



ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

Μόνιμη Επιτροπή Ενέργειας

Υπάρχουσες τεχνολογίες και τελικές χρήσεις του "καυσίμου του μέλλοντος" - H₂

*(Πόρισμα Ομάδας Εργασίας του ΤΕΕ/ΤΚΜ όπως εγκρίθηκε με την απόφαση
Α103/Σ8/23.03.2010 της Διοικούσας Επιτροπής)*



Μέλη Ομάδας Εργασίας

Σπυρίδων Βουτετάκης, Χ.Μ.

Ευθύμιος Κικκινίδης, Χ.Μ.

Γεώργιος Μαρνέλλος, Χ.Μ.

Λεωνίδας Ντζιαχρήστος, Μ.Μ.

Ιωάννης Παναπακίδης, Η.Μ.

Θεσσαλονίκη Μάρτιος 2010

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	4
1.1	Ανασκόπηση της παγκόσμιας ενεργειακής κατάστασης.....	4
1.2	Η ανάγκη για ένα νέο ενεργειακό μοντέλο	8
1.3	Γιατί H ₂	8
1.4	Διεθνείς δραστηριότητες για την προώθηση της οικονομίας H ₂	10
1.5	Στόχοι και δομή της εργασίας	16
2	Τεχνολογίες Παραγωγής H ₂	17
2.1	Εισαγωγικά στοιχεία.....	17
2.2	Υδρογόνο από ορυκτά καύσιμα	20
2.3	Υδρογόνο από την διάσπαση του νερού.....	27
2.4	Υδρογόνο από τη βιομάζα.....	35
2.5	Προοπτικές και εμπόδια για την παραγωγή H ₂	37
3	Αποθήκευση, Διανομή, Ασφάλεια H ₂	40
3.1	Εισαγωγικά στοιχεία.....	40
3.2	Αποθήκευση με συμπίεση	41
3.3	Αποθήκευση με υγροποίηση	43
3.4	Αποθήκευση σε προηγμένα υλικά.....	45
3.5	Μεταφορά και διανομή H ₂	48
3.6	Ασφάλεια χρήσης	50
4	Κυψέλες Καυσίμου.....	53
4.1	Εισαγωγικά στοιχεία.....	53
4.2	Λειτουργία και απόδοση.....	56
4.3	Τύποι κυψελών καυσίμου.....	61
4.4	Τεχνο-οικονομική αξιολόγηση των κυψελών καυσίμου.....	71
5	Εφαρμογές Συστημάτων H ₂	81
5.1	Στατικές εφαρμογές παραγωγής ισχύος	81
5.2	Μεταφορές.....	83
5.3	Μικροσυστήματα παραγωγής ενέργειας	91
5.4	Οικιακά συστήματα ενέργειας.....	93
5.5	Άλλες εφαρμογές.....	93
6	Σύνοψη και Συμπεράσματα	95
6.1	Ενεργειακή θεώρηση και η συμμετοχή του H ₂	95
6.2	Παραγωγή.....	95
6.3	Αποθήκευση και διανομή	96
6.4	Χρήση και εφαρμογές	97
6.5	Σενάρια διεξόδου H ₂	98
7	Βιβλιογραφία	100
	Παράρτημα Α	107
	Παράρτημα Β	116

1 Εισαγωγή

1.1 Ανασκόπηση της παγκόσμιας ενεργειακής κατάστασης

Στην σύγχρονη εποχή η παγκόσμια κοινότητα καλείται να επιλύσει δύο σημαίνοντα ενεργειακά ζητήματα, αυτό του ανεπαρκούς και ανασφαλούς ενεργειακού εφοδιασμού υπό οικονομικά πλαίσια και των δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων λόγω της έντονης εκμετάλλευσης των ενεργειακών πόρων. Η ενθύμηση του ουσιώδους ρόλου που διαδραματίζει η ενέργεια στην οικονομική ανάπτυξη και εν γένει στην προαγωγή του ανθρώπινου πολιτισμού προήλθε σχετικά πρόσφατα, μέσω των αυξήσεων των τιμών στην παραγωγή και κατανάλωση της ενέργειας αλλά και μέσω γεωπολιτικών γεγονότων. Η ασφαλής προμήθεια της ενέργειας είναι καίριο θέμα στις διεθνείς πολιτικές ατζέντες. Η εξασφάλιση της ασφάλειας στον εφοδιασμό με την ταυτόχρονη ελάττωση των περιβαλλοντικών παρεμβάσεων απαιτεί την συνδυασμένη αρωγή των κυβερνήσεων και των πολιτών.

Η ενεργειακή κατανάλωση σχετίζεται με τους ακόλουθους παράγοντες:

- την αύξηση του πληθυσμού
- την οικονομική ανάπτυξη
- τη μείωση των αποθεμάτων των φυσικών καυσίμων
- τις συνέπειες της παρέμβασης του ανθρώπου στο περιβάλλον

Σύμφωνα με μελέτη του Οργανισμού των Ηνωμένων Εθνών, το έτος 2005 ο παγκόσμιος πληθυσμός έφτανε τα 6,4 δις ενώ οι προβλέψεις θέλουν να προσεγγίζει τα 8,2 δις το έτος 2030, σημειώνοντας μέση ετήσια αύξηση ~1%. Το μεγαλύτερο μερίδιο της αύξησης αντιστοιχεί στις αναπτυσσόμενες χώρες, από τα 4,9 δις του 2005 στα 6,6 δις του 2030. Ο αριθμός των κατοίκων των δύο χωρών που θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην αγορά ενέργειας και κατ' επέκταση στην παγκόσμια οικονομία, της Κίνας και της Ινδίας, αναμένεται να φτάσει τα 1,46 δις και 1,09 δις, αντίστοιχα.

Ο κύριος παράγοντας που αυξάνει την ζήτηση για ενεργειακές υπηρεσίες είναι η αύξηση του Εθνικού Ακαθάριστου Προϊόντος (Gross Domestic Product, GDP). Κατά την διάρκεια των τριών τελευταίων δεκαετιών, η ενεργειακή ζήτηση έτεινε σε ευθεία γραμμική αύξηση με το GDP. Από το 1990 και έπειτα, η εξάρτηση αυτή μεταβλήθηκε: μία αύξηση του GDP κατά 1% σήμαινε αύξηση κατά 0,5% στην ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια, η ζήτηση αυξάνεται με μικρότερο βαθμό σε σχέση με αυτή του GDP, κυρίως λόγω θερμότερου κλίματος στο βόρειο ημισφαίριο, αλλά και την ενεργειακή βελτίωση των συσκευών με τεχνολογικά μέτρα.

Παρόλη την αύξηση της τιμής του πετρελαίου από το 2002 και μετά, οι οικονομίες των περισσότερων χωρών συνέχισαν να αναπτύσσονται. Το παγκόσμιο GDP αναμένεται να

αυξηθεί κατά 3,6% ετησίως στην περίοδο 2004-2030. Οι αναπτυσσόμενες Ασιατικές χώρες αναμένεται να έχουν μεγαλύτερο ρυθμό ανάπτυξης σε σχέση με τις υπόλοιπες σε παγκόσμια κλίμακα, ενώ ακολουθούν η Μέση Ανατολή και η Αφρική. Η χώρα με την μεγαλύτερη ανάπτυξη αναμένεται να είναι η Κίνα με ετήσιο ποσοστό της τάξεως του 5,5% ετησίως. Το εισόδημα ανά κεφαλή (income per capita) αναμένεται να αυξηθεί κατά 2,6% ανά έτος. Στις αναπτυσσόμενες χώρες και κυρίως στην Κίνα, η αντίστοιχη αύξηση είναι 5,6%.

Σύμφωνα με εκτιμήσεις της International Energy Agency (IEA, 2006), κατά την περίοδο 2005-2030 η παγκόσμια ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας εμφανίζει ετήσιο ρυθμό αύξησης 1,8%. Η ζήτηση κατά το έτος 2005 έφτανε τα 11,4 δις τόνους ισοδύναμου πετρελαίου και υπάρχει η πρόβλεψη που θέλει να προσεγγίζει τα 17,7 δις το έτος 2030. Ο Πίνακας 1-1 παρουσιάζει την παγκόσμια ζήτηση για πρωτογενή ενέργεια ανά καύσιμο.

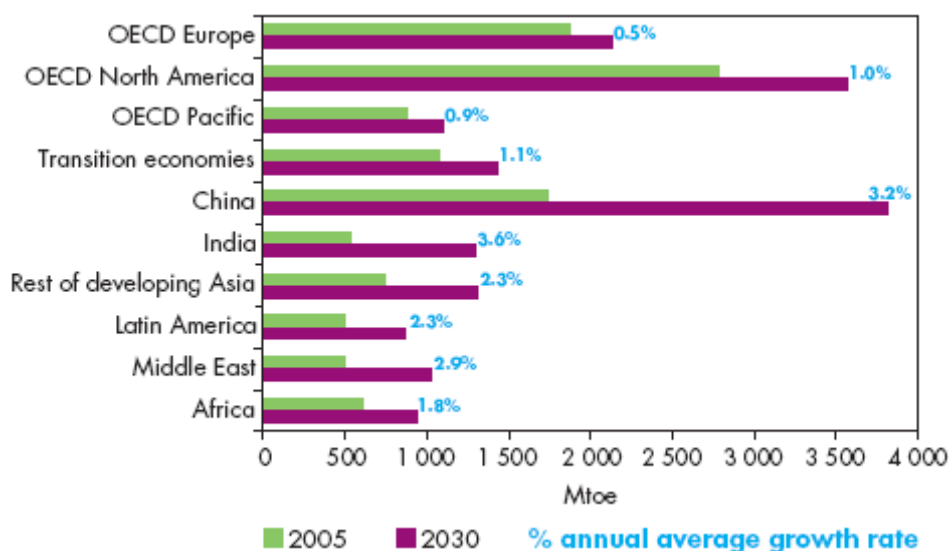
Πίνακας 1-1: Ζήτηση ενέργειας ανά καύσιμο σε Mtoe (IEA, 2006).

	1980	2000	2005	2015	2030	2005-2030*
Coal	1 786	2 292	2 892	3 988	4 994	2.2%
Oil	3 106	3 647	4 000	4 720	5 585	1.3%
Gas	1 237	2 089	2 354	3 044	3 948	2.1%
Nuclear	186	675	721	804	854	0.7%
Hydro	147	226	251	327	416	2.0%
Biomass and waste	753	1 041	1 149	1 334	1 615	1.4%
Other renewables	12	53	61	145	308	6.7%
Total	7 228	10 023	11 429	14 361	17 721	1.8%

Παρατηρούμε ότι τα ορυκτά καύσιμα, πετρέλαιο, φυσικό αέριο και άνθρακας, συνεχίζουν να είναι η κύρια πηγή πρωτογενούς ενέργειας. Το πετρέλαιο συνεχίζει να έχει το μεγαλύτερο μερίδιο παρά την μικρή ποσοστιαία αύξηση του, από 81% του 2005 στο 82% το 2030. Τα μερίδια του άνθρακα και του φυσικού αερίου μεταβάλλονται από 25% σε 28% και 21% σε 22%, αντίστοιχα. Αυτή η αύξηση στην χρήση των φυσικών καυσίμων θα έχει ως συνέπεια την αύξηση των εκπομπών του CO₂ κατά 57% για την περίοδο 2005-2030, αν φυσικά δεν ληφθούν υπ' όψιν μέτρα για το περιορισμό αυτών. Μικρότερους ρυθμούς αύξησης της κατανάλωσης εμφανίζουν κάποιες από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως π.χ. η βιομάζα.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι Κίνα και η Ινδία, αναμένεται να έχουν σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια αγορά ενέργειας. Αποτελούν δε τις χώρες με την μεγαλύτερη ενεργειακή ζήτηση. Πιο συγκεκριμένα, για την περίοδο 2005-2030, κατέχουν το 45% της συνολικής αύξησης στην χρήση της ενέργειας. Στην Εικόνα 1-1 παρουσιάζεται η ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας ανά περιοχή. Οι μεταβατικές οικονομίες έχουν μερίδιο 6%, ενώ οι χώρες του Ο.Ο.Σ.Α. περίπου 20%. Μετά το 2010, η Κίνα θα είναι η χώρα με την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας αφήνοντας τις Η.Π.Α. στην αμέσως επόμενη

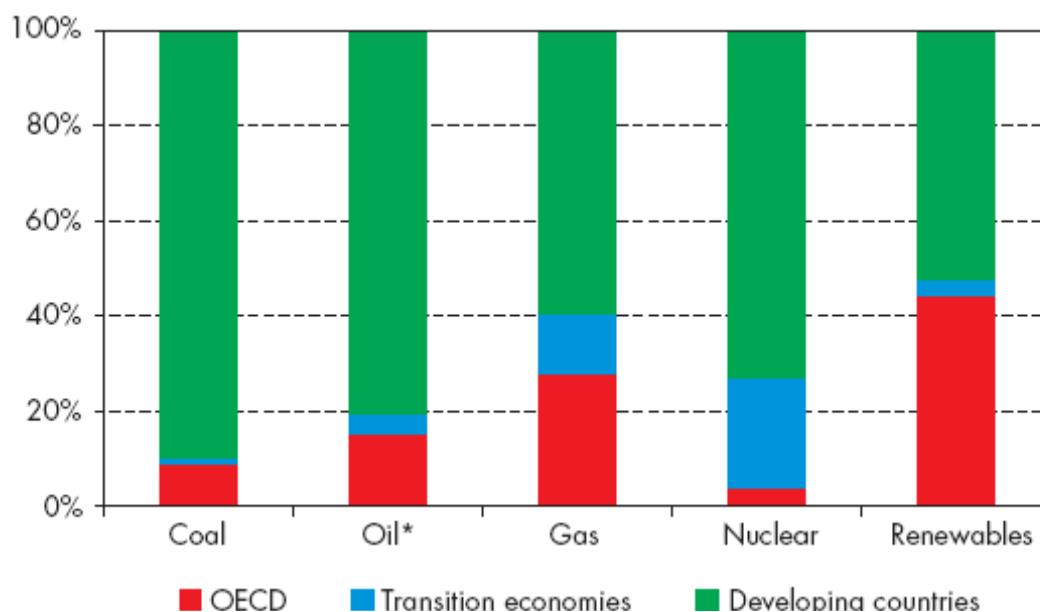
θέση. Οι αναπτυσσόμενες χώρες θα κατέχουν το 47% της παγκόσμιας ζήτησης το 2015 και περισσότερο από το 50% το 2030, σε σύγκριση με το σημερινό 41%. Το μερίδιο των χωρών Ο.Ο.Σ.Α. πέφτει από το σημερινό 48% σε 43% το 2015 και σε 38% το 2030. Τα ποσοστά κάθε κατηγορίας χωρών (χώρες Ο.Ο.Σ.Α., αναπτυσσόμενες και μεταβατικές οικονομίες) στην αύξηση της ζήτησης ανά καύσιμο φαίνεται στην Εικόνα 1-2.



Εικόνα 1-1: Ποσοστό αύξησης της ζήτησης πρωτογενούς ενέργειας (IEA, 2006).

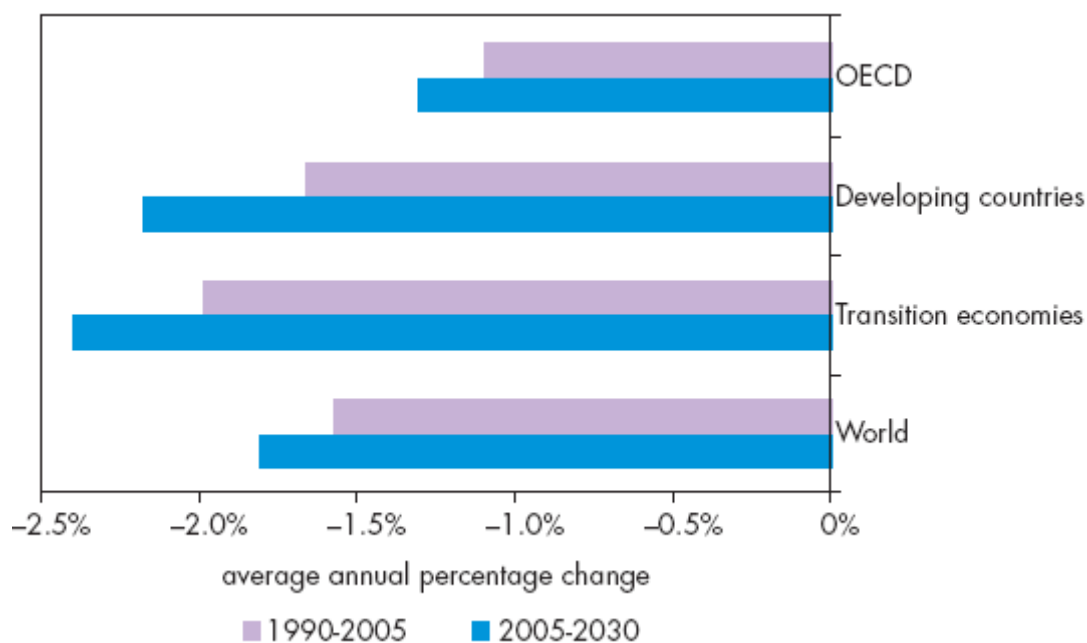
Οι αναπτυσσόμενες χώρες κατέχουν το μεγαλύτερο μερίδιο σε κάθε κατηγορία καυσίμου εκτός από τις ανανεώσιμες που δεν περιλαμβάνουν υδροηλεκτρική ενέργεια. Το μερίδιο των αναπτυσσόμενων χωρών είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην πυρηνική ενέργεια αλλά και στην εκμετάλλευση του άνθρακα λόγω της ιδιαίτερης προτίμησης σε αυτό από την Κίνα και την Ινδία. Το έτος 2030 το μερίδιο των δύο προαναφερθέντων χωρών φτάνει το 60% σε σχέση με το 45% του έτους 2005. Σε ό,τι αφορά την κατανάλωση του πετρελαίου, αναμένεται μια αύξηση στην ζήτηση κατά 32 εκ. βαρελιών εκ των οποίων τα 25 αντιστοιχούν στις Κίνα και Ινδία.

Σχετικά με τον δείκτη ενεργειακής έντασης (energy intensity) της παγκόσμιας ζήτησης πρωτογενούς ενέργειας αναμένεται μία μέση πτώση κατά 1.8% στην περίοδο 2005-2030 σε σχέση με το 1,6% της περιόδου 1990-2005 (Εικόνα 1-3).



Εικόνα 1-2: Συμμετοχή των χωρών στην ζήτηση ανά καύσιμο. (Χώρες ΟΟΣΑ με κόκκινο, μεταβατικές οικονομίες με μπλε, αναπτυσσόμενες χώρες με πράσινο) (IEA, 2006).

Αιτία αυτού του γεγονότος είναι η ταχύτερη οικονομική αλλαγή από την βαριά οικονομία προς μια άλλη που περιλαμβάνει δραστηριότητες μικρότερου δείκτη ενεργειακής έντασης.



Εικόνα 1-3: Δείκτης ενεργειακής έντασης της πρωτογενούς ενέργειας (IEA, 2006).

Καθώς η θερμική απόδοση των μονάδων είναι ο βασικός παράγοντας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ο δείκτης είναι χαμηλότερος στις αναπτυσσόμενες χώρες.

Η προηγούμενη ανάλυση δείχνει ότι η πρόβλεψη για τις παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες είναι ότι αυτές αυξάνονται ταχύτατα, κυρίως λόγω της αύξησης του GDP των αναπτυσσόμενων οικονομικών (Κίνα, Ινδία) και του σχετικά χαμηλού βαθμού ενεργειακής τους απόδοσης. Έως το 2030, οι απαιτήσεις αυτές θα συνεχίσουν να ικανοποιούνται κατά κύριο λόγο από κατανάλωση ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, άνθρακας, αέριο). Η εξέλιξη αυτή θα έχει αρνητικές συνέπειες με επιτάχυνση της κλιματικής αλλαγής, περαιτέρω επιδείνωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, και τάχιστα μείωση των ενεργειακών αποθεμάτων.

1.2 Η ανάγκη για ένα νέο ενεργειακό μοντέλο

Στις επόμενες δεκαετίες, τα σημαντικότερα ζητήματα που καλούνται να αντιμετωπιστούν από τη διεθνή ενεργειακή πολιτική και τις αντίστοιχες βιομηχανικές και τεχνολογικές καινοτομίες είναι τα εξής: η αναμενόμενη εξάντληση των πετρελαϊκών αποθεμάτων, η εξασφάλιση της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού, η αντιστροφή της κλιματικής αλλαγής και η προστασία του περιβάλλοντος, η κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών και η δημιουργία μίας νέας βιομηχανικής και τεχνολογικής ενεργειακής βάσης που να αποβλέπει στην οικονομική ευμάρεια. Επομένως νέα ενεργειακά μοντέλα και πηγές ή φορείς ενέργειας θα πρέπει να αξιοποιηθούν σε ευρύτατο βαθμό.

1.3 Γιατί H₂;

Οι νέες πηγές και φορείς ενέργειας θα πρέπει να είναι σε θέση να εγγυηθούν ένα αειφόρο, ασφαλές και φιλικό προς το περιβάλλον ενεργειακό σύστημα. Το υδρογόνο εμφανίζει μία σειρά σχετικών πλεονεκτημάτων:

- Ασφάλεια ενεργειακού εφοδιασμού: Το υδρογόνο είναι ένας μη ρυπογόνος φορέας ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από πρωτογενής πηγές, από πυρηνική ενέργεια αλλά και από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτή η ποικιλότητα των μεθόδων παραγωγής συνδράμει στην ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού. Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κεντρικές και αποκεντρωμένες ή αυτόνομες εφαρμογές για παραγωγή ενέργειας.
- Προστασία του περιβάλλοντος: Η χρήση του συνοδεύεται από πολύ χαμηλές (καύση) έως και μηδενικές εκπομπές ρύπων (κυψέλες καυσίμου).
- Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου: το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από πηγές χωρίς την καύση άνθρακα (ανανεώσιμες) ή από ορυκτά καύσιμα εφαρμόζοντας μεθόδους κατακράτησης και αποθήκευσης του άνθρακα (Carbon Dioxide Capture and Storage, CCS).

- Οικονομική ανάπτυξη: η ανάπτυξη της αγοράς ενεργειακών συστημάτων που χρησιμοποιούν το υδρογόνο συνεπάγεται την οικονομική ανάπτυξη και την αειφορία κυρίως σε αναπτυσσόμενες χώρες.

Ο όρος “οικονομία υδρογόνου” εμφανίστηκε για πρώτη φορά το 1973 και εννοεί τη χρήση του H_2 προς πλήρη ή τουλάχιστον σημαντική αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων. Σε αυτό το πλαίσιο βέβαια, το H_2 είναι φορέας ενέργειας και όχι πρωτογενής πηγή. Η πρωτογενής πηγή που θα παράγει το H_2 θα πρέπει να είναι είτε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είτε η πυρηνική. Διεργασίες, βασιζόμενες σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που μπορούν να οδηγήσουν σε παραγωγή υδρογόνου είναι η μετατροπή της βιομάζας, και η ηλεκτρολυτική, βιοφωτολική ή θερμοχημική διάσπαση του νερού.

Η μετάβαση στην οικονομία υδρογόνου, πέρα από πολιτικές αποφάσεις, απαιτεί την αντιμετώπιση διάφορων τεχνικοοικονομικών θεμάτων, με τα σημαντικότερα να είναι τα ακόλουθα:

- Πρώτον, τα επιμέρους τμήματα του δικτύου υποδομής (σημεία παραγωγής, δίκτυο μεταφοράς, μονάδες μετατροπής σε άλλες μορφές ενέργειας) θα πρέπει να συνδεθούν μεταξύ τους και να λειτουργούν με εύρωστο τρόπο, αντίστοιχο με το υφιστάμενο δίκτυο φυσικών καυσίμων και ηλεκτρισμού.
- Δεύτερον, το υδρογόνο ως ενεργειακός φορέας θα πρέπει να είναι σε θέση να αποδείξει ότι είναι οικονομικά ανταγωνιστικός. Αν και το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις μεταφορές, στην παραγωγή ηλεκτρισμού και στα καταναλωτικά ηλεκτρονικά, στην παρούσα στιγμή, δεν μπορεί να συναγωνιστεί σε ζητήματα κόστους, αποδοτικότητας και αξιοπιστίας τις συμβατικές τεχνολογίες και να τις αντικαταστήσει σταδιακά.

Προφανώς, για την υπέρβαση αυτών των εμποδίων απαιτείται κατάλληλος πολιτικός σχεδιασμός. Μέσω ρυθμίσεων και ενισχύσεων θα πρέπει να διαμορφωθεί το κατάλληλο περιβάλλον για τη σύναψη εταιρικών συνεργασιών που θα αποβλέπουν στην καθιέρωση και εμπορευματοποίηση της τεχνολογίας. Δεύτερον, θα πρέπει να υποστηριχθεί ο τομέας έρευνας και ανάπτυξης για την ανάπτυξη τεχνολογιών που σχετίζονται με το υδρογόνο, με τη σύμπραξη πανεπιστημίων και μικρών και μεσαίων επιχειρήσεων (small and medium enterprises, SMEs). Τρίτον, θα πρέπει να αξιοποιηθεί και να επεκταθεί το υπάρχον δίκτυο φυσικού αερίου, καθώς η αναμόρφωσή του είναι μια άμεσα διαθέσιμη μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου. Επίσης, το υφιστάμενο δίκτυο μεταφοράς και διανομής του φυσικού αερίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διάθεση του υδρογόνου στην τελική χρήση.

Η μετάβαση σε μία οικονομία υδρογόνου αναμένεται να αλλάξει κατά θεμελιώδη τρόπο τις οικονομικές ισορροπίες σε παγκόσμια κλίμακα, απαιτώντας νέες συνεργασίες και συνεταιρισμούς μεταξύ κυβερνήσεων, εταιρείες που δραστηριοποιούνται στην βιομηχανία των μεταφορών και περιβαλλοντικών οργανώσεων.

1.4 Διεθνείς δραστηριότητες για την προώθηση της οικονομίας H₂

1.4.1 Δράσεις της Διεθνούς Υπηρεσίας Ενέργειας

Η IEA έχει εφαρμόσει ήδη από το 1977, τη συμφωνία Hydrogen Implementing Agreement (IEA, 2009), με σκοπό τη διασφάλιση της συνεργασίας στην έρευνα και την ανάπτυξη αλλά και την ανταλλαγή τεχνογνωσίας μεταξύ των συμμετεχόντων μελών (Η.Π.Α., Ε.Ε., Ιαπωνία, Αυστραλία, κ.α.). Η ΗΙΑ οραματίζεται ένα μέλλον με αειφόρο ενεργειακό εφοδιασμό που να χρησιμοποιεί το υδρογόνο, το οποίο θα έχει επίδραση σε πολλούς τομείς της παγκόσμιας οικονομίας. Οι αντικειμενικοί στόχοι της ΗΙΑ κατηγοριοποιούνται στις ακόλουθες κατηγορίες:

Τεχνολογία: η προώθηση της χρήσης του υδρογόνου ως φορέα ενέργειας, μέσω των εξής δράσεων:

- Η έρευνα και ανάπτυξη για την άρση των εμποδίων προς την καθολική αποδοχή του υδρογόνου.
- Η ανάπτυξη αποδοτικών, ασφαλών και οικονομικών συστημάτων αποθήκευσης του υδρογόνου
- Η παρουσίαση ολοκληρωμένων συστημάτων υδρογόνου
- Η συλλογή και η ανάλυση διάφορων τεχνολογιών που χρησιμοποιούν το υδρογόνο

Ενεργειακή ασφάλεια: η συνεισφορά στη διεθνή ενεργειακή ασφάλεια, μέσω των εξής δράσεων:

- Παροχή αρωγής σε αναπτυσσόμενες χώρες στην αξιοποίηση ενδογενών πηγών για παραγωγή υδρογόνου
- Προώθηση της μετάβασης από συστήματα που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα σε αειφόρα συστήματα βασισμένα στο υδρογόνο.

Περιβάλλον: ανάδειξη των πλεονεκτημάτων του υδρογόνου σχετικά με το περιβάλλον, μέσω των εξής δράσεων:

- Δράσεις E&A σχετικά με τη παραγωγή H₂ από ΑΠΕ
- Προώθηση του υδρογόνου ως “καθαρό” καύσιμο
- Δράσεις E&A για την απανθράκωση του ορυκτών καυσίμων

Οικονομία: ανάπτυξη οικονομικά ανταγωνιστικών ενεργειακών συστημάτων στις διεθνείς αγορές, μέσω των εξής δράσεων:

- Ανάπτυξη εργαλείων για την αξιολόγηση και βελτιστοποίηση των συστημάτων που χρησιμοποιούν υδρογόνο
- Ενθάρρυνση της βιομηχανίας για συμμετοχή στις δράσεις ΗΙΑ

Εμπόριο: αναγνώριση και υπερνίκηση των εμποδίων της ενσωμάτωσης του υδρογόνου στην αγορά ενέργειας και στην αγορά καυσίμων, μέσω των εξής δράσεων:

- Συμβολή στην εφαρμογή επικυρωμένων κωδίκων και προτύπων

- Προώθηση του δικτύου τροφοδοσίας, αποθήκευσης και χρήσης του H_2
- Προώθηση τεχνολογιών που οδηγούν σε αυξημένη διείσδυση του H_2 στην αγορά
- Προώθηση εκπαιδευτικών και ενημερωτικών δραστηριοτήτων σχετικά με θέματα ασφάλειας

Ανάπτυξη: προώθηση των τεχνολογιών του υδρογόνου με σημαντικά τοπικά και διεθνή πλεονεκτήματα, μέσω των εξής δράσεων:

- Διεξαγωγή εξειδικευμένων μελετών για αναπτυσσόμενες χώρες
- Παροχή σχεδιαστικής υποστήριξης για επιδείξεις των τεχνολογιών του H_2

Προώθηση: διαφήμιση των πλεονεκτημάτων του υδρογόνου, μέσω των εξής δράσεων:

- Ενθάρρυνση δημόσιων και ιδιωτικών οργανισμών για μεγαλύτερη συμμετοχή ιδιωτικών και δημόσιων οργανισμών στις δράσεις της ΗΙΑ
- Χρήση πολυμέσων στην εκπαιδευτική δραστηριότητα σχετικά με το υδρογόνο
- Προώθηση προγραμμάτων E&A με στόχο την συνεργασία διεθνών φορέων

Ενδεικτικές δράσεις της ΗΙΑ που έχουν ολοκληρωθεί περιλαμβάνουν τη φωτοβιολογική παραγωγή H_2 (Δράση 15), την αποθήκευση H_2 σε στέρεα και υγρή κατάσταση (Δράση 17), την αξιολόγηση ολοκληρωμένων συστημάτων (Δράση 18), την ανάπτυξη βασικών και εφαρμοσμένων υλικών αποθήκευσης (Δράση 22), κ.α. Η Ελλάδα συμμετείχε στις δράσεις 18 και 22 μέσω του Κ.Α.Π.Ε.

1.4.2 Δράσεις στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Είναι γνωστό ότι η ερευνητική δραστηριότητα στην Ευρώπη συντηρείται και κατευθύνεται σε μεγάλο βαθμό από Προγράμματα-Πλαίσια (ΠΠ). Κατά τη περίοδο 1984-2002 ολοκληρώθηκαν πέντε ΠΠ, που χρηματοδότησαν σε ικανοποιητικό βαθμό την E&A για τις τεχνολογίες H_2 (8 Μ€ στο 2^ο ΠΠ, 23 8 Μ€ στο 3^ο ΠΠ, 58 Μ€ στο 4^ο ΠΠ, και 145 Μ€ στο 5^ο ΠΠ). Η σχετική έρευνα ενισχύθηκε στο 6^ο ΠΠ (2002-2006) με 300 Μ€. Στόχος του 6^{ου} ΠΠ ήταν η υποστήριξη ενός αριθμού τεχνολογιών για κυψέλες καυσίμου και παραγωγή H_2 , τόσο σε ό,τι αφορά την έρευνα, την ανάπτυξη αλλά και δράσεις επίδειξης. Τα έργα που χρηματοδοτήθηκαν από το 6^ο ΠΠ κάλυπταν ένα ευρύ φάσμα θεμάτων όπως υλικά και στοιχεία για κυψέλες καυσίμου, παραγωγή και αποθήκευση υδρογόνου και επίδειξη των τεχνολογιών υπό πραγματικές λειτουργικές συνθήκες. Επίσης υποστηρίχθηκαν και παράλληλες δράσεις σχετικές με την κοινωνικοοικονομική έρευνα, την κατάρτιση οδικών χαρτών και ενεργειακών στρατηγικών (EC, 2003; 2006α). Η κατανομή του προϋπολογισμού στις διάφορες περιοχές ήταν:

-
- Αξιολόγηση και επίδειξη (16.8%)
 - Σταθερές και κινητές εφαρμογές (8.0%)
 - Εφαρμογές στις μεταφορές (19.3%)
 - Βασική έρευνα στις κυψέλες καυσίμου-χαμηλές θερμοκρασίες (8.1%)
 - Βασική έρευνα στις κυψέλες καυσίμου-υψηλές θερμοκρασίες (6.5%)
 - Κοινωνικοοικονομική ανάλυση (8.8%)
 - Ασφάλεια, ρυθμιστικό πλαίσιο, τεχνικοί κανονισμοί και κώδικες (4.9%)
 - Αποθήκευση του υδρογόνου (8.1%)
 - Παραγωγή και διανομή του υδρογόνου (19.3%)

Παράλληλα με τα προγράμματα-πλαίσια, δημιουργήθηκε σε υψηλότερο επίπεδο μια ευρωπαϊκή πλατφόρμα για την Τεχνολογία Υδρογόνου και Κυψελών Καυσίμου (European Hydrogen and Fuel Cell Technology Partnership – EC, 2006β) με συντονιστικό ρόλο. Η Πλατφόρμα έχει ως στόχο τη διευκόλυνση και την επίσπευση της ανάπτυξης και διάδοσης τεχνολογιών υδρογόνου και κυψελών καυσίμου ανταγωνιστικού κόστους, οι οποίες θα συνεισφέρουν στη δημιουργία ενός συστήματος αειφόρου ενέργειας για το μέλλον. Ο πυρήνας της Πλατφόρμας περιλαμβάνει όλες τις παρούσες δραστηριότητες που χρηματοδοτούνται από την ΕΕ στον τομέα των τεχνολογιών υδρογόνου και κυψελών καυσίμου (όπως έργα, πρωτοβουλίες, δίκτυα και δομές). Στόχος είναι η ένταξη εθνικών, περιφερειακών και τοπικών έργων και πρωτοβουλιών εντός του πλαισίου της.

Στις προτεραιότητες των θεμάτων που συντονίζει η πλατφόρμα, βρίσκεται καταρχήν η δημιουργία ενός ρυθμιστικού πλαισίου και των τεχνικών κανονισμών και κωδίκων για εφαρμογή του H_2 στο μεταφορικό τομέα και σε στατικές εφαρμογές. Σε ό,τι αφορά την παραγωγή και αποθήκευση υδρογόνου, τα θέματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι το υψηλό κόστος παραγωγής από ΑΠΕ (3-8 φορές υψηλότερο από τα συμβατικά καύσιμα και το υψηλό κόστος διανομής. Επίσης υποστηρίζεται η ανάπτυξη κυψελών καυσίμου χαμηλού κόστους οι οποίες όμως να έχουν υψηλή διάρκεια ζωής (~45000 ώρες λειτουργίας) καθώς και η έρευνα για αποδοτική αποθήκευση H_2 υπό πίεση. Στο Παράρτημα Α περιγράφονται τα έργα στην περιοχή του H_2 που χρηματοδοτήθηκαν στο 6^ο ΠΠ.

Από το 2007, ταυτόχρονα με την έναρξη του 7^{ου} ΠΠ, ιδρύθηκε στην Ευρωπαϊκή Κοινότητα ένα Joint Technology Initiative για το υδρογόνο και τις κυψέλες καυσίμου. Αποτέλεσμα αυτού ήταν η δημιουργία του Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) τον Μάιο του 2008 με διάρκεια έως το 2017, προϋπολογισμό 450 Μ€ και στρατηγικούς στόχους:

- Την τοποθέτηση της Ευρώπης στη κορυφή της παγκόσμιας κλίμακας σχετικά με τις τεχνολογίες του υδρογόνου και ενθάρρυνση πιθανών καινοτομιών στην αγορά, έτσι ώστε οι φορείς της αγοράς να επωμιστούν οφέλη.

- Τη συντονισμένη υποστήριξη της E&A στις συμμετέχοντες χώρες του FP7.
- Την προώθηση συμπληρωματικών τεχνολογιών του υδρογόνου έτσι ώστε να αναδειχθεί η αειφορία και η οικονομική ανταγωνιστικότητα.
- Την ενημέρωση του κοινού σχετικά με το πώς οι τεχνολογίες του υδρογόνου επιδρούν σε θέματα ενεργειακής επάρκειας και προστασίας του περιβάλλοντος.
- Τη διασφάλιση του αποδοτικού καταμερισμού των κονδυλίων των δράσεων E&A.

Οι στόχοι εξειδικεύονται για κάθε μία από τέσσερις θεματικές περιοχές: Μεταφορές και δίκτυο ανεφοδιασμού, παραγωγή και διανομή υδρογόνου, παραγωγή ηλεκτρισμού και συμπαραγωγή, πρώιμες αγορές. Οι επιμέρους δράσεις που χρηματοδοτούνται σε κάθε θεματική περιοχή είναι κοινές, δηλαδή (α) καινοτόμα έρευνα, (β) έρευνα και τεχνολογική ανάπτυξη, (γ) έργα επίδειξης και (δ) έργα υποστήριξης. Έργα που υποστηρίζονται από το 7^ο ΠΠ εμφανίζονται στο Παράρτημα Β.

1.4.3 Δράσεις στην Ελλάδα

Η πρώτη σημαντική κίνηση στο τομέα του H₂ στην Ελλάδα υπήρξε η ίδρυση το 2003 της Ελληνικής Εταιρείας Υδρογόνου (ΕΛΕΤΥ, 2010). Η ΕΛΕΤΥ είναι επιστημονικός μη κερδοσκοπικός οργανισμός με στόχο τη συνδρομή στις προσπάθειες για την εφαρμογή τεχνολογιών υδρογόνου στην Ελλάδα, φέρνοντας σε συνεργασία το επιστημονικό, τεχνολογικό και επιχειρηματικό δυναμικό. Στο πλαίσιο αυτό, οι δράσεις της ΕΛΕΤΥ επικεντρώνονται στη συλλογή και διάχυση πληροφοριών σχετικά με τις τεχνολογίες H₂, στις ανταλλαγές επιστημόνων μεταξύ φορέων, και στη συμμετοχή της σε δράσεις εκπαίδευσης και επιμόρφωσης του επιστημονικού δυναμικού της χώρας. Η ΕΛΕΤΥ έχει διοργανώσει τρία Εθνικά συνέδρια για τις τεχνολογίες H₂.

Το 2006 ιδρύθηκε η Ελληνική Τεχνολογική Πλατφόρμα Υδρογόνου και Κυψελών Καυσίμου (ΚΑΠΕ, 2006), μετά από πρωτοβουλία του Υπουργείου Ανάπτυξης, με στόχο την προώθηση της οικονομίας Υδρογόνου για τη βιώσιμη ανάπτυξη της χώρας. Στην Ελληνική Πλατφόρμα Υδρογόνου συμμετέχουν όλοι οι φορείς (ερευνητικά κέντρα, πανεπιστήμια, βιομηχανία, ανεξάρτητες αρχές, μη κερδοσκοπικοί οργανισμοί) που ασχολούνται με το υδρογόνο και τις κυψέλες καυσίμου στη χώρα. Η Πλατφόρμα αποτελείται από τέσσερις ομάδες εργασίας: Παραγωγή, Αποθήκευση και Διανομή, Εφαρμογές και Κοινωνικο-οικονομικά θέματα του H₂. Το πρώτο παραδοτέο της Πλατφόρμας ήταν ο Ελληνικός Οδικός Χάρτης για το Υδρογόνο και τις Κυψέλες Καυσίμου (ΚΑΠΕ, 2007).

Κατά τη διάρκεια του 1^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Τεχνολογιών Υδρογόνου που διεξήχθη στην Αθήνα το 2004, η Ελληνική ερευνητική κοινότητα στο χώρο του υδρογόνου, με συντονιστή το Κ.Α.Π.Ε., συμφώνησε να επικεντρώσει τις προσπάθειες της στην προετοιμασία πρότασης έργου με θέμα “τη δημιουργία Ελληνικού Νησιού Υδρογόνου” που θα υποβαλλόταν στο πλαίσιο της “Ευρωπαϊκής Πρωτοβουλίας για Ανάπτυξη”. Το νησί μου επιλέχτηκε για την υλοποίηση του έργου ήταν η Μήλος (ΕΝΥ, 2010).

Το έργο που θα υλοποιηθεί στη Μήλο αφορά την ανάπτυξη, εφαρμογή και διάδοση τεχνολογιών παραγωγής, αποθήκευσης, διανομής και χρήσης υδρογόνου σε όλους τους τομείς της ενέργειας, δηλαδή την ηλεκτροδότηση, την θέρμανση και τις μεταφορές. Στόχος του έργου θα είναι η κάλυψη ουσιαστικού μέρους των ανωτέρω τομέων με ενέργεια που θα προέλθει από τεχνολογίες υδρογόνου, και ειδικότερα το 10% της ηλεκτρικής ενέργειας, το 5% της ενέργειας για θέρμανση και το 5% της ενέργειας για μεταφορές. Η παραγωγή του υδρογόνου θα προέρχεται από τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις Α.Π.Ε. μέσω ηλεκτρόλυσης, από προγραμματιζόμενες εγκαταστάσεις Α.Π.Ε. που πρόκειται να δημιουργηθούν στα πλαίσια του έργου και από εισαγωγή βιοκαυσίμων στο νησί. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των υπό ένταξη μονάδων Α.Π.Ε. θα είναι 3 MW και θα αντιστοιχεί σε αιολικές μονάδες και μονάδες γεωθερμίας. Επιπλέον, η εγκατεστημένη ισχύς των ηλεκτρολυτών θα είναι 3 MW με εκτιμώσα ετήσια παραγωγή υδρογόνου τα 1.600.000 Nm³. Προβλέπεται και η χρήση κυψελών καυσίμων 500 kW με καύσιμο υδρογόνο ή βιοκαύσιμα.

Η αποθήκευση του υδρογόνου θα καλυφθεί κυρίως από δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου σε αέρια μορφή. Η διανομή του υδρογόνου θα γίνει μέσω περιορισμένου δικτύου ή φιαλών όσον αφορά τη χρήση σε κτίρια ή μέσω σταθμών πλήρωσης όσον αφορά τις επίγειες και θαλάσσιες μεταφορές.

1.4.4 Δράσεις στις ΗΠΑ

Οι ΗΠΑ ίδρυσαν το 2003 την International Partnership for Hydrogen Economy (IPHE, 2005) με συνεργασία των Υπουργείων Ενέργειας και Μεταφορών, με στόχο την ενθάρρυνση διακρατικής συνεργασίας για E&A στις περιοχές του H₂ και των κυψελών καυσίμων. Η πρωτοβουλία εισέπραξε το ενδιαφέρον 17 εταίρων, (Ευρωπαϊκή Ένωση, Αυστραλία, Βραζιλία, Κίνα, κ.α.) Έχουν περατωθεί 30 διεθνή προγράμματα που καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος θεμάτων όπως οι κυψέλες καυσίμου, η αποθήκευση του υδρογόνου, κοινωνικοοικονομικά ζητήματα, κ.α. Μερικά από τις δράσεις που έχουν περατωθεί είναι οι ακόλουθες:

- Fuel Cell Testing, Safety and Quality Assurance (2005)
- HySafe – Safety of Hydrogen as an energy Carrier (2005)
- Solar Hydrogen of Methane (2005)
- Solar Driven Temperature Thermochemical Production of Hydrogen (2005)
- HYTHEC-Hydrogen THERmochemical Cycles (2006)
- Hydrogen Pathways (2006)
- Hydrogen and Fuel Cell Bus Demonstration Program (2006)
- Fundamental Safety Testing and Analysis of Hydrogen Storage Materials and Systems (2008)

Σε εθνικό επίπεδο, το υπουργείο ενέργειας των ΗΠΑ έχει δημιουργήσει το Hydrogen Program (USDOE, 2002) που προωθεί τη συνεργασία της βιομηχανίας, με εθνικά εργαστήρια, πανεπιστήμια και υπηρεσίες σχετικά με την άρση των τεχνικών εμποδίων για την παραγωγή και διάθεση του H_2 , τη διευθέτηση ζητημάτων ασφαλείας, και την ενημέρωση των εμπλεκόμενων φορέων. Επίσης, σε συνεργασία, τα υπουργεία ενέργειας και μεταφορών δημιούργησαν το Hydrogen Posture Plan το 2006 με στόχο το συντονισμό των εμπλεκόμενων φορέων (πανεπιστήμια, ερευνητικά ινστιτούτα, βιομηχανία, οργανισμούς ανάπτυξης τεχνικών κανονισμών, εταιρείες παροχής ηλεκτρισμού και τοπικές αρχές) για την προώθηση της οικονομίας υδρογόνου. Σχετικά με το προϋπολογισμό ανά έτος αυτός διαμορφώνεται σε πάνω από 250 M\$ ανά έτος, την περίοδο 2006-2009. Σχετικά με τη κατανομή του προϋπολογισμού ανά κατηγορία (για το 2007), αυτή διαμορφώνεται ως εξής:

- παραγωγή και μεταφορά (27%)
- ασφάλεια, τεχνικοί κανονισμοί και κώδικες (5%)
- ανάλυση συστήματος και ολοκλήρωση (3%)
- αποθήκευση (12%)
- επιμόρφωση και ενημέρωση του κοινού (0.7%)
- κατασκευές (0.7%)
- αξιολόγηση υποδομών και τεχνολογίας (14%)
- βασική έρευνα στις κυψέλες καυσίμου, στη παραγωγή και στη αποθήκευση του υδρογόνου (17%)
- τεχνολογία μετατροπής/κυψέλες καυσίμου (20%)

Η τέταρτη φάση του προγράμματος, που αφορά την εκτεταμένη εφαρμογή των τεχνολογιών H_2 στην πράξη (δηλαδή την υλοποίηση της οικονομίας H_2), αναμένεται να ξεκινήσει σταδιακά το 2025 και να ολοκληρωθεί μετά το 2030.

1.4.5 Δράσεις σε άλλες χώρες

Οι τεχνολογικά ανεπτυγμένες χώρες έχουν αναπτύξει σημαντικά Εθνικά προγράμματα για την προώθηση των τεχνολογιών H_2 .

Η Ιαπωνία ήταν η πρώτη χώρα που πραγματοποίησε μεγάλης κλίμακας πρόγραμμα E&A (165 M\$) ήδη από το 1992. Το New Hydrogen Project ξεκίνησε το 2003 με προϋπολογισμό 320 M\$. Το New Hydrogen Project αποβλέπει στη ευρεία εισαγωγή οχημάτων καύσης υδρογόνου για τη περίοδο 2010-2020. Ο στόχος για το τέλος της περιόδου θέλει τη κυκλοφορία 5 εκ. οχημάτων, την ύπαρξη 4000 πρατηρίων και τη λειτουργία 10000 συστημάτων συμπαραγωγής κυψελών καυσίμου.

Στον Καναδά, οι δράσεις E&A στοχεύουν στις κυψέλες καυσίμου και στη παραγωγή υδρογόνου από ΑΠΕ. Στον Καναδά έγινε η επίδειξη του πρώτου λεωφορείου χρήσης κυψέλης καυσίμου το 1993. Κάθε χρόνο οι κρατικές χρηματοδοτήσεις ανέρχονται στα

25 M\$ και η συνολική χρηματοδότηση, από τις αρχές της δεκαετίας του 1980, έχει ξεπεράσει τα 200 M\$.

Στην Κορέα, το πρώτο πρόγραμμα E&A ξεκίνησε το 1998 αλλά οι τεχνολογίες του υδρογόνου έκτοτε συγκεντρώνουν συνεχώς το ενδιαφέρον. Ένα νέο πρόγραμμα προϋπολογισμού 586 M\$ έχει ξεκινήσει το 2004 με έτος ολοκλήρωσης το 2011. Το πρόγραμμα αποβλέπει στην εμπορευματοποίηση 370 MW κυψελών καυσίμου και την εισαγωγή 10000 οχημάτων καύσης υδρογόνου.

Στη Βραζιλία, ο οδικός χάρτης επικεντρώνεται στην εμπορευματοποίηση κυψελών καυσίμου για τις μεταφορές και για αυτόνομα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, έχει δοθεί έμφαση στη παραγωγή του υδρογόνου από βιοκαύσιμα που είναι άφθονα στη Βραζιλία και στο φυσικό αέριο.

1.5 Στόχοι και δομή της εργασίας

Στόχος της εργασίας είναι να παρουσιάσει συνοπτικά την ‘οικονομία υδρογόνου’ δηλαδή, όλο το δίκτυο παραγωγής, διανομής και χρήσης του υδρογόνου. Η εργασία παρουσιάζει τις σχετικές τεχνολογίες και τους τεχνικούς και οικονομικούς περιορισμούς που υπεισέρχονται στην ευρεία διάδοση του H₂. Πέρα από το εισαγωγικό κεφάλαιο, οι κύριοι στόχοι της εργασίας παρουσιάζονται στα ακόλουθα κεφάλαια:

- Κεφάλαιο 2: Η παρουσίαση των τεχνικών παραγωγής H₂ από ορυκτά καύσιμα, βιομάζα και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η συζήτηση εστιάζεται στα τεχνικά θέματα που προκύπτουν καθώς και στην οικονομική και ενεργειακή αξιολόγηση των εναλλακτικών.
- Κεφάλαιο 3: Η συζήτηση των μεθόδων διανομής και μεταφοράς του H₂ καθώς και θέματα που αφορούν την ασφαλή χρήση του. Έμφαση δίνεται στην άρση της εσφαλμένης εντύπωσης υψηλής επικινδυνότητας του H₂.
- Κεφάλαιο 4: Η παρουσίαση των συσκευών μετατροπής του H₂ σε ηλεκτρική ενέργεια (κυψέλες καυσίμου) με ανάλυση του τρόπου λειτουργίας και των χαρακτηριστικών τους.
- Κεφάλαιο 5: Η ανασκόπηση εφαρμογών H₂ και η παρουσίαση ενδεικτικών παραδειγμάτων. Μεγάλη σημασία δίνεται στη χρήση του H₂ ως καυσίμου στις μεταφορές.

Επίσης, ένα τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζει τα συμπεράσματα της εργασίας και παρέχει ορισμένες σκέψεις για τα σενάρια μελλοντικής διείσδυσης του H₂ ως φορέα ενέργειας.

2 Τεχνολογίες Παραγωγής H₂

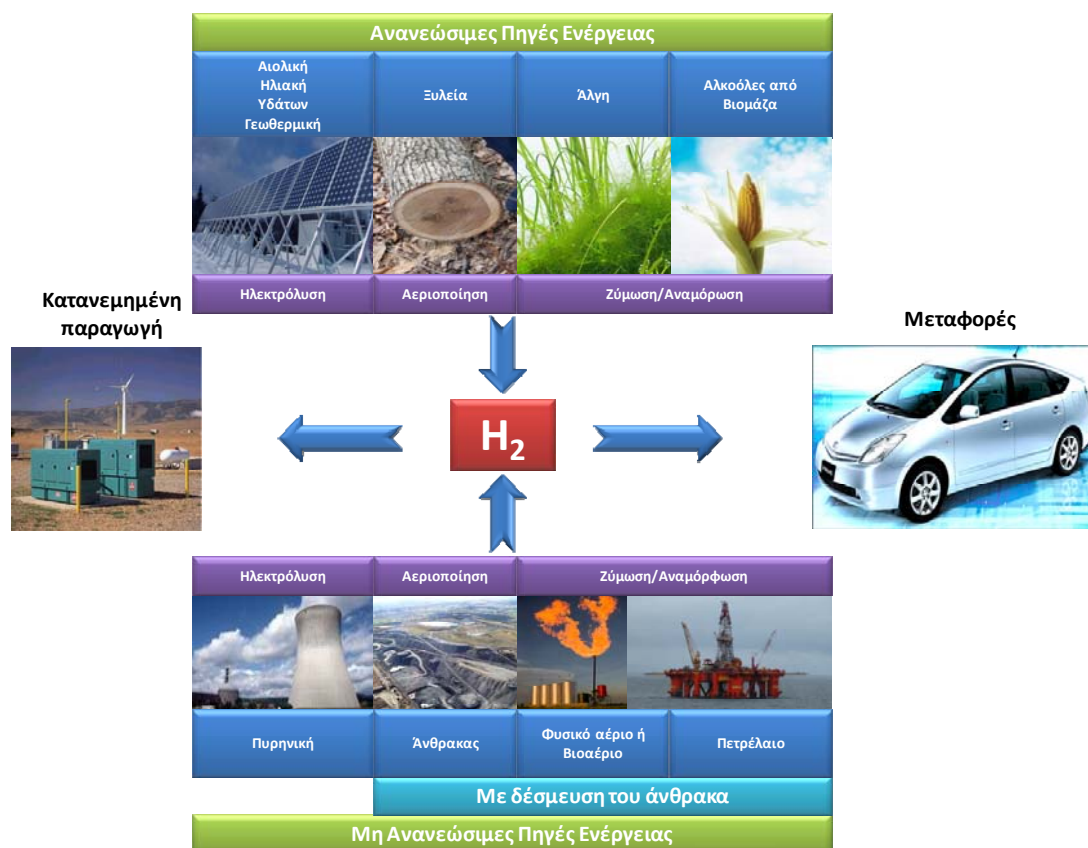
2.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Το υδρογόνο (H₂) υπάρχει σχεδόν παντού, αλλά δυστυχώς είναι δύσκολο να βρεθεί στη φύση ως ξεχωριστό στοιχείο, αντ' αυτού συνδέεται με χημικό δεσμό με το οξυγόνο στο νερό και με τον άνθρακα σε υδρογονάνθρακες. Το υδρογόνο που υφίσταται δεσμευμένο στο νερό και σε οργανικές ενώσεις αποτελεί περισσότερο από το 70% της γήινης επιφάνειας (Dunn, 2002). Αυτό το άχρωμο, άοσμο, και άγευστο χημικό στοιχείο αποτελεί μία χρήσιμη "πρώτη ύλη" για ποικίλες βιομηχανικές δραστηριότητες και ένα σημαντικότερο καύσιμο που επαρκεί να τροφοδοτήσει το σύνολο των δραστηριοτήτων της κοινωνίας, από τις ανάγκες για ηλεκτρικό στα σπίτια, στις επιχειρήσεις, στη βιομηχανία ακόμα και ως καύσιμο στις μεταφορές.

Σύμφωνα με το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ, η παγκόσμια ετήσια παραγωγική ικανότητα του H₂ προσεγγίζει σήμερα τα 400 δισεκατομμύρια m³. Αυτή η ποσότητα ισοδυναμεί με 360 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου, ή με το 10% της παγκόσμιας παραγωγής πετρελαίου το 1999. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ποσότητας υδρογόνου παράγεται στις πετροχημικές βιομηχανίες, χρησιμοποιώντας κυρίως υδρατμούς για την αναμόρφωση του φυσικού αερίου. Το υδρογόνο καταναλώνεται συνήθως επιτόπου και δεν πωλείται στην αγορά. Χρησιμοποιείται κυρίως ως πρώτη ύλη για τον εξευγενισμό του πετρελαίου (π.χ. υδρογονοαποθείωση) και για την παρασκευή λιπασμάτων, πλαστικών, διαλυτών, και άλλων βιομηχανικών προϊόντων. Μόνο το 5% του υδρογόνου μπορεί να χαρακτηριστεί ως "εμπορικό προϊόν" και να μεταφερθεί αλλού σε υγρή ή σε αέρια μορφή (Dunn, 2002).

Το υδρογόνο αποτελεί έναν υψηλής ποιότητας δευτερεύων ενεργειακό φορέα και δεν πρέπει να θεωρείται ως πρωτογενής πηγή ενέργειας. Επομένως, πρέπει να παραχθεί από μία άλλη πρώτη ύλη, γεγονός που θέτει προκλήσεις και πολυπλοκότητα, αλλά συγχρόνως προσφέρει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ένα διαφοροποιημένο ενεργειακό μίγμα που θα μειώσει την εξάρτηση από τις εισαγωγές πετρελαίου, θα μειώσει τις εκπομπές αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και θα αποτελεί ένα βιώσιμο ενεργειακό σύστημα. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από μία ποικιλία ευρέως διαθέσιμων πρώτων υλών συμπεριλαμβανομένων των διάφορων ορυκτών καυσίμων και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με χρήση διαφορετικών τεχνολογιών ανά περίπτωση:

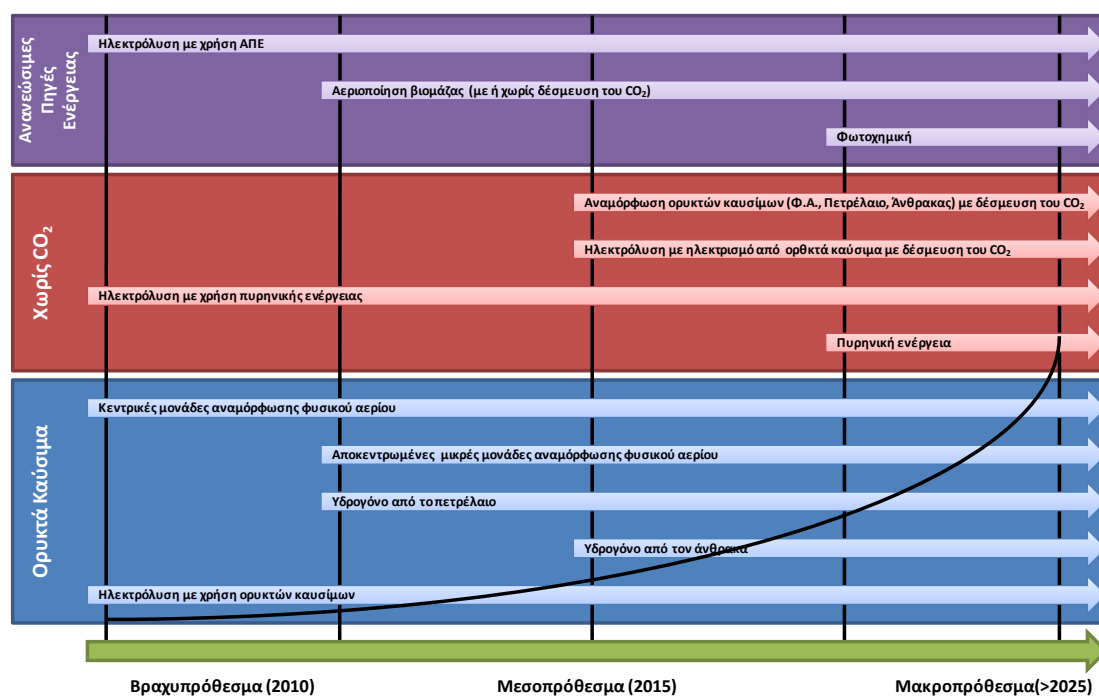
- Ορυκτά καύσιμα (αναμόρφωση του φυσικού αερίου, αεριοποίηση άνθρακα),
- ανανεώσιμη και πυρηνική ενέργεια (διεργασίες αξιοποίησης της βιομάζας, φωτο-ηλεκτρόλυση, βιολογική παραγωγή, διάσπαση του νερού σε υψηλή θερμοκρασία),
- ηλεκτρική ενέργεια (ηλεκτρόλυση του νερού) (Momirlan *et al.*, 2002).



Εικόνα 2-1: Πρώτες ύλες και εναλλακτικές διεργασίες για παραγωγή του H_2 .

Κάθε μία από τις παραπάνω τεχνολογίες βρίσκεται σε ένα διαφορετικό στάδιο ανάπτυξης και κάθε μία διακρίνεται από τις διαφορετικές τεχνικοοικονομικές προκλήσεις. Η διαθεσιμότητα των πρώτων υλών, η ωριμότητα της τεχνολογίας, οι εφαρμογές και η ζήτηση της αγοράς, ο τρόπος διαχείρισης και το κόστος δύναται να επηρεάσουν την απόφαση για την βέλτιστη επιλογή τεχνολογίας για παραγωγή υδρογόνου. Μια επισκόπηση των διαφόρων πρώτων υλών και των τεχνολογιών που σχετίζονται με την παραγωγή υδρογόνου παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-1.

Στην αγορά είναι ήδη διαθέσιμες διάφορες τεχνολογίες για τη βιομηχανική παραγωγή του υδρογόνου. Η πρώτη εμπορική τεχνολογία, που χρονολογείται από τις αρχές της δεκαετίας του '20, είναι η ηλεκτρόλυση του νερού (Marban *et al.*, 2007). Εντούτοις, στη δεκαετία του '60, η βιομηχανική παραγωγή του υδρογόνου άρχισε να μετατοπίζεται προς την χρήση του φυσικού αερίου, το οποίο αποτελεί σήμερα την κυριότερη πρώτη ύλη για την παραγωγή υδρογόνου. Γενικά, όλες οι πιθανές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου μπορούν να ταξινομηθούν σε βραχυπρόθεσμες (2010), μεσοπρόθεσμες (2010–2020) και μακροπρόθεσμες (2020–2030) τεχνολογίες (Εικόνα 2-2).



Εικόνα 2-2: Βραχυ-, Μέσο-, και Μακροπρόθεσμες τεχνολογίες παραγωγής H₂.

Ανάλογα με την κλίμακα της εφαρμογής, οι διεργασίες παραγωγής υδρογόνου χαρακτηρίζονται ως κατανεμημένες (π.χ. μικρές εγκαταστάσεις σε σταθμούς ανεφοδιασμού, η παραγωγική ικανότητα των οποίων κυμαίνεται από 100 έως 1500 kg H₂ ανά ημέρα) και κεντροποιημένες (μεγάλες εγκαταστάσεις όπου η δυναμικότητα προσεγγίζει τα 50000 kg H₂ ανά ημέρα). Οι βιομηχανικές μέθοδοι παραγωγής του υδρογόνου σήμερα περιλαμβάνουν την αναμόρφωση του φυσικού αερίου (μεθάνιο) με ατμό και την ηλεκτρόλυση του (αξιοποιώντας ταυτόχρονα και το ηλεκτρικό δίκτυο). Επίσης, η αναμόρφωση της αιθανόλης και της μεθανόλης σε μικρή κλίμακα αποτελούν μεθόδους προς αξιολόγηση.

Οι βασικές τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου περιλαμβάνουν:

- Την αεριοποίηση του άνθρακα (με προαιρετικές την συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την δέσμευση του άνθρακα),
- την αναμόρφωση του φυσικού αερίου με ατμό (με προαιρετική τη δέσμευση και αποθήκευση του άνθρακα),
- την αεριοποίηση της βιομάζας,
- τις πυρηνικές διεργασίες (θερμοχημική διεργασία Θείου-Ιωδίου υψηλών θερμοκρασιών, συμβατική ηλεκτρόλυση του νερού και ηλεκτρόλυση σε υψηλές θερμοκρασίες),
- την ηλεκτρόλυση με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (με προαιρετική την συμπαραγωγή).

Εάν το H_2 παράγεται από ανανεώσιμη και πυρηνική ενέργεια ή από το φυσικό αέριο και τον άνθρακα με δέσμευση και αποθήκευση του CO_2 (CCS), τότε δύναται σε μεγάλο ποσοστό το ανθρακικό αποτύπωμα να είναι ουδέτερο. Εάν το H_2 παράγεται από την ηλεκτρόλυση του νερού, δημιουργούνται εκπομπές από τις αντίστοιχες διεργασίες παραγωγής της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή τη στιγμή, το H_2 παράγεται κατά ένα μεγάλο μέρος από τα ορυκτά καύσιμα χωρίς CCS (48% από το φυσικό αέριο, 30% από τα απαέρια πετροχημικών/χημικών διεργασιών, 18% από τον άνθρακα και το υπόλοιπο από την ηλεκτρόλυση). Εντούτοις, η χρήση του H_2 για ενεργειακές εφαρμογές απαιτεί αποδοτικότερες και χαμηλού κόστους διεργασίες, με ουσιαστικά μηδενικές εκπομπές CO_2 . Η αποκεντρωμένη παραγωγή είναι η καλύτερη επιλογή για την ενίσχυση της αγοράς δεδομένου ότι ελαχιστοποιεί τις ανάγκες για την εγκατάσταση υποδομών διανομής, αφού τόσο η μεταφορά όσο και η αποθήκευση του υδρογόνου με τα σημερινά δεδομένα θεωρείται οικονομικά ασύμφορη. Όμως είναι λιγότερο αποδοτική από τη μεγάλης κλίμακας κεντροποιημένη παραγωγή και καθιστά τις τεχνικές CCS μη εφαρμόσιμες στην πράξη.

2.2 Υδρογόνο από ορυκτά καύσιμα

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από τα περισσότερα ορυκτά καύσιμα (π.χ. κάρβουνο, φυσικό αέριο, πετρέλαιο, κ.λπ.). Η πολυπλοκότητα των διεργασιών ποικίλλει. Δεδομένου ότι το διοξείδιο του άνθρακα παράγεται ως παραπροϊόν, το CO_2 πρέπει να συλλέγεται και να αποθηκεύεται προκειμένου να εξασφαλιστεί μια βιώσιμη (με μηδενικές εκπομπές) διεργασία. Η βιωσιμότητα της διεργασίας θα διαφέρει ανάλογα με το μέγεθος της κλίμακας, δηλαδή σε κεντρικές ή κατακεντρωμένες εγκαταστάσεις παραγωγής υδρογόνου.

2.2.1 Παραγωγή από το φυσικό αέριο/υδρογονάνθρακες

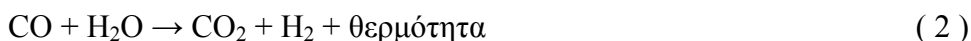
Έναντι των υπολοίπων ορυκτών καυσίμων, το φυσικό αέριο αποτελεί μία ιδανική, από οικονομική άποψη, πρώτη ύλη για την παραγωγή υδρογόνου, επειδή είναι ευρέως διαθέσιμο, είναι εύκολο να διαχειριστεί και έχει υψηλή αναλογία υδρογόνου-άνθρακα, η οποία ελαχιστοποιεί το σχηματισμό CO_2 ως παραπροϊόν. Το υδρογόνο σήμερα μπορεί να παραχθεί από το φυσικό αέριο χρησιμοποιώντας τις παρακάτω διεργασίες:

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

Αν και έχουν αναπτυχθεί διάφορες εναλλακτικές τεχνικές παραγωγής, καμία από αυτές με τα σημερινά δεδομένα δε θεωρείται εμπορική.

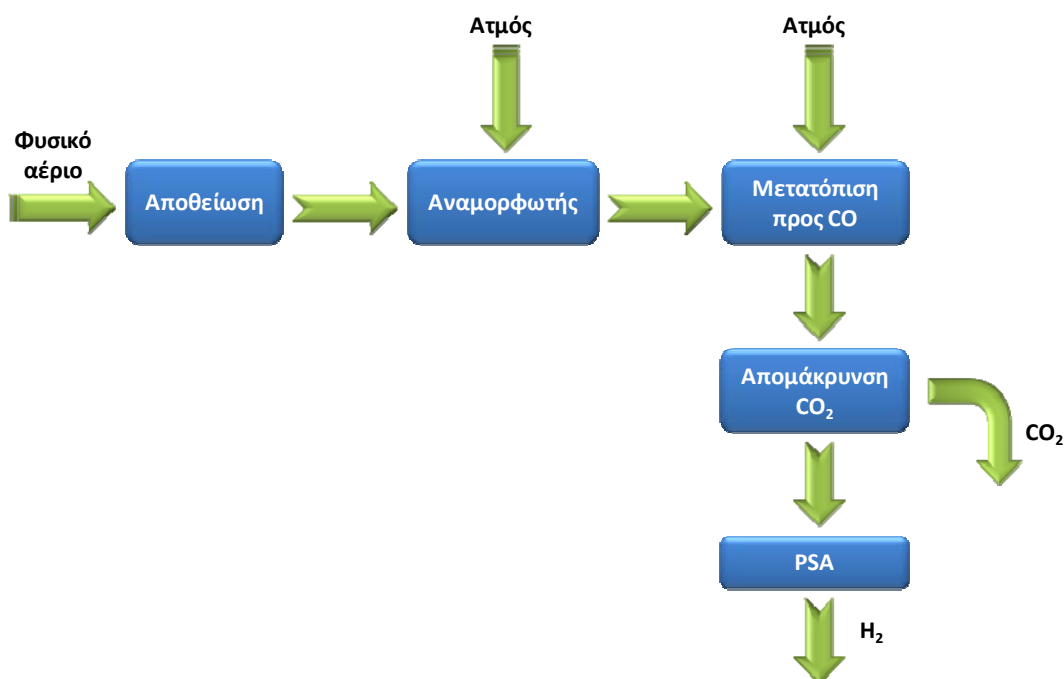
2.2.1.1 Αναμόρφωση με ατμό

Η αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιημένη και λιγότερο δαπανηρή μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου. Είναι μία από τις κυριότερες διεργασίες που χρησιμοποιούνται στις πετροχημικές και χημικές βιομηχανίες για παραγωγή H₂ σε μεγάλη κλίμακα. Διάφορες εταιρείες αναπτύσσουν μικρής κλίμακας συσκευές αναμόρφωσης του μεθανίου με ατμούς σε αποκεντρωμένους σταθμούς καυσίμων, οι οποίοι μπορούν να αποδειχθούν η πλέον βιώσιμη, βραχυπρόθεσμα, επιλογή παραγωγής υδρογόνου (Hummel, 2001). Η SMR περιλαμβάνει την ενδόθερμη αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό προς παραγωγή αερίου σύνθεσης (μίγμα υδρογόνου και μονοξειδίου άνθρακα – Εξίσωση (1)). Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι το μεθάνιο αποτελεί το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου. Η θερμότητα παρέχεται συχνά από την καύση ενός ποσοστού της τροφοδοσίας. Η διεργασία πραγματοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες από 700 έως 850°C και σε πιέσεις από 3 έως 25 bar. Το προϊόν της αντίδρασης (αέριο σύνθεσης) περιέχει περίπου 12% CO, που μπορεί να μετατραπεί περαιτέρω σε CO₂ και περίσσεια H₂ μέσω της αντίδρασης μετατόπισης του υδραερίου, με περίσσεια ατμού - Εξίσωση (2).



Η αναμόρφωση με ατμό των περισσότερων υδρογονανθράκων και φυσικά του μεθανίου πραγματοποιείται μόνο με τους κατάλληλους καταλύτες. Οι καταλύτες για τη αναμόρφωση με ατμό είναι συνήθως μέταλλα της VIII ομάδας (Carette *et al.*, 2001), με το Ni να φαίνεται να είναι το πιο αποτελεσματικό. Ανάλογα με την εκλεκτικότητα του καταλύτη και το ποσοστό κορεσμού των χρησιμοποιούμενων υδρογονανθράκων, η διάσπαση του υδρογονάνθρακα μπορεί να ευνοηθεί κατά τη διάρκεια της αντίδρασης με τον ατμό. Προκειμένου να ληφθεί καθαρό υδρογόνο, το αέριο τελικά καθαρίζεται σε μια μονάδα ρόφησης με εναλλαγή πίεσης (PSA) (Εικόνα 2-3).

Μια νέα τεχνική που ονομάζεται "sorption enhanced reaction process" προσφέρει την δυνατότητα της ταυτόχρονης διεξαγωγής της αντίδρασης και του διαχωρισμού σε ένα στάδιο. Ο ατμός και το μεθάνιο εισάγονται στους 440–550°C σε έναν αντιδραστήρα που περιέχει έναν καταλύτη αναμόρφωσης και ένα προσροφητικό υλικό για την απομάκρυνση του CO₂ (Reijers *et al.*, 2003 και Hufton *et al.*, 2000). Το όφελος αυτής της διεργασίας αφορά στην παραγωγή καθαρού H₂ (90%), μειώνοντας ταυτόχρονα τα επακόλουθα στάδια καθαρισμού του υδρογόνου. Οι Moller *et al.* (2004) πρότειναν ότι μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση καυσίμου μέχρι 40% με τη χρήση μιας διαδικασίας αναμόρφωσης με ηλιακή ενέργεια. Σε αυτή την μέθοδο χρησιμοποιείται ένα σύστημα ηλιακών συλλεκτών για την συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας, έτσι ώστε να παρασχεθεί η απαιτούμενη ποσότητα θερμότητας.



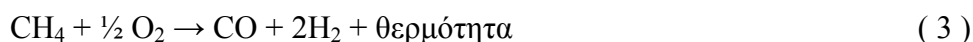
Εικόνα 2-3: Σχηματική απεικόνιση της διεργασίας αναμόρφωσης του μεθανίου με ατμό.

Η αναμόρφωση του φυσικού αερίου προσφέρει αποδόσεις μετατροπής ενέργειας μεταξύ 65–75% (H_2 LHV) για τις μικρές αποκεντρωμένες μονάδες και έως 85% για τα μεγάλα κεντροποιημένα συστήματα παραγωγής υδρογόνου. Εάν ο ατμός σε περίσσεια επαναχρησιμοποιείται, η συνολική απόδοση μπορεί να είναι υψηλότερη. Προσφάτως έχει βελτιωθεί σημαντικά η συνεκτικότητα των μικρής κλίμακας αναμορφωτών ($10 \times 3 \times 3$ m) και η επιτευχθείσα δυναμικότητά τους (5.5-7.5 GJ/h), αλλά απαιτείται περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη για να μειωθεί το κόστος και να αυξηθεί η απόδοση. Η συμπίεση του H_2 και η CCS (στις μεγάλες μονάδες) μπορούν η κάθε μία να μειώσουν την καθαρή απόδοση κατά 5-10%. Η CCS στις μικρές εγκαταστάσεις δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα με τα σημερινά δεδομένα.

Σε τρέχουσες τιμές του φυσικού αερίου (4–6 €/GJ), το κόστος του H_2 που παράγεται από την αναμόρφωση του κυμαίνεται μεταξύ 7–10 €/GJ H_2 (για παραγωγή μεγάλης κλίμακας) έως περισσότερο από 20 €/GJ. Η τελική βέβαια τιμή θα επηρεάζεται από τις τρέχουσες τιμές του φυσικού αερίου, τις εμπλεκόμενες διεργασίες και τις οικονομίες κλίμακας. Η μικρής κλίμακας αποκεντρωμένη παραγωγή υδρογόνου μπορεί να υπερβεί τα 33 €/GJ. Το συμπιεσμένο H_2 σε φιάλες μπορεί να κοστίσει 60–70 €/GJ (περιλαμβανομένου της παράδοσης). Το κόστος για CCS αναμένεται να προσθέσει επιπλέον περίπου 2 €/GJ, ανάλογα με τη διεργασία CCS που θα χρησιμοποιηθεί και την κλίμακα της εφαρμογής. Ο Πίνακας 2-1 συνοψίζει τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά για μικρής κλίμακας SMR, μεγάλης κλίμακας SMR και για έναν ηλιακό αναμορφωτή.

2.2.1.2 Μερική οξείδωση

Η διεργασία της μερικής οξείδωσης χρησιμοποιείται στα διυλιστήρια για τη μετατροπή των υδρογονανθρακικών παραπροϊόντων σε υδρογόνο, CO, CO₂ και νερό. Το μεθάνιο μπορεί να μετατραπεί σε υδρογόνο μέσω της μερικής οξείδωσης, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί καταλυτικά ή μη καταλυτικά ή με συνδυασμό και των δύο (Damen *et al.*, 2006). Η μερική οξείδωση είναι μια διεργασία αναμόρφωσης στην οποία τα καύσιμα καίγονται μερικώς (το οξυγόνο που τροφοδοτείται στο σύστημα είναι υποστοιχειομετρικό) σε μια εξώθερμη αντίδραση που παρέχει την απαιτούμενη θερμότητα για άλλες αντιδράσεις στο σύστημα αναμόρφωσης ώστε να παραχθεί μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο – εξίσωση (3). Σε αυτή τη διεργασία παράγεται θερμότητα και ως εκ τούτου είναι δυνατός ένας πιο συνεκτικός σχεδιασμός δεδομένου ότι δεν υπάρχει περαιτέρω ανάγκη για την θέρμανση του αντιδραστήρα. Τέλος, το CO που παράγεται μετατρέπεται σε H₂, όπως περιγράφεται στην εξίσωση (2).



Πίνακας 2-1: Τεχνικά και οικονομικά στοιχεία για τις διαφορετικές τεχνολογίες SMR (Stoukides, 2000 και Dreier *et al.*, 2000).

		Μικρής κλίμακας SMR		Μεγάλης κλίμακας SMR		Ηλιακός αναμορφωτής
		Τεχνολογία αιχμής	Μακρο-πρόθεσμος στόχος	Τεχνολογία αιχμής	Μακρο-πρόθεσμος στόχος	Μακρο-πρόθεσμος στόχος
Δυναμικότητα φυσικού αερίου	kW	4500	4275	405000	385000	125000
Ηλιακή θερμότητα	kW					47700
Παραγωγή H ₂	Nm ³ /h	1000	1000	100.000	100.000	50.000
Πίεση	bar	16	16	30	30	
Απόδοση (H ₂ LHV)	%	67	70	74	78	87
Διάρκεια ζωής	Yr	25	25	25	25	20
Χρόνος εκμετάλλευσης	hr/yr	8000	8000	8000	8000	2000
Κόστος επένδυσης	€ ₂₀₀₀ /kW _{H2}	690	655	335	320	370
Σταθερό κόστος	%Invest./yr	5	5	2	2	5,5
Λειτουργικό κόστος	€ ₂₀₀₀ /Nm ³	0,003	0,003	0,003	0,003	0,013

Επιπλέον, το υδρογόνο μπορεί επίσης να παραχθεί από το πετρέλαιο, τη βενζίνη, και τη μεθανόλη μέσω της αναμόρφωσης τους. Αυτή όμως η διεργασία μερική οξείδωσης απαιτεί επίσης τη χρήση καθαρού οξυγόνου, και όπως με την περίπτωση αεριοποίησης του άνθρακα, είναι λιγότερο αποδοτική και εκπέμπει περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα σε σχέση με την αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει τις πετροχημικές βιομηχανίες να εστιάσουν και αυτές το ενδιαφέρον τους στην ανάπτυξη τεχνολογιών απομάκρυνσης και δέσμευσης του άνθρακα (Dunn, 2002). Αυτή η μη-καταλυτική διεργασία λαμβάνει χώρα στους 1300-1500 °C και σε πιέσεις 30-100 bar. Η μερική οξείδωση ακολουθείται από μια διεργασία αποθείωσης, μετατόπισης προς CO και τέλος απομάκρυνσης του CO₂. Η μέθοδος της μερικής οξείδωσης των βαρέων υδρογονανθράκων αφορά μόνο στην παραγωγή υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα.

2.2.1.3 Αυτόθερμη αναμόρφωση

Η αυτόθερμη μετατροπή του μεθανίου σε H₂ πραγματοποιείται στους 850°C, όπου συνδυάζονται οι διεργασίες της μερικής οξείδωσης και της καταλυτικής αναμόρφωσης (Damen *et al.*, 2006). Με χρήση της μεθόδου αυτής είναι δυνατό να επιτευχθεί μετατροπή μεθανίου 60-65% με εκλεκτικότητα 80% προς παραγωγή υδρογόνου. Σύμφωνα με το μηχανισμό της διαδοχικής καύσης/αναμόρφωσης του μεθανίου, το CH₄ αρχικά οξειδώνεται προς CO₂ και H₂O, ενώ παράγεται αέριο σύνθεσης από την περαιτέρω διεργασία αναμόρφωσης του υδρογονάνθρακα. Ο δεύτερος μηχανισμός βασίζεται στην άμεση μερική οξείδωση του CH₄, όπου το CO₂ και το H₂O παράγονται μέσω των παράλληλων αντιδράσεων καύσης ή από την περαιτέρω οξείδωση του CO και του H₂. Καθεμία από τις παραπάνω διεργασίες έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα αλλά και προκλήσεις, τις οποίες συνοψίζει ο Πίνακας 2-2.

Πίνακας 2-2: Σύγκριση των τεχνολογιών παραγωγής H₂ από φυσικό αέριο.

Τεχνολογία	SMR	ATR ή POX
Οφέλη	Υψηλή απόδοση	Μικρότερο μέγεθος
	Εκπομπές	Υψηλό κόστος για μικρές μονάδες
	Υψηλό κόστος για μεγάλες μονάδες	Απλό σύστημα
Προκλήσεις	Πολυπλοκότητα συστήματος	Χαμηλότερη απόδοση
	Ευαίσθητη στη ποιότητα του φυσικού αερίου	Καθαρισμός H ₂
		Εκπομπές

Η κατανεμημένη (μη-αποκεντρωμένη) παραγωγή χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη το φυσικό αέριο θα μπορούσε να είναι η χαμηλότερου κόστους επιλογή κατά τη διάρκεια μετάβασης στην εποχή της οικονομίας υδρογόνου. Η κύρια πρόκληση είναι να αναπτυχθεί μια συσκευή παραγωγής υδρογόνου με αποδεδειγμένη ικανότητα να μπορεί να παρασκευαστεί μαζικά και να λειτουργεί αξιόπιστα και ακίνδυνα με όσο το δυνατό μικρότερη περιοδική συντήρηση. Ειδικότερα και όσον αφορά στην ικανότητα για μαζική παραγωγή, αυτή απαιτείται προκειμένου να ικανοποιηθεί η ζήτηση κατά τη διάρκεια της μετάβασης στην οικονομία του υδρογόνου και να ελαχιστοποιηθεί το κόστος παραγωγής (οικονομία κλίμακας).

Αυτές οι μονάδες θα πρέπει αρχικά να διακρίνονται από την υψηλή απόδοση που θα πρέπει να επιτυγχάνουν και να συμπεριλαμβάνουν όλα εκείνα τα απαραίτητα βοηθητικά υποσυστήματα προκειμένου να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις για υψηλής καθαρότητας υδρογόνο που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε κυψέλες καυσίμου. Η τεχνολογία για τη διεργασία της ατμοαναμόρφωσης είναι διαθέσιμη για αυτήν την εφαρμογή. Εάν θα είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί η μερική οξειδωση ή η αυτόθερμη αναμόρφωση για τη κατανεμημένη παραγωγή του υδρογόνου φαίνεται να εξαρτάται από την ανάπτυξη νέων μεθόδων για την ανάκτηση του ατμοσφαιρικού οξυγόνου ή το διαχωρισμό του παραγόμενου υδρογόνου από το άζωτο.

2.2.1.4 Πυρόλυση υδρογονανθράκων

Οι υδρογονάνθρακες μπορούν να μετατραπούν σε υδρογόνο χωρίς να παράγεται CO₂, εάν διασπώνται σε μια αρκετά υψηλή θερμοκρασία (που παρέχεται από έναν καυστήρα πλάσματος) απουσία οξυγόνου (Kandiyoti *et al.*, 2006). Το μεθάνιο παρουσία ενός καταλύτη μπορεί να διασπαστεί και να παραγάγει υδρογόνο και άνθρακα.



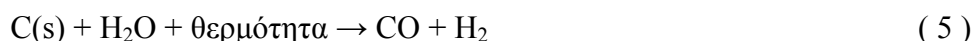
Ο άνθρακας μπορεί είτε να απομονωθεί είτε να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω από διάφορες βιομηχανίες, π.χ. στη μεταλλουργική βιομηχανία είτε στην κατασκευή ελαστικών αυτοκινήτου. Αυτή η διαδικασία έχει αναπτυχθεί εμπορικά από τη Νορβηγική εταιρεία Aker Kvaerner.

2.2.2 Παραγωγή από άνθρακα

Ο άνθρακας μπορεί επίσης να αναμορφωθεί για να παραχθεί υδρογόνο, μέσω ποικίλων διεργασιών αεριοποίησης (π.χ. σταθερής κλίνης, ρευστοστερεάς κλίνης κ.α. – Shoko *et al.*, 2006). Η συγκεκριμένη διεργασία εφαρμόζεται εμπορικά αλλά μπορεί να θεωρηθεί ανταγωνιστικότερη της αναμόρφωσης του μεθανίου μόνο σε περιπτώσεις όπου το φυσικό αέριο είναι ακριβό. Το μέγεθος των παγκόσμιων αποθεμάτων άνθρακα έχει προτρέψει τους επιστήμονες να προτείνουν ότι ο άνθρακας μπορεί να θεωρηθεί ως κύρια πρώτη ύλη για την παραγωγή υδρογόνου, το οποίο θα μπορούσε να επιτρέψει σε

χώρες όπως η Κίνα ή η Ινδία να στραφούν προς την οικονομία υδρογόνου. Εντούτοις, αυτό θα απαιτούσε την δέσμευση του άνθρακα που απελευθερώνεται από την αεριοποίηση. Αυτό ίσως διαδραματίσει έναν συμπληρωματικό ρόλο προκειμένου να απαλλαχθεί το ενεργειακό μίγμα από τον άνθρακα και να βελτιωθεί η απόδοση τόσο στην παροχή όσο και στη ζήτηση (Yamashita *et al.*, 2003).

Η αεριοποίηση του άνθρακα είναι μια διεργασία που μετατρέπει το στερεό άνθρακα σε ένα αέριο μίγμα που αποτελείται κυρίως από H_2 , CO , CO_2 και CH_4 . Μια χαρακτηριστική αντίδραση που περιγράφει την παραπάνω διεργασία παρουσιάζεται στην Εξίσωση (5) στην οποία ο άνθρακας μετατρέπεται σε αέριο σύνθεσης:



Ο άνθρακας μπορεί να αεριοποιηθεί με πολλούς τρόπους διαφοροποιώντας το μίγμα άνθρακα, οξυγόνου και ατμού μέσα στον αεριοποιητή (Shoko *et al.*, 2006). Δεδομένου ότι αυτή η αντίδραση είναι ενδόθερμη, απαιτείται επιπλέον θερμότητα, όπως και με την αναμόρφωση του μεθανίου. Το CO που παράγεται μετατρέπεται περαιτέρω σε CO_2 και H_2 μέσω της αντίδρασης μετατόπισης του υδραερίου - Εξίσωση (2). Σε αντίθεση με το H_2 , το τελικό προϊόν αποτελείται από σχετικά καθαρό CO_2 , έτοιμο να συμπιεστεί και να αποθηκευθεί (CCS). Η παραγωγή υδρογόνου από τον άνθρακα είναι εμπορικά ώριμη, αλλά είναι περισσότερο πολύπλοκη σε σχέση με την παραγωγή υδρογόνου με τη μέθοδο SMR. Για τις περισσότερες εφαρμογές απαιτείται ο τελικός καθαρισμός του H_2 . Το κόστος του παραγόμενου υδρογόνου είναι επίσης υψηλότερο εξαιτίας του αεριοποιητή και της απαίτησης για O_2 .

2.2.3 Δέσμευση και αποθήκευση του CO_2

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι ένα κύριο παραπροϊόν σε όλες τις τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου που βασίζονται στα ορυκτά καύσιμα. Η ποσότητα του CO_2 ποικίλει ανάλογα με την αναλογία υδρογόνου/άνθρακα στο χρησιμοποιούμενο καύσιμο. Συνεπώς, για να αναπτυχθεί μια βιώσιμη (με μηδενικές εκπομπές) τεχνολογία για την παραγωγή του υδρογόνου, το CO_2 πρέπει να συλλέγεται και να αποθηκεύεται (Damen *et al.*, 2007). Η δέσμευση του άνθρακα από την παραγωγή του υδρογόνου περιλαμβάνει την απομάκρυνση των ανθρακούχων προϊόντων από τα απαέρια του αεριοποιητή ή του ατμοαναμορφωτή του μεθανίου και την αποθήκευσή τους σε υπόγεια μη πληρωμένα πεδία εξόρυξης πετρελαίου ή αερίου, βαθιά κοιτάσματα άνθρακα ή σε βαθύ ωκεανό. Διάφορες εταιρείες παραγωγής ενέργειας και ηλεκτρικής ισχύος επιδιώκουν την δέσμευση του άνθρακα, αν και οι τεχνολογίες αυτές αναμένεται να καταστούν εμπορικά βιώσιμες την επόμενη δεκαετία (Dunn, 2002).

Υπάρχουν τρεις κυρίως τρόποι να δεσμευθεί το CO_2 σε μια διεργασία καύσης:

- Μετά την καύση. Το CO₂ μπορεί να απομακρυνθεί από τα απαέρια της διεργασίας καύσης με χημική προσρόφηση σε διάλυμα αμινών. Το διάλυμα μπορεί να αναγεννηθεί με χρήση θερμότητας και να επαναχρησιμοποιηθεί. Η διεργασία αυτή είναι ιδιαίτερος γνωστή και δοκιμασμένη. Ωστόσο οδηγεί σε μείωση του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης κατά 24% και αύξηση του κόστους επένδυσης κατά 61% (εκφρασμένη σε \$/kW – Herzog *et al.*, 2009).
- Πριν την καύση. Το CO₂ δεσμεύεται κατά την παραγωγή του υδρογόνου μέσω των διεργασιών αεριοποίησης του άνθρακα ή κατά την παραγωγή H₂ από φυσικό αέριο. Έτσι το καύσιμο μετασχηματίζεται από άνθρακα ή υδρογονάνθρακα σε H₂ και το CO₂ δεσμεύεται κατά την παραγωγή. Η διεργασία αυτή είναι πολύ περισσότερο οικονομική από τη διεργασία δέσμευσης μετά την καύση αλλά απαιτεί αρχικό σχεδιασμό της μονάδας και δεν αποτελεί επιλογή για υπάρχουσες μονάδες παραγωγής ενέργειας με βάση τον κονιορτοποιημένο άνθρακα.
- Καύση με οξυγόνο (Oxyfuel-combustion). Εάν η καύση δεν πραγματοποιηθεί με αέρα αλλά με καθαρό οξυγόνο, τότε η ποσότητα καυσαερίων μειώνεται σημαντικά, λόγω απουσίας N₂ στα απαέρια. Επομένως, τα απαέρια αποτελούνται βασικά από CO₂ και H₂O. Επομένως το CO₂ μπορεί να διαχωριστεί με συμπύκνωση των υδρατμών. Η αύξηση του κόστους εδώ προέρχεται από τη φάση παραγωγής του καθαρού O₂ και από την ανακυκλοφορία καυσαερίου με σκοπό να μειωθεί η θερμοκρασία της καύσης με καθαρό O₂.

2.3 Υδρογόνο από την διάσπαση του νερού

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

2.3.1 Ηλεκτρόλυση του νερού

Μια ελπιδοφόρος και ιστορική μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου είναι η ηλεκτρόλυση του νερού, μια ηλεκτροχημική διεργασία, η οποία περιλαμβάνει τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για τον διαχωρισμό του νερού στα συστατικά του, π.χ. σε υδρογόνο και οξυγόνο, όπως απεικονίζεται στην Εξίσωση (6). Σήμερα, περίπου 4% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου παράγεται από την ηλεκτρόλυση του νερού (Berry, 2004). Αυτή η διεργασία είναι ήδη οικονομικά αποδοτική για την παραγωγή υπερ-καθαρού υδρογόνου σε μικρές ποσότητες, εντούτοις, εξακολουθεί να παραμένει ακριβή για εφαρμογές μεγαλύτερης κλίμακας, λόγω κυρίως της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία κοστίζει αυτήν την περίοδο τρεις έως πέντε φορές περισσότερο έναντι των αντίστοιχων πρώτων υλών ορυκτών καυσίμων.



Η συνολική ενέργεια που απαιτείται για την ηλεκτρόλυση του νερού αυξάνεται ελάχιστα με τη θερμοκρασία, ενώ η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια μειώνεται. Μια διεργασία ηλεκτρόλυσης σε υψηλές θερμοκρασίες πιθανόν να είναι προτιμητέα όταν υπάρχει διαθέσιμη θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας.

Ενώ η ηλεκτρόλυση του νερού είναι η ακριβότερη διεργασία παραγωγής υδρογόνου σήμερα, κυρίως λόγω της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας, το συνολικό κόστος αναμένεται να μειωθεί λαμβάνοντας υπόψη την υψηλή απόδοση των νέων συστημάτων και την ένταξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες είναι δυνατό να συνδυαστούν με την ηλεκτρόλυση του νερού (Zoulías *et al.*, 2006). Το κόστος της ηλεκτρόλυσης που βασίζεται στην ηλιακή και αιολική ενέργεια είναι ακόμα υψηλό, αλλά αναμένεται να μειωθεί στο μισό κατά τη διάρκεια της επόμενης δεκαετίας. Επιπλέον, επειδή το υδρογόνο παράγεται επιτόπου και κατά παραγγελία, δεν απαιτείται ούτε η μεταφορά του ούτε και η αποθήκευσή του, καθιστώντας το υδρογόνο που παράγεται από την ηλεκτρόλυση οικονομικά βιώσιμο και ανταγωνιστικό. Τα οικονομικά μεγέθη είναι δυνατό να βελτιωθούν επίσης με την αναμενόμενη μελλοντική μαζική παραγωγή (οικονομίες κλίμακας) των μικρών συσκευών ηλεκτρόλυσης, οι οποίες θα δύνανται να κλιμακώνονται από μικρές σε μεγάλες μονάδες με σχετικά απλό τρόπο, θα χρησιμοποιούν λιγότερο ακριβή ενέργεια (και υδροηλεκτρική) τις ώρες αιχμής, και θα επιτυγχάνουν αποδόσεις της τάξης του 70–85%.

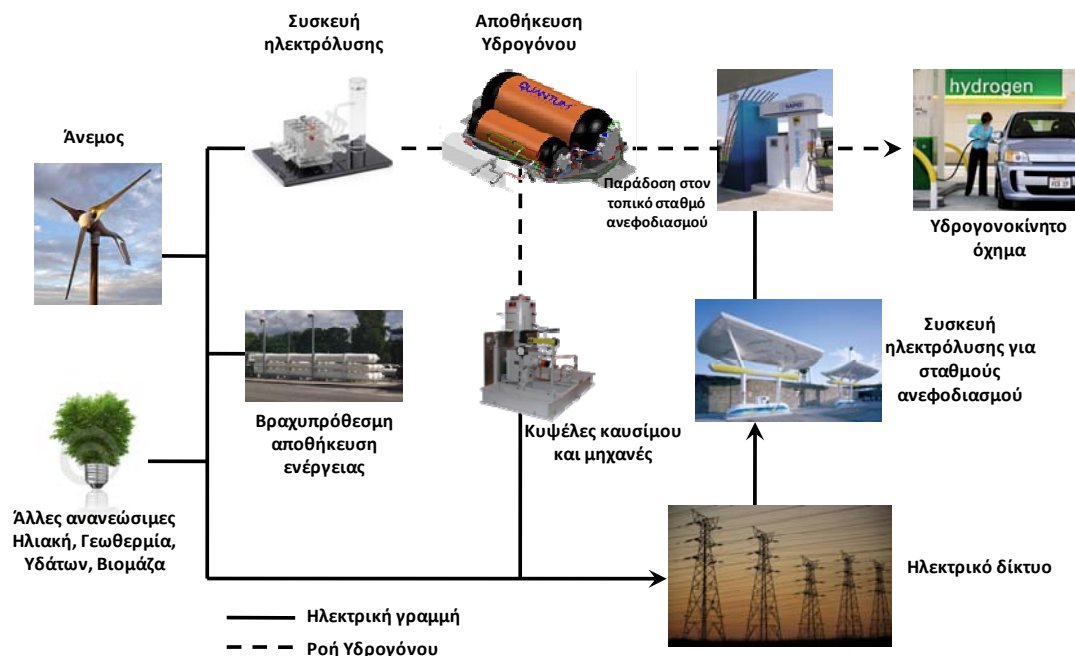
Η ηλεκτρόλυση από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι δυνατό να οδηγήσει σε έναν καθαρό κύκλο υδρογόνου (Εικόνα 2-4). Υδρογόνο από την ηλιακή και την αιολική ενέργεια θα μπορούσε να καλύψει μελλοντικές ενεργειακές απαιτήσεις, αν και το κόστος παράδοσης της ενέργειας μπορεί να είναι υψηλότερο σε σχέση με την περίπτωση παραγωγής υδρογόνου με την μέθοδο SMR.

Σε βάθος χρόνου, το υδρογόνο θα παρέχει επίσης ένα ιδεατό μέσο αποθήκευσης για ανανεώσιμη ενέργεια. Το υδρογόνο αναμένεται να επιτρέψει την ένταξη στο ενεργειακό σύστημα, ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με μη-μόνιμη παροχή (ήλιος, άνεμος) (Zoulías *et al.*, 2006). Κατά συνέπεια, μπορούμε να οραματιστούμε ένα φωτοβολταϊκό ηλιακό πάνελ (ή έναν ανεμόμυλο) συνδεδεμένο με μία αντιστρεπτής λειτουργίας κυψέλη καυσίμου/κυψέλη ηλεκτρόλυσης, που χρησιμοποιεί ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας για να παραγάγει H_2 κατά τη διάρκεια της ημέρας (ή σε ανέμους με υψηλή ταχύτητα), και να καταναλώνει το υδρογόνο κατά τη διάρκεια της νύχτας (ή απουσία αέρα) για να παραγάγει ηλεκτρική ενέργεια. Παρά την αναμφισβήτητη μειωμένη απόδοση αυτού του συστήματος, είναι σαφές ότι θα αποτελούσε μία αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.

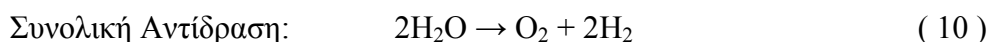
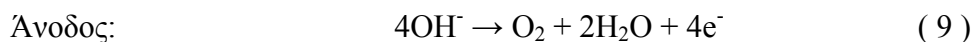
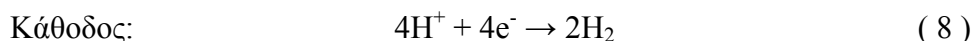
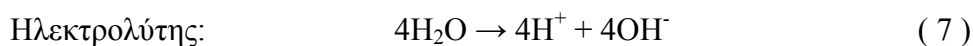
2.3.1.1 Αλκαλική ηλεκτρόλυση

Οι αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης χρησιμοποιούν ένα υδατικό διάλυμα KOH ως ηλεκτρολύτη (Floch *et al.*, 2007). Η αλκαλική ηλεκτρόλυση είναι η καταλληλότερη για σταθερές εφαρμογές που διεξάγονται σε πιέσεις μέχρι 25 bar. Οι αλκαλικές συσκευές

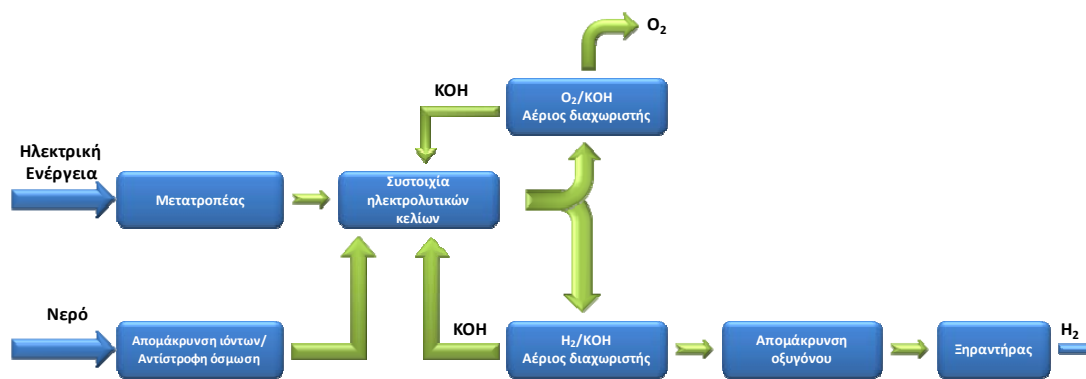
ηλεκτρόλυσης έχουν εμπορευματοποιηθεί εδώ και πολύ καιρό. Οι ακόλουθες ηλεκτροχημικές αντιδράσεις πραγματοποιούνται μέσα στην κυψέλη αλκαλικής ηλεκτρόλυσης:



Εικόνα 2-4: Ηλεκτρόλυση που τροφοδοτείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.



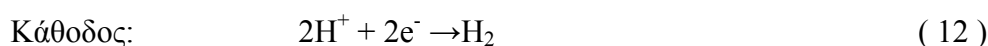
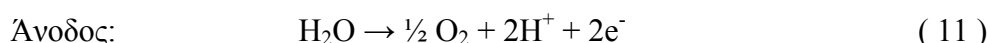
Συνήθως, οι εμπορικές διατάξεις ηλεκτρόλυσης αποτελούνται από ένα πλήθος ηλεκτρολυτικών κυψελών σε μορφή συστοιχίας. Οι αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης περιέχουν τα κύρια συστατικά που παρουσιάζονται στην Εικόνα 2-5. Οι σημαντικότερες προκλήσεις για το μέλλον είναι να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης με το χαμηλότερο κόστος αλλά με υψηλότερη ενεργειακή απόδοση (Floch *et al.*, 2007).



Εικόνα 2-5: Διάγραμμα ροής μίας αλκαλικής συσκευής ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή H₂.

2.3.1.2 Ηλεκτρόλυση σε πολυμερικής μεμβράνης ηλεκτρολύτες (PEM)

Η αρχή της ηλεκτρόλυσης που βασίζεται στις κυψέλες τύπου PEM περιγράφεται στις εξισώσεις (11) και (12). Ο ηλεκτρολύτης είναι μια οργανική πολυμερική μεμβράνη, στην οποία τα πρωτόνια που παράγονται στην άνοδο μεταφέρονται στην κάθοδο. Οι PEM συσκευές ηλεκτρόλυσης μπορούν να σχεδιαστούν για να λειτουργούν σε πιέσεις μέχρι αρκετές εκατοντάδες bar, και είναι κατάλληλες τόσο για σταθερές όσο και για κινητές εφαρμογές (Grigoriev *et al.*, 2006). Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των PEM σε σχέση με τις αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης είναι ευελιξία τους όσον αφορά την λειτουργία τους σε ένα μεγάλο εύρος δυναμικοτήτων, η ασφάλεια τους λόγω της απουσίας του ηλεκτρολύτη KOH, η συνεκτικότερη κατασκευή λόγω των υψηλότερων πυκνοτήτων ισχύος που είναι δυνατό να επιτευχθούν και οι υψηλότερες πιέσεις λειτουργίας (καμία ανάγκη για περαιτέρω συμπίεση).



Λόγω όμως του σχετικά υψηλού κόστους, της χαμηλής δυναμικότητας, της μικρής απόδοσης και της σύντομης διάρκεια ζωής, οι συσκευές ηλεκτρόλυσης τύπου PEM, οι οποίες είναι διαθέσιμες σήμερα, δεν είναι τόσο ώριμες εμπορικά όσο οι αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης. Αναμένεται ότι η απόδοση των συσκευών ηλεκτρόλυσης PEM μπορεί να αυξηθεί σημαντικά εάν βελτιστοποιηθούν οι διεργασίες παρασκευής των υλικών από τα οποία αποτελείται και ο σχεδιασμός των συστοιχιών (Grigoriev *et al.*, 2006).

2.3.1.3 Ηλεκτρόλυση σε υψηλές θερμοκρασίες

Η υψηλής θερμοκρασίας ηλεκτρόλυση του ατμού βασίζεται στην αντίστροφη λειτουργία μιας κυψέλης καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας (Herring *et al.*, 2007). Η

ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για να διαχωριστεί το νερό στους 1000°C είναι αρκετά χαμηλότερη από την ηλεκτρόλυση στους 100°C. Αυτό σημαίνει ότι μια υψηλής θερμοκρασίας συσκευή ηλεκτρόλυσης μπορεί να λειτουργήσει σε σημαντικά υψηλότερες αποδόσεις από μια διάταξη ηλεκτρόλυσης που λειτουργεί σε χαμηλές θερμοκρασίες. Μια χαρακτηριστική τεχνολογία αυτής της κατηγορίας είναι η κυψέλη ηλεκτρόλυσης στερεού ηλεκτρολύτη (SOEC).

Γενικά, η ηλεκτρόλυση είναι δυνατό να κλιμακωθεί από λίγα Nm³/h σε αρκετές δεκάδες χιλιάδες Nm³/h, έτσι ώστε να δύναται να χρησιμοποιηθεί σε αποκεντρωμένες εφαρμογές παραγωγής υδρογόνου καθώς επίσης και για μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις παραγωγής υδρογόνου. Σήμερα, η απόδοση των συμβατικών συσκευών ηλεκτρόλυσης είναι περίπου 40–50% (Schuckert, 2005). Άλλες βιβλιογραφικές πηγές αναφέρουν υψηλότερης τιμές απόδοσης, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν στις διαφορές μεταξύ των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας και των εργαστηριακών συνθηκών. Η απόδοση είναι μια βασική παράμετρος για την ηλεκτρόλυση, καθώς το κόστος καθορίζεται κατά ένα μεγάλο μέρος από το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. Η βέλτιστη στην πράξη απόδοση θα μπορούσε να είναι υψηλότερη από 85%, αλλά οι εμπορικές συσκευές επιτυγχάνουν αποδόσεις μεταξύ 55–75%. Οι αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης είναι οι πιο κοινές συσκευές για την ηλεκτρόλυση του νερού, εντούτοις, νέες συσκευές ηλεκτρόλυσης, οι οποίες βασίζονται στην αντίστροφη λειτουργία μιας κυψέλης καυσίμου εισέρχονται αυτήν την περίοδο στην αγορά. Το τρέχον κόστος ηλεκτρόλυσης υπερβαίνει τα 20 €/GJ, αλλά το κόστος θα ήταν δυνατό να μειωθεί περαιτέρω, κάτω από 13 €/GJ (συμπεριλαμβανομένου και του κόστους συμπίεσης) κατά τη διάρκεια των επόμενων δεκαετιών, υποθέτοντας ένα κόστος ηλεκτρικής ενέργειας στα 23 €/MWh και 80% απόδοση της διεργασίας. Η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας σε ώρες εκτός αιχμής και σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας μπορεί να μειώσει περαιτέρω τις δαπάνες, αν και το κόστος CCS αναμένεται να αυξήσει το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, το οξυγόνο ως παραπροϊόν της ηλεκτρόλυσης του νερού μπορεί να επηρεάσει τα οικονομικά της διεργασίας εάν υπάρχει μια επαρκής ζήτηση οξυγόνου σε κοντινές βιομηχανίες.

2.3.2 Άλλες μέθοδοι διάσπασης του νερού

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

Πίνακας 2-3: Τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων συσκευών ηλεκτρόλυσης.

		Υψηλής πίεσης αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης				Συσκευές ηλεκτρόλυσης τύπου PEM		SOEC
		Τεχνολογία αιχμής		Μακροπρόθεσμος στόχος		Τεχνολογία αιχμής	Μακροπρόθεσμος στόχος	Μακροπρόθεσμος στόχος
		Τεχνικά χαρακτηριστικά						
Παραγωγή Υδρογόνου	Nm ³ /h	5-50000	5-50000			10	30	>10000
Απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια	kW/kW _{H2}	1.43	1.3			2		1.07
Απαιτήσεις σε ατμό	kW/kW _{H2}							0.2
Πίεση	Bar	30	100			1.4	400	
Απόδοση (H ₂ LHV)	%	70	80			50		79
Διάρκεια ζωής	yr	20	20					20
Διάρκεια ζωής συστοιχίας	yr					3-4	5	9
		Οικονομικά στοιχεία						
		<5MWel		>55MWel				
		SotA	LTT	SotA	LTT			
Κόστος Επένδυσης								
Συσκευή ηλεκτρόλυσης	€ ₂₀₀₀ /kW _{H2}	525	450	420	360			
Πλήρες σύστημα	€ ₂₀₀₀ /kW _{H2}	600	510	480	410	1565		1000
Κόστος Επένδυσης								
Συσκευή ηλεκτρόλυσης	€ ₂₀₀₀ /kW _{H2}	750	560	600	450			
Πλήρες σύστημα	€ ₂₀₀₀ /kW _{H2}	860	640	690	510	3130		1270
Σταθερό κόστος	%Invest./yr	2	2	2	2	2		2

SotA: Τεχνολογία αιχμής

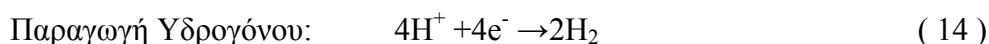
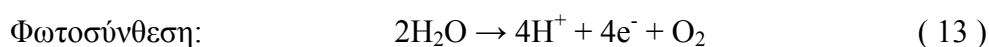
LTT: Μακροπρόθεσμος στόχος

2.3.2.1 Φωτο-ηλεκτρόλυση (φωτόλυση)

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα (PV) που συνδυάζονται με συσκευές ηλεκτρόλυσης διατίθενται σήμερα στο εμπόριο. Τα συστήματα αυτά διακρίνονται από τη σχετική ευελιξία τους, όπως η ταυτόχρονη/διαδοχική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά και υδρογόνου από τη συσκευή ηλεκτρόλυσης (Nowotny *et al.*, 2005). Η άμεση φωτο-ηλεκτρόλυση αντιπροσωπεύει μια προηγμένη εναλλακτική λύση σε ένα σύστημα PV-ηλεκτρόλυσης με το συνδυασμό και των δύο διεργασιών σε μια ενιαία συσκευή. Η φωτο-ηλεκτρόλυση του νερού είναι η διεργασία με την οποία το φως του ήλιου χρησιμοποιείται για να διεγείρει τους ημιαγωγούς που βρίσκονται σε υγρή φάση σε μία συσκευή που μετατρέπει το φως σε χημική ενέργεια προκειμένου να διασπάσει το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο. Το κόστος τέτοιων παρόμοιων συστημάτων μπορεί να είναι μικρότερο σε σχέση με τα συνδυασμένα συστήματα φωτοβολταϊκών-ηλεκτρόλυσης (τεχνολογία δύο βημάτων). Η άμεση παραγωγή του υδρογόνου μέσω της διάσπασης του νερού από το φως του ήλιου απαιτεί μια διάταξη συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (συστοιχία ηλιακών κατόπτρων) και ειδικών καταλυτικών συστημάτων αποδοτικών για την διάσπαση του νερού. Γίνονται πολλές προσπάθειες παγκοσμίως που αφορούν στις φωτο-ηλεκτροχημικές κυψέλες (PEC), οι οποίες κυρίως εστιάζονται στα πεδία της επιστήμης και μηχανικής των υλικών (Varner *et al.*, 2002 και Turner, 2003). Οι στόχοι προκειμένου να εισχωρήσουν στην αγορά συστήματα PEC είναι να επιτευχθεί 10% απόδοση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε υδρογόνο, να έχουν μία μέση διάρκεια ζωής περίπου 10 ετών και το κόστος παραγωγής του υδρογόνου να ανέρχεται σε 2 €/kg (Turner, 2003).

2.3.2.2 Φωτο-Βιολογική παραγωγή

Η φωτο-βιολογική παραγωγή του υδρογόνου είναι βασισμένη σε δύο βήματα: τη φωτοσύνθεση - Εξίσωση (13) - και την παραγωγή του υδρογόνου που καταλύεται από υδρογενάσες - Εξίσωση (14), π.χ., πράσινη άλγη και κυανοβακτήρια (Melis, 2002).



Σε αναερόβιες συνθήκες, η πράσινη άλγη παράγει ένα ένζυμο την υδρογενάση. Η υδρογενάση μέσω της βιο-φωτόλυσης παράγει υδρογόνο από το νερό. Οι συνθήκες πρέπει να είναι απόλυτα ελεγχόμενες, δεδομένου ότι το συγκεκριμένο ένζυμο δραστηριοποιείται απουσία φωτός και είναι πολύ ευαίσθητο στην παρουσία οξυγόνου που παράγεται από τη φωτοσύνθεση. Για να αναπτυχθεί η συγκεκριμένη μέθοδος, απαιτείται μακροχρόνια προσπάθεια τόσο σε βασική όσο και σε εφαρμοσμένη έρευνα, όμως στην περίπτωση που προκύψουν ενθαρρυντικά αποτελέσματα, μπορεί να

αποτελέσει μία βιώσιμη λύση για την ανανεώσιμη παραγωγή υδρογόνου (Levin *et al.*, 2004).

2.3.2.3 Θερμοχημική διάσπαση του νερού

Η διάσπαση του νερού σε υψηλή θερμοκρασία πραγματοποιείται περίπου στους 3000°C. Σε αυτήν την θερμοκρασία, διασπάται το 10% του νερού και το υπόλοιπο 90% μπορεί να ανακυκλωθεί. Για να μειωθεί η θερμοκρασία, έχουν προταθεί άλλες διεργασίες για το διαχωρισμό του νερού σε υψηλή θερμοκρασία (Marban *et al.*, 2007), όπως:

- Θερμο-χημικοί κύκλοι.
- Υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν τη θερμική διάσπαση και ηλεκτρόλυση.
- Άμεση καταλυτική διάσπαση του νερού ("θερμο-φυσικός κύκλος").
- Χημική διάσπαση του νερού με χρήση τεχνολογίας πλάσματος σε έναν κύκλο CO₂ δύο σταδίων.

Για τις παραπάνω διεργασίες αναμένεται να επιτευχθούν αποδόσεις υψηλότερες από 50%, οι οποίες θα μπορούσαν ενδεχομένως να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση του κόστους παραγωγής υδρογόνου. Τα κύρια τεχνολογικής φύσεως ζητήματα που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν για αυτές τις διεργασίες υψηλών θερμοκρασιών, αφορούν στην ανάπτυξη υλικών με υψηλή αντίσταση στη διάβρωση, στην κατασκευή μεμβρανών υψηλών θερμοκρασιών, στους εναλλάκτες θερμότητας, και στα μέσα που απαιτούνται για την αποθήκευση της θερμότητας. Οι σχεδιαστικές παράμετροι καθώς και θέματα που αφορούν την ασφάλεια είναι επίσης σημαντικά για τις διεργασίες υψηλών θερμοκρασιών.

Η θερμοχημική διάσπαση του νερού αφορά στην μετατροπή του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο μέσω μίας σειράς θερμικών χημικών αντιδράσεων. Οι κύκλοι θερμοχημικής διάσπασης είναι γνωστοί εδώ και 35 χρόνια. Η θερμική διάσπαση του νερού πραγματοποιείται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες που υπερβαίνουν τους 2500°C, αλλά οι θερμοχημικές διεργασίες όπως οι κύκλοι ιωδίου/θείου (Vitart *et al.*, 2006) ή του βρωμίου/ασβεστίου μπορούν να μειώσουν τη θερμοκρασία κάτω από τους 1000°C. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι οι θερμοχημικοί κύκλοι υπόκεινται στους περιορισμούς του κύκλου Carnot, και για μια ανώτερη θερμοκρασία 1000 K και μια χαμηλότερη θερμοκρασία 300 K, η μέγιστη θεωρητική απόδοση που μπορεί να επιτευχθεί είναι ίση με 88%. Ενώ δεν γεννάται θέμα για την τεχνική δυνατότητα πραγματοποίησης και τη δυνατότητα για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων, απομένουν πολλά ακόμα βήματα για την είσοδο αυτών των διατάξεων στην αγορά. Οι συγκεκριμένες διεργασίες απαιτούν υψηλές ποσότητες θερμότητας σε χαμηλό κόστος από πυρηνική ή ηλιακή ενέργεια, καθώς επίσης και υλικά ανθεκτικά στη διάβρωση.

2.4 Υδρογόνο από τη βιομάζα

Η βιομάζα είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που θα μπορούσε να διαδραματίσει έναν ουσιαστικό και σημαντικό ρόλο σε ένα διαφοροποιημένο και βιώσιμο ενεργειακό μίγμα. Η βιομάζα μπορεί να οριστεί ως οποιαδήποτε ανανεώσιμη πηγή άνθρακα, όπως τα ξύλα, τα υπολείμματα από το ξύλο, οι γεωργικοί καρποί και τα υπολείμματά τους. Τα βιομηχανικά και αστικά απόβλητα θεωρούνται επίσης συχνά ως βιομάζα λόγω των υψηλών ποσοστών τους σε οργανικά απόβλητα (Ni *et al.*, 2006). Σήμερα αποτελεί το 14% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας. Οι πρώτες ύλες της βιομάζας μπορούν να μετατραπούν σε προηγμένα βιοκαύσιμα με τη χρήση θερμοχημικών και βιολογικών διεργασιών. Η καύση, η πυρόλυση, η ταχεία πυρόλυση (flash pyrolysis ή liquefaction) και η αεριοποίηση είναι οι τέσσερις θερμοχημικές διεργασίες. Η άμεση βιοφωτόλυση, η έμμεση βιοφωτόλυση, η βιολογική αντίδραση μετατόπισης του υδραερίου, η φωτοζύμωση και η ζύμωση απουσία φωτός ανήκουν στις βιολογικές διεργασίες.

Η βιομάζα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να παραχθεί υδρογόνο χωρίς να απαιτούνται σημαντικές τεχνολογικές προκλήσεις και μεταβολές. Η βιομάζα δύναται λοιπόν να αποτελέσει την πλέον πρακτική και βιώσιμη (χωρίς παραγωγή άνθρακα) επιλογή για την παραγωγή υδρογόνου. Δεδομένου ότι η βιομάζα είναι ανανεώσιμη και καταναλώνει το ατμοσφαιρικό CO₂ κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης της, η συνεισφορά της σε εκπομπές CO₂ είναι πάρα πολύ μικρή σε σχέση με τη χρήση ορυκτών καυσίμων. Οι διεργασίες για την παραγωγή του υδρογόνου από βιομάζα μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες (Ni *et al.*, 2006):

- Άμεσοι μέθοδοι παραγωγής (π.χ., αεριοποίηση, πυρόλυση όμοια με αυτή στην περίπτωση του άνθρακα).
- Έμμεσοι τρόποι παραγωγής μέσω της αναμόρφωσης των παραγόμενων βιοκαυσίμων (π.χ. βιοαέριο, βιοέλαιο).
- Διεργασίες μεταβολισμού για την διάσπαση του νερού μέσω της φωτοσύνθεσης, ή για την διεξαγωγή της αντίδρασης μετατόπισης του υδραερίου με χρήση φωτοβιολογικών οργανισμών.

Η καύση αφορά στην άμεση οξείδωση της βιομάζας με αέρα για να μετατρέψει τη χημική ενέργεια της βιομάζας σε θερμότητα, μηχανική ή ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας εξοπλισμό όπως οι σόμπες, οι φούρνοι, οι λέβητες ή οι αεριοστρόβιλοι. Δεδομένου ότι η ενεργειακή απόδοση είναι χαμηλή (10–30%) και τα προϊόντα της διεργασίας αποτελούν αέριους ρύπους, η καύση δεν μπορεί να θεωρηθεί ως η καταλληλότερη διεργασία για την βιώσιμη παραγωγή υδρογόνου. Κατά την ταχεία πυρόλυση της βιομάζας, αυτή θερμαίνεται στους 525-600 K σε πίεση 50-200 bar απουσία αέρα. Ένας διαλύτης ή ένας καταλύτης μπορεί να προστεθεί στη διεργασία. Τα μειονεκτήματα της διεργασίας της ταχείας πυρόλυσης της βιομάζας αφορούν στις δυσκολίες που πρέπει να αντιμετωπιστούν προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές συνθήκες λειτουργίας και στην αναμενόμενη χαμηλή παραγωγή υδρογόνου. Επομένως,

η διεργασία της ταχείας πυρόλυσης της βιομάζας δεν ευνοεί την παραγωγή υδρογόνου. Άλλες θερμοχημικές (πυρόλυση και αεριοποίηση) και βιολογικές (βιο-φωτόλυση, βιολογική αντίδραση μετατόπισης του υδραερίου ζύμωση) διεργασίες είναι εφικτές και έχουν συγκεντρώσει την προσοχή και το ενδιαφέρον πολλών για την παραγωγή υδρογόνου (Ni *et al.*, 2006).

2.4.1 Ζύμωση βιομάζας

Η ζύμωση είναι μια αναερόβια διεργασία απουσία φωτός, όμοια με την αναερόβια χώνευση, για την παραγωγή H_2 . Τα βακτήρια που παράγουν το H_2 στο σκοτάδι μπορούν να καλλιεργηθούν σε καθαρές καλλιέργειες ή να εμφανιστούν σε μικτές καλλιέργειες, όπως η αναερόβια χώνευση της λυματολάσπης ενός βιολογικού καθαρισμού. Το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής του H_2 με αυτή την διαδικασία προέρχεται από τον αναερόβιο μεταβολισμό ενζύμων που προκύπτουν κατά τη διάρκεια του καταβολισμού των διάφορων υποστρωμάτων. Αντίθετα από τη βιο-φωτόλυση που παράγει μόνο H_2 , τα προϊόντα της ζύμωσης απουσίας φωτός είναι συνήθως H_2 και CO_2 που συνδυάζονται με άλλα αέρια, όπως το CH_4 ή το H_2S , ανάλογα με την αντίδραση και το χρησιμοποιούμενο υπόστρωμα. Η ποσότητα του παραγόμενου υδρογόνου από τη ζύμωση απουσία φωτός εξαρτάται από το pH, τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT) και τη μερική πίεση του αερίου. Για τη βέλτιστη παραγωγή υδρογόνου, το pH πρέπει να διατηρείται μεταξύ 5 και 6 (Fang *et al.*, 2002). Η μερική πίεση του H_2 είναι μια ακόμα σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την παραγωγή υδρογόνου. Όταν η συγκέντρωση του υδρογόνου αυξάνεται, η αντίδραση μετατοπίζεται προκειμένου να παραγάγει περισσότερα οξειδωμένα υποστρώματα, όπως λακτόζη, αιθανόλη, ακετόνη, βουτανόλη ή αλανίνη, τα οποία, στη συνέχεια, μειώνουν την αναμενόμενη παραγωγή υδρογόνου (Niel *et al.*, 2003).

2.4.2 Αεριοποίηση και πυρόλυση βιομάζας

Η θερμοχημική μέθοδος της αεριοποίησης αφορά στην μετατροπή μίας ανθρακούχας τροφοδοσίας σε ένα χαμηλού ή μέσου ενεργειακού περιεχομένου αέριο μίγμα μέσω της μερικής οξείδωσης σε υψηλές θερμοκρασίες (Saxena *et al.*, 2007). Η αεριοποίηση του άνθρακα είναι μία καθιερωμένη τεχνολογία και κατά συνέπεια και η τεχνολογία της αεριοποίησης της βιομάζας έχει ωφεληθεί σημαντικά από την υφιστάμενη τεχνογνωσία. Εντούτοις, οι δύο τεχνολογίες δεν είναι δυνατό να συγκριθούν άμεσα λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων στην πρώτη ύλη (π.χ. ενεργότητα του απανθρακώματος, γενική σύσταση τροφοδοσίας, σύσταση τέφρας, περιεκτικότητα σε υγρασία, πυκνότητα).

Η πυρόλυση αφορά στην θερμική διάσπαση που πραγματοποιείται απουσία οξυγόνου. Αποτελεί πάντα το πρώτο βήμα σε διεργασίες καύσης και αεριοποίησης, όπου ακολουθείται από τη συνολική ή μερική οξείδωση των αρχικών προϊόντων. Η χαμηλότερη απαιτούμενη θερμοκρασία για τη διεργασία και οι μεγαλύτεροι χρόνοι παραμονής ευνοούν την παραγωγή ενεργοποιημένου άνθρακα. Η υψηλή θερμοκρασία και οι μεγαλύτεροι χρόνοι παραμονής αυξάνουν τη μετατροπή της βιομάζας σε

βιοαέριο ενώ μία μέση θερμοκρασία και μικρότεροι χρόνοι παραμονής ευνοούν την παραγωγή υγρών προϊόντων (π.χ. βιοέλαιο).

Γενικά, τα κυριότερα αέρια προϊόντα που παράγονται από την πυρόλυση της βιομάζας είναι το H₂, το CO₂, το CO και διάφοροι αέριοι υδρογονάνθρακες, ενώ στην περίπτωση της αεριοποίησης της βιομάζας είναι το H₂, το CO₂, το CO και το N₂. Είναι πλέον γνωστό ότι η χρήση συστημάτων αεριοποίησης + πυρόλυσης επιτρέπει την αντιμετώπιση πλήθους τεχνικών και μη εμποδίων, υποδεικνύοντας ουσιαστικά την ταυτόχρονη χρήση και των δύο τεχνολογιών.

Αντί της άμεσης αεριοποίησης της βιομάζας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ταχεία πυρόλυση για να παραχθεί ένα υγρό ενδιάμεσο προϊόν που ονομάζεται βιοέλαιο, από το οποίο μπορεί να παραχθεί υδρογόνο μέσω της διεργασίας αναμόρφωσης με ατμό (Yaman, 2004). Η βιομάζα αρχικά ξηραίνεται και στην συνέχεια μετατρέπεται σε ένα έλαιο μέσω της ταχείας έκθεσης της σε υψηλή θερμοότητα σε έναν αντιδραστήρα ρευστοστερεάς κλίνης. Το απανθράκωμα και τα αέρια που παράγονται καίγονται περαιτέρω για να παρέχουν την απαιτούμενη θερμοότητα στον αντιδραστήρα, ενώ τα υγρά προϊόντα ψύχονται, συμπυκνώνονται και ανακτούνται. Η καταλυτική ατμοαναμόρφωση του βιοελαίου πραγματοποιείται στους 750-850°C με χρήση καταλυτών Ni. Η ιδέα της ταχείας πυρόλυσης που συνδυάζεται με την διεργασία της ατμοαναμόρφωσης αναμένεται να έχει περισσότερα πλεονεκτήματα έναντι της παραδοσιακής τεχνολογίας αεριοποίησης/αντίδρασης μετατόπισης του υδραερίου. Το βιοέλαιο είναι πολύ ευκολότερο να μεταφερθεί σε σχέση με τη στερεή βιομάζα, προσφέροντας τη δυνατότητα παραγωγής του βιοελαίου σε μικρότερες εγκαταστάσεις που θα γειτνιάζουν με την πηγή της βιομάζας, μειώνοντας το κόστος της πρώτης ύλης. Ένα δεύτερο πλεονέκτημα αφορά στην δυνητική παραγωγή και ανάκτηση από το βιοέλαιο χημικών προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας, όπως οι φαινόλες, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτες ύλες για την παρασκευή ρητινών (Yaman, 2004).

Ενώ η έρευνα & ανάπτυξη εστιάζει στην αεριοποίηση, συνέργειες με άλλες διεργασίες παραγωγής καυσίμων (βιοκαύσιμα) θα μπορούσαν να ανοίξουν το δρόμο σε άλλες επιλογές και να επιταχύνουν την ανάπτυξη της συγκεκριμένης αγοράς. Γενικά, δεδομένου ότι η διαθεσιμότητα της βασικής πρώτης ύλης είναι περιορισμένη, η παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα δεν αναμένεται να ωφεληθεί από τις οικονομίες μεγάλης κλίμακας. Το κόστος αναμένεται να είναι υψηλότερο έναντι της αεριοποίησης του άνθρακα ή της αναμόρφωσης του φυσικού αερίου.

2.5 Προοπτικές και εμπόδια για την παραγωγή H₂

2.5.1 Κεντροποιημένη παραγωγή υδρογόνου

Η βιομηχανική (μεγάλης κλίμακας) παραγωγή υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα μπορεί να θεωρηθεί εμπορική τεχνολογία. Η παραγωγή υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα διακρίνεται από το σχετικά χαμηλό κόστος της μονάδας, αν και το κόστος παραγωγής

του υδρογόνου από το φυσικό αέριο στις μεσαίου μεγέθους εγκαταστάσεις μπορεί να μειωθεί έως το αντίστοιχο κόστος που επιτυγχάνεται στις μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις. Μια σημαντική πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η διεργασία παραγωγής του υδρογόνου να έχει ουδέτερο ανθρακικό αποτύπωμα. Οι διάφορες επιλογές που υφίστανται για CCS δεν είναι δυνατό να θεωρηθούν σήμερα πλήρως τεχνικά και οικονομικά εφαρμόσιμες. Απαιτούν περαιτέρω έρευνα & ανάπτυξη στις διεργασίες απορρόφησης ή διαχωρισμού, επεξεργασίας, καθώς επίσης και στην αποδοχή που θα πρέπει να υπάρχει για την αποθήκευση του CO₂. Είναι επίσης σημαντικό να αυξηθεί η απόδοση των εγκαταστάσεων, να μειωθεί το αρχικό κόστος και να ενισχυθεί η αξιοπιστία και η ευελιξία στην λειτουργία.

Περαιτέρω έρευνα & ανάπτυξη απαιτείται ιδιαίτερα στον καθαρισμό και διαχωρισμό (του υδρογόνου ή του CO₂ από το παραγόμενο αέριο μίγμα) του υδρογόνου. Αυτό περιλαμβάνει την ανάπτυξη καταλυτών, υλικών προσρόφησης και μεμβρανών διαχωρισμού αερίων για την παραγωγή και τον καθαρισμό του υδρογόνου. Αν χρησιμοποιηθούν διεργασίες συνδυασμένου κύκλου με αεριοποίηση (IGCC) είναι δυνατό να επιτευχθεί η συμπαραγωγή υδρογόνου και θερμικής/ηλεκτρικής ισχύος. Οι διεργασίες IGCC αποτελούν την πλέον προηγμένη και αποδοτική λύση, στην οποία ο άνθρακας που περιέχεται στα καύσιμα αφαιρείται και το υδρογόνο παράγεται σε μια διεργασία προ-καύσης. Όμως, η οικονομικά βέλτιστη παραγωγή υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα απαιτεί και μεγάλη ζήτηση στην αγορά, καθώς επίσης και την κατασκευή μιας νέας υποδομής γραμμών μεταφοράς και διανομής του υδρογόνου και αντίστοιχων υποδομών για την αποθήκευση του CO₂. Στο μέλλον, η κεντροποιημένη παραγωγή υδρογόνου από υψηλής θερμοκρασίας διεργασίες που θα βασίζονται στην ανανεώσιμη ενέργεια και στην απορριπτόμενη θερμότητα (π.χ. πυρηνικοί σταθμοί) θα μπορεί επίσης να αποτελέσει μια επιλογή για αειφόρο ανάπτυξη χωρίς να απαιτείται επιπρόσθετα η δέσμευση και αποθήκευση του CO₂.

2.5.2 Κατανεμημένη παραγωγή υδρογόνου

Η κατανεμημένη παραγωγή υδρογόνου μπορεί να βασιστεί τόσο στην ηλεκτρόλυση του νερού όσο και στις διεργασίες του φυσικού αερίου που αναφέρθηκαν παραπάνω. Το όφελος αφορά στις μειωμένες απαιτήσεις για τη μεταφορά του καυσίμου υδρογόνου, και ως εκ τούτου στην μείωση των αναγκών για την κατασκευή νέων υποδομών μεταφοράς υδρογόνου. Η κατανεμημένη παραγωγή θα χρησιμοποιούσε επίσης την υπάρχουσα υποδομή, όπως αυτή του φυσικού αερίου ή του νερού και της ηλεκτρικής ενέργειας. Εντούτοις, το κόστος παραγωγής είναι υψηλότερο στις μικρότερες εγκαταστάσεις παραγωγής, και οι αποδόσεις θα είναι πιθανά μικρότερες σε σύγκριση με την κεντροποιημένη παραγωγή σε μεγάλη κλίμακα. Επίσης, είναι πολύ δύσκολο στις μικρής κλίμακας μονάδες παραγωγής υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα να αναπτυχθούν συστήματα δέσμευσης και αποθήκευσης του παραγόμενου CO₂. Οι μικρής κλίμακας αναμορφωτές θα επιτρέψουν τη χρήση των υπάρχουσών υποδομών του φυσικού αερίου για την παραγωγή του υδρογόνου επί του τόπου από τον καταναλωτή. Τέτοιοι αναμορφωτές επομένως αποτελούν μια σημαντικότερη τεχνολογία για τη μετάβαση

στην εποχή της οικονομίας του υδρογόνου. Η διαθεσιμότητα των αναμορφωτών στην αγορά είναι περιορισμένη και οι περισσότεροι αναμορφωτές βρίσκονται αυτήν την περίοδο στο στάδιο της έρευνας και ανάπτυξης.

Ορισμένες από τις προαναφερόμενες δυσκολίες ενέχουν προκλήσεις και απαιτούν περισσότερη προσπάθεια από τους υπεύθυνους για την ανάπτυξη της τεχνολογίας και τους προμηθευτές. Τα επιτεύγματα της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια είναι αξιόλογα και τα τυχόν χάσματα που υπάρχουν έχουν γεφυρωθεί σημαντικά. Ο όγκος των εμπορικών διατάξεων αποτελεί μια ιδιαίτερα σημαντική απαίτηση της αγοράς. Οι προμηθευτές έχουν μειώσει σημαντικά τον συνολικό όγκο. Το βέλτιστο σύστημα για το μέλλον θα ήταν η οποιαδήποτε διάταξη για την παραγωγή υδρογόνου να τοποθετείται υπογείως σε ένα χώρο $10 \times 3 \times 3$ m για δυναμικότητες παραγωγής υδρογόνου της τάξης των 500-700 Nm³/h. Ο στόχος αυτό θεωρείται εφικτός. Εντούτοις, ο χώρος που απαιτείται για την παραγωγή του υδρογόνου αποτελεί ένα σημαντικό μειονέκτημα.

2.5.3 Δυνατότητες και εμπόδια

Το υδρογόνο είναι πιθανό να κερδίσει ένα σημαντικό μερίδιο της αγοράς ενέργειας κατά τη διάρκεια των ερχόμενων δεκαετιών εάν το κόστος παραγωγής, διανομής και τελικής χρήσης του υδρογόνου μειωθούν σημαντικά, και εάν τεθούν σε ισχύ αποτελεσματικές πολιτικές για αύξηση της απόδοσης, μείωση των εκπομπών του CO₂ και βελτίωση του ενεργειακού εφοδιασμού και της σχετιζόμενης ασφάλειας. Το κόστος παραγωγής H₂ πρέπει να μειωθεί κατά 3 έως 10 φορές (ανάλογα με την τεχνολογία και την διεργασία). Συγχρόνως τα οικονομικά κίνητρα μείωσης των εκπομπών σε 17–33 €/tCO₂ (ανάλογα με την τιμή των ορυκτών καυσίμων) θα βοηθούσαν να καταστήσουν το καύσιμο H₂ ανταγωνιστικότερο οικονομικά. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η αύξηση των εκπομπών κατά τη διάρκεια των ερχόμενων δεκαετιών θα μπορούσε να μειωθούν σημαντικά ώστε οι αναμενόμενες εκπομπές το 2050 να έχουν ελαττωθεί κατά το ήμισυ.

Το ανανεώσιμο υδρογόνο αναμένεται ότι θα διαδραματίσει έναν σημαντικό ρόλο μακροπρόθεσμα. Ο σχεδιασμός της μετάβασης προς τις τεχνολογίες παραγωγής ανανεώσιμου υδρογόνου θα επηρεαστεί έντονα από την αρχική υποδομή που θα απαιτηθεί για να επιτρέψει σε ένα αρχικό στάδιο την μαζική διείσδυση του στην αγορά. Λόγω της διάρκειας ζωής μιας τυπικής εγκατάστασης (περίπου 20 έτη) για τον βασικό εξοπλισμό όπως οι συσκευές ηλεκτρόλυσης, οι σταθμοί ανεφοδιασμού ή οι μεγάλης κλίμακας αναμορφωτές, οι επιλογές που θα γίνουν τώρα για τα μεγάλης κλίμακας επιδεικτικά έργα και η ακόλουθη φάση εισαγωγής στην αγορά θα φέρουν τα πρώτα αποτελέσματα μετά το 2030. Ως εκ τούτου μια μελλοντική ενεργειακή πολιτική πρέπει να εξετάσει το θέμα της χρήσης των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας θεωρώντας ότι οι (συγκριτικά φτηνοί) ανανεώσιμοι πόροι είναι περιορισμένοι και υπάρχει ήδη ένας ισχυρός ανταγωνισμός μεταξύ των σταθερών χρηστών σε μερικές περιοχές λόγω των υφιστάμενων νόμων και κινήτρων για την παραγωγή "πράσινης" ηλεκτρικής ενέργειας.

3 Αποθήκευση, Διανομή, Ασφάλεια H₂

3.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Το ενδιαφέρον για το υδρογόνο ως πιθανό ενεργειακό φορέα έχει αυξηθεί σημαντικά την τελευταία δεκαετία, εξαιτίας των ραγδαίων εξελίξεων στην τεχνολογία των κυψελών καυσίμου που παράγουν ενέργεια και νερό ως παραπροϊόν. Επομένως η ανάπτυξη της παραπάνω τεχνολογίας αναμένεται να αποτελέσει καθοριστικό παράγοντα στη μετάβαση σε ένα μελλοντικό σύστημα βιώσιμης ενέργειας με μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, ειδικά στον τομέα των μεταφορών όπου οι περισσότεροι από τους μεγαλύτερους κατασκευαστές οχημάτων παγκοσμίως επενδύουν σε προγράμματα έρευνας και ανάπτυξης οχημάτων με κυψέλες καυσίμου (Von Helmholt and Eberle, 2007 και Mehta and Cooper, 2003). Η ανάγκη για παγκόσμια αλλαγή από ορυκτά καύσιμα σε H₂ απαιτεί την αντιμετώπιση μιας σειράς προκλήσεων που εμφανίζονται κατά τα διάφορα στάδια των τεχνολογιών H₂.

Αν και η παραγωγή, η αποθήκευση και οι τεχνολογίες μεταφοράς υδρογόνου χρησιμοποιούνται εμπορικά στην χημική και πετρελαιοχημική βιομηχανία, οι παραπάνω τεχνολογίες θεωρούνται ακριβές για περαιτέρω χρήση σε ενεργειακές εφαρμογές. Η εμπορικά βιώσιμη τεχνολογία αποθήκευσης υδρογόνου θεωρείται ως μια από τις πιο κρίσιμες προκλήσεις από τεχνολογική άποψη, στην αποδοτική χρήση του υδρογόνου ως ενεργειακό φορέα (Edwards *et al.*, 2007, Crabtree *et al.*, 2004, Harris *et al.*, 2004, Kikkinides, 2008). Το H₂ περιέχει περισσότερη ενέργεια κατά βάρος από κάθε άλλη ουσία. Δυστυχώς όμως, επειδή είναι το πιο ελαφρύ χημικό στοιχείο του περιοδικού πίνακα, έχει επίσης και πολύ χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα όγκου (Πίνακας 3-1).

Πίνακας 3-1: Ενεργειακές πυκνότητες διαφόρων καυσίμων (Kikkinides, 2008).

Καύσιμο	Ενεργειακή πυκνότητα κατά βάρος (kWh/kg)	Ενεργειακή πυκνότητα κατ' όγκο (kWh/l)
Βενζίνη	12,7	8,7
Diesel	12,6	10,6
Λιγνίτης	8,2	7,6
Φυσικό αέριο	13,9	2,6
Υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG)	13,9	5,6
Υδρογόνο-αέριο (200 bar)	33,3	0,53
Υδρογόνο-υγρό	33,3	2,37
Μεθανόλη	5,6	4,4

Είναι αναμενόμενο ότι η οικονομία του υδρογόνου απαιτεί δύο τύπους συστημάτων αποθήκευσης υδρογόνου, έναν για στατικές εφαρμογές και έναν για κινητές εφαρμογές (οχήματα). Κάθε σύστημα έχει τις δικούς του περιορισμούς και απαιτήσεις. Ωστόσο, είναι αποδεδειγμένο ότι οι κινητές εφαρμογές είναι πολύ πιο απαιτητικές αντιμετωπίζοντας τις παρακάτω ανάγκες (Agrawal *et al.*, 2005, Edwards *et al.*, 2007):

- Υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο υδρογόνου ανά μονάδα όγκου, εξαιτίας περιορισμών χώρου και βάρους, ειδικά στην αυτοκινητοβιομηχανία.
- Χαμηλές πιέσεις λειτουργίας για λόγους ασφαλείας.
- Θερμοκρασία λειτουργίας από -50°C ως 150°C.
- Υψηλούς ρυθμούς φόρτισης και από-φόρτισης του υδρογόνου για εφοδιασμό των οχημάτων σε σύντομους χρόνους.
- Σχετικά χαμηλό κόστος του συστήματος αποθήκευσης.

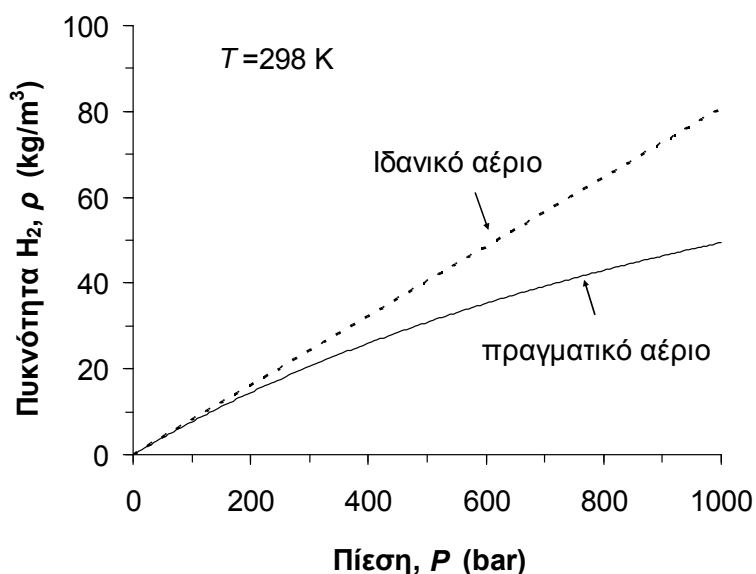
Οι προαναφερθείσες απαιτήσεις επιβάλουν την αντιμετώπιση αρκετών επιστημονικών και τεχνολογικών προκλήσεων για την ανάπτυξη αποτελεσματικών συστημάτων αποθήκευσης σε κινητές εφαρμογές. Δυστυχώς, μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν συστήματα αποθήκευσης υδρογόνου που να ανταποκρίνονται σε όλα τα παραπάνω κριτήρια. Οι στατικές εφαρμογές, από την άλλη, δεν έχουν περιορισμούς βάρους και χώρου, μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες και έχουν την επιπλέον ικανότητα να αντισταθμίζουν τους χαμηλούς ρυθμούς αντίδρασης.

Οι σύγχρονες εμπορικά εφαρμόσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης H₂ έχουν επικεντρωθεί σε δοχεία υψηλής πίεσης (250-700 bar) ή σε υγρό υδρογόνο σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (20-30 K). Αποθήκευση του υδρογόνου σε εξαντλημένους ταμειυτήρες υδρογονανθράκων αποτελεί μια πιθανή εναλλακτική λύση, αποδοτική σε κόστος, αλλά μόνο για στατικές εφαρμογές (Taylor *et al.*, 1986; Venter *et al.*, 1997; Stone *et al.*, 2005). Η χρήση προηγμένων υλικών για την αποθήκευση του υδρογόνου που περιλαμβάνουν προσροφητές, μεταλλικά και χημικά υδρίδια κλπ, μπορεί να αποτελέσει μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση, ωστόσο, η ανάγκη για μεγάλες ποσότητες των υλικών αυτών σε συνδυασμό με το κόστος καθώς και ζητήματα αντιστρεπτότητας και κυκλικής σταθερότητας περιορίζουν προς το παρόν την παραπάνω μέθοδο σε εφαρμογές μικρής κλίμακας.

3.2 Αποθήκευση με συμπίεση

Η αποθήκευση συμπιεσμένου υδρογόνου (Compressed Gas Hydrogen - CGH₂) αποτελεί εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία αποθήκευσης. Με δεδομένο ότι το υδρογόνο έχει χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα όγκου, πρέπει να συμπιεστεί σε πολύ υψηλές πιέσεις ώστε να αποθηκευτεί επαρκής ποσότητα υδρογόνου σε περιορισμένο όγκο ένα πρόβλημα που συναντάται ιδιαίτερα σε κινητές εφαρμογές. Επιπλέον το

υδρογόνο δεν θα πρέπει να θεωρείται ιδανικό αέριο για πιέσεις μεγαλύτερες των 150 bar (Wetzel *et al.*, 1998), όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-1.

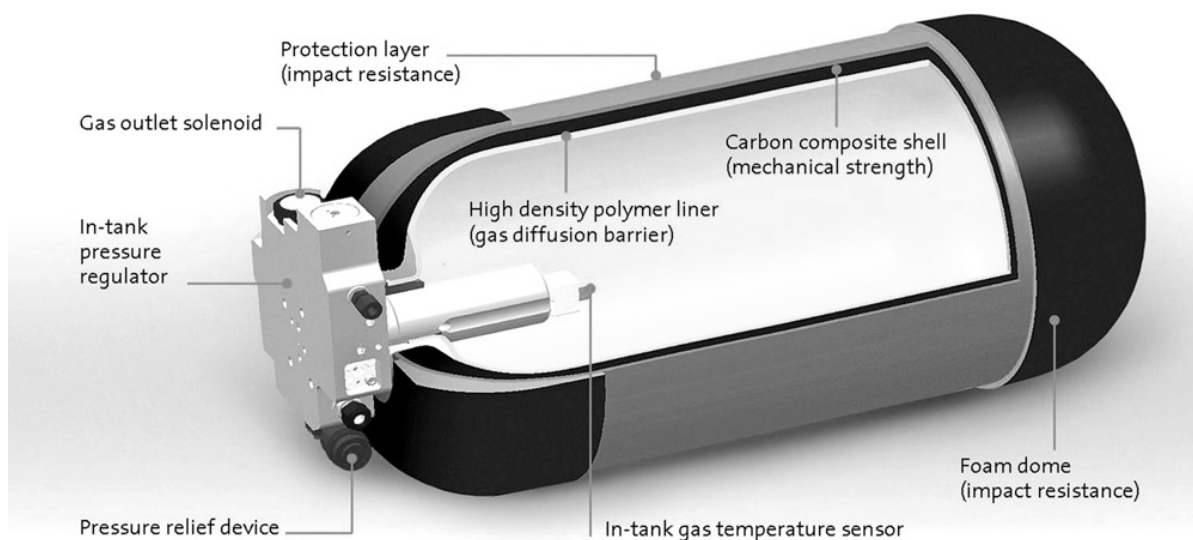


Εικόνα 3-1: Η πυκνότητα του αερίου υδρογόνου ως συνάρτηση της πίεσης, σε θερμοκρασία δωματίου (Πηγή: προσαρμογή από Kikkinides, 2008).

Από την παραπάνω εικόνα διαπιστώνεται ότι σε θερμοκρασία δωματίου, η πυκνότητα του συμπιεσμένου υδρογόνου στα 350 bar είναι περίπου 23 g/lit, και στα 700 bar είναι περίπου 40 g/lit. Βιομηχανικά πρότυπα για αποθήκευση συμπιεσμένου υδρογόνου είναι στα 350 bar, με έναν απώτερο στόχο τα 700 bar. Δοχεία πίεσης έως 700 bar μπορούν να πετύχουν πυκνότητα αποθήκευσης ~6% wt. και 30 g/lit. Ωστόσο απαιτούν τη χρήση ακριβών σύνθετων υλικών ώστε να επιτευχθούν οι διαφορετικοί στόχοι. Ο συνδυασμός ποικιλίας διαφορετικών υλικών αυξάνει σημαντικά το κόστος του δοχείου αποθήκευσης. Σχηματική απεικόνιση ενός πρότυπου δοχείου αποθήκευσης αερίου υδρογόνου υψηλής πίεσης φαίνεται στην Εικόνα 3-2.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της αποθήκευσης συμπιεσμένου υδρογόνου (CGH_2) είναι ότι αποτελεί μία σχετικά απλή και ταχεία διαδικασία, αφού ο εφοδιασμός της δεξαμενής ενός οχήματος μπορεί να ολοκληρωθεί μέσα σε 3 λεπτά. Εξαιτίας αυτών των πλεονεκτημάτων, η μέθοδος CGH_2 έχει υιοθετηθεί σε πολλά πρωτότυπα οχήματα με κυψέλες καυσίμου (von Helmholt and Eberle, 2007). Τα κύρια μειονεκτήματα σχετίζονται με τις σχετικά χαμηλές ογκομετρικές και σταθμικές πυκνότητες, συγκρινόμενες με διαφορετικές μεθόδους αποθήκευσης. Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα για τη διαδεδομένη χρήση της μεθόδου είναι η φοβία του κοινού για τα θέματα ασφαλείας που σχετίζεται με τις εξαιρετικά υψηλές πιέσεις των δοχείων υδρογόνου κατά τη λειτουργία ενός κοινού επιβατικού αυτοκινήτου. Εντούτοις, πρόσφατα αποτελέσματα δοκιμών έχουν δείξει ότι σύνθετα δοχεία που λειτουργούν σε πιέσεις των 700 bar είναι πιθανό να είναι στην πραγματικότητα πιο ασφαλή από ότι τα

δοχεία χαμηλής πίεσης που χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία (Felderhoff *et al.*, 2007 and Zhang *et al.*, 2005). Περισσότερες λεπτομέρειες αναφορικά με τη λειτουργία της διεργασίας της μεθόδου αποθήκευσης καθώς και συναφή ενεργειακά ζητήματα που προκύπτουν υπάρχουν σε πιο εξειδικευμένες αναφορές (π.χ. βλέπε Kikkinides (2008) και σχετικές αναφορές εντός).



Εικόνα 3-2: Πρωτότυπο δοχείο που περιέχει συμπιεσμένο αέριο υδρογόνο (von Helmholt and Eberle, 2007).

3.3 Αποθήκευση με υγροποίηση

Η αποθήκευση υγρού υδρογόνου (LH₂) αποτελεί μια επίσης εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία. Υγρό υδρογόνο αποθηκεύεται σε ατμοσφαιρική πίεση σε κρυογενικές δεξαμενές σε θερμοκρασία 20,3 K με πυκνότητα 70,8 g/lit, η οποία είναι σχεδόν διπλάσια της πυκνότητας του συμπιεσμένου υδρογόνου στα 700 bar. Μία κρυογενική δεξαμενή 68 lt μπορεί να περιέχει περίπου 5 kg LH₂, το οποίο είναι επαρκές για να κινήσει ένα επιβατικό αυτοκίνητο για απόσταση 500 km. Δεξαμενές LH₂ μπορούν να πληρωθούν σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα και είναι πολύ πιο ασφαλείς σε κρυογενικές θερμοκρασίες από ότι οι υψηλής πίεσης δεξαμενές υδρογόνου. Το κύριο μειονέκτημα της αποθήκευσης υγροποιημένου υδρογόνου είναι η υψηλή κατανάλωση ενέργειας που σχετίζεται με τις διαδικασίες ρευστοποίησης και τη συνεχή «εξάτμιση» κατά την αποθήκευση (Zhang *et al.*, 2005). Η απαιτούμενη ενέργεια για να υγροποιηθεί το υδρογόνο είναι περίπου το 30-40% του ενεργειακού περιεχομένου του αερίου και για το λόγο αυτό μειώνει σημαντικά τη συνολική απόδοση του συστήματος. Οι χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας συγκρινόμενες με τις περιβαλλοντικές συνθήκες θερμοκρασίας 300 K, οδηγούν σε αναπόφευκτη ροή θερμότητας προς το περιβάλλον εξαιτίας των τριών βασικών μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας: αγωγή, συναγωγή και

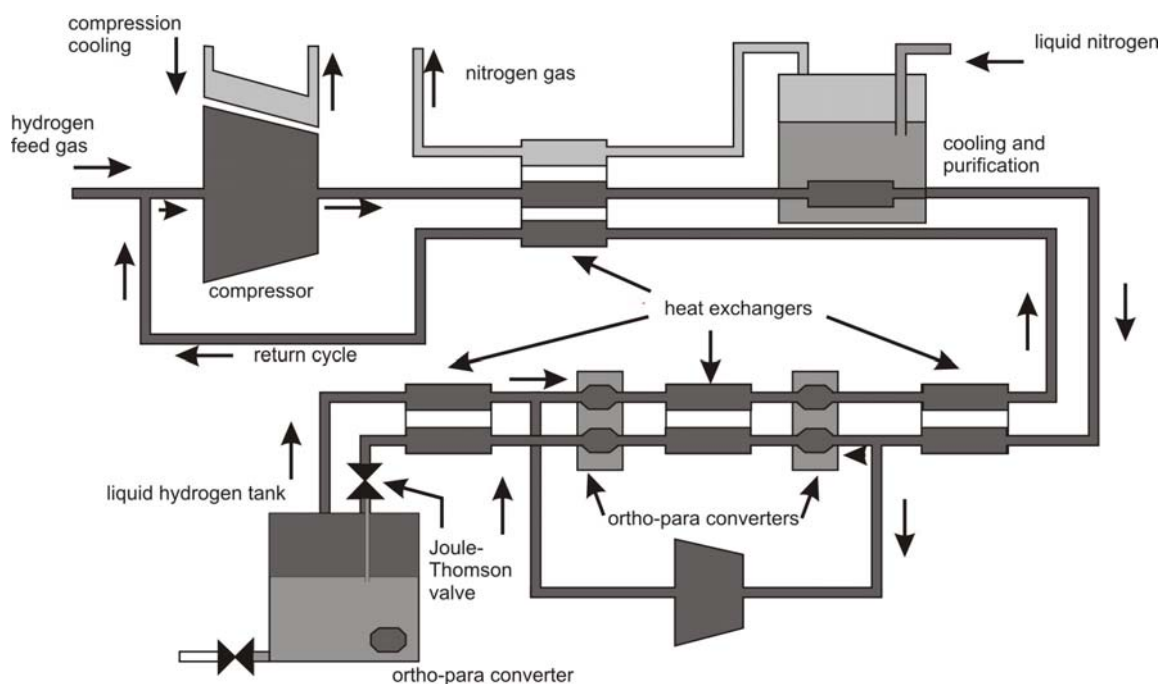
ακτινοβολία, από τους οποίους ο πρώτος και ο τρίτος είναι οι κυρίαρχοι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας προς το περιβάλλον (von Helmholt and Eberle, 2007 και, Felderhoff *et al.*, 2007).

Η ανάγκη να ελαχιστοποιηθούν ενεργειακές απώλειες και ο χρόνος ανεφοδιασμού του LH₂ είχε ως αποτέλεσμα την εντατική συνεργασία την τελευταία εικοσαετία μεταξύ της BMW και της SWB, μιας κοινοπραξίας μεταξύ της Bayernwerk AG, BMW INTEC GmbH, Linde AG και της Siemens AG. Μελέτες βελτιστοποίησης των παραπάνω θεμάτων έχουν προχωρήσει στη SWB από το 1991 και έχουν οδηγήσει σε μείωση του χρόνου ανεφοδιασμού του LH₂ από >1 ώρα σε λιγότερο από 3 λεπτά (Wetzel, 1998). Το Μάιο του 1999 άρχισε την λειτουργία του ο πρώτος δημόσιος σταθμός ανεφοδιασμού για υγρό υδρογόνο στο αεροδρόμιο του Μονάχου. Ο σταθμός ανεφοδιασμού λειτουργεί πλήρως αυτοματοποιημένα υιοθετώντας ρομποτικές μεθόδους ανεφοδιασμού πετυχαίνοντας πλήρη αυτοματοποιημένο ανεφοδιασμό ενός οχήματος σε 2-3 λεπτά χωρίς εκπομπές ή οσμές, με μία ελεγχόμενη και αξιόπιστη συμπεριφορά του συστήματος (Pehr *et al.*, 2001).

Η υγροποίηση του υδρογόνου απαιτεί την αφαίρεση θερμότητας και την απόρριψή της στο περιβάλλον υιοθετώντας ένα συνδυασμό ψυκτικών διεργασιών οι οποίες είναι καθιερωμένες στην κρυογενική βιομηχανία (Li *et al.*, 1999, 2007). Πριν τη ρευστοποίηση, το υδρογόνο πρέπει να καθαριστεί για την απομάκρυνση των αερίων CO₂, CO, CH₄, και H₂O (υγρασία). Αυτό συνήθως γίνεται χρησιμοποιώντας μία διαδικασία προσρόφησης με εναλλαγή της πίεσης (PSA). Ο απλούστερος κύκλος ρευστοποίησης είναι ο κύκλος Joule – Thomson στον οποίο το αέριο υδρογόνο αρχικά συμπιέζεται σε υψηλές πιέσεις ($p \geq 40$ bar) και στη συνέχεια εκτονώνεται σε χαμηλότερη πίεση μέσω ενός ακροφυσίου ή μίας βαλβίδας στραγγαλισμού, σε αδιαβατικές συνθήκες, παράγοντας υγρό. Το ψυχρό αέριο διαχωρίζεται από το υγρό και επιστρέφει στο συμπιεστή μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας.

Θερμοδυναμικά, η υγροποίηση του υδρογόνου εμπεριέχει τρία στάδια μεταφοράς θερμότητας (Zhang *et al.*, 2005): Το πρώτο στάδιο αφαιρεί αισθητή θερμότητα (4000 kJ/kg) ώστε να μειώσει τη θερμοκρασία από τους 300 K στους 20,3 K. Στο δεύτερο στάδιο αφαιρείται λανθάνουσα θερμότητα (450 kJ/kg) ώστε να συμπυκνωθεί το υδρογόνο στους 20,3 K. Το τρίτο στάδιο είναι η μετατροπή του ορθοϋδρογόνου σε παραϋδρογόνο, η οποία απαιτεί αποβολή θερμότητας 703 kJ/kg. Περισσότερες λεπτομέρειες αναφορικά με τη λειτουργία της διεργασίας της μεθόδου αποθήκευσης υγροποιημένου υδρογόνου καθώς και συναφή ενεργειακά ζητήματα που προκύπτουν υπάρχουν σε πιο εξειδικευμένες αναφορές (π.χ. βλέπε Kikkinides (2008) και σχετικές αναφορές εντός).

Ένα σχηματικό διάγραμμα ροής της συνδυασμένης διεργασίας υγροποίησης-μετατροπής υδρογόνου παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-3.

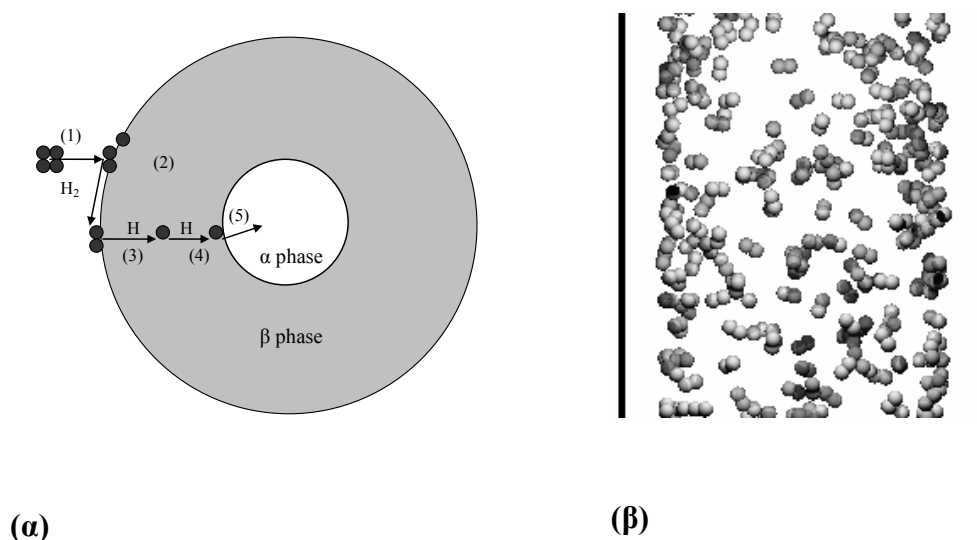


Εικόνα 3-3: Σχηματική απεικόνιση υγροποίησης και μετατροπής υδρογόνου (Kikkinides, 2008).

3.4 Αποθήκευση σε προηγμένα υλικά

Μια εναλλακτική λύση στις παραδοσιακές μεθόδους αποθήκευσης υδρογόνου αποτελεί η αποθήκευση υδρογόνου σε προηγμένα στερεά υλικά τα οποία λειτουργούν ως μικρο-δεξαμενές αποθήκευσης του υδρογόνου σε ατομική ή μοριακή μορφή. Η παραπάνω μέθοδος αποθήκευσης αναφέρεται συχνά ως μέθοδος αποθήκευσης «στερεού» υδρογόνου διότι το υδρογόνο αποτελεί μέρος του στερεού υλικού μέσω φυσικοχημικών δεσμών.

Στην παρούσα φάση υπάρχουν δύο θεμελιώδεις μηχανισμοί αποθήκευσης στερεού υδρογόνου με αντιστρεπτό τρόπο: η απορρόφηση και η προσρόφηση. Κατά την απορρόφηση το υδρογόνο απορροφάται από τον κύριο όγκο του υλικού που δρα ως σπόνγγος. Σε απλά κρυσταλλικά μεταλλικά υδρίδια η απορρόφηση λαμβάνει χώρα με την ενσωμάτωση του υδρογόνου σε ατομική μορφή στις ενδόθετες θέσεις του κρυσταλλικού πλέγματος (Schlapbach and Züttel, 2001) μέσα από μια σειρά σταδίων όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-4α. Η προσρόφηση από την άλλη μεριά λαμβάνει χώρα μέσα από την αλληλεπίδραση των μορίων του υδρογόνου με τα τοιχώματα των πόρων του προσροφητικού υλικού (Εικόνα 3-4β) και διακρίνεται σε φυσική και χημική ρόφηση ανάλογα με τις δυνάμεις προσρόφησης που λαμβάνουν χώρα σε κάθε περίπτωση. Ένας τρίτος μηχανισμός αποθήκευσης «στερεού» υδρογόνου λαμβάνει χώρα μέσω χημικών αντιδράσεων (Stone *et al.*, 2005 και Schlapbach and Züttel, 2001).



Εικόνα 3-4: Σχηματική αναπαράσταση μηχανισμών αποθήκευσης στερεού υδρογόνου: (α) απορρόφηση, (β) προσρόφηση.

Η αποθήκευση στερεού υδρογόνου παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα από την άποψη της ασφάλειας δεδομένου ότι απαιτούνται ηπιότερες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας σε σχέση με τις μεθόδους συμπιεσμένου και υγροποιημένου υδρογόνου, αντίστοιχα. Ανασκόπηση των κυριότερων επιτευγμάτων στην ανάπτυξη υλικών αποθήκευσης «στερεού» υδρογόνου υπάρχει σε μια σειρά από σχετικές μελέτες στη βιβλιογραφία (Wetzel, 1998; Schlapbach and Züttel, 2001; Dornheim *et al.*, 2006; Seyad and Antonelli, 2004; Sakintun *et al.*, 2007, Berube *et al.*, 2007; Thomas, 2007).

Τα υλικά που αναπτύσσονται οφείλουν να ικανοποιούν τους στόχους της ελάχιστης χωρητικότητας 6,5% wt. και 65 g/lit σε υδρογόνο, σε θερμοκρασίες μεταξύ 60 και 120°C και πιέσεις μικρότερες από 150 bar για εμπορικές εφαρμογές (<http://www.doe.gov>). Επιπλέον το κόστος του υλικού αποθήκευσης πρέπει να μην είναι υψηλό για να μπορεί η μέθοδος αποθήκευσης να είναι ανταγωνιστική με τις συμβατικές τεχνολογίες (Sakintun *et al.*, 2007).

3.4.1 Προσροφητικά υλικά

Η αποθήκευση του υδρογόνου μέσω προσρόφησης σε σχετικά χαμηλές πιέσεις (≤ 150 bar) και θερμοκρασία δωματίου παρέχει το πλεονέκτημα της αυξημένης ασφάλειας σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες όπου απαιτείται είτε πολύ υψηλή πίεση είτε πολύ χαμηλή θερμοκρασία.

Το γεγονός ότι το υδρογόνο έχει πολύ χαμηλό κανονικό σημείο βρασμού και κρίσιμη θερμοκρασία (20,3 K και 33,25 K, αντίστοιχα) αποκλείει τη δυνατότητα συμπίκνωσης μέσα στους πόρους ενός προσροφητικού υλικού σε συνήθεις θερμοκρασίες. Επομένως η φυσική ρόφηση λαμβάνει χώρα λόγω δυνάμεων van der Waals με το σχηματισμό μονομοριακής στοιβάδας στην επιφάνεια των πόρων του υλικού. Για μονομοριακή κάλυψη στους 77 K το προσροφημένο ποσό υδρογόνου αυξάνει γραμμικά με την ειδική

επιφάνεια των προσροφητικών υλικών (Schlapbach and Züttel, 2001, Sakintun et al., 2007).

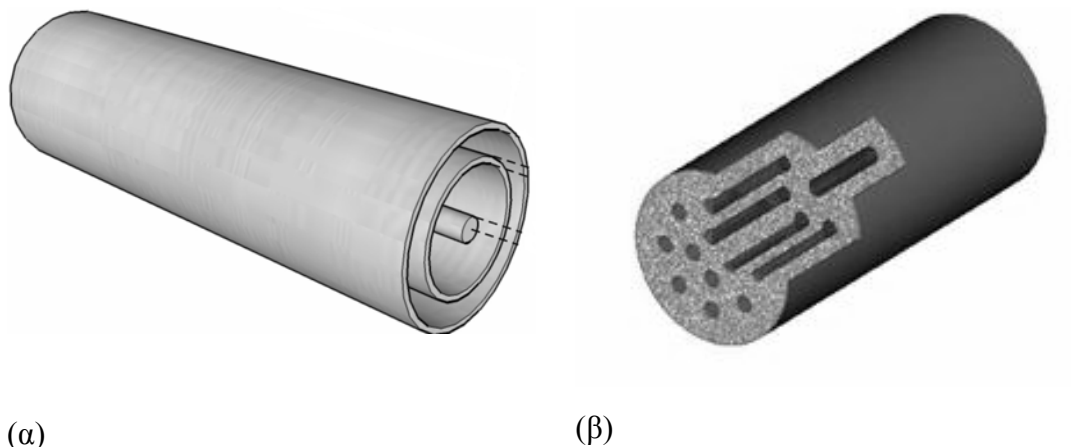
Ανθρακούχα προσροφητικά υλικά (ενεργοί άνθρακες, νανο-σωλήνες και νανο-ίνες άνθρακα, κ.α.) έχουν αποτελέσει αντικείμενο έρευνας τα τελευταία 15 χρόνια. Δυστυχώς ο αρχικός ενθουσιασμός από ανακοινώσεις και μελέτες με ασυνήθιστα υψηλές τιμές αποθηκευτικής ικανότητας σε υδρογόνο από ανθρακούχα υλικά, έδωσε τη θέση του στο σκεπτικισμό λόγω του εντοπισμού σφαλμάτων και παραλείψεων στις πειραματικές μετρήσεις και στην αδυναμία επαναληψιμότητας των τιμών αυτών. Επιπλέον προσπάθειες θεωρητικής πρόβλεψης των παραπάνω ιδιοτήτων μέσα από λεπτομερείς υπολογιστικές μοριακές προσομοιώσεις σε ανθρακούχα υλικά φανέρωσαν την αδυναμία των υλικών αυτών να επιτύχουν αποθήκευση επαρκούς ποσότητας υδρογόνου (Sakintun et al., 2007). Έτσι σήμερα τα ανθρακούχα υλικά έχουν πάψει να θεωρούνται ικανά μέσα αποθήκευσης υδρογόνου για εμπορικές εφαρμογές εκτός εάν η μονάδα αποθήκευσης λειτουργεί σε θερμοκρασίες μικρότερες των 80 K, ή/και πιέσεις μεγαλύτερες των 150 bar, συνθήκες που θεωρούνται απαγορευτικές για κινητές εφαρμογές. Άλλες ιδέες που αφορούν τον εμποτισμό της επιφάνειας του υλικού με οξείδια μετάλλων για την ενίσχυση των δυνάμεων αλληλεπίδρασης βρίσκονται ακόμα σε πρώιμο στάδιο έρευνας (Li et al., 2007). Τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί πιο εξεζητημένα υλικά και πορώδεις δομές τόσο σε πειραματικό όσο και σε θεωρητικό επίπεδο (Li et al., 1999; Rowsell et al., 2005) η μετάβαση όμως από το στάδιο της έρευνας σε αυτό της παραγωγής αποτελεί μια μακρόχρονη και καθόλου εγγυημένη διαδικασία.

3.4.2 Μεταλλικά υδρίδια

Τα μεταλλικά υδρίδια μελετώνται ως πιθανοί φορείς αποθήκευσης υδρογόνου από τη δεκαετία του 70. Η αρχή της αποθήκευσης σε μεταλλικά υδρίδια βασίζεται στο γεγονός ότι άτομα του υδρογόνου σχηματίζουν δεσμούς με τα άτομα του μεταλλικού πλέγματος σε χαμηλές πιέσεις. Τα μεταλλικά υδρίδια διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες με βάση τους τύπους των πλεγμάτων των μεταλλικών ενώσεων που χρησιμοποιούνται ως αποθηκευτικά μέσα (Sakintun et al., 2007). Τα σύνθετα υλικά από μέταλλα μετάπτωσης εξακολουθούν να είναι σημαντικά για την χρήση τους ως μέσα αποθήκευσης υδρογόνου. Πολλές μελέτες έχουν γίνει με σκοπό να βελτιωθούν οι ικανότητες απορρόφησης υδρογόνου (και προφανώς και εκρόφησης) γεγονός που οδήγησε στην ανακάλυψη νέων μεταλλικών υδριδίων βασισμένα σε ενώσεις σπανίων γαιών – μετάλλων μετάπτωσης βασισμένων στο Ti ή στο Zr, στο Mg αλλά και σε ενώσεις στερεάς μορφής βασισμένες στο V. Τα βασικότερα προβλήματα που εμφανίζονται στη χρήση των μεταλλικών υδριδίων για αποθήκευση του υδρογόνου είναι η αντιστρεπτότητα κατά την περιοδική φόρτιση-αποφόρτιση του υλικού, οι χαμηλοί ρυθμοί φόρτισης-αποφόρτισης καθώς και το μεγάλο βάρος των υλικών αυτών ειδικά σε κινητές εφαρμογές.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τόσο η προσρόφηση όσο και η απορρόφηση είναι εξώθερμες διεργασίες, κατά συνέπεια κατά τον σχεδιασμό τους απαιτείται η παράλληλη

ανάπτυξη συστήματος διαχείρισης της παραγόμενης θερμότητας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται πολύπλοκες γεωμετρικές διατάξεις εναλλακτών θερμότητας όπως πολλαπλοί αυλοί, εσωτερικές σπείρες εναλλακτών, κλπ. (Dimitrakakis *et al.*, 2008 - Εικόνα 3-5).



Εικόνα 3-5: Δεξαμενές αποθήκευσης «στερεού» υδρογόνου: (α) εσωτερικός εναλλάκτης με τη μορφή «δακτυλιδιού» (β) σύστημα πολλαπλών αυλών εναλλακτών.

Περισσότερες λεπτομέρειες αναφορικά με τη λειτουργία της διεργασίας της μεθόδου αποθήκευσης «στερεού» υδρογόνου καθώς και συναφή ενεργειακά ζητήματα που προκύπτουν υπάρχουν σε πιο εξειδικευμένες αναφορές (π.χ. βλέπε Kikkinides (2008) και σχετικές αναφορές εντός).

3.5 Μεταφορά και διανομή H_2

Το υδρογόνο μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες ποσότητες μέσω υπόγειων αγωγών (αέριο υδρογόνο) ή με δεξαμενόπλοια (υγρό υδρογόνο). Επί του παρόντος, η μεταφορά υδρογόνου μέσω αγωγών χρησιμοποιείται είτε σε σύνδεση μεταξύ της παραγωγής και των γύρω χώρων χρήσης (μέχρι 10 χλμ.) ή σε πιο εκτεταμένα δίκτυα (περίπου 200 χλμ.). Ο Πίνακας 3-2 παρουσιάζει ένα κατάλογο των κυριότερων υφιστάμενων αγωγών υδρογόνου (Pottier *et al.*, 1995). Για την κατασκευή των αγωγών υδρογόνου, είναι αναγκαία η χρήση του χάλυβα που είναι ανθεκτικός ως προς την ευθραυστότητα κατά την χρήση υδρογόνου υπό πίεση, ιδίως για το πολύ καθαρό υδρογόνο (περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 99,5%). Εμβολοφόροι συμπιεστές αερίου που χρησιμοποιούνται για το φυσικό αέριο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το υδρογόνο χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις του σχεδιασμού. Ωστόσο, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην σφράγιση (για την αποφυγή διαρροών του υδρογόνου) και την επιλογή των βασικών υλικών για τα μέρη που υπόκεινται σε μηχανική κόπωση. Η χρήση των φυγοκεντρικών συμπιεστών για το υδρογόνο δημιουργεί περισσότερα προβλήματα που οφείλονται στην εξαιρετική ελαφρότητα του υδρογόνου.

Κατά κανόνα, η μετάδοση του υδρογόνου μέσω αγωγών απαιτεί μεγαλύτερη διάμετρο σωληνώσεων και μεγαλύτερη δύναμη συμπίεσης από τους αντίστοιχους του φυσικού αερίου για την ίδια απόδοση ενέργειας. Ωστόσο, λόγω των χαμηλότερων απωλειών πίεσης στην περίπτωση του υδρογόνου, οι σταθμοί συμπίεσης μπορούν να είναι τοποθετημένοι δύο φορές μακρύτερα μεταξύ τους. Σε οικονομικό επίπεδο, σε περισσότερες από τις μελέτες διαπιστώθηκε ότι το κόστος της μεταφοράς του υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα είναι μεγαλύτερο περίπου 1,5-1,8 φορές του κόστους της μεταφοράς φυσικού αερίου.

Πίνακας 3-2: Ορισμένοι κύριοι αγωγοί υδρογόνου.

Τοποθεσία	Ετος Λειτουργίας	Διάμετρος (mm)	Μήκος (km)	Πίεση (MPa)	Καθαρότητα
AGEC, Alberta, Canada	Από το 1987	273	3,7	3,79	99,9%
Air Liquide, France	Από το 1966	Διάφορες	290	6,48-10	Καθαρό και παραγόμενο
Air Products, Houston, TX	Από το 1969	114-324	100	0,35-5,5	Καθαρό
Air Products, Louisiana	Από το 1990	102-305	48	3,45	
Chemische Werke Huls	Από το 1938	168-273	215	to 2,5	Παραγόμενο
Cominco, B.C., Canada	Από το 1964	5	0,6	>30	62-100%
Gulf Petroleum Canada		168,3	16		93,5%
Hawkeye Chemical, Iowa	Από το 1987	152	3,2	2,75	
ICI Billingham, U.K.			15	30	Pure
Philips Petroleum	Από το 1986	203	20,9	12	

Προς αντιμετώπιση της ζήτησης της κατανάλωσης, το υδρογόνο μπορεί να μεταφέρεται και να διανέμεται σε περιφερειακό επίπεδο, είτε ως αέριο είτε ως υγρό, με αγωγούς ή σε ειδικές περιπτώσεις, σε δοχεία με οδικές και σιδηροδρομικές μεταφορές. Αέριο (και υγρό) υδρογόνο κατά την μεταφορά υπόκειται σε αυστηρές ρυθμίσεις που να διασφαλίζουν τη δημόσια ασφάλεια, η οποίες σε ορισμένες χώρες είναι πολύ περιοριστικές.

Μεταφορά αερίου ή υγρού υδρογόνου σε ασυνεχή τρόπο πραγματοποιείται και σήμερα από την περιστασιακή χρήση ή για χρήστες με χαμηλό όγκο. Το κόστος της ασυνεχούς

μεταφοράς είναι πολύ υψηλό (αυτό μπορεί να φθάνει μέχρι και 2-5 φορές το κόστος παραγωγής).

3.6 Ασφάλεια χρήσης

Όπως κάθε άλλο καύσιμο ή φορέας ενέργειας, το υδρογόνο ενέχει κινδύνους, αν δεν χρησιμοποιείται σωστά ή ελέγχεται. Ο κίνδυνος του υδρογόνου, ως εκ τούτου, πρέπει να εξεταστεί σε σχέση με τα κοινά καύσιμα όπως η βενζίνη, το προπάνιο ή το φυσικό αέριο. Τα ειδικά φυσικά χαρακτηριστικά του υδρογόνου και οι ιδιότητες που του προσδίδουν είναι αρκετά διαφορετικές από τα κοινά καύσιμα. Ορισμένες από αυτές τις ιδιότητες καθιστούν το υδρογόνο δυνητικά λιγότερο επικίνδυνο, ενώ άλλα χαρακτηριστικά του υδρογόνου θα μπορούσαν να το καταστήσουν πιο επικίνδυνο σε ορισμένες περιπτώσεις.

Επειδή το υδρογόνο έχει το μικρότερο μόριο από όλα τα αέρια, έχει μια μεγαλύτερη τάση να διαφεύγει μέσα από μικρά ανοίγματα σε σχέση με άλλα υγρά ή αέρια καύσιμα. Με βάση τις ιδιότητες του υδρογόνου, όπως η πυκνότητα, ιξώδες, και το συντελεστή διάχυσης στον αέρα, η ροπή του υδρογόνου να διαρρέει μέσα από τις οπές ή στις αρθρώσεις των αγωγών καυσίμου χαμηλής πίεσης μπορεί να είναι μόνο 1,26-2,8 φορές γρηγορότερη από τη διαρροή φυσικού αερίου μέσα από την ίδια οπή (και δεν είναι 3,8 φορές πιο γρήγορα, όπως συχνά θεωρείται όταν ο υπολογισμός βασίζεται αποκλειστικά σε συντελεστές διάχυσης). Πειράματα έχουν δείξει ότι η ροή από αγωγούς φυσικού αερίου είναι στρωτή στις περισσότερες διαρροές των κατοικιών (Sherif *et al.*, 2005). Επειδή το φυσικό αέριο έχει πάνω από τρεις φορές την πυκνότητα ενέργειας ανά μονάδα όγκου, διαρροή φυσικού αερίου θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη απελευθέρωση ενέργειας από μια διαρροή υδρογόνου.

Για πολύ μεγάλες διαρροές από δεξαμενές υψηλής πίεσης, η έκταση της διαρροής περιορίζεται από το την ταχύτητα του ήχου. Λόγω της υψηλότερης ταχύτητας του ήχου (1.308 m s^{-1}) στο υδρογόνο, αρχικά θα ξεφύγει πολύ πιο γρήγορα από ό,τι το φυσικό αέριο (ταχύτητα του ήχου του φυσικού αερίου είναι 449 m s^{-1}). Και πάλι, επειδή το φυσικό αέριο έχει περισσότερες από τρεις φορές την πυκνότητα της ενέργειας από το υδρογόνο, η διαρροή φυσικού αερίου θα περιέχει πάντα περισσότερη ενέργεια.

Ορισμένοι χάλυβες υψηλής αντοχής είναι επιρρεπείς σε αστοχία λόγω ευθραυστότητας εξαιτίας του υδρογόνου. Η παρατεταμένη έκθεση σε υδρογόνο, ιδιαίτερα σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, μπορεί να προκαλέσει στο χάλυβα απώλεια της αντοχής του και να οδηγήσει σε αστοχία του υλικού. Ωστόσο, οι περισσότερες άλλες κατασκευές, δεξαμενές, σωλήνες και τα άλλα υλικά δεν είναι επιρρεπή σε αστοχία ευθραυστότητας λόγω του υδρογόνου. Ως εκ τούτου, με την κατάλληλη επιλογή των υλικών, οι κίνδυνοι για την ασφάλεια από αστοχία ευθραυστότητας λόγω του υδρογόνου θα μπορούσαν να αποφευχθούν.

Σε περίπτωση που θα παρουσιαστεί διαρροή για οποιονδήποτε λόγο, το υδρογόνο θα διαλυθεί στον αέρα πολύ πιο γρήγορα από οποιοδήποτε άλλο καύσιμο, μειώνοντας έτσι γρήγορα τα επίπεδα επικινδυνότητας. Το υδρογόνο είναι το πιο δυναμικό και πιο

διαχυτό από τη βενζίνη, το προπάνιο ή το φυσικό αέριο. Ο Πίνακας 3-3 συγκρίνει ορισμένες ιδιότητες και τα ποσοστά διαρροής για το υδρογόνο και το φυσικό αέριο.

Το μείγμα υδρογόνου / αέρα μπορεί να καεί σε σχετικά ευρεία αναλογία όγκων, μεταξύ 4% και 75% του υδρογόνου στον αέρα. Τα άλλα καύσιμα έχουν πολύ χαμηλότερο εύρος ευφλεκτότητας: το φυσικό αέριο 5,3-15%, το προπάνιο 2,1-10%, και η βενζίνη 1-7,8%. Ωστόσο, η περιοχή ευφλεκτότητας έχει μικρή πρακτική αξία. Σε πολλές πραγματικές καταστάσεις διαρροής, η βασική παράμετρος που καθορίζει εάν μια διαρροή θα αναφλεγεί είναι το κατώτερο όριο ευφλεκτότητας, και κατώτατο όριο ευφλεκτότητας υδρογόνου είναι 4 φορές υψηλότερο από εκείνο της βενζίνης, 1,9 φορές υψηλότερο από αυτό του προπανίου, και ελαφρώς μικρότερο από αυτό του φυσικού αέριου.

Το υδρογόνο έχει πολύ χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης (0,02 MJ), περίπου μία τάξη μεγέθους χαμηλότερη από άλλα καύσιμα. Η ενέργεια ανάφλεξης είναι συνάρτηση του λόγου καυσίμου / αέρα, και για το υδρογόνο πρέπει να φθάσει τουλάχιστον περίπου στο 25-30%. Στο χαμηλότερο όριο ευφλεκτότητας, του υδρογόνου η ενέργεια ανάφλεξης είναι συγκρίσιμη με εκείνη του φυσικού αερίου (Swain *et al.*, 1992). Το υδρογόνο έχει ταχύτητα φλόγας επτά φορές πιο γρήγορη από ότι το φυσικό αέριο ή η βενζίνη. Μια φλόγα υδρογόνου ως εκ τούτου είναι πιο πιθανό να προχωρήσει σε μια ανάφλεξη ή ακόμη και μια έκρηξη από άλλα καύσιμα. Ωστόσο, η πιθανότητα μιας έκρηξης εξαρτάται με ένα πολύπλοκο τρόπο από την ακριβή αναλογία καυσίμου / αέρα, τη θερμοκρασία και ιδιαίτερα τη γεωμετρία του κλειστού χώρου. Έκρηξη του υδρογόνου στην ανοικτή ατμόσφαιρα είναι εξαιρετικά απίθανη.

Το κάτω όριο του λόγου καυσίμου / αέρα για την εκρηκτικότητα του υδρογόνου είναι 13-18%, το οποίο είναι δύο φορές υψηλότερο από εκείνο του φυσικού αερίου και 12 φορές υψηλότερο από εκείνο της βενζίνης. Επειδή το κατώτατο όριο ευφλεκτότητας είναι 4%, μια έκρηξη είναι δυνατή μόνο υπό τα πιο απίθανα σενάρια, π.χ., το υδρογόνο θα πρέπει πρώτα να συσσωρεύεται και να φθάσει σε συγκέντρωση 13% σε κλειστό χώρο χωρίς ανάφλεξη, και μόνο τότε μια πηγή ανάφλεξης θα πρέπει να ενεργοποιηθεί. Σε περίπτωση που συμβεί μια έκρηξη, το υδρογόνο έχει τη χαμηλότερη εκρηκτική ενέργεια ανά μονάδα αποθηκευμένης ενέργειας, και μία δεδομένη ποσότητα υδρογόνου θα έχει 22 φορές λιγότερο εκρηκτική ενέργεια από τον ίδιο όγκο γεμάτο με ατμούς βενζίνης.

Η φλόγα του υδρογόνου είναι σχεδόν αόρατη, το οποίο μπορεί να είναι επικίνδυνο επειδή οι άνθρωποι στην περιοχή που γειτνιάζει με μια φλόγα υδρογόνου μπορεί να μην γνωρίζουν καν ότι υπάρχει φωτιά. Αυτό μπορεί να διορθωθεί με την προσθήκη χημικών ουσιών που θα παρέχουν την απαραίτητη φωτεινότητα. Ο χαμηλός συντελεστής εκπομπής της φωτιάς υδρογόνου σημαίνει ότι τα υλικά και οι άνθρωποι από γύρω θα είναι πολύ λιγότερο πιθανό να προκληθεί ανάφλεξη και / ή να προκληθεί ζημιά από ακτινοβολούμενη μεταφορά θερμότητας. Οι καπνοί και η αιθάλη από μια πυρκαγιά βενζίνης αποτελούν κίνδυνο για οποιονδήποτε εισπνεύσει τον καπνό, ενώ οι πυρκαγιές υδρογόνου παράγουν μόνο υδρατμούς (εφόσον δεν αρχίσουν να καίγονται δευτερογενή υλικά).

Το υγρό υδρογόνο παρουσιάζει μια άλλη σειρά ζητημάτων ασφάλειας, όπως ο κίνδυνος εγκαυμάτων λόγω του κρύου, καθώς και την αυξημένη διάρκεια διαρροής ενός κρυογενικού καυσίμου. Μια μεγάλη διαρροή υγρού υδρογόνου έχει κάποια χαρακτηριστικά της διαρροής ενός υγρού καυσίμου όπως η βενζίνη. Ωστόσο, ότι θα διαλυθεί πολύ γρηγορότερα στον αέρα. Ένας άλλος πιθανός κίνδυνος είναι μια βίαιη έκρηξη ενός ζέοντος υγρού και μετατροπή του σε ατμό σε περίπτωση εκτόνωσης λόγω αποτυχίας βαλβίδας ανακούφισης. Σαν συμπέρασμα το υδρογόνο παρουσιάζει ανάλογη επικινδυνότητα με το φυσικό αέριο ή την βενζίνη. Εάν η οικονομία του υδρογόνου πρόκειται να γίνει πραγματικότητα η αντίληψη του κοινού ότι το υδρογόνο είναι ανασφαλές πρέπει να αλλάξει.

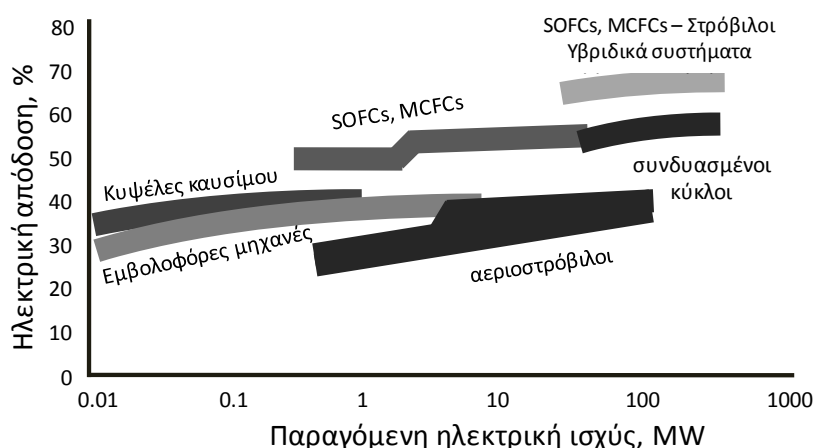
Πίνακας 3-3: Ιδιότητες και ρυθμοί διαρροής υδρογόνου και φυσικού αερίου.

Παράμετροι ροής	Υδρογόνο	Φυσικό αέριο
Συνυελεστής Διάχυσης (cm ² /s)	0,61	0,16
Ιξώδες (μi-poise)	87,5	100
Πυκνότητα (kg/m ³)	0.0838	0,651
Ταχύτητα ήχου (m/s)	1308	449
Σχετικού ρυθμοί διαρροής		
Διάχυσης	3,80	1
Γραμμικής ροής	1,23	1
Τυρβώδους ροής	2,83	1
Ηχητικής ροής	2,91	1

4 Κυψέλες Καυσίμου

4.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Οι κυψέλες καυσίμου θεωρούνται ως η βέλτιστη τεχνολογία μετατροπής ενέργειας για την μεγιστοποίηση της απόδοσης σε παραγόμενη ισχύ, με χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο (Boudghene Stambouli *et al.*, 2002). Οι σημερινές κυψέλες καυσίμου επιτυγχάνουν αποδόσεις της τάξης των 40-55% ως προς την κατώτερη θερμογόνο δύναμη (LHV) ανεξάρτητα από το μέγεθός τους, ενώ οι υβριδικοί κύκλοι αεριοστρόβιλων- κυψελών καυσίμου είναι δυνατό να υπερβούν το 70% με βάση την LHV (Εικόνα 4-1).



Εικόνα 4-1: Συγκριτική απόδοση (% LHV) των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος (U.S. DOE, 2002; IEA, 2005).

Οι κυψέλες καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές διατάξεις που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια των καυσίμων άμεσα σε ηλεκτρική, παρακάμπτοντας τους θερμοδυναμικούς περιορισμούς που διέπουν τις συμβατικές θερμικές μηχανές. Αποτελούνται από τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος βρίσκεται σε άμεση επαφή με δύο πορώδη ηλεκτρόδια. Όλοι οι τύποι κυψελών καυσίμου συνδυάζουν το υδρογόνο και το οξυγόνο για να παράγουν συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα, νερό και θερμότητα. Ανάλογα με τον τύπο του ηλεκτρολύτη οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να ταξινομηθούν σε (Πίνακας 4-1):

- Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) (ή κυψέλες καυσίμου πολυμερικού ηλεκτρολύτη PEFCs), οι οποίες αποτελούνται από μία πολυμερική μεμβράνη αγωγό ιόντων H^+ , ως ηλεκτρολύτη. Μέσω αυτής της μεμβράνης τα πρωτόνια που παρήχθησαν στην άνοδο μεταφέρονται στην κάθοδο, η οποία είναι εκτεθειμένη σε ατμοσφαιρικό αέρα. Στην κάθοδο τα

πρωτόνια ηλεκτρο-οξειδώνονται προς σχηματισμό νερού σε χαμηλές θερμοκρασίες.

- Κυψέλες καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη (SOFC), που χρησιμοποιούν κεραμικές μεμβράνες αγωγούς ιόντων οξυγόνου ως ηλεκτρολύτη. Το υδρογόνο ηλεκτρο-οξειδώνεται στην άνοδο από τα ανιόντα οξυγόνου, O^{2-} , που προέρχονται από την αναγωγή που λαμβάνει χώρα στην πλευρά της καθόδου, του οξυγόνου της ατμόσφαιρας σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC), με χρήση τηγμένου ανθρακικού άλατος (σε μήτρες $LiAlO_2$) ως ηλεκτρολύτη, ο οποίος άγει ανιόντα CO_3^{2-} που παράγονται στην κάθοδο, η οποία είναι εκτεθειμένη σε μίγματα O_2/CO_2 . Τα συγκεκριμένα ανιόντα ηλεκτρο-οξειδώνουν το H_2 στην άνοδο σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC), με συμπυκνωμένο διάλυμα KOH (σε μήτρες ασβέστου) ως ηλεκτρολύτη, το οποίο άγει ανιόντα OH^- που παράγονται στην κάθοδο, η οποία είναι εκτεθειμένη σε μίγμα O_2/H_2O . Τα ανιόντα OH^- στην συνέχεια ηλεκτρο-οξειδώνουν το H_2 (καύσιμο) στην άνοδο σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες, και
- Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) με συμπυκνωμένο διάλυμα H_3PO_4 (σε μήτρες καρβιδίου του πυριτίου) ως ηλεκτρολύτη, το οποίο άγει κατιόντα H^+ που παράγονται στην άνοδο. Τα πρωτόνια οδεύουν προς την κάθοδο, η οποία εκτίθεται σε ατμοσφαιρικό αέρα, όπου ηλεκτρο-οξειδώνονται προς παραγωγή νερού σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες.

Πίνακας 4-1: Τύποι κυψελών καυσίμου.

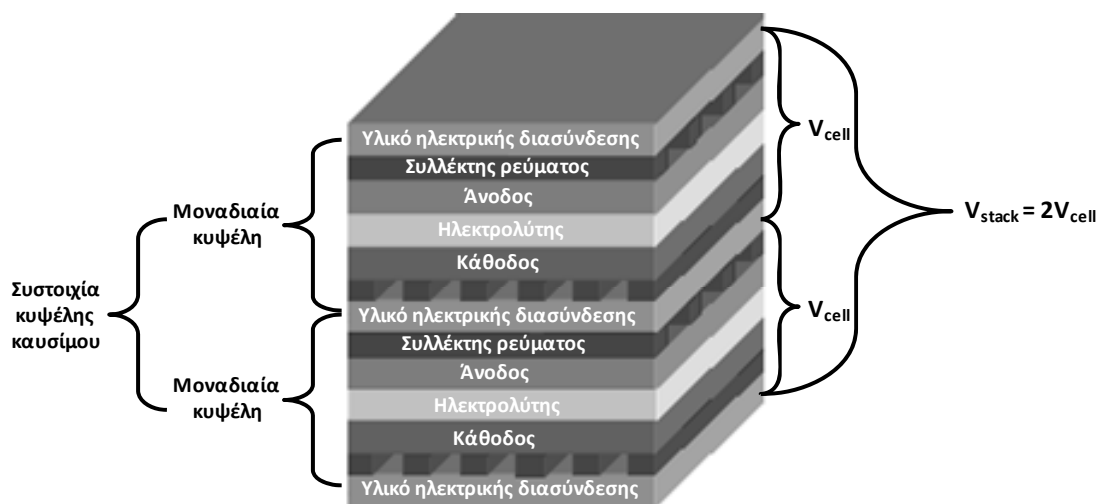
	Ανοδική αντίδραση	Ηλεκτρολύτης	Καθοδική αντίδραση
PEFC	$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$	Πολυμερικές μεμβράνες Αγωγή ιόν: H^+	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow H_2O$
SOFC	$2H_2 + 2O^{2-} \rightarrow 2H_2O + 4e^-$	Μικτά κεραμικά οξειδία Αγωγή ιόν: O^{2-}	$O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$
MCFC	$2H_2 + 2CO_3^{2-} \rightarrow 2H_2O + 2CO_2 + 4e^-$	Μίγμα τηγμένων ανθρακικών αλάτων Αγωγή ιόν: CO_3^{2-}	$O_2 + 2CO_2 + 4e^- \rightarrow 2CO_3^{2-}$
PAFC	$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$	Διάλυμα H_3PO_4 Αγωγή ιόν: H^+	$O_2 + 2CO_2 + 4e^- \rightarrow 2CO_3^{2-}$
AFC	$2H_2 + 4OH^- \rightarrow 4H_2O + 4e^-$	Διάλυμα KOH Αγωγή ιόν: OH^-	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$

Ανεξάρτητα από το συγκεκριμένο τύπο κυψελών καυσίμου, τα αέρια καύσιμα (συνήθως υδρογόνο) και τα οξειδωτικά αέρια μίγματα (συνήθως ατμοσφαιρικός αέρας) τροφοδοτούνται συνεχώς στην άνοδο και στην κάθοδο, αντίστοιχα. Τα αέρια ρεύματα των αντιδρώντων δεν αναμιγνύονται, δεδομένου ότι τα διαχωρίζει ο ηλεκτρολύτης. Η ηλεκτροχημική καύση του υδρογόνου και η ηλεκτροχημική αναγωγή του οξυγόνου,

πραγματοποιούνται στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων, το πορώδες των οποίων παρέχει την απαραίτητη επιφάνεια για αυτές τις αντιδράσεις προκειμένου να ενισχυθούν καθώς επίσης και για να διευκολύνουν τη μεταφορά μάζας των αντιδρώντων/προϊόντων από/προς τον ηλεκτρολύτη προς/από την αέρια φάση.

Σε συνθήκες κλειστού κυκλώματος, οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις περιλαμβάνουν διάφορα διαδοχικά βήματα, συμπεριλαμβανομένης της προσρόφησης/εκρόφησης, της επιφανειακής διάχυσης των αντιδρώντων ή των προϊόντων και της μεταφοράς φορτίου προς ή από το ηλεκτρόδιο. Η μεταφορά φορτίου περιορίζεται σε ένα στενό (σχεδόν μονοδιάστατο) όριο τριών φάσεων (tpb) μεταξύ της αέριας φάσης, του ηλεκτρολύτη και του ηλεκτροδίου-καταλύτη.

Εκτός από τον ρόλο τους ως καταλύτες, τα ηλεκτρόδια συλλέγουν (άνοδος) ή παρέχουν (κάθοδος) ηλεκτρόνια που συμμετέχουν στις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, οπότε θα πρέπει να αποτελούνται από υλικά με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η συνεχής παροχή (ή άντληση) ηλεκτρονίων, είναι απαραίτητη για την εξέλιξη των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων, έχοντας ως αποτέλεσμα μια σταθερή ροή ηλεκτρονίων από την άνοδο προς την κάθοδο. Συγχρόνως, ο ηλεκτρολύτης, με τη μεταφορά των αντιδρώντων υπό μορφή ιοντικών ειδών, ολοκληρώνει το κύκλωμα των κυψελών καυσίμου. Η ηλεκτρο-κάυση του υδρογόνου διατηρεί μια διαφορά στο χημικό δυναμικό του ηλεκτρο-ενεργού είδους (το αγωγίμο ιόν) μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, το οποίο αποτελεί την ωθούσα δύναμη για την ιοντική ροή μέσω του ηλεκτρολύτη, η οποία εκφράζεται με το δυναμικό ανοικτού κυκλώματος ή διαφορετικά με την ηλεκτρεγερτική δύναμή του (emf).



Εικόνα 4-2: Απεικόνιση της δομής μίας συστοιχίας κυψελών καυσίμου επίπεδης γεωμετρίας.

Ένας συλλέκτης ρεύματος, ολοκληρώνει τη δομή μιας κυψέλης καυσίμου, ο οποίος έρχεται σε επαφή με τα πορώδη ηλεκτρόδια, διευκολύνοντας τη μεταφορά των ηλεκτρονίων. Στις πραγματικές διατάξεις κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούνται

αγώγιμες διασυνδέσεις για να ενώσουν ηλεκτρικά τις μοναδιαίες κυψέλες καυσίμου, προκειμένου να αυξηθεί η αναπτυσσόμενη τάση, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4-2 για την κλασσική επίπεδη διάταξη συστοιχίας κυψέλης καυσίμου (το καύσιμο και το οξειδωτικό διαρρέουν τα σχηματιζόμενα κανάλια του συλλέκτη ρεύματος με διασταυρούμενη ροή). Αυτές οι αγώγιμες διασυνδέσεις χρησιμεύουν για τον διαχωρισμό των ρευμάτων του καυσίμου και του οξειδωτικού, έτσι ώστε να μην επιτρέπουν τελικά την ανάμιξη και την διέλευση των αερίων μιγμάτων εκατέρωθεν του ηλεκτρολύτη. Επιπλέον, διαμορφώνουν την απαιτούμενη διάταξη για την διάχυση των αντιδρώντων αερίων σε όλη την επιφάνεια των ηλεκτροδίων (US DOE, 2002; IEA, 2005; Pehnt *et al.*, 2004; Larminie *et al.*, 2003; Srinivasan, 2006; Acres , 2001).

4.2 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 $aA + bB \rightarrow cC + dD$:

$$W_{el} = \Delta G = -nFE \quad (15)$$

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 ΔG και του ΔH είναι ανάλογη της μεταβολής στην εντροπία (ΔS):

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (16)$$

όπου το ΔH 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 ΔG της αντίδρασης που λαμβάνει χώρα στην κυψέλη καυσίμου σε εκείνη την θερμοκρασία. Αν θεωρηθεί ότι:

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad (17)$$

το αντιστρεπτό δυναμικό ή δυναμικό στην ισορροπία γίνεται ίσο με:

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[A]^a [B]^b}{[C]^c [D]^d} \quad (18)$$

Η Εξίσωση (18) αποτελεί την γενική μορφή της εξίσωσης Nernst, όπου το ΔG 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 4-2 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 4-2, και επειδή η μεταβολή της εντροπίας της καύσης του υδρογόνου είναι αρνητική, το αντιστρεπτό δυναμικό μειώνεται με τη θερμοκρασία κατά 0.84 mV/°C (υποθέτοντας ότι το H_2O 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, η_{act}), ή/και από τις ωμικές απώλειες (ωμική υπέρταση, η_{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, η_{conc}).

Πίνακας 4-2: Εξισώσεις Nernst και ιδανικά δυναμικά για τους διάφορους τύπους κυψελών καυσίμου.

Τύπος	Συνολική αντίδραση	Εξίσωση Nernst	T, oC	E, V
AFC	$H_2 + 1/2O_2 + H_2O \rightarrow 2H_2O$	$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2} P_{H_2O}^3}{P_{H_2O}^3 P_{H_2O}}$	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	$H_2 + 1/2O_2 + CO_2 \rightarrow H_2O + CO_2$	$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2} P_{H_2O}^3}{P_{H_2O}^3 P_{CO_2}}$	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.

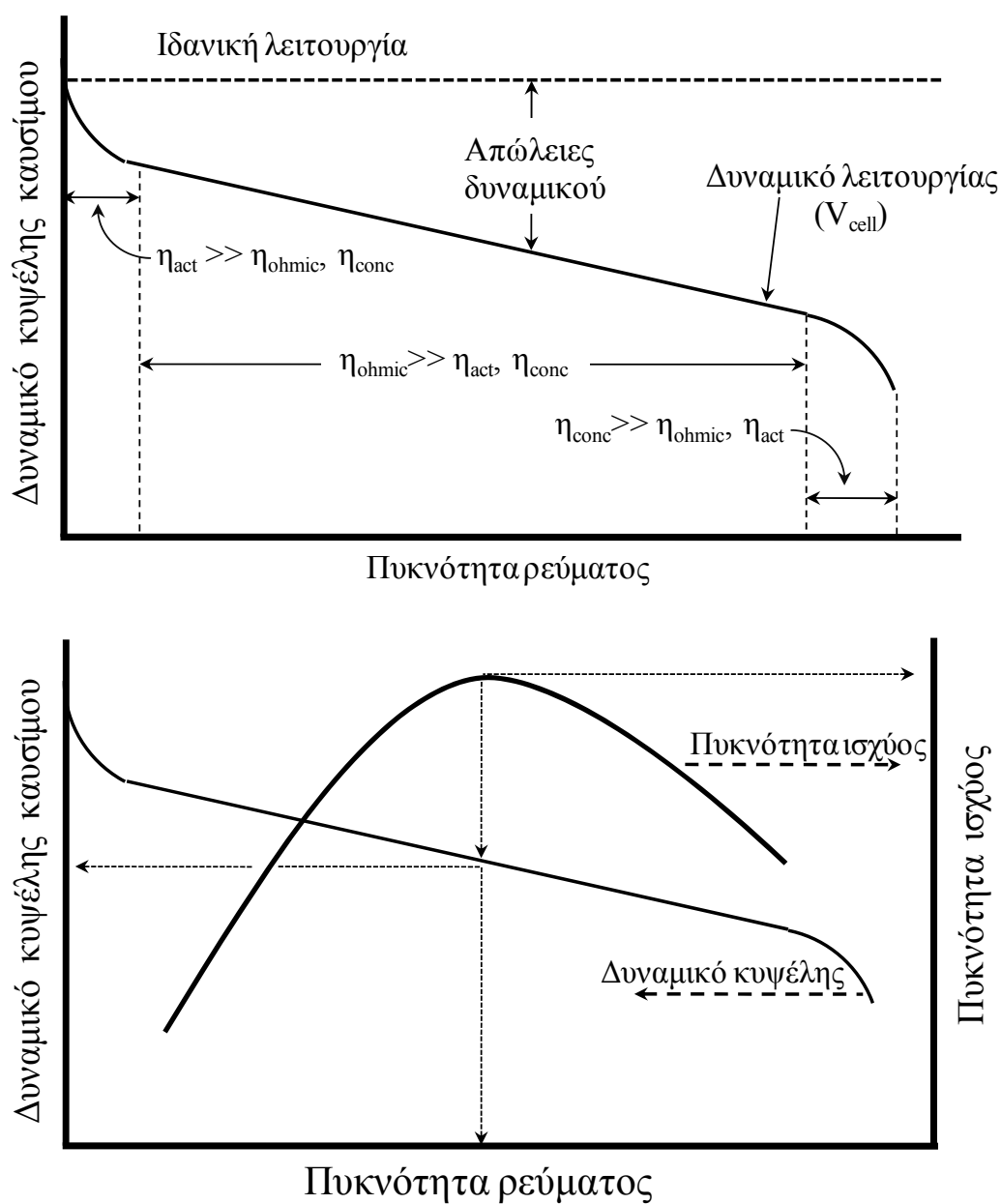
Το δυναμικό λειτουργίας μίας κυψέλης καυσίμου είναι ίσο με τη διαφορά μεταξύ των δυναμικών της καθόδου και της ανόδου (καθώς αυτά τα δυναμικά μεταβάλλονται λόγω των αντίστοιχων υπερτάσεων ενεργοποίησης και συγκέντρωσης κάθε ηλεκτροδίου) μείον τις ωμικές απώλειες των διάφορων τμημάτων της συστοιχίας:

$$V_{\text{cell}} = (E_{\text{cath}} - |\eta_{\text{act}}^{\text{cath}}| - |\eta_{\text{conc}}^{\text{cath}}|) - (E_{\text{anod}} + |\eta_{\text{act}}^{\text{anod}}| + |\eta_{\text{conc}}^{\text{anod}}|) - IR \quad (19)$$

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 $I - V_{\text{cell}}$ στην Εικόνα 4-3α, η παραγόμενη πυκνότητα ισχύος (ισχύς ανά φαινόμενη επιφάνεια ηλεκτροδίου) υπολογίζεται από το γινόμενο του V_{cell} 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 Εικόνα 4-3β.

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:

$$\eta_{\text{ideal}} = \frac{\Delta G^0}{\Delta H^0} = \frac{-nFE^0}{\Delta H^0} \quad (20)$$



Εικόνα 4-3: (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:

$$\eta_{th} = \frac{-nFV_{cell}}{\Delta H^O} = \eta_{ideal} \frac{-nFV_{cell}}{-nFE^O} = \eta_{ideal} \frac{V_{cell}}{E^O} \quad (21)$$

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 Εικόνα 4-3β, 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).

4.3 Τύποι 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 PEFCs, SOFCs και MCFCs θεωρούνται ιδανικές για σταθερές εφαρμογές. Οι κυψέλες καυσίμου τύπου PEM παράγουν υψηλές πυκνότητες ισχύος σε πυκνότητες ρεύματος που προσεγγίζουν τα 4 A/cm^2 , σε αντίθεση με τους άλλους τύπους κυψελών καυσίμου όπου με δυσκολία φθάνουν το 1 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).

4.3.1 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 αγωγοί 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 Cl₂, το H₂ και το O₂ 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

κάθόδου, 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 κρίσιμότερο 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/cm² της μεμβράνης (συνολικά στην άνοδο και την κάθοδο) – από 2.0–4.0 mg Pt/cm² (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 αγωγίων 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 σπειρών 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 χημειορροφάται 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 H₂ 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 οξείδωσης (μια διεργασία που οξειδώνει εκλεκτικά το CO έναντι του υδρογόνου σε αέρια μίγματα πλούσια σε H₂). 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_e σε κυψέλες καυσίμου PEMFC, το δυναμικό λειτουργίας κυμαίνεται από 0,5–0,76 V/μοναδιαία κυψέλη για πυκνότητες ρεύματος 0,55–1 A/cm² και πυκνότητες ισχύος 0,22–0,57 W_e/cm² (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).

4.3.2 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 O²⁻ 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 ακριβώς 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^2/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 40 μm . 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/cm² στους 1000°C 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 O₂ παρά του αέρα ως οξειδωτικό μίγμα, από το οποίο συμπεραίνεται ότι η υπέρταση συγκέντρωσης

είναι σημαντική κατά τη διάρκεια της αναγωγής του O_2 του αέρα στο ηλεκτρόδιο της καθόδου. Αν και τόσο το H_2 όσο και το CO μπορούν να θεωρηθούν ως καύσιμα, το θεωρητικό δυναμικό για το H_2 υπερβαίνει αυτό του CO σε θερμοκρασίες πάνω από $800^\circ C$. Συνεπώς, αύξηση του περιεχόμενου H_2 στο μίγμα τροφοδοσίας συνεπάγεται υψηλότερο δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος και κατά συνέπεια υψηλότερες αποδόσεις. Επιπλέον, χαμηλές συγκεντρώσεις H_2 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 kW_e) κυψελών καυσίμου SOFCs κυμαίνονται μεταξύ $0.6\text{--}0.79\text{ V}$, στα $0.2\text{--}0.8\text{ A/cm}^2$ στους $750\text{--}800^\circ C$, επιτυγχάνοντας πυκνότητες ισχύος της τάξης των $0.16\text{--}0.55\text{ W/cm}^2$. 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).

4.3.3 Κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων

Οι κυψέλες καυσίμου MCFCs τηγμένων ανθρακικών αλάτων μπορούν να λειτουργούν αποτελεσματικά με μίγματα καυσίμων που περιέχουν CO_2 , 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_2 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 $LiAlO_2$. Η μήτρα του ηλεκτρολύτη μπορεί να είναι είτε α - ή γ - $LiAlO_2$. Οι κυψέλες καυσίμου MCFCs τηγμένων ανθρακικών αλάτων λειτουργούν σε θερμοκρασίες μεταξύ $600\text{--}700^\circ C$, όπου τα ανθρακικά άλατα σχηματίζουν ένα τηγμένο άλας, το οποίο είναι αγωγός ιόντων 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 Li_2CO_3 παρουσιάζει υψηλότερη ιοντική αγωγιμότητα από το Na_2CO_3 και το K_2CO_3 , εντούτοις, η διαλυτότητα και η διαχυτότητα του αερίου μίγματος είναι σχετικά χαμηλή. Οι ηλεκτρολύτες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι μίγματα ανθρακικών αλάτων καλίου/λίθιου (Li_2CO_3/K_2CO_3 – 62:38 mol %) για λειτουργία σε ατμοσφαιρική πίεση και ανθρακικά άλατα νατρίου/λίθιου (Li_2CO_3/Na_2CO_3 – 52:48 έως 60:40 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 ανοξειδωτού 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°C, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται υψηλές αποδόσεις και να αυξάνεται η διάρκεια ζωής της συστοιχίας. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 650 °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 CO₂ για κάθε mol O₂, 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/cm² και σε δυναμικό 750-900 mV/μοναδιαία κυψέλη, επιτυγχάνοντας πυκνότητες ισχύος μεγαλύτερες από 150 mW/cm². (US DOE, 2002; Larminie *et al.*, 2003; Yuh *et al.*, 2002).

4.3.4 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/cm² στην περίπτωση του ανοδικού ηλεκτροδίου και 0,50 mg Pt/cm² 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_3PO_4 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_2S 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 ($0.55\text{--}1.15\text{ mV/}^{\circ}\text{C}$), 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 $0.45\text{--}0.75\text{ mV/mA/cm}^2$, για ατμοσφαιρική πίεση, και $0.4\text{--}0.5\text{ mV/mA/cm}^2$, 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^2) αντί για καθαρό οξυγόνο (480 mV σε 300 mA/cm^2). Η υπέρταση λόγω της ανόδου είναι πολύ χαμηλή (-4 mV/100 mA/cm^2) χρησιμοποιώντας καθαρό H_2 ως καύσιμο. Οι ωμικές απώλειες είναι επίσης σχετικά μικρές, οι οποίες ανέρχονται περίπου σε 12 mV για 100 mA/cm^2 πυκνότητα ρεύματος. Οι κυψέλες καυσίμου PAFCs φωσφορικού οξέος λειτουργούν συνήθως σε πυκνότητες ρεύματος μεταξύ $100\text{--}450\text{ mA/cm}^2$ και σε δυναμικά $600\text{--}800\text{ mV/μοναδιαία κυψέλη}$, επιτυγχάνοντας πυκνότητες ισχύος $100\text{--}330\text{ mW/cm}^2$, και ηλεκτρικές αποδόσεις $40\text{--}55\%$ 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).

4.3.5 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 ($85\text{ wt\%}$) διάλυμα KOH στις υψηλών θερμοκρασιών κυψέλες καυσίμου AFCs ($\sim 250^{\circ}\text{C}$), ή από αραιό ($35\text{--}50\text{ wt\%}$) διάλυμα KOH στις αλκαλικές κυψέλες καυσίμου χαμηλών θερμοκρασιών ($< 120^{\circ}\text{C}$). 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_2 αντιδρά με KOH παράγοντας K_2CO_3 . Συνεπώς ακόμη και οι μικροποσότητες του περιβαλλοντικού CO_2 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_2 και το κόστος απομάκρυνσης του CO_2 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 οξείδια τύπου σπινελίου και περοβσκίτη. Οι περιεκτικότητες σε ευγενή μέταλλα είναι της τάξης των 5 g/m². 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 H₂ ή αμμωνία υπό τη μορφή των προϊόντων διάσπασής της, δηλαδή μίγμα με 25% N₂, 75% H₂ και μικρές ποσότητες NH₃. Λόγω του υψηλού ποσοστού διάχυσης του υδρογόνου, στην περίπτωση της τροφοδοσίας με NH₃, 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 H₂ (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/cm², όπου επιτυγχάνονται πυκνότητες ισχύος της τάξεως των 60-180 mW/cm². Η εταιρεία UTC fuel cells έχει κατασκευάσει κυψέλες καυσίμου AFCs, οι οποίες επιτυγχάνουν πυκνότητα ισχύος ίση με 3.4 W/cm² σε δυναμικό 0.8V και για πυκνότητα ρεύματος 4.3 A/cm² (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 CO₂ (McLean *et al.*, 2001; Gülzow *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).

4.4 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 οικονομικών κλίμακας (Lipman *et al.*, 2004; Hawkes *et al.*, 2005; Alanne *et al.*, 2006; Williams *et al.*, 2004).

4.4.1 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 4-3 παρουσιάζει μια εκτίμηση για το συνολικό κόστος των διατάξεων κυψελών καυσίμου PEMFC (έτος αναφοράς 2004).

Πίνακας 4-3: Κατανομή του κόστους κατασκευής των PEMFC (Tsuchiya, 2004).

	€/m ²	€/kW _e	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 αυτής 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_e ίσως να μη λειτουργούν ικανοποιητικά σε συνθήκες υψηλής πίεσης. Ενώ αυτό το γεγονός απλοποιεί το σχεδιασμό και μειώνει το κόστος για τους συμπίεστες και τους αποσυμπίεστες πιθανώς να επιδρά αρνητικά στην τελική παραγόμενη πυκνότητα ισχύος. Τα διαθέσιμα σήμερα συστήματα κυψελών καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών παράγουν περίπου 250 kW_e (για αυτά τα συστήματα, η προσθήκη ενός αεριοστρόβιλου μπορεί να αυξήσει την ηλεκτρική απόδοση μέχρι και 60%). Ο Πίνακας 4-4 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 4-4: Εκτιμήσεις του κόστους της παραγόμενης ισχύος σε κυψέλες καυσίμου SOFC και MCFC (Blesl *et al.*, 2004).

	SOFC		MCFC	
	€/kW _e	ποσοστό, %	€/kW _e	ποσοστό, %
Συστοιχία κυψέλης καυσίμου	4714	42	4661	50
Λέβητας	4672	41	2146	23
Λειτουργικό σύστημα	1231	11	820	9
Αναμορφωτής	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_{el} ενώ των μεγαλύτερων υπολογίζονται μεταξύ 5000 και 18000 €/kW_{el} (Pehnt *et al.*, 2004).

Πίνακας 4-5: Εκτιμήσεις του μελλοντικού κόστους κατασκευής των συστοιχιών PEMFC για παραγωγική ικανότητα 250000 MWe/a (Tsuchiya, 2004).

	€/m ²	€/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 €/kW_e 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 €/kW_e, ακόμη και με το σημερινό status της τεχνολογίας, συμπεριλαμβανομένου και των υλικών, ενώ στοχεύει να το μειώσει ακόμα περαιτέρω σε 20 €/kW_e 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 €/m² ή σε 110–250 €/kW_e. 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 €/m² (IEA, 2005).

Τα σημερινά συστήματα PEMFC που λειτουργούν στους 80°C απαιτούν 5 g/m² ποσότητα λευκόχρυσου τόσο για το ανοδικό όσο και για το καθοδικό ηλεκτρόδιο ή 10 g/m² στο σύνολο (5 g Pt/kW_e για πυκνότητες ισχύος περίπου 2 kW_e/m²). Οι νέες μεμβράνες, που λειτουργούν σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 100°C, αναμένεται να

μειώσουν την απαιτούμενη ποσότητα λευκόχρυσου σε περίπου 0.2 g/kW_e. 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/m² οδηγεί σε απώλειες της απόδοσης από 2–4% (Gasteiger *et al.*, 2005).

Πίνακας 4-6: Εκτίμηση κόστους κατασκευής συστημάτων SOFC και MCFC (Blesl *et al.*, 2004).

	SOFC (200 kW)		MCFC (300 kW)	
	€/kW _e	μερίδιο, %	€/kW _e	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	

4.4.1.1 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 t ετησίως. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος πιθανές λύσεις θα αποτελούσαν η ανακύκλωση του λευκόχρυσου ή η 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 €/kW_e για πυκνότητες ισχύος της τάξης των 2–6 kW_e/m² (IEA, 2005).

Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, είναι εφικτό το κόστος των συστοιχιών κυψελών καυσίμου τύπου PEM να μειωθεί και κάτω από 70 €/kW_e στο εγγύς μέλλον, ενώ ένα προβλεπόμενο κόστος 40 €/kW_e μπορεί να είναι εφικτό, υποθέτοντας μια αύξηση της πυκνότητας ισχύος σε 4 kW_e/m² 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/cm² σε 0.6–0.7 V, με την πυκνότητα ισχύος να κυμαίνεται από 1.8–4.2 kW_e/m² (2 kW_e/m² κατά μέσο όρο). Εντούτοις, τα 3 kW_e/m² είναι δυνατό να επιτευχθούν με ελάχιστες βελτιώσεις και τεχνολογικές παρεμβάσεις, ενώ τιμές της τάξης των 4–6 kW_e/m² θα απαιτούσαν νέα βελτιωμένα υλικά τόσο για τις μεμβράνες όσο και για τα ηλεκτρόδια.

Πίνακας 4-7: Σύγκριση συμβατικού συστήματος SOFC και υβριδικών συστημάτων SOFC-CHP (IEA, 2005).

	Συμβατικός	SOFC 2010	SOFC 2030
Ειδική επένδυση, €/kW	1000	5000	1000
Ηλεκτρική ισχύς, kW _e	200	200	200
Θερμική ισχύς, kW _{th}	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 €/kW_e για 20 MW_e αθροιστική παραγωγή ισχύος - ακόμη και κάτω από 2000 €/kW_e σε ένα αθροιστικό ρυθμό παραγωγής πάνω από 10000 MW_e (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 €/kW_e ανάλογα με το μέγεθος του προς χρήση συστήματος (IEA, 2005).

4.4.1.2 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 αποδόσεών 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 €/kW_e (Pehnt *et al.*, 2004; Hawkes *et al.*, 2005).

Ο Πίνακας 4-8 εμφανίζει το σημερινό τεχνολογικό επίπεδο των μικρών μονάδων (0.5-5 kW_e) 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 €/kW_e (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.

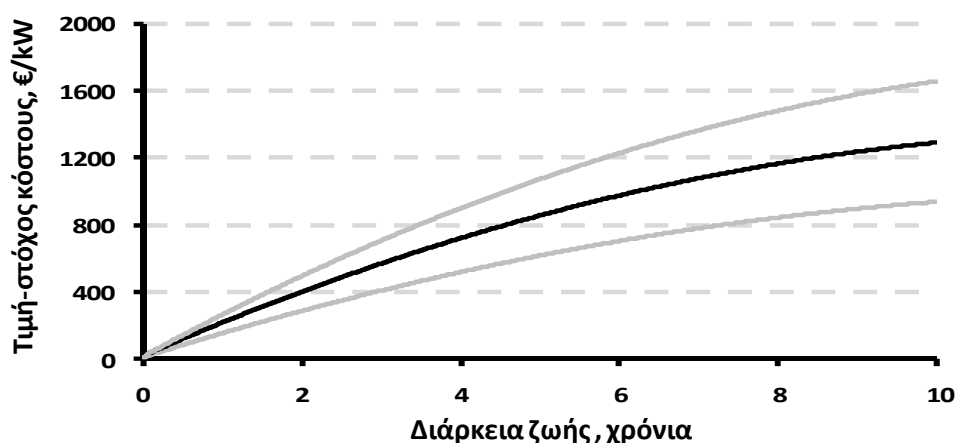
Πίνακας 4-8: Αποδόσεις και κόστη κυψελών καυσίμου τύπου PEM, SOFC, PAFC και AFC, μέχρι 5 kW (Staffell *et al.*, 2007).

	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 ²	0,40 – 0,90	0,32 – 0,67	0,16 – 0,31	0,09 – 0,24
Πυκνότητα ισχύος, W/cm ²	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 _e	300 – 900	200 – 600		150 – 600
Κόστος συστήματος, €/kW _e	530 – 1130	680 – 1080	2500 – 5000	375 – 825
Λιανική τιμή, €/kW (στόχος)	220 – 440	510 – 970	660 – 1100	120 – 230

Οι εκτιμήσεις για τα σταθερά συστήματα είναι πιο συντηρητικές εξαιτίας των διαφορετικών σχεδιαστικών κριτηρίων. Πολλά από τα πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου PEMFCs είναι καταλληλότερα για κινητές εφαρμογές: π.χ. η υψηλή πυκνότητα ισχύος, η μηχανική ανθεκτικότητα και η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας. Εντούτοις, η εφαρμογή τους στην αγορά της αποκεντρωμένης συμπαραγωγής (CHP) αυξάνει το ενδιαφέρον μεταξύ των κατασκευαστών, καθώς κανένα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά γνωρίσματα δεν θεωρείται μειονέκτημα για τις σταθερές εφαρμογές και η συνολική απόδοση εμφανίζεται να είναι παρόμοια με τις άλλες κυψέλες καυσίμου χαμηλών θερμοκρασιών (Staffell *et al.*, 2007).

Η διάρκεια ζωής ενός συστήματος (Εικόνα 4-4) και η ζήτηση σε ισχύ (ή η ονομαστική παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος - Εικόνα 4-5) βρέθηκαν να επιδρούν σημαντικά στη τιμή-

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).



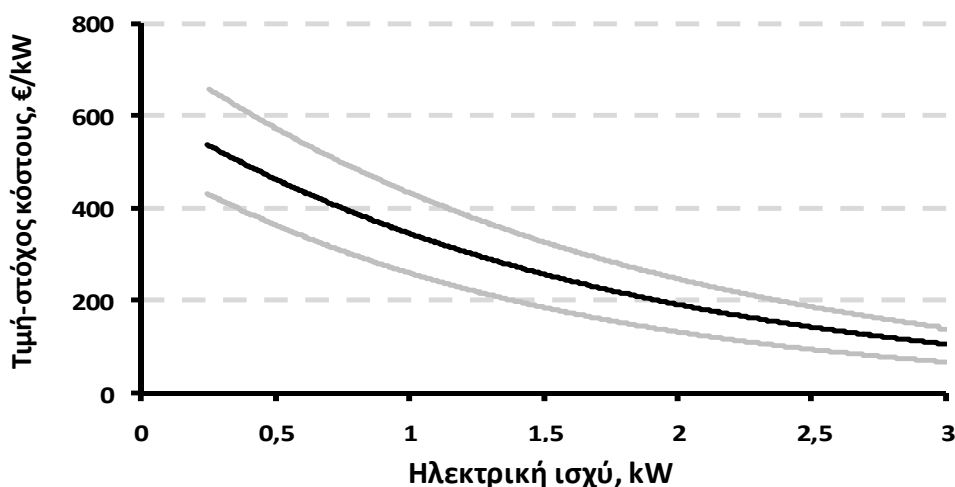
Εικόνα 4-4: Επίδραση της διάρκειας ζωής των κυψελών καυσίμου στο κόστος τους για την ανταγωνιστική εμπορευματοποίησή τους (Staffell et al., 2007).

4.4.1.3 Ανάπτυξη της αγοράς των κυψελών καυσίμου

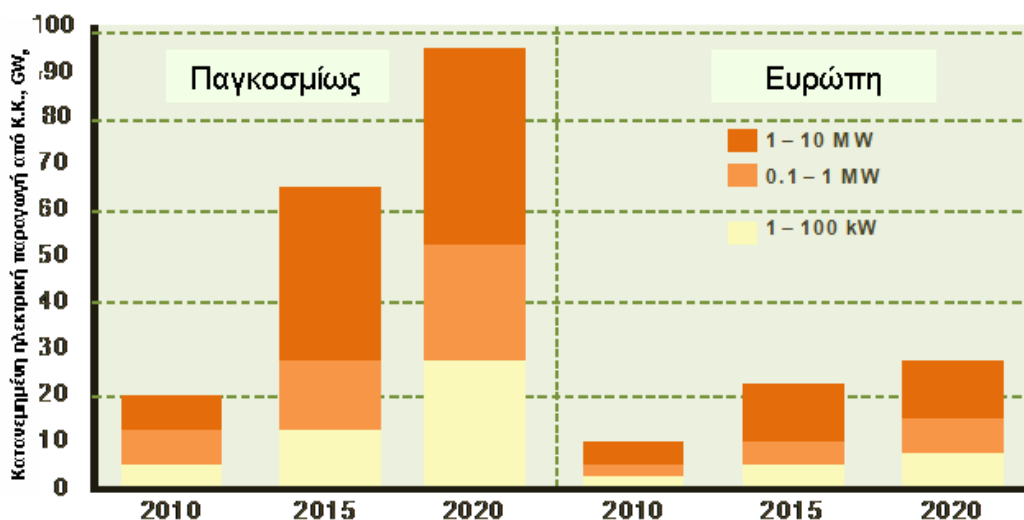
Το κόστος κατασκευής των κυψελών καυσίμου και οι σχετικές λιανικές τιμές αναμένεται να επηρεαστούν έντονα από τους εγκαταστημένους όγκους παραγωγής και την αντίστοιχη τεχνογνωσία. Οι όγκοι παραγωγής θα επηρεαστούν από τον ρυθμό εμπορευματοποίησης των κυψελών καυσίμου, ο οποίος με την σειρά του θα εξαρτάται 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).



Εικόνα 4-5: Επίδραση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος των κυψελών καυσίμου στην τελική τιμή-στόχο για την ανταγωνιστική εμπορευματοποίησή τους (Staffell *et al.*, 2007).



Εικόνα 4-6: Πρόβλεψη του UNEP 2002 για την κατανομημένη 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 αντανakλά 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).

5 Εφαρμογές Συστημάτων Η₂

Το κεφάλαιο αυτό παρέχει μια επισκόπηση των τεχνικών και οικονομικών στοιχείων των εφαρμογών υδρογόνου μέσω των κυψελών καυσίμου. Μια εκτενής και ολοκληρωμένη εξέταση αυτού του θέματος παρουσιάζεται στην ιστοσελίδα Fuel Cell Today (www.fuelcelltoday.com).

5.1 Στατικές εφαρμογές παραγωγής ισχύος

Οι εφαρμογές κυψελών 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.

5.1.1 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).

5.1.2 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 (συμπαραγωγή). 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 (τύπους "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).

5.1.3 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.

5.1.4 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 παρόμοια

μεγέθους εγκατάσταση που θα παρήγαγε την ενέργεια με βάση τα ορυκτά καύσιμα κατά τη διάρκεια ενός έτους.

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

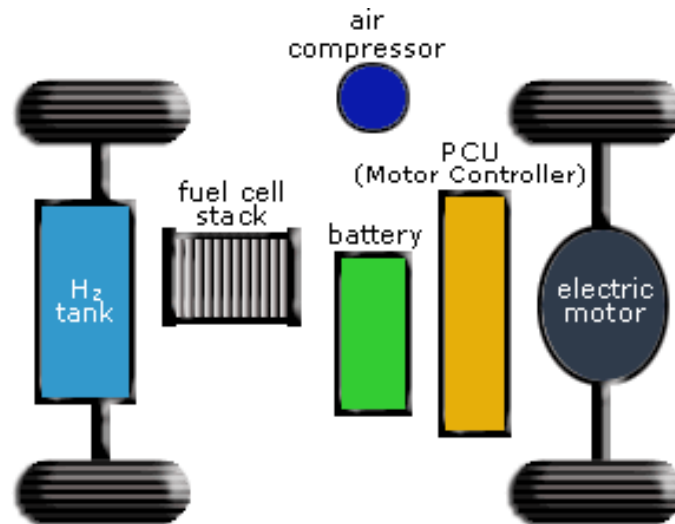
Αν και η πλειονότητα των εγκαταστάσεων κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούν φυσικό αέριο, αυξάνεται ο αριθμός των μονάδων που κινούνται με εναλλακτικά καύσιμα, όπως το αέριο άνθρακος, φυσικό αέριο αναερόβιας χώνευσης, και αεριοποιημένα οργανικά απόβλητα και απόβλητα από πλαστικά.

5.2 Μεταφορές

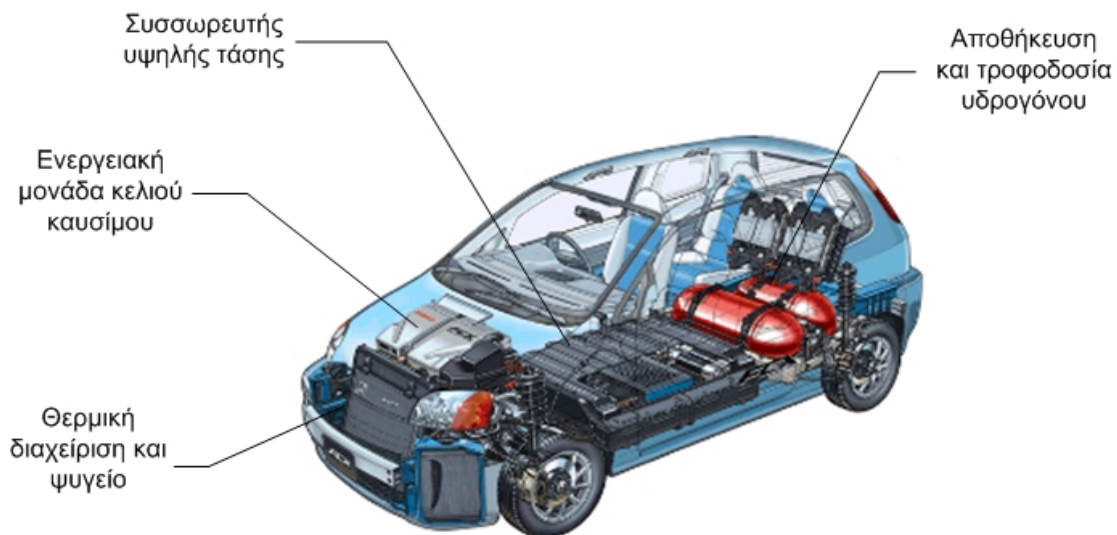
Οι ΚΚ μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις μεταφορές για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος που τροφοδοτεί έναν ηλεκτρικό κινητήρα. Ένα όχημα κυψελών καυσίμου (FCV) είναι ένα σύστημα που συνδυάζει όλες τις απαιτούμενες λειτουργίες ενός οδικού οχήματος, με τη χρήση κυψελών καυσίμου ως μονάδων παραγωγής ενέργειας για την πρόωση του οχήματος (Εικόνα 5-1). Το σύστημα μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια σε κίνηση και τροφοδοτεί τα υποσυστήματα ελέγχου του οχήματος (δηλαδή του συστήματος διεύθυνσης, ευστάθειας και πέδησης) και τα υποσυστήματα άνεσης και εξοπλισμού επιβατών (κλιματισμός, χειριστήρια, κλπ).. Στην ουσία, ένα όχημα κυψελών καυσίμου είναι παρόμοιο με ένα ηλεκτρικό όχημα (Εικόνα 5-2), ωστόσο, οι συμβατικές στήλες έχουν αντικατασταθεί από μια συστοιχία κυψελών καυσίμου.

5.2.1 Απόδοση των οχημάτων

Τα οχήματα FCVs χρησιμοποιούν την ενέργεια που προέρχεται από υδρογόνο, μετατρέπουν την ενέργεια σε ηλεκτρική στις κυψέλες καυσίμου, και στη συνέχεια μέσω ηλεκτρικών κινητήρων παρέχεται η μηχανική ισχύς στους τροχούς. Με βάση αυτή την αρχιτεκτονική η ηλεκτρική απόδοση του οχήματος κυψελών καυσίμου μπορεί να περιγραφεί ως ο λόγος της αποδιδόμενης μηχανικής ισχύος από τους ηλεκτρικούς κινητήρες ως προς την κατώτερη θερμογόνο δύναμη του υδρογόνου στην είσοδο της συστοιχίας των κυψελών καυσίμου.



Εικόνα 5-1: Επιμέρους συσκευές ισχύος οχήματος με κυψέλη καυσίμου.



Εικόνα 5-2: Διαμόρφωση και χωροταξία ηλεκτρικού οχήματος με κυψέλη καυσίμου.

5.2.2 Οικονομία Καυσίμου

Τα οχήματα κυψελών καυσίμου εμφανίζουν εξαιρετικά μεγαλύτερη οικονομία καυσίμου σε σύγκριση με τα οχήματα εφοδιασμένα με κινητήρες εσωτερικής καύσης (βενζίνης ή diesel). Αυτό οφείλεται στον πολύ μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης στα ηλεκτρικά οχήματα με ΚΚ, σε σχέση με τα συμβατικά. Έτσι, ενώ σε μέσα και χαμηλά σημεία λειτουργίας, ένας σύγχρονος κινητήρας βενζίνης εμφανίζει βαθμό απόδοσης 15-20%, η κυψέλη καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων μπορεί να φτάσει σε βαθμούς απόδοσης της τάξης του 60%. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης μειώνεται σημαντικά αν το όχημα ΚΚ τροφοδοτείται με φυσικό αέριο και είναι εφοδιασμένο με reformer.

5.2.3 Αυτονομία οχημάτων με κελιά καυσίμου

Η αυτονομία της οδήγησης είναι μια κρίσιμη παράμετρος για ένα όχημα με κελιά καυσίμου και καθορίζει το σχεδιασμό και τις επιδόσεις κατά ισοδύναμο τρόπο με ένα όχημα κινητήρα εσωτερικής καύσης. Είναι επίσης σημαντικός παράγοντας για τον υπολογισμό και τον σχεδιασμό της μελλοντικής υποδομής διανομής υδρογόνου και τη υποδομή από σταθμούς ανεφοδιασμού. Η αυτονομία για ένα όχημα με κελιά καυσίμου περιορίζεται από το ποσό της αποθηκευμένης μάζας υδρογόνου και συνήθως δεν υπερβαίνει τα 200 χιλιόμετρα. Ωστόσο, τον Ιούνιο του 2008 η Toyota Motor Corporation ανέφερε ότι μια νέα έκδοση του οχήματος με κελιά καυσίμου της μπορεί να ταξιδεύει περίπου 515 μίλια χωρίς ενδιάμεσο ανεφοδιασμό.

5.2.4 Εκπομπές ρύπων

Ένα ηλεκτρικό όχημα με κυψέλη καυσίμου και καύσιμο υδρογόνο ουσιαστικά δεν παράγει ρύπους από το σύστημα κίνησης, εκτός από μικροποσότητες υδρογόνου που διαφεύγουν. Από την «εξάτμιση» του οχήματος βασικά εκπέμπονται υδρατμοί. Το ποσοστό του υδρογόνου στους υδρατμούς δεν πρέπει να υπερβαίνει το 50% του κατώτερου ορίου έκρηξης για λόγους ασφαλείας. Αυτά τα οχήματα ουσιαστικά εκπέμπουν μόνο σωματιδιακούς ρύπους από τα ελαστικά και τα φρένα τους.

Βέβαια, η παραγωγή του υδρογόνου για των τροφοδοσία των οχημάτων αυτών, ενδεχομένως οδηγεί σε σημαντικές ποσότητες παραγόμενων ρύπων (αερίων θερμοκηπίου και συμβατικούς ρυπαντές) στις μονάδες παραγωγής του H_2 . Ειδικά όταν το H_2 παράγεται από καύσιμα με μεγάλο ανθρακικό περιεχόμενο ή με διεργασίες χαμηλού βαθμού απόδοσης, η συνολική επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με αέρια του θερμοκηπίου μπορεί να είναι μεγαλύτερη από ό,τι με χρήση συμβατικών καυσίμων στο όχημα. Ουσιαστικά, μηδενική επιβάρυνση με αέρια του θερμοκηπίου έχουμε μόνο με παραγωγή υδρογονανθράκων από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (USFCC, 2003; SAE 2009). Εκτίμηση των πραγματικών εκπομπών όλης της αλυσίδας (παραγωγής και χρήσης καυσίμου) μπορεί να γίνει με ανάλυση του κύκλου ζωής που επιχειρείται σε ακόλουθες ενότητες.

Ωστόσο, σημαντικές ποσότητες αερίων ρύπων μπορεί να εκπέμπονται και από το ίδιο το όχημα ΚΚ, όταν χρησιμοποιούνται καύσιμα υδρογονανθράκων που μετατρέπονται σε H_2 πάνω στο όχημα με αναμορφωτές. Στην περίπτωση αυτή ο αναμορφωτής απορρίπτει στο περιβάλλον σημαντικές ποσότητες αερίων (διοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του θείου, και μονοξείδιο του άνθρακα), κατά την παραγωγή υδρογόνου. Ετσι, τέτοια οχήματα δεν μπορούν να θεωρηθούν μηδενικής ρύπανσης.

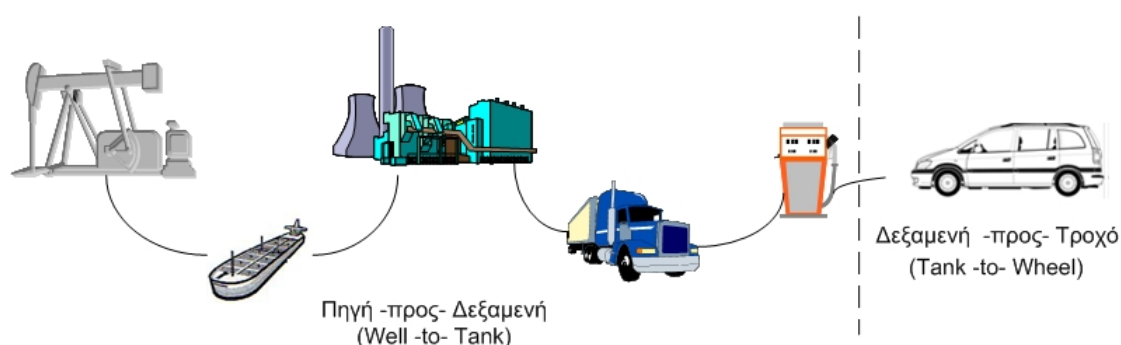
5.2.5 Κόστος

Το σημερινό κόστος ενός ηλεκτρικού οχήματος με ΚΚ είναι αρκετά υψηλό (~300 k€), γιατί τέτοια οχήματα παράγονται μόνο ως πρωτότυπα. Η μαζική παραγωγή προφανώς θα οδηγήσει σε σημαντική μείωση του κόστους και ενδεχομένως να φτάσουμε σύντομα σε επίπεδα που θα είναι ανταγωνιστικά με οχήματα συμβατικής τεχνολογίας

(εφοδιασμένα με MEK). Άλλωστε η τεχνολογία των ΚΚ δεν είναι εξωτική ούτε τα υλικά είναι απαγορευτικού κόστους για να μην υπάρχουν περιθώρια μείωσης του κόστους. Σήμερα άλλωστε παρατηρείται στροφή των κατασκευαστών προς ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα. Αυτά θεωρούνται μεταβατικό στάδιο, δηλαδή «πλατφόρμες» για τη μελλοντική διείσδυση οχημάτων με ΚΚ. Αύξηση της εμπειρίας μέσω της προηγμένης υβριδικής-ηλεκτρικής τεχνολογίας των οχημάτων και της παραγωγής τους θα βοηθήσει να μειωθεί περαιτέρω το κόστος των μελλοντικών οχημάτων με ΚΚ.

5.2.6 Ανάλυση κύκλου ζωής

Για την συνολική ενεργειακή θεώρηση και αποτίμηση του περιβαλλοντικού αποτύπωμα της χρήσης ΚΚ σε οχήματα χρειάζεται η εφαρμογή ανάλυσης του κύκλου ζωής (ΑΚΖ) του καυσίμου. Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται για τη χρήση των καυσίμων είναι η “well-to-wheel”, δηλαδή η συνολική θεώρηση της επεξεργασία του καυσίμου από την πηγή (well) μέχρι την τελική απόδοση ισχύος από τους τροχούς του οχήματος (wheels). Η σχηματική παράσταση της γραμμής αυτής φαίνεται στην Εικόνα 5-3 (Brinkman *et al.*, 2005). Οι μελέτες well-to-wheel ουσιαστικά αποτελούνται από δύο τμήματα: 1) Το τμήμα της παραγωγής και διανομής καυσίμου μέχρι το τεπόζιτο του οχήματος (well-to-tank) και (2) το τμήμα της χρήσης του καυσίμου στο όχημα (tank-to-wheel).

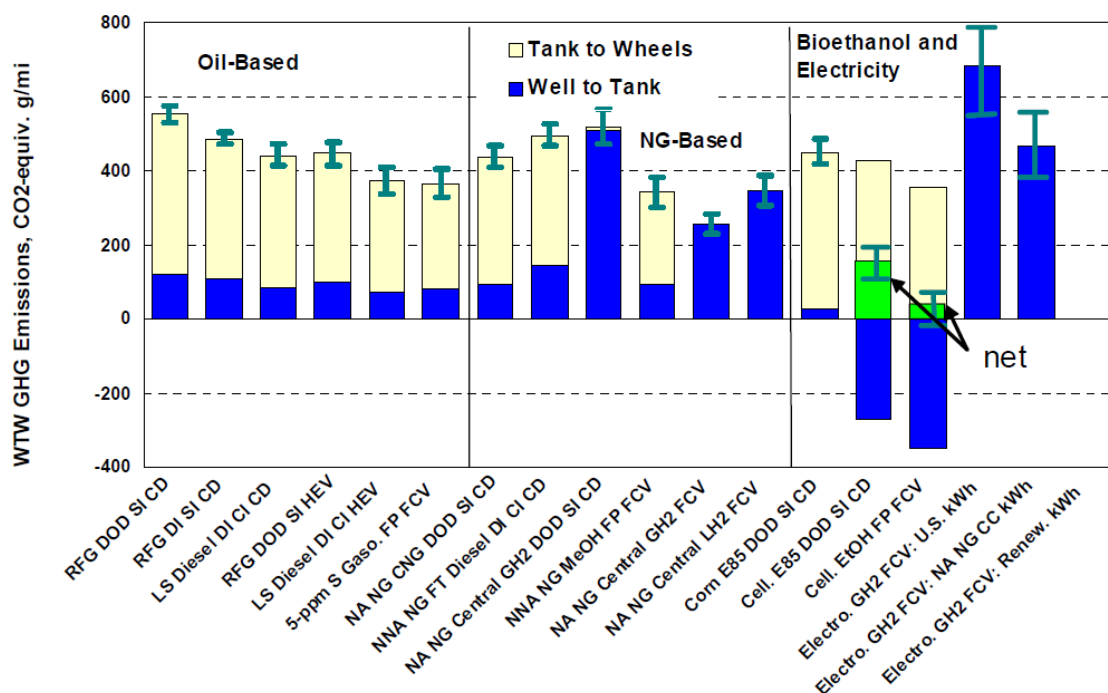


Εικόνα 5-3: Σχηματική παράσταση ανάλυσης κύκλου ζωής καυσίμων.

5.2.6.1 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_2 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. Η Εικόνα 5-4 εμφανίζει μια συγκριτική επίπτωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από διαφορετικές πηγές πρωτογενούς ενέργειας και τεχνολογιών οχημάτων.



Εικόνα 5-4: Σύγκριση αερίων well-to-wheel αερίων θερμοκηπίου για διάφορους συνδυασμούς πρωτογενών πηγών και τεχνολογιών οχημάτων (Πηγή: Brinkman *et al.*, 2005).

5.2.6.2 Χρήση καυσίμου (Tank-to-wheel)

Σε ότι, αφορά τη χρήση καυσίμου, τα οχήματα με ΚΚ (FCV) επιδεικνύουν την χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση και μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, όταν χρησιμοποιούν υδρογόνο. Δεύτερα έρχονται τα οχήματα με κινητήρες diesel (DI) και τα υβριδικά οχήματα (HEV). Τα οχήματα με βενζινοκινητήρες εμφανίζουν τη χειρότερη ενεργειακή απόδοση κατά τη χρήση του καυσίμου.

5.2.6.3 Συνολική θεώρηση

Με βάση την ανάλυση των Brinkman *et al.* (2005) οι συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου των οχημάτων με ΚΚ και χρήση υδροποιημένου Η₂ είναι περίπου στο 50% ενός συμβατικού οχήματος diesel. Ωστόσο, το αποτέλεσμα αυτό είναι κατάλληλο μόνο για την αμερικάνικη κατάσταση, λόγω της σημαντικής συμβολής της πυρηνικής ενέργειας στο ενεργειακό μίγμα. Στην Ελλάδα με τη μεγάλη χρήση του άνθρακα (λιγνίτη) στο ενεργειακό μίγμα, η διαφορά μεταξύ οχημάτων ΚΚ και συμβατικών diesel θα είναι σαφώς μικρότερη ή ακόμα και αρνητική. Ωστόσο, δεν υπάρχει σχετική

συγκριτική μελέτη. Βεβαίως, μεγάλα κέρδη μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την παραγωγή H_2 , όπως βιομάζα αλλά και ηλιακή ή αιολική ενέργεια (Rousseau and Sharer, 2004).

5.2.7 Πρακτικές εφαρμογές στις μεταφορές

Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα σε κινητήρες εσωτερικής καύσης ως καύσιμο για καύση. Η τεχνολογία αυτή βρίσκεται στο πλαίσιο της ανάπτυξης στις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ευρώπη (Adamson *et al.*, 2006; USFCC, 2003).

Σε εφαρμογές κυψελών καυσίμου στις μεταφορές, το απαραίτητο οξυγόνο προέρχεται από τον αέρα, αλλά η παραγωγή, η διανομή, και η αποθήκευση του αερίου υδρογόνου είναι το πιο προβληματικό και πολύπλοκο θέμα. Κατά τα πρώτα στάδια της ανάπτυξης οχημάτων κυψελών καυσίμου, προτιμήθηκε η μετατροπή των υδρογονανθρακικών καυσίμων επί του οχήματος σε reformers (αναμορφωτές). Οι βασικές λειτουργίες της επεξεργασίας των καυσίμων επί του οχήματος ήταν (α) η αναμόρφωση καυσίμων υδρογονανθράκων σε υδρογόνο συν άλλα αέρια (τα λεγόμενα «αέρια αναμόρφωσης φυσικού αερίου»), και (β) ο καθαρισμός του αερίου αναμόρφωσης από τα βλαπτικά αέρια.

Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα καύσιμα για αυτό το είδος της εφαρμογής είναι η υγρή μεθανόλη, το συμπιεσμένο φυσικό αέριο (CNG), και η βενζίνη. Ορισμένοι κατασκευαστές αυτοκινήτων, όπως η Daimler-Chrysler, Ford, General Motors, και άλλοι, έχουν αναπτύξει κάποια πρωτότυπα που περιλαμβάνουν την μετατροπή των καυσίμων και τα υποσυστήματα για τον καθαρισμό των αερίων επί του οχήματος.

Η πολυπλοκότητα, το κόστος, το βάρος, και η χαμηλή αποτελεσματικότητα αυτής της προσέγγισης καθιστούν αυτή τη μέθοδο απαγορευτική για τις εφαρμογές επί του οχήματος. Κατά τα τελευταία χρόνια, η Shell Hydrogen, BP, Exxon-Mobil, Chevron, και πολλές άλλες εταιρείες πετρελαιοειδών δεσμεύτηκαν για τη δημιουργία υποδομών σε όλο τον κόσμο για την παραγωγή, την αποθήκευση και τη διανομή υδρογόνου για εφαρμογές οχημάτων.

Τα λεωφορεία κυψελών καυσίμου αποδεικνύεται σ' ολόκληρο τον κόσμο ότι κατά πάσα πιθανότητα θα είναι η πρώτη πρακτική και σε μεγάλο εύρος εφαρμογή ΚΚ σε οχήματα, δεδομένου ότι τα λεωφορεία χρησιμοποιούν κεντρικούς σταθμούς ανεφοδιασμού και εγκαταστάσεις συντήρησης που διευκολύνουν την ανάπτυξη της κατάλληλης υποδομής. Λεωφορεία κυψελών καυσίμου λειτουργούν στην Καλιφόρνια, την Ευρώπη και την Ιαπωνία (Adamson *et al.*, 2006; USFCC, 2003).

Τα οχήματα κυψελών καυσίμου υπόσχονται πολλά καθώς μπορούν να οδηγήσουν σε οχήματα μηδενικών εκπομπών ρύπων τοπικά που είναι κρίσιμης σημασίας για την υγιή ανάπτυξη των αστικών κέντρων του κόσμου. Επίσης, έχουν μεγάλες οικονομικές δυνατότητες, όπως φαίνεται από τις σημαντικές επενδύσεις που έγιναν από τον ιδιωτικό τομέα με σκοπό να αναπτυχθεί και να αποδειχθεί η εφαρμογή των κυψελών καυσίμου στα οχήματα.

5.2.8 Άλλες εφαρμογές στις μεταφορές

5.2.8.1 Αεροπλοΐα

Στην αεροπλοΐα οι κινητήρες αεροσκαφών έχουν δύο λειτουργίες: η μία είναι να παρέχει την πρόωση στο σκάφος και η άλλη, η οποία είναι δευτερεύουσα, είναι να παρέχει άνετες συνθήκες για τους επιβάτες. Προς το παρόν, η πρόωση προβλέπεται ότι θα παρέχεται αποκλειστικά από τα υγρά καύσιμα, επειδή ο σχεδιασμός ενός αεροσκάφους με πρόωση H_2 παρουσιάζει τεχνολογικά και κοινωνικά προβλήματα. Ωστόσο, βοηθητική ισχύς για την άνεση των επιβατών (φωτισμός, θέρμανση φαγητών, ψύξη, κλπ) μπορεί να παρέχεται από κυψέλες καυσίμου. Με την αφαίρεση των ηλεκτρικών φορτίων από τους κινητήρες, υπολογίζεται ότι η κατανάλωση καυσίμου μπορεί να μειωθεί κατά τρία τέταρτα εάν το αεροπλάνο βρίσκεται στο έδαφος και μέχρι 40% κατά τη διάρκεια της πτήσης (Wentz *et al.*, 2005; Dokupil *et al.*, 2006). Τόσο η Airbus (ΕΕ) και η Boeing (ΗΠΑ) εργάζονται για την ανάπτυξη βοηθητικών μονάδων ισχύος αυτού του τύπου. Η κλίμακα των μονάδων αυτών είναι μεγάλη, της τάξης των 200-600 kW, και ο στόχος του σχεδιασμού είναι να ελαχιστοποιηθεί το βάρος της μονάδας και το μέγεθος στο επίπεδο που για την τοποθέτηση επί του σκάφους δεν έρχεται σε αντίθεση με την ανάγκη εξυπηρέτησης του χώρου των επιβατών. Ως εκ τούτου, ακόμη και το ενδεχόμενο της παραγωγής υδρογόνου μέσω της αναμόρφωσης του συστήματος των καυσίμων JP8/JP12 επί του σκάφους, για τις αερομεταφορές είναι ιδιαίτερα ελκυστικό για τη μείωση της πολυπλοκότητας του συστήματος τροφοδοσίας, του κόστους των καυσίμων, και της ρύπανσης. Το πρώτο πρωτότυπο επί του σκάφους αναπτύχθηκε από την Airbus σε μια επίδειξη στον αέρα στο Βερολίνο το 2008.

5.2.8.2 Εκτός δρόμου και ειδικά οχήματα

Εξοπλισμός μικρών βιομηχανικών οχημάτων, όπως τα περionoφόρα ανυψωτικά μηχανήματα, τα ρυμουλκά, και οι μεταφορείς αποσκευών, προσελκύουν επίσης την προσοχή ως ένα πιθανό «παράθυρο ευκαιρίας» για την εισαγωγή των κυψελών καυσίμου (Εικόνα 5-5). Στα αεροδρόμια ο οδικός εξοπλισμός και η υποστήριξη των οχημάτων που λειτουργούν με επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και επιτελούν σημαντικά καθήκοντα κάθε ημέρα και είναι μια άλλη ευκαιρία για την υδρογονοκίνηση. Επί του παρόντος, οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται απαιτούν σημαντική ικανότητα αποθήκευσης, το να αλλάζονται είναι χρονοβόρο, και είναι περίπλοκη η ανακύκλωσή τους. Ο εξοπλισμός των οχημάτων που κινούνται εκτός του οδικού δικτύου με κυψέλες καυσίμου θα είναι πολύ ελκυστικός γιατί προσφέρει μηδενικές εκπομπές, γρήγορο ανεφοδιασμό καυσίμων και καλύτερη δυναμική απόδοση (Wentz *et al.*, 2005).

Στις Ηνωμένες Πολιτείες αναπτύσσονται εφαρμογές για ορυχεία και εφαρμογές φορτωτών. Σχεδόν όλα τα ορυχεία χρησιμοποιούν μηχανές ντίζελ για την παραγωγή ενέργειας, που απαιτεί ακριβό εξοπλισμό και υπόγεια δίοδο αερισμού για την αντιμετώπιση των επιβλαβών συνεπειών των καυσαερίων. Αντικατάσταση της χρήσης του ντίζελ με οχήματα με κινητήρες υδρογόνου θα εξοικονομήσει περίπου 30-40% του κόστους εξοπλισμού, αντισταθμίζοντας εύκολα το κόστος των κυψελών καυσίμου.



Εικόνα 5-5: Περνοφόρο όχημα υδρογόνου (Πηγή:Hydrogenics Corporation).

5.2.8.3 Σιδηρόδρομοι

Οι σιδηρόδρομοι αποτελούν άλλο ένα χώρο με υψηλό δυναμικό για εφαρμογές κυψελών καυσίμου. Ακολουθούν μερικά παραδείγματα. Η κοινοπραξία Hydrogen Train Project της ΕΕ ελπίζει να επιδείξει ένα τρένο που θα κινείται με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου μέσα στο 2010. Από τεχνικής άποψης, αυτό θα είναι ένα υβριδικό σύστημα με φορτίο βάσης 150-200 kW προερχόμενο από κυψέλη καυσίμου τύπου PEM και με μπαταρία 50-100 kW, για την ανταπόκριση κατά τη διάρκεια κορυφών ισχύος.

Η Ιαπωνία έχει επικεντρωθεί στην ανάπτυξη αξιόπιστων και φιλικών προς το περιβάλλον επιβατικών τρένων κυψελών καυσίμου, με την επίδειξη επί των γραμμών το 2010, που θα χρησιμοποιούν επίσης ένα υβριδικό σύστημα με ΚΚ τύπου PEM τύπου σε συνδυασμό με μπαταρία, με μια αυτονομία των 300-400 χιλιομέτρων και της ταχύτητας των 120 χιλιομέτρων την ώρα.

5.2.8.4 Άλλες μεταφορές

Ποδήλατα και μοτοποδήλατα είναι δημοφιλή μέσα μετακίνησης αντί των αυτοκινήτων στις πόλεις και στις αστικές περιοχές σε όλο τον κόσμο, αλλά κατά κύριο λόγο στην Ασία (Εικόνα 5-6). Η μείωση των εκπομπών ρύπων και βελτίωση της ενεργειακής κατανάλωσης αυτών των οχημάτων θα ήταν ένα μεγάλο βήμα για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα και διατήρηση της ποιότητας του περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένης της μείωσης του θορύβου. Η Honda, η Yamaha, και πολλές άλλες εταιρείες έχουν επιδείξει με επιτυχία σκούτερ με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου που βασίζονται στην τεχνολογία πρωτονιακών αγωγών ή απευθείας χρήσης μεθανόλης όπου το υδρογόνο ή η μεθανόλη φυλάσσονται σε μια δεξαμενή επί του οχήματος ή σε

φιάλες νικελίου υδριδίου μετάλλου. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν υποβοηθούμενα ποδήλατα, σκούτερ, μοτοσικλέτες και άλλα (π.χ. Εικόνα 5-6).



Εικόνα 5-6: Σκούτερ κυψέλης καυσίμου (Πηγή: Fuel Cell Today).

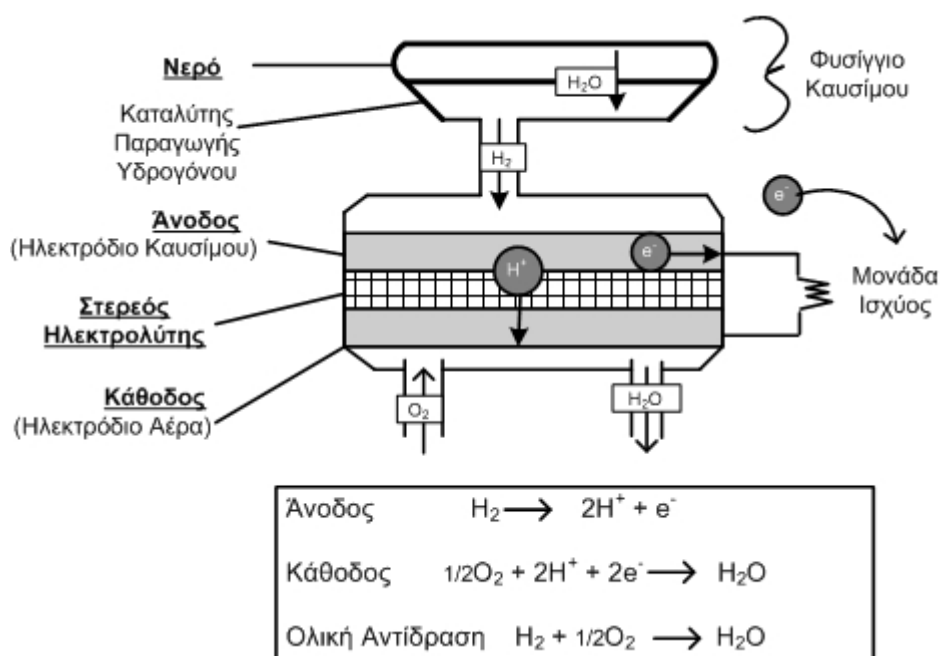
Οι αναπηρικές καρέκλες είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα όπου η τεχνολογία συναντά τις ανάγκες της κοινωνίας. Τα συνήθη ηλεκτρικά αναπηρικά αμαξίδια είναι βαριά και έχουν χαμηλές ταχύτητες λόγω του βάρους της μπαταρίας. Προσαρμογή των κυψελών καυσίμου σε αναπηρικό καροτσάκι δεν έχει δύσκολο τόσο για να περιλάβει την αποθήκευση του καυσίμου όσο και την εγκατάστασή τους, και παραδείγματα υπάρχουν ήδη στην Ιαπωνία και την Ευρώπη. Η χρήση αυτής της τεχνολογίας αυξάνει την κινητικότητα του ανθρώπου, παρέχοντας μεγαλύτερη ροπή και επιτάχυνση από πριν. Τυπικά η διαμόρφωση και ο σχεδιασμός περιλαμβάνει ένα συνδυασμό της συστοιχίας κυψελών καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης με ένα χώρο αποθήκευσης υδρογόνου με ικανότητα λειτουργίας της μονάδας πάνω από 12 ώρες.

5.3 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 αν βρουν εφαρμογή ως ηλεκτρονικές συσκευές και συσκευές επικοινωνίας, π.χ. ψηφιακές κάμερες, κινητά τηλέφωνα, φορητοί υπολογιστές, ραδιόφωνα και φορητές τηλεοράσεις, κλπ.

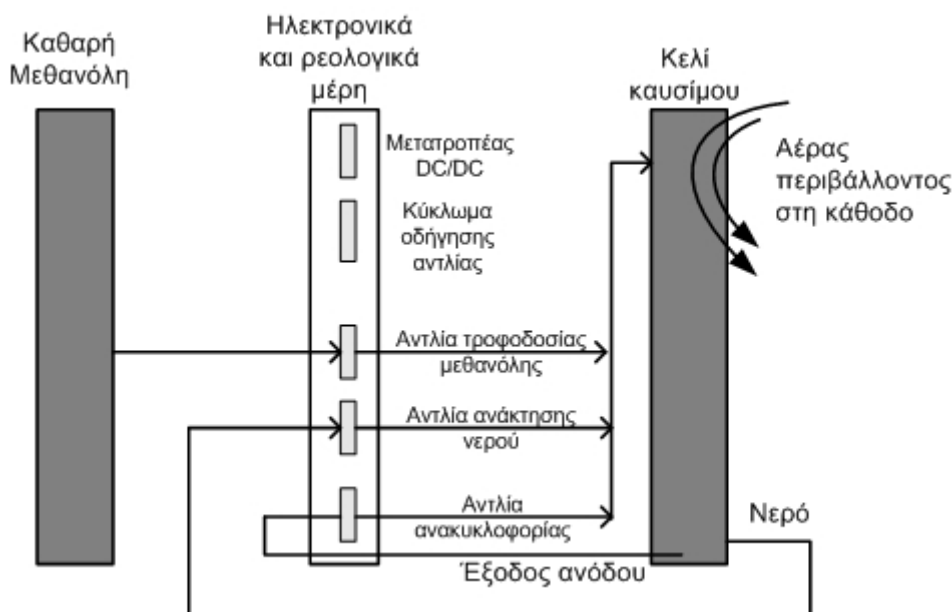
Οι ιαπωνικές εταιρείες DoCoMo και Aquafairy (<http://www.mtimicrofuelcells.com>), προτείνουν μικρο-συστήματα κυψελών καυσίμου με τροφοδοσία από νερό. Η λειτουργία του κελιού καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης για το σκοπό αυτό φαίνεται

στην Εικόνα 5-7. 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. Η Εικόνα 5-7 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.



Εικόνα 5-7: 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 στην Εικόνα 5-8. Άλλα παραδείγματα μικροσυσκευών αποτελούν συστήματα απευθείας μεθανόλης της εταιρείας Motorola (20 W), της MTI Micro Fuel Cells και της Medis Technologies.



Εικόνα 5-8: Ολοκληρωμένη συσκευή ενέργειας με βάση κυψέλη καυσίμου που τροφοδοτείται με μεθανόλη.

5.4 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 πλειονοψηφία 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.

5.5 Άλλες εφαρμογές

5.5.1 Διάστημα

Η σημασία και η απόδοση των κυψελών καυσίμου στο χώρο των διαστημικών πτήσεων έχουν συμβάλλει σημαντικά στην περαιτέρω ανάπτυξή τους. Η αποστολή του

Απόλλωνα έκανε χρήση κυψελών καυσίμου αλκαλικής τεχνολογίας. Πιο πρόσφατα, τα διαστημικά λεωφορεία χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης για την κάλυψη των αναγκών μεγάλου μέρους της απαιτούμενης ενέργειας του εξοπλισμού τους (McCurdy *et al.*, 2003). Η NASA αναπτύσσει κυψέλες καυσίμου που θα αντέχουν τα σκληρά περιβάλλοντα διαστημικών μεταφορών. Τα συστήματα κυψελών καυσίμου που βρίσκονται αυτή τη στιγμή στο στάδιο της έρευνας μπορούν να παρέχουν ισχύ με ενεργειακή πυκνότητα μεγαλύτερης των 500 Wh/kg και θα επιτρέψουν μεγαλύτερες διαστημικές αποστολές (Burke, 2003).

5.5.2 Στρατιωτικές εφαρμογές

Η τεχνολογία κυψελών καυσίμου μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του εξοπλισμού, ειδικά σε εξειδικευμένες λειτουργίες όπως λειτουργία stealth ή εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη εκκίνηση. Για παράδειγμα, ένα σύστημα με χαμηλή εκπομπή θερμότητας και θορύβου καθιστά τον εντοπισμό του από τον εχθρό πιο δύσκολη. Επίσης, το νερό που προκύπτει ως παραπροϊόν της λειτουργίας των κυψελών καυσίμου μπορεί να είναι χρήσιμο για πολλούς σκοπούς. Επίσης κυψέλες καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή ενέργειας σε στρατιωτικό εξοπλισμό, όπως συστήματα εντοπισμού της θέσης, ανιχνευτές ακτίνας λέιζερ, ψηφιακά συστήματα επικοινωνίας, αισθητήρες συλλογής πληροφοριών, και προσδιορισμού στόχων. Επίσης υβριδικά συστήματα κυψελών καυσίμου και MEK μπορούν να οδηγήσουν σε οχήματα με καλύτερα χαρακτηριστικά (αυτονομίας, επιτάχυνσης, έλξης) σε σύγκριση με συμβατικά οχήματα.

Το πιο ελπιδοφόρο πεδίο στο ναυτικές εφαρμογές είναι τα υποβρύχια που κινούνται με κυψέλες καυσίμου. Εφαρμογή των κυψελών καυσίμου στην πρόωση προσφέρει υψηλή απόδοση, χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας, και ταυτόχρονα μηδενική στάθμη θορύβου, καθιστώντας πολύ δύσκολη την ανίχνευση του υποβρύχιου μέσω ανίχνευσης θορύβου ή υπέρυθρους αισθητήρες.

6 Σύνοψη και Συμπεράσματα

6.1 Ενεργειακή θεώρηση και η συμμετοχή του H_2

- Η παγκόσμια οικονομία θα συνεχίσει να αναπτύσσεται μεσο-μακροπρόθεσμα (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 διείσδυση 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.

6.2 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. Άλλες μέθοδοι είναι η μερική οξείδωση και ένας

συνδυασμός αναμόρφωσης/οξειδωσης (αυτόθερμη αναμόρφωση). Οι μέθοδοι αυτές συνοδεύονται από σημαντικό κόστος με μικρό εμπορικό ενδιαφέρον.

- Η παραγωγή του H_2 μπορεί να γίνει από στερεό άνθρακα (λιγνίτη, λιθάνθρακα, κλπ.) μέσω της αεριοποίησης του άνθρακα με υδρατμούς σε υψηλή θερμοκρασία. Η εφαρμογή έχει ενδιαφέρον όπου χρησιμοποιείται ευρέως ορυκτός άνθρακας (π.χ. Κίνα) γιατί μπορεί να συνδυαστεί με δέσμευση του άνθρακα για μείωση της παραγωγής αερίων του θερμοκηπίου.
- Η παραγωγή H_2 από ηλεκτρόλυση νερού με χρήση ΑΠΕ αποτελεί μια καθαρή λύση (χωρίς παραγωγή ανθρακικών παραπροϊόντων) με αυξημένο όμως ακόμα κόστος. Το κόστος αναμένεται να μειωθεί στα επόμενα χρόνια. Η παραγωγή H_2 με αυτόν τον τρόπο έχει το πλεονέκτημα ότι μέσω της αποθήκευσης H_2 είναι δυνατόν να μειωθεί η διακύμανση του φορτίου στο δίκτυο από τις ΑΠΕ, οι οποίες μπορούν να συμμετάσχουν περαιτέρω στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας. Άλλες μέθοδοι διάσπασης του νερού (φωτοηλεκτρόλυση, φωτοβιολογική παραγωγή, θερμοχημική διάσπαση) έχουν υψηλό δυναμικό αλλά είναι σε ερευνητικό ακόμα στάδιο.
- H_2 μπορεί να παραχθεί και από τη βιομάζα, μέσω αναερόβιας ζύμωσης ή αεριοποίησης. Και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται σήμερα σε κάποιο βαθμό, ο οποίος αναμένεται να αυξηθεί στο μέλλον. Και οι δύο διεργασίες μπορούν να θεωρηθούν ικανοποιητικές για αποκεντρωμένη παραγωγή H_2 .
- Το ανθρακικό αποτύπωμα παραγωγής H_2 εξαρτάται ισχυρά από τη διεργασία και κυμαίνεται από μηδενικό (ηλεκτρόλυση από με χρήση ΑΠΕ) έως σημαντικό (αεριοποίηση ορυκτών καυσίμων χωρίς δέσμευση του άνθρακα). Διεργασίες δέσμευσης και αποθήκευσης του άνθρακα έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται αλλά αυξάνουν σημαντικά το κόστος της επένδυσης και μειώνουν τους βαθμούς απόδοσης της παραγωγής ενέργειας.
- Παραγωγή του H_2 σε κεντρικούς σταθμούς μέσω των τεχνικών που παρουσιάστηκαν απαιτεί σημαντική μείωση του κόστους από 3 έως 10 φορές σε σχέση με τη σημερινά επίπεδα. Αυτό είναι τεχνικά δυνατό ως ένα βαθμό. Σε κάθε περίπτωση αύξηση του κόστους παραγωγής θα πρέπει να αναμένεται από όλες τις πηγές ενέργειας λόγω της ανάγκης μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου. Αυτό θα κάνει την παραγωγή H_2 πιο ανταγωνιστική.
- Παραγωγή του H_2 σε αποκεντρωμένους σταθμούς παρέχει τη δυνατότητα εξομάλυνσης της παραγόμενης ισχύος από ΑΠΕ μέσω ενδιάμεσης αποθήκευσης H_2 . Τέτοια συστήματα θα γίνουν οικονομικά ανταγωνιστικά των συμβατικών ΑΠΕ όταν το κόστος περαιτέρω ανάπτυξης του δικτύου θα γίνει απαγορευτικό και όταν τα οικονομικά οφέλη από παραγωγή 'πράσινης' ηλεκτρικής ενέργειας μειωθούν λόγω κορεσμού του δικτύου.

6.3 Αποθήκευση και διανομή

- Η αποθήκευση μπορεί να γίνει σε συνθετικές φιάλες υπό υψηλή πίεση (350-700 bar) με πυκνότητα που φτάνει τα 30 g/lit. Οι φιάλες παρουσιάζουν πολύ καλή ασφάλεια και μηδενική διαρροή H_2 αλλά εμφανίζουν υψηλό κόστος. Η αποθήκευση σε υψηλή πίεση είναι καλή λύση σε εφαρμογές μεταφορών (οχήματα) λόγω του μικρού βάρους, της ταχύτητας ανεφοδιασμού και της ταχύτητας στην αποδέσμευση του H_2 προς χρήση.

- 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_2 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_2 .
- Η μεταφορά του H_2 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 τράινα.

6.4 Χρήση και εφαρμογές

- Η μετατροπή του H_2 σε ηλεκτρική ενέργεια γίνεται σε ηλεκτροχημικές διατάξεις που ονομάζονται κυψέλες καυσίμου. Στις κυψέλες καυσίμου γίνεται ανταλλαγή ηλεκτρικού φορτίου μέσω ηλεκτρολυτών και το H_2 μετατρέπεται σε H_2O 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/cm². 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/cm² 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/cm² 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/cm² και ηλεκτρικές αποδόσεις της τάξης του 40-55%.
- Οι κυψέλες καυσίμου εμφανίζουν κόστη από 10-50 k€/kW_{el} (συστήματα έως 5 kW) και μεταξύ 5 και 18 k €/kW_{el} τα μεγαλύτερα συστήματα. Για σύγκριση

ένα τυπικό ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος βιομηχανικής εφαρμογής κοστίζει περί τα 0,1 k€/kW_{el}. 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 μόλυνσή 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 H₂ 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 H₂, η χρήση τέτοιων οχημάτων μπορεί να μειώσει σημαντικά, έως και να εκμηδενίσει, το ανθρακικό αποτύπωμα των μεταφορών.

6.5 Σενάρια διείσδυσης H₂

Η παραγωγή H₂ 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 H₂.

Η ευρεία εξάπλωση της χρήσης H₂ 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 H₂, που δεν είναι αμελητέα, ενώ το δίκτυο αυτό υπάρχει ήδη για την ηλεκτρική ενέργεια.

Η παραγωγή H₂ από κατανεμημένους σταθμούς (από ΑΠΕ, βιομάζα ή συμβατικά καύσιμα) είναι ελκυστικότερη σε σχέση με την κεντροποιημένη αφού και στην περίπτωση παραγωγής ηλεκτρισμού και παραγωγής H₂ θα απαιτηθεί σε τέτοιες εφαρμογές μια αρχική επένδυση. Η παραγωγή δε H₂, 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 H₂

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_2 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_2 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.

7 Βιβλιογραφία

- Acres G., (2001). Recent advances in fuel cell technology and its applications. *Journal of Power Sources* 100: 60–66.
- Adamson K-A, Crawley G, Jollie D, (2006). Fuel Cell Today 2005 Worldwide Market Survey, *Fuel Cell Today*, January.
- Agrawal R, Offutt M, Ramage MP, (2005). Hydrogen economy – an opportunity for chemical engineers. *AIChE Journal* 51: 1582–1589.
- Alanne K, Saari A, Ugursal V, Good J, (2006). The financial viability of an SOFC cogeneration system in single-family dwellings. *Journal of Power Sources* 158: 403–416.
- Antolini E., (2007). Platinum-based ternary catalysts for low temperature fuel cells Part II. Electrochemical properties. *Applied Catalysis B: Environmental* 74: 337–350.
- Athanasίου C, Coutelieris F, Vakouftsi E, Skoulou V, Antonakou E, Marnellos G and Zabaniotou A, (2007). From biomass to electricity through integrated gasification/SOFC system–optimization and energy balance. *International Journal of Hydrogen Energy* 32: 337–342.
- Ballard, (2005). Fuel Cell Technology “Road Map”. Available from www.ballard.com/be_informed/fuel_cell_technology/roadmap
- Bar-On I, Kirchain R, Roth R, (2002). Technical Cost Analysis for PEM Fuel Cells. *Journal of Power Sources* 109: 71–75.
- Berry GD, (2004). Hydrogen production. *Encyclopedia of Energy* 253–265.
- Berube V, Radtke G, Dresselhaus M, Chen G, (2007). Size effects on the hydrogen storage properties of nanostructured metal hydrides: A review. *Int. J. Energy Res.* 31: 637–663.
- Bezerra C, Zhang L, Liu H, Lee K, Marques A, Marques E, Wang H, Zhang J, (2007). A review of heat-treatment effects on activity and stability of PEM fuel cell catalysts for oxygen reduction reaction *Journal of Power Sources* 173: 891–908.
- Blesl M, Fahl U, Ohl M, (2004). Hochtemperaturbrennstoffzellen und deren Kostenentwicklung. *BWK*, 56: 72–56.
- Boudghene Stambouli A, Traversa E, (2002). Fuel cells, an alternative to standard sources of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6: 297–306.
- Brinkman, N., Wang, M., Weber, T., Darlington. Th. (2005). Well-to-Wheels Analysis of Advanced Fuel/Vehicle Systems — A North American Study of Energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Criteria Pollutant Emissions, Διαθέσιμο στη διεύθυνση <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/339.pdf>.
- Bujalski W, Dikwal C, Kendall K, (2007). Cycling of three solid oxide fuel cell types. *Journal of Power Sources* 171: 96–100.
- Burke, K.A. (2003). Fuel cells for space applications. NASA/TM-2003-212730, Διαθέσιμο στη διεύθυνση <http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2003/TM-2003-212730.pdf>.
- Carrette L, Friedrich KA and Stimming U, (2001). Fuel cells fundamentals and applications. *Fuel Cells* 1: 1–35.
- Chen B, Ockwig NW, Millward AR, Conteras DS, Yaghi OM, (2005). High H₂ adsorption in a microporous metal–organic framework with open metal sites. *Angewandte Chemie International Edition* 44, 4745–4749.
- Cheng X, Shi Z., Glass N, Zhang L, Zhang J, Song D, Liu Z, Wang H, Shen J, (2007). A review of PEM hydrogen fuel cell contamination: Impacts, mechanisms, and mitigation. *Journal of Power Sources* 165: 739–756.
- Collier A, Wang H, Zi Yuan X, Zhang J, Wilkinson D, (2006). Degradation of polymer electrolyte membranes. *International Journal of Hydrogen Energy* 31: 1838 – 1854.
- Costamagna P, Srinivasan S, (2001). Quantum jumps in the PEMFC science and technology from the 1960s to the year 2000. Part I. Fundamental scientific aspects. *Journal of Power Sources* 102: 242–252.
- Cotrell J, Pratt W, (2003). Modeling the Feasibility of Using Fuel Cells and Hydrogen Internal Combustion Engines in Remote Renewable Energy Systems” NREL Technical Review.
- Crabtree GW, Dresselhaus MS, Buchanan MV, (2004). The hydrogen economy. *Physics Today* 57: 39–44.

- Damen K, van Troost M, Faaij A, Turkenburg W, (2006). A comparison of electricity and hydrogen production systems with CO₂ capture and storage. Part A: Review and selection of promising conversion and capture technologies. *Progress in Energy and Combustion Science* 32: 2514–2529.
- Damen K, van Troost M, Faaij A, Turkenburg W, (2006). A comparison of electricity and hydrogen production systems with CO₂ capture and storage. Part B: Chain analysis of promising CCS options. *Progress in Energy and Combustion Science* 33: 580–609.
- Darkrim FL, Malbrunot P, Tartaglia GP, (2002). Review of hydrogen storage by adsorption in carbon nanotubes. *Int. J. Hydrogen Energy* 27: 193–202
- de Bruijn, R, (2005). The current status of fuel cell technology for mobile and stationary applications. *Green Chemistry* 7: 132–150.
- De Castro E, Tsou Y, Cao L, Hou C (2004). Approaches for low-cost components and MEAs for PEFCs: Current and future directions” 2004 Fuel Cell Seminar, San Antonio, Texas. Available from <http://www.fuelcellseminar.com/pdf/2004/82%20De%20Castro.pdf>.
- Dimitrakakis G.K., Tylianakis E., Froudakis G.E. (2008). Pillared Graphene: A New 3-D Network Nanostructure for Enhanced Hydrogen Storage. *Nano Letters* 8: 3166–3170.
- Dokupil, M., Spitta, C, Mathiak, J., Beckhaus, P., Heinzl, A. (2006). Compact propane fuel processor for auxiliary power unit application. *Journal of Power Sources* 157. 906–913.
- Doran P, Robeson S, Wright D, Craven J, (2003). Finance and the fuel cell industry: a review of the current financing climate. *International Journal of Hydrogen Energy* 28: 713–715.
- Dornheim M, Eigen N, Barkhordarian G, Klassen T, Bormann R, (2006). Tailoring hydrogen storage materials towards application. *Advanced Engineering Materials* 8: 377–385.
- Dreier T, Wagner U, (2000). Perspektiven einer wasserstoff-energiewirtschaft. Teil 1: Techniken und Systeme zur Wasserstofferzeugung. *BWK Bd. 52*: 41–46.
- Dunn S, (2002). Hydrogen futures: toward a sustainable energy system. *International Journal of Hydrogen Energy* 27: 235–264.
- EC (2003). European Commission, Directorate-General for Research, Directorate-General for Energy and Transport. Hydrogen Energy and Fuel Cells, a Vision of our Future.
- EC (2006a). European Commission, Directorate-General for Research, Directorate-General for Energy and Transport. European Hydrogen and Fuel Cell Projects 2002-2006, διαθέσιμο on-line: http://ec.europa.eu/research/fch/index_en.cfm?pg=links.
- EC (2006β). European Commission, Advisory Council of the Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform. European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform, Implementation Plan, διαθέσιμο στη διεύθυνση :http://ec.europa.eu/research/fch/index_en.cfm?pg=documents.
- Eddaoudi M, Kim J, Rosi N, Vodak D, Wachter J, O’Keeffe M, Yaghi OM, (2002). Systematic design of pore size and functionality in isorecticular MOFs and their application in methane storage. *Science* 295: 469–472.
- Eddaoudi M, Li H, Yaghi OM, (2000). Highly porous and stable metal-organic frameworks: Structure design and sorption properties. *Journal of the American Chemical Society* 122: 1391–1397.
- Edwards PP, Kuznetsov VL, David WIF, (2007). Hydrogen energy. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 365, 1043–1056.
- Ernst W, (2000). PEM technology development at Plug Power. 2000 Fuel Cell Seminar Program and Abstracts, Portland Oregon.
- Fang HHP, Liu H, (2002). Effect of pH on hydrogen production from glucose by a mixed culture. *Bioresources Technology* 82: 87–93.
- Farooque M, Maru H, (2006). Carbonate fuel cells: Milliwatts to megawatts. *Journal of Power Sources* 160 827 – 834.
- Felderhoff M, Weidenthaler C, von Helmolt R, Eberle U, (2007). Hydrogen storage: the remaining scientific and technological challenges. *Physical Chemistry Chemical Physics* 9: 2643–2653.
- Fergus J, (2006). Oxide anode materials for solid oxide fuel cells. *Solid State Ionics* 177: 1529–1541.
- Floch P-H, Gabriel S, Mansilla C, Werkoff F, (2007). On the production of hydrogen via alkaline electrolysis during off-peak periods. *International Journal of Hydrogen Energy* 32: 4641–4647.
- Fuel Cells (2000). How much do fuel cells cost? Available from <http://www.fuelcells.org/fcfaqs.htm#cost>.

-
- Gasteiger H, Kocha S, Sompalli B, Wagner F, (2005). Activity benchmarks and requirements for Pt, Pt-alloy and non-Pt oxygen reduction catalysts for PEMFCs", *Applied Catalysis B: Environmental*, 56: 9–35.
- Ghouse M, Abaoud H, Al-Boeiz A, (2000). Operational experience of a 1 kW PAFC stack. *Applied Energy* 65: 303–314
- Gouérec P, Poletto L, Denizot J, Sanchez-Cortezon E, Miners J, (2004). The evolution of the performance of alkaline fuel cells with circulating electrolyte. *Journal of Power Sources*, 129: 193–204.
- Grigoriev SA, Porembsky VI, Fateev VN, (2006). Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy. *International Journal of Hydrogen Energy* 31: 171–175.
- Gülzow E, Schulze M, (2004). Long-term operation of AFC electrodes with CO₂ containing gases. *Journal of Power Sources*, 127: 243–251.
- Haile S, (2003). Fuel cell materials and components. *Acta Materialia* 51: 5981–6000.
- Haland A, (2000). High-pressure conformable hydrogen storage for fuel cell vehicles, US DOE Hydrogen Program review, NREL/CP-570-28890, San Ramon California USA.
- Harris R, Book D, Anderson PA, Edwards PP, (2004). Hydrogen storage: the grand challenge. *The Fuel Cell Review* 1: 17–23.
- Hawkes A, Leach M, (2005). Solid oxide fuel cell systems for residential micro-combined heat and power in the UK: Key economic drivers. *Journal of Power Sources*, 149: 72–83.
- Hellmana H, van den Hoed R, (2007). Characterising fuel cell technology: Challenges of the commercialisation process. *International Journal of Hydrogen Energy* 32: 305 – 315.
- Hermann A, Chaudhuri T, Spagnol P, (2005). Bipolar plates for PEM fuel cells: A review. *International Journal of Hydrogen Energy* 30: 1297–1302.
- Herring JS, O'Brien JE, Stoots CM, Hawkes GL, Hartrigsen JJ, Shahnan M, (2007). Progress in high temperature electrolysis for hydrogen production using planar SOFC technology. *International Journal of Hydrogen Energy* 32: 440–450.
- Herzog, H., Meldon, J., Hatton, A. (2009). Advanced Post-Combustion CO₂ Capture. Prepared for the Clean Air Task Force. MIT Report, p.39. Διαθέσιμο στη διεύθυνση <http://web.mit.edu/mitei/docs/reports/herzog-meldon-hatton.pdf>.
- Hirscher M, Becher M, (2003). Hydrogen storage in carbon nanotubes. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 3: 3–17.
- Hogarth W, Diniz da Costa J, Lu G, (2005). Solid acid membranes for high temperature (>140°C) proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources* 142: 223–237.
- Huften J, Waldron W, Weigel S, Rao M, Nataraj S, Sircar S, (2000). Sorption enhanced reaction process for the production of hydrogen. *Proceedings of the 2000 US Department of Energy Hydrogen Program Review, NREL/CP-570-28890*.
- Hummel G, (2001). Hydrogen burner technology. The benefits of on-site reforming of natural gas to hydrogen for early alternative fuelling systems. In: National Hydrogen Association (NHA). *Hydrogen: The common thread*, 12th Annual US Hydrogen Meeting, Washington, DC, 6–8 March 2001, *Proceedings*: 121–127.
- IEA, (2009). International Energy Agency, Hydrogen Implementing Agreement: End-of-Term 2004-2009 and Strategic Plan 2009–2014, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www.ieahia.org/pdfs/IEA%20HIA%20December09-January2010.pdf>.
- IEA, (2005). Prospects for hydrogen and fuel cells. IEA Publications.
- IPHE, (2005). International Partnership on Hydrogen Economy, IPHE Collaborative Projects 2005-2008, διαθέσιμο on-line: www.iphe.net/docs/IPHE_projects_2009.pdf.
- Kandiyoti R, Herod AA, Bartle KD, (2006). Pyrolysis: Thermal breakdown of solid fuels in a gaseous environment. *Solid Fuels and Heavy Hydrocarbons Liquids*: 36–90.
- Kendall K, Singhal S, (2003). *High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications*. Elsevier Ltd.
- Kikkinides ES, (2008). Hydrogen-based energy Systems: The Storage Challenge, E.N. Pistikopoulos, M.C. Georgiadis and E.S. Kikkinides, Eds, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (ISBN 978-3-527-316946), Chapter 3, 85–123.
- Knights S, Colbow K, St-Pierre J, Wilkinson D, (2004). Aging mechanisms and lifetime of PEFC and DMFC. *Journal of Power Sources* 127: 127–134.
-

- Larminie J, Dicks A, (2003). Fuel cell systems explained 2nd edn. John Wiley & Sons Ltd. West Sussex, UK.
- Levin DB, Pitt L, Love M, (2004). Biohydrogen production: Prospects and limitations to practical application. *International Journal of Hydrogen Energy* 29: 173–185.
- Li H, Eddaoudi M, O'Keeffe M, Yaghi OM, (1999). Design and synthesis of an exceptionally stable and highly porous metal–organic framework. *Nature* 402: 276–279.
- Li X, Sabir I, (2005). Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow–field designs. *International Journal of Hydrogen Energy* 30: 359 – 371.
- Li YW, Yang RT, (2007). Hydrogen storage on platinum nanoparticles doped on superactivated carbon. *Journal of Physical Chemistry C* 111: 11086–11094.
- Lipman T, Edwards J, Kammen D, (2004). Fuel cell system economics: comparing the costs of generating power with stationary and motor vehicle PEM fuel cell systems. *Energy Policy* 32: 101–125.
- Litster S, G. McLean G, (2004). PEM fuel cell electrodes. *Journal of Power Sources* 130: 61–76.
- Ma Y, Wainright J, Savinell R, (2004). Conductivity of PBI Membranes for high–temperature polymer electrolyte fuel cells. *Journal of Electrochemical Society* 151: 8–16.
- Mahadevan K, Judd K, Stone H, Zewatsky J, Thomas A, Mahy H, Paul D, (2007). Identification and characterization of near–term direct hydrogen proton exchange fuel cell markets. US DOE, DOE Contract No. DE–FC36–03GO13110.
- Marban G and Valdes–Solis T, (2007). Towards the hydrogen economy? *International Journal of Hydrogen Energy*, 32: 1625–1637.
- McCurdy, K., Vasquez, A., Bradley, K., Development of PEMFC systems for space power applications. Fuel Cell Science, Engineering and Technology, International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, Rochester, NY, Apr. 21–23, 2003.
- McLean G, Niet T, Prince–Richard S, Djilali N, (2001). An assessment of alkaline fuel cell technology. *International Journal of Hydrogen Energy* 27: 507–526.
- Mehta V, Cooper J, (2003). Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing. *Journal of Power Sources* 114: 32–53.
- Melis A, (2002). Green algae hydrogen production: progress, challenges and prospects. *International Journal of Hydrogen Energy* 27: 1217–1228.
- Moller S, Kaucic D, Sattler S, (2004). Hydrogen production by solar reforming of natural gas: a cost study. Proceedings of 2004 Solar Conference, July 11–14, Portland, Oregon, USA.
- Momirlan M and Veziroglu TN, (2002). Current status of hydrogen energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6: 141–179.
- Ni M, Leung DYC, Leung MKH and Sumathy K, (2006). An overview of hydrogen production from biomass. *Fuel Process Technology* 87: 461–472.
- Niel EWJV, Claassen PAM, Stams AJM, (2003). Substrate and product inhibition of hydrogen production by the extreme thermophile *Caldicellulosiruptor saccharolyticus*. *Biotechnology Bioengineering* 81: 255–262.
- Nowotny J, Sorrell CC, Bak T, Sheppard LR, (2005). Solar–hydrogen: Unresolved problems in solid–state science. *Solar Energy* 78: 593–602.
- Ntziachristos L, Kouridis C, Samaras Z, Pattas K., (2005). A Wind–Power Fuel–Cell Hybrid System Study on the Non–Interconnected Aegean Islands Grid. *Renewable Energy* 30: 1471–1487.
- Panella B, Hirscher M, Püttner H, Müller U, (2006). Hydrogen adsorption in metal–organic frameworks: Cu–MOFs and Zn–MOFs compared. *Advanced Functional Materials* 16: 520–524.
- Pehnt M, Ramesohl S, (2004). Fuel cells for distributed power: benefits, barriers and perspectives. An Activity of World Fuel Cell Council, <http://assets.panda.org/downloads/stationaryfuelcellsreport.pdf>.
- Pehr K, Sauermann P, Traeger O, Bracha M, (2001). Liquid hydrogen for motor vehicles–the world's first public LH2 filling station. *International Journal of Hydrogen Energy* 26: 777–782.
- Pottier, J. D. (1995). Hydrogen transmission for future energy systems, *Hydrogen Energy Systems, Utilization of Hydrogen and Future Aspects*, ASI Series E-295, Yurum, ed., 181–194.
- Price Waterhouse Coopers (2006). New energy for world markets: 2006 fuel cell industry survey. Available from: http://www.fuelcelltoday.com/media/pdf/financials/fcis_06.pdf.

-
- PriceWaterhouse Coopers (2007). New energy for world markets: 2007 fuel cell industry survey. Available from: <http://www.pwc.com/extweb/pwcpublications.nsf/DocID/25582836BD5E736A852570CA00178BC7>.
- Ralph T, (1997). Proton exchange membrane fuel cells: Progress in cost reduction of the key components. *Platinum Metals Review*, 41: 102–113.
- Reijers HTJ, Roskam–Bakker DF, Dijkstra JW, de Smidt RP, de Groot A, van den Brink RW, (2003). Hydrogen production through sorption enhanced reforming. 1st European Hydrogen Energy Conference, Grenoble.
- Rifkin, J. *The Hydrogen Economy*. New York, NY: Tarcher/Penguin, 2002.
- Rousseau, A., Sharer, P. 2004. Comparing Apples to Apples: Well-to-Wheel Analysis of Current ICE and Fuel Cell Vehicle Technologies. SAE Technology Paper 2004-01-1302.
- Rowsell JLC, Yaghi OM, (2005). Strategies for hydrogen storage in metal–organic frameworks. *Angewandte Chemie International Edition* 44: 4670–4679.
- SAE. 2009, AE J2572 FCEV Standard Accessed Oct. 2009 from <http://www.sae.org/technical/standards/>.
- Sakintun B, Lamari–Darkrim F, Hirscher M, (2007). Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review. *International Journal of Hydrogen Energy* 32: 1121–1140.
- Sammes N, Bove R, Stahl K, (2004). Phosphoric acid fuel cells: Fundamentals and applications. *Current opinion in solid state and materials. Science* 8: 372–378.
- Sandrock G, (1999). A panoramic overview of hydrogen storage alloys from a gas reaction point of view. *Journal of Alloys and Compounds* 293–295: 877–888.
- Saxena RC, Seal D, Kumar S, Goyal HB, (2007). Thermo–chemical routes for hydrogen rich gas from biomass: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, 1909–1927
- Schlapbach L, Züttel A, (2001). Hydrogen–storage materials for mobile applications. *Nature* 414: 353–358
- Schuckert M, (2005). CUTE—a major step towards cleaner urban transport. Hydrogen and Fuel Cell Expert Workshop, IEA
- Seayad, AM, Antonelli M, (2004). Recent advances in hydrogen storage in metal containing inorganic nanostructures and related materials. *Advanced Materials* 16: 765–777.
- Sherif, S.A., Barbir, F., Veziroglu, T.N. 2005 Towards a Hydrogen Economy. *The Electricity Journal* 18, pp. 62–76.
- Shoko E, McLellan B, Dicks AL, Diniz da Costa JC, (2006). Hydrogen from coal: Production and utilisation technologies. *International. Journal of Coal Geology* 65: 213–222.
- Smith B, Sridhar S, Khan A, (2005). Solid polymer electrolyte membranes for fuel cell applications—a review. *Journal of Membrane Science* 259: 10–26.
- Sopian K, Wan Daud W, (2006). Challenges and future developments in proton exchange membrane fuel cells. *Renewable Energy* 31: 719–727.
- Srinivasan S, (2006). *Fuel cells: From fundamentals to applications*. Springer Science and Business Media LLC, New York
- Staffell I, (2007a). Review of Alkaline Fuel Cell performance. Available from: <http://www.form-eng.bham.ac.uk/fuelcells/staffell.htm>.
- Staffell I, (2007b). Review of PEM fuel cell performance. Available from: <http://www.form-eng.bham.ac.uk/fuelcells/staffell.htm>.
- Staffell I, (2007c). Review of Solid Oxide Fuel Cell performance. Available from: <http://www.form-eng.bham.ac.uk/fuelcells/staffell.htm>.
- Staffell I, Green R, Kendall K, (2007). Cost targets for domestic fuel cell CHP. *Journal of Power Sources*, doi:10.1016/j.jpowsour.2007.11.068.
- Stone HBJ, Veldhuis I, Richardson RN, (2005). An investigation into large–scale hydrogen storage in the UK. *Proceedings International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC, Istanbul, Turkey*, 13–15 July 2005
- Stoukides M, (2000). Solid electrolyte membrane reactors: current experience and future outlook. *Catalysis Reviews Science & Engineering* 42: 1–70
- St-Pierre J., Jia, N., Successful demonstration of Ballard PEMFCs for space shuttle applications. *Ballard Power Systems, Burnaby, BC. Can. J. New Materials for Electrochemical Systems* 2002; 5(4): 263–271.
- Sun C, Stimming U, (2007). Recent anode advances in solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources* 171: 247–260
-

- Sunandana CS, (2007). Nanomaterials for hydrogen storage – The van't Hoff connection. Springer Resonance, 12(5): 31–36(6)
- Swain, M. R. and Swain, M. N. 1992 A comparison oh H₂, CH₄, and C₃H₈ fuel leakage in residential settings, International Journal of Hydrogen Energy, 17 (10), 807-815.
- Tawfik H, Hung Y, Mahajan D, (2007). Metal bipolar plates for PEM fuel cell – A review. Journal of Power Sources 163: 755–767
- Taylor JB, Alderson JEA, Kalyanam KM, Lyle AB and Phillips LA, (1986). Technical and economic assessment of methods for the storage of large quantities of hydrogen, International Journal of Hydrogen Energy 11: 5–22
- Thomas KM, (2007). Hydrogen adsorption and storage on porous materials. Catalysis Today 120: 389–398.
- Timmerhaus KD, Flynn TM, (1989). Cryogenic process engineering, Plenum Press, New York
- Tsuchiya H, Kobayashi O, (2004). Mass production cost of PEM fuel cell by learning curve. International Journal of Hydrogen Energy, 29: 985–990
- Turner J, (2003). Photo electrochemical water splitting. http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/hydrogen/pdfs/15_nrel_john_turner.pdf
- UNEP (2002). Fuel Cell Market Prospects and Intervention Strategies, United Nations Environment Programme, Imperial College Centre for Energy Policy and Technology
- US DOE, (2002). Fuel cell handbook (Sixth edn). EG&G Technical Services, Inc. Science Applications International Corporation. DOE/NETL–2002/1179
- USDOE (2002). United States Department of Energy. National Hydrogen Energy Roadmap, διαθέσιμο στη διεύθυνση: http://www.fossil.energy.gov/programs/fuels/publications/programplans/2002/national_h2_roadmap.pdf
- USDOE (2006). United States Department of Energy, Hydrogen Posture Plan, an Integrated Research, Development and Demonstration Plan, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/>.
- USFCC, 2003. U.S. Fuel Cell Council. Fuel Cell Vehicle World Survey 2003. Washington, DC: U.S. Fuel Cell Council; 2003.
- Varner K, Warren S, Turner JA, (2002). Photoelectrochemical systems for hydrogen production. Proceedings of the 2002 US DOE Hydrogen Program Review. NREL/CP–610–32405.
- Venter RD and Pucher G, (1997). Modelling of stationary bulk hydrogen storage systems. International Journal of Hydrogen Energy 22: 791–798.
- Vitart X, Le Duigou A, Carles P, (2006). Hydrogen production using the sulphur–iodine cycle coupled to a VHTR: An overview. Energy Conversion and Management 47(17): 2740–2747
- Von Helmolt R, Eberle U, (2007). Fuel cell vehicles: Status 2007. Journal of Power Sources 165: 833–843.
- Wang B, (2005). Recent development of non–platinum catalysts for oxygen reduction reaction: Review. Journal of Power Sources 152: 1–15
- Wee J, Lee K, (2006). Overview of the development of CO–tolerant anode electrocatalysts for proton–exchange membrane fuel cells. Journal of Power Sources 157: 128–135
- Wentz W., Myose R. and Mohamed A. "Hydrogen-Fueled General Aviation Airplanes" AIAA 5th Aviation, Integration, and Operations Conference (ATIO) September 2005, Arlington, Virginia, AIAA 2005-7324
- Wetzel FJ, (1998). Improved handling of liquid hydrogen at filling stations: Review of six years' experience. International Journal of Hydrogen Energy 23: 339–348.
- Wilkinson D, Steck A, (1997). General progress in the research of solid polymer fuel cell technology at Ballard. Second international symposium on new materials for fuel cell and modern battery systems, Montreal, Quebec, Canada.
- Williams M, Strakey J, Singhal S, (2004). US distributed generation fuel cell program. Journal of Power Sources 131: 79–85.
- Wong–Foy AG, Matzger AJ, Yaghi OM, (2006). Exceptional H₂ saturation uptake in microporous metal–organic frameworks. Journal of the American Chemical Society 128: 3494–3495.
- Worldwide Fuel Cell Industry Survey (2006). Available from: http://www.usfcc.com/download_a_file/download_a_file/Nov27–PGWG–2006WorldwideFuelCellIndustrySurvey–06–209.pdf.

-
- Yaman S, (2004). Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. *Energy Conversion and Management* 45: 651–671.
- Yamashita and Barreto, (2003). Integrated energy systems for the 21st century: Coal gasification for co-producing hydrogen, electricity and liquid fuels. Interim report IR-03-039, International Institute for Applied System Analysis, Laxenburg.
- Yang J, Park Y, Seo S, Lee H, Noh J, (2002). Development of a 50 kW PAFC power generation system. *Journal of Power Sources*. 106: 68–75.
- Yu X, Ye S, (2007). Recent advances in activity and durability enhancement of Pt/C catalytic cathode in PEMFC. Part I. Physico-chemical and electronic interaction between Pt and carbon support, and activity enhancement of Pt/C catalyst. *Journal of Power Sources* 172: 133–144.
- Yu X, Ye S, (2007). Recent advances in activity and durability enhancement of Pt/C catalytic cathode in PEMFC. Part II: Degradation mechanism and durability enhancement of carbon supported platinum catalyst. *Journal of Power Sources* 172: 145–154.
- Yuh A, Farooque M, (2002). Carbonate fuel cell materials. *Advanced Materials and Processes*, 160: 31.
- Zaluska A, Zaluski L, Ström-Olsen JO (2001). Structure, catalysis and atomic reactions on the nano-scale: a systematic approach to metal hydrides for hydrogen storage. *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 72(2): 157–165.
- Zhang J, Fisher TS, Ramachandran PV, Gore JG, Mudawar I, (2005). A review of heat transfer issues in hydrogen storage technologies. *Journal of Heat Transfer* 127: 1391–1399.
- Zhang J, Xie Z, Zhang J, Tang Y, Song C, Navessin T, Shi Z, Song D, Wang H, Wilkinson D, Liu Z, Holdcroft S, (2006). High temperature PEM fuel cells: Review. *Journal of Power Sources* 160: 872–891.
- Zhang L, Zhang J, Wilkinson D, Wang H, (2006). Progress in preparation of non-noble electrocatalysts for PEM fuel cell reactions. *Journal of Power Sources* 156: 171–182.
- Zink F, Lu Y, Schaefer L, (2007). A solid oxide fuel cell system for buildings. *Energy Conversion and Management* 48: 809–818.
- Zoulas EI, Glockner R, Lymberopoulos N, Tsoutsos T, Vosseler I, Gavalda O, Mydske HJ, Taylor P, (2006). Integration of hydrogen energy technologies in stand-alone power systems. Analysis of the current potential for application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10(5): 432–462 διαθέσιμο on-line: http://ec.europa.eu/research/fch/pdf/hlg_vision_report_en.pdf
- ΕΛΕΤΥ (2010). Ελληνική Εταιρεία Υδρογόνου, <http://www.hellashy.org>.
- ΕΝΥ (2010). Ελληνικό Νησί Υδρογόνου, http://www.cres.gr/h2ellenic_island/index.htm.
- IEA (2006). International Energy Agency, World Energy Outlook 2006, διαθέσιμο στη διεύθυνση: http://www.iea.org/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=1804.
- ΚΑΠΕ (2006). Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Εθνική Στρατηγική για την Έρευνα, Ανάπτυξη και Εφαρμογή Ενεργειακών Τεχνολογιών H₂ – Δημιουργία Ελληνικής Τεχνολογικής Πλατφόρμας Υδρογόνου & Κυψελών Καυσίμου, διαθέσιμο στη διεύθυνση: www.cres.gr/h2ellenic_island/pdf/march/Stratigiki.doc.
- ΚΑΠΕ (2007). Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Συντονιστική Επιτροπή Ελληνικής Πλατφόρμας Υδρογόνου. Ελληνικός Οδικός Χάρτης για το Υδρογόνο και τις Κυψέλες Καυσίμου.
-

Παράρτημα Α

Έργα στην περιοχή του Η₂ που χρηματοδοτήθηκαν από το 6^ο Πρόγραμμα – Πλαίσιο

Παραγωγή και διανομή του υδρογόνου	Bio-Hydrogen	Προϋπολογισμός: 1.37 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Ανάπτυξη ενός οικονομικά αποδοτικού συστήματος αναμόρφωσης βιοαερίου με 6KW εγκατεστημένη ισχύ υδρογόνου (Profactor Produktions forschung, Αυστρία)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/24 μήνες
	CHRISGAS	Προϋπολογισμός: 15.6 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικής μεθόδου για παραγωγή συνθετικών αερίων που περιέχουν υδρογόνο από βιομάζα (Vaxjo Universitet, Σουηδία)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/36 μήνες
	GenHyPem	Προϋπολογισμός: 2.2 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Παραγωγή υδρογόνου από ηλεκτρόλυση του ύδατος μέσω της μεθόδου PEM (Universite Paris-Sud, Γαλλία)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/36 μήνες
	Hi2H2	Προϋπολογισμός: 1.77 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Υψηλής απόδοσης παραγωγή υδρογόνου από ηλεκτρόλυση του ύδατος υπό υψηλές θερμοκρασίες (Universitat Karlsruhe, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/36 μήνες
	HYTHEC	Προϋπολογισμός: 2.94 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Παραγωγή υδρογόνου από ηλεκτρόλυση του ύδατος μέσω της μεθόδου PEM (Universite Paris-Sud, Γαλλία)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/36 μήνες
	HYVOLUTION	Προϋπολογισμός: 13.8 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Ανάπτυξη διαδικασίας 2-σταδίων για τη παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα (Agrotechnology & Food Innovations, Ολλανδία)	Έναρξη/Διάρκεια 2006/60 μήνες
	NATULARHY	Προϋπολογισμός: 17.3 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Διερεύνηση του δυναμικού μεταφοράς και διανομής του υδρογόνου από το υπάρχον δίκτυο υποδομής του φυσικού αερίου (N.V. Nederlandse Gasunie, Ολλανδία)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/36 μήνες
	NEMESIS	Προϋπολογισμός: 3.87 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Κατασκευή μικρής κλίμακας γεννήτριας υδρογόνου με καύση υγρών και αέριων υδρογονανθράκων (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V., Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/36 μήνες
	SOLAR-H	Προϋπολογισμός: 2.3 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Παραγωγή υδρογόνου από ύδωρ και ηλιακή ενέργεια μέσω καινοτόμων μεθόδων (Uppsala University, Σουηδία)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/36 μήνες
	SOLHYCARB	Προϋπολογισμός: 23.25 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Παραγωγή υδρογόνου από ηλιακή ενέργεια μέσω υψηλής θερμοκρασίας χημικού αντιδραστήρα (Centre National de Recherche Scientifique, Γαλλία)	Έναρξη/Διάρκεια 2006/48 μήνες
	SOLREF	Προϋπολογισμός: 3.45 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Κατασκευή καινοτόμου ηλιακού αναμορφωτή 400 kWh για παραγωγή υδρογόνου και ηλεκτρικής ενέργειας (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V., Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/45 μήνες

	BIOMODULARH2	Προϋπολογισμός: υ.δ.
	Περιγραφή (Συντονιστής): Παραγωγή υδρογόνου από τεχνικώς τροποποιημένα βακτήρια (Ecole Polytechnique, Γαλλία)	Έναρξη/Διάρκεια υ.δ.
	CACHET	Προϋπολογισμός: 13.45 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Παραγωγή υδρογόνου από αέρια καύσιμα (BP Exploration and Operating Company Ltd, Ηνωμένο Βασίλειο)	Έναρξη/Διάρκεια 2006/36 μήνες
	HY2SEPS	Προϋπολογισμός: 2.53 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Υβριδικό υδρογόνο-συστήματα διαχωρισμού CO ₂ (Ίδρυμα Έρευνας και Τεχνολογίας, Ελλάδα)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/36 μήνες
	HYDROSOL-II	Προϋπολογισμός: 4.29 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Κατασκευή καινοτόμου ηλιακού αντιδραστήρα 100 kWth για παραγωγή υδρογόνου μέσω 2-σταδίων θερμοχημικής ηλεκτρόλυσης του ύδατος (Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Ελλάδα)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/48 μήνες
Αποθήκευση του υδρογόνου	STORPHY	Προϋπολογισμός: 18.7 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Διεξαγωγή έρευνας σε τεχνολογίες αποθήκευσης με επίκεντρο στα οχήματα (Magna Steyr Fahrzeugtechnik)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/54 μήνες
	NESSHY	Προϋπολογισμός: 11.6 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Προώθηση της υπάρχουσας κατάστασης της στερεάς αποθήκευσης υδρογόνου μέσω νέων υλικών, νέων αναλυτικών εργαλείων, μοντελοποίησης, προτυποποίησης και ελέγχου (Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ», Ελλάδα)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/48 μήνες
	HYSIC	Προϋπολογισμός: υ.δ.
	Περιγραφή (Συντονιστής): Προώθηση διεθνούς συνεργασίας μέσω του προγράμματος NESSHY με υποστήριξη καινοτόμων δράσεων E&A (Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ», Ελλάδα)	Έναρξη/Διάρκεια υ.δ.
	HYCONES	Προϋπολογισμός: υ.δ.
	Περιγραφή (Συντονιστής): Ανάπτυξη νέων Carbon Cone (CC) υλικών για αποθήκευση υδρογόνου σε κινητές εφαρμογές και ανάπτυξη νέων εργαλείων για μοντελοποίηση της σχέσης μεταξύ CC και υδρογόνου (University of Nottingham, Ηνωμένο Βασίλειο)	Έναρξη/Διάρκεια υ.δ.
	HYTRAIN	Προϋπολογισμός: 2.65 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Εκπαίδευση ερευνητικού προσωπικού πάνω στην αποθήκευση του υδρογόνου και ενδυνάμωση του ρόλου της Ευρωπαϊκής Ένωσης στη διεθνή έρευνα πάνω στην αποθήκευση (Institute for Materials Research, Ηνωμένο Βασίλειο)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/48 μήνες
	HYDROGEN	Προϋπολογισμός: 3.54 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Διεξαγωγή έρευνας στη φωτο-ηλεκτροχημική παραγωγή και αποθήκευση του υδρογόνου και στη αποθήκευση του υδρογόνου με μορφή αμμωνίας (Universiteit Leiden, Ολλανδία)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/48 μήνες
Κυβέλες	REAL- SOFC	Προϋπολογισμός: 18.26Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Ανάπτυξη υλικών για SOFC (Forschungszentrum Jülich GmbH, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/48 μήνες

TSOFC600	Προϋπολογισμός: 11.48 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Διεξαγωγή έρευνας για τη χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας των επίπεδων SOFC στους 600° (Energy Research Centre of the Netherlands, Ολλανδία)	Έναρξη/Διάρκεια 2006/48 μήνες
SOFCSPRAY	Προϋπολογισμός: 1.18 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Προσαρμογή χαμηλού κόστους και υψηλής θερμοκρασίας υλικών για εφαρμογές SOFC (NTDA Energía, Ισπανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/24 μήνες
MATSILC	Προϋπολογισμός: υ.δ.
Περιγραφή (Συντονιστής): Διεξαγωγή έρευνας σε χαμηλού κόστους ηλεκτρολύτες εστέρα πυριτικού οξέος και ηλεκτρόδια (Technische Universität Clausthal, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια υ.δ.
FURIM	Προϋπολογισμός: 6.1 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Ανάπτυξη προηγμένων υλικών για υψηλής θερμοκρασίας PEFC που λειτουργούν στους 170° και ενσωμάτωση τους σε κυψέλη καυσίμου (Technical University of Denmark, Δανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/48 μήνες
AUTOBRANE	Προϋπολογισμός: 14.4 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Διεξαγωγή έρευνας για την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του PEFC σε εφαρμογές οχημάτων (DaimlerChrysler, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/48 μήνες
IPHE-GENIE	Προϋπολογισμός: υ.δ.
Περιγραφή (Συντονιστής): Ενσωμάτωση της Ρωσίας και της Κίνας στο πρόγραμμα AUTOBRANE (Energy Research Centre for the Netherlands, Ολλανδία)	Έναρξη/Διάρκεια υ.δ.
FCANODE	Προϋπολογισμός: υ.δ.
Περιγραφή (Συντονιστής): Αντικατάσταση των ευγενών-μετάλλων καταλυτών για PEM κυψέλες καυσίμου με οικονομικότερους (Danish Technical University, Δανία)	Έναρξη/Διάρκεια υ.δ.
APOLLON-B	Προϋπολογισμός: υ.δ.
Περιγραφή (Συντονιστής): Παροχή καινοτόμων λύσεων σε αποδοτικά χαμηλού κόστους και υψηλής θερμοκρασίας ηλεκτρόδια για PEM (Πανεπιστήμιο Πατρών, Ελλάδα)	Έναρξη/Διάρκεια υ.δ.
IMPRESS	Προϋπολογισμός: 15.9 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Κατανόηση των δεσμών μεταξύ της στερεοποίησης (European Space Agency, Ολλανδία)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/60 μήνες
CARISMA	Προϋπολογισμός: υ.δ.
Περιγραφή (Συντονιστής): Ενοποίηση της Ευρωπαϊκής, εθνικής και τοπικής εφαρμοσμένης έρευνας και ανάπτυξης σε υψηλής θερμοκρασίας PEFC μεμβράνες ηλεκτρολύτη (Centre National de la Recherche Scientifique, Γαλλία)	Έναρξη/Διάρκεια υ.δ.
PEMTOOL	Προϋπολογισμός: 1.18 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Παροχή εργαλείων μοντελοποίησης (λογισμικού) σε SME για την αποδοτικότερη ανάπτυξη προϊόντων που να σχετίζονται με κυψέλες καυσίμου (Kungl Tekniska Högskolan, Σουηδία)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/24 μήνες
GENFC	Προϋπολογισμός: 2.67 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Ανάπτυξη γενικής χρήσης εργαλείο μοντελοποίησης κυψελών καυσίμου (Forschungszentrum Jülich, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια

		2005/26
Κινητές και σταθερές εφαρμογές	MOREPOWER	Προϋπολογισμός: 3.39 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Ανάπτυξη κυψελών καυσίμου DMFC συγκαταλέγοντας νέα πολυμερή υλικά για ηλεκτρόδια για φορητές εφαρμογές (GKSS Forschungszentrum, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/36 μήνες
	FEMAG	Προϋπολογισμός: 1.06 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Ολοκλήρωση της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου για φορητές και κινητές εφαρμογές με υπάρχουσες διατάξεις όπως οι μπαταρίες και η υπερπυκνωτές (Labor S.R.I., Ιταλία)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/24 μήνες
	DEMAG	Προϋπολογισμός: 1.13 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Ολοκλήρωση της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου για φορητές και κινητές εφαρμογές με υπάρχουσες διατάξεις όπως οι μπαταρίες και η υπερπυκνωτές (Labor S.R.I., Ιταλία)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/24 μήνες
	BIOCELLUS	Προϋπολογισμός: 3.36 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Ανάπτυξη και επίδειξη κυψέλης καυσίμου που ικανοποιεί τις ειδικές απαιτήσεις των βιοκαυσίμων (Lehrstuhl für Energiesysteme, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/36 μήνες
	GREEN FUEL CELL	Προϋπολογισμός: 5.17 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Ανάπτυξη και επίδειξη κυψέλης καυσίμου που ικανοποιεί τις ειδικές απαιτήσεις των βιοκαυσίμων (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Γαλλία)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/36 μήνες
	FLAMESOFC	Προϋπολογισμός: 12.26 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Ανάπτυξη καινοτόμου συστήματος συμπαραγωγής θερμότητας ηλεκτρισμού βασισμένου σε SOFC ικανό να λειτουργήσει με διαφορετικά καύσιμα και να εκπληρώσει όλες τις τεχνολογικές και εμπορικές απαιτήσεις σε Ευρωπαϊκό επίπεδο (VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/48 μήνες
	NETGENCELL	Προϋπολογισμός: υ.δ.
	Περιγραφή (Συντονιστής): Ανάπτυξη υλικών που να επιτρέπουν στη τεχνολογία PEM MEA να μειώσει το κόστος και να αυξήσει την αξιοπιστία των παρόντων PEM στο πλαίσιο μικρών οικιακών συστημάτων συμπαραγωγής θερμότητας ηλεκτρισμού (Vaillant GmbH, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια υ.δ.
Εφαρμογές στις μεταφορές	BIOCELLUS	Προϋπολογισμός: 3.36 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Ανάπτυξη και επίδειξη κυψέλης καυσίμου που ικανοποιεί τις ειδικές απαιτήσεις των βιοκαυσίμων (Lehrstuhl für Energiesysteme, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/36 μήνες
	FELICITAS	Προϋπολογισμός: 12.7 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Διεξαγωγή έρευνας σε κυψέλες καυσίμου PEFC και SOFC για διαφορετικές κινητές εφαρμογές ισχύος άνω των 200 kW _e (Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung eV, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/υ.δ.
	HYTRAN	Προϋπολογισμός: 16.8 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Διεξαγωγή έρευνας σε στοιχεία και υποσυστήματα για FC-APU (Volvo Technology Corporation AB, Σουηδία)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/60 μήνες
	HYICE	Προϋπολογισμός: 7.7 Μ€

Περιγραφή (Συντονιστής): Δημιουργία προτύπου μηχανής με υψηλότερη απόδοση από τις μηχανές με καύση βενζίνης και πετρελαίου diesel (DaimlerChrysler AG, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/648 μήνες
HYSYS	Προϋπολογισμός: 11.2 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Αξιολόγηση της λειτουργίας των οχημάτων με κυψέλη καυσίμου και βελτίωση των στοιχείων των κυψελών καυσίμου (DaimlerChrysler AG, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/48 μήνες
HOPE	Προϋπολογισμός: 4.09 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Ανάπτυξη ηλεκτρονικών ισχύος για HEV (Siemens AG, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2006/36 μήνες
HYHEELS	Προϋπολογισμός: 4.73 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Ανάπτυξη ενός βελτιωμένου οικονομικά αποδοτικού τροφοδοτικού για υβριδικά αυτοκίνητα (Siemens AG, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/36 μήνες
ILHYPOS	Προϋπολογισμός: 2.86 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Ανάπτυξη υβριδικών υπερπυκνωτών για ηλεκτρικά αυτοκίνητα που χρησιμοποιούν PEM (ENEA Casaccia Research Centre, Ιταλία)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/36 μήνες
INTELLICON	Προϋπολογισμός: 0.96 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Διεξαγωγή έρευνας σε διάφορες διατάξεις όπως DC-DC μετατροπείς, υπερπυκνωτές και μπαταρίες (HILTech Developments Limited, Ηνωμένο Βασίλειο)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/24 μήνες
POMEROL	Προϋπολογισμός: 4.86 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Ανάπτυξη χαμηλού κόστους μπαταριών και ασφαλών λιθίου-ιόντος (Direction de la Recherche, Γαλλία)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/36 μήνες
VELA H2	Προϋπολογισμός: υ.δ.
Περιγραφή (Συντονιστής): Ανάπτυξη προγραμμάτων δοκιμών για την αποτίμηση της απόδοσης και της συνολικής περιβαλλοντικής απόδοσης ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων (Institute for Environment and Sustainability, European Commission Joint Research Center)	Έναρξη/Διάρκεια 20044/υ.δ.
CELINA	Προϋπολογισμός: 8.1 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Εξέταση της συμπεριφοράς των κυψελών καυσίμου κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες (χαμηλή θερμοκρασία, πίεση, δονήσεις) (Airbus Deutschland GmbH, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/36 μήνες
MC-WAP	Προϋπολογισμός: 17.17 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Σχεδίαση και ανάπτυξη μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βασισμένο σε κυψέλη καυσίμου και καύσιμο πετρέλαιο Diesel και ενσωμάτωση του σε πλοίο (CETENA SpA, Ιταλία)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/60 μήνες
NEW H SHIP	Προϋπολογισμός: 0.55 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Αναγνώριση των τεχνικών και λειτουργικών εμποδίων σχετικά με τις απαιτήσεις των συστημάτων των πλοίων και των καυσίμων που χρησιμοποιούν (Icelandic New Energy Ltd, Ισλανδία)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/15 μήνες
ROADS2HYCOM	Προϋπολογισμός: 4.5Μ€

Περιγραφή (Συντονιστής): Υποστήριξη της Commission στη παρακολούθηση και το συντονισμό στις τρέχουσες δράσεις του HFP και παροχή νέων δεδομένων για έρευνα και επίδειξη μέσα στα πλαίσια μίας ολοκληρωμένης ευρωπαϊκής στρατηγικής (Ricardo UK Ltd, Ηνωμένο Βασίλειο)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/36 μήνες
HY-CO	Προϋπολογισμός: 2.7 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Δημιουργία δικτύου που θα περιέχει όλες τις εθνικές δράσεις E&A με την ίδρυση του European Research Area (ERA-Net) για το υδρογόνο και τις κυψέλες καυσίμου	Έναρξη/Διάρκεια 2004/48 μήνες
HYTETRA	Προϋπολογισμός: υ.δ.
Περιγραφή (Συντονιστής): Υποστήριξη των ευρωπαϊκών SME για τη διαχείριση των επερχόμενων τεχνολογιών του υδρογόνου (υ.δ.)	Έναρξη/Διάρκεια υ.δ.
ENFUGEN	Προϋπολογισμός: 0.25 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Υποστήριξη της συμμετοχής ερευνητικού προσωπικού από τη Πολωνία, τη Δημοκρατία της Τσεχίας, τη Σλοβακία, τη Βουλγαρία και τη Ρουμανία σε ερευνητικά κέντρα (Labor S.R.I., Ιταλία)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/24 μήνες
HY-PROSTORE	Προϋπολογισμός: 0.65 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Βελτίωση της ερευνητικού δυναμικού του τουρκικού Κέντρου στις τεχνολογίες του υδρογόνου (TÜBITAK – Marmara Research Center Energy Institute, Τουρκία)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/36 μήνες
CASCADE MINTS	Προϋπολογισμός: 1.73 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Προώθηση αιφώρων ενεργειακών συστημάτων (Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ελλάδα)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/36 μήνες
DYNAMIS	Προϋπολογισμός: 7.46 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Προώθηση μεγάλης κλίμακας σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ορυκτών καυσίμων με ταυτόχρονη παραγωγή υδρογόνου και άμεση γεωλογική αποθήκευση του CO ₂ (SINTEF Energy Research, Νορβηγία)	Έναρξη/Διάρκεια 2006/36 μήνες
HYWAYS	Προϋπολογισμός: 7.9 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Ανάπτυξη επικυρωμένου οδικού χάρτη για την εισαγωγή του υδρογόνου στο ενεργειακό σύστημα (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/36 μήνες
HYWAYS-IPHE	Προϋπολογισμός: υ.δ.
Περιγραφή (Συντονιστής): Σύγκριση των οδικών χαρτών της Ευρώπης και των Η.Π.Α. (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια υ.δ.
INNOHYP-CA	Προϋπολογισμός: 0.62 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής) Συντονισμός των δράσεων σχετικά με την αποθήκευση του υδρογόνου και διαμόρφωση ενός οδικού χάρτη για βραχύ-, μέσο- και μακροπρόθεσμα ερευνητικά προγράμματα (Commissariat à l'Énergie Atomique, Γαλλία)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/27 μήνες
HYCELL-TPS	Προϋπολογισμός: 2.78 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Δημιουργία Ευρωπαϊκής HFP Γραμματείας (Συντονιστής: European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform Secretariat, Βέλγιο)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/27 μήνες
WETO-H2	Προϋπολογισμός: 0.46 Μ€

	Περιγραφή (Συντονιστής): Διαμόρφωση σεναρίων για το μελλοντικό ενεργειακό σύστημα έως το έτος 2050 που να λαμβάνουν υπόψη τη χρήση του υδρογόνου σαν ενεργειακό φορέα (ENERDATA S.A., Γαλλία)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/24 μήνες
Κοινωνικοοικονομική ανάλυση	Τίτλος: NANOCOFC	Προϋπολογισμός: υ.δ.
	Περιγραφή (Συντονιστής): Ενίσχυση των ερευνητικών δραστηριοτήτων στη νανοτεχνολογία και σε πολυ-λειτουργικά υλικά (Royal Institute of Technology, Σουηδία)	Έναρξη/Διάρκεια υ.δ.
	Τίτλος: PREMIA	Προϋπολογισμός: 1.0 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Εξέταση της οικονομικής αποδοτικότητας των μέτρων υποστήριξης εναλλακτικών καυσίμων (όπως το υδρογόνο) στην ευρωπαϊκή αγορά (Συντονιστής: Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Ελλάδα)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/36 μήνες
Επικυριοποίηση τεχνολογίας και επίδειξη	HYCHAIN-MINITRAINS	Προϋπολογισμός: 27.65 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Ανάπτυξη πολλών κατηγοριών οχημάτων με χρήση κυψελών καυσίμων σε τέσσερις χώρες της Ευρώπης (Γαλλία, Ιταλία, Ισπανία, Γερμανία) (Axane Fuel Cell Systems, Γαλλία)	Έναρξη/Διάρκεια 2006/υ.δ.
	ZERO REGIO	Προϋπολογισμός: 21.4 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Επίδειξη οχημάτων με καύσιμο υδρογόνο και δικτύου υποδομής σε δύο ευρωπαϊκές περιοχές (Infraserv GmbH & Co. Höchst KG, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/60 μήνες
	HYFLEET:CUTE	Προϋπολογισμός: 43.16 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Σχεδίαση, κατασκευή και δοκιμή των λεωφορείων τύπου ICE αλλά και επόμενης γενιάς λεωφορείων που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου (DaimlerChrysler AG, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2006/υ.δ.
	HYLIGHTS	Προϋπολογισμός: 4.4 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Υποστήριξη της Commission στη παρακολούθηση και συντονισμό των δράσεων του HFP μέσα στη ευρωπαϊκή στρατηγική με επίκεντρο τις εφαρμογές στον τομέα των μεταφορών (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2006/24 μήνες
Ασφάλεια, ρυθμιστικό πλαίσιο, τεχνικοί κανονισμοί και κώδικες	HYSAFE	Προϋπολογισμός: 13 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Δημιουργία ενός αξιόπιστου δικτύου σε ευρωπαϊκό επίπεδο για την αποτίμηση της ασφάλειας των τεχνολογιών του υδρογόνου (Forschungszentrum Karlsruhe GmbH – IKET, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2004/60
	HySAFEST	Προϋπολογισμός: 0.7 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής) Εκπαίδευση στην ασφάλεια του υδρογόνου (FireSERT Institute, Ηνωμένο Βασίλειο)	Έναρξη/Διάρκεια 2006/48 μήνες
	HyCourse	Προϋπολογισμός: 0.62 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Ευρωπαϊκό θερινό σχολείο στην ασφάλεια του υδρογόνου (FireSERT Institute, Ηνωμένο Βασίλειο)	Έναρξη/Διάρκεια 2006/48 μήνες
	HARMONY	Προϋπολογισμός: 0.46 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Αποτίμηση των δραστηριοτήτων των ρυθμιστικών πλαισίων και των προτύπων για το υδρογόνο και τις κυψέλες καυσίμου στο διεθνές επίπεδο (Vrije Universiteit Brussel, Βέλγιο)	Έναρξη/Διάρκεια 2005/15 μήνες
	HYAPPROVAL	Προϋπολογισμός: 3.95 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής): Ανάπτυξη ενός εγχειριδίου για τη διευκόλυνση της	Έναρξη/Διάρκεια

έγκρισης των σταθμών τροφοδοσίας υδρογόνου σε ευρωπαϊκό επίπεδο (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Γερμανία)	2005/24 μήνες
HYFIRE	Προϋπολογισμός: υ.δ.
Περιγραφή (Συντονιστής): Δημιουργία ενός συνόλου ερευνητικού προσωπικού με ειδικευση στην ασφάλεια λόγω αναφλέξεων και εκρήξεων του υδρογόνου (Kingston University, Ηνωμένο Βασίλειο)	Έναρξη/Διάρκεια υ.δ./υ.δ.
FCTES	Προϋπολογισμός: 4.9 Μ€
Περιγραφή (Συντονιστής): Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του FCTESTNET (the Fuel Cells Testing and Standardization Network) του FP5 (Ente per le Nuove Tecnologie l'Energia e l'Ambiente – ENEA, Ιταλία)	Έναρξη/Διάρκεια 2006/48 μήνες
FCTEDI	Προϋπολογισμός: υ.δ.
Περιγραφή (Συντονιστής): Επιπλέον προώθηση των αποτελεσμάτων του FCTES σε διεθνείς οργανισμούς και διεξαγωγή ανάλυσης σχετικά με τα ρυθμιστικά πλαίσια και πρότυπα για τις κυψέλες καυσίμου που θα χρησιμοποιηθούν σε στατικές εφαρμογές (Ente per le Nuove Tecnologie l'Energia e l'Ambiente – ENEA, Ιταλία)	Έναρξη/Διάρκεια υ.δ./υ.δ.
FCTEST	Προϋπολογισμός: υ.δ.
Περιγραφή (Συντονιστής): Αποτίμηση των διαδικασιών αξιολόγησης, των λειτουργικών χαρακτηριστικών, της απόδοσης, της ασφάλειας και των επιδράσεων στο περιβάλλον των κυψελών καυσίμου (υ.δ)	Έναρξη/Διάρκεια υ.δ./48 μήνες

Παράρτημα Β

Έργα που χρηματοδοούνται από το 7^ο Πρόγραμμα Πλαίσιο

Μεταφορές και δίκτυο εφοδιασμού	Τίτλος: H2moves Scandinavia	Προϋπολογισμός: 19.5 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής) Δημιουργία μονάδας (πρατήριο) με τροφοδότηση υδρογόνου στο Όσλο (Νορβηγία) (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2010/36 μήνες
	Τίτλος: NextHyLights	Προϋπολογισμός: 1.1 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής) Ανάπτυξη στρατηγικής για την εισαγωγή στην αγορά των παραδοτέων διάφορων προγραμμάτων όπως HyWays, R2H, HyLights, ZERO REGIO, κ.α. (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2010/12 μήνες
	Τίτλος: Auto-Stack	Προϋπολογισμός: 2.9 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής) Ανάπτυξη ενός συμπλέγματος (cluster) πρωτοβουλιών (initiative) για οχήματα που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου στην Ευρώπη (ZENTRUM FUER SONNENENERGIE- UND WASSERSTOFF- FORSCHUNG, BADEN-WUERTEMBERG, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2010/18 μήνες
Παραγωγή και διανομή υδρογόνου	Τίτλος: NEXPEL	Προϋπολογισμός: 3.4 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής) Ανάπτυξη επόμενης γενιάς ηλεκτρολύτη PEM για αειφόρο παραγωγή υδρογόνου (STIFTELSEN SINTEF, Νορβηγία)	Έναρξη/Διάρκεια 2010/36 μήνες
	Τίτλος: PrimoLyzer	Προϋπολογισμός: 2.6 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής) Ανάπτυξη υψηλής απόδοσης και ελαχίστου κόστους ηλεκτρολύτη PEM για ενσωμάτωση του σε οικιακό μCHP (IRD Fuel Cells A/S, Δανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2010/24 μήνες
	Τίτλος: HYDROSOL-3D	Προϋπολογισμός: 1.8 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής) Ανάπτυξη μεθόδου παραγωγής του υδρογόνου απουσία CO ₂ μέσω θερμοχημικής λύσης του ύδατος με τη χρήση ηλιακής ακτινοβολίας (Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογίας, Ελλάδα)	Έναρξη/Διάρκεια 2010/36 μήνες
Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και CHP	Τίτλος: GENIUS	Προϋπολογισμός: 4.2 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής) Ανάπτυξη εργαλείου για τη διαγνωστική και αξιολόγηση κυψελών καυσίμου SOFC (European Institute for Energy Research, Γερμανία)	Έναρξη/Διάρκεια 2010/36 μήνες
	Τίτλος: ASSENT	Προϋπολογισμός: 4.9 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής) Ανάπτυξη υποσυστήματος ανόδου και βελτιστοποίηση κυψελών καυσίμου SOFC (Valtion Tieteellinen Tutkimuskeskus, Φινλανδία)	Έναρξη/Διάρκεια 2010/36 μήνες
	Τίτλος: DEMMEA	Προϋπολογισμός: 3.1 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής) Κατανόηση των μηχανισμών διάβρωσης των μεμβρανών ηλεκτροδίων των υψηλής θερμοκρασίας PEMFC (Advanced Energy Technologies SA, Ελλάδα)	Έναρξη/Διάρκεια 2010/36 μήνες
	Τίτλος: KEEPEMALIVE	Προϋπολογισμός: 2.9 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής)	Έναρξη/Διάρκεια

	Βελτίωση της αντοχής των κυψελών καυσίμου PEM μέσω διεξαγωγής πειραμάτων(STICHTING ENERGIEONDERZOEK CENTRUM NEDERLAND, Ολλανδία)	20010/36 μήνες
	Τίτλος: LOLIPEM	Προϋπολογισμός: 2.9 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής) Ανάπτυξη συστημάτων CHP βασισμένα στη τεχνολογία PEMFCH για θερμοκρασίες άνω των 100 °C (CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE, Ιταλία)	Έναρξη/Διάρκεια 20010/36 μήνες
	Τίτλος: MCFC-CONTEX	Προϋπολογισμός: 4.4 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής) Εξέταση των μηχανισμών διάβρωσης και της διάρκειας ζωής των κυψελών καυσίμων MCFC (AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE, Ιταλία)	Έναρξη/Διάρκεια 20010/36 μήνες
	Τίτλος: ROBANODE	Προϋπολογισμός: 3.4 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής) Ελαχιστοποίηση της διάβρωσης της ανόδου για κυψέλες καυσίμου SOFC με καύσιμο το φυσικό αέριο και το υδρογόνο (Ιδρυμα Έρευνας και Τεχνολογίας, Ελλάδα)	Έναρξη/Διάρκεια 20010/36 μήνες
Πρώιμες αγορές (Early markets)	Τίτλος: IRAFC	Προϋπολογισμός: 2.5 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής) Ανάπτυξη υψηλής θερμοκρασίας κυψέλης καυσίμου PEM με εσωτερική αναμόρφωση αλκοόλης (Advanced Energy Technologies SA, Ελλάδα)	Έναρξη/Διάρκεια 20010/36 μήνες
	Τίτλος: ISH2SUP	Προϋπολογισμός: 1.7 Μ€
	Περιγραφή (Συντονιστής) Ανάπτυξη μεθόδων τροφοδότησης κυψελών καυσίμων για χρήση τους στη κινητή τηλεφωνία (TEKNILLINEN KORKEAKOULU, Φινλανδία)	Έναρξη/Διάρκεια 20010/39 μήνες