα λευκόχρυσου-ρουθηνίου ( Pt - Ru ), επιπλέον, παρουσιάζει, καλύτερες καταλυτικές ιδιότητες από τον καθαρό Pt στην άνοδο γεγονός το οποίο έγκειται κυρίως στη μεγαλύτερη του ανθεκτικότητα στη δηλητηρίαση από το CO , με αποτέλεσμα μεγαλύτερες τάσεις εξόδου. Μπορούμε να καταλάβουμε καλύτερα το γιατί μέσω των επόμενων αντιδράσεων στις οποίες λαμβάνουν μέρος δύο κοντινά ενεργά κέντρα, Pt και Ru.



Εξάλλου η ηλεκτρονική πυκνότητα του Pt μειώνεται, καθώς αυτό βρίσκεται στον καταλύτη ως μέρος κράματος και επομένως η ισχύς του δεσμού Pt - CO μειώνεται αφήνοντας μεγαλύτερη ποσότητα Pt-Ru ελεύθερη. Άλλα κράματα του Pt εκτός του Pt - Ru τα οποία έχουν μελετηθεί στο ρόλο του καταλύτη είναι τα Pt - Rh και Pt - Ir τα οποία όμως δεν είναι τόσο αποτελεσματικά όσο το πρώτο. Τέλος εκτός από το CO και το CO<sub>2</sub> δρα σαν δηλητήριο καθώς αυτό παράγει CO όπως βλέπουμε από τις αντιδράσεις που ακολουθούν:



και





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### 2.1 Διαχείριση νερού

Η διαχείριση νερού ( water management ) είναι μία έννοια κλειδί όσων αφορά την αποτελεσματική λειτουργία μίας PEM κυψέλης. Παρόλο που το νερό αποτελεί προϊόν την αντίδρασης της κυψέλης και μεταφέρεται εκτός αυτής, τόσο το καύσιμο (υδρογόνο) όσο και ο αέρας (με το οξυγόνο που αυτός περιέχει) πρέπει να περιέχουν επαρκή ποσότητα υγρασίας έτσι ώστε η μεμβράνη να διατηρείται ένυδρη.

Ωστόσο, προσοχή πρέπει να δοθεί στο ποσό του νερού αυτού αφού λιγότερη από τη ιδανική ποσότητα επηρεάζει αρνητικά την ιοντική αγωγιμότητα της μεμβράνης με αποτέλεσμα τη μείωση του αποδιδόμενου ρεύματος. Αν ο ρυθμός με τον οποίο ο αέρας εισέρχεται στην κυψέλη είναι αργός τότε το νερό το οποίο παράγεται δεν απομακρύνεται αρκετά γρήγορα και αυτό έχει ως συνέπεια το "πλημμύρισμα" της καθόδου αποτρέποντας με τη σειρά του το οξυγόνο να εισέλθει στα καταλυτικά κέντρα της καθόδου.

### 2.2 Ροή αερίων και συλλογή ρεύματος

Σε επαφή με τα στρώματα υποστήριξης βρίσκεται υλικό (υπό μορφή πλάκας) το οποίο έχει διττό ρόλο στη λειτουργία της κυψέλης. Κατά πρώτον, καθορίζει το πεδίο ροής ( flow field ) των αερίων και κατά δεύτερον συλλέγει το παραγόμενο ρεύμα. Το υλικό αυτό είναι ελαφρύ, σκληρό, ανθεκτικό σε διαβρωτικές ουσίες, μη διαπερατό από αέρια και αγωγίμο. Γραφίτης και μέταλλα χαρακτηρίζονται από αυτές τις ιδιότητες και είναι αυτά όπου συνήθως χρησιμοποιούνται.

Οι πλάκες αυτές ορίζουν ένα πεδίο ροής στα εισερχόμενα αέρια. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια καναλιών τα οποία βρίσκονται στη μία πλευρά της πλάκας με τέτοιο τρόπο ώστε το πεδίο να είναι ομοιογενές και να μεγιστοποιείται η απόδοση. Επίδραση στην απόδοση έχουν παράγοντες όπως το πλάτος και το βάθος των καναλιών αυτών. Βλέπουμε δηλαδή πως η κατασκευή των καναλιών επηρεάζει το πεδίο ροής των αερίων όπου με τη σειρά του επηρεάζει την αποδοτικότητα της κυψέλης. Εξάλλου η κατασκευή των καναλιών καθορίζει και την αποτελεσματική εισροή και εκροή του απαραίτητου για τη λειτουργία της κυψέλης νερού.

Δεύτερος σκοπός κάθε πλάκας είναι αυτός της συλλογής του παραγόμενου ρεύματος. Προκειμένου το ηλεκτρικό ρεύμα αυτό να διέλθει εκτός της κυψέλης μεταφέρεται από την άνοδο στο στρώμα υποστήριξης και στη συνέχεια στην πλάκα. Αυτή τροφοδοτεί το εξωτερικό κύκλωμα και στη συνέχεια το ρεύμα διέρχεται στην πλάκα της καθόδου.

### 2.3 Υπολογισμός τάσης ιδανικής κυψέλης καυσίμου

Για τον υπολογισμό της τάσης μιας ιδανικής κυψέλης καυσίμου απαιτείται η γνώση των ενεργειακών διαφορών μεταξύ αντιδρώντων ( $H_2 + 1/2O_2$ ) και προϊόντων ( $H_2O$ ). Αυτό γίνεται με τη βοήθεια της μεταβολής της ελεύθερης ενέργειας κατά Gibbs κατά τη μετατροπή των αντιδρώντων σε προϊόντα. Γνωρίζουμε πως η σχέση μεταξύ της μέγιστης τάσης  $\Delta E$  και της ελεύθερης ενέργειας κατά Gibbs το  $\Delta G$  δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta E = -\frac{\Delta G}{nF}$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός των mol των ηλεκτρονίων όπου παίρνουν μέρος στην αντίδραση ανά mol  $H_2$  και  $F$  η σταθερά του Faraday ίση με 96487 joules/volt. Η ελεύθερη ενέργεια υπολογίζεται από το τύπο:

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

όπου τα  $\Delta H$  και  $\Delta S$  είναι η μεταβολή της ενθαλπίας και της εντροπίας αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας θεωρητικά αριθμητικά δεδομένα για θερμοκρασία δωματίου έχουμε:

$$\Delta G = -285800J - (298K)(-163,2J/K) = -273200J$$

και επομένως για την τάση  $\Delta E$  έχουμε:

$$\Delta E = -[-237200J \cdot V / (2 \times 96487J)] = 1,23V$$

Σε θερμοκρασία  $80^{\circ}C$  η οποία και χαρακτηρίζει τη λειτουργία της κυψέλης τα  $\Delta H$  και  $\Delta S$  μεταβάλλονται πολύ λίγο κι έτσι έχουμε τελικά  $\Delta E = 1,18 V$ . Αν επιπλέον επαναλάβουμε τους υπολογισμούς όχι για

καθαρό οξυγόνο αλλά για αέρα βρίσκουμε μια νέα τιμή για την τάση ίση με 1,16 V .

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### 3.1 Αναμορφωτές

Οι κυψέλες καυσίμου βασίζονται στο υδρογόνο. Ωστόσο οποιοδήποτε υλικό το οποίο περιέχει υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο, όπως η μεθανόλη, η αιθανόλη, το φυσικό αέριο, παράγωγα του πετρελαίου, υγρό προπάνιο κτλ. Μέσω της διαδικασίας της αναμόρφωσης (reforming) επιτυγχάνεται η παραγωγή υδρογόνου από τα υλικά αυτά και κατά αυτό τον τρόπο γίνεται εφικτή η χρήση του σε εφαρμογές όπως η κίνηση ενός οχήματος χωρίς να είναι απαραίτητη αποθήκευση του αυτού καθ' αυτού.

Οι αναμορφωτές φαίνεται να είναι αναγκαίοι αφού προς το παρόν δεν υπάρχει οργανωμένη υποδομή για την παράδοση υδρογόνου ενώ δεν υπάρχουν επίσης και αποτελεσματικοί τρόποι για την αποθήκευση του ώστε να επιτευχθεί η άμεση χρήση του.

Η αναμόρφωση μπορεί να λάβει χώρα σε μεγάλη, μεσαία ή μικρή κλίμακα. Παράδειγμα της πρώτης είναι η παραγωγή του υδρογόνου σε υγρή μορφή ύστερα από επεξεργασία των καυσίμων σε μεγάλα εργοστάσια παραγωγής. Παράδειγμα της δεύτερης αποτελούν οι ήδη υπάρχοντες σταθμοί ανεφοδιασμού. Τέλος αναμόρφωση μπορεί να γίνει τοπικά με την άμεση τροφοδότηση μιας κυψέλης καυσίμου από τον αναμορφωτή όπως για παράδειγμα σε ένα όχημα το οποίο τροφοδοτείται αρχικά με συμβατική βενζίνη την οποία μετατρέπει σε υδρογόνο προς χρήση στην κυψελίδα καυσίμου.

### 3.2 Στήλη κυψελών καυσίμου

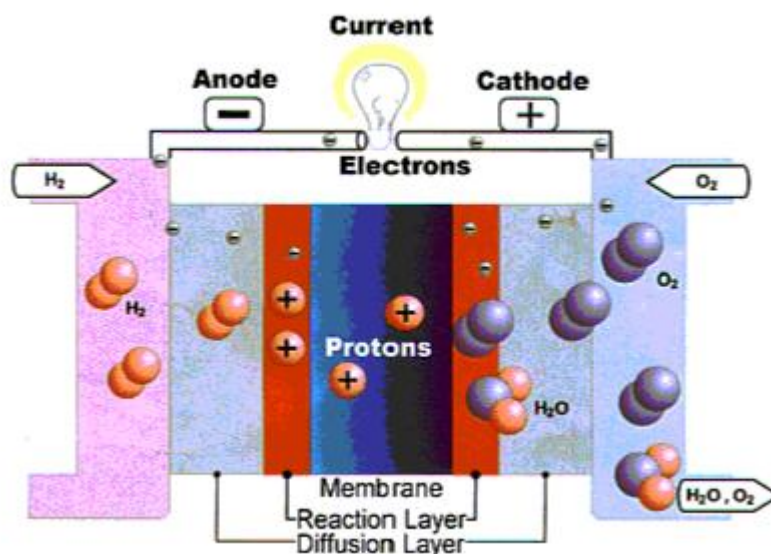
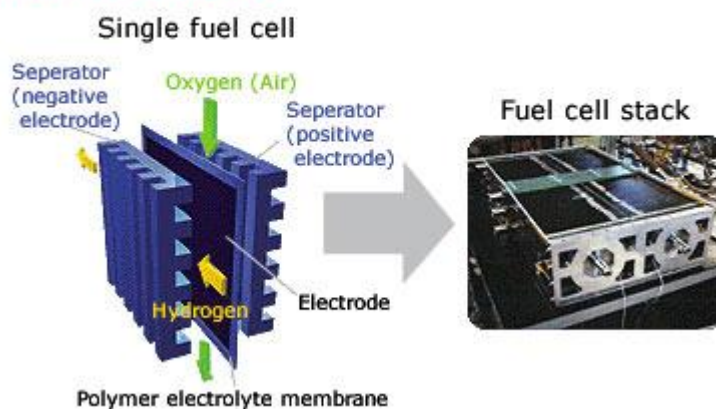
Η απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου δεν είναι 100% κι επομένως η θεωρητική τάση των 1,16 V δε συναντάται. Αντίθετα μια συνηθισμένη τιμή τάσης εξόδου ισούται περίπου με 0,7V . Ωστόσο επειδή αυτή η τάση είναι μικρή και επομένως ακατάλληλη για τις περισσότερες πιθανές εφαρμογές της, γίνεται χρήση παραπάνω από μιας κυψέλης συνδεδεμένες μεταξύ τους σε σειρά, δημιουργώντας αυτό το οποίο ονομάζουμε στήλη κυψέλης καυσίμου (fuel cell stack). Ανάλογα με τη χρήση όπου

προορίζεται η κυψέλη η στήλη μπορεί να αποτελείται από μερικές έως και εκατοντάδες κυψέλες. Ειδικά σε περιπτώσεις όπου απαιτείται εκτός από μεγάλη τάση και μεγάλη ισχύ χρησιμοποιούνται περισσότερες από μία στήλες σε σειρά.

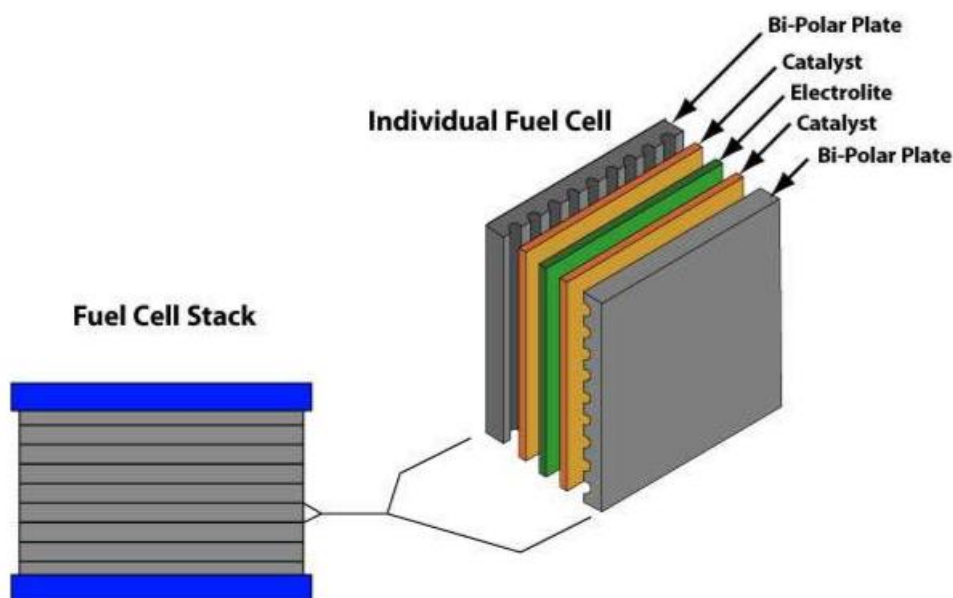
Προκειμένου να μειωθεί ο συνολικός όγκος και βάρος της στήλης γίνεται χρήση αντί δύο πλακών καθορισμού της ροής των αερίων, μίας. Αυτή η πλάκα έχει δύο περιοχές με κανάλια μεταφοράς, μια σε κάθε μεριά της η οποία αναλαμβάνει τη μεταφορά και διαφορετικού αερίου (υδρογόνου ή αέρα) και ονομάζεται διπολική πλάκα (bipolar plate). Στα άκρα της κυψέλης βρίσκονται δύο απλές πλάκες.

Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στο διαπεράστο από αέρια της στήλης διότι σε αντίθετη περίπτωση υδρογόνο και αέρας θα ενώνονταν άμεσα χωρίς την παραγωγή εκμεταλλεύσιμου ρεύματος. Η διπολική πλάκα πρέπει επίσης να είναι αγωγίμη ώστε το ρεύμα να μπορεί να κινηθεί από τη μία κυψέλη στην επόμενη.

### Fuel cell structure



Σχήμα 9: Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας



Σχήμα 10: Στήλη κυψέλης καυσίμου

### 3.3 Λειτουργία και απόδοση

Το μέγιστο ηλεκτρικό έργο (WEL) μιας κυψέλης καυσίμου υπολογίζεται από την μεταβολή στην ελεύθερη ενέργεια της συνολικής (συνδυάζοντας την ανοδική και καθοδική αντίδραση) ηλεκτροχημικής αντίδρασης  $aA + bB \rightarrow cC + dD$ :

$$W_{el} = \Delta G = -nFE$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που συμμετέχουν στην αντίδραση,  $F$  είναι η σταθερά του Faraday (96487 Cb/mole) και  $E$  το αντιστρεπτό δυναμικό της κυψέλης ή το δυναμικό σε ισορροπία (emf). Η διαφορά μεταξύ του  $\Delta G$  και του  $\Delta H$  είναι ανάλογη της μεταβολής στην εντροπία ( $\Delta S$ ):

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

όπου το  $\Delta H$  αποτελεί το συνολικό θερμικό περιεχόμενο της τροφοδοσίας και  $T\Delta S$  είναι το ποσό θερμότητας που παράγεται από μια κυψέλη καυσίμου που λειτουργεί αντιστρεπτά. Το αντιστρεπτό δυναμικό μιας κυψέλης καυσίμου σε μία θερμοκρασία  $T$  υπολογίζεται από το  $\Delta G$  της αντίδρασης που λαμβάνει χώρα στην κυψέλη καυσίμου σε εκείνη την θερμοκρασία. Αν θεωρηθεί ότι:

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b}$$

το αντιστρεπτό δυναμικό ή δυναμικό στην ισορροπία γίνεται ίσο με:

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[A]^a [B]^b}{[C]^c [D]^d}$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί την γενική μορφή της εξίσωσης Nernst, όπου το  $\Delta G^0$  και το  $E^0$  αναφέρονται στους 29 K. Η ιδανική απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου προσδιορίζεται από το δυναμικό που καθορίζεται από την εξίσωση Nernst. Ο Πίνακας 1, παρουσιάζει τις εξισώσεις Nernst που ποσοτικοποιούν τη συσχέτιση μεταξύ του ιδανικού πρότυπου δυναμικού ( $E^0$ ) και του ιδανικού δυναμικού σε ισορροπία ( $E$ ) για τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις των διάφορων τύπων κυψελών καυσίμου, μαζί με τις χαρακτηριστικές τιμές των δυναμικών της εξίσωσης Nernst στις αντίστοιχες θερμοκρασίες λειτουργίας τους.

Όπως εμφανίζει ο Πίνακας 1 και επειδή η μεταβολή της εντροπίας της καύσης του υδρογόνου είναι αρνητική, το αντιστρεπτό δυναμικό μειώνεται με τη θερμοκρασία κατά  $0.84 \text{ mV}/^\circ\text{C}$  (υποθέτοντας ότι το  $\text{H}_2\text{O}$  ως προϊόν της αντίδρασης βρίσκεται σε υγρή φάση). Επιπλέον θα πρέπει να επισημανθεί ότι το πραγματικό δυναμικό της κυψέλης καυσίμου είναι μικρότερο από το θεωρητικά αναμενόμενο λόγω των μη-αντιστρεπτών απωλειών δυναμικού (ή των υπερτάσεων), οι οποίες προέρχονται είτε από τις πιθανές απαιτήσεις σε δυναμικό προκειμένου να ενεργοποιηθούν οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις (υπέρταση ενεργοποίησης,  $\eta_{act}$ ), ή/και από τις ωμικές απώλειες (ωμική υπέρταση,  $\eta_{ohm}$ ) ή/και από τις απώλειες δυναμικού λόγω μεταφοράς μάζας (διάχυση στην κύρια μάζα του ρευστού και στην επιφάνεια και κύρια μάζα του ηλεκτροδίου) των ειδών που συμμετέχουν στις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις (υπέρταση συγκέντρωσης,  $\eta_{conc}$ ).

**Πίνακας 2: Εξισώσεις Nernst και ιδανικά δυναμικά για τους διάφορους τύπους κυψελών καυσίμου.**

Τύπος	Συνολική αντίδραση	Εξίσωση Nernst	T, oC	E, V
AFC	$H_2 + 1/2O_2 + H_2O \rightarrow 2H_2O$	$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2} P_{H_2O}^{anod}}{P_{H_2O}^{cath}}$	100	1,17
PEFC PAFC SOFC	$H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}}$	80 205 1100	1,17 1,14 0,91
MCFC	$H_2 + 1/2O_2 + CO_2 \rightarrow H_2O + CO_2$	$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2} P_{CO_2}^{anod}}{P_{H_2O}^{cath} P_{CO_2}}$	650	1,03

Η υπέρταση ενεργοποίησης αποτελεί την κυριότερη πηγή απωλειών δυναμικού σε χαμηλές πυκνότητες ρεύματος, εκφράζοντας ουσιαστικά την ενέργεια ενεργοποίησης που απαιτείται προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι ανωτέρω ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. Η ωμική υπέρταση αυξάνεται γραμμικά με το ρεύμα (δεδομένου ότι η αντίσταση της κυψέλης καυσίμου είναι ουσιαστικά σταθερή σε σταθερή θερμοκρασία) και βαθμιαία επικρατεί έναντι των υπολοίπων υπερτάσεων καθώς η πυκνότητα ρεύματος αυξάνεται. Τέλος, οι απώλειες δυναμικού λόγω αντιστάσεων στην μεταφορά μάζας (διάχυση) υφίστανται σε όλο σχεδόν το εύρος των πυκνοτήτων ρεύματος. Σε υψηλές όμως πυκνότητες ρεύματος αποτελούν την κυρίαρχη πηγή υπερτάσεων καθώς η διάχυση τόσο στην αέρια φάση όσο και στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου δεν επαρκεί για να παρασχεθούν αρκετά ηλεκτρο-ενεργά είδη στην τριεπιφάνεια αέριας φάσης/ηλεκτροδίου/ηλεκτρολύτη.

Το δυναμικό λειτουργίας μίας κυψέλης καυσίμου είναι ίσο με τη διαφορά μεταξύ των δυναμικών της καθόδου και της ανόδου (καθώς αυτά τα δυναμικά μεταβάλλονται λόγω των αντίστοιχων υπερτάσεων ενεργοποίησης και συγκέντρωσης κάθε ηλεκτροδίου) μείον τις ωμικές απώλειες των διάφορων τμημάτων της συστοιχίας:

$$V_{\text{cell}} = (E_{\text{cath}} - |\eta_{\text{act}}^{\text{cath}}| - |\eta_{\text{conc}}^{\text{cath}}|) - (E_{\text{anod}} + |\eta_{\text{act}}^{\text{anod}}| + |\eta_{\text{conc}}^{\text{anod}}|) - IR$$

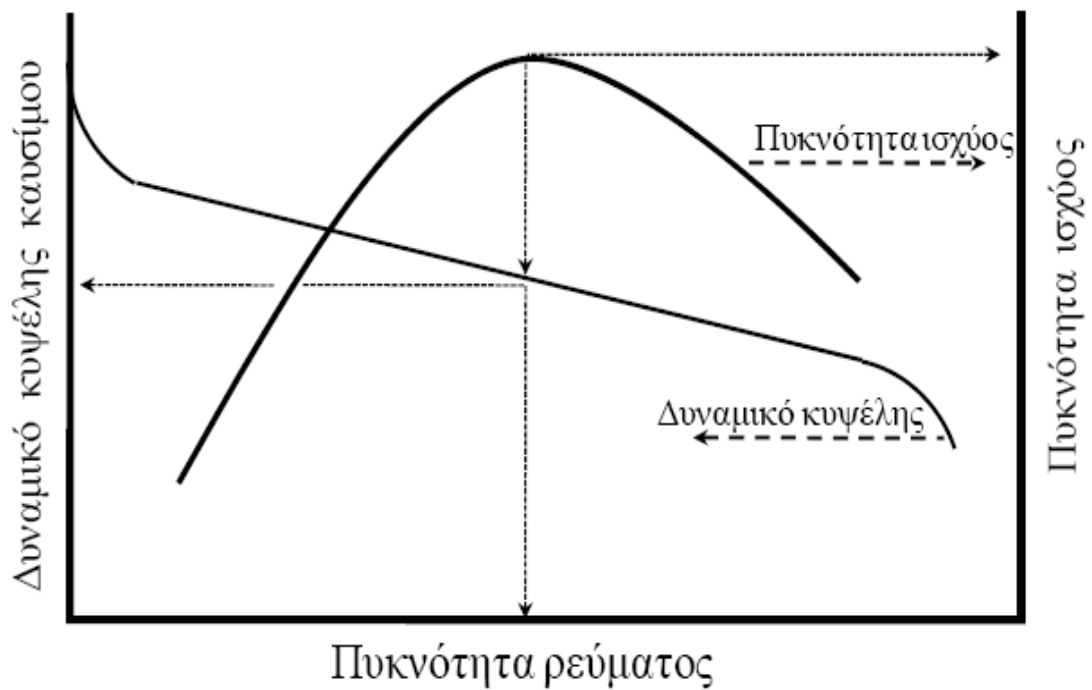
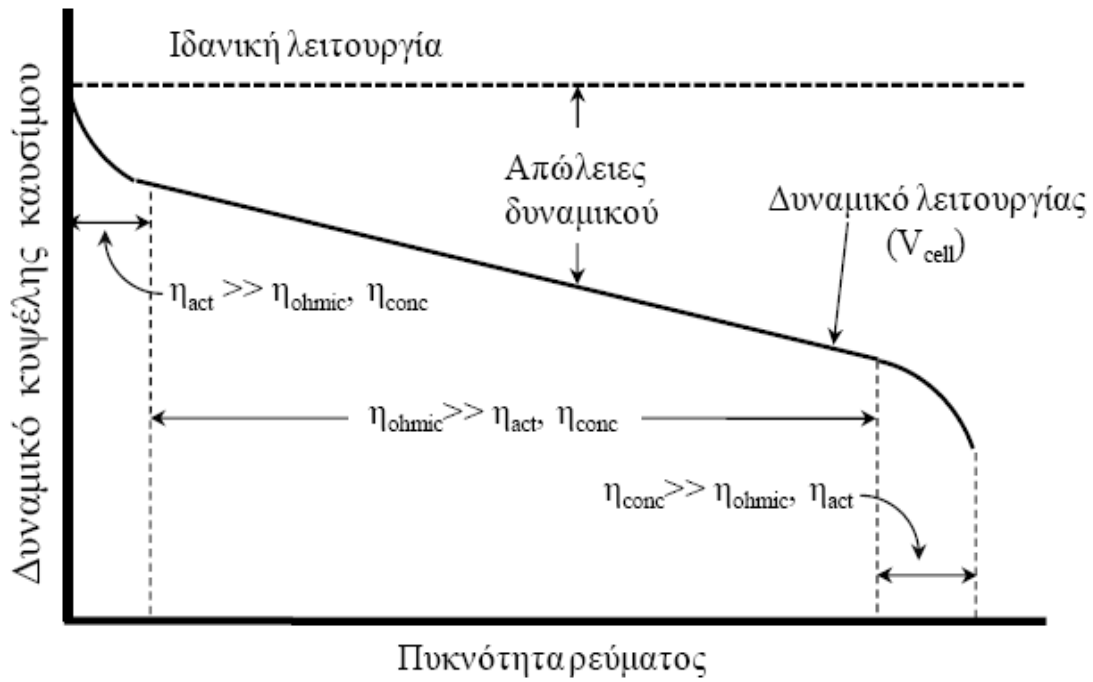


Καθώς μία κυψέλη καυσίμου διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, λόγω των υφιστάμενων υπερτάσεων, το δυναμικό της κυψέλης καυσίμου μειώνεται. Λαμβάνοντας υπόψη ότι σε κάθε σημείο της καμπύλης I– V<sub>cell</sub> στην Σχήμα 11: (α), η παραγόμενη πυκνότητα ισχύος (ισχύς ανά φαινόμενη επιφάνεια ηλεκτροδίου) υπολογίζεται από το γινόμενο του V<sub>cell</sub> με την αντίστοιχη πυκνότητα ρεύματος, συνεπάγεται ότι για να επιτύχουμε υψηλές πυκνότητες ισχύος και κατά συνέπεια αποδόσεις θα πρέπει να ελαττώσουμε σημαντικά τις αντίστοιχες υπερτάσεις που μειώνουν το θεωρητικό δυναμικό. Η παραγόμενη πυκνότητα ισχύος τείνει να ελαχιστοποιείται σε χαμηλές και υψηλές πυκνότητες ρεύματος (όταν το ρεύμα και το δυναμικό λειτουργίας προσεγγίζουν το μηδέν, αντίστοιχα) και παρουσιάζει ένα μέγιστο σε ενδιάμεσες τιμές, όπως φαίνεται στην Σχήμα 11: (β).

Η θερμική απόδοση των κυψελών καυσίμου ορίζεται ως το ποσό της ωφέλιμης ενέργειας που παράγεται κατά την μετατροπή της χημικής ενέργειας των καυσίμων (το ποσό της ενέργειας που απελευθερώνεται υπό μορφή θερμότητας κατά τη διάρκεια της πλήρους καύσης των καυσίμων, γνωστής ως ανώτερη θερμογόνο δύναμη). Ιδανικά το ηλεκτρικό έργο που παράγεται σε μία κυψέλη καυσίμου πρέπει να είναι ίσο με την μεταβολή στην ελεύθερη ενέργεια Gibbs, ΔG, της συνολικής αντίδρασης.

Η θεωρητική απόδοση σε πρότυπες συνθήκες και σε αντιστρεπτή λειτουργία είναι ίση με:

$$\eta_{\text{ideal}} = \frac{\Delta G^{\circ}}{\Delta H^{\circ}} = \frac{-nFE^{\circ}}{\Delta H^{\circ}}$$



Σχήμα 11: (α) Ιδανικό και πραγματικό δυναμικό μίας κυψέλης καυσίμου.

(β) Εξάρτηση της πυκνότητας ισχύος από το δυναμικό της κυψέλης καυσίμου.

Η θερμική απόδοση μίας πραγματικής κυψέλης καυσίμου, που λειτουργεί αντιστρεπτά σε θερμοκρασία  $T$ , απλοποιείται σε:

$$\eta_{th} = \frac{-nFV_{cell}}{\Delta H^{\circ}} = \eta_{ideal} \frac{-nFV_{cell}}{-nFE^{\circ}} = \eta_{ideal} \frac{V_{cell}}{E^{\circ}}$$

Κατά συνέπεια, η απόδοση μίας πραγματικής κυψέλης καυσίμου μπορεί να εκφραστεί ως προς το λόγο του δυναμικού λειτουργίας και του πρότυπου δυναμικού της κυψέλης καυσίμου.

Μία κυψέλη καυσίμου μπορεί να λειτουργεί σε διαφορετικές τιμές πυκνοτήτων ρεύματος. Λογικά μία κυψέλη καυσίμου θα πρέπει να λειτουργεί στις συνθήκες όπου επιτυγχάνεται η μέγιστη πυκνότητα ισχύος. Εντούτοις, μειώνοντας την πυκνότητα ρεύματος κάτω από αυτήν την τιμή, το δυναμικό λειτουργίας είναι πιο κοντά στο αντιστρεπτό δυναμικό και η απόδοση αυξάνει. Επιπλέον, η ενεργή επιφάνεια μίας κυψέλης καυσίμου θα πρέπει να αυξηθεί προκειμένου να επιτευχθεί η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς. Συνεπώς η απαίτηση για επίτευξη υψηλών αποδόσεων αυξάνει το πάγιο κόστος για ένα ορισμένο επίπεδο τιμών πυκνοτήτων ισχύος, μολονότι μειώνονται οι απαιτήσεις σε καύσιμο. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η συνήθης πρακτική που ακολουθείται είναι να λειτουργούν οι κυψέλες καυσίμου προς την αριστερή περιοχή στην Σχήμα 11: (β), σε ένα συγκεκριμένο σημείο όπου τόσο το κόστος λειτουργίας όσο και το πάγιο κόστος ελαχιστοποιούνται.

Η απόδοση σε μία δεδομένη κυψέλη καυσίμου είναι δυνατό να βελτιωθεί ρυθμίζοντας ανάλογα την θερμοκρασία, την πίεση, την σύσταση του αερίου μίγματος τροφοδοσίας, την πυκνότητα ρεύματος ή/και άλλους παραμέτρους που επηρεάζουν το ιδανικό δυναμικό της κυψέλης καυσίμου και το μέγεθος των υπερτάσεων. Η επιλογή αυτών των παραμέτρων βασίζεται κυρίως στην επιθυμητή παραγόμενη πυκνότητα ισχύος. Επιπλέον, θα πρέπει να καθοριστούν οι απαιτήσεις σε δυναμικό και ρεύμα της συστοιχίας και της μοναδιαίας κυψέλης καυσίμου σε δεδομένες συνθήκες λειτουργίας (θερμοκρασία, πίεση). Η επίδραση της θερμοκρασίας στο δυναμικό λειτουργίας είναι αρκετά διαφορετική σε σχέση με την αντίστοιχη επίδραση στο αντιστρεπτό δυναμικό. Το αντιστρεπτό δυναμικό μειώνεται με τη θερμοκρασία, ενώ το δυναμικό λειτουργίας αυξάνεται, λόγω της μείωσης των υπερτάσεων (σε υψηλότερες θερμοκρασίες οι ρυθμοί αντίδρασης και μεταφοράς μάζας επιταχύνονται και στις περισσότερες περιπτώσεις η ιοντική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη - η κύρια πηγή ωμικών απωλειών -

αυξάνεται), με συνέπεια να βελτιώνεται η συνολική απόδοση της κυψέλης καυσίμου. Επιπλέον, η αύξηση της πίεσης λειτουργίας αυξάνει τις μερικές πιέσεις των αντιδρώντων και συνεπώς τους ρυθμούς της αντίδρασης και της μεταφοράς μάζας, βελτιώνοντας την απόδοση. Όμως θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η πίεση αυξάνει τις απαιτήσεις για ισχύ προκειμένου να συμπιεστούν τα αντιδρώντα, και κατά συνέπεια αυξάνεται ανάλογα και το πάγιο κόστος της διάταξης. Η σύσταση του αερίου μίγματος τροφοδοσίας και η επιτυγχανόμενη μετατροπή των αντιδρώντων επίσης επιδρούν σημαντικά στην απόδοση των κυψελών καυσίμου. Ο παράγοντας χρήσης (utilization factor,  $U_f$ ) αναφέρεται στο ποσοστό του καυσίμου που καταναλώνεται ηλεκτροχημικά. Στις κυψέλες καυσίμου χαμηλών θερμοκρασιών (PEFCs, AFCs και PAFCs), το  $U_f$  υπολογίζεται άμεσα από την κατανάλωση του  $H_2$ , το οποίο είναι το μοναδικό αντιδρών καύσιμο που λαμβάνει μέρος στην ηλεκτροχημική αντίδραση (US DOE, 2002; Larminie *et al.*, 2003; Srinivasan, 2006).

### **3.4 Τεχνο-οικονομική αξιολόγηση των κυψελών καυσίμου**

Όπως για κάθε νέο προϊόν, τόσο η δαπάνη για την αγορά όσο και το λειτουργικό κόστος των κυψελών καυσίμου αποτελούν σημαντικούς παραμέτρους που σχετίζονται άμεσα με την εμπορευματοποίηση τους. Το συνολικό κόστος μπορεί να διαχωριστεί στο κόστος του καυσίμου και σε άλλες λειτουργικές δαπάνες καθώς και στην αρχική πάγια επένδυση. Το βασικό ποσοστό του αρχικού κόστους καταλαμβάνεται ουσιαστικά από το κόστος κατασκευής, το οποίο σχετίζεται άμεσα με τον όγκο παραγωγής και κατά συνέπεια με την εισαγωγή οικονομιών κλίμακας (Lipman *et al.*, 2004; Hawkes *et al.*, 2005; Alanne *et al.*, 2006; Williams *et al.*, 2004).

### **3.5 Κόστος των κυψελών καυσίμου**

Το κόστος κατασκευής μιας συστοιχίας κυψελών καυσίμου τύπου PEM περιλαμβάνει το κόστος της μεμβράνης, των ηλεκτροδίων, του καταλύτη λευκόχρυσου, των διπολικών δίσκων, των περιφερειακών υλικών και της συναρμολόγησης της διάταξης (μικρό ποσοστό του συνολικού κόστους). Ο Πίνακας 2, παρουσιάζει μια εκτίμηση για το συνολικό κόστος των διατάξεων κυψελών καυσίμου PEMFC (έτος αναφοράς 2004).

**Πίνακας 3: Κατανομή του κόστους κατασκευής των PEMFC (Tsuchiya, 2004).**

	€/m <sup>2</sup>	€/kW <sub>e</sub>	Ποσοστό (%)
Μεμβράνη	357	179	14
Ηλεκτρόδια	1016	509	39
Διπολικοί δίσκοι	1179	589	45
Λευκόχρυσος	34	17	1
Περιφερειακά	11	6	0
Διάταξη		6	0
Σύνολο		1304	100

Στην περίπτωση των συστοιχιών κυψελών καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών, εν αντιθέσει με τις κυψέλες καυσίμου χαμηλών θερμοκρασιών, το κόστος των ηλεκτροδίων είναι σχετικά χαμηλό αφού δεν απαιτείται η χρήση πολύτιμων μετάλλων, οι δαπάνες όμως για την κατασκευή της συστοιχίας, λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας, είναι περισσότερες. Συνεπώς διαπιστώνεται ότι η κατασκευή αυτή καθ' αυτής της συστοιχίας αποτελεί περίπου το ένα τρίτο του συνολικού κόστους κατασκευής ενός συστήματος κυψελών καυσίμου. Επίσης ένα μεγάλο ποσοστό του συνολικού κόστους οφείλεται στην προ-επεξεργασία του καυσίμου (αναμόρφωση, καθαρισμός κ.λπ.), στις διαδικασίες ελέγχου και αυτοματοποίησης των μονάδων και στην διαχείριση της παραγόμενης ισχύος. Για τα μικρής κλίμακας συστήματα SOFC, το κόστος της συστοιχίας αποτελεί το 40–45% του συνολικού κόστους. Αυτή η κατανομή του κόστους κατασκευής θα μπορούσε να ισχύει σε ικανοποιητικό βαθμό για συστήματα PEMFC. Στην περίπτωση όμως των συστοιχιών κυψελών καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών η θερμική μόνωση του συστήματος είναι δυνατό να συνεισφέρει σημαντικά στο συνολικό κόστος, ειδικά για χαμηλές τιμές παραγόμενης ισχύος (US DOE, 2002).

Μικρά συστήματα λίγων kW<sub>e</sub> ίσως να μη λειτουργούν ικανοποιητικά σε συνθήκες υψηλής πίεσης. Ενώ αυτό το γεγονός απλοποιεί το σχεδιασμό και μειώνει το κόστος για τους συμπίεστρες και τους αποσυμπιεστές πιθανώς να επιδρά αρνητικά στην τελική παραγόμενη πυκνότητα ισχύος. Τα διαθέσιμα σήμερα συστήματα κυψελών καυσίμου

υψηλών θερμοκρασιών παράγουν περίπου 250 kWe (για αυτά τα συστήματα, η προσθήκη ενός αεριοστρόβιλου μπορεί να αυξήσει την ηλεκτρική απόδοση μέχρι και 60%). Ο Πίνακας 3, περιλαμβάνει την ανάλυση του κόστους των κυψελών καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών για χρήση σε σταθερές εφαρμογές (IEA, 2005; Blesl *et al.*, 2004; Alanne *et al.*, 2006). Σήμερα, το κόστος κατασκευής των κυψελών καυσίμου τύπου PEM αναφέρεται να ποικίλει ανάλογα με την κλίμακα, την παραγόμενη ισχύ και τις απαιτήσεις για το σύστημα αναμόρφωσης του καυσίμου. Η λιανική τιμή για μία κυψέλη καυσίμου PEMFC κυμαίνεται μεταξύ 3000 – 6000 \$/kW (Cotrell *et al.*, 2003; Fuel Cells, 2000).

**Πίνακας 4: Εκτιμήσεις του κόστους της παραγόμενης ισχύος σε κυψέλες καυσίμου SOFC και MCFC (Blesl *et al.*, 2004).**

	SOFC		MCFC	
	€/kW <sub>e</sub>	ποσοστό, %	€/ kW <sub>e</sub>	ποσοστό, %
Συστοιχία κυψέλης καυσίμου	4714	42	4661	50
Λέβητας	4672	41	2146	23
Λειτουργικό σύστημα	1231	11	820	9
Αναμορφοτής	52	0	544	6
Εναλλάκτης θερμότητας	274	2	286	3
Καυστήρας	109	1	258	3
Παροχή αέρα	118	1	31	0
Μετατροπέας	151	1	88	1
Σκελετός (frame)	0	0	500	5
Σύνολο	11319		9334	

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω κόστη και την δυσκολία για την εκτίμηση των πιθανών περιθωρίων κέρδους από τις εταιρείες καθώς και τις δαπάνες που θα πρέπει να πραγματοποιηθούν για την έρευνα και ανάπτυξη αυτών των συστημάτων, οι λιανικές τιμές των μικρότερων συστημάτων (μέχρι 5 kW) κυμαίνονται μεταξύ 10000 και 50000 €/kW<sub>e</sub> ενώ των μεγαλύτερων υπολογίζονται μεταξύ 5000 και 18000 €/kW<sub>e</sub> (Pehnt *et al.*, 2004).

**Πίνακας 5: Εκτιμήσεις του μελλοντικού κόστους κατασκευής των συστοιχιών PEMFC για παραγωγική ικανότητα 250000 MWe/a (Tsuchiya, 2004).**

	€/m <sup>2</sup>	€/kW	ποσοστό, %
Μεμβράνη	36	9 – 12	16 – 25
Ηλεκτρόδια	69 – 107	17 – 36	48 – 49
Διπολικοί δίσκοι	25 – 65	6 – 21	17 – 29
Λευκόχρυσος (καταλύτης)	6	1 – 2	3 – 4
Περιφερειακά	3	1	1 – 2
Διάταξη		1	2 – 4
Σύνολο		36 – 74	100

Για την μείωση του κόστους κατασκευής των κυψελών καυσίμου και κατά συνέπεια των λιανικών τιμών πώλησης αυτών των συστημάτων, ένα σημαντικό σημείο που θα επηρεάσει τις παραπάνω τιμές είναι εάν τα συστατικά από τα οποία αποτελούνται οι κυψέλες καυσίμου παράγονται σε μεγάλης κλίμακας βιομηχανικές διεργασίες. Το 2000 υπολογίστηκε ένα κόστος παραγωγής γύρω στα 100 €/kWe για μια ετήσια παραγωγή 500000 PEMFC (Bar-On *et al.*, 2002). Το 2005, η εταιρεία Ballard υποστήριξε ότι το κόστος κατασκευής των PEMFC θα μπορούσε να μειωθεί σε 75 €/kWe, ακόμη και με το σημερινό status της τεχνολογίας, συμπεριλαμβανομένου και των υλικών, ενώ στοχεύει να το μειώσει ακόμα περαιτέρω σε 20 €/kWe μέχρι το 2010 (IEA, 2005; Ballard, 2005). Οι σημερινές κυψέλες καυσίμου τύπου PEM χρησιμοποιούν μεμβράνες Nafion® πάχους από 50 έως 175 μm, το οποίο αντιστοιχεί σε ένα κόστος 450 €/m<sup>2</sup> ή σε 110–250 €/kWe. Οι μεμβράνες αυτές είναι πιθανό να βελτιωθούν σημαντικά μέσα στην ερχόμενη δεκαετία οδηγώντας σε σημαντικές μειώσεις στο κόστος κατασκευής κατά 10-20 φορές (IEA, 2005).

Το κόστος των ηλεκτροδίων εξαρτάται επίσης από την τεχνολογία, τα υλικά και τον όγκο παραγωγής. Η αυτοματοποιημένη παραγωγή σε μεγάλη κλίμακα μπορεί να μειώσει το σχετικό κόστος ακόμη και σε 100 €/m<sup>2</sup> (IEA, 2005).

Τα σημερινά συστήματα PEMFC που λειτουργούν στους 80°C απαιτούν 5 g/m<sup>2</sup> ποσότητα λευκόχρυσου τόσο για το ανοδικό όσο και για το καθοδικό ηλεκτρόδιο ή 10 g/m<sup>2</sup> στο σύνολο (5 g Pt/kWe για πυκνότητες ισχύος περίπου 2 kWe/m<sup>2</sup>). Οι νέες μεμβράνες, που λειτουργούν σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 100°C, αναμένεται να μειώσουν την απαιτούμενη ποσότητα λευκόχρυσου σε περίπου 0.2 g/kWe. Η ποσότητα λευκόχρυσου της ανόδου μπορεί εύκολα να μειωθεί χωρίς να επηρεαστεί η απόδοση. Εντούτοις, η μείωση του λευκόχρυσου στην κάθοδο σε 2–4 g/m<sup>2</sup> οδηγεί σε απώλειες της απόδοσης από 2–4% (Gasteiger *et al.*, 2005).

**Πίνακας 6: Εκτίμηση κόστους κατασκευής συστημάτων SOFC και MCFC (Blesl *et al.*, 2004).**

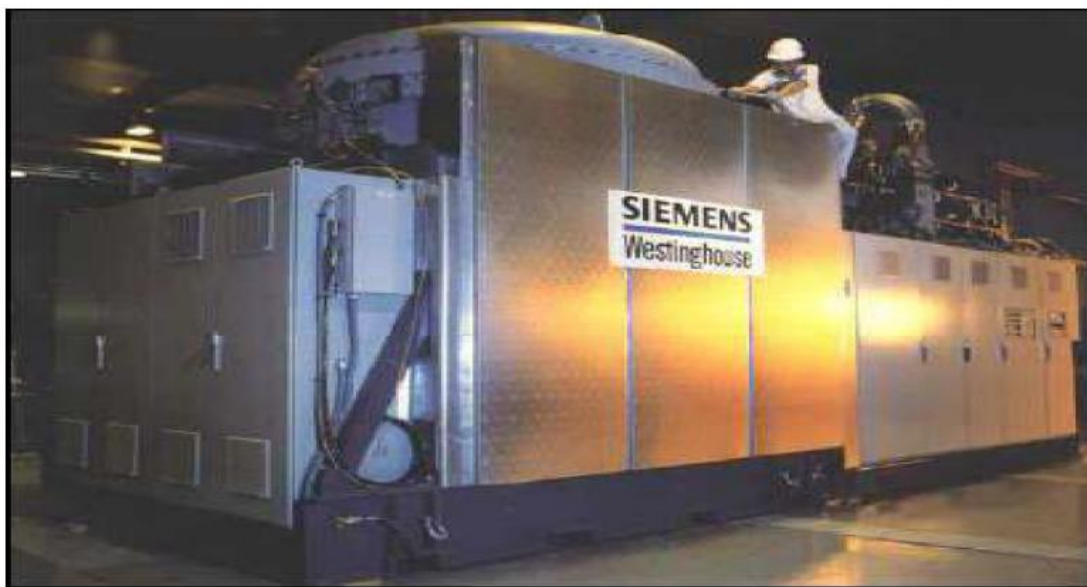
	SOFC (200 kW)		MCFC (300 kW)	
	€/kW <sub>e</sub>	μερίδιο, %	€/kW <sub>e</sub>	μερίδιο, %
Συστοιχία κυψέλης καυσίμου	396	33	418	35
Λέβητας	382	32	311	26
Λειτουργικό σύστημα	104	9	119	10
Αναμορφωτής	52	4	44	4
Εναλλάκτης θερμότητας	66	6	60	5
Καυστήρας	38	3	47	4
Παροχή αέρα	38	3	9	1
Μετατροπέας	66	6	69	6
Σκελετός (frame)	42	4	101	9
Σύνολο	1184		1179	

### 3.6 Τεχνολογική πρόοδος και εμπειρία

Η βελτίωση που έχει επιτευχθεί στα μέσα διάχυσης καθώς και η ανάπτυξη νέων καινοτόμων δομών ηλεκτροδίων μπορούν να αυξήσουν την πυκνότητα ισχύος και να μειώσουν αναλόγως την απαιτούμενη ποσότητα του λευκόχρυσου. Οι νέες τεχνολογίες παρασκευής ηλεκτροδίων που οδηγούν σε μεγαλύτερες ειδικές επιφάνειες μπορούν επίσης να μειώσουν την ποσότητα του λευκόχρυσου, ενώ η χρήση ενός νέου περισσότερο ενεργού πολύ-μεταλλικού ηλεκτροδίου Pt-Co-Cr



φαίνεται ότι δύναται να αυξήσει την ενεργότητα και κατά συνέπεια την παραγόμενη πυκνότητα ισχύος (De Castro *et al.*, 2004). Ένα πιθανό εμπόδιο για την πλήρη ανάπτυξη της αγοράς όσον αφορά στις κυψέλες καυσίμου τύπου PEM, έγκειται στην περιορισμένη παγκόσμια παραγωγική ικανότητα του λευκόχρυσου, η οποία σήμερα προσεγγίζει τους 200 tn ετησίως. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος πιθανές λύσεις θα αποτελούσαν η ανακύκλωση του λευκόχρυσου ή η



Σχήμα 12: Υβριδική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Siemens-Westinghouse ισχύος 220KW, που συνδυάζει κυψέλες καυσίμου τύπου SOFC με αεριοστρόβιλο.

χρήση άλλων πολύτιμων μετάλλων (π.χ. παλλάδιο, ρουθίνιο) χωρίς όμως να φαίνεται να είναι αρκετές για να ικανοποιήσουν την ενδεχόμενη ζήτηση. Κατά συνέπεια, οι νέοι ενεργοί καταλύτες - που δεν περιέχουν Pt - ή οι υψηλής θερμοκρασίας μεμβράνες είναι σημαντικοί όχι μόνο για τη μείωση του κόστους κατασκευής αλλά και για την διασφάλιση της επιτυχούς εμπορευματοποίησης των κυψελών καυσίμου PEMFC.

Οι διπολικοί δίσκοι κατασκευάζονται από κονιορτοποιημένο γραφίτη ή ανοξείδωτο χάλυβα με επίστρωση χρυσού. Ερευνητικές προσπάθειες στοχεύουν να αντικαταστήσουν αυτά τα υλικά με πολυμερή ή χαμηλού κόστους κράματα χάλυβα, τα οποία θα επιτρέψουν τη χρήση χαμηλού κόστους τεχνικών παραγωγής. Ακόμη και σήμερα, οι διπολικοί δίσκοι μπορούν να παραχθούν με κόστος της τάξης των 200 €/kW, εάν ο όγκος παραγωγής αυξηθεί σε 10000 τμχ/χρόνο και ακόμη λιγότερο από 20 €/kW για παραγωγική ικανότητα 1 εκατομμυρίου τεμαχίων/χρόνο, δηλ.

10–30 €/kWe για πυκνότητες ισχύος της τάξης των 2–6 kWe/m<sup>2</sup> (IEA, 2005).

Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, είναι εφικτό το κόστος των συστοιχιών κυψελών καυσίμου τύπου PEM να μειωθεί και κάτω από 70 €/kWe στο εγγύς μέλλον, ενώ ένα προβλεπόμενο κόστος 40 €/kWe μπορεί να είναι εφικτό, υποθέτοντας μια αύξηση της πυκνότητας ισχύος σε 4 kWe/m<sup>2</sup> με χρήση φτηνότερων ηλεκτροδίων και διπολικών δίσκων. Εντούτοις, υπολογίζεται ότι η μείωση του κόστους σε αυτά τα χαμηλά επίπεδα δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί χωρίς σημαντικές βελτιώσεις στις υφιστάμενες τεχνολογίες. Συνεπώς απαιτείται αφενός η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών παραγωγής για τις μεμβράνες, τα ηλεκτρόδια και τους διπολικούς δίσκους καθώς και η χρησιμοποίηση νέων φτηνότερων υλικών. Εάν πραγματοποιηθούν τα παραπάνω τότε είναι δυνατόν να επιτευχθούν ακόμα υψηλότερες πυκνότητες ισχύος και αποδόσεις καθώς και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (IEA, 2005). Επιπλέον, υπάρχει μια κρίσιμη ισορροπία μεταξύ των υψηλότερων πυκνοτήτων ισχύος και των υψηλότερων αποδόσεων, και ανάλογα με το κόστος επένδυσης και το κόστος καυσίμου υπάρχει μια βέλτιστη πυκνότητα ισχύος για να ελαχιστοποιηθεί το κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας. Οι σημερινές κυψέλες επιτυγχάνουν 0.3–0.6 A/cm<sup>2</sup> σε 0.6–0.7 V, με την πυκνότητα ισχύος να κυμαίνεται από 1.8–4.2 kWe/m<sup>2</sup> (2 kWe/m<sup>2</sup> κατά μέσο όρο). Εντούτοις, τα 3 kWe/m<sup>2</sup> είναι δυνατό να επιτευχθούν με ελάχιστες βελτιώσεις και τεχνολογικές παρεμβάσεις, ενώ τιμές της τάξης των 4–6 kW/m<sup>2</sup> θα απαιτούσαν νέα βελτιωμένα υλικά τόσο για τις μεμβράνες όσο και για τα ηλεκτρόδια.

**Πίνακας 7: Σύγκριση συμβατικού συστήματος SOFC και υβριδικών συστημάτων SOFC-CHP (IEA, 2005).**

	Συμβατικός	SOFC 2010	SOFC 2030
Ειδική επένδυση, €/kW	1000	5000	1000
Ηλεκτρική ισχύς, kWe	200	200	200
Θερμική ισχύς, kWth	326	244	164
Ηλεκτρική απόδοση, %	38	45	55
Συνολική απόδοση (ηλεκτρική + θερμική), %	90	85	90
Συντήρηση, €/kWh	1,5	2,5	0,5

Όμως η αποκτηθείσα εμπειρία λόγω των υψηλότερων όγκων παραγωγής μπορεί να αποτελέσει τον σημαντικότερο παράγοντα για την

μείωση του κόστους των συστημάτων κυψελών καυσίμου. Μία ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων της εμπειρίας, και για έναν μέσο παράγοντα μάθησης ίσο με 0.8, προβλέπει μείωση του κόστους των συστημάτων κυψελών καυσίμου - για τιμή εισόδου στην αγορά της τάξης των 15000 €/kWe για 20 MWe αθροιστική παραγωγή ισχύος - ακόμη και κάτω από 2000 €/kWe σε ένα αθροιστικό ρυθμό παραγωγής πάνω από 10000 MWe (Mahadevan *et al.*, 2007; Pehnt *et al.*, 2004). Ειδικά για τα συστήματα SOFC που τροφοδοτούνται από φυσικό αέριο, υποθέτοντας μια ετήσια παραγωγή 500000 μονάδων, το κόστος αναμένεται να κυμανθεί από 725 έως 1400 €/kWe ανάλογα με το μέγεθος του προς χρήση συστήματος (IEA, 2005).

### **3.7 Ανταγωνιστικό κόστος των συστημάτων κυψελών καυσίμου**

Το κόστος στο οποίο οι κυψέλες καυσίμου θα γίνουν ανταγωνιστικές ως προς τα συμβατικά συστήματα μετατροπής ενέργειας καθορίζεται από τα αντίστοιχα κόστη αυτών των ανταγωνιστικών τεχνολογιών. Λόγω των υψηλότερων αποδόσεων τους, οι κυψέλες καυσίμου δύναται να παραμείνουν κατά 20–30% ακριβότερες σε σχέση με άλλα συστήματα παραγωγής ισχύος και αυτή η διαφορά τείνει να αυξάνεται για τα μικρότερα συστήματα κυψελών καυσίμου. Ειδικά για μικρές εφαρμογές (μέχρι 5 kW), οι υψηλές τιμές της οικιακής ηλεκτρικής ενέργειας προβλέπεται να οδηγήσουν σε ένα κόστος κυψελών καυσίμου μέχρι και 2000 €/kWe (Pehnt *et al.*, 2004; Hawkes *et al.*, 2005).

Ο Πίνακας 4-8 εμφανίζει το σημερινό τεχνολογικό επίπεδο των μικρών μονάδων (0.5-5 kWe) κυψελών καυσίμου τύπου PEM, SOFC, AFC και PAFC, για σταθερές εφαρμογές. Η απόδοση των συστημάτων αναφέρεται στις ηλεκτρικές απώλειες του συστήματος των κυψελών καυσίμου (ανεμιστήρες, αντλίες, έλεγχος) και της μονάδας διαχείρισης της παραγόμενης ισχύος (μετασχηματιστής, μετατροπέας), ενώ η συνολική απόδοση αναφέρεται στη συμπαραγωγή ηλεκτρικής ισχύος και θερμότητας. Οι εκτιμήσεις για το κόστος αναφέρονται σε συνθήκες μαζικής παραγωγής συστημάτων κυψελών καυσίμου σύμφωνα με την σημερινή τεχνολογία αιχμής, ενώ οι τρέχουσες λιανικές τιμές των συστημάτων επίδειξης κυψελών καυσίμου αναφέρονται να κυμαίνονται σε ένα εύρος μεταξύ των 10000–100000 €/kWe (Staffell *et al.*, 2007).

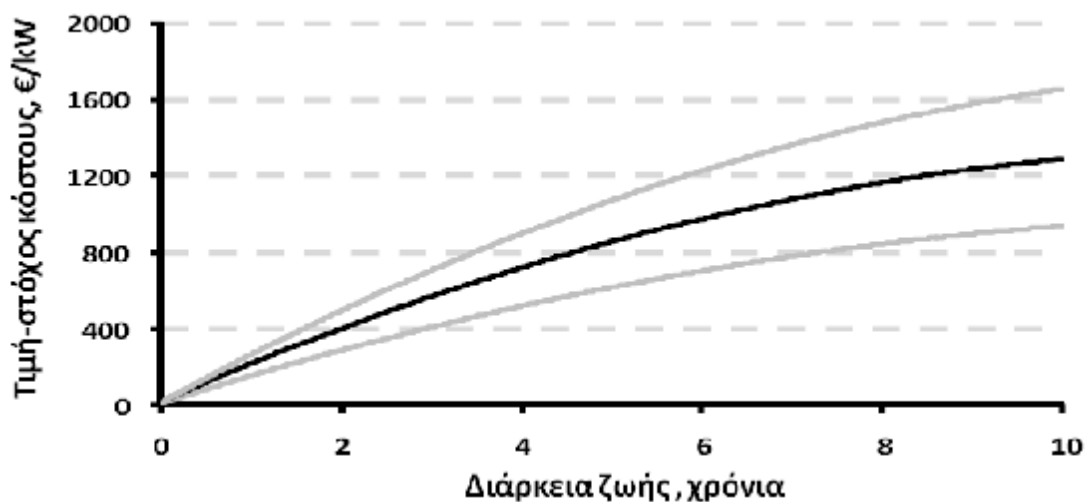
Η χρήση και οι κύκλοι on/off ενός συστήματος CHP επηρεάζουν το πιθανό όφελος. Επιπλέον, οι υψηλότερες συνολικές αποδόσεις οδηγούν σε ελάχιστη κατανάλωση καυσίμου, ενώ οι μεγαλύτεροι χρόνοι ζωής σε χαμηλότερα ετήσια κόστη κεφαλαίου.

Συγκρίνοντας το εκτιμώμενο κόστος παραγωγής για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές με το κόστος που πρέπει να διακρίνει τις κυψέλες καυσίμου ώστε να καθίστανται ανταγωνιστικές σε σχέση με τις συμβατικές μηχανές μετατροπής ενέργειας, μπορεί να προσδιοριστούν οι προοπτικές ανάπτυξης της σχετικής αγοράς για κάθε τύπο κυψελών καυσίμου. Κατά συνέπεια, σύμφωνα με την εργασία των Staffell *et al.* (2007) οι κυψέλες καυσίμου PAFCs και AFCs, σε όλες τις περιπτώσεις, αναμένεται να κοστίζουν περισσότερο σε σχέση με την τιμή-στόχο (ανταγωνιστική), ενώ για τις κυψέλες καυσίμου PEMFCs και SOFCs υπάρχει επικάλυψη μεταξύ του εκτιμώμενου κόστους κατασκευής και του κόστους που θα πρέπει να έχουν για να θεωρούνται ανταγωνιστικές. Επιπλέον, η κατ' εκτίμηση διάρκεια ζωής των AFCs και PEMFCs βρέθηκε να είναι μικρότερη σε σύγκριση με την εκτιμώμενη περίοδο απόσβεσης τους. Οι κυψέλες καυσίμου PEMFCs (εναλλακτικά PEM, PEFC ή SPFC) έχουν διαφημιστεί αρκετά και θεωρούνται υπεύθυνες για την αύξηση του ενδιαφέροντος που έχει σημειωθεί για την αγορά των κυψελών καυσίμου κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας. Συνεπώς, μεγάλο μέρος της ερευνητικής και εμπορικής δραστηριότητας παγκοσμίως στρέφεται τώρα στην τεχνολογία των PEMFC (Price Waterhouse Coopers, 2007), δίνοντας τη δυνατότητα να πραγματοποιηθούν οι διαρθρωτικές αλλαγές που απαιτούνται για να κερδίσουν οι κυψέλες καυσίμου το προσδοκώμενο μερίδιο αγοράς.

**Πίνακας 8: Αποδόσεις και κόστη κυψελών καυσίμου τύπου PEM, SOFC, PAFC και AFC, μέχρι 5 kW (Staffell *et al.*, 2007).**

	PEMFC	SOFC	PAFC	AFC
Δυναμικό λειτουργίας, V	0,59 – 0,73	0,63 – 0,75	0,64 – 0,72	0,64 – 0,82
Πυκνότητα ρεύματος λειτουργίας, A/cm <sup>2</sup>	0,40 – 0,90	0,32 – 0,67	0,16 – 0,31	0,09 – 0,24
Πυκνότητα ισχύος, W/cm <sup>2</sup>	0,27 – 0,56	0,22 – 0,46	0,11 – 0,21	0,06 – 0,18
Απόδοση συστοιχίας, % HHV	36,5 – 50,0	42,0 – 64,5	40,5 – 54,5	42,5 – 49,5
Απόδοση συστήματος, % HHV	23,0 – 31,5	27,0 – 41,5	26,0 – 35,0	27,0 – 32,0
Συνολική απόδοση, % HHV	63,5 – 81,5	67,0 – 71,0	74,0 – 87,0	~ 87,0
Διάρκεια ζωής, kh	7 – 21	15 – 59	30 – 53	4 – 8
Διάρκεια ζωής, χρόνια	0,7 – 2,4	1,7 – 6,7	3,5 – 6,1	0,5 – 0,9
Απενεργοποίηση, mV/χρόνο	13,1 – 74,5	28,0 – 73,6	14,9 – 39,4	78,8 – 254,0
Απενεργοποίηση, %/χρόνο	2 – 11	4 – 10	2 – 6	11 – 35
Κόστος συστοιχίας, €/kW <sub>e</sub>	300 – 900	200 – 600		150 – 600
Κόστος συστήματος, €/kW <sub>e</sub>	530 – 1130	680 – 1080	2500 – 5000	375 – 825
Λιανική τιμή, €/kW (στόχος)	220 – 440	510 – 970	660 – 1100	120 – 230

στόχο. Τα αποτελέσματα των Kendall et al. επισημαίνουν την ιδιαίτερη αβεβαιότητα στην διαμόρφωση της τελικής τιμής για μία κυψέλη καυσίμου με συμπαραγωγή (CHP), η οποία αναμένεται να κυμαίνεται σε ένα εύρος μεταξύ 300–700 €/kW (Kendall et al., 2003). Οι διακυμάνσεις στις ηλεκτρικές και συνολικές αποδόσεις μεταξύ των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου, βρέθηκαν να έχουν μικρή σημασία στην τελική τιμή. Όπως λοιπόν διαπιστώνεται οι κυψέλες καυσίμου PEFC και SOFC έχουν τη δυνατότητα να εκπληρώσουν την τιμή-στόχο, την τιμή δηλαδή για την οποία αυτές οι τεχνολογίες θα είναι ανταγωνιστικές σε σχέση με τις συμβατικές μηχανές μετατροπής ενέργειας. Εντούτοις, είναι κρίσιμο, να προχωρήσουμε σε μεγάλους όγκους παραγωγής (Staffell et al., 2007). Οι υψηλής θερμοκρασίας μεμβράνες, σήμερα, αναμένονται να λειτουργούν για λιγότερες από 20000 ώρες και να παρουσιάζουν ένα γενικό εγκατεστημένο κόστος συστημάτων κυψελών καυσίμου λιγότερο από \$1500/kW για το αρχικό στάδιο εμπορευματοποίησης τους (μέχρι το 2008) και τελικά \$400/kW για τις μεγάλες αγορές (μέχρι το 2010) (Pehnt et al., 2004).

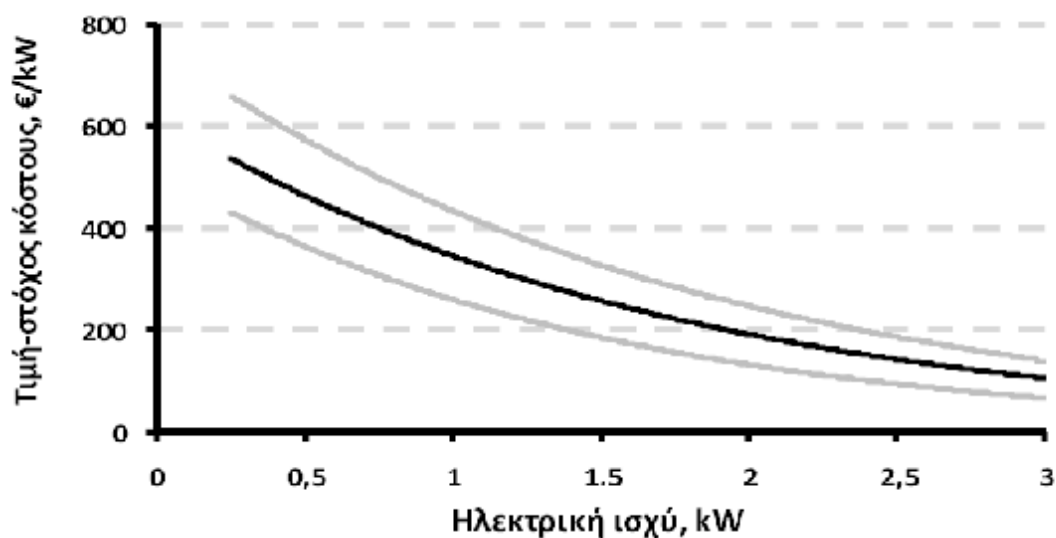


Σχήμα 13: Επίδραση της διάρκειας ζωής των κυψελών καυσίμου στο κόστος τους για την ανταγωνιστική εμπορευματοποίησή τους (Staffell et al., 2007).

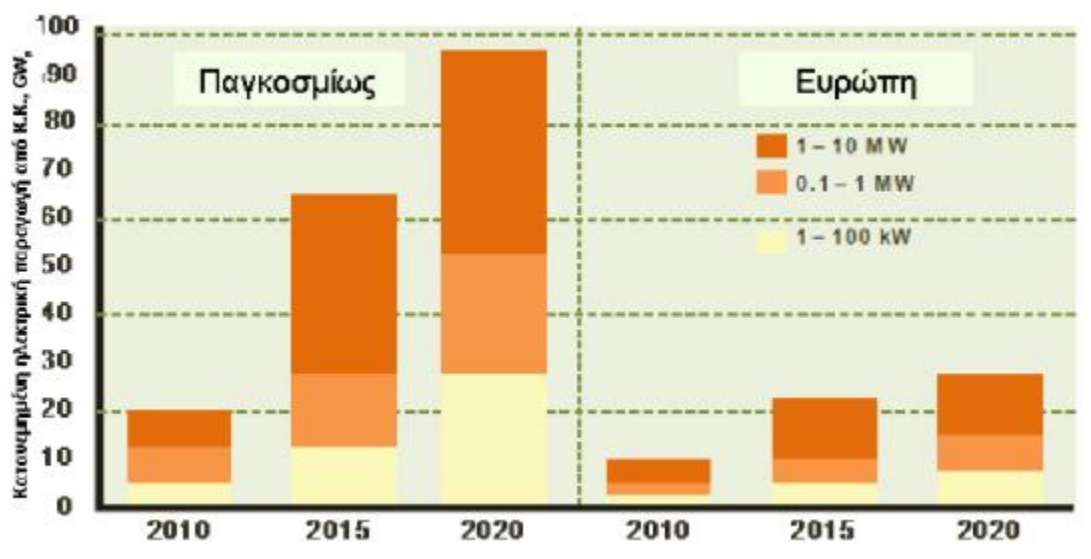
### 3.8 Ανάπτυξη της αγοράς των κυψελών καυσίμου

Το κόστος κατασκευής των κυψελών καυσίμου και οι σχετικές λιανικές τιμές αναμένεται να επηρεαστούν έντονα από τους εγκαταστημένους όγκους παραγωγής και την αντίστοιχη τεχνογνωσία. Οι όγκοι παραγωγής θα επηρεαστούν από τον ρυθμό εμπορευματοποίησης των κυψελών καυσίμου, ο οποίος με την σειρά του θα εξαρτάται από την ανταγωνιστικότητα των τελικών τιμών σε σχέση με το κόστος των συμβατικών μηχανών μετατροπής ενέργειας (Pehnt *et al.*, 2004).

Η εμπορευματοποίηση μιας νέας τεχνολογίας αποτελεί μια σημαντική πρόκληση και μια αβέβαιη διαδικασία. Ο αναδυόμενος βιομηχανικός κλάδος των κυψελών καυσίμου στην πορεία αναβάθμισής του από τις αρχικές δραστηριότητες έρευνας και ανάπτυξης στην παραγωγή, στο μάρκετινγκ και στις πωλήσεις, βιώνει πολυάριθμες αβεβαιότητες όσον αφορά τόσο σε τεχνολογικά θέματα όσο και στην ίδια την φύση της αγοράς. Η φάση της προ-εμπορευματοποίησης μιας νέας τεχνολογίας είναι άκρως ενδιαφέρουσα και συναρπαστική. Μεταξύ των άλλων, η αντίστοιχη βιομηχανία καλείται να διαχειριστεί τις μεγάλες περιόδους απόσβεσης και μία ποικιλία στις διάφορες επενδυτικές επιλογές που ανοίγονται. Η διαδικασία ανάπτυξης της αγοράς των κυψελών καυσίμου είναι αρκετά πιθανό ότι περνά μέσω μιας αρχικής ρευστής φάσης, που χαρακτηρίζεται από έναν υψηλό βαθμό αβεβαιότητας σχετικά με τα ζητήματα που αφορούν στις εναλλακτικές τεχνολογικές λύσεις που θα γίνουν αποδεκτές τελικά από τις αγορές ή σε πόσα έτη από τώρα θα είναι έτοιμες προς χρήση αυτές οι νέες τεχνολογίες (Price Waterhouse Coopers, 2006; Worldwide Fuel Cell Industry Survey, 2006; Hellmana *et al.*, 2007).



Σχήμα 14: Επίδραση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος των κυψελών καυσίμου στην τελική τιμή-στόχο για την ανταγωνιστική εμπορευματοποίηση τους (Staffell *et al.*, 2007).



Σχήμα 15: Πρόβλεψη του UNEP 2002 για την καταμερισμένη ηλεκτρική παραγωγή ισχύος από κυψέλες καυσίμου (UNEP, 2002).

Σε αυτή τη φάση, απαιτούνται εκτενείς επενδύσεις τόσο σε έρευνα και ανάπτυξη όσο και για τη βαθμιαία ανάπτυξη της παραγωγικής ικανότητας (οικονομίες κλίμακας). Εντούτοις, η αγορά για τα προϊόντα κυψελών καυσίμου είναι σχεδόν ανύπαρκτη μέχρι σήμερα. Η έρευνα του οίκου PriceWatershouse Cooper, αναφέρει ότι καμία από τις αντίστοιχες επιχειρήσεις δεν ήταν κερδοφόρα το 2005 και ότι η χρηματοοικονομική απόδοση αντανάκλα τις δαπάνες που απαιτούνται για την ανάπτυξη και βελτιστοποίηση της εφαρμοζόμενης τεχνολογίας πριν το τελικό στάδιο εισόδου στην αγορά. Κατά συνέπεια, η βιομηχανία των κυψελών καυσίμου εμφανίζεται ακόμα να μην είναι αυτοσυντηρούμενη.

Η απόσβεση της επένδυσης αναμένεται να πάρει χρόνο. Οι εταιρείες κυψελών καυσίμου αντιμετωπίζουν μεγάλες περιόδους απόσβεσης και εξαρτώνται από τα επιδοτούμενα προγράμματα, τη χρηματοδότηση της επιχείρησης, τις επενδύσεις σε έρευνα και ανάπτυξη. Εντούτοις, η βιομηχανία των κυψελών καυσίμου εμφανίζει σημαντική πρόοδο τόσο στην τεχνολογία όσο και στις πωλήσεις στις νέες αγορές, εμφανίζοντας θετικές προοπτικές σε ένα φαινομενικά μη-υγιή βιομηχανικό κλάδο (Hellmana *et al.*, 2007). Η επιτυχής εμπορευματοποίηση των κυψελών καυσίμου αναμένεται να απαιτήσει ένα ουσιαστικό ποσό επένδυσης και

στην περίπτωση μιας νεοσύστατης εταιρείας αυτό σημαίνει συχνά συγκέντρωση κεφαλαίων περισσότερο από μία φορά λαμβάνοντας υπόψη ότι η επιχείρηση θα αναπτύσσει το προϊόν της και ταυτόχρονα θα επεκτείνει το εργατικό δυναμικό της (Doran *et al.*, 2003).

### 3.9 Εφαρμογές των κυψελών καυσίμων

- Σπίτι, γραφείο, πολυώροφα κτίρια, εστιατόρια, εργοστάσια, βιοτεχνίες.
- Πολυκαταστήματα, super markets.
- Βενζινάδικα, πάρκινγκ, αθλητικές εγκαταστάσεις, σχολεία, τράπεζες.
- Νοσοκομεία, θέατρα, κινηματογράφοι, χώροι αναψυχής.
- Πισίνες, ενυδρεία.
- Αεροδρόμια, ελικοδρόμια, σταθμοί λεωφορείων και τρένων, γκαράζ
- Για την αυτόνομη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος σε νησιά με παραγωγή υδρογόνου από τον ήλιο και τον άνεμο.
- Δήμοι και κοινότητες
- Συστήματα UPS ισχύος (500v1000)Watt για αναμεταδότες κινητής τηλεφωνίας.



Σχήμα 16: Εφαρμογές Κυψελών Καυσίμων



### 3.10 Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα

#### Πλεονεκτήματα

- Ø Ελάχιστες εκπομπές ρύπων. Προστασία της ατμόσφαιρας, φιλικός προς το περιβάλλον ηλεκτρισμός
- Ø Οι κυψέλες δεν έχουν κινητά μέρη. Ήσυχη λειτουργία και μικρή συντήρηση.
- Ø Μεγάλη απόδοση στην μετατροπή ηλεκτρισμού της τάξης του 40-65% .
- Ø Εξοικονόμηση ενέργειας.
- Ø Προσαρμοζόμενος σχεδιασμός για εφαρμογές από watt μέχρι megawatt.
- Ø Σαν αέριο ή υγρό, το υδρογόνο μπορεί εύκολα να μεταφερθεί, να φυλαχθεί και τελικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε εφαρμογή όπου χρησιμοποιούνται σήμερα τα καύσιμα.
- Ø Κοστίζει λιγότερο για να μετακινηθεί το υδρογόνο σε άλλες ηπείρους ως συμπιεσμένο αέριο με τη βοήθεια σωλήνων, από ένα ίσο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας. Το υγρό υδρογόνο είναι η ασφαλέστερη και πιο οικονομική επιλογή για την κίνηση της ενέργειας από τους ωκεανούς.
- Ø Το υδρογόνο είναι το πιο ασφαλές από όλα τα καύσιμα. Το αέριο υδρογόνο είναι 14 φορές ελαφρύτερο από τον αέρα και για αυτό διαχέεται ταχέως στην ατμόσφαιρα στην περίπτωση ενός ατυχήματος. Ενώ τα άλλα καύσιμα έχουν μεγάλο χρόνο επικινδυνότητας έως ότου αυτά ξεφύγουν από την θέση τους.

#### Μειονεκτήματα

- Ø "Πράσινος" κίνδυνος Η χρήση του υδρογόνου ως πηγή ενέργειας τις επόμενες δεκαετίες ίσως βλάψει σημαντικά το στρώμα του όζοντος, σύμφωνα με έρευνα που δημοσιεύεται στο περιοδικό Science. Η ερευνητική ομάδα του Τεχνολογικού Ινστιτούτου της Καλιφόρνιας (CalTech) υποστηρίζει ότι το υδρογόνο που διαρρέει στο περιβάλλον θα ανεβαίνει πολύ γρήγορα στη στρατόσφαιρα - το υδρογόνο είναι το πιο ελαφρύ στοιχείο - όπου θα αντιδρά με το οξυγόνο για το σχηματισμό νερού.
- Ø Άγνωστες παράμετροι. Σύμφωνα με υπολογισμούς, η διαρροή από τις μονάδες παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής του καυσίμου θα αντιστοιχεί στο 20% της ολικής ποσότητας υδρογόνου.
- Ø Τέλος ένα μεγάλο μειονέκτημα των κυψελών καυσίμου είναι το μεγάλο οικονομικό κόστος που συνεπάγεται η χρήση τους.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

## 4.1 Φωτοβολταϊκά

### 4.1.1 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Το φωτοβολταϊκό (Φ/Β) φαινόμενο αφορά τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Το Φ/Β φαινόμενο ανακαλύφθηκε το 1839 από τον Εντμόντ Μπεκερέλ (Alexandre-Edmond Becquerel ). Περιληπτικά πρόκειται για την απορρόφηση της ενέργειας του φωτός από τα ηλεκτρόνια των ατόμων του Φ/Β στοιχείου και την απόδραση των ηλεκτρονίων αυτών από τις κανονικές τους θέσεις με αποτέλεσμα την δημιουργία ρεύματος. Το ηλεκτρικό πεδίο που προϋπάρχει στο Φ/Β στοιχείο οδηγεί το ρεύμα στο φορτίο.

### 4.1.2 Φωτοβολταϊκή Διάταξη

Τα Φ/Β πλαίσια έχουν ως βασικό μέρος το ηλιακό στοιχείο (solar cell) που είναι ένας κατάλληλα επεξεργασμένος ημιαγωγός μικρού πάχους σε επίπεδη επιφάνεια. Η πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας δημιουργεί ηλεκτρική τάση και με την κατάλληλη σύνδεση σε φορτίο παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα.

Τα Φ/Β στοιχεία ομαδοποιούνται κατάλληλα και συγκροτούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ή γεννήτριες (module), τυπικής ισχύος από 20W έως 300W. Οι Φ/Β γεννήτριες συνδέονται ηλεκτρολογικά μεταξύ τους και δημιουργούνται οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες (arrays).

### 4.1.3 Τεχνολογίες Φ/Β Στοιχείων

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες:

#### 1. Κρυσταλλικού Πυριτίου

- Μονοκρυσταλλικού πυριτίου, με ονομαστικές αποδόσεις πλαισίων 14,5% έως 21%,
- Πολυκρυσταλλικού πυριτίου, με ονομαστικές αποδόσεις πλαισίων 13% έως 14,5%.2.

#### 2. Λεπτών Μεμβρανών

- Άμορφου Πυριτίου, ονομαστικής απόδοσης ~7%.

- Χαλκοπυριτών CIS / CIGS, ονομαστικής απόδοσης από 7% έως 11%.

Το πυρίτιο (Si) είναι η βάση για το 90% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής Φ/Β. Η κυριαρχία αυτή οφείλεται αρχικά στην τεράστια παγκόσμια επιστημονική και τεχνική υποδομή για το υλικό αυτό από τη δεκαετία του '60. Μεγάλες κυβερνητικές και βιομηχανικές επενδύσεις έγιναν σε προγράμματα για τις χημικές και ηλεκτρονικές ιδιότητες του Si, ώστε να δημιουργηθεί ο εξοπλισμός που απαιτείται στα βήματα της επεξεργασίας για την απόκτηση της απαραίτητης καθαρότητας και της κρυσταλλικής δομής του υλικού.

Η γνώση που προέκυψε έτσι για το πυρίτιο, τα χαρακτηριστικά του και η αφθονία του στη γη, το κατέστησαν ικανό και συμφέρον μέσο για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Εντούτοις, λόγω του ότι είναι εύθραυστο, το πυρίτιο απαιτεί τον σχηματισμό στοιχείων σχετικά μεγάλου πάχους. Αυτό σημαίνει ότι μερικά από τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται μετά την απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας πρέπει να ταξιδέψουν μεγάλες αποστάσεις για να ενταχθούν στην ροή του ρεύματος και να συνεισφέρουν στο ηλεκτρικό κύκλωμα. Συνεπώς, το υλικό θα πρέπει να έχει υψηλή καθαρότητα και δομική τελειότητα, ώστε να αποτρέψει την επιστροφή των ηλεκτρονίων στις φυσικές τους θέσεις. Οι ατέλειες πρέπει να αποφευχθούν ώστε η ενέργεια του ηλεκτρονίου να μην μετατραπεί σε θερμότητα. Η παραγωγή θερμότητας, η οποία είναι επιθυμητή στα ηλιακά θερμικά πλαίσια, όπου αυτή η θερμότητα μεταφέρεται σε ένα ρευστό, είναι ανεπιθύμητη στα Φ/Β πλαίσια, όπου η ηλιακή ενέργεια θα πρέπει να μετατραπεί σε ηλεκτρική.

Το πυρίτιο, ανάλογα με την επεξεργασία του, δίνει μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά ή άμορφα υλικά, από τα οποία παράγονται τα Φ/Β στοιχεία. Τα λεπτά υλικά είναι ένας τρόπος να μειωθεί το κόστος των Φ/Β πλαισίων και να αυξηθεί η απόδοσή τους. Εκτός από τη χρήση μικρότερης ποσότητας υλικού, ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι ολόκληρα πλαίσια μπορούν να κατασκευαστούν παράλληλα με τη διαδικασία απόθεσης. Αυτό είναι συμφέρον οικονομικά, αλλά επίσης πολύ απαιτητικό τεχνικά, επειδή η επεξεργασία χωρίς ατέλειες αφορά μεγαλύτερη επιφάνεια.

Στα πλεονεκτήματα των λεπτών πλαισίων τα οποία αναφέρθηκαν παραπάνω, θα πρέπει να αντιπαρατεθεί η χαμηλότερη ως τώρα απόδοσή τους, η οποία περιορίζεται στο 5-10%, ανάλογα με το υλικό. Πάντως η τεχνολογία λεπτού στρώματος (thin film) είναι σε φάση ανάπτυξης, αφού με διάφορες μεθόδους επεξεργασίας και χρήση διαφορετικών υλικών

αναμένεται αύξηση της απόδοσης, σταθεροποίηση των χαρακτηριστικών τους και αύξηση της διείσδυσης στην αγορά. Σήμερα πάντως αποτελούν την πιο φθηνή επιλογή Φ/Β πλαισίων.

#### **4.1.4 Δομή ενός φωτοβολταϊκού συστήματος**

Το φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα αριθμό μερών ή υποσυστημάτων:

- (α) Τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια με τη μηχανική υποστήριξη και πιθανόν ένα σύστημα παρακολούθησης της ηλιακής τροχιάς.
- (β) Μπαταρίες (υποσύστημα αποθήκευσης)- πλέον δεν χρησιμοποιούνται, εκτός σε απομακρυσμένες εγκαταστάσεις όπως είναι π.χ. οι Φάροι, διαφορετικά η σύνδεση του πάνελ γίνεται απευθείας με το υφιστάμενο δίκτυο της ΔΕΗ.
- (γ) Καθορισμό ισχύος και συσκευή ελέγχου που περιλαμβάνει φροντίδα για μέτρηση και παρατήρηση.
- (δ) Εφεδρική γεννήτρια. Η επιλογή του πώς και ποια από αυτά τα στοιχεία ολοκληρώνονται μέσα στο σύστημα εξαρτάται από ποικίλες εκτιμήσεις.

#### **4.1.5 Φωτοβολταϊκές γεννήτριες**

Πρόκειται στην ουσία για ένα ηλεκτρονικό στοιχείο το οποίο ονομάζεται «δίοδος» και έχει τη δυνατότητα να μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια που πέφτει πάνω του σε ηλεκτρικό ρεύμα. Πάρα πολλές «διόδους» μαζί συνθέτουν αυτό που ονομάζουμε φωτοβολταϊκή πλάκα, η οποία μας δίνει τελικά στα άκρα της 12Volt συνεχές ρεύμα και έχει κάποια ισχύ ανάλογα με το μέγεθός της, δηλαδή ανάλογα με τον αριθμό «διόδων». Οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες παράγουν ρεύμα όταν υπάρχει φως, δηλαδή ακόμη και στη διάρκεια μιας συννεφιασμένης μέρας, όχι όμως με την ίδια απόδοση, η οποία στην καλύτερη περίπτωση φτάνει το (12-14)%. Αυτό σημαίνει ότι από τις 100 μονάδες ηλιακής ενέργειας που πέφτουν στις πλάκες μετατρέπονται σε ρεύμα 12-14 μονάδες.

Οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες, αποτελούνται από κυψέλες οι οποίες είναι κατασκευασμένες από πυρίτιο και μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια. Μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια αποτελείται από πολλές φωτοβολταϊκές κυψέλες.

Στις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις συνδέονται πολλές φωτοβολταϊκές γεννήτριες μεταξύ τους σε σειρά δημιουργώντας φωτοβολταϊκές συστοιχίες(strings), οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν από 2 έως και αρκετές εκατοντάδες φωτοβολταϊκές γεννήτριες.

Ανάλογα με τον τύπο του χρησιμοποιούμενου πυριτίου, οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες χωρίζονται σε μονοκρυσταλλικές, πολυκρυσταλλικές ή άμορφες.



Σχήμα 17

## **4.2 Μονοκρυσταλλικές γεννήτριες**

Αποτελούνται από μονοκρυσταλλικές κυψέλες, οι οποίες παράγονται από δισκία μονοκρυσταλλικού πυριτίου, γνωστά ως wafers. Μετατρέπουν στις τεχνικές τους εφαρμογές μέχρι και 20% της εκπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια.

## **4.3 Πολυκρυσταλλικές γεννήτριες**

Το πλεονέκτημα αυτού του τύπου έγκυται στην ιδιαίτερα καλή σχέση τιμής - απόδοσης.

#### 4.4 Γεννήτριες λεπτού υμενίου (thinfilm)

Διαφέρουν στον τρόπο κατασκευής από τις κρυσταλλικές και είναι σημαντικά οικονομικότερες στην παραγωγή τους. Οι σπουδαιότερες αυτών είναι οι :

- Άμορφου πυριτίου

Αυτές οι γεννήτριες κατασκευάζονται από άμορφο, μη κρυσταλλικό πυρίτιο και είναι αρκετά φθηνές στην παραγωγή τους. Ονομάζονται και thin film modules. Ο βαθμός απόδοσης είναι μικρός (5-8%) αλλά ο τύπος αυτός των φωτοβολταϊκών γεννητριών προσφέρει πλεονεκτήματα σε συνθήκες με λίγο ή διάχυτο φως ή ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες.

- Καδμίου (CdTe)

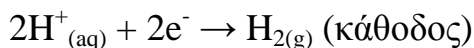
Ιδανικές για θερμά κλίματα (καλός συντελεστής θερμοκρασίας).

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

## 5.1 Ηλεκτρόλυση

Κατά την ηλεκτρόλυση του νερού, το νερό διασπάται στα βασικά στοιχεία όπου το αποτελούν, υδρογόνο και οξυγόνο με την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Τα πλεονεκτήματα αυτής της διεργασίας είναι η υψηλής καθαρότητας υδρογόνο που παράγεται. Ωστόσο, αποτελεί ακριβή μέθοδο εξαιτίας του κόστους του ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο απαιτείται.

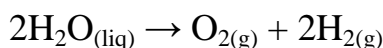
Κατά την ηλεκτρόλυση, στην κάθοδο ιόντα υδρογόνου (πρωτόνια) ανάγονται σε υδρογόνο ενώ στην άνοδο το νερό οξειδώνεται σε οξυγόνο και πρωτόνια. Οι διεργασίες αυτές περιγράφονται αντίστοιχα από τις παρακάτω αντιδράσεις:



και



οι οποίες μας δίνουν το συνολικό μηχανισμό της ηλεκτρόλυσης



Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι το ότι το παραγόμενο οξυγόνο μπορεί επίσης να εκμεταλλευτεί για βιομηχανική ή άλλη χρήση.

Θεωρητικά 1,23 V εφαρμοζόμενης τάσης αρκούν για τη διεξαγωγή της ηλεκτρόλυσης. Πρακτικά, χρειάζεται περισσότερη τάση (1,55 V με 1,65 V). Η απόδοση της ηλεκτρόλυσης ορίζεται ως το λόγο του 1,23 V προς την τάση όπου χρησιμοποιείται. Με τάση 1,60 V έχουμε απόδοση

$$\frac{1,23}{1,60} = 0,77 = 77\%$$

Η αντίδραση της καθόδου, εμπλέκει 4 ηλεκτρόνια και η οξείδωση πραγματοποιείται μέσω μιας σειράς ενδιάμεσων προϊόντων. Σε αυτό οφείλεται η ανάγκη επιπλέον τάσης καθώς η όλη διαδικασία χαρακτηρίζεται από αργό κινητικό μηχανισμό. Η χρήση καταλύτη βοηθάει στη μείωση αυτής της τάσης και επιταχύνει τη διαδικασία. Ένας ιδανικός καταλύτης για την οξείδωση του νερού θα πρέπει να

εξισορροπεί την απαιτούμενη ενέργεια του κάθε ενδιάμεσου βήματος και επίσης να εξισορροπεί τους ρυθμούς μεταφοράς κάθε ηλεκτρονίου.

Η απευθείας ηλεκτρόλυση νερού μέχρι και τη δεκαετία του '50 είχε ευρεία χρήση στην παραγωγή υδρογόνου. Σήμερα, ένα μικρό μόνο ποσοστό υδρογόνου παράγεται κατά αυτόν τον τρόπο σε εφαρμογές κυρίως όπου χρειάζεται μικρός όγκος καθαρού υδρογόνου. Ωστόσο παράλληλα παρατηρείται μια αναγέννηση του ενδιαφέροντος με την κατασκευή ολοκληρωμένων συστημάτων ηλεκτρολυτών σε συνδυασμό με εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακής ή αιολικής).

## **5.2 Το Πρόβλημα της Ηλεκτρόλυσης**

Στην ενότητα αυτή δίνουμε μια σύντομη παρουσίαση του φαινομένου της ηλεκτρολυτικής διάβρωσης και των μεθόδων αντιμετώπισής της.

### **5.2.1 Το φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης**

Ηλεκτρόλυση ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο δύο διαφορετικά μέταλλα έρχονται σε επαφή με το ίδιο υγρό (ηλεκτρολύτης), με αποτέλεσμα να μετακινείται μάζα από το ηλεκτροθετικότερο μέταλλο (άνοδος) προς το λιγότερο ηλεκτροθετικό (κάθοδος). Μία τυπική εφαρμογή της ηλεκτρόλυσης είναι οι μπαταρίες.

### **5.2.2 Η ηλεκτρολυτική διάβρωση**

Το πιο ηλεκτροθετικό από τα δύο μέταλλα διαβρώνεται σταδιακά. Όταν το μέταλλο αυτό είναι το υλικό κατασκευής τμήματος μίας υδραυλικής εγκατάστασης (π.χ. σίδηρος), τότε το τμήμα αυτό αργά ή γρήγορα θα εξασθενήσει τόσο ώστε να αρχίσουν οι διαρροές λόγω τρυπήματος ή λόγω αδυνατίσματος σε σημεία σύνδεσης. Στην περίπτωση μίας υδραυλικής εγκατάστασης το διακινούμενο υγρό παίζει το ρόλο του ηλεκτρολύτη.

### **5.2.3 Παράγοντες που ενισχύουν το φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης**

Το φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης γίνεται πιο ισχυρό, όταν:

- ü Συμμετέχουν δύο ή περισσότερα διαφορετικά μέταλλα σε ένα υδραυλικό δίκτυο.
- ü Τα διάφορα μέταλλα έρχονται σε απευθείας επαφή μεταξύ τους, χωρίς παρεμβολή άλλου υλικού.



- Û Η αγωγιμότητα του διακινούμενου υγρού είναι υψηλή.
- Û Η θερμοκρασία του υγρού είναι υψηλή.
- Û Δημιουργείται ισχυρό ηλεκτρολυτικό κελί εξαιτίας του υπεδάφους, ηλεκτρικών συσκευών κτλ.
- Û Τα μέταλλα που συμμετέχουν στο δίκτυο έχουν μεγάλη διαφορά δυναμικού μεταξύ τους.
- Û Η επιφάνεια των μετάλλων είναι καθαρή από άλατα και άλλες επικαθίσεις.

#### **5.2.4 Παραδείγματα ηλεκτρολυτικής διάβρωσης.**

Από την εμπειρία που έχουμε συλλέξει μέσα από τις επισκέψεις μας σε ξενοδοχεία, βιομηχανίες, δίκτυα ύδρευσης κτλ. μπορούμε να πούμε ότι η ηλεκτρόλυση προσβάλλει συχνότερα τα πιο κάτω είδη εγκαταστάσεων:

- Û Υπόγειες σωληνώσεις και δεξαμενές (λόγω μεταλλικών στοιχείων και υγρασίας εδάφους).
- Û Boilers νερού χρήσης (λόγω χάλκινης σερπαντίνας και χαλκοσωλήνων εξόδου και επιστροφής).
- Û Λέβητες θέρμανσης (λόγω χαλκοσωλήνων εισόδου και εξόδου).
- Û Δίκτυο επιστροφών συμπυκνωμάτων ατμού (λόγω πολύ υψηλής θερμοκρασίας).
- Û Σιδερένια κολεκτέρ αναχωρήσεων – επιστροφών (λόγω χαλκοσωλήνων & υψηλής θερμοκρασίας).
- Û Δίκτυα ύδρευσης, σε σημεία σύνδεσης σιδηροσωλήνα με χαλκοσωλήνα.

#### **5.2.5 Οι αρνητικές συνέπειες της ηλεκτρολυτικής διάβρωσης.**

Τα προβλήματα που δημιουργεί το φαινόμενο της διάβρωσης σε μία επιχείρηση ή έναν οργανισμό ή μία ιδιωτική κατοικία είναι ποικίλα. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα κυριότερα από αυτά:

- Û Κόστος επισκευών & αντικατάστασης δικτύων.
- Û Σκάψιμο τοίχων ή εδάφους για αντικατάσταση σωληνώσεων.
- Û Γκρέμισμα τοίχων για αντικατάσταση λεβήτων, boilers κ.ά. μηχανημάτων.
- Û Κόστος σε χρόνο απασχόλησης συντηρητών, διοίκησης, εργοδοτών, συν το κόστος ευκαιρίας.
- Û Απροειδοποίητες διακοπές λειτουργίας σε περιπτώσεις ζημιάς.

- Û Απώλεια προϊόντος που διαρρέει (σημαντική όταν το προϊόν δεν είναι φθινό όπως το νερό).
- Û Κίνδυνοι λόγω διαρροών (π.χ. νερό που πέφτει πάνω σε ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις).
- Û Ρύπανση του νερού χρήσης με μεταλλικά ιόντα και οξειδία μετάλλων.
- Û Ανάπτυξη μικροοργανισμών επιβλαβών για την υγεία (π.χ. legionella).

### 5.2.6 Μέθοδοι αντιμετώπισης του προβλήματος

Επειδή το πρόβλημα της ηλεκτρόλυσης έχει απασχολήσει πάρα πολλούς τεχνικούς σε όλες τις χώρες του κόσμου, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι αντιμετώπισής του. Τις κυριότερες από αυτές τις ταξινομήσαμε με διάφορα κριτήρια που κρίναμε απαραίτητα για τη σωστή αξιολόγησή τους. Στον πιο κάτω συγκριτικό πίνακα επιχειρείται μια πρώτη προσέγγιση του θέματος, που σίγουρα δεν είναι ολοκληρωμένη, όμως παρέχει έναν οργανωμένο τρόπο μελέτης του θέματος, πάνω στον οποίο μπορεί να προσθέσει κανείς κι άλλα κριτήρια ταξινόμησης και αξιολόγησης (στήλες), καθώς επίσης και άλλες μεθόδους (σειρές), που έχουν παραλειφθεί σε αυτόν τον πίνακα. Το «?» σημαίνει ότι η απάντηση μπορεί να είναι είτε «ΝΑΙ» είτε «ΟΧΙ».

**Πίνακας 9:**

Μέθοδοι αντιμετώπισης της ηλεκτρόλυσης στα δίκτυα διακίνησης νερού και άλλων υγρών	Πλεονεκτήματα των μεθόδων (κριτήρια αξιολόγησης των μεθόδων)																			
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.	
1. Αντικατάσταση διαβρωμένων τμημάτων του δικτύου	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	100%	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
2. Ενεργητική καθοδική προστασία με επβολή αρνητικής τάσης	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	95%	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
3. Παθητική καθοδική προστασία με ράβδους μαγνησίου	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	95%	ΟΧΙ	?	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ
4. Συσκευή an-linc παθητικής καθοδικής προστασίας PROMAG	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	95%	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ
5. Συσκευή an-linc παθητικής καθοδικής προστασίας τύπου tau	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	70%	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ
6. Διηλεκτρικοί σύνδεσμοι (ρακόρ & φλάντζες) ΕΡСО	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	95%	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
7. Καθοδική προστασία μη εμβαπτίζομενου ανοδίου STOPCOR	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	100%	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
8. Χημικό που δημιουργεί προστατευτικό φιλμ εσωτερικά	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	80%	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	?	ΝΑΙ	?	?
9. Εσωτερική επίστρωση με προστατευτικό υλικό	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	80%	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	?
10. Τα ευπαθή μέρη του δικτύου να γίνουν ανοξείδωτα	ΟΧΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	50%	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ

Για τη διευκόλυνσή σας, επειδή τα γράμματα είναι πολύ μικρά, δείτε εδώ το κείμενο που υπάρχει στις γραμμές και τις στήλες του πίνακα:

- Γραμμές (μέθοδοι αντιμετώπισης της ηλεκτρόλυσης):

- Αντικατάσταση διαβρωμένων τμημάτων του δικτύου.
- Ενεργητική καθοδική προστασία με επιβολή αρνητικής τάσης (μέθοδος ICCP).
- Παθητική καθοδική προστασία με ράβδους μαγνησίου.
- Συσκευή on-line παθητικής καθοδικής προστασίας PROMAG.
- Συσκευή on-line παθητικής καθοδικής προστασίας τύπου ταυ.
- Δηλεκτρικοί σύνδεσμοι (ρακόρ & φλάντζες) CLEAR FLOW.
- Καθοδική προστασία μη εμβαπτιζόμενου ανοδίου STOPCOR.
- Χημικό που δημιουργεί προστατευτικό φιλμ εσωτερικά BOILER LIQUID.
- Εσωτερική επίστρωση με προστατευτικό υλικό.
- Τα ευπαθή μέρη του δικτύου να γίνουν ανοξείδωτα.

### 5.3 Στήλες (κριτήρια αξιολόγησης των μεθόδων)

- Χαμηλό κόστος αγοράς.
- Απλή εγκατάσταση, εύκολη αντικατάσταση / προσθήκη αναλωσίμου.
- Λειτουργία που δεν απαιτεί τεχνογνωσία.
- Χαμηλό κόστος λειτουργίας, επίβλεψης και συντήρησης.
- Μηδενικό κόστος αναλωσίμων.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής, για να μην επαναληφθεί σύντομα η αρχική επένδυση.
- Αφαίρεση παλιάς σκουριάς.
- Αφαίρεση ή εξουδετέρωση οξυγόνου κ.ά. διαβρωτικών συστατικών του νερού.
- Ποσοστό επιτυχίας μεθόδου (εμπειρική προσέγγιση κατ' εκτίμηση).
- Η επιτυχία της μεθόδου δεν εξαρτάται από ανθρώπινα σφάλματα, αμέλεια κτλ.
- Ο εξοπλισμός της εγκατάστασης δεν φθείρεται εξαιτίας της μεθόδου.
- Εφαρμόσιμη σε ολόκληρη την έκταση ενός μεγάλου δικτύου διακίνησης υγρών.
- Προστατεύει και υπόγειες σωληνώσεις και δεξαμενές από την εξωτερική διάβρωση.
- Προστατεύει και άλλα είδη μεταλλικών κατασκευών από την εξωτερική διάβρωση.
- Κατάλληλη για δίκτυα ατμού.
- Φιλική προς το περιβάλλον.
- Η μέθοδος δεν δημιουργεί ενοχλητικά αέρια μέσα στο νερό.

- Δε βλάπτει την υγεία και δε θέτει σε κίνδυνο την ασφάλεια των συντηρητών.
- Κατάλληλη για δίκτυα διακίνησης πόσιμου νερού κ.ά. υγρών τροφίμων.

## 5.4 Παρατηρήσεις & συμπεράσματα πάνω στον πίνακα

Η μέθοδος STOPCOR (7η μέθοδος) δείχνει να υπερτερεί σε γενικές γραμμές έναντι των άλλων μεθόδων.

Η μέθοδος CLEAR FLOW (6η μέθοδος) έχει κι αυτή πολύ καλά χαρακτηριστικά, με το επιπλέον πλεονέκτημα της ανυπαρξίας αναλωσίμου και επαναλαμβανόμενου κόστους (5ο κριτήριο αξιολόγησης). Έχει, όμως, το μειονέκτημα ότι θέλει υδραυλικό για την εγκατάσταση (2ο κριτήριο αξιολόγησης), το δε αρχικό κόστος αγοράς είναι υψηλότερο (1ο κριτήριο αξιολόγησης), επειδή απαιτείται η παρεμβολή ενός διηλεκτρικού συνδέσμου σε κάθε σημείο σύνδεσης χαλκού με σίδηρο.

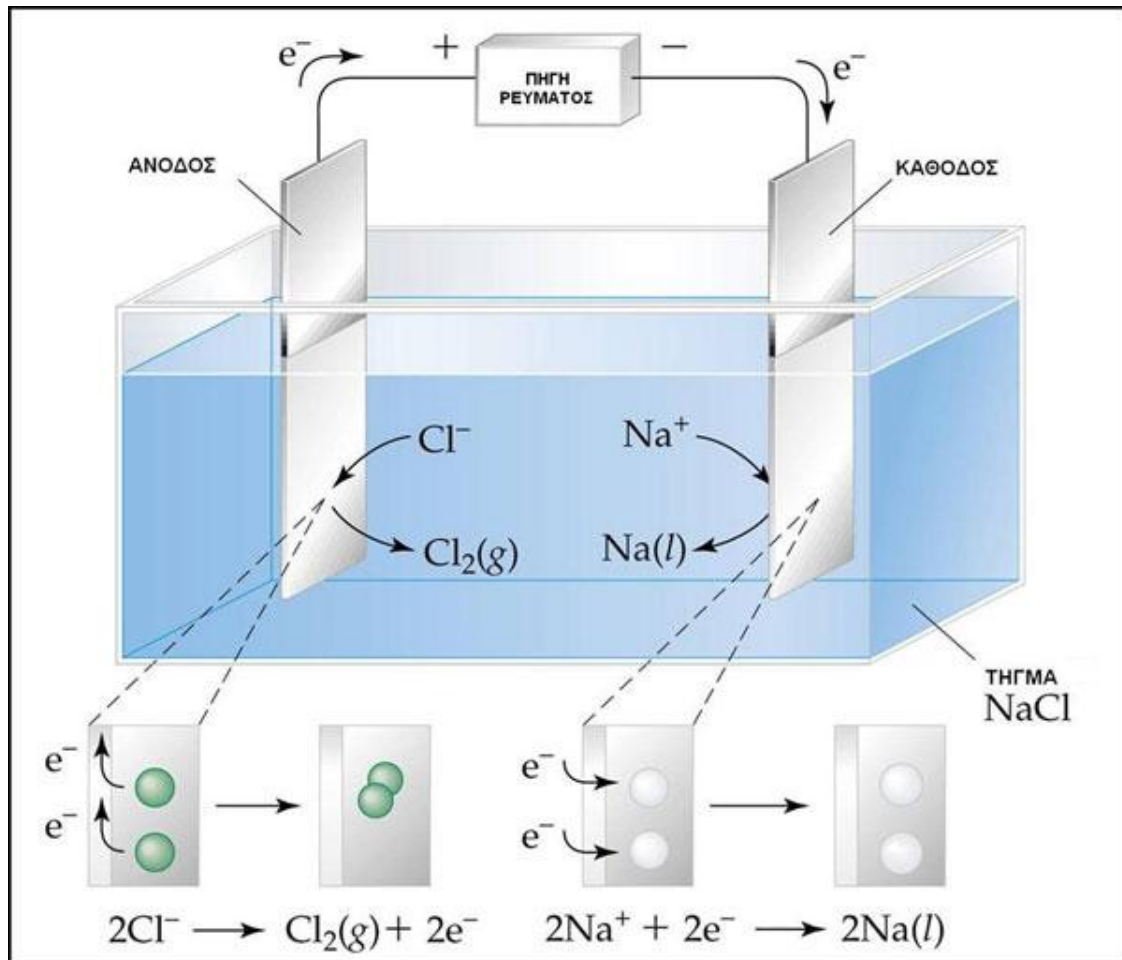
Η **Smart Technical Solutions** προτείνει το συνδυασμό των δύο μεθόδων, για απόλυτα ασφαλή αποτελέσματα, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η καθεμιά από τις δύο μεθόδους δεν είναι από μόνη της αρκετά αποτελεσματική. Οι κατασκευαστές και των δύο μεθόδων αναφέρουν ότι σύμφωνα με τη μέχρι τώρα εμπειρία τους έχει αποδειχθεί ότι οι μέθοδοί τους είναι απόλυτα αυτόνομες και αποτελεσματικές.

Οι ράβδοι μαγνησίου (3η μέθοδος) είναι μία πολύ αποτελεσματική μέθοδος για χώρους αποθήκευσης κρύου και ζεστού νερού, όχι για κολεκτέρ, όπου κακώς χρησιμοποιούνται συχνά. Η **Smart Technical Solutions** προτείνει τις ράβδους μαγνησίου – εφόσον είναι εφικτή η εγκατάστασή τους – σε όλα τα boilers ζεστού νερού χρήσης και στα ηλιακά boilers, ανεξάρτητα αν έχει εφαρμοστεί και άλλη μέθοδος καθοδικής προστασίας για ολόκληρο το δίκτυο, επειδή οι ράβδοι μαγνησίου είναι δοκιμασμένες και αξιόπιστες.

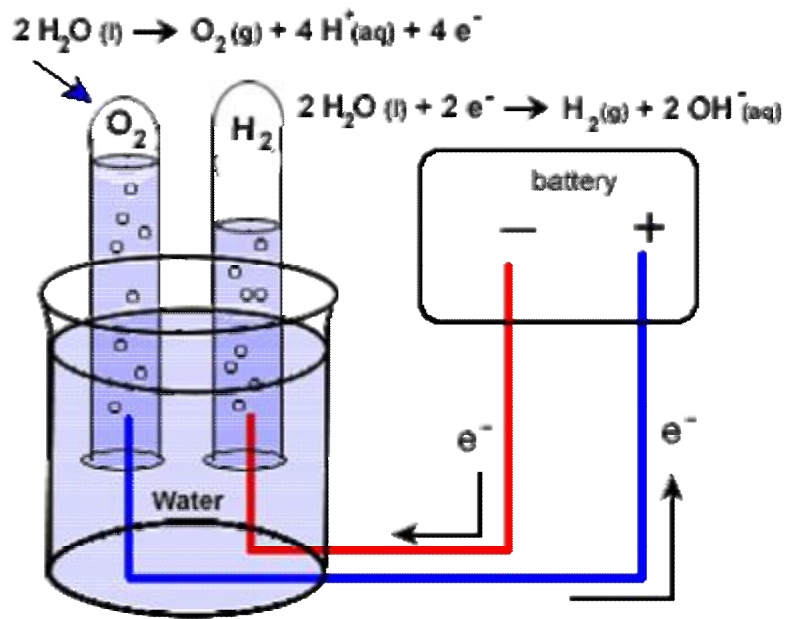
Η συσκευή **PROMAG** υπερτερεί έναντι όλων των άλλων συσκευών on-line καθοδικής προστασίας, οι οποίες, επειδή είναι τύπου ταυ, είναι μεν κατά πολύ φθηνότερες από το **PROMAG**, έχουν όμως διάφορα μειονεκτήματα.

Γενικά, πάντως, η μέθοδος του μη εμβαπτιζόμενου ανοδίου STOPCOR (7η μέθοδος) δείχνει να έχει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των μεθόδων που χρησιμοποιούν εμβαπτιζόμενα ανόδια (4η και 5η μέθοδος). Η **Smart Technical Solutions** διαθέτει, πάντως, εκτός του STOPCOR και συσκευές **PROMAG**, για όσους πελάτες της εμπιστεύονται περισσότερο

τα εμβαπτιζόμενα ανόδια, που είναι πιο παλιά και ευρέως γνωστή μέθοδος.



Σχήμα 18



Σχήμα 19

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>

### 6.1 Γιατί προτείνεται το υδρογόνο ως φορέας ενέργειας

Το υδρογόνο χρησιμοποιείται σαν βιομηχανικό καύσιμο εδώ και αρκετές δεκαετίες. Από την συνολική ποσότητα του υδρογόνου που παράγεται κάθε χρόνο σε παγκόσμια κλίμακα, η βιομηχανία της αμμωνίας καταναλώνει περίπου το 50% αυτής, ενώ τα διυλιστήρια του πετρελαίου το 37%. Το υπόλοιπο 13% καταναλώνεται σε διάφορους άλλους βιομηχανικούς τομείς, μεταξύ των οποίων το μεγαλύτερο ποσοστό σε κατανάλωση κατέχει η βιομηχανία των τροφίμων. Το υδρογόνο, όμως, εκτός από βιομηχανικό καύσιμο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την παραγωγή ενέργειας, δεδομένου ότι απαντά σε τέσσερα μείζονα προβλήματα της χρήσης των συμβατικών καυσίμων.

- 1) Εκμηδενισμός ή ελαχιστοποίηση της ρύπανσης του περιβάλλοντος από εκπομπές.
- 2) Επάρκεια αποθεμάτων.
- 3) Ασφάλεια εφοδιασμού.
- 4) Ενεργειακή ανεξαρτησία.

#### Εκμηδενισμός – Ελαχιστοποίηση της Ρύπανσης:

Όπως αναφέρθηκε, η χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο με αντίδρασή του με το οξυγόνο παράγει ηλεκτρισμό και θερμότητα και μοναδικό υποπροϊόν υδρατμούς και καθαρό νερό. Έτσι, η τεχνολογία του υδρογόνου μπορεί να συμβάλει στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου και στη βελτίωση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, φαινόμενα που έχουν προκληθεί από τη χρήση των συμβατικών μορφών καυσίμων.

Βέβαια, το υδρογόνο δεν απαντάται μόνο του στη φύση, με συνέπεια να απαιτείται η παραγωγή του για τη χρήση του ως ενεργειακό καύσιμο. Έχουν αναπτυχθεί ποικίλες τεχνολογίες παρασκευής του, οι περισσότερες όμως από τις οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την εκπομπή ρυπογόνων αερίων. Σήμερα, η πλέον διαδεδομένη και οικονομικά βιώσιμη μέθοδος παραγωγής υδρογόνου είναι η αναμόρφωση υδρογονανθράκων (κυρίως φυσικού αερίου) με ατμό, η οποία θα παρουσιασθεί αναλυτικά σε επόμενη παράγραφο. Αυτή η μέθοδος

παραγωγής έχει, όμως, ανεπιθύμητα για το περιβάλλον προϊόντα (παραγωγή CO<sub>2</sub>, CO).

Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχει αναβιώσει η τεχνολογία των κυψελίδων καυσίμων με χρήση υδρογόνου. Οι κυψελίδες καυσίμου βασίζονται στην αντίστροφη ηλεκτρόλυση: παράγουν ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνοντας υδρογόνο ως καύσιμο, το οποίο οξειδώνεται ηλεκτροχημικά με οξυγόνο με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και μοναδική εκπομπή το νερό. Η τεχνολογία των κυψελίδων καυσίμου καθιστά το υδρογόνο παραγωγό ηλεκτρικής ενέργειας τελικής χρήσης χωρίς επιβλαβείς εκπομπές και με μηδενικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Από την άλλη πλευρά, δύναται η παραγωγή υδρογόνου από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), κυρίως αιολική ενέργεια και φωτοβολταϊκά, όπου δεν υπάρχει καμία περιβαλλοντική επιβάρυνση από την παραγωγή και χρήση του υδρογόνου, γεγονός που το καθιστά το πλέον φιλικό καύσιμο για το περιβάλλον. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή δεν είναι ακόμη οικονομικά ανταγωνιστική, απαιτεί μεγάλες εκτάσεις για την εγκατάσταση των συστημάτων ΑΠΕ, ενώ μπορεί να χαρακτηριστούν ρυπογόνες οι διαδικασίες κατά την κατασκευή, μεταφορά και εγκατάσταση των τεχνολογιών μετατροπής της αιολικής (ανεμογεννήτριες) ή ηλιακής (φωτοβολταϊκά) ενέργειας και ίσως της ενέργειας για την μεταφορά του υδρογόνου.

### **Επάρκεια Αποθεμάτων**

Όσον αφορά στον προβληματισμό για την αειφορία των αποθεμάτων ενέργειας, φαίνεται ότι το υδρογόνο κυριαρχεί ως λύση. Το γεγονός ότι το υδρογόνο αποτελεί το 90% της συνολικής μάζας του σύμπαντος το καθιστά καύσιμο ευρείας διάθεσης, του οποίου ο ανεφοδιασμός δεν τελειώνει ποτέ. Πράγματι, το νερό και οι υδρατμοί που εκλύονται από την καύση του υδρογόνου υφίστανται ανακύκλωση μέσω της βροχής, των ποταμών, των λιμνών και των ωκεανών για να «επανορθώσουν» για το νερό που αρχικά χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του.

Αξίζει ακόμα να αναφερθεί ότι το υδρογόνο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής ενέργειας ανά μονάδα βάρους από οποιοδήποτε άλλο γνωστό καύσιμο, η οποία ανέρχεται σε 33,30 kWh/kg (Πίνακας 6.1). Η ενέργεια αυτή είναι τρεις φορές μεγαλύτερη περίπου από την ενέργεια 1 kg συμβατικής βενζίνης, γεγονός που καθιερώνει το υδρογόνο καύσιμο υψηλής δραστηριότητας, οπότε και ενδείκνυται σε πλήθος εφαρμογών. Από την άλλη μεριά βέβαια, το υδρογόνο παρουσιάζει και την μικρότερη ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου, συγκριτικά με τα συμβατικά καύσιμα, η οποία ανέρχεται σε 0,53 kWh/l (Πίνακας 6.1). Αυτό οφείλεται στην εξαιρετικά μικρή του αέρια πυκνότητα υπό



συνθήκες περιβάλλοντος και, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, αποτελεί σήμερα το κυριότερο εμπόδιο στην ανάπτυξη της τεχνολογίας του, κυρίως στον τομέα της ασφαλούς και αποτελεσματικής αποθήκευσής του.

Συγκριτικά στοιχεία ενεργειακής πυκνότητας μεταξύ του υδρογόνου και των κυριοτέρων από τα σημερινά ενεργειακά καύσιμα.

**Πίνακας 10: Συγκριτικά στοιχεία ενεργειακής πυκνότητας μεταξύ του υδρογόνου και των κυριοτέρων από τα σημερινά ενεργειακά καύσιμα.**

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

\* Το βάρος κάθε καυσίμου αποτελεί το καθαρό βάρος αυτού, χωρίς τον συμψηφισμό κάποιου άλλου βάρους που προστίθεται στο συνολικό του βάρος (π.χ. βάρος εξοπλισμού για την αποθήκευσή του κ.τ.λ.).

### Ασφάλεια Εφοδιασμού

Τα περισσότερα καύσιμα έχουν υψηλή ενεργειακή περιεκτικότητα και απαιτείται ασφαλής χειρισμός τους. Το υδρογόνο δεν θεωρείται ούτε λιγότερο ούτε περισσότερο επικίνδυνο συγκριτικά με τα συμβατικά καύσιμα. Άλλωστε, ο σωστός και ασφαλής χειρισμός ενός καυσίμου εξαρτάται από την καλή γνώση των φυσικών, χημικών και θερμικών του ιδιοτήτων, οπότε διαθέτοντας τις γνώσεις αυτές και ο χειρισμός του υδρογόνου ως καύσιμο μπορεί να επιτευχθεί με ασφάλεια. Σύμφωνα με μελέτες που έχουν διεξαχθεί, χαρακτηρίζοντας με έναν συντελεστή ασφαλείας τα καύσιμα ανά ιδιότητά τους, το υδρογόνο κατατάσσεται ως το πιο ασφαλές καύσιμο. Τονίζεται ότι τα επίπεδα ασφαλείας ενός

καυσίμου καθορίζονται από την τοξικότητά τους, αλλά και τους κινδύνους πυρκαγιάς (επίπεδα ανάφλεξης).

Γενικότερα, τα καύσιμα από μόνα τους είναι τοξικά. Η τοξικότητά τους αυξάνεται, καθώς ο λόγος άνθρακα / υδρογόνου αυξάνεται. Το υδρογόνο, καθώς και τα κύρια προϊόντα της καύσης του, όπως το νερό ή οι υδρατμοί, δεν είναι τοξικά. Ωστόσο, οξείδια του αζώτου μπορεί να παραχθούν από την καύση του με τον αέρα (λόγω της παρουσίας του αζώτου στον ατμοσφαιρικό αέρα), τα οποία παρουσιάζουν τοξικότητα, όπως συμβαίνει και με τα συμβατικά καύσιμα. Η διαφορά όμως με τα συμβατικά καύσιμα έγκειται στο ότι οι ποσότητες των οξειδίων του αζώτου είναι πολύ μικρές, ακόμα και για μαζική κατανάλωση του υδρογόνου, οπότε δεν θα επηρεάσουν σημαντικά το γήινο περιβάλλον.

Το υδρογόνο είναι το ίδιο ακίνδυνο από πλευράς αυθόρμητης ανάφλεξης, σε σχέση με τα υπόλοιπα συμβατικά ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται σήμερα (π.χ. βενζίνη, πετρέλαιο, φυσικό αέριο κ.τ.λ.). Μάλιστα, κατά την απουσία ατμοσφαιρικού αέρα και υπό συνήθεις συνθήκες περιβάλλοντος ( $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $P=1\text{atm}$ ), το υδρογόνο είναι λιγότερο εύφλεκτο από αυτά, έχοντας για θερμοκρασία αυθόρμητης ανάφλεξής του τους  $585\text{ }^{\circ}\text{C}$  (αντίστοιχη θερμοκρασία αυθόρμητης ανάφλεξης της βενζίνης, απουσία ατμοσφαιρικού αέρα:  $230\text{ }^{\circ}\text{C} \div 480\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

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

### **Ενεργειακή ανεξαρτησία**

Το υδρογόνο μπορεί να βοηθήσει πολλά κράτη που είναι “φτωχά” σε διαθέσιμα κοιτάσματα ορυκτών καυσίμων να αναπτύξουν τα δικά τους αυτόνομα και ολοκληρωμένα ενεργειακά συστήματα. Μέσω της τεχνολογίας του υδρογόνου τα κράτη αυτά, που ως γνωστόν είναι και τα πολυπληθέστερα πάνω στον πλανήτη, θα μπορέσουν να αναπτύξουν τις δικές τους αυτόνομες ενεργειακές οικονομίες, ξεφεύγοντας από τον φαύλο κύκλο της ενεργειακής τους εξάρτησης από άλλα κράτη – προμηθευτές τους σε ορυκτά καύσιμα.

Επιπρόσθετα, στα πλαίσια της ενεργειακής ανεξαρτησίας που προσφέρει το υδρογόνο ως καύσιμο, ανήκει και η υψηλή αυτονομία και αυτοδιαχείριση που προσφέρει όταν καταναλώνεται στα πλαίσια ενός ενεργειακού συστήματος. Η υψηλή αυτή αυτονομία και αυτοδιαχείριση συντελεί στο να προφυλάσσεται ικανοποιητικά το σύστημα αυτό, όταν στο δίκτυό του συμβούν διάφορες καταστροφές λόγω δυσμενών

γεγονότων (π.χ. πυρκαγιές, πλημμύρες, σεισμοί κ.α.). Έτσι, η διακοπή της λειτουργίας μερικών τμημάτων του δεν έχει οπωσδήποτε σαν αποτέλεσμα την καθολική του κατάρρευση, μιας και τα διάφορα τμήματα που το αποτελούν είναι λίγο ή περισσότερο ανεξάρτητα το ένα με το άλλο.

## **6.2 Στατικές εφαρμογές παραγωγής ισχύος**

Οι εφαρμογές κυψέλων καυσίμου σε στατικά συστήματα παραγωγής ενέργειας περιλαμβάνουν παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας σε απομακρυσμένες τοποθεσίες, με εφαρμογές στις τηλεπικοινωνίες, σε εμπορικές και οικιστικές εφαρμογές σε κτίρια, σε εφεδρικά συστήματα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και βοηθητικές μονάδες ισχύος με ατομικό μέγεθος μονάδας που κυμαίνεται από 3 kW έως 350 kW. Τα τέσσερα είδη κυψελών καυσίμου που εξετάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, εφαρμόζονται σε διαφορετική κλίμακα σε στατικές εφαρμογές.

## **6.3 Εφαρμογές ΚΚ τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC)**

Οι ΚΚ αυτού του τύπου έχουν τις υψηλότερες αποδόσεις και δεν υπόκεινται στους περιορισμούς των υλικών των άλλων τύπων κελιών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας. Οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικού άλατος αναπτύσσονται σήμερα για χρήσεις με πρώτη ύλη το φυσικό αέριο και τον άνθρακα σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις υποδομής στην βιομηχανία, και τις στρατιωτικές εφαρμογές. Τα MCFCs είναι ΚΚ υψηλής θερμοκρασίας που χρησιμοποιούν έναν ηλεκτρολύτη που αποτελείται από μείγμα τηγμένου ανθρακικού άλατος διεσπαρμένο σε μία πορώδη, χημικώς αδρανή κεραμική μήτρα στερεού ηλεκτρολύτη β-αλούμινας. Δεδομένου ότι λειτουργούν σε θερμοκρασίες από 650°C και άνω, μπορούν να χρησιμοποιούνται ως καταλύτες της ανόδου και καθόδου μη-πολύτιμα μέταλλα, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του κόστους. Η ΚΚ τήγματος ανθρακικών αλάτων μπορεί να φθάσει αποδόσεις που προσεγγίζουν το 60%. Αυτό είναι σημαντικά υψηλότερο από το 37-42% της αποτελεσματικότητας των κελιών φωσφορικού οξέος. Όταν μάλιστα αξιοποιηθεί η θερμότητα των αποβλήτων, η συνολική απόδοση των καυσίμων μπορεί να φθάσει το 85%. Το πρωταρχικό μειονέκτημα της τρέχουσας τεχνολογίας ΚΚ τήγματος ανθρακικών αλάτων είναι η αντοχή. Η υψηλή θερμοκρασία στην οποία λειτουργούν αυτά τα κελιά και ο διαβρωτικός ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται επιταχύνει τη

διάλυση και τη διάβρωση των στοιχείων, που τα αποτελούν και οδηγεί στη μείωση της ζωής των κελιών (Adamson *et al.*, 2006).

## **6.4 Εφαρμογές ΚΚ φωσφορικού οξέος**

Οι κυψέλες αυτές κάνουν χρήση του υγρού φωσφορικού οξέος ως ηλεκτρολύτη και ανθρακούχο χαρτί επικαλυμμένο με καταλύτη λευκόχρυσου σε λεπτή διασπορά ως ηλεκτρόδιο. Οι ΚΚ φωσφορικού οξέος δεν είναι ευαίσθητες στις ακαθαρσίες στη ροή υδρογόνου. Ωστόσο, το φωσφορικό οξύ στερεοποιείται στους 40°C, καθιστώντας την εκκίνηση πολύ δύσκολη σε συνθήκες περιβάλλοντος. Οι ΚΚ αυτού του τύπου λειτουργούν στην περιοχή από 150°C έως 200°C, οπότε το παραγόμενο νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη και θερμικών αναγκών (συμπαράγωγή). Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος που έχουν χρησιμοποιηθεί για στατικές εφαρμογές με συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας φτάνουν αποδόσεις της τάξης του 80%, και για το λόγο αυτό κυριαρχούν στην αγορά στατικών εφαρμογών κυψελών καυσίμου.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, μεγάλος παραγωγός της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου Φωσφορικού οξέος είναι η UTC Fuel Cells, η οποία έχει εγκαταστήσει περί τις 300 μονάδες των 200 kW (τύπου "PureCell") για παροχή ενέργειας υποδομών σε παγκόσμιο επίπεδο. Το αρνητικό χαρακτηριστικό των κυψελών καυσίμου φωσφορικού οξέος είναι ότι απαιτείται αντικατάσταση της συστοιχίας των κελιών και του αναμορφωτή καυσίμου κάθε πέντε χρόνια. Ως εκ τούτου, η τρέχουσα ανάπτυξη επικεντρώνεται στην αύξηση της διάρκειας των εξαρτημάτων και τη βελτίωση του κόστους (Adamson *et al.*, 2006).

## **6.5 Εφαρμογές ΚΚ στερεού οξειδίου**

Αυτός ο τύπος αναπτύσσεται από πολλές εταιρείες. Για παράδειγμα, η GE Energy αναπτύσσει ένα σύστημα υβριδικής κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου υψηλής ισχύος σε συνδυασμό με αεριοστρόβιλους που λειτουργεί με ανθρακικά καύσιμα. Η οικοδόμηση μιας μεγάλης μονάδας κυψελών καυσίμου της κατηγορίας ισχύος των πολλών MW είναι πολύ πιο δύσκολη λόγω των περιορισμένων δεδομένων και μετρήσεων και της ραγδαίας αύξησης του κόστους των πόρων που απαιτούνται για την έναρξη λειτουργίας.

## **6.6 Εφαρμογές ΚΚ πολυμερικής μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων**

Η τεχνολογία αυτή έχει περιορισμένη δημοτικότητα στην αγορά στατικών εφαρμογών λόγω της ανάγκης για καθαρό υδρογόνο. Ωστόσο, η έρευνα για συστήματα ΚΚ πολυμερικής μεμβράνης εστιάζεται στην αναμόρφωση καυσίμων υδρογονάνθρακα ή άλλου φορέα για την παραγωγή υδρογόνου για εφαρμογές κλίμακας της τάξης των 50 kW. Η εν λόγω διαδικασία είναι σε θέση να μετατρέψει μια πληθώρα καυσίμων σε υδρογόνο, συμπεριλαμβανομένου του φυσικού αερίου, προπανίου, κηροζίνης, JP-8, του βιοντίζελ, και άλλων καύσιμα με βάση την αλκοόλη.

Το 2005, η μεγαλύτερη εγκατάσταση κυψελών καυσίμου αναπτύχθηκε για μια εγκατάσταση επικοινωνιών (Verizon), η οποία παράγει 1,4 MW της πρωτογενούς ηλεκτρικής ενέργειας και 30.000 kWh χρησιμοποιήσιμης θερμότητας. Με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από τις κυψέλες καυσίμου και την ανάκτηση της θερμότητας και του νερού για τη χρήση στο κτίριο, η Verizon καταργεί έως και 50.000 τόνων διοξειδίου του άνθρακα που θα εκπέμποντο στην ατμόσφαιρα από μια παρόμοιου μεγέθους εγκατάσταση που θα παρήγαγε την ενέργεια με βάση τα ορυκτά καύσιμα κατά τη διάρκεια ενός έτους.

## **6.7 Υβριδικά συστήματα ΚΚ και στροβίλων φυσικού αερίου**

Ο συνδυασμός κυψελών καυσίμου και αεριοστροβίλων αυξάνει την αποτελεσματικότητα των μεγάλων σταθμών παραγωγής ισχύος. Η ανάκτηση της θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας των ΚΚ από τους στροβίλους μπορεί να οδηγήσει σε ηλεκτρική απόδοση άνω του 70% και σημαντικό μικρότερο κόστος της παραγόμενης ενέργειας. Ενδεικτικά μπορεί να αναφερθεί, ότι η FuelCell Energy αναπτύσσει μια τεχνολογία που ονομάζεται DFC/T, που απαρτίζεται από ΚΚ και στρόβιλο. Το σύστημα συνδέεται απευθείας στο δίκτυο φυσικού αερίου και μπορεί να φτάσει σε βαθμό ηλεκτρικής απόδοσης της τάξης του 80%. Με το συνδυασμό αυτό η κυψέλη καυσίμου να είναι υπεύθυνη για την παραγωγή περίπου των τεσσάρων πέμπτων της ενέργειας, ενώ η τουρμπίνα παράγει το ένα πέμπτο. Η τουρμπίνα ανακτά επίσης τα τη

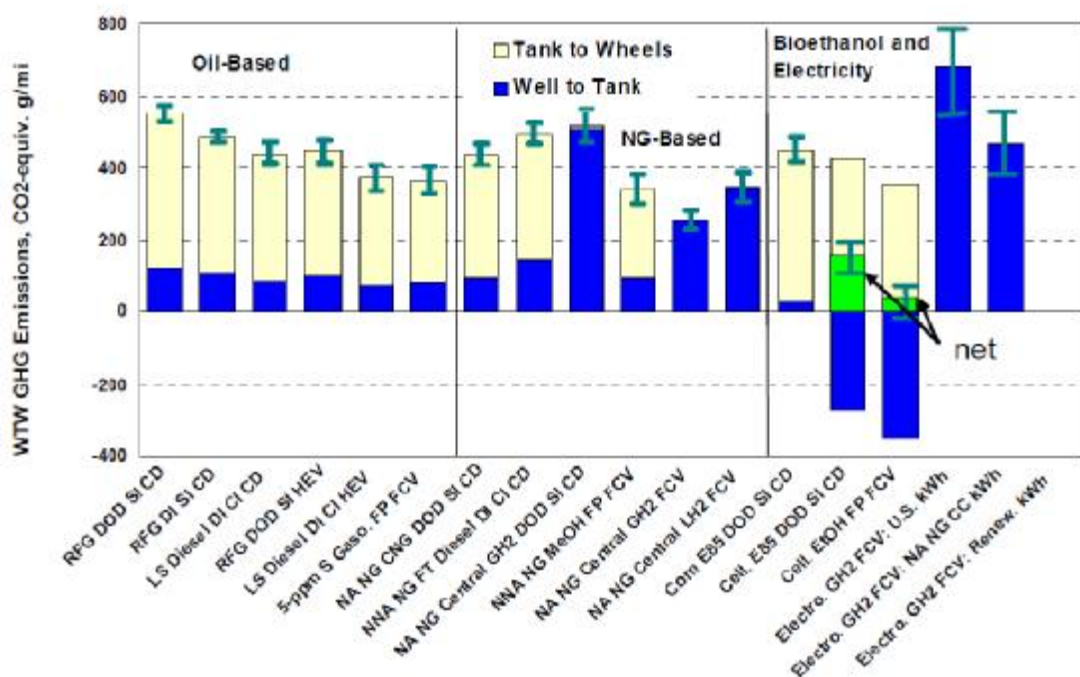
θερμικά φορτία απόρριψης και ανατροφοδοτεί τον αέρα για την κυψέλη καυσίμου.

Αν και η πλειονότητα των εγκαταστάσεων κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούν φυσικό αέριο, αυξάνεται ο αριθμός των μονάδων που κινούνται με εναλλακτικά καύσιμα, όπως το αέριο άνθρακος, φυσικό αέριο αναερόβιας χώνευσης, και αεριοποιημένα οργανικά απόβλητα και απόβλητα από πλαστικά.

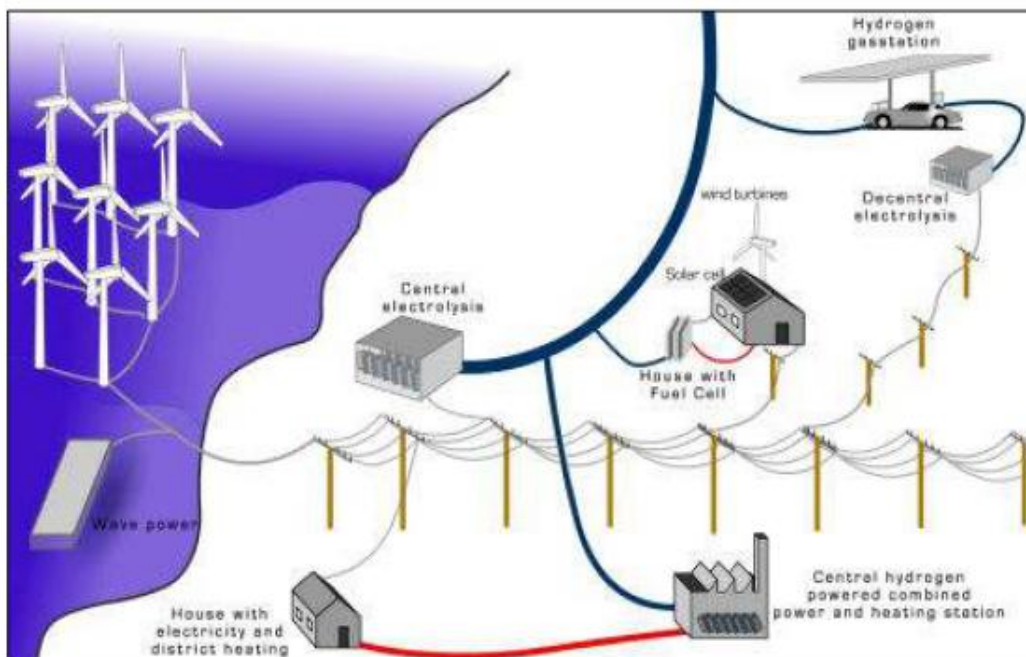
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>

### 7.1 Παραγωγή και διανομή καυσίμου (Well-to-Tank)

Από την άποψη της συνολικής χρήσης ενέργειας, το diesel, η βενζίνη και το φυσικό αέριο εμφανίζουν τις χαμηλότερες ενεργειακές ανάγκες για την επεξεργασία τους και τη διανομή μέχρι το τεπόζιτο. Αντίθετα, το υδροποιημένο υδρογόνο έχει υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις (περίπου 10-πλάσιες από ένα συμβατικό όχημα diesel). Αντίστοιχα, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για την παραγωγή H<sub>2</sub> εξαρτώνται από το συνδυασμό καυσίμων που χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροπαραγωγή. Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόλυση για την παραγωγή φυσικού αερίου υδρογόνου ελαχιστοποιούνται οι εκπομπές μόνο σε περίπτωση που κατά τη διαδικασία της παραγωγής χρησιμοποιούνται πυρηνική ενέργεια ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Διαφορετικά (π.χ. με τη χρήση λιγνίτη) οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι ιδιαίτερα αυξημένες. Ακόμα και αν το υδρογόνο προέρχεται από φυσικό αέριο, τότε οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατά την παραγωγή του καυσίμου είναι περίπου οκταπλάσιες από ότι η παραγωγή συμβατικού diesel. Το σχήμα 14, εμφανίζει μια συγκριτική επίπτωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από διαφορετικές πηγές πρωτογενούς ενέργειας και τεχνολογιών οχημάτων.



Σχήμα 20: Σύγκριση αερίων well-to-wheel αερίων θερμοκηπίου για διάφορους συνδυασμούς πρωτογενών πηγών και τεχνολογιών οχημάτων.



Σχήμα 21 : «Κεντροποιημένη» διανομή του υδρογόνου

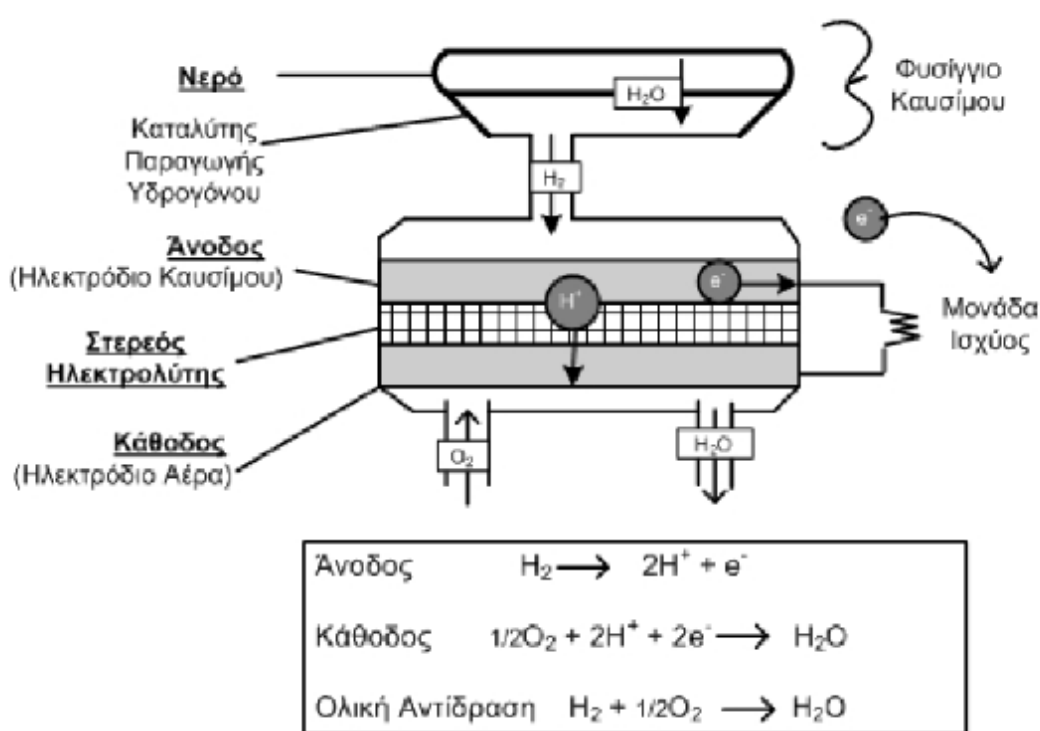
## 7.2 Μικροσυστήματα παραγωγής ενέργειας

Σε σύγκριση με τις υπάρχουσες μπαταρίες, η υιοθέτηση των φορητών κυψελών καυσίμου έχει εγγυημένη υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και μεγάλους χρόνους λειτουργίας, μεγάλο αριθμό κύκλων επαναφόρτισης, και λιγότερη μόλυνση του περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της ανακύκλωσης. Σήμερα τεχνολογίες ΚΚ για χρήση ως μικροπηγών ενέργειας είναι κυψέλες απευθείας χρήσης μεθανόλης και μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. Τέτοια συστήματα μπορούν να βρουν εφαρμογή ως ηλεκτρονικές συσκευές και συσκευές επικοινωνίας, π.χ. ψηφιακές κάμερες, κινητά τηλέφωνα, φορητοί υπολογιστές, ραδιόφωνα και φορητές τηλεοράσεις, κλπ.

Οι ιαπωνικές εταιρείες DoCoMo και Aquafairy, προτείνουν μικροσυστήματα κυψελών καυσίμου με τροφοδοσία από νερό. Η λειτουργία του κελιού καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης για το σκοπό αυτό φαίνεται στο σχήμα 15. Η δεξιά πλευρά δείχνει το τυπικό κελί καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης που λειτουργεί με ένα φυσίγγιο καυσίμων. Το φυσίγγιο περιέχει ένα καταλύτη για την παραγωγή υδρογόνου. Αέριο υδρογόνο που παράγεται από το φυσίγγιο παρέχεται στο διαμέρισμα της ανόδου του κελιού καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης. Το οξυγόνο



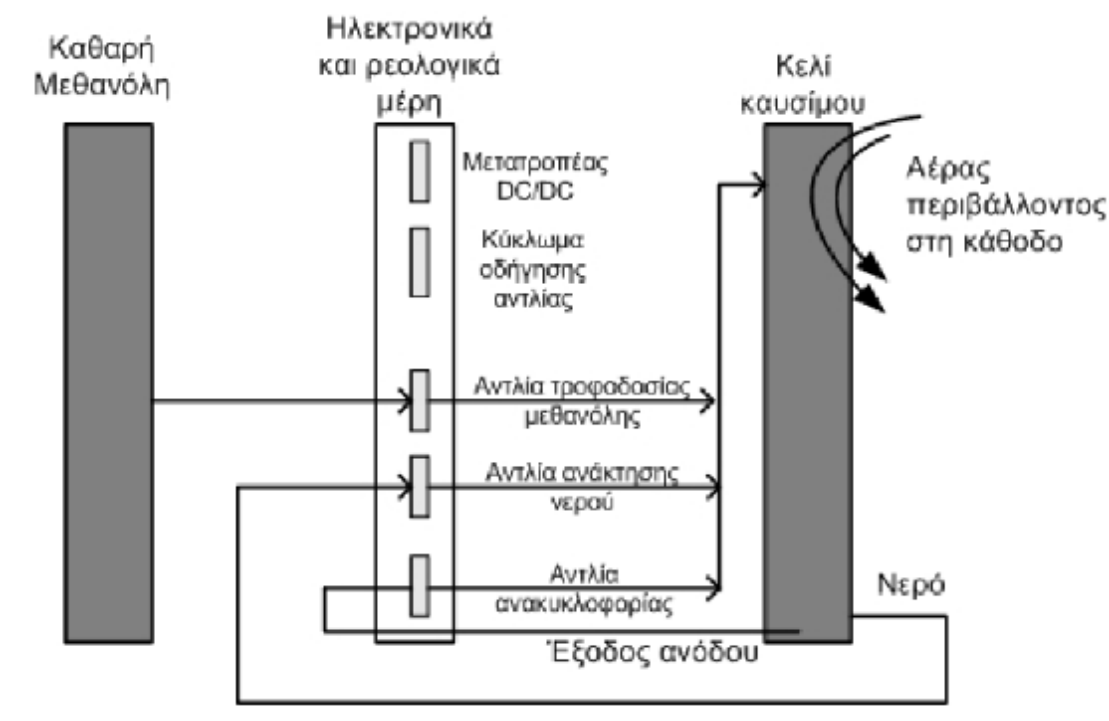
προέρχεται από τον αέρα και διατίθεται στην κάθοδο. Η ενέργεια που παράγεται από το κελί προσφέρεται για την τροφοδοσία για ένα κινητό τηλέφωνο ή laptop. Το σχήμα 15, δείχνει τα τμήματα αυτής τη κυψέλη καυσίμου και τις αντίστοιχες αντιδράσεις. Η πάνω πλευρά δείχνει την περιγραφή της κασέτας. Η ισχύς του φορητού αυτού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι περίπου 2 Watt. Με την προσθήκη του φυσιγγίου μπορεί να φορτιστεί η συσκευή αρκετές φορές με προσθήκη νερού. Ο χρόνος επαναφόρτισης είναι περίπου η ίδιος με αυτόν μιας μπαταρίας.



Σχήμα 22 : Συσκευή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από νερό.

Οι πολύ μικρές διαστάσεις είναι ένα πολύ θετικό στοιχείο των μικροσυστημάτων ενέργειας με κυψέλες καυσίμου. Το σύστημα της Toshiba με κυψέλη καυσίμου άμεσης παραγωγής από μεθανόλη (DMFC), πιστοποιήθηκε το 2005 ως το μικρότερο σύστημα παραγωγής ενέργειας από το Guinness Book of World Records. Έχει σχεδιαστεί για ενσωμάτωση σε μικροσυσκευές, όπως π.χ. για MP3 USB players. Είναι μια συσκευή συμπαγής με διαστάσεις 22×56×4,5 mm και βάρος 8,5 g. Μια σχηματική παράσταση τέτοιας συσκευής εμφανίζεται στο σχήμα 16. Άλλα παραδείγματα μικροσυσκευών αποτελούν συστήματα απευθείας

μεθανόλης της εταιρείας Motorola (20 W), της MTI Micro Fuel Cells και της Medis Technologies.



Σχήμα 23: Ολοκληρωμένη συσκευή ενέργειας με βάση κυψέλη καυσίμου που τροφοδοτείται με μεθανόλη.

### 7.3 Οικιακά συστήματα ενέργειας

Η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου επιτρέπει το σχεδιασμό και την κατασκευή τους για μονάδες ισχύος διαφόρων μεγεθών. Για οικιακές εφαρμογές, η βιομηχανία βρίσκεται στο στάδιο της ανάπτυξης μικρών σταθερών μονάδων ονομαστικής ισχύος μικρότερης των 10 kW, με χρήση κυψελών καυσίμου τεχνολογίας στερεών οξειδίων (SOFC) ή πολυμερικής μεμβράνης. Η πλειοψηφία των μονάδων είναι της τάξης του 1 kW, και χρησιμοποιούνται για να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια για οικιακές συσκευές και παραγωγή ζεστού νερού. Μεγαλύτερες μονάδες, της τάξης των 5 kW, χρησιμοποιούνται για να παρέχουν συνεχή ισχύ σε νοικοκυριά με μικρές περιόδους αιχμής της ζήτησης που καλύπτονται από το δίκτυο. Οι περισσότερες από αυτές τις μονάδες αναπτύσσονται ώστε να λειτουργούν με φυσικό αέριο, προπάνιο ή υγραέριο (LPG). Η τρέχουσα τάση είναι να προσαρμοστούν και για χρήση της βιομάζας. Ως

παράδειγμα, στις Ηνωμένες Πολιτείες το σύστημα κυψελών καυσίμου GenCore προσφέρεται για συστήματα ισχύος συνεχούς παραγωγής εκτός δικτύου από την Plug Power, ενώ είναι διαθέσιμα για οικιακή χρήση και ως πηγή εφεδρικής ισχύος. Τα GenCore παραδίδουν μέχρι 5 kW ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα ευρύ φάσμα λειτουργίας.

## **7.4 Τα Πλεονεκτήματα και οι Στρατηγικές της Ανάπτυξης του Υδρογόνου**

Όταν αυτοί οι μύθοι διαλύονται, μπορούμε να δούμε καθαρά τα πλεονεκτήματα της ενέργειας του υδρογόνου, όπως και τα οικονομικά οφέλη που υπόσχεται. «Το υδρογόνο θα μπορούσε να αποτελέσει τμήμα της επιχειρηματικής στρατηγικής και μια ατμομηχανή της παγκόσμιας οικονομικής ανάπτυξης μέσα στην δεκαετία που διανύουμε, όπως και σημαντική κληρονομιά στις γενιές του 21<sup>ου</sup> αιώνα», συμπέραναν στο άρθρο τους στο περιοδικό *The Futurist* το 2005, οι Julian Gresser και James Cusumano. Είναι πασίγνωστο ότι πάντα στις κρίσιμες ως προς την εξέλιξη στιγμές στην ιστορία, συγκεκριμένες βιομηχανίες έκαναν τεχνολογικές επαναστάσεις που αποτελούσαν το κλειδί για μια μετέπειτα ευρύτατη οικονομική ανάπτυξη και πρόοδο. Τα γνωστά παραδείγματα της σύγκλισης των κρίσιμων τεχνολογιών και αστραπιαίας ανάπτυξης περιλαμβάνουν, για παράδειγμα, τα κανάλια και τους σιδηρόδρομους στην Αγγλία του 17<sup>ου</sup> και 18<sup>ου</sup> αιώνα. Κάτι, ακόμη πιο πρόσφατο, είναι η σύγκλιση του σκληρού δίσκου των υπολογιστών και των λογισμικών τους με την τεχνολογία του Internet στην Αμερική στα τέλη του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Εξαιτίας των εκπληκτικών πλεονεκτημάτων που πραγματοποιήθηκαν μέσω της επιτυχίας της στρατηγικής των νέων τεχνολογιών και βιομηχανιών, οι κυβερνήσεις συνήθως έπαιξαν ένα κρίσιμο ρόλο στο να επιταχύνουν την ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών.

Η Καλιφόρνια ήδη πήρε τα ηνία της πρωτοπορίας στην υλοποίηση ενός «Hydrogen Highway Network Action Plan», για να κατασκευαστούν 150-200 σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου, που θα βρίσκονται κάθε 20 μίλια ο ένας απ' τον άλλο σ' όλους τους μεγάλους αυτοκινητόδρομους της Καλιφόρνιας. Παρομοίως η κυβέρνηση της πολιτείας της Φλόριντα ξεκίνησε ένα καινοτόμο πρόγραμμα που προωθεί το υδρογόνο ως ένα τμήμα στρατηγικής για την ανάπτυξη. Αντιλήφθηκαν επίσης ότι υπάρχει μια μεγάλη συμμαχία ανάμεσα σε ιδιωτικές εταιρίες, σε τοπικές κυβερνήσεις, πανεπιστήμια και περιβαλλοντολογικές ομάδες. Η Στρατηγική του Υδρογόνου της Φλόριντα αρχικά εστιάζεται στο καύσιμο του υδρογόνου (που είναι μια από τα τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας), στους αποθηκευτικούς χώρους υδρογόνου, όπως και στη βελτιστοποίηση

του ενεργειακού συστήματος. Η στρατηγική αυτή προσφέρει επιστροφή των φόρων, επενδυτικά δάνεια, παρουσιάσεις των κινήτρων και της ασφάλειας της επένδυσης στην επιχείρηση αυτή. Η Ιαπωνία, η Γερμανία, ο Καναδάς και η Ισλανδία έχουν τα μεγαλύτερα προγράμματα υδρογόνου που είναι ήδη σε εξέλιξη. Οι ηγέτες αυτών των χωρών αντιλαμβάνονται ότι στη συνέχεια αυτής της ανεξαρτητοποίησης από τη βενζίνη, η γρήγορη ανάπτυξη της βιομηχανίας που βασίζεται στο υδρογόνο, θα επιταχύνει και τις καινοτομίες σε άλλα σχετικά τμήματα όπως βιοτεχνολογία, τα φωτοβολταϊκά συστήματα, στην ανάπτυξη των άκρως ελαφρών υλικών (ultra-light materials) όπως και νάνο-υλικών (nano-materials).

Εξαιτίας της έντονης ενεργειακής και κλιματολογικής κρίσης είναι απαραίτητη μια ευρεία πολιτική ομοφωνία σχετικά με τη στρατηγική της μετάβασης από τα ορυκτά καύσιμα στην οικονομία του υδρογόνου. Αυτή η στρατηγική θα εφαρμόζει ρυθμιστικές, οικονομικές και άλλες ως προς την αγορά προσανατολισμένες καινοτομίες, ενώ θα βασίζεται στις καλύτερες υπάρχουσες τεχνολογίες. Κάτω από την ηγεσία του National Hydrogen Task Force, οι πολιτικοί ηγέτες στην Αμερική και παντού θα έπρεπε να ενώσουν όλες τις επιστημονικές δυνάμεις της χώρας τους και να μαζέψουν τους ειδικούς πάνω στις τεχνολογίες υδρογόνου – μηχανικούς και εφευρέτες– μαζί με τους κορυφαίους περιβαλλοντολόγους, δικηγόρους, ειδικούς οικονομολόγους, και ειδικούς σε ιδιωτικές επιχειρήσεις.

Η αποστολή τους θα έπρεπε να είναι η ανάπτυξη του SHARE: Strategic Hydrogen Alliance Reform and Enterprise Act (Στρατηγική της Μεταρρύθμισης και της Συμμαχίας Υδρογόνου και Επιχειρηματικής Δράσης), που θα δημιουργήσει ένα νομοθετημένο πλαίσιο εργασίας για την επιτάχυνση της ανάπτυξης της οικονομίας του υδρογόνου με το βαθμό της επείγουσας ανάγκης, που συνοδεύουν μια χώρα που βιώνει πόλεμο ή φυσική καταστροφή.

Καμία άλλη ενέργεια δεν είναι τόσο καθαρή, φιλική προς το περιβάλλον και τεχνολογικά εφικτή.

Το υδρογόνο δεν συνεισφέρει στην υπερθέρμανση του πλανήτη μας. Ενώ το υδρογόνο είναι ακόμη ακριβό για να παραχθεί, όταν συνδυαστεί με fuel-cell technology, είναι οικονομικά βιώσιμο ακόμη και με τιμές του πετρελαίου κοντά στα 60 δολάρια το βαρέλι.

Η οικονομία του υδρογόνου θα επιτρέψει στην Αμερική και στη Δύση γενικότερα να αποκτήσει μια ενεργειακή ελευθερία μεγάλης διάρκειας και ανεξαρτησία από τα εισαγόμενα πετρέλαια.

Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρέχει τη κινητήρια δύναμη για οποιουδήποτε μηχανισμούς, ακόμη και σε ακίνητες εφαρμογές (σπίτια και γραφεία) ή σε κινητές εφαρμογές (αυτοκίνητα και φορτηγά).

Μακροπρόθεσμα, το καύσιμο του υδρογόνου μπορεί να αντικαταστήσει τη μηχανή εσωτερικής καύσης για να οδηγήσει έτσι σε οικονομική αναγέννηση τις βιομηχανικές περιοχές.

Το υδρογόνο μπορεί να δημιουργηθεί από το φυσικό αέριο και τελικά από το νερό, μέσω ενός τοπικού, αποκεντρωμένου ενεργειακού συστήματος, αποκλείοντας το κόστος και το ρίσκο της διανομής καυσίμου, πράγμα που συνδέεται με τα ορυκτά καύσιμα και πυρηνική ενέργεια.

Τελικά, ως μια ανεξάντλητη πηγή καθαρής ενέργειας, το υδρογόνο θα εμπλουτίσει την ανθρώπινη υγεία, θα προστατέψει το περιβάλλον και θα αυξήσει την ενεργειακή ισότητα.

## **7.5 Προβληματισμοί για τη χρήση του υδρογόνου ως ενεργειακό καύσιμο**

Γενικότερος προβληματισμός για τη χρήση του υδρογόνου ως ενεργειακό καύσιμο στο μέλλον αποτελεί η αποθήκευση και η διανομή του προς τους καταναλωτές.

### **Πρόβλημα Αποθήκευσης**

Το υδρογόνο είναι ιδιαίτερα πτητικό, γεγονός που δυσχεραίνει την αποθήκευσή του μιας και διαρρέει πολύ εύκολα. Ακόμα, δεδομένου ότι είναι ένα στοιχείο που σε αέρια κατάσταση είναι πολύ ελαφρύ, η συμπίεση μεγάλης ποσότητάς του σε πολύ μικρού μεγέθους δεξαμενές είναι ακόμα αρκετά δύσκολη, εξαιτίας των υψηλών πιέσεων που χρειάζονται γι' αυτό (ή αντίστοιχα εξαιτίας των πολύ χαμηλών θερμοκρασιών που χρειάζονται για την αποθήκευσή του σαν υγρό).

Εκτός από αυτό, οι ακραίες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που απαιτούνται για την αέρια ή την υγρή του αποθήκευση συνεπάγονται και την κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας για την επίτευξή τους, με αποτέλεσμα η αέρια ή η υγρή αποθήκευση του υδρογόνου να είναι αρκετά δαπανηρή σαν μέθοδος αποθήκευσής του.

Η έρευνα που γίνεται αναφορικά με την αποθήκευση του υδρογόνου έχει στραφεί προς νέες τεχνικές μεθόδους, οι οποίες έχουν σαν πεδίο αναφοράς τους την αποθήκευσή του σε νανοδομημένα υλικά (αύξηση της ποσότητας αποθήκευσής του) και την δέσμευσή του από στερεά υλικά τα οποία το αποθηκεύουν στη μάζα τους με τη μορφή “στερεού”

(προσροφημένο ή απορροφημένο μεταξύ των στερεών τους μορίων). Η “στερεή” αποθήκευση του υδρογόνου στα συγκεκριμένα υλικά έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνονται δραματικά οι ακραίες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που απαιτούνται κατά την αποθήκευσή του σαν υγρό ή σαν αέριο.

### **Πρόβλημα Διανομής**

Όσον αφορά στη διανομή του υδρογόνου, θα πρέπει να υπάρχει εύκολος, ασφαλής και οικονομικός τρόπος πρόσβασης των καταναλωτών στο καύσιμο. Η μετάβαση από ένα επί σειράς ετών σύστημα ενέργειας που βασίζεται κυρίως στο πετρέλαιο και τα παράγωγά του, σε ένα που θα γίνεται χρήση υδρογόνου απαιτεί χρόνο και δαπανηρά βήματα από κυβερνήσεις, παραγωγούς και καταναλωτές ενέργειας. Προς το παρόν, το παγκόσμιο δίκτυο διανομής του υδρογόνου δεν υφίσταται, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μαζική κλίμακα και από όλες τις χώρες του κόσμου. Μελλοντικά, στον τομέα των μεταφορών θα πρέπει να υπάρχει στους δρόμους μεγάλος αριθμός σταθμών ανεφοδιασμού, ενώ οι καταναλωτές θα πρέπει να ευθυγραμμιστούν με τις καινούριες απαιτήσεις ως προς την ασφάλεια χρήσης.

Επιπρόσθετα, λόγω της ανυπαρξίας του δικτύου διανομής του, το κόστος ανεφοδιασμού του υδρογόνου σε παγκόσμια κλίμακα παραμένει ακόμα υψηλό, μιας και οι διάφορες τεχνολογίες παραγωγής του μέσω ΑΠΕ δεν έχουν εξελιχθεί ακόμα σε ικανοποιητικό βαθμό. Το γεγονός όμως αυτό αναμένεται να αλλάξει στο μέλλον, όσο η κατανάλωσή του σαν καύσιμο θα αρχίσει να αυξάνεται και όσο η παραγωγή του από ΑΠΕ θα γίνεται όλο και περισσότερο φθηνότερη.

### **Αυξημένο Κόστος Ενεργειακών Διατάξεων**

Ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζει σήμερα το υδρογόνο σαν καύσιμο μαζικής παραγωγής ενέργειας, είναι το αυξημένο κόστος των διαφόρων ενεργειακών διατάξεων που χρησιμοποιούνται για την αξιοποίησή του σαν καύσιμο (των κυψελών καυσίμου και των ΜΕΚ υδρογόνου). Η τεχνολογία των διατάξεων αυτών, προς το παρόν, δε μπορεί ακόμα να θεωρηθεί ολοκληρωτικά αξιόπιστη, μιας και κατά την εφαρμογή τους παρουσιάζονται ορισμένα τεχνικής και οικονομικής φύσης προβλήματα που δεν καθιστούν ικανή τη μαζική χρησιμοποίησή τους.

### **Οικονομία του υδρογόνου – Εφαρμογές τεχνολογίας του υδρογόνου στην Ελλάδα.**

Οι μέχρι σήμερα υπάρχουσες τεχνικές δυσχέρειας, αλλά και το σχετικό κόστος σε όλα τα επίπεδα της παραγωγής, διανομής, αποθήκευσης, υποδομής και ασφάλειας θέτουν την εποχή μετάβασης του υδρογόνου σε μακρινό ορίζοντα. Πρέπει να βελτιωθούν τα υλικά, τα κατασκευαστικά στοιχεία, οι επιδόσεις των τεχνολογιών υδρογόνου και ο σχεδιασμός των συστημάτων, ενώ δεν πρέπει να παραμεληθούν οι κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις που μπορεί να προκληθούν από την αντίστοιχη τεχνολογία.

Η υιοθέτηση δηλαδή του υδρογόνου ως βασικού ενεργειακού μέσου στο μέλλον προϋποθέτει την ριζική μεταστροφή της παγκόσμιας ενεργειακής οικονομίας σε έναν καινούργιο και διαφορετικό τρόπο λειτουργίας της, ο οποίος θα βασίζεται κατά κύριο λόγο σ' αυτό και στις διάφορες τεχνολογίες του. Η νέα αυτή μορφή, χαρακτηρίζεται σήμερα από τους επιστήμονες που ασχολούνται με την τεχνολογία του σαν παγκόσμια "Οικονομία του Υδρογόνου".

Παρόλο, όμως, τους προβληματισμούς και τις δυσκολίες που παρουσιάζει η παραγωγή και χρήση του υδρογόνου, η διορατικότητα κρατών και οργανισμών για τη μελλοντική καθιέρωσή του το έχουν ήδη κατατάξει σε ανταγωνιστικό καθεστώς. Σήμερα, κονδύλια και έρευνες διατίθενται και διεξάγονται από διάφορα κράτη και οργανισμούς για τη μελλοντική καθιέρωση του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα στους διάφορους τομείς της βιομηχανίας, των μεταφορών και της οικιακής χρήσης.

Στην Ελλάδα, αυτή τη στιγμή αρκετά ερευνητικά εργαστήρια ασχολούνται με την τεχνολογία της παραγωγής και χρήσης του υδρογόνου ως ενεργειακό καύσιμο, ενώ γίνεται μια Εθνική προσπάθεια με συνεργασία πανεπιστημίων, ινστιτούτων και φορέων για την δημιουργία του Ελληνικού Νησιού, ΑΠΕ-Υδρογόνου "H2ellenic Island", το οποίο θα καλύπτει πολλές από τις ενεργειακές του ανάγκες με H<sub>2</sub> παραγόμενο από ΑΠΕ (Η Μήλος αποτελεί το υποψήφιο Ελληνικό Νησί H<sub>2</sub>, μετά από ενημέρωση και αποδοχή του εγχειρήματος από τις τοπικές αρχές και την τοπική κοινωνία).

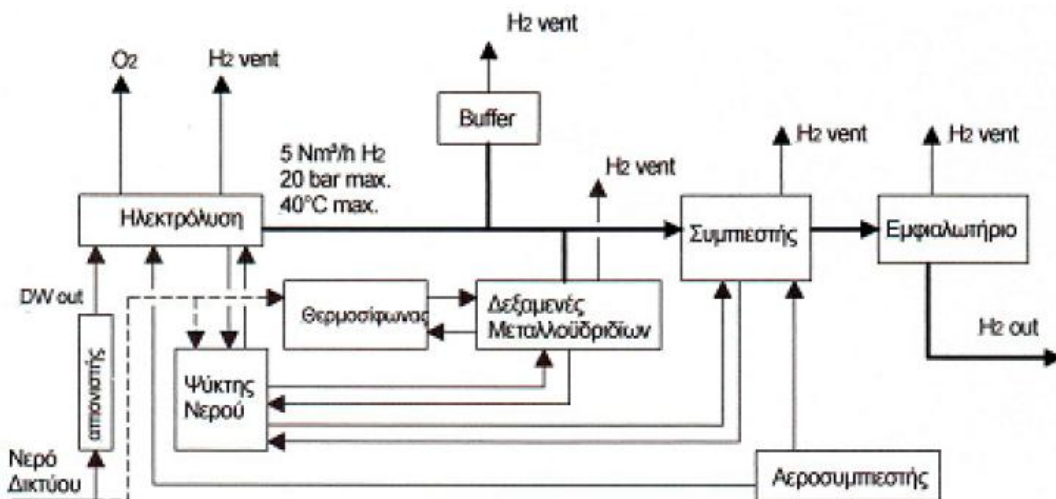
Επιπρόσθετα, στα πλαίσια του πενταετούς Ευρωπαϊκού προγράμματος RES2H<sub>2</sub> που ξεκίνησε το 2001, το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) σε συνεργασία με άλλους Ευρωπαϊκούς φορείς, σχεδίασε και υλοποίησε μία πιλοτική εγκατάσταση για παραγωγή, αποθήκευση και εμφιάλωση υδρογόνου από αιολική ενέργεια. Η μονάδα παραγωγής του υδρογόνου εγκαταστάθηκε στο Επιδεικτικό Αιολικό Πάρκο του ΚΑΠΕ κοντά στο Λαύριο, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 3 MW. Η εγκατάσταση ολοκληρώθηκε και τα τμήματα του εξοπλισμού δοκιμάστηκαν ένα - ένα στο διάστημα Μάιος-Ιούλιος 2005. Στην πορεία προέκυψαν διάφορες μικρο-εργασίες, οπότε η λειτουργία του ολοκληρωμένου συστήματος ξεκίνησε στο τέλος Σεπτεμβρίου 2005

(ΚΑΠΕ, “Υλοποίηση και πρώτα αποτελέσματα από μονάδα παραγωγής υδρογόνου από αιολική ενέργεια”).

Ένα απλό διάγραμμα της χημικής εγκατάστασης παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1. Αποτελείται από τα εξής επιμέρους τμήματα:

- 1) Την ηλεκτρόλυση του νερού.
- 2) Τις δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων.
- 3) Μια συμβατική δεξαμενή υδρογόνου.
- 4) Τον συμπιεστή υδρογόνου.
- 5) Τον σταθμό πλήρωσης φιαλών.
- 6) Το κλειστό σύστημα ψύξης νερού.
- 7) Το σύστημα πεπιεσμένου αέρα.

Η μονάδα ηλεκτρόλυσης νερού των 25 kW είναι συνδεδεμένη στην έξοδο 400 V μιας σύγχρονης ανεμογεννήτριας Enercon E-40 των 500 kW. Η ηλεκτρόλυση παράγει 5 Nm<sup>3</sup>/h υδρογόνου στα 19 bar, που περνάει από επιπλέον καθαρισμό και είτε αποθηκεύεται σε δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων ικανότητας 40 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> είτε συμπιέζεται σε κυλίνδρους υψηλής πίεσης, στα 220 bar.



Σχήμα 24 : Απλό διάγραμμα της εγκατάστασης υδρογόνου στο αιολικό πάρκο του ΚΑΠΕ.





(α)



(β)

Σχήμα 25 : (α) Πανοραμική άποψη του σταθμού παραγωγής υδρογόνου από ΑΠΕ.

(β) Αλκαλική μονάδα ηλεκτρόλυσης 25 kW στο Αιολικό πάρκο του ΚΑΠΕ.

(Πηγή: ΚΑΠΕ, “Υλοποίηση και πρώτα αποτελέσματα από μονάδα παραγωγής υδρογόνου από αιολική”)



(α)



(β)

Σχήμα 26 : α) Ο συμπιεστής υδρογόνου στο αιολικό πάρκο του ΚΑΠΕ.

β) Δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων.

(Πηγή: ΚΑΠΕ, “Υλοποίηση και πρώτα αποτελέσματα από μονάδα παραγωγής υδρογόνου από αιολική ενέργεια”)

Τα πρώτα αποτελέσματα λειτουργίας είναι πολύ ενθαρρυντικά και αποδεικνύουν ότι η μονάδα έχει πολύ υψηλή απόδοση (της τάξης του 60%), όπως είχε σχεδιαστεί. Αξίζει να αναφερθεί ότι πολύ πρόσφατα προστέθηκε στο όλο σύστημα και κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία έχει τρεις συνδέκτες, που συνδέονται με το δίκτυο σε περίπτωση άπνοιας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>

### 8.1 Παραγωγή του υδρογόνου

Το υδρογόνο είναι ένας δευτερογενής φορέας ενέργειας, καθώς για την παραγωγή του απαιτείται ενέργεια. Μπορεί να παραχθεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους από διαφορετικές πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ορυκτής, της ανανεώσιμης και της πυρηνικής.

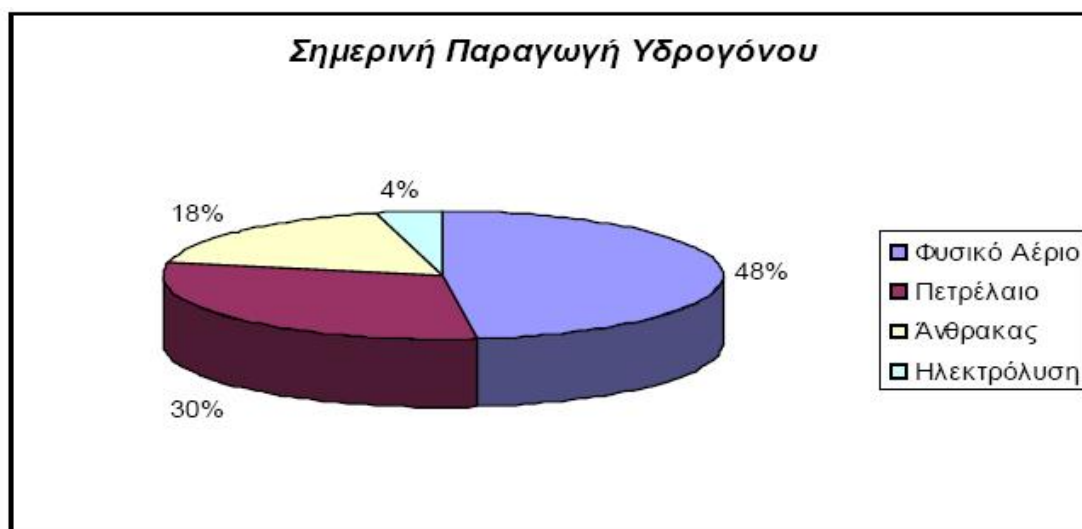
Κάποιες τεχνολογίες είναι καθιερωμένες, ενώ άλλες (π.χ. παραγωγή υδρογόνου από την πυρηνική ενέργεια) απαιτούν σημαντική έρευνα και ανάπτυξη. Το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για να παραχθεί το υδρογόνο είναι πάντα μεγαλύτερο από την ενέργεια που ελευθερώνεται κατά την χρησιμοποίησή του. Σήμερα, η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την παραγωγή του υδρογόνου αποτελεί η παραγωγή του μέσω διαφόρων ορυκτών καυσίμων (φυσικό αέριο, πετρέλαιο και γαιάνθρακα).

Κάθε χρόνο παράγονται παγκοσμίως τεράστιες ποσότητες υδρογόνου και μάλιστα με αυξανόμενη τάση (10%) από χρόνο σε χρόνο. Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται οι διάφορες ποσότητες υδρογόνου που παράγονται σήμερα κατά μέσο όρο παγκοσμίως από τα διάφορα ορυκτά καύσιμα, καθώς και μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού.

**Πίνακας 11: Παγκόσμια παραγωγή υδρογόνου ανά μέσο παραγωγής (Έτος αναφοράς: 2003).**

Μέσο	Δισεκατομμύρια m <sup>3</sup> /έτος	Ποσοστό
Φυσικό Αέριο	240	48%
Πετρέλαιο	150	30%
Άνθρακας	90	18%
Ηλεκτρόλυση	20	4%
Συνολική Ποσότητα	500	100%

Ακολουθεί σχηματική απεικόνιση της σημερινής παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου:



Σχήμα 27 : Παγκόσμια παραγωγή υδρογόνου σήμερα.

Οι διάφορες μέθοδοι παραγωγής του υδρογόνου ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:

- Ø Τις θερμοχημικές.
- Ø Τις ηλεκτρολυτικές.
- Ø Τις φωτολυτικές.

Κάθε μία από τις βασικές αυτές κατηγορίες των εμπορικών μεθόδων παραγωγής του υδρογόνου θα παρουσιασθεί συνοπτικώς στις επόμενες παραγράφους.

## 8.2 Θερμοχημικές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου

### 8.2.1 Παραγωγή του υδρογόνου από τα ορυκτά καύσιμα

Οι βασικότεροι τρόποι με τους οποίους το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από τα ορυκτά καύσιμα είναι οι ακόλουθοι:

Παραγωγή από το Φυσικό Αέριο:

Αναμόρφωση του Μεθανίου με Ατμό (Steam Methane Reforming - SMR):

Η αναμόρφωση του μεθανίου (φυσικού αερίου) μέσω της επίδρασης υδρατμών γίνεται σύμφωνα με τρεις αμφίδρομες αντιδράσεις, εκ των

οποίων οι δύο είναι ενδόθερμες και η άλλη εξώθερμη (απαιτείται επίσης η ταυτόχρονη παρουσία διαφόρων καταλυτών, όπως π.χ. το νικέλιο (Ni), το οποίο βρίσκεται τυλιγμένο σε φορέα Al):



Λόγω των ενδόθερμων αντιδράσεων, η αναμόρφωση μεθανίου ευνοείται από υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, επειδή η αντίδραση συνοδεύεται από αύξηση του όγκου μπορεί να πραγματοποιηθεί σε χαμηλή πίεση. Η αύξηση της παραγωγής του υδρογόνου απαιτεί αύξηση της ποσότητας του ατμού, συνεπώς θα είναι αναγκαία περισσότερη ενέργεια. Στην πράξη, η αναλογία ατμού - μεθανίου είναι  $P(H_2O)/P(CH_4)=3$  (Βαζάκας Νικόλαος: “Μεθοδολογία αξιολόγησης ενεργειακών αλυσίδων υδρογόνου”).

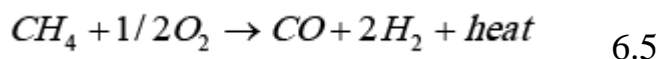
1ο στάδιο: Στους 800-1000 οC και πίεση 30-40 bar, λαμβάνει χώρα η αναμόρφωση με τις αντιδράσεις (6.2) και (6.4).

2ο στάδιο : Σε χαμηλότερη θερμοκρασία (συνήθως 200-400 οC), για την αύξηση της μετατροπής του υδρογόνου λαμβάνει χώρα η αντίδραση (6.3).

Παρατηρούμε ότι κατά την παραγωγή υδρογόνου με τη μέθοδο αυτή εκλύεται CO<sub>2</sub>. Ωστόσο, οι ποσότητες που παράγονται είναι αρκετά μικρές, οπότε δεν προκαλούν σημαντικές επιβαρύνσεις στην ατμοσφαιρική σύνθεση.

Μερική Οξείδωση του Φυσικού Αερίου (Partial Oxidation - POX):

Η μερική οξείδωση του φυσικού αερίου είναι η διαδικασία με την οποία το υδρογόνο παράγεται από τη μερική καύση του μεθανίου με το οξυγόνο:



Σε αυτήν την διαδικασία η θερμότητα παράγεται με μια εξώθερμη αντίδραση, οπότε δεν υπάρχει καμία ανάγκη για οποιαδήποτε εξωτερική θέρμανση του αντιδραστήρα. Το παραχθέν CO μετατρέπεται περαιτέρω σε H<sub>2</sub>, όπως περιγράφεται από την αντίδραση καταλυτικής αναμόρφωσης (αντίδραση 6.3).

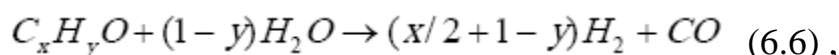
## **Θερμική Διάσπαση Υδρογονανθράκων (Thermal Cracking– TC)**

Η μόνη μέθοδος που μπορεί να παράγει υδρογόνο από φυσικά καύσιμα χωρίς την εκπομπή CO<sub>2</sub> είναι απευθείας από θερμικό και καταλυτικό σπάσιμο των υδρογονανθράκων. Κατά τη θερμική διάσπαση των υδρογονανθράκων που περιέχονται στα ορυκτά καύσιμα, παράγονται σαν προϊόντα το υδρογόνο και ο “καθαρός” άνθρακας με τη μορφή λεπτής σκόνης. Τα ορυκτά καύσιμα που προσφέρονται περισσότερο για την παραγωγή του υδρογόνου με τη μέθοδο αυτή, είναι κατά κύριο λόγο το φυσικό αέριο και τα διάφορα ελαφρά κλάσματα του πετρελαίου. Πρόκειται όμως για μία τεχνολογία που είναι οικονομικά ασύμφορη, καθώς βρίσκεται ακόμα σε αρχικά στάδια.

## **Παραγωγή με Αεριοποίηση Άνθρακα (Coal Gasification)**

Κατά την αεριοποίηση, οι στερεοί υδρογονάνθρακες μετατρέπονται σε αέρια φάση με πρόσδοση θερμότητας και εφαρμογή πίεσης παρουσία ατμού. Η διαδικασία περιλαμβάνει «μερική οξείδωση» του αρχικού καυσίμου, η οποία παρέχει την απαραίτητη θερμότητα για να πραγματοποιηθούν οι αντιδράσεις, ώστε η μεγαλύτερη ποσότητα του άνθρακα να μετατραπεί σε συνθετικό αέριο (syngas). Το συνθετικό αέριο είναι κυρίως υδρογόνο (H<sub>2</sub>) και μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Η αναλογία υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα στο παραγόμενο αέριο εξαρτάται από το είδος του υδρογονάνθρακα με το οποίο τροφοδοτείται το σύστημα και από τις συνθήκες που επικρατούν στον αεριοποιητή.

Η διαδικασία της αεριοποίησης περιλαμβάνει την ανάμειξη του κονιοποιημένου λιθάνθρακα ή λιγνίτη με το οξειδωτικό μέσο (αέρα ή οξυγόνο και ατμό). Το μίγμα εισέρχεται στον αεριοποιητή και θερμαίνεται στους 1000 - 1500 οC. Οι υδρογονάνθρακες αντιδρούν σύμφωνα με την αντίδραση:



όπου παράγεται συνθετικό αέριο. Για την παραγωγή καθαρού υδρογόνου, το αέριο επεξεργάζεται σε αντιδραστήρες αναμόρφωσης (Water Gas Shift Reactors). Κατά την καταλυτική αντίδραση, CO και ατμός αντιδρούν προς παραγωγή H<sub>2</sub> και CO<sub>2</sub> σύμφωνα με την αντίδραση 6.3.

## **8.2.2 Παραγωγή του υδρογόνου από τη βιομάζα**

Οι τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου από τη βιομάζα είναι η αεριοποίηση και η πυρόλυση.

Η αεριοποίηση βασίζεται στη θέρμανση της βιομάζας παρουσία περιορισμένων ποσοτήτων οξυγόνου, κατά την οποία προκύπτουν άμεσα CO και H<sub>2</sub>, καθώς και κάποια άλλα αέρια προϊόντα. Το μίγμα, συνολικά, των αερίων που προκύπτει κατά την αεριοποίηση της βιομάζας αναφέρεται συνήθως ως αέριο συνθέσεως (synthesis gas).

Η πυρόλυση βασίζεται στη θέρμανση της βιομάζας απουσία οξυγόνου και κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Κατά την πυρόλυση της βιομάζας ανάλογα και με τις ακριβείς συνθήκες διεξαγωγής της (πίεση και θερμοκρασία), προκύπτει ένα πλήθος από προϊόντα αέριας, υγρής ή και στερεάς μορφής. Τα υγρής μορφής προϊόντα στην ουσία είναι ένα είδος λαδιού, το οποίο όπως και το πετρέλαιο, περιέχει ένα ευρύ φάσμα από συστατικά, τα οποία μέσω κατάλληλης επεξεργασίας τους μπορούν να διαχωριστούν σε χρήσιμες χημικές ουσίες και καύσιμα συμπεριλαμβανομένου και του υδρογόνου.

## **8.3 Ηλεκτρολυτικές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου**

### **8.3.1 Παραγωγή του υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού**

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

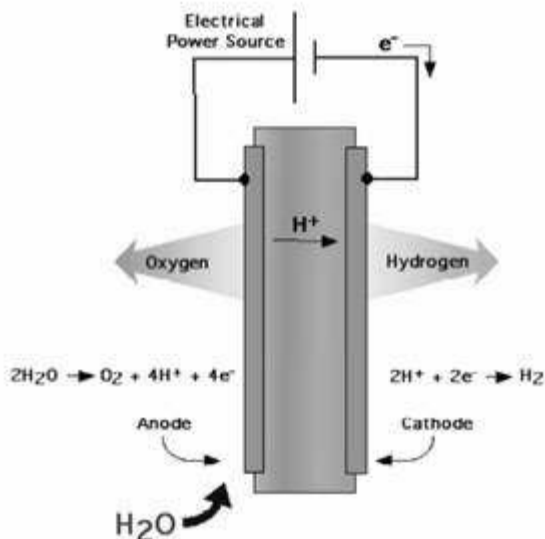
Μετά τη δεκαετία του '50 όμως, λόγω των διαφόρων φθηνότερων μεθόδων που ανακαλύφθηκαν για την παραγωγή του υδρογόνου (κυρίως της καταλυτική αναμόρφωση φυσικού αερίου), η ηλεκτρόλυση του νερού εγκαταλείφθηκε στο μεγαλύτερο μέρος της, με αποτέλεσμα στις μέρες μας, μόνο ένα σχετικά μικρό ποσοστό της συνολικής ποσότητας του παραγόμενου υδρογόνου σε παγκόσμια κλίμακα να παράγεται πλέον με αυτόν τον τρόπο. Η εφαρμογή της ηλεκτρόλυσης του νερού προς παραγωγή του υδρογόνου εφαρμόζεται σήμερα κυρίως όταν υπάρχουν αυξημένες απαιτήσεις σε «καθαρό» υδρογόνο και οι ποσότητες αυτού που απαιτούνται δεν είναι πολύ μεγάλες.

Από την άλλη μεριά, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σταδιακά μια σταδιακή αύξηση του παγκόσμιου ενδιαφέροντος για την παραγωγή του υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού, κυρίως εξαιτίας της σύγχρονης δυνατότητας κατασκευής ολοκληρωμένων συστημάτων από ηλεκτρολυτικές διατάξεις νερού, οι οποίες λειτουργούν μέσω της παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος με τη βοήθεια διαφόρων ΑΠΕ (κυρίως της ηλιακής και αιολικής ενέργειας). Τα ολοκληρωμένα αυτά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω διαφόρων ΑΠΕ παρουσιάζουν το σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τα παραδοσιακά ηλεκτρολυτικά συστήματα, ότι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν παράγεται χωρίς κάποιο σημαντικό κόστος, μιας και βασίζεται όπως είπαμε στην παραγωγή της από διάφορες ΑΠΕ.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η εφαρμογή τους για την μαζική παραγωγή του υδρογόνου να γίνεται πολύ φθηνότερα από την κλασική μέθοδο παραγωγής του υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης (παραγωγή με χρησιμοποίηση της συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου) και να εφαρμόζεται σταδιακά όλο και περισσότερο. Από την άλλη μεριά βέβαια, το κόστος κυρίως των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αυτών των ολοκληρωμένων ηλεκτρολυτικών συστημάτων παραγωγής υδρογόνου μέσω ΑΠΕ, είναι προς το παρόν ακόμα αρκετά υψηλό ώστε η παραγωγή αυτού μέσω των συγκεκριμένων διατάξεων να μπορεί να υποσκελίσει τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής του μέσω π.χ. των ορυκτών καυσίμων, με αποτέλεσμα η παραγωγή υδρογόνου μέσω ολοκληρωμένων ηλεκτρολυτικών διατάξεων να μην χρησιμοποιείται τόσο μαζικά όσο αυτές.

Μία χαρακτηριστική ηλεκτρολυτική διάταξη παραγωγής υδρογόνου που χρησιμοποιείται σήμερα για την παραγωγή του σε εργαστηριακή κλίμακα, είναι αυτή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.2. Στο διπλανό

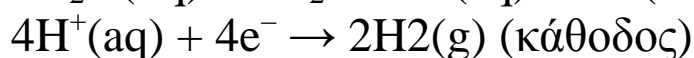




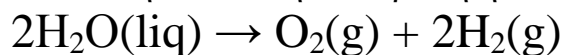
Σχήμα 28 : Α. Εργαστηριακή συσκευή ηλεκτρόλυσης.  
 Β. Αναπαράσταση εσωτερικής λειτουργίας συσκευής ηλεκτρόλυσης

σχήμα 28, φαίνεται επίσης και η διαδικασία της εσωτερικής λειτουργίας, κατά την παραγωγή του υδρογόνου μέσω αυτής.

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



Οπότε η συνολική αντίδραση ηλεκτρόλυσης του νερού έχει ως εξής:



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

Αποδεικνύεται θεωρητικά, ότι η παραγωγή του υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού, απαιτεί ηλεκτρική τάση η οποία ισούται με 1,23 V. Στην πράξη όμως, η ηλεκτρική τάση που συνήθως εφαρμόζεται

γι' αυτόν το σκοπό είναι κατά τι μεγαλύτερη (μεταξύ 1,55 V και 1,65V). Η αυξημένη αυτή τιμή της, οφείλεται κυρίως στις διάφορες απώλειες που υφίσταται το ηλεκτρικό ρεύμα (απώλειες θερμότητας και ηλεκτρομαγνητικού πεδίου) όταν διοχετεύεται μέσα στις ηλεκτρολυτικές διατάξεις. Η απόδοση παραγωγής υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού, ορίζεται από τον λόγο της τάσης των 1,23 V η οποία απαιτείται θεωρητικά για την παραγωγή του, προς την ηλεκτρική τάση την οποία εφαρμόζουμε κάθε φορά στη πράξη γι' αυτό. Για παράδειγμα, με πρακτικά εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση ίση με 1,60 V, θα έχουμε απόδοση παραγωγής υδρογόνου:

$$\frac{1,23}{1,60} = 0,77 = 77\%$$

Παρατηρούμε, ότι από ενεργειακής τουλάχιστον σκοπιάς, η παραγωγή του υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού παρουσιάζει σημαντικό πλεονέκτημα έναντι της παραγωγής του από τα διάφορα ορυκτά καύσιμα (των οποίων η απόδοση παραγωγής δεν υπερβαίνει συνήθως το 60%).

#### **8.4 Φωτολυτικές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου**

Οι φωτολυτικές διαδικασίες χρησιμοποιούν την ήπιας μορφής ενέργεια για να διασπάσουν το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο. Αυτήν την περίοδο οι διαδικασίες αυτές βρίσκονται στα πολύ αρχικά στάδια της έρευνας, αλλά προσφέρουν μακροπρόθεσμη δυνατότητα για τη βιώσιμη παραγωγή υδρογόνου με χαμηλή περιβαλλοντική επίδραση ([www.sciencenews.gr](http://www.sciencenews.gr), “Παραγωγή υδρογόνου”).

#### **8.5 Φωτοβιολογική Παραγωγή**

Σε αυτή την διαδικασία, το υδρογόνο παράγεται από το νερό χρησιμοποιώντας το φως του ήλιου και ειδικούς μικροοργανισμούς, όπως τα κυανοβακτήρια. Ακριβώς όπως τα φυτά παράγουν οξυγόνο κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης, αυτοί οι μικροοργανισμοί καταναλώνουν το νερό και παράγουν υδρογόνο ως υποπροϊόν των φυσικών μεταβολικών διαδικασιών τους. Μέσω κατάλληλης εκμετάλλευσης της ποσότητας του υδρογόνου που παράγεται από τη μεθοδολογία αυτή, μπορούμε να παράγουμε υδρογόνο με αποδοτικότητα παραγωγής που προσεγγίζει το 25%.

## 8.6 Φωτοηλεκτρόλυση

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

## 8.7 Διανομή του υδρογόνου

Η διανομή του υδρογόνου αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την ανάπτυξη και την εδραίωση της “Οικονομίας του Υδρογόνου”. Ως γνωστόν, τα περισσότερα συμβατικά ορυκτά καύσιμα που καταναλώνονται στις μέρες μας από τον άνθρωπο (με εξαίρεση το φυσικό αέριο), μεταφέρονται αποκλειστικά σε υγρή ή στερεά μορφή. Το γεγονός αυτό καθιστά τις υπάρχουσες υποδομές μεταφοράς τους ακατάλληλες για την μεταφορά του υδρογόνου, το οποίο σε συνθήκες συνθήκες περιβάλλοντος είναι αέριο. Ακόμα και αν το υδρογόνο μετατρέπεται σε υγρό, μέσω συμπίεσης και μεταφερόταν από το σημερινό υπάρχον σύστημα μαζικής διανομής των υγρών ορυκτών καυσίμων, η μεταφορά του αυτή θα σήμαινε αφενός την κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας για την μετατροπή του σε υγρό (με αποτέλεσμα υπερβολικά μεγάλο κόστος μεταφοράς του) και αφετέρου θα παρουσίαζε αυξημένα προβλήματα ασφάλειας και αξιοπιστίας εξαιτίας των ιδιαίτερων συνθηκών που επικρατούν κατά τη μεταφορά του υδρογόνου σε υγρή μορφή (υψηλές πιέσεις). Από την άλλη μεριά, η υποδομή του παγκόσμιου δικτύου διανομής που χρησιμοποιείται σήμερα για τη μεταφορά του φυσικού αερίου σαν αέριο, είναι εξίσου ανεπαρκής για τη μεταφορά του αερίου υδρογόνου, αφού οι συνθήκες πιέσεων που απαιτούνται για τη μεταφορά του φυσικού αερίου σε συνθήκες θερμοκρασίες περιβάλλοντος είναι πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες της μεταφοράς του υδρογόνου.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι για τη μελλοντική διανομή του υδρογόνου με ασφαλή και αποτελεσματικό τρόπο, απαιτείται νέα υποδομή . Σε θεωρητικό επίπεδο υπάρχουν σήμερα διάφορες προσεγγίσεις συγκρότησης του μελλοντικού δικτύου διανομής του υδρογόνου (*Καρύδας Χρήστος, “Τεχνολογία Υδρογόνου”*):

### **1η Προσέγγιση:**

Πολλές μονάδες μεγάλης παραγωγής του υδρογόνου συνδεδεμένες μεταξύ τους με αγωγούς μεταφοράς του, οι οποίοι θα το μεταφέρουν σε αέρια μορφή. Η παραγωγή, κατά τη συγκεκριμένη προσέγγιση, λαμβάνει χώρα μακριά από τις τοπικές πηγές κατανάλωσης του υδρογόνου και για το λόγο αυτό ο συγκεκριμένος τρόπος διανομής του χαρακτηρίζεται σαν “κεντροποιημένος”.

### **2η Προσέγγιση:**

Τοπική παραγωγή σε ποσότητες αρκετές για την τοπική ζήτηση. Η προσέγγιση αυτή αναφέρεται σαν “μη κεντροποιημένη” διανομή του υδρογόνου. Οι μελλοντικές ποσότητες του υδρογόνου που θα παράγονται στα διάφορα τοπικά σημεία της ζήτησής του θα μπορούν εκτός από το να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες του κάθε τοπικού πληθυσμού, να διοχετευτούν και στο ευρύτερο δίκτυο διανομής, είτε για εσωτερική κατανάλωση (για ένα κράτος) είτε για εξαγωγή.

### **3η Προσέγγιση:**

Οικιακή παραγωγή. Ο καθένας παραγωγός της δικής του ενέργειας (π.χ. στο χώρο του σπιτιού μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού από οικιακά ηλιακά ή αιολικά ηλεκτροπαραγωγικά συστήματα με σκοπό την κάλυψη των διαφόρων οικιακών αναγκών ή στο χώρο της εργασίας για μικρές ή μεσαίες επιχειρήσεις). Το περίσσειμα το διαθέτει στους άλλους.

## 8.8 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα των συστημάτων διανομής του υδρογόνου

Από την ανάλυση που προηγήθηκε, γίνεται φανερό ότι η “μη κεντροποιημένη” διανομή του υδρογόνου υπερτερεί της “κεντροποιημένης” διανομής όσον αφορά στην ενεργειακή ανεξαρτησία. Αυτό γιατί, η ενδεχόμενη δυσλειτουργία κάποιου σημείου του δικτύου της πρώτης δε θα είχε οπωσδήποτε σαν συνέπεια την παρεμπόδιση ή διακοπή της λειτουργίας και κάποιων άλλων σημείων του δικτύου της, δεδομένου ότι τα διάφορα σημεία του ευρύτερου δικτύου της λειτουργούν σχεδόν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Αντίθετα, στην περίπτωση της “κεντροποιημένης” διανομής η ελαττωματική λειτουργία οποιουδήποτε τυχαίου σημείου του δικτύου της θα επηρεάσει πιθανότατα ένα ή περισσότερα γειτονικά του σημεία. Επομένως, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι σε αντίθεση με τη “κεντροποιημένη διανομή” του υδρογόνου, η μη κεντροποιημένη” διανομή μπορεί να λειτουργήσει ομαλά και σε πιθανές περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης που καταστρέφουν ή θέτουν προσωρινά εκτός λειτουργίας κάποια σημεία του δικτύου της (π.χ. περιπτώσεις φυσικών καταστροφών, δηλαδή εκτεταμένων πυρκαγιών, σεισμών κ.α.).

Ένα άλλο πλεονέκτημα του “μη κεντροποιημένου” συστήματος διανομής του υδρογόνου είναι η σημαντική συνεισφορά του στην κάλυψη των ευρύτερων ενεργειακών αναγκών οποιουδήποτε κράτους, το οποίο συνεπάγεται γι’ αυτό την οικονομική και ενεργειακή του ανεξαρτησία από άλλα κράτη.

Για να λειτουργήσουν, όμως, τα μελλοντικά δίκτυα διανομής του υδρογόνου με ασφαλή και αξιόπιστο τρόπο, είναι απαραίτητη η επίλυση σημαντικών ζητημάτων. Συγκεκριμένα:

- Ø Οι αγωγοί μεταφοράς του αέριου υδρογόνου και οι διάφοροι σταθμοί ανεφοδιασμού του θα πρέπει να εξοπλιστούν με κατάλληλες τεχνολογίες διαχείρισής του, υψηλότερων απαιτήσεων από τις μέχρι σήμερα χρησιμοποιούμενες για το φυσικό αέριο (εξαιτίας των αρκετά υψηλότερων πιέσεων που απαιτούνται για τη διανομή του υδρογόνου).
  
- Ø Είναι απαραίτητη η λήψη όλων των τεχνικών προφυλάξεως ανίχνευσης πιθανούς διαρροής του υδρογόνου, ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος έκρηξης.

Ø Δεδομένου ότι η διανομή και ο ανεφοδιασμός του υδρογόνου γίνονται κάτω από υψηλές πιέσεις, τα υλικά κατασκευής των μελλοντικών αγωγών μεταφοράς του υδρογόνου θα πρέπει να παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή από τους αγωγούς που χρησιμοποιούνται σήμερα για τη μεταφορά του φυσικού αερίου.

Ø Οι αγωγοί διακίνησης του υδρογόνου είναι αναγκαίο να εφοδιαστούν και με κατάλληλες διατάξεις συμπιεστών του σε διάφορα σημεία τους, αφού εκτός από υψηλές πιέσεις κατά τη μεταφορά του, το υδρογόνο σαν αέριο απαιτεί οι υψηλές αυτές πιέσεις να παραμένουν και συνεχώς σταθερές. Αυτό οφείλεται κυρίως στην μεγάλη πτώση πίεσης που παρατηρείται στο δίκτυο διανομής του υδρογόνου όταν αυτό απάγεται απ' αυτό και χρησιμοποιείται για λόγους ανεφοδιασμού.

Σήμερα, παρά τις διάφορες τεχνικές δυσκολίες που υπάρχουν για την ευρύτερη εφαρμογή της διανομής του υδρογόνου, αρκετά τεχνολογικά προηγμένα κράτη (μεταξύ αυτών και αρκετά κράτη της Ευρωπαϊκής Ένωσης) έχουν ήδη αρχίσει να αναπτύσσουν τις πρώτες, μικρής κλίμακας, υποδομές διανομής και ανεφοδιασμού του υδρογόνου, κυρίως δε για τον ανεφοδιασμό με υδρογόνο αστικών μεταφορικών οχημάτων του (π.χ. λεωφορεία).

## **8.9 Σύνοψη και Συμπεράσματα**

### **8.9.1 Ενεργειακή θεώρηση και η συμμετοχή του H<sub>2</sub>**

Η παγκόσμια οικονομία θα συνεχίσει να αναπτύσσεται μεσομακροπρόθεσμα (έως το 2030) με ρυθμούς της τάξης του 3,6% ετησίως. Μεγάλο τμήμα της ανάπτυξης προέρχεται από τις οικονομίες ασιατικών κρατών (Κίνα, Ινδία) που γνωρίζουν μεγάλη πληθυσμιακή ανάπτυξη.

Η οικονομική ανάπτυξη οδηγεί σε αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας με ετήσιο ρυθμό αύξησης της τάξης του 1,8%. Ο ρυθμός είναι μικρότερος αυτού της οικονομικής ανάπτυξης λόγω σταδιακής βελτίωσης του βαθμού ενεργειακής εκμετάλλευσης των πρωτογενών πηγών ενέργειας.

Οι αυξημένες ενεργειακές ανάγκες προβλέπεται να καλυφθούν με αύξηση της κατανάλωσης των ορυκτών καυσίμων αλλά και με

σημαντική αύξηση των ΑΠΕ, με μέσους ρυθμούς της τάξης του 6,7% ετησίως.

Η αύξηση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων οδηγεί σε εξάντληση των αποθεμάτων και συνεπαγόμενη αύξηση του κόστους εξόρυξης και διάθεσης, επιτάχυνση της κλιματικής αλλαγής και επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με ρύπους.

Το  $H_2$  δεν είναι πρωτογενής πηγή ενέργειας αφού δεν είναι ελεύθερα διαθέσιμο στη φύση σε σημαντικές ποσότητες. Το  $H_2$  είναι φορέας ενέργειας για τεχνικές εφαρμογές, δηλαδή είναι αντίστοιχο της ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, η παραγωγή του μπορεί να ενισχύσει τη διεύθυνση των ΑΠΕ.

Πλεονεκτήματα του  $H_2$  είναι η μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα, οι μεγάλοι βαθμοί απόδοσης των συσκευών κατά τη μετατροπή του, και η μηδενική παραγωγή αερίων θερμοκηπίου και άλλων ρύπων κατά τη χρήση του σε ηλεκτροχημικές διεργασίες.

Σήμερα χρηματοδοτούνται παγκόσμια σημαντικές δράσεις για την προώθηση της χρήσης του  $H_2$ , που αφορούν βασική έρευνα για τις διεργασίες και τη μετατροπή του  $H_2$  σε συσκευές, έρευνα για την αποθήκευση και τη διανομή του, έργα επίδειξης, έργα τυποποίησης και ανάπτυξης τεχνικών κανονισμών, κλπ.

## 8.9.2 Παραγωγή

Το  $H_2$  μπορεί να παραχθεί από ΑΠΕ σε αποκεντρωμένους (κατανεμημένους) σταθμούς ώστε να ενισχύσει τη συμμετοχή των ΑΠΕ στην πρωτογενή παραγωγή ενέργειας. Η αποκεντρωμένη παραγωγή προσφέρει τα πλεονεκτήματα της ενίσχυσης της τοπικής οικονομίας και μείωσης των αναγκών για δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η συνηθέστερη μέθοδος παραγωγής σήμερα είναι από φυσικό αέριο με αναμόρφωση με ατμό και βαθμούς απόδοσης που κυμαίνονται από 65% (μικρή κλίμακα) έως 85% (μεγάλη κλίμακα). Η συμπίεση του  $H_2$  και η δέσμευση του άνθρακα μειώνουν η κάθε μία το βαθμό απόδοσης κατά 5-10 ποσοστιαίες μονάδες.

Υγροποιημένο  $H_2$  ( $LH_2$ ) μπορεί να αποθηκευτεί σε κρυογενικές δεξαμενές σε θερμοκρασία 20,3 K και πυκνότητα 70,8 g/l. Η αποθήκευση σε κρυογενικές δεξαμενές έχει ενεργειακό κόστος ~30-40% του ενεργειακού περιεχομένου του  $H_2$  λόγω της συνεχούς εξάτμισης και επαναυγροποίησης του  $H_2$  που απαιτείται για διατήρηση της χαμηλής θερμοκρασίας. Σύγχρονες τεχνικές έχουν μειώσει το χρόνο ανεφοδιασμού με  $LH_2$  σε λίγα λεπτά.

H<sub>2</sub> μπορεί να αποθηκευτεί μέσω προσρόφησης σε στερεά υλικά, με τα πιο διαδεδομένα να είναι τα μεταλλικά υδρίδια αλλά και νανοϋλικά ανθρακικής βάσης. Η διεργασία αυτή παρέχει μεγάλη ασφάλεια. Από την άλλη μεριά, τα στερεά υλικά έχουν μεγάλο βάρος, χαμηλούς ρυθμούς φόρτισης / αποφόρτισης καθώς και περιορισμένο ποσοστό ανάκτησης αποθηκευμένου H<sub>2</sub>.

Η μεταφορά του H<sub>2</sub> σε αποστάσεις έως ορισμένα εκατοντάδες χιλιόμετρα μπορεί να γίνει μέσω υπόγειων χαλύβδινων αγωγών. Το κόστος μεταφοράς είναι από 1,5 έως 1,8 φορές μεγαλύτερο από το κόστος μεταφοράς φυσικού αερίου. Επίσης η μεταφορά του μπορεί να γίνεται σε υγροποιημένη μορφή με πλοία ή τραίνα.

### 8.9.3 Χρήση και εφαρμογές

Η μετατροπή του H<sub>2</sub> σε ηλεκτρική ενέργεια γίνεται σε ηλεκτροχημικές διατάξεις που ονομάζονται κυψέλες καυσίμου. Στις κυψέλες καυσίμου γίνεται ανταλλαγή ηλεκτρικού φορτίου μέσω ηλεκτρολυτών και το H<sub>2</sub> μετατρέπεται σε H<sub>2</sub>O το οποίο αποτελεί και το προϊόν της διεργασίας. Οι εμπορικά διαθέσιμες κυψέλες καυσίμου διακρίνονται ανάλογα με τον ηλεκτρολύτη σε διάφορους τύπους (ανταλλαγής πρωτονίων, στερεού οξέος, τηγμένων ανθρακικών αλάτων, φωσφορικού οξέος).

Οι κυψέλες καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων είναι χαμηλής θερμοκρασίας (60-80°C) ενώ τελευταία εμφανίζονται μονάδες υψηλότερης θερμοκρασίας. Ο βαθμός απόδοσης τέτοιων μονάδων υπερβαίνει το 60% σε μερικό φορτίο και η πυκνότητα ισχύος 0,22-0,57 W/cm<sup>2</sup>. Τέτοιου είδους κυψέλες είναι ιδανικές για τον τομέα των μεταφορών (ισχύς ορισμένων δεκάδων kW).

Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου λειτουργούν σε ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες (~800°C) με μεγάλη πυκνότητα ισχύος 0.16-0.55 W/cm<sup>2</sup> και μπορούν να φτάσουν σε συνολική ισχύ ορισμένων εκατοντάδων kW. Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας, αυτός ο τύπος συνδυάζεται ιδανικά με αεροστρόβιλους και μπορεί να επιτύχει συνολικούς βαθμούς ηλεκτρικής απόδοσης της τάξης του 80%.

Οι κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων λειτουργούν σε θερμοκρασίες 600-700°C και επιτυγχάνουν πυκνότητες ισχύος της τάξης του 0,15 W/cm<sup>2</sup> και βαθμούς απόδοσης της τάξης του 55%.

Οι κυψέλες φωσφορικού οξέος αποτέλεσαν τα πρώτα εμπορικά συστήματα με ισχύ της τάξης των 50-200 kW. Λειτουργούν στην περιοχή των 150-220°C με πυκνότητα ισχύος 0,1-0,33 W/cm<sup>2</sup> και ηλεκτρικές αποδόσεις της τάξης του 40-55%.



Οι κυψέλες καυσίμου εμφανίζουν κόστη από 10-50 k€/kWel (συστήματα έως 5 kW) και μεταξύ 5 και 18 k €/kWel τα μεγαλύτερα συστήματα. Για σύγκριση ένα τυπικό ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος βιομηχανικής εφαρμογής κοστίζει περί τα 0,1 k€/kWel. Το κόστος ΚΚ αναμένεται να πέσει σε αυτό το επίπεδο καθώς βελτιώνεται η τεχνολογία και αυξάνεται ο όγκος παραγωγής. Επίσης οι κυψέλες καυσίμου μπορεί να συνεχίσουν να είναι ανταγωνιστικές σε υψηλό κόστος λόγω του, έως και διπλάσιου, μεγαλύτερου βαθμού απόδοσης από συμβατικές συσκευές ηλεκτροπαραγωγής.

- Ένα μειονέκτημα των κυψελών καυσίμου είναι η ανάγκη για αλλαγή του ηλεκτρολύτη καθώς και η μόλυνση των ηλεκτροδίων από προσμίξεις στο προσαγόμενο αέριο. Η βελτίωση της απόδοσης και στις δύο περιπτώσεις αποτελεί πεδίο σημαντικής τρέχουσας έρευνας.
- Η χρήση κυψελών καυσίμου μπορεί να γίνει σε μεγάλο εύρος εφαρμογών, από εγκαταστάσεις βιομηχανικής κλίμακας ορισμένων MW έως εφαρμογές mW για τροφοδοσία ηλεκτρικών συσκευών (laptops, κλπ).
- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η χρήση H<sub>2</sub> σε συνδυασμό με κυψέλες καυσίμου για τις οδικές μεταφορές λόγω της μηδενικής ρύπανσης (αέρια θερμοκηπίου και συμβατικοί ρύποι) που προκύπτουν με αυτό τον τρόπο κατά τη χρήση του οχήματος. Η τεχνολογία αυτή θα γίνει απολύτως ανταγωνιστική σε περίπτωση που δεν γίνει δυνατή η παραγωγή συσσωρευτών υψηλής χωρητικότητας και μικρού βάρους, ώστε να υποστηρίξουν την προώθηση των ηλεκτρικών οχημάτων.
- Επιβατηγά οχήματα με κυψέλες καυσίμου έχουν ήδη κατασκευαστεί ως πρωτότυπα από διάφορους κατασκευαστές. Ανάλογα με τις μεθόδους παραγωγής του H<sub>2</sub>, η χρήση τέτοιων οχημάτων μπορεί να μειώσει σημαντικά, έως και να εκμηδενίσει, το ανθρακικό αποτύπωμα των μεταφορών.

#### **8.9.4 Σενάρια διείσδυσης H<sub>2</sub>**

Η παραγωγή H<sub>2</sub> συνδέεται με σημαντική αύξηση του κόστους ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας αλλά μπορεί να συνδυαστεί με τεχνολογίες που επιβαρύνουν ελάχιστα το περιβάλλον, με σημαντικό όφελος σε σχέση με τις συμβατικές τεχνικές. Η ερευνητική προσπάθεια

σήμερα αποσκοπεί στη μείωση του κόστους στην παραγωγή και χρήση του  $H_2$ .

Η ευρεία εξάπλωση της χρήσης  $H_2$  σε σχέση με ηλεκτρική ενέργεια προσκρούει σε σημαντικά εμπόδια. Η παραγωγή υδρογόνου σε κεντρικούς σταθμούς βάσης σε σχέση με την κεντροποιημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν προσφέρει σήμερα ιδιαίτερα πλεονεκτήματα. Επιπλέον, μια τέτοια επένδυση θα επιβαρύνονταν από το κόστος ανάπτυξης της υποδομής διανομής και διάθεσης του  $H_2$ , που δεν είναι αμελητέα, ενώ το δίκτυο αυτό υπάρχει ήδη για την ηλεκτρική ενέργεια.

Η παραγωγή  $H_2$  από καταναμημένους σταθμούς (από ΑΠΕ, βιομάζα ή συμβατικά καύσιμα) είναι ελκυστικότερη σε σχέση με την κεντροποιημένη αφού και στην περίπτωση παραγωγής ηλεκτρισμού και παραγωγής  $H_2$  θα απαιτηθεί σε τέτοιες εφαρμογές μια αρχική επένδυση.

Η παραγωγή δε  $H_2$ , υπό προϋποθέσεις, πλεονεκτεί της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κυρίως όταν το κόστος διασύνδεσης του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής με το κεντρικό δίκτυο είναι υψηλό. Επίσης, όταν η ενέργεια προέρχεται από ΑΠΕ – και κυρίως αιολική ενέργεια – η αποθήκευσή της σε μορφή  $H_2$  έναντι της απευθείας διάθεσής της στο δίκτυο ως ηλεκτρικής προσφέρει σταθεροποίηση της παρεχόμενης ισχύος και διάθεσή της κατά βούληση. Αυτό δίνει τη δυνατότητα μεγαλύτερης διείσδυσης των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο. Μια μελέτη έχει δείξει ότι μια τέτοια μονάδα μπορεί ακόμα και σήμερα να είναι οικονομικά ανταγωνιστική για μικρά Ελληνικά νησιά του μη διασυνδεδεμένου δικτύου που χρησιμοποιούν σταθμούς βάσης ντίζελ (Ntziachristos *et al.*, 2004). Το οικονομικό όφελος προκύπτει καθώς δεν υφίσταται το υψηλό κόστος μεταφοράς της πρωτογενούς παραγωγής ενέργειας (ντίζελ) στο νησί.

Σημαντική ώθηση στη χρήση και στην ανάπτυξη του δικτύου του  $H_2$  θα προσφέρει η ενδεχόμενη χρήση του στις μεταφορές. Ο λόγος είναι ότι οι μεταφορές χρησιμοποιούν σήμερα αποκλειστικά ορυκτά καύσιμα και επιβαρύνουν σημαντικά την ατμόσφαιρα με αέρια του θερμοκηπίου. Άρα αναζητούνται λύσεις. Η ευρεία χρήση βιοκαυσίμων, πέρα από ~20% των συνολικών ενεργειακών αναγκών, προσκρούει σε σημαντικά εμπόδια που επιγραμματικά είναι:

- (α) οι περιορισμοί του όγκου πρωτογενούς παραγωγής (ανταγωνισμός με τροφή, πεπερασμένοι υδάτινοι πόροι),
- (β) οι τεχνικές δυσκολίες στη χρήση των βιοκαυσίμων, ο έλεγχος της ποιότητας, και η σταθερότητα του καυσίμου (κυρίως για βιοντίζελ),
- (γ) η επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με συμβατικούς ρύπους,
- (δ) το μικρό συνολικά κέρδος σε αέρια του θερμοκηπίου. Επομένως η διείσδυση των βιοκαυσίμων έχει συγκεκριμένη οροφή που δεν μπορεί να αρθεί.

Εκτός των βιοκαυσίμων, σημαντική δραστηριότητα επικεντρώνεται σήμερα στην προώθηση ηλεκτρικών οχημάτων που θα τροφοδοτούνται από το δίκτυο. Ο κύριος περιοριστικός παράγοντας είναι η μη ύπαρξη συσσωρευτών που να επιτυγχάνουν υψηλή πυκνότητα ενεργειακής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμα και οι ιδιαίτερα μεγάλοι και ακριβοί συσσωρευτές που χρησιμοποιούνται σε υβριδικά οχήματα σήμερα δεν μπορούν να προσφέρουν αυτονομία πέρα από μερικά χιλιόμετρα. Επομένως το ερώτημα αν θα υπάρξουν σύντομα ή στο βραχυπρόθεσμο μέλλον διαθέσιμοι συσσωρευτές υψηλής πυκνότητας ενέργειας είναι ακόμα ανοιχτό. Άλλα εμπόδια στην προώθηση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι η διαθεσιμότητα σταθμών φόρτισης στις πόλεις και τα δίκτυα που πρέπει να αναπτυχθούν, καθώς και η ανάγκη νέων σταθμών παραγωγής και ενίσχυσης του δικτύου για κάλυψη των απαιτούμενων αναγκών.

Σε περίπτωση που η εκτεταμένη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας δεν καταστεί δυνατή στις μεταφορές για τους παραπάνω λόγους, τότε η χρήση H<sub>2</sub> θα αποτελέσει μονόδρομο. Η αύξηση του κόστους στην περίπτωση αυτή θα είναι σημαντική αλλά όχι απαγορευτική λόγω του μεγάλου όγκου παραγωγής. Επίσης, θα αντισταθμιστεί ως ένα βαθμό από τη μείωση του εξωτερικού κόστους των μεταφορών (ρύπανση). Τα τεχνικά προβλήματα που θα πρέπει να ξεπεραστούν για την ευρεία διάδοση του H<sub>2</sub> στις μεταφορές είναι η αποθήκευσή του, η ανάγκη για ανάπτυξη προτύπων ανεφοδιασμού και η ανάπτυξη του δικτύου ανεφοδιασμού, η βελτίωση των συστημάτων ισχύος για ταχεία ανταπόκριση στις μεταβολές φορτίου, και η αύξηση της διάρκειας ζωής των ΚΚ.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ecocrete.gr, Οκτώβριος 2005, «Περιεχόμενο και κανονιστική σημασία της αιεφόρου ανάπτυξης», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:  
[http://www.ecocrete.gr/index.php?option=com\\_content&task=view&id=1899&Itemid=82](http://www.ecocrete.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=1899&Itemid=82)
- [2] Νόμος και Φύση, Νοέμβριος 2004, «Δίκαιο Περιβάλλοντος και Αειφόρου Ανάπτυξης – Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Η εναλλακτική τεχνολογία για ένα αιεφόρο μέλλον», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:  
[http://www.nomosphysis.org.gr/articles.php?artid=353&lang=1&catpid=1#\\_ftnref4](http://www.nomosphysis.org.gr/articles.php?artid=353&lang=1&catpid=1#_ftnref4).
- [3] Μιλτιάδης Τσοσκούνουγλου, «ΕΒΕΑ, 21 Σεπτεμβρίου 2006 – «Η γεωλογική διάσταση: τελειώνει το πετρέλαιο;», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:  
[www.ellinikietairia.gr/media/pdf/tsoskounoglou.pdf](http://www.ellinikietairia.gr/media/pdf/tsoskounoglou.pdf)
- [4] Ανδρέας Παυλικκάς, «Πετρέλαιο – Ποιοι κερδίζουν, Ποιοι χάνουν», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:  
[http://www.apavlikkas.com/greek/index.php?article\\_id=103](http://www.apavlikkas.com/greek/index.php?article_id=103)
- [5] Wikipedia, «Παγκόσμια θέρμανση», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:  
[http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%B1%CE%B3%CE%BA%CF%8C%CF%83%CE%BC%CE%B9%CE%B1\\_%CE%B8%CE%AD%CF%81%CE%BC%CE%B1%CE%BD%CF%83%CE%B7](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%B1%CE%B3%CE%BA%CF%8C%CF%83%CE%BC%CE%B9%CE%B1_%CE%B8%CE%AD%CF%81%CE%BC%CE%B1%CE%BD%CF%83%CE%B7).
- [6] Wikipedia, «Υδρογόνο», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:  
<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF>
- [7] Argonne National Laboratory, Center for Energy, Environmental, and Economic Systems Analysis, "Assessing Current, Near-term, and Longterm U.S. Hydrogen Markets", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:  
[http://www.dis.anl.gov/ceesa/programs/hydrogen\\_markets.html](http://www.dis.anl.gov/ceesa/programs/hydrogen_markets.html)

[8] ΕΚΠΑΑ, Νοέμβριος 2003, «Ενέργεια, περιβάλλον και επιχειρηματικότητα - Προτάσεις για τον ενεργειακό τομέα στον ελληνικό χώρο», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: [www.envirohelp.net/greece/processes/documents/Energy\\_Environment.pdf](http://www.envirohelp.net/greece/processes/documents/Energy_Environment.pdf)

[9] hy2.gr, «Φυσικές ιδιότητες υδρογόνου», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.hy2.gr/reference.php?item=5>

[10] hy2.gr, «Χημικές ιδιότητες υδρογόνου», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.hy2.gr/reference.php?item=6>

[11] Phase Diagrams Of Pure Substances, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.chemguide.co.uk/physical/phaseeqia/phasediags.html>

[12] National Aeronautics and Space Administration (NASA), July 25 2005, "Safety Standard For Hydrogen And Hydrogen Systems - Guidelines for Hydrogen System Design, Materials Selection, Operations, Storage, and Transportation", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: [www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/canceled/871916.pdf](http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/canceled/871916.pdf)

[13] hy2.gr, «Παρασκευή και χρήσεις υδρογόνου», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.hy2.gr/reference.php?item=7>

[14] hy2.gr, «Το υδρογόνο ως φορέας ενέργειας», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.hy2.gr/reference.php?item=10>

[15] Νικόλαος Ρωμανός, «Το Αυτοκίνητο του Μέλλοντος κινούμενο με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.)», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: [http://library.tee.gr/digital/m2102/m2102\\_romanos.pdf](http://library.tee.gr/digital/m2102/m2102_romanos.pdf)

[16] J. Rifkin, «Η οικονομία του Υδρογόνου (Η >ημιουργία του Παγκόσμιου Ενεργειακού Ιστού και η Ανακατανομή της Εξουσίας στη η, Η επόμενη Μεγάλη Οικονομική Επανάσταση)», Αθήνα 2003, Εκδόσεις Λιβάνη

[17] ΤΕΕ Μήλου, «Σύγκριση Η<sub>2</sub> με άλλους ενεργειακούς φορείς»  
διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://tee-milou.kyk.sch.gr/daidalos2005/CompareH2.htm>

[18] Εγκυκλοπαίδεια Πάπυρος – Larus Britannica, Αθήνα 1992

[19] hySolutions, " Hamburgs Antrieb Wasserstoff - Projekte",  
διαθέσιμο το διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hysolutions-hamburg.de/index.php?id=20>

[20] hy2.gr, «Πλεονεκτήματα έναντι συμβατικών πηγών ενέργειας»,  
διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=11>

[21] hy2.gr, «Μειονεκτήματα έναντι συμβατικών πηγών ενέργειας»,  
διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=12>

[22] Alibrando, M., H.S. Hahm and E.E. Wolf, 1997, "Partial  
oxidation of methane to syngas on a Rh/TiO<sub>2</sub> catalyst in a fast flow  
porous membrane reactor:", J.C. Baltzer., Science Publishers.

[23] hy2.gr, «Αεριοποίηση και πυρόλυση βιομάζας», διαθέσιμο στο  
διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=145>

[24] [www.sciencenews.gr](http://www.sciencenews.gr), «Παραγωγή υδρογόνου», διαθέσιμο στο  
διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.sciencenews.gr/afieromata/ydrogono/ydrogono2.asp>

[25] Wikipedia, «Ηλεκτρόλυση», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη  
διεύθυνση:

<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CF%8C%CE%BB%CF%85%CF%83%CE%B7>

[26] hy2.gr, «Ηλεκτρόλυση νερού», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη  
διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=146>

[27] hy2.gr, «Φωτοηλεκτρόλυση», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη  
διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=148>

[28] hy2.gr, «Διανομή υδρογόνου», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=150>

[29] Sciencenews.gr, «Διανομή υδρογόνου», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.sciencenews.gr/afieromata/ydrogono/ydrogono3.asp>

[30] H2 Filling Stations Worldwide, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.h2stations.org/overview/fillingdata/filling149.html>

[31] H2 Mobility.org, "H2Buses", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

[http://www.h2cars.de/2\\_busdata/b068.htm](http://www.h2cars.de/2_busdata/b068.htm)

[32] Andreas Zuttel, "Hydrogen Storage Methods and Materials", University of Fribourg April 2004.

[33] Hydrogen embrittlement, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

[http://www.uni-saarland.de/fak8/wwm/research/phd\\_barnoush/hydrogen.pdf](http://www.uni-saarland.de/fak8/wwm/research/phd_barnoush/hydrogen.pdf)

[34] Sciencenews.gr, «Αποθήκευση σαν υγρό ή αέριο», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.sciencenews.gr/afieromata/ydrogono/ydrogono4.asp>

[35] hy2.gr, «Αποθήκευση υδρογόνου σε υγρή φάση», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=155>

[36] Sciencenews.gr, «Αποθήκευση σε υδρίδια μετάλλων και νανοσωλήνες άνθρακα», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.sciencenews.gr/afieromata/ydrogono/ydrogono5.asp>

[37] hy2.gr, «Το σύστημα Pd-H», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=160>

[38] hy2.gr, «Σχηματισμός υδριδίων», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=161>

[39] B.-H. Liu, Hydrogen-Metal Systems: Hydride Forming Alloys. Encyclopaedia of Materials: Science and Technology

[40] hy2.gr, «Σταθερότητα υδριδίων», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=166>

[41] hy2.gr, «Μετάβαση στην κλίμακα του νανομέτρου», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=169>

[42] hy2.gr, Δομή νανοκρυσταλλικών υδριδίων», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=170>

[43] hy2.gr, «Επίδραση κατάλυσης στη απορρόφηση», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=171>

[44] hy2.gr, «Μίγματα υδριδίων», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=172>

[45] hy2.gr, «Συγκριτική παρουσίαση διαφόρων υδριδίων», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=175>

[46] hy2.gr, «Παρουσίαση μορφών άνθρακα», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=178>

[47] hy2.gr, «Τύποι νανοσωλήνων άνθρακα», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=182>

[48] Thomas W. Ebbesen, "Carbon nanotubes: preparation and properties".



[49] hy2.gr, «Καταλυτική χημική απόθεση από ατμό», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=185>

[50] Wikipedia, «Νανοσωλήνας άνθρακα», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

[http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9D%CE%B1%CE%BD%CE%BF%CF%83%CF%89%CE%BB%CE%AE%CE%BD%CE%B1%CF%82\\_%CE%AC%CE%BD%CE%B8%CF%81%CE%B1%CE%BA%CE%B1](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9D%CE%B1%CE%BD%CE%BF%CF%83%CF%89%CE%BB%CE%AE%CE%BD%CE%B1%CF%82_%CE%AC%CE%BD%CE%B8%CF%81%CE%B1%CE%BA%CE%B1)

[51] hy2.gr, «Ηλεκτρονικές ιδιότητες νανοσωλήνων άνθρακα», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=189>

[52] hy2.gr, «Μηχανικές και άλλες ιδιότητες νανοσωλήνων άνθρακα», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=190>

[53] Physics 4u, «Τι είναι το μικροσκόπιο ατομικής δύναμης;», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.physics4u.gr/faq/forcemicroscope.html>

[54] hy2.gr, «Μηχανισμοί αποθήκευσης υδρογόνου σε νανοσωλήνες Άνθρακα», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=193>

[55] hy2.gr, «Αποθήκευση σε νανοσωλήνες άνθρακα προσμίξεων Αλκαλίων», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=196>

[56] Wikipedia, «Κυψέλη καυσίμου», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

[http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%85%CF%88%CE%AD%CE%BB%CE%B7\\_%CE%BA%CE%B1%CF%85%CF%83%CE%AF%CE%BC%CE%BF%CF%85](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%85%CF%88%CE%AD%CE%BB%CE%B7_%CE%BA%CE%B1%CF%85%CF%83%CE%AF%CE%BC%CE%BF%CF%85)

[57] Wikipedia, " Proton exchange membrane fuel cell" ,διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

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

[58] ScienceNews.gr, «Κυψέλες καυσίμου», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.sciencenews.gr/afieromata/ydrogono/ydrogono6.asp>

[59] Wikipedia, "Fuel cell – History" ,διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

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

[60] hy2.gr, «Κυψέλη καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης (PEM)», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=204>

[61] Rocky Mountain Institute, "Types of Fuel cells – Alkaline Fuel Cell (AFC)", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.rmi.org/sitepages/pid201.php>

[62] Wikipedia, "Alkaline fuel cell", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Alkaline\\_fuel\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Alkaline_fuel_cell)

[63] hy2.gr, «Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=203>

[64] hy2.gr, «Κυψέλη καυσίμου τηγμένου άνθρακα (MCFC)», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=205>

[65] hy2.gr, «Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=206>

[66] Wikipedia, "Thermal efficiency" ,διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Thermodynamic\\_efficiency](http://en.wikipedia.org/wiki/Thermodynamic_efficiency)

[67] hy2.gr, «Θεωρητική προσέγγιση», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=210>

[68] hy2.gr, «Πρακτική προσέγγιση», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=211>

[69] MTC, Renewable Energy Trust, "Fuel Cell Overview"  
διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:  
<http://www.masstech.org/cleanenergy/fuelcell/overview.htm>

[70] FUEL CELL MARKETS, "Advantages & Benefits of Fuel Cell  
& Hydrogen Technologies - Multiple Sources", διαθέσιμο στο  
διαδίκτυο στη διεύθυνση:  
[http://www.fuelcellmarkets.com/fuel\\_cell\\_markets/5,1,1,663.html#MULTIPLE](http://www.fuelcellmarkets.com/fuel_cell_markets/5,1,1,663.html#MULTIPLE)

[71] NUVERA FUEL CELLS, "HOW A FUEL PROCESSOR  
WORKS", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:  
[http://www.nuvera.com/company/processors\\_work.php](http://www.nuvera.com/company/processors_work.php)

[72] hy2.gr, «Ρόλος αναμορφωτών», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη  
διεύθυνση:  
<http://www.hy2.gr/reference.php?item=214>

[73] hy2.gr, «Ενδόθερμη αναμόρφωση ατμού» διαθέσιμο στο  
διαδίκτυο στη διεύθυνση:  
<http://www.hy2.gr/reference.php?item=215>

[74] hy2.gr, «Εξώθερμη μερική οξείδωση», διαθέσιμο στο διαδίκτυο  
στη διεύθυνση:  
<http://www.hy2.gr/reference.php?item=216>

[75] hy2.gr, «Αυτοθερμική αναμόρφωση», διαθέσιμο στο διαδίκτυο  
στη διεύθυνση:  
<http://www.hy2.gr/reference.php?item=217>

[76] hy2.gr, «Απομάκρυνση μονοξειδίου του άνθρακα», διαθέσιμο  
στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:  
<http://www.hy2.gr/reference.php?item=218>

[77] hy2.gr, «Υπολογισμός τάσης ιδανικής κυψέλης καυσίμου»,  
διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:  
<http://www.hy2.gr/reference.php?item=230>

[78] hy2.gr, «Υπολογισμός ρυθμού παραγωγής θερμότητας»,  
διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:  
<http://www.hy2.gr/reference.php?item=231>

[79] Jonathan Day, Advanced Energy Research Lab, Department of Mechanical, Engineering, IUPUI, "Polymer Electrolyte Membrane, Fuel Cell (PEMFC) Test Lab ", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

[www.tkk.fi/Units/AES/studies/dis/mikkola.pdf](http://www.tkk.fi/Units/AES/studies/dis/mikkola.pdf)

[80] hy2.gr, «Απεικόνιση λειτουργίας κυψέλης καυσίμου με σκέδαση Νετρονίων», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.hy2.gr/reference.php?item=234>

[81] Wikipedia, "Hydrogen", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://wikipedia.cas.ilstu.edu/index.php/CGH2>

[82] ΤΕΕ Μήλου, «Μηχανές Εσωτερικής Καύσης Η<sub>2</sub>», διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://tee-milou.kyk.sch.gr/daidalos2005/MEKH2.htm>

[83] Pathfinder, "BMW Hydrogen 7", Δημοσίευση: 16 Φεβ. 2007, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://woman.pathfinder.gr/driving/257546.html>

[84] AUTO24, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.auto24.gr/html/ent/554/ent.15554.asp>

[85] H2Mobility.org, "Toyota forklift truck", διαθέσιμο στο διαδίκτυο

στη διεύθυνση:

[http://www.h2cars.de/4\\_utilitydata/u046.htm](http://www.h2cars.de/4_utilitydata/u046.htm)

[86] H2Mobility.org, "ARGEMUC-MAN fuel cell bus", διαθέσιμο στο

διαδίκτυο στη διεύθυνση:

[http://www.h2cars.de/2\\_busdata/b050.htm](http://www.h2cars.de/2_busdata/b050.htm)

[87] H2Mobility.org, "MAN - "Lion's City" bus ("Green Goal" - "HyFLEET:CUTE" - "IAA") ", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

[http://www.h2cars.de/2\\_busdata/b068.htm](http://www.h2cars.de/2_busdata/b068.htm)

[88] H2Mobility.org, "Submarine 214 class", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

[http://www.h2cars.de/6\\_shipdata/s017.htm](http://www.h2cars.de/6_shipdata/s017.htm)

[89] Germanischer Lloyd, "Willkommen in der Zukunft! – Der GL und die Brennstoffzellen-Technologie", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

[www.gl-group.com/brochurepdf/0D067.pdf](http://www.gl-group.com/brochurepdf/0D067.pdf)

[90] H2Mobility.org, "Zebotec", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

[http://www.h2mobility.org/6\\_shipdata/s032.htm](http://www.h2mobility.org/6_shipdata/s032.htm)

[91] Techon!, "NTT DoCoMo Speaks on Requirements of Fuel Cell for Mobile Devices", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

[http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS\\_EN/20060831/120661/](http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20060831/120661/)

[92] H2Mobility.org, "RES2H2", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://www.h2stations.org/overview/fillingdata/filling122.html>

[93] H2Mobility.org, "E-plane", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

[http://www.h2cars.de/7\\_aircraftdata/a025.htm](http://www.h2cars.de/7_aircraftdata/a025.htm)

[93] « Η οικονομία του υδρογόνου », διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

[www.ccs-net.gr/PDM/marnellos1.pdf](http://www.ccs-net.gr/PDM/marnellos1.pdf) )

[94] A. Jossen, J. Garche, H. Doering, M. Goetz, W. Knaupp, L. Joerissen, «Hybrid systems with lead–acid battery and proton-exchange membrane fuel cell», Journal of Power Sources 144 (2005) 395–401

[95] Fengzhen Chen\_, Neven Duic, Luis Manuel Alves, Maria da Grac-a Carvalho, «Renewislands—Renewable energy solutions for islands», Renewable and Sustainable Energy Reviews, December 2005

[96] P. Spath, M. Mann, «Life Cycle Assessment of Renewable Hydrogen Production via Wind/Electrolysis», Milestone Completion Report, February 2004

[97] E.I. Zouliasa, R. Glocknerb, N. Lymberopoulou, T. Tsoutsosa, e, I. Vosselerc, O. Gavaldac, H.J. Mydske, P. Taylord, « Integration of

hydrogen energy technologies in stand-alone power systems analysis of the current potential for applications», *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10 (2006) 432–462

[98] M.J. Khan \_, M.T. Iqbal, « Dynamic modeling and simulation of a small wind–fuel cell hybrid energy system», *Renewable Energy* 30 (2005) 421–439

[99] L. Ntziachristos, C. Kouridis, Z. Samaras, K. Pattas, «A wind-power fuel-cell hybrid system study on the non-interconnected Aegean islands grid», *Renewable Energy* 30 (2005) 1471–1487

[100] Thanaa F. El-Shatter, Mona N. Eskander, Mohsen T. El-Hagry, « Energy flow and management of a hybrid wind/PV/fuel cell generation system», *Energy Conversion and Management* 47 (2006) 1264–1280

[101] D.B. Nelson, M.H. Nehrir\_, C. Wang, « Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems», *Renewable Energy* August 2005

[102] E. Kasseris, Z. Samaras,\_, D. Zafeiris, «Optimization of a wind-power fuel-cell hybrid system in an autonomous electrical network environment», *Renewable Energy* December 2005

[103] Dae-Kyu Choi, Byoung-Kuk Lee, Se-Wan Choi, Chung-Yuen Won, Dong-Wook Yoo, «A novel power conversion circuit for cost-effective battery-fuel cell hybrid systems» *Journal of Power Sources* 152 (2005) 245–255

[104] <http://www.hydrogennow.org>

[105] <http://www.hydrogenus.org>

[106] <http://www.eere.energy.gov/RE/hydrogen.html>

[107] <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells>

[108] <http://www.hydrogenenergycenter.org>

[109] <http://www.eyeforfuelcells.com>

[110] <http://www.fuelcelltoday.com>

[111] <http://www.hfcletter.com>

[112] <http://www.nrel.gov/hydrogen>