ΤΕΙ Κρήτης
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης

Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τμήμα Μηχανολογίας



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κυψέλες καυσίμων (Fuel Cells)



Σουρτζής Βασίλειος

Επιβλέπων καθηγητής: Σαββάκης Κωνσταντίνος

Σεπτέμβριος 2014

Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με το εξαιρετικά ενδιαφέρον αντικείμενο των κυψελών καυσίμων. Οι κυψέλες καυσίμων είναι μια τεχνολογία η οποία βρίσκεται ακόμα στα πρώτα της βήματα όμως αναπτύσσεται με πάρα πολύ γρήγορους ρυθμούς. Η εκπόνηση της εργασίας έγινε με την βοήθεια του διαδικτύου μέσα από συγγράμματα, βιβλία, διδακτορικές διατριβές, ενημερωτικά, πληροφοριακά και εμπορικά sites που υπάρχουν για το αντικείμενο αυτό. Η πρόσβαση σε πολλές πληροφορίες ήταν δύσκολη λόγω του ότι όπως προαναφέρθηκε οι κυψέλες καυσίμων είναι μια νέο-αναπτυσσόμενη τεχνολογία και διατηρείται απόρρητο από τις εταιρίες για την εξέλιξη της τεχνολογίας, την κατοχύρωση ευρεσιτεχνιών κλπ.

Στις ευχαριστίες μου θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον καθηγητή μου κ. Σαββάκη Κωνσταντίνο για την εμπιστοσύνη και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το θέμα αυτό. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την στήριξη τους σε όλη την φοιτητική μου σταδιοδρομία.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή 10
1. Ιστορική εξέλιξη των κυψέλων αέριων καυσίμων 13
2. Τύποι κυψελών καυσίμου 22
   2.1. Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (Alkaline Fuel Cells, AFC) 23
   2.2. Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Eembrane, PEM) 25
   2.3. Κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) 27
   2.4. Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC) 29
   2.5. Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (Phosphoric - Acid Fuel Cells, PAFC) 32
   2.6. Κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης
   2.7. (Direct Methanol Fuel Cells, DMFC) 34
   2.8. Άλλοι τύποι κυψελών καυσίμου 36
3. Μηχανισμός λειτουργίας 38
   3.1. Εισαγωγή 38
   3.2. Δομή κυψέλης καυσίμου 38
   3.3. Αρχή λειτουργίας 44
   3.4. Θερμοδυναμική ανάλυση 46
4. Σύγκριση των κυψέλων αέριων καυσίμων με άλλες πηγές παραγωγής ενέργειας 56
   4.1. Εισαγωγή 56
   4.2. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Συμβατικές Πηγές Ενέργειας (Σ.Π.Ε.) 58
   4.3. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε) 64
5. Εφαρμογές των κυψελών καυσίμων 75
   5.1. Εισαγωγή 75
   5.2. Χρησιμοποίηση της κυψέλης καυσίμου για συμπαραγωγή ενέργειας (Παραγωγή θερμότητας και ενέργειας για ξενοδοχεία, νοσοκομεία και σπίτια) 78
   5.3. Αποκεντρωμένη παραγωγή ισχύος (Έρευνα και ανάπτυξη στη βιομηχανία) 85
   5.4. Εφαρμογές μικρής ισχύος (Φώτα απομακρυσμένων περιοχών, ταμπέλες δρόμων, σταθμοί επικοινωνιών και μετεωρολογικοί σταθμοί) 90
   5.5. Μεταφορές (Διαστημόπλοια, υποβρύχια, τραίνα, λεωφορεία) 94
   5.6. Φορητές συσκευές ισχύος (Φορητά τηλέφωνα, Laptop ,κάμερες και φορητές συσκευές ήχου) 136
Βιβλιογραφία 153

Περιεχόμενα εικόνων

Εισαγωγή 10
Εικόνα 1: Υδρογόνο. 10
Εικόνα 2: Υδρογόνο-Πρωτογενείς πηγές ενέργειας, μετατροπείς ενέργειας και εφαρμογές. 11
Εικόνα 3: Κυψέλες καυσίμων, πιθανά καύσιμα και εφαρμογές. 12

Κεφάλαιο 1 13
Εικόνα 1-1: Christian Friedrich Schönbein 13
Εικόνα 1-2: Sir William Robert Grove 13
Εικόνα 1-3: Σκίτσο της κατασκευής της μπαταρίας αερίων όπως δημοσιεύθηκε στο PHILOSOPHICAL MAGAZINE AND JOURNAL OF SCIENCE 14
Εικόνα 1-4: Παρουσίαση της πρώτης αλκαλικής κυψέλης καυσίμου από τον Thomas Francis Bacon (1959). 15
Εικόνα 1-5: Το τρακτέρ της Allis-Chalmers και ο δημιουργός του Harry Karl Ihrig (1959). 15
Εικόνα 1-6: Οι επιστήμονες Willard Thomas Grubb και Leonard Niedrach. 16
Εικόνα 1-7: Κυψέλη καυσίμου από το Gemini. 17
Εικόνα 1-8: Αλκαλική κυψέλη καυσίμου από το πρόγραμμα Apollo. 17
Εικόνα 1-9: Το electrovan της General Motors και η μοτοσικλέτα της Union Carbide. 18
Εικόνα 1-10: Υβριδικό σύστημα MTG-SOFC 220 kW από έκθεση στο National Fuel Cell Research Center. 20
Εικόνα 1-11: Εφαρμογές απο διάφορους τομείς χρήσης των κυψελών καυσίμου. 20
Εικόνα 1-12: Ιστορική στήλη σημαντικών ιστορικών γεγονότων της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου. 21

Κεφάλαιο 2 22
Εικόνα 2.1-1: Αλκαλική κυψέλη καυσίμου. 23
Εικόνα 2.2-1: PEM κυψέλη καυσίμου. 25
Εικόνα 2.2-2: Τα μέρη και τα υλικά μιας PEM κυψέλης καυσίμου. 26
Εικόνα 2.3-1: Κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος. 27
Εικόνα 2.4-1: Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου. 29
Εικόνα 2.4-2: Τα μέρη μιας επίπεδης και μιας σωληνοειδούς SOFC. 31
Εικόνα 2.5-1: Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος. 32
Εικόνα 2.6-1: Κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης. 34
Πίνακας 2-1:Συγκεντρωτικός πίνακας τύπων κυψελών καυσίμων με τα χαρακτηριστικά τους. 37

Κεφάλαιο 3 38
Εικόνα 3.2-1: Δομή κυψέλης καυσίμου. 38
Εικόνα 3.2-2: Διπολικές πλάκες. 41

Εικόνα 3.2-3: Τεχνολογίες αναμόρφωσης και τα παράγωγα τους. 42
Εικόνα 3.2-4: Επεξεργασία καυσίμου για τους διάφορους τύπους κυψελών καυσίμου. 43
Εικόνα 3.2-5: Ολοκληρωμένα συστήματα. 44
Εικόνα 3.3-1: Όριο τριών φάσεων (Three Phase Boundary, TPB) 45
Εικόνα 3.3-2: Απεικόνιση της δομής μίας συστοιχίας κυψελών καυσίμου επίπεδης γεωμετρίας. 46
Πίνακας 3.4-1: Εξισώσεις Nernst και ιδανικά δυναμικά για τους διάφορους τύπους κυψελών καυσίμου. 48
Διάγραμμα 3.4-1: Διάγραμμα του Tafel για αργές και γρήγορες ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. 49
Διάγραμμα 3.4-2: Ιδανικό και πραγματικό δυναμικό μίας κυψέλης καυσίμου. 52
Διάγραμμα 3.4-3: Εξάρτηση της πυκνότητας ισχύος από το δυναμικό της κυψέλης καυσίμου. 54

Κεφάλαιο 4 56
Πίνακας 4.1-1: Πρωτογενής ενέργεια. 56
Πίνακας 4.1-2: Ενεργειακές μετατροπές – βαθμός απόδοσης. 57
Εικόνα 4.1-1: Μετατροπή ενεργειών. 57
Εικόνα 4.2-1: Σχηματική διάταξη ΑΗΣ. 58
Εικόνα 4.2-2: Σχηματική διάταξη ΘΗΣ. 58
Εικόνα 4.2-3: Μετατροπή θερμικής ενέργειας σε μηχανικό έργο. 59
Εικόνα 4.2-4: Σύστημα συνδυασμένου κύκλου αεριοστρόβιλου-ατμοστρόβιλου. 60
Εικόνα 4.2-5: Σχηματική απεικόνιση Ατμοηλεκτρικού Πυρηνικού Σταθμού. 60
Εικόνα 4.2-6: Εσωτερικό μπαταρίας και σχηματική απεικόνιση διαφόρων μπαταριών. 61
Πίνακας 4.2-1: Συγκεντρωτικός πίνακας συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ενδεικτικοί βαθμοί απόδοσης τους. 63
Εικόνα 4.2-7: Βαθμός απόδοσης διαφόρων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με την ισχύ εξόδου. 63
Εικόνα 4.3-1: Ηλιακός πύργος ισχύος και σχηματική απεικόνιση των μερών του. 65
Εικόνα 4.3-2: Παραβολικά κοίλα κάτοπτρα ισχύος και σχηματική απεικόνιση των μερών τους. 65
Εικόνα 4.3-3: Σύστημα δίσκου /μηχανής. 66
Εικόνα 4.3-4: Ηλιακός πύργος ισχύος και σχηματική απεικόνιση των μερών του. 66
Εικόνα 4.3-5: Ανεμογεννήτριες. 67
Εικόνα 4.3-6: Κάθετη και οριζόντια ανεμογεννήτρια και τα μέρη τους. 67
Εικόνα 4.3-7: Υδροηλεκτρικός σταθμός. 67
Εικόνα 4.3-8: Επί μέρους στάδια παραγωγής βιοντίζελ. 68
Εικόνα 4.3-9: Μονάδα αεριοποίησης. 68
Εικόνα 4.3-10: Χρήση βιοαερίου από βιοαποικοδόμιση. 69
Εικόνα 4.3-11: Γεωθερμικές μονάδες κλειστού και ανοιχτού κύκλου αντίστοιχα. 69
Εικόνα 4.3-12: Σύστημα εκμετάλλευσης των θαλάσσιων κυμάτων. 70
Εικόνα 4.3-13: Σύστημα εκμετάλλευσης της παλίρροιας. 70

Εικόνα 4.3-14: Σύστημα της θερμο-κρασιακής διαφοράς της θάλασσας. 70
Εικόνα 4.3-15: Εικονικό πλάνο για την οικονομία του υδρογόνου. 72
Εικόνα 4.3-16: Ο κύκλος του υδρογόνου από ΑΠΕ. 72
Εικόνα 4.3-17: Τρόποι και στάδια μετατροπής της ενέργειας του ήλιου για παραγωγή υδρογόνου. 73

Κεφάλαιο 5 75
Πίνακας 5.1-1: Ορισμός, τυπική ισχύ, τυπική τεχνολογία και εφαρμογές ανά κατηγορία εφαρμογών. 75
Διάγραμμα 5.1-1: Πωλήσεις και εγκατεστημένα MW ανά εφαρμογή. 76
Διάγραμμα 5.1-2: Πωλήσεις και εγκατεστημένα MW ανά τον κόσμο. 77
Διάγραμμα 5.1-3: Κόστος ($) ανά kW συστημάτων στις μεταφορές. 77
Διάγραμμα 5.1-4:Διακύμανση του κόστους ($) ανά kW συστημάτων μεταφορών την περίοδο 2007-2011. 78
Διάγραμμα 5.1-5: Κόστος ($) ανά kW για την FuelCell Energy. 78
Εικόνα 5.2-1: Εκμετάλλευση της ενέργειας σε συμβατικό, συμπαραγωγής και τρι-παραγωγής σύστημα. 79
Εικόνα 5.2-2: Τυπικό οικιακό σύστημα συμπαραγωγής. 81
Εικόνα 5.2-3: Πρόγραμμα EneFarm. 82
Εικόνα 5.2-4: Πρόγραμμα CALLUX. 83
Εικόνα 5.2-5: Πρόγραμμα ene.field. 84
Διάγραμμα 5.2-1: Σημείο τομής για το ρίσκο εμπορευματοποίησης του διαθέσιμου προϊόντος σε σχέση με το κόστος. 85
Πίνακας 5.2-1: Τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων που θα αναπτυχθούν μέσω του ene.field. 85
Εικόνα 5.3-1:Διαχείρηση και λειτουργία προγραμμάτων έρευνας και ανάπτυξης. 86
Εικόνα 5.3-2: Εγκατεστημένα συστήματα της Bloom Energy. 87
Εικόνα 5.3-3: Εκατεστημένο σύστημα της FuelCell Energy. 88
Εικόνα 5.3-4: Εγκατεστημένα συστήματα της ClearEdge Power. 88
Εικόνα 5.3-5: Εγκατεστημένο σύστημα ClearGen™ 1MW στην Toyota Motor Sales USA, Inc. (TMS). 89
Πίνακας 5.3-1: Εταιρίες κυψελών καυσίμου με συστήματα κύριας ισχύος, micro-CHP, βοηθητικής και απομακρυσμένης ισχύος. 89
Διάγραμμα 5.3-1: Οι δέκα πρώτες εταιρίες προιόντων τεχνολογίας σε εγκατεστημένα MW ισχύος. 90
Εικόνα 5.4-1: H2LT Fuel Cell Mobile Light. 91
Εικόνα 5.4-2: Ρυμουλκούμενος πύργος φωτισμού Ecolite-H2 και φάρος South Gare Lighthouse. 91
Εικόνα 5.4-3: Αρχιτεκτονική κατασκευή London Oasis. 92
Εικόνα 5.4-4: Εφαρμογές κυψελών καυσίμου σε ταμπέλες δρόμων. 92
Εικόνα 5.4-5: Σκίτσο απομακρυσμένου σταθμού τηλεπικοινωνιών. 93
Εικόνα 5.5-1: Συστήματα κίνησης οχημάτων. 95
Διάγραμμα 5.5-1: Αναμενόμενο εύρος χιλιομέτρων και εκπομπές CO2/km διαφόρων τύπων τεχνολογιών κινητήρων και οι στόχοι για το 2050. 96

Εικόνα 5.5-2: Πρωτότυπα μοντέλα αυτοκινήτων κυψελών καυσίμου. 97
Εικόνα 5.5-3: Αυτοκίνητο κυψελών καυσίμου της Toyota που προορίζεται για την γραμμή παραγωγής το 2015. 98
Εικόνα 5.5-4: Αυτοκίνητο κυψελών καυσίμου της Daimler (Mercedes-Benz) που προορίζεται για την γραμμή παραγωγής το 2014. 99
Εικόνα 5.5-5: Αυτοκίνητο κυψελών καυσίμου της Ford που προορίζεται για την γραμμή παραγωγής το 2020. 100
Εικόνα 5.5-6: Αυτοκίνητο κυψελών καυσίμου της Nissan που προορίζεται για την γραμμή παραγωγής το 2016. 100
Εικόνα 5.5-7: Αυτοκίνητο κυψελών καυσίμου της Chevrolet που προορίζεται για την γραμμή παραγωγής το 2015. 101
Εικόνα 5.5-8: Αυτοκίνητο κυψελών καυσίμου της Honda που προορίζεται για την γραμμή παραγωγής το 2015. 101
Εικόνα 5.5-9: Αυτοκίνητο κυψελών καυσίμου της Hyundai που προορίζεται για την γραμμή παραγωγής το 2015. 102
Εικόνα 5.5-10: Τυπική διάταξη συστήματος λεωφορείου κυψελών καυσίμου. 103
Εικόνα 5.5-11: Λεωφορείο κυψελών καυσίμου της CT Transit. 107
Εικόνα 5.5-12: Λεωφορείο κυψελών καυσίμου της Wrightbus στους δρόμους του Λονδίνου. 108
Εικόνα 5.5-13: Συστήματα κυψελών καυσίμου για λεωφορεία. 108
Εικόνα 5.5-14: Λεωφορείο κυψελών καυσίμου της Daimler. 109
Εικόνα 5.5-15: Φουτουριστικό σκίτσο λεωφορείου κυψελών καυσίμου της Proterra. 109
Εικόνα 5.5-16: Λεωφορείο κυψελών καυσίμου της Tata Motors. 110
Εικόνα 5.5-17: Τρένο κυψελών καυσίμου της Railway. 112
Εικόνα 5.5-18: Τραμ της FEVE και το σύστημα της κυψέλης καυσίμου του αναλυτικά. 112
Εικόνα 5.5-19: Σχέδιο του τραμ της FEVE όπου φαίνονται τα επί μέρους συστήματα και η θέση τους. 113
Εικόνα 5.5-20: Τρένο κυψέλων καυσίμου BNFS1205. 113
Εικόνα 5.5-21: Τα επί μέρους συστήματα του τρένου BNFS1205 . 114
Εικόνα 5.5-22: Τρένο κυψελών καυσίμου στην Κίνα. 114
Εικόνα 5.5-23: APFCT Σκούτερ κυψελών καυσίμου. 115
Εικόνα 5.5-24: Μοτοσικλέτες κυψελών καυσίμου ENV και Crosscage. 115
Εικόνα 5.5-25: Σκούτερ κυψελών καυσίμου της Suzuki. 116
Εικόνα 5.5-26: Το σκούτερ FC-me της Yamaha. 116
Πίνακας 5.5-1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του FC-AQEL. 117
Εικόνα 5.5-27: Το σκούτερ FC-AQEL της Yamaha. 117
Εικόνα 5.5-28: Σκούτερ κυψελών καυσίμου της Honda. 117
Εικόνα 5.5-29: Το ποδήλατο ACTIVE. 118
Εικόνα 5.5-30: Το ποδήλατο Iwatani. 118
Πίνακας 5.5-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά του ποδήλατου Iwatani. 118
Εικόνα 5.5-31: Το ποδήλατο Gitane και ο τρόπος τοποθέτησης κασέτας ανεφοδιασμού καυσίμου. 119

Εικόνα 5.5-32: Παραδείγματα οχημάτων χειρισμού υλικών κυψελών καυσίμου. 119
Εικόνα 5.5-33: Εταιρίες - κυψελών καυσίμου, ολοκληρωμένων συστημάτων, οχημάτων χειρισμού υλικών και ιδιοκτήτες οχημάτων. 120
Εικόνα 5.5-34: Συστήματα GenDrive για όλους τους τύπους περονοφόρων οχημάτων. 121
Πίνακας 5.5-3: Εμπορικός διαθέσιμα συστήματα κυψελών καυσίμου οχημάτων χειρισμού υλικών. 121
Εικόνα 5.5-35: Σταθμός ανεφοδιασμού της Nuvera. 121
Εικόνα 5.5-36: Περονοφόρο κυψελών καυσίμου της Toyota στην έκθεση 2014 Kobe Eco & Safety. 122
Εικόνα 5.5-37: Εγκατεστημένο σύστημα GenDrive στο εργοστάσιο της Raymond. 122
Εικόνα 5.5-38: Τυπική διάταξη συστήματος κυψελών καυσίμου για περονοφόρο όχημα. 123
Εικόνα 5.5-39: Top 10 εταιριών με τα περισσότερα περονοφόρα κυψελών καυσίμου. 126
Εικόνα 5.5-40: Σταθμός ανεφοδιασμού της Air Liquide σε αποθήκες του ΙΚΕΑ. 126
Εικόνα 5.5-41: Λογότυπο του έργου HyLIFT. 126
Εικόνα 5.5-42: Το όχημα ZERO-TT. 127
Εικόνα 5.5-43: Τα οχήματα της STILL με φόντο το σταθμό ανεφοδιασμού της Linde. 127
Εικόνα 5.5-44: Γκάμα οχημάτων κυψελών καυσίμου της STILL. 128
Εικόνα 5.5-45: Αεροπλάνο κυψελών καυσίμου της Boeing. 128
Εικόνα 5.5-46: Τα επιμέρους εξαρτήματα του συστήματος του αεροπλάνου και η θέση τους. 129
Εικόνα 5.5-47: Μη επανδρωμένο αεροπλάνο της NASA με σύστημα κυψελών καυσίμου της Horizon και το σύστημα AEROPAK σε κομμάτια με μια ενδεικτική θέση τοποθέτησης. 129
Εικόνα 5.5-48: Ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός (ISS). 130
Εικόνα 5.5-49: Μη επανδρωμένο διαστημικό όχημα σχεδιασμένο για πτήσεις στον ΑΡΗ. 130
Εικόνα 5.5-50:Ο ι θέσεις τοποθέτησης κυψελών καυσίμου σε Διαστημικό λεωφορείο της NASA. 131
Εικόνα 5.5-51: Το πλοίο Elding. 132
Εικόνα 5.5-52: κυψέλη καυσίμου PM Basic A 50 maritime 132
Εικόνα 5.5-53: Το τουριστικό πλοίο Alsterwasser. 132
Εικόνα 5.5-54: Οι θέσεις τοποθέτησης των επιμέρους συστημάτων του Alsterwasser. 133
Εικόνα 5.5-55: Το πλοίο Nemo H2. 133
Εικόνα 5.5-56: Χάρτης με τα κυριότερα έργα κυψελών καυσίμου για σκάφη. 133
Εικόνα 5.5-57: Το υποβρύχιο U212A και οι θέσεις των επιμέρους συστημάτων του. 134
Εικόνα 5.5-58: Το υποβρύχιο Dolphin Class. 135
Εικόνα 5.6-1: Φορητές εφαρμογές. 136
Εικόνα 5.6-2: Κατασκευαστές συστημάτων ανά κατηγορία φορητών εφαρμογών. 137

Εικόνα 5.6-3: Εκπαιδευτικά κιτ και παιχνίδια από την Horizon. 138
Εικόνα 5.6-4: Τηλεκατευθυνόμενο αμαξάκι της Horizon και τα χαρακτηριστικά του. 138
Εικόνα 5.6-5: Εκπαιδευτικά κιτ Fuel Cell 10 και Fuel Cell X7 από την Thames & Kosmos. 139
Εικόνα 5.6-6: Εκπαιδευτικό κιτ από την Pro Power και τα χαρακτηριστικά του. 139
Εικόνα 5.6-7: Εμπορικός διαθέσιμα δοχεία μεθανόλης από την SFC και τα χαρακτηριστικά τους. 140
Εικόνα 5.6-8: Το σύστημα EFOY COMFORT και τα τεχνικά του χαρακτηριστικά. 140
Εικόνα 5.6-9: Η σειρά συστημάτων EFOY Pro και τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά. 141
Εικόνα 5.6-10: Το σύστημα HYDROPAK με δοχεία ανεφοδιασμού και τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά. 142
Εικόνα 5.6-11: Εμπορικός διαθέσιμα συστήματα της Hymera (14V, 110V και 230V αντίστοιχα) και η φιάλη ανεφοδιασμού 54-ZH. 142
Εικόνα 5.6-12: Τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος Hymera. 143
Εικόνα 5.6-13: Στρατιωτική φορητή γεννήτρια XX55. 143
Εικόνα 5.6-14: Στρατιωτική φορητή γεννήτρια JENNY. 143
Εικόνα 5.6-15: Στρατιωτική φορητή γεννήτρια EMILY. 143
Εικόνα 5.6-16: mp3της Toshiba. 144
Εικόνα 5.6-17: Κινητό τηλέφωνο της Motorola. 144
Εικόνα 5.6-18: Συστήματα κυψελών καυσίμου της Antig και της Samsung ενσωματωμένα σε laptop. 144
Εικόνα 5.6-19: Φορητός φορτιστής MiniPak της Horizon. 145
Εικόνα 5.6-20: Ο MiniPak με το πρόσθετο εξάρτημα φακού και τα τεχνικά του χαρακτηριστικά. 146
Εικόνα 5.6-21: Το φυσίγγιο καυσίμου HYDROSTIK της Horizon και τα τεχνικά του χαρακτηριστικά. 146
Εικόνα 5.6-22: Σταθμός ανεφοδιασμού HYDROFILL της Horizon και τα τεχνικά του χαρακτηριστικά. 147
Εικόνα 5.6-23: Ενδεικτικές τιμές του συστήματος της Horizon. 147
Εικόνα 5.6-24: Φορητός φορτιστής POWERTREKK 147
Εικόνα 5.6-25: POWERTREKK. 148
Εικόνα 5.6-26: Το νέο μοντέλο POWERTREKK 2.0 και τα χαρακτηριστικά του. 148
Εικόνα 5.6-27: Τρόπος λειτουργίας του POWERTREKK. 148
Εικόνα 5.6-28: Ενδεικτικές τιμές του συστήματος POWERTREKK. 149
Εικόνα 5.6-29: Διαφημιστικό λογότυπο του POWERTREKK. 149
Εικόνα 5.6-30: Ο φορητός φορτιστής AF-M3000 της Aquafairy. 149
Εικόνα 5.6-31: Τεχνικά χαρακτηριστικά του AF-M300 και σχηματική εικόνα του. 150
Εικόνα 5.6-32: Ο φορητός φορτιστής Nectar. 151
Εικόνα 5.6-33: Ο φορητός φορτιστής της Ezelleron. 151
Εικόνα 5.6-34: Ο φορτιστής PowerPlay™ 151
Εικόνα 5.6-35: Ο φορητός φορτιστής UPP. 152

Εισαγωγή

Η ενέργεια αποτελεί τον βασικότερο παράγοντα της σύγχρονης κοινωνίας και οικονομίας. Τόσο η εργασία και η ψυχαγωγία όσο και η εν γένει οικονομική και κοινωνική ευημερία εξαρτώνται από την αδιάλειπτη παροχή ενέργειας. Μέχρι σήμερα η ενέργεια αυτή προερχόταν κατά κύριο λόγο από φυσικές πηγές ενέργειας τα λεγόμενα ορυκτά καύσιμα όπως το κάρβουνο, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Τα ορυκτά καύσιμα δεν είναι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας γιατί χρειάζονται εκατομμύρια χρόνια για να σχηματιστούν και έτσι εξαντλούνται με πολύ ταχύτερο ρυθμό από τον ρυθμό με τον οποίο σχηματίζονται και ενώ η ενεργειακή ζήτηση αυξάνεται σταθερά, χρόνο με το χρόνο, οι παραδοσιακές φυσικές πηγές ενέργειας είναι τελικά περιορισμένες και το κενό μεταξύ της αυξανόμενης ζήτησης και της μειούμενης προσφοράς θα πρέπει να καλυφθεί από εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Η συνεχή λοιπόν αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με την επιβάρυνση του περιβάλλοντος από αέρια του θερμοκηπίου που εκλύονται από τις υπάρχουσες μεθόδους παραγωγής ενέργειας οδηγούν στην αναζήτηση νέων τρόπων παραγωγής ενέργειας, κάτι που οι επιστήμονες αναζητούν εδώ και αρκετά χρόνια.

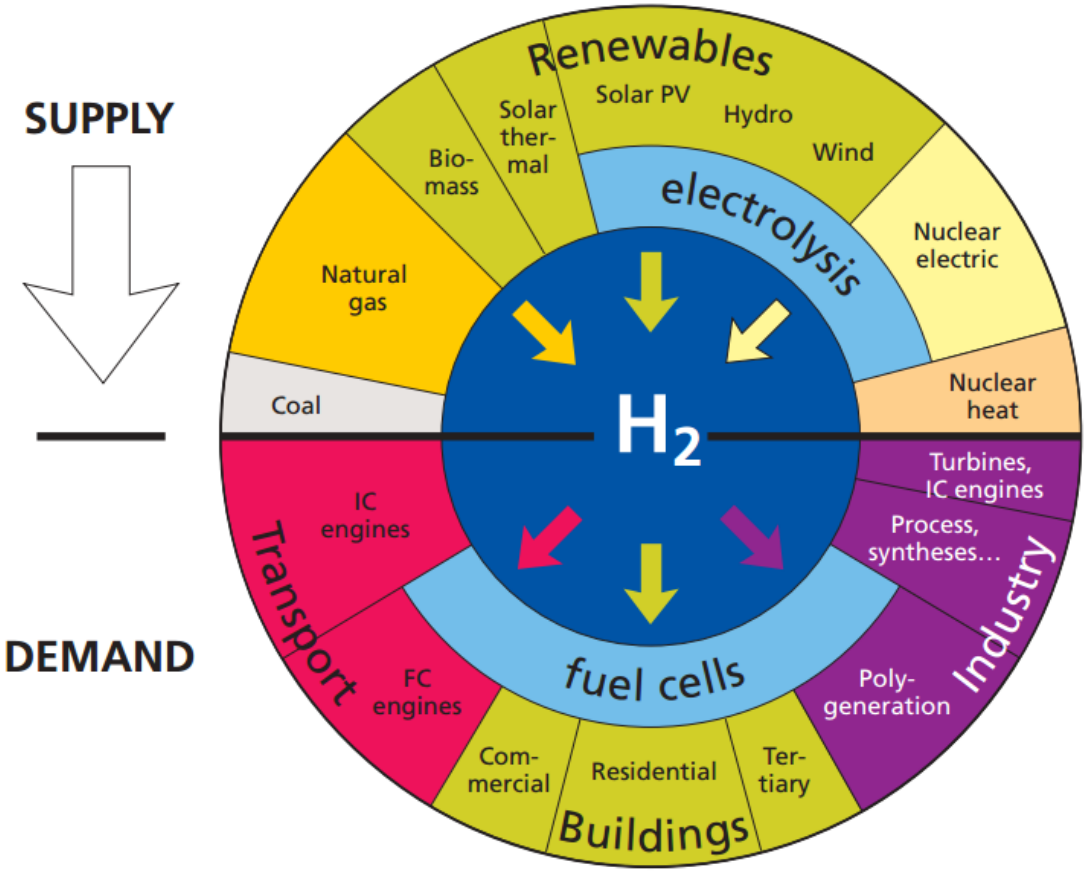
Αρχικά την λύση την εντόπισαν στην πυρηνική ενέργεια. Το πρόβλημα όμως των πυρηνικών αποβλήτων και οι φρικτές εμπειρίες από διαρροή ραδιενέργειας απώθησαν αυτή την πηγή ενέργειας ως προοπτική για το μέλλον. Έπειτα δοκιμάστηκαν οι ήπιες μορφές ενέργειας. Η ηλιακή, η αιολική, η γεωθερμική, τα κύματα, όλες υγιείς, καθαρές, αλλά και μη επαρκείς για να καλύψουν την ενεργειακή δίψα του πλανήτη, ιδίως όσον αφορά τα καύσιμα μετακίνησης. Τα τελευταία χρόνια, επιστήμονες, κυβερνήσεις, περιβαλλοντολόγοι και εταιρείες εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων ομοφωνούν ότι το υδρογόνο είναι μια λύση μακράς πνοής.

Το υδρογόνο (H_2) αποτελεί το 75% του σύμπαντος και είναι το ελαφρύτερο αέριο στην φύση. Η ονομασία του υδρογόνου δεν είναι τυχαία. Όταν ο Χένρι Κάβεντις (Henry Cavendish) αναγνώρισε πρώτος ότι το αέριο υδρογόνο είναι μια διακριτή χημική ουσία και ότι παρήγαγε νερό όταν καίγονταν το ονόμασε «υδρογόνο», συνενώνοντας τις ελληνικές λέξεις «ὕδωρ» και «γεννῶ». Η χημική ένωση αυτού του στοιχείου με το οξυγόνο (H_2O), γεννάει την πηγή της ζωής, το νερό. Υπό ειδικές συνθήκες όμως γεννάει και ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτή η λιγότερο γνωστή ιδιότητά του δημιουργεί την ελπίδα για ένα ενεργειακά αστείρευτο μέλλον.



Εικόνα 1: Υδρογόνο.

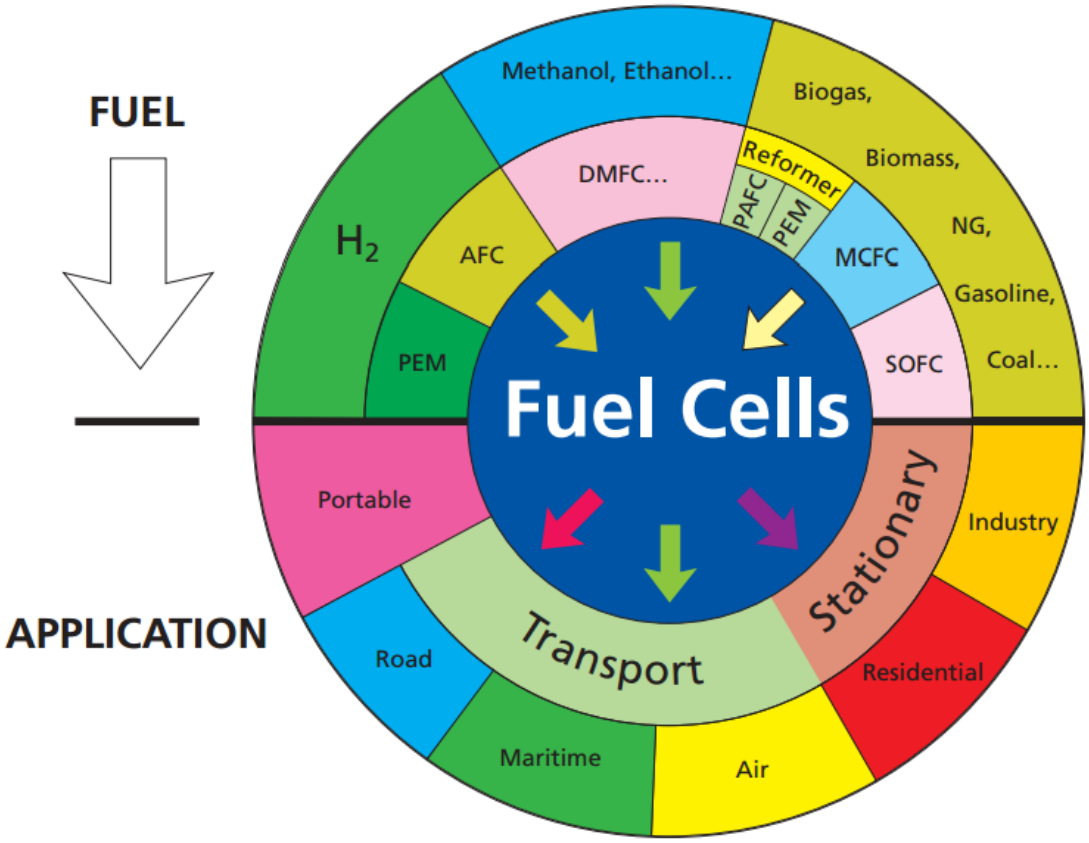
Το υδρογόνο παράγεται από ορυκτούς πόρους όπως είναι ο άνθρακας (με δέσμευση CO_2) και το φυσικό αέριο, παράγεται επίσης με ηλεκτρόλυση του νερού η οποία μπορεί να προέλθει από πυρηνική ενέργεια ή από ανανεώσιμες πηγές όπως η αιολική, η ηλιακή, η γεωθερμική και υδροηλεκτρική ενέργεια. Αυτή ακριβώς η ποικιλία των πηγών προμήθειας του υδρογόνου είναι και ο σημαντικότερος λόγος που το υδρογόνο προδιαγράφει ένα πολλά υποσχόμενο μέλλον. Στην εικόνα 2 απεικονίζονται οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υδρογόνου, οι τρόποι μετατροπής και εφαρμογής του.



Εικόνα 2: Υδρογόνο-Πρωτογενείς πηγές ενέργειας, μετατροπείς ενέργειας και εφαρμογές.

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα το μυστικό της αποδοτικότερης εκμετάλλευσης του υδρογόνου κρύβεται στα ηλεκτροπαραγωγά στοιχεία χημικής αντίδρασης, τα fuel cells, γνωστά και ως «κυψέλες καυσίμου». Οι κυψέλες καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές συσκευές που μετατρέπουν την ελεύθερη χημική ενέργεια μιας αντίδρασης απ' ευθείας σε ηλεκτρική. Η βασική δομή μίας κυψέλης καυσίμου αποτελείται από έναν ηλεκτρολύτη, υγρό ή στερεό, σε επαφή με δύο πορώδη ηλεκτρόδια τα οποία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με εξωτερικό ηλεκτρόδιο. Σε αυτά τα ηλεκτρόδια τροφοδοτούνται αέρια έτσι ώστε να πραγματοποιείται αντίδραση οξείδωσης στο ανοδικό ηλεκτρόδιο και αντίδραση αναγωγής στο καθοδικό ηλεκτρόδιο. Από τις δύο αυτές ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στα ηλεκτρόδια παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο καταναλώνεται στο εξωτερικό κύκλωμα.

Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν μια σημαντική τεχνολογία για την οικονομία του υδρογόνου και έχουν τη δυναμική να φέρουν την επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο τροφοδοτούμε με ενέργεια τα έθνη μας, προσφέροντας πιο καθαρές και αποδοτικές εναλλακτικές λύσεις από την καύση βενζίνης και άλλων ορυκτών πόρων. Οι κυψέλες καυσίμων μπορούν να αντικαταστήσουν τις μηχανές εσωτερικής καύσης στα οχήματα και να παρέχουν ενέργεια σε σταθερές και κινητές εφαρμογές, κινητά τηλέφωνα και φορητοί υπολογιστές, όσο και σε μεγάλες φορητές συσκευές όπως τα αυτοκίνητα, τα φορτηγά, ή τα πλοία. Ακόμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θέρμανση και παροχή ενέργειας για οικιακή ή βιομηχανική χρήση. Στην εικόνα 3 απεικονίζονται τα πιθανά καύσιμα, οι τύποι και οι εφαρμογές των κυψελών καυσίμου.



Εικόνα 3**:** Κυψέλες καυσίμων, πιθανά καύσιμα και εφαρμογές.

Τα Fuel Cells χρησιμοποιούνται εδώ και αρκετά χρόνια σε πολλές εφαρμογές. Παρά το ότι δείχνουν σχετικά νέα τεχνολογία στην πραγματικότητα η ιστορία τους έχει καλύψει σχεδόν δύο αιώνες. Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να παρουσιάσει την εξέλιξη των κυψελών καυσίμου σε όλη την πορεία της ιστορίας τους, να τις συγκρίνει με άλλες πηγές παραγωγής ενέργειας και τέλος να παρουσιάσει τις εφαρμογές τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Ιστορική εξέλιξη των κυψέλων αέριων καυσίμων.

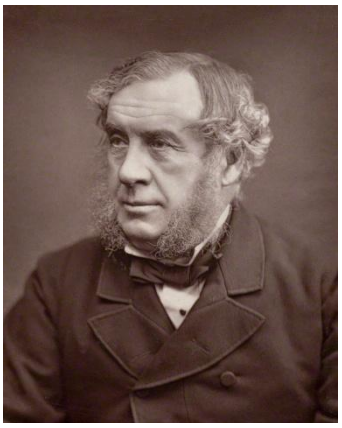
Η ιστορία των κυψελών καυσίμου ξεκινάει από τις αρχές του 19ου αιώνα. Το 1802 ο Άγγλος χημικός Sir Humphrey Davy (17 Δεκεμβρίου 1778 – 29 Μαΐου 1829) είχε κάνει αναφορές σχετικά με το φαινόμενο των κυψελών καυσίμου τις οποίες όμως δεν μπόρεσε να τεκμηριώσει και έτσι αγνοήθηκαν από την επιστημονική κοινότητα.



Εικόνα 1-1: Christian Friedrich Schönbein

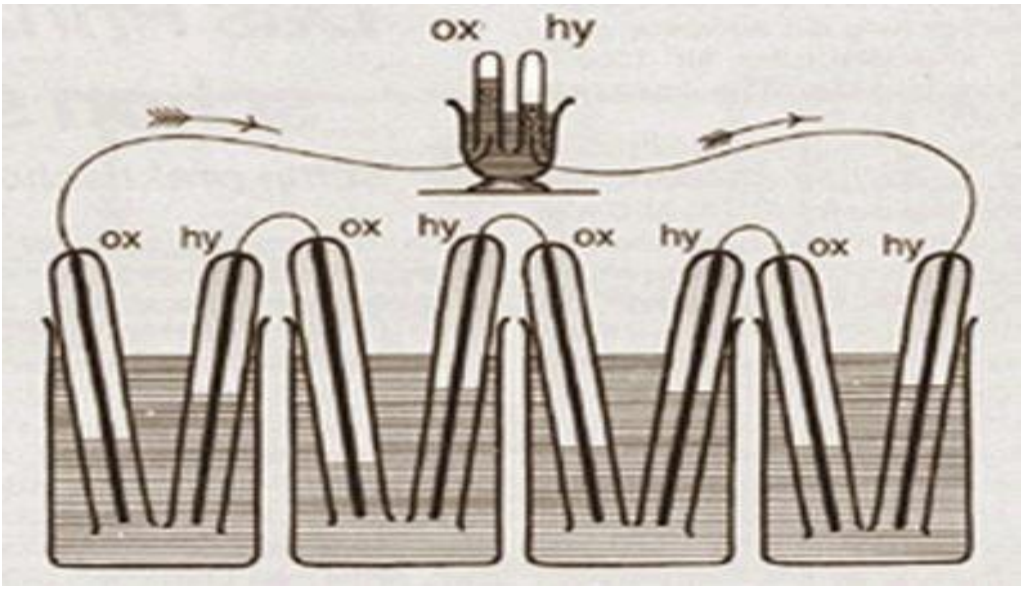
Το 1838 ο Γερμανοελβετός χημικός Christian Friedrich Schönbein (18 Οκτωβρίου 1799 – 29 Αυγούστου 1868) φαίνεται να είχε ανακαλύψει την αρχή λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου και τον Ιανουάριο του 1839 ο Schönbein δημοσίευσε ένα άρθρο του στο επιστημονικό περιοδικό PHILOSOPHICAL MAGAZINE AND JOURNAL OF SCIENCE στο όποιο παρουσιαζόταν η ιδέα στην οποία στηρίζονται οι κυψέλες καυσίμου.

Την ίδια όμως περίοδο ο Sir William Robert Grove (11 Ιουλίου 1811 – 1 Αυγούστου 1896), Άγγλος δικηγόρος και φυσικός επιστήμονας έκανε πειράματα πάνω στο ίδιο θέμα και φαίνεται πως κι αυτός είχε κάνει την ανακάλυψη του σχετικά με την κυψέλη καυσίμου. Έτσι ένα μήνα μετά ήρθε να επιβεβαιώσει τον Schönbein δημοσιεύοντας στο ίδιο επιστημονικό περιοδικό τον Φεβρουάριο του 1839 κάποια πειράματα που έκανε σε μια πρώιμη κατασκευή της κυψέλης καυσίμου και τα αποτελέσματα τους.



Εικόνα 1-2: Sir William Robert Grove

Την μετέπειτα περίοδο ο Schönbein και ο Grove αλληλογραφούσαν σε ένα κλήμα συνεργασίας εξελίσσοντας αυτή την εφεύρεση. Έτσι το Δεκέμβριο του 1842 ο Grove παρουσίασε μια ολοκληρωμένη εργασία την οποία δημοσίευσε στο επιστημονικό περιοδικό (PHILOSOPHICAL MAGAZINE AND JOURNAL OF SCIENCE) με σκίτσα της κατασκευής και με όλα τα στάδια του πειράματος αναλυτικά. Η εργασία αυτή παρουσίαζε στην ουσία την πρώτη κατασκευασμένη κυψέλη καυσίμου την οποία ο Grove είχε ονομάσει `` Gas Voltaic Battery-βολταϊκή μπαταρία αερίων ´´. Η συσκευή αυτή είχε ως εξής: Δύο λωρίδες λευκόχρυσου ήταν τοποθετημένες σε χωριστές σφραγισμένες φιάλες οι οποίες περιείχαν υδρογόνο και οξυγόνο αντίστοιχα. Όταν τα δοχεία ήταν βυθισμένα σε αραιό θειικό οξύ, ένα ηλεκτρικό ρεύμα έρεε ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια και στις φιάλες αερίου παραγόταν νερό. Προκειμένου να αυξηθεί η παραχθείσα τάση, ο Grove συνέδεσε αρκετές από αυτές τις συσκευές σε σειρά (εικόνα 1-3).



Εικόνα 1-3: Σκίτσο της κατασκευής της μπαταρίας αερίων όπως δημοσιεύθηκε στο PHILOSOPHICAL MAGAZINE AND JOURNAL OF SCIENCE

Τον όρο κυψέλη καυσίμου επινόησαν δύο ερευνητές χημικοί, ο Ludwig Mond και ο Charles Langer το 1889, καθώς κατασκεύαζαν μια πιο πρακτική συσκευή κυψέλης καυσίμου. Ο Mond και ο Langer ανέπτυξαν μια πορώδης δομή ηλεκτροδίου ώστε να αυξηθεί η επιφάνεια του. Παρατήρησαν ότι αν τα αντιδραστήρια αέρια διοχετευόταν στον ηλεκτρολύτη μειωνόταν η αποδοτικότητα του. Επίσης χρησιμοποίησαν ως καύσιμο αέριες ενώσεις του άνθρακα και ως οξειδωτικό ατμοσφαιρικό αέρα. Προσδιόρισαν περαιτέρω την δυνατότητα να αυξηθεί η παραγωγή ρεύματος από την κυψέλη καυσίμου με "στοίβαξη" κυψελών και μέσω συλλέκτη των αερίων αντιδραστηρίων στην στοίβα.

Το 1893, ο Friedrich Wilhelm Ostwald (2 Σεπτεμβρίου 1853 - 4 Απριλίου 1932) Γερμανός χημικός, ανέπτυξε το θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση της λειτουργίας της «μπαταρίας αερίων» του Grove και πειραματικά επεξήγησε την λειτουργία των διαφόρων τμημάτων που την απαρτίζουν. Το 1894, ο Ostwald πρότεινε μια διαδικασία συνδυασμού άνθρακα και οξυγόνου. Η πραγματοποίηση αυτής της ιδέας όμως απέτυχε, εξ' αιτίας των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας (της τάξης των 1000 °C) και των προβλημάτων που δημιουργήθηκαν, όσον αφορά την αντοχή και την ομαλή συμπεριφορά των υλικών σε αυτές τις θερμοκρασίες.

Από τότε και μετά, οι ερευνητικές προσπάθειες εστιάστηκαν στην αντίδραση υδρογόνου – οξυγόνου, η οποία μπορούσε να ελεγχθεί ευκολότερα. Επιστήμονες και μηχανικοί σύντομα κατάλαβαν ότι θα έπρεπε να ξεπεραστούν πολλά εμπόδια, ώστε αυτή η νέα τεχνολογία να είναι εμπορικά διαθέσιμη. Όμως μέχρι το τέλος του 19ου αιώνα, ο κινητήρας εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ) ήταν στο επίκεντρο και η εκτεταμένη εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων απομάκρυνε το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας από τις κυψέλες καυσίμου.

Το επόμενο μεγάλο κεφάλαιο στην ιστορία των κυψελών καυσίμου γράφτηκε από τον μηχανικό, Δρ Thomas Francis Bacon (21 Δεκεμβρίου 1904- 24 Μαΐου 1992), στο Πανεπιστήμιο του Cambridge της Αγγλίας. Το 1932, ο Bacon επανέφερε στο προσκήνιο την κυψέλη που είχαν αναπτύξει οι Mond και Langer, εφαρμόζοντας διάφορες τροποποιήσεις στο αρχικό σχέδιο. Αυτές συμπεριλάμβαναν την αντικατάσταση των ηλεκτροδίων πλατίνας με ηλεκτρόδια νικελίου που είναι λιγότερο δαπανηρά. Επίσης, αντικατέστησε τους ηλεκτρολύτες θειικού οξέως με αλκαλικό

υδροξείδιο του καλίου, μια ουσία λιγότερο διαβρωτική για τα ηλεκτρόδια και τέλος στη συσκευή του Bacon τα αέρια καύσιμο-οξειδωτικό μέσο, (υδρογόνο-οξυγόνο) βρίσκονταν υπό πίεση. Αυτή η συσκευή ονομάστηκε «Κυψέλη Bacon» και στην ουσία ήταν η πρώτη αλκαλική κυψέλη καυσίμου (Alkaline Fuel Cells, AFC). Μέτα από αρκετά χρόνια έρευνας και εφαρμογών το 1959, ο Bacon μαζί με τους συνεργάτες του κατάφεραν να δημιουργήσουν μια πραγματικά λειτουργική κυψέλη καυσίμου, ισχύος 6 kW.



Εικόνα 1-4: Παρουσίαση της πρώτης αλκαλικής κυψέλης καυσίμου από τον Thomas Francis Bacon (1959).

Αυτό οδήγησε και τον μηχανικό Harry Karl Ihrig, τον Οκτώβριο του 1959 να κατασκευάσει το πρώτο όχημα κυψελών καυσίμου το οποίο ήταν ένα τρακτέρ της Allis-Chalmers (εικόνα 1-5). Στο όχημα αυτό είχε τοποθετήσει μια τροποποιημένη «Κυψέλη Bacon» η οποία απαρτιζόταν από μια "στοίβα" 1.008 μεμονωμένων κυψελών και απέδιδε ισχύς 20 ίππων~(15kW).



Εικόνα 1-5: Το τρακτέρ της Allis-Chalmers και ο δημιουργός του Harry Karl Ihrig (1959).

Όσο ο Bacon εξέλισσε την αλκαλική κυψέλη καυσίμου ένας άλλος επιστήμονας χημικός ο Willard Thomas Grubb ο οποίος εργαζόταν για την εταιρία

General Electric (GE), το 1955 δημιούργησε έναν νέο είδος κυψέλης καυσίμου την λεγόμενη "κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων" (proton exchange membrane, PEM) χρησιμοποιώντας μια μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων από θειωμένο πολυστυρένιο ως ηλεκτρολύτη. Τρία χρόνια αργότερα ένας άλλος χημικός της General Electric, ο Leonard Niedrach εξέλιξε αυτή την μεμβράνη επινοώντας έναν τρόπο εναπόθεσης λευκόχρυσου επί της μεμβράνης. Οι βελτιώσεις που έγιναν χάρη στις συνδυασμένες προσπάθειες των Grubb και Niedrach δημιούργησαν τελικά την κυψέλη καυσίμου γνωστή ως "Grubb-Niedrach fuel cell".

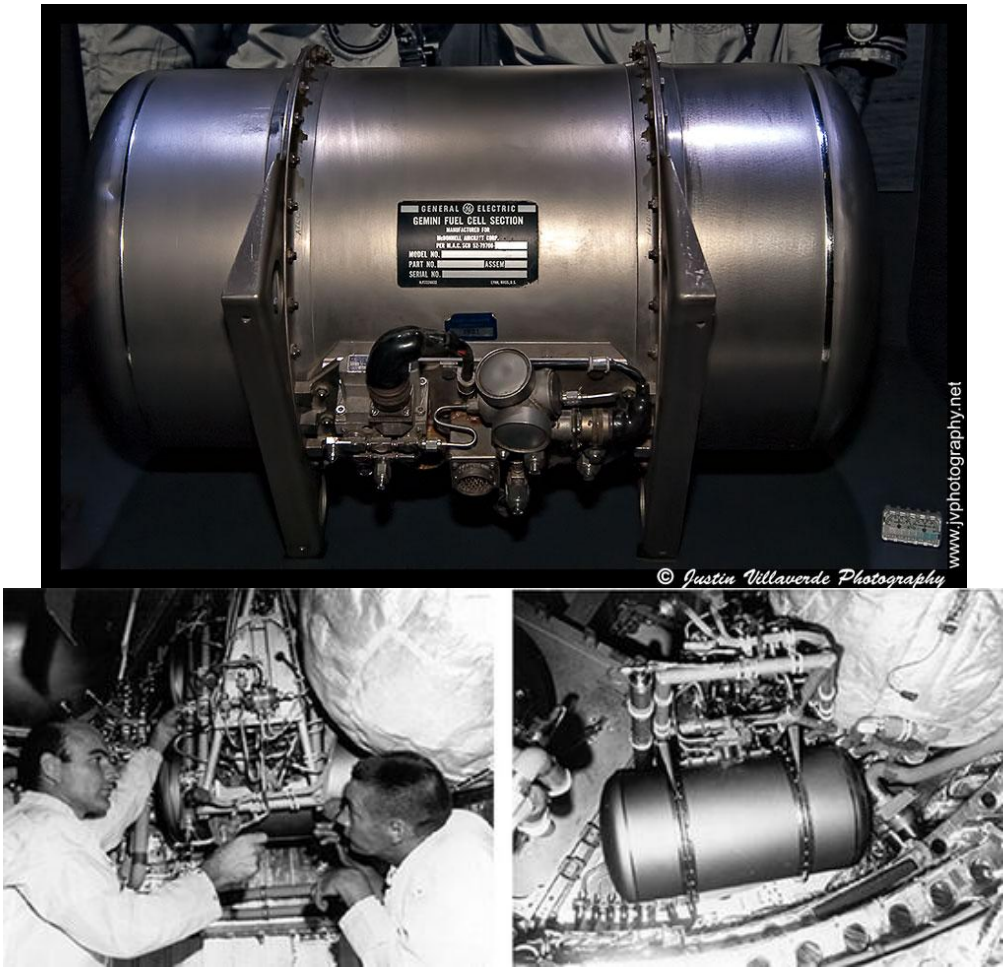


Εικόνα 1-6: Οι επιστήμονες Willard Thomas Grubb και Leonard Niedrach.

Το 1960 δύο Ολλανδοί επιστήμονες ο G. H. J. Broers και ο J. A. A. Ketelaar οι οποίοι έκαναν πειράματα σε μια κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC), ανέφεραν την επιτυχή συνεχή λειτουργία μιας συσκευής MCFC για 6 μήνες. Την τεχνολογία αυτή την είχε αναπτύξει ο Emil Baur το 1921 στην Ελβετία χρησιμοποιώντας ως ηλεκτρολύτη τηγμένα άλατα, από τότε όμως η τεχνολογία αυτή δεν είχε σημειώσει σημαντική πρόοδος παραμένοντας έτσι στο παρασκήνιο. Την ίδια περίπου περίοδο επανήλθε στο προσκήνιο ακόμη ένας τύπος κυψέλης καυσίμου ο οποίος είχε παραμείνει σε μια αδρανή κατάσταση για αρκετά χρόνια. Αυτός ήταν η κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (solid oxide fuel cells, SOFC) μια τεχνολογία την οποία είχαν εξελίξει στα τέλη της δεκαετίας του 1930 ο Ελβετός επιστήμονας Emil Baur και ο συνάδελφος του H. Peris κάνοντας πειράματα με στερεούς ηλεκτρολύτες και χρησιμοποιώντας υλικά όπως το ζιρκόνιο (Zr), το λανθάνιο (La) και το ύττριο (Y). Το 1962 οι επιστήμονες της εταιρίας Westinghouse Electric Corporation (τώρα Siemens Westinghouse) επαναφέρουν αυτήν την τεχνολογία κάνοντας επίδειξη της πρώτης πρακτικής κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου.

Το ενδιαφέρον για την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου κορυφώθηκε όταν η Εθνική Υπηρεσία Αεροναυτικής και Διαστήματος (NASA), στις αρχές της δεκαετίας του 1960 αποφάσισε να χρησιμοποιήσει την τεχνολογία αυτή στις διαστημικές της αποστολές, χρηματοδοτώντας έτσι πολλά ερευνητικά προγράμματα. Η συμβολή της αυτή την έθεσε ως σταθμό στην ιστορική εξέλιξη των κυψελών καύσιμου. Η NASA αρχικά συνεργάστηκε με την General Electric αναπτύσσοντας

την κυψέλη "Grubb-Niedrach" την οποία χρησιμοποίησε στο διαστημικό πρόγραμμα Gemini. Αυτή ήταν και η πρώτη εμπορική χρήση των κυψελών καυσίμου.



Εικόνα 1-7: Κυψέλη καυσίμου από το Gemini.

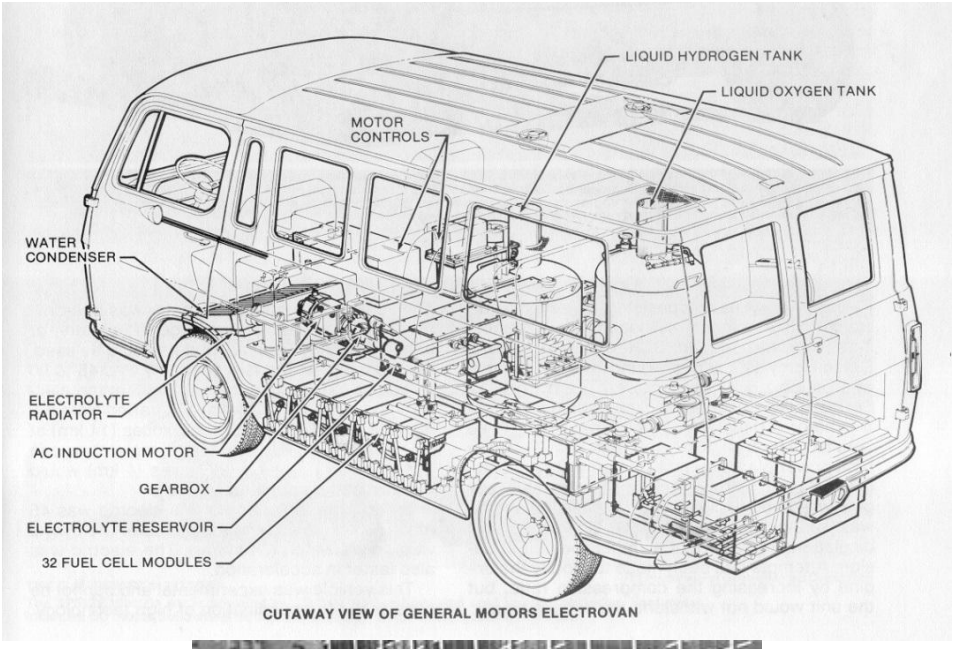
Συνεχίζοντας τις ερευνητικές της προσπάθειες η NASA στα μέσα της δεκαετίας του 60 συνεργάστηκε με μια ακόμα εταιρία την Pratt & Whitney η οποία με βάση την ευρεσιτεχνία του Bacon ανέπτυξε μια αλκαλική κυψέλη καυσίμου η οποία χρησιμοποιήθηκε στο διαστημικό πρόγραμμα Apollo.



Εικόνα 1-8: Αλκαλική κυψέλη καυσίμου από το πρόγραμμα Apollo.

Την τάση που δημιούργησε η NASA προς την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου και την χρησιμοποίηση της σε πρακτικές εφαρμογές αποφάσισε να ακολουθήσει και μια εταιρία παραγωγής οχημάτων η General Motors (GM) και το 1966 κατασκεύασε ένα πειραματικό όχημα, ένα βαν, το οποίο είχε την ονομασία GM electrovan και βασιζόταν στο GMC Handivan που κυκλοφορούσε εκείνη την εποχή. Το βαν αυτό ήταν το πρώτο επιβατικό ηλεκτροκίνητο όχημα που χρησιμοποιούσε κυψέλες καυσίμου για την κίνηση του. Επικεφαλής της κατασκευής ήταν ο Dr. Craig Marks όπου με τη βοήθεια των συνεργατών του τοποθέτησαν στο όχημα αυτό μια

συστοιχία από 32 κυψέλες καυσίμου τύπου PEM κατασκευασμένες από την εταιρία Union Carbide. Η κυψέλη καυσίμου της Union Carbide απέδιδε 5kW και τροφοδοτούταν από δυο δεξαμενές όπου περιείχαν υγρό υδρογόνο και οξυγόνο αντίστοιχα. Η κυψέλη με τη σειρά της τροφοδοτούσε τον ηλεκτρικό κινητήρα που διέθετε το όχημα δίνοντας του την δυνατότητα να αναπτύσσει ταχύτητες των 60-70 μιλίων. Το μέλλον του οχήματος αυτού περιορίστηκε μόνο σε πειραματικό στάδιο καθώς είχε υψηλό κόστος κατασκευής και διάφορα άλλα τεχνικά προβλήματα. Ένα χρόνο μετά το 1967 ένας επιστήμονας της Union Carbide παρουσίαζε και την πρώτη μοτοσικλέτα με fuel cell.





Εικόνα 1-9: Το electrovan της General Motors και η μοτοσικλέτα της Union Carbide.

Από την περίοδο αυτή και μετά και λόγο της πετρελαϊκής κρίσης που άρχισε να κάνει την εμφάνιση της στις αρχές του 70’ όλες οι βιομηχανίες οχημάτων παγκοσμίως άρχισαν να μελετούν και να αναπτύσσουν οχήματα κυψελών καυσίμου τα λεγόμενα «Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs)».

Η πετρελαϊκή κρίση όμως δεν επηρέασε μόνο τα μεταφορικά μέσα αλλά και γενικά την παγκόσμια παραγωγή ενέργειας. Έτσι την τάση προς αναζήτηση νέων τρόπων παραγωγής ενέργειας υιοθέτησαν πολλές κυβερνήσεις καθώς και μεγάλες εταιρίες που ασχολούνταν με θέματα παραγωγής ενέργειας. Αυτό ωφέλησε πάρα πολλές τεχνολογίες κυψελών καυσίμου να μελετηθούν και να εξελιχτούν. Μια από αυτές τις τεχνολογίες ήταν και οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέως (Phosphoric Acid Fuel Cells-PAFCs) που χρησιμοποιούσαν ως ηλεκτρολύτη φωσφορικό οξύ. Η τεχνολογία αυτή είχε ανακαλυφθεί το 1961 από τους G. V. Elmore και H. A. Tanner που εργάζονταν για την εταιρία Kettering Foundation (Η.Π.Α.). Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέως σημείωσαν σημαντική πρόοδο σε θέματα σταθερότητας και απόδοσης πράγμα που τις κατέστησε κατάλληλες για χρήση ως μεγάλες σταθερές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Άρχισαν έτσι να δημιουργούνται και να λειτουργούν μεγάλες μονάδες παραγωγής ενέργειας και μια απ ’αυτές ήταν το 1983 στην Νέα Υόρκη των Ηνωμένων Πολιτειών όπου αναπτύχθηκε ένα πιλοτικό πρόγραμμα μιας σταθερής μονάδας 4,8 MW, βασισμένο στην τεχνολογία των κυψελών καυσίμου φωσφορικού οξέως. Το πρόγραμμα αυτό ήταν και η πρώτη εφαρμογή κυψελών καυσίμου τόσο μεγάλης κλίμακας.

Συνεχίζοντας την ιστορική τους εξέλιξη και μπαίνοντας έτσι στην δεκαετία του 1990, οι κυψέλες καυσίμου φαίνεται να έχουν ωριμάσει αρκετά σαν τεχνολογία, αρχίζοντας έτσι να δημιουργείτε μια νέα βιομηχανία και να κάνουν την εμφάνιση τους οι πρώτες εμπορικά βιώσιμες κυψέλες καυσίμου με κυριότερους τύπους εκείνον της κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) και της κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM), που λόγο του χαμηλότερου κόστους και του μικρού βάρους και όγκου βρίσκει μεγαλύτερη εφαρμογή στις κινητές εφαρμογές. Επίσης το 1990 παρουσιάζεται από τους επιστήμονες Surya Prakash και George A. Olah στο πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας ένας νέος τύπος κυψέλης καυσίμου η κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης (Direct Methanol Fuel Cells, DMFC) μια υποκατηγορία των κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) η οποία χρησιμοποιεί ως καύσιμο μεθανόλη αντί υδρογόνου. Το 1993 η εταιρία Ballard Power Systems κάνει παρουσίαση αστικών λεωφορείων τα οποία λειτουργούν με κυψέλες καυσίμου. Επίσης η Energy Partners την ίδια χρονιά παρουσιάζει ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο τροφοδοτούμενο από κυψέλες καυσίμου. Μέχρι το τέλος της δεκαετίας αυτής όλες σχεδόν οι αυτοκινητοβιομηχανίες είχαν δημιουργήσει πρωτότυπα μοντέλα αυτοκινήτων με fuel cell’s. Εξέλιξη όμως υπήρξε και στις σταθερές εφαρμογές καθώς το 1996 τέθηκε σε λειτουργία ένας σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ισχύος 2 MW, στην Καλιφόρνια των Η.ΠΑ. από την εταιρία Energy Research Corp (τώρα Fuel Cell Energy Inc) χρησιμοποιώντας κυψέλες καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (MCFC). Στις αρχές του 21^{ου} αιώνα η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου κάνει ακόμη ένα μεγάλο βήμα, καθώς το εθνικό ερευνητικό κέντρο κυψελών καυσίμου στο πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας το 2000 παρουσιάζει ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούμενο από κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) και αεριοστρόβιλο. Την κατασκευή του συστήματος αυτού είχαν αναλάβει οι εταιρίες Southern California Edison και Siemens Westinghouse Power Corporation και η ισχύς του ήταν 220 kW.



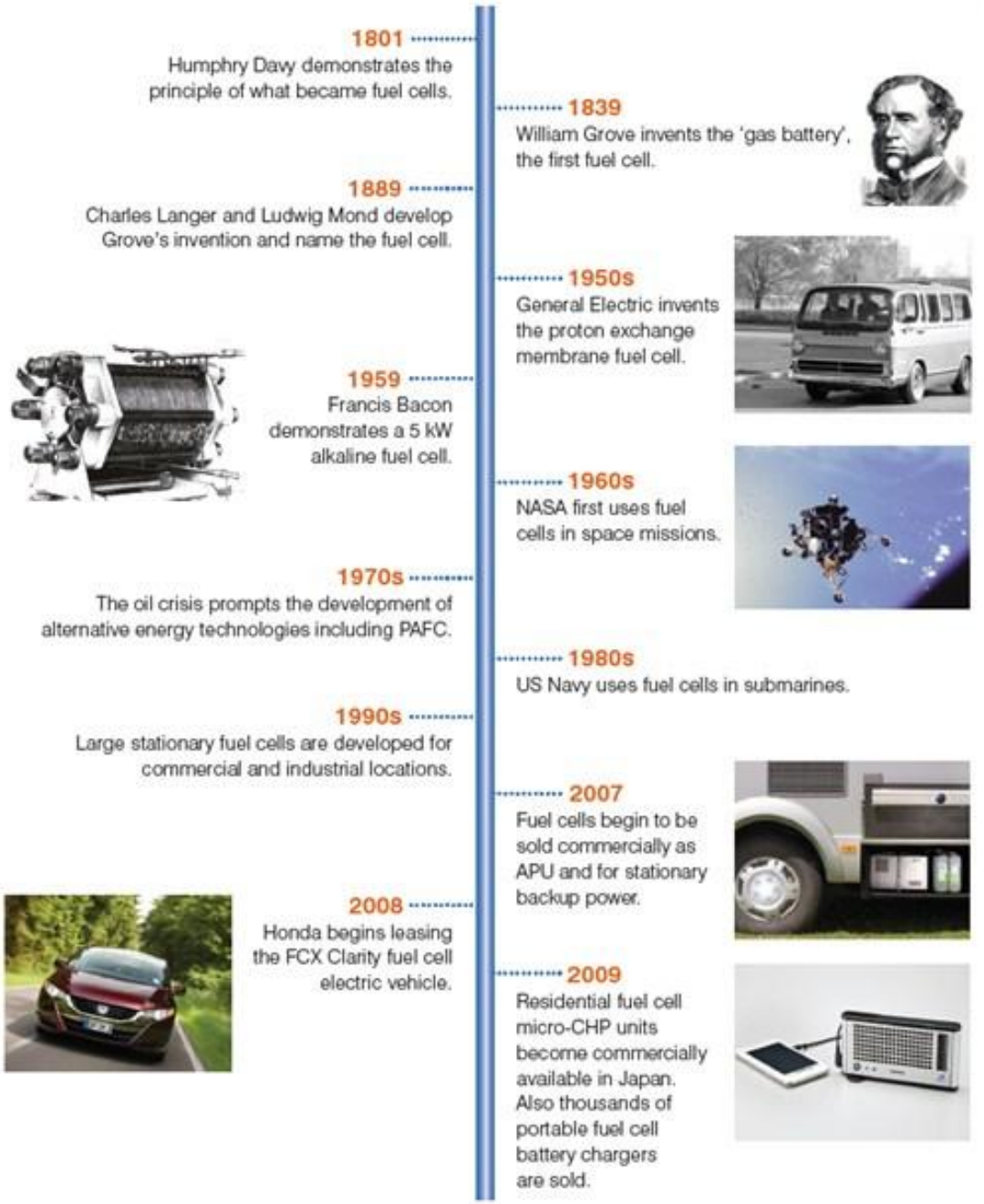
Εικόνα 1-10: Υβριδικό σύστημα MTG-SOFC 220 kW από έκθεση στο National Fuel Cell Research Center.

Το 2007 συσκευές κυψελών καυσίμου αρχίζουν να πωλούνται στο εμπόριο ως βοηθητικές και εφεδρικές μονάδες ισχύος. Το 2008 η Honda ξεκινάει την πρώτη μαζική παραγωγή αυτοκινήτου με κυψέλες καυσίμου με το Honda FCX Clarity. Το 2009 στην Ιαπωνία καθίστανται εμπορικά διαθέσιμες μικρές μονάδες συμπαραγωγής με κυψέλες καυσίμου. Επίσης αρχίζουν να πωλούνται χιλιάδες φορητές συσκευές κυψελών καυσίμου οι οποίες χρησιμοποιούνται σαν φορτιστές μπαταριών για διάφορα Gadgets.



Εικόνα 1-11: Εφαρμογές απο διάφορους τομείς χρήσης των κυψελών καυσίμου.

Μέχρι σήμερα οι κυψέλες καυσίμου συνεχίζουν να εξελίσσονται και να γίνονται χρόνο με το χρόνο αποδοτικότερες και εμπορικά πιο προσιτές καταλαμβάνοντας έτσι σημαντική θέση στην παγκόσμια ενεργειακή αγορά. Το μέλλον τους δείχνει αρκετά υποσχόμενο και φαίνεται πως έχουν ακόμη πολλά να μας δώσουν.



Εικόνα 1-12: Ιστορική στήλη σημαντικών ιστορικών γεγονότων της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου.

Κεφάλαιο 2

Τύποι κυψελών καυσίμων

Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να ταξινομηθούν με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος αφορά τον κυριότερο παράγοντα της λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου, τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιεί. Ο παράγοντας αυτός καθορίζει τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά και τις βασικές ιδιότητες της κυψέλης, όπως είναι, το υλικό κατασκευής της, το μέγεθος της, η πυκνότητα ισχύος, η θερμοκρασία λειτουργίας της, το χρησιμοποιούμενο καύσιμο και η επεξεργασία που χρειάζεται αυτό πριν χρησιμοποιηθεί. Ο δεύτερος τρόπος ταξινόμησης είναι με βάση την θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης. Στην ουσία αυτός ο παράγοντας είναι αποτέλεσμα του πρώτου κριτηρίου παρ' όλα αυτά όμως είναι συνήθως ένα πρωταρχικό στάδιο στην πρακτική επιλογή μιας κυψέλης καυσίμου για το αν είναι κατάλληλη για την εφαρμογή που θα χρησιμοποιηθεί. Με βάση λοιπόν τα παραπάνω έχουμε:

Ταξινόμηση με βάση τον ηλεκτρολύτη:

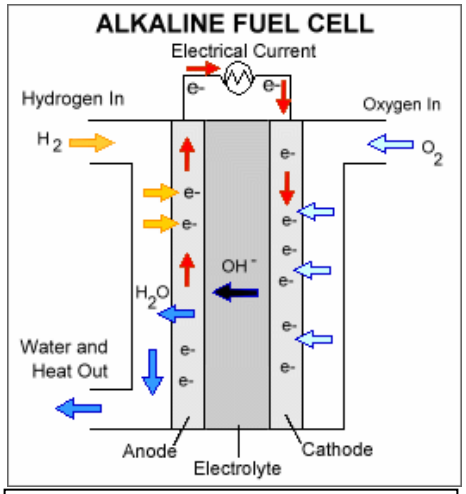
- **Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (Alkaline Fuel Cells, AFC).**
- **Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (proton exchange membrane, PEM).**
- **Κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC).**
- **Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC).**
- **Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (Phosphoric - Acid Fuel Cells, PAFC).**
- **κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης (Direct Methanol Fuel Cells, DMFC).**

Ταξινόμηση με βάση τη θερμοκρασία λειτουργίας:

- **Χαμηλής θερμοκρασίας ~ 50 – 100** °C.
- **Ενδιάμεσης θερμοκρασίας ~ 150 – 220** °C.
- **Υψηλής θερμοκρασίας ~ 600 – 1000** °C.

Αναλυτικότερα:

2.1 Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (Alkaline Fuel Cells, AFC)



Εικόνα 2.1-1: Αλκαλική κυψέλη καυσίμου.

Η αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC) ήταν από τις πρώτες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου που αναπτύχθηκαν και ήταν ο πρώτος τύπος που χρησιμοποιήθηκε ευρέως στο διαστημικό πρόγραμμα των ΗΠΑ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και νερού επί του διαστημικού σκάφους.

Στην κυψέλη αυτή χρησιμοποιείται συνήθως ένα διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH) (30 – 45 wt% σε νερό) ως ηλεκτρολύτης. Είναι επίσης, δυνατή και η χρήση υδροξειδίου του νατρίου (NaOH) ως ηλεκτρολύτης, με μερικά όμως μειονεκτήματα, ιδίως η χαμηλότερη διαλυτότητα του ανθρακικού νατρίου (Na_2CO_3) σε σύγκριση με το ανθρακικό κάλιο (K_2CO_3). Το διάλυμα του ηλεκτρολύτη διατηρείται σε μια μήτρα που είναι συνήθως αμίαντος, επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα υλικά όπως, τιτανικό κάλιο ($KTiO_3$), φωσφορικό δημήτριο ($CePO_4$) ή ζιρκονία (ZrO_2). Η μήτρα του ηλεκτρολύτη, ουσιαστικά λειτουργεί και ως διαχωριστής των αερίων μιγμάτων του καυσίμου και του οξειδωτικού.

Στις περισσότερες περιπτώσεις ως καταλύτης χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια με υψηλές περιεκτικότητες από ευγενή μέταλλα (δηλ. 80% Pt - 20% Pd). Επίσης, στοχεύοντας στην περαιτέρω μείωση του κόστους έχουν δοκιμαστεί ως ηλεκτροκαταλύτες και μη ευγενή μέταλλα, όπως νικέλιο (Ni) και άργυρος (Ag) με ιδιαίτερα υψηλή ειδική επιφάνεια καθώς και μικτά οξείδια τύπου σπινελίου ($MgAl_2O_4$) και περοβσκίτη ($CaTiO_3$). Οι περιεκτικότητες σε ευγενή μέταλλα είναι της τάξης των 5 g/m^2. Ο ηλεκτροκαταλύτης είναι διεσπαρμένος σε πορώδη ηλεκτρόδια άνθρακα.

Στην άνοδο ως καύσιμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε καθαρό H_2 ή αμμωνία υπό τη μορφή των προϊόντων διάσπασής της, δηλαδή μίγμα με 25% N_2, 75% H_2 και μικρές ποσότητες NH_3. Λόγω του υψηλού ποσοστού διάχυσης του υδρογόνου, στην περίπτωση της τροφοδοσίας με NH_3, το δυναμικό της κυψέλης μειώνεται σε μικρό βαθμό σε μέσες πυκνότητες ρεύματος. Ο καθαρισμός του αερίου από τα ανθρακούχα υπολείμματα θεωρείται απαραίτητος στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο το H_2 .

Συνήθως αυτός ο τύπος κυψέλης καυσίμου λειτουργεί σε θερμοκρασίες περίπου 60 – 80°C. Έχει την ικανότητα να λειτουργεί και ως χαμηλής θερμοκρασίας κυψέλη καυσίμου σε θερμοκρασίες από 23 έως 70°C και ως μεσαίας θερμοκρασίας από 100 έως 250°C ανάλογα με το ποσοστό του υδροξειδίου του καλίου στο διάλυμα (συγκέντρωση 85 wt% όταν η κυψέλη λειτουργεί σε μεσαίες θερμοκρασίες και συγκέντρωση 35 – 50 wt% για χαμηλές θερμοκρασίες). Η απόδοση της κυψέλης είναι αρκετά υψηλή φτάνοντας μέχρι και το 60 – 70% λόγω του ότι οι χημικές αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια γίνονται αρκετά γρήγορα και ειδικά σε σχέση με άλλους τύπους κυψελών καυσίμου πολύ γρηγορότερα. Σε αυτό συντελεί επίσης και το ότι λειτουργεί σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες πράγμα που βοηθά και στο να έχει μικρή χρονική υστέρηση κατά την ψυχρή εκκίνηση. Η τυπική πυκνότητα ισχύος της είναι 0.1 – 0.3 W/cm^2 και οι προβλεπόμενες ώρες λειτουργίας της είναι πάνω από 10.000 ώρες.

Η αλκαλική κυψέλη καυσίμου παράγει ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας οξειδοαναγωγικής αντίδρασης μεταξύ υδρογόνου και οξυγόνου. Κατά την άνοδο , το υδρογόνο οξειδώνεται με τα ιόντα του υδροξειδίου σύμφωνα με την αντίδραση:

$$2H_2 + 4OH^- \longrightarrow 4H_2O + 4e^-$$

παράγοντας νερό (και μέσα στον ηλεκτρολύτη) και απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος και επιστρέφουν στην κάθοδο , αντιδρώντας με το νερό που βρίσκεται μέσα στον ηλεκτρολύτη και το οξυγόνο κατά την αντίδραση:

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \longrightarrow 4OH^-$$

παράγοντας ιόντα υδροξειδίου μέσα στον ηλεκτρολύτη τα οποία με τη σειρά τους μετακινούνται στην άνοδο για να ξανά αντιδράσουν με το υδρογόνο.
Η συνολική αντίδραση:

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O$$

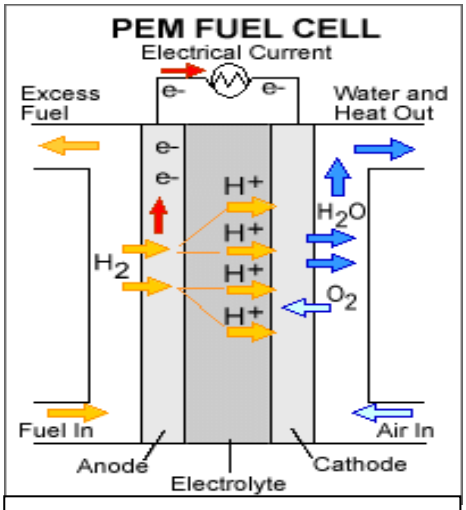
καταναλώνει ένα άτομο οξυγόνου και δύο άτομα υδρογόνου σχηματίζοντας δυο μόρια νερού. Τα παραπροϊόντα αυτής της αντίδρασης είναι ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα.

Το μειονέκτημα αυτού του τύπου κυψέλης καυσίμου είναι ότι μπορεί εύκολα δηλητηριαστεί από το μονοξείδιο και το διοξείδιο του άνθρακα (CO, CO_2). Η χημειορόφηση του μονοξειδίου του άνθρακα επηρεάζει τα ηλεκτρόδια Pt (υποβαθμίζει την καταλυτική τους ενεργότητα) που δρουν ως καταλύτες των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων, ενώ επιπλέον το CO_2 αντιδρά με το KOH παράγοντας ανθρακικά άλατα K_2CO_3 που φράζουν τους πόρους των ηλεκτροδίων. Συνεπώς ακόμη και οι μικροποσότητες του περιβαλλοντικού CO_2 μπορούν να αποβούν καταστρεπτικές για την απόδοση και την διάρκεια ζωής της κυψέλης καυσίμου. Αυτό καθιστά απαραίτητο το να καθαρισθεί τόσο το υδρογόνο όσο και το οξυγόνο που χρησιμοποιείται. Η διαδικασία του καθαρισμού είναι αρκετά δαπανηρή, αυξάνοντας έτσι σημαντικά το κόστος της κυψέλης.

Οι κυψέλες καυσίμου AFCs δεν έχουν εμπορευματοποιηθεί πλήρως μέχρι σήμερα, γεγονός που αποδίδεται στα προβλήματα που σχετίζονται με τη διάρκεια ζωής και την υποβάθμιση της απόδοσης λόγω της παρουσίας του CO_2. Το κόστος περιορίζεται αρκετά για εφαρμογές σε απομακρυσμένες περιοχές όπως το διάστημα ή κάτω από τη θάλασσα. Ωστόσο, για να ανταγωνιστούν αποτελεσματικά την επικρατούσα τάση των εμπορικών αγορών, οι AFCs θα πρέπει να γίνουν αποδοτικότερες. Μέχρι τώρα έχει αποδειχθεί επαρκώς η διατήρηση σταθερής λειτουργίας για περισσότερο από 10.000 ώρες, όμως για να είναι οικονομικά βιώσιμη σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας κοινής ωφέλειας, αυτή η κυψέλη καυσίμου θα πρέπει να φθάσει σε μια κλίμακα των 40.000 ωρών και άνω, κάτι που δεν έχει ακόμη επιτευχθεί λόγω προβλημάτων αντοχής των υλικών.

2.2 Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane, PEM)

Η κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), γνωστή και ως κυψέλη καυσίμου στερεού πολυμερούς (SPFC), χρησιμοποιεί μια στερεή πολυμερή μεμβράνη αγωγό ιόντων H^+, ως ηλεκτρολύτη. Είναι ο πιο ανεπτυγμένος και πολλά υποσχόμενος τύπος στοιχείων καυσίμου, ιδιαίτερα για χρήση σε κινητές εφαρμογές, λόγο του ότι διαθέτει χαρακτηριστικά όπως, η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας, το χαμηλό βάρος και η αρκετά υψηλή πυκνότητα ισχύος.



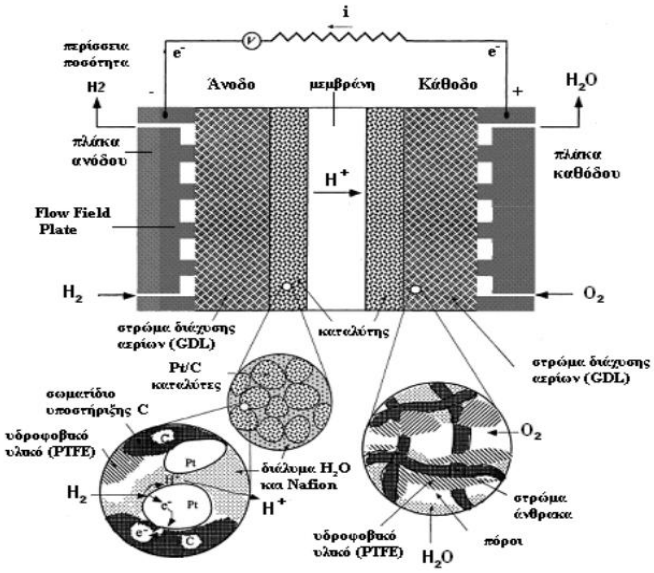
Εικόνα 2.2-1: PEM κυψέλη καυσίμου.

Οι πρώτες κυψέλες καυσίμου τύπου (PEM), χρησιμοποιήθηκαν στο διαστημικό πρόγραμμα GEMINI της NASA και είχαν διάρκεια ζωής περίπου 500 ωρών, αρκετές για τις ανάγκες των πρώτων αποστολών. Οι συνεχείς όμως έρευνες οδήγησαν το 1967, στην δημιουργία μιας καινούργιας πολυμερούς μεμβράνης που ονομάστηκε Nafion, της εταιρίας Dupont, η οποία βελτίωσε κατά πολύ τα χαρακτηριστικά της κυψέλης, έτσι η μεμβράνη αυτή καθιερώθηκε και χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα.

Η συνήθης δομή αυτής της κυψέλης έχει ως εξής:

Ο πολυμερής ηλεκτρολύτης από Nafion (σουλφονωμένο πολυτετραφθοροαιθυλένιο), είναι κατασκευασμένος σαν μια διαφανή μεμβράνη. Διατίθεται σε πάχη από 25.4 – 254μm και έχει την όψη ενός καθαρού χαρτιού περιτυλίγματος από σελοφάν. Όταν στην επιφάνεια της μεμβράνης υπάρχει η κατάλληλη ποσότητα υγρασίας, τότε η μεμβράνη γίνετε αγώγιμη για τα θετικά ιόντα H^+ (πρωτόνια υδρογόνου), αλλά δεν άγει τα αρνητικά (ηλεκτρόνια). Από τις δυο πλευρές της μεμβράνης τοποθετούνται ηλεκτρόδια άνθρακος στα οποία έχει εναποτεθεί ένα στρώμα από Teflon (πολυτετραφθοροαιθυλενίου, PTFE) εμπλουτισμένο με λευκόχρυσο ή και ρουθήνιο, το οποίο παίζει και το ρόλο του καταλύτη. Η μεμβράνη μαζί με τα ηλεκτρόδια ονομάζεται και MEA (Membrane Electrode Assembly). Στην συνέχεια υπάρχει το στρώμα διάχυσης αερίων (Gas Diffusion Layer, GDL), το οποίο αποτελείται συνήθως από υδροφοβικό χαρτί ή ύφασμα γραφίτη πάχους 0.2 – 0.5 mm. Η κύρια λειτουργία αυτού του στρώματος είναι να διαχέει ομοιόμορφα τα αέρια αντιδρώντα στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων, καθώς και το να διατηρεί την κατάλληλη ποσότητα νερού επί της κυψέλης ώστε να παρέχετε η απαραίτητη υγρασία στην μεμβράνη. Η δομή της κυψέλης ολοκληρώνετε με τις πλάκες ροής αερίων και τις διπολικές πλάκες. Οι πλάκες ροής αερίων κατασκευάζονται από γραφίτη. Κάθε πλάκα ροής αερίων περιέχει αυλακές, από τις οποίες περνούν, τα αέρια αντιδρώντα, (ώστε να διοχετευτούν στα ηλεκτρόδια και την μεμβράνη) και το παραγόμενο (ως αποτέλεσμα της αντίδρασης) νερό. Η τάση που δημιουργεί μια συγκεκριμένη κυψέλη καυσίμου είναι μικρή (περίπου 0,7 volt), γι' αυτό είναι αναγκαίο να ενώνονται σε σειρά κι άλλες κυψέλες αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την λειτουργική τάση και σχηματίζοντας έτσι αυτό το οποίο ονομάζουμε στήλη κυψέλης καυσίμου (fuel cell stack). Επομένως είναι αναγκαίο οι πλάκες να

έχουν και από τις δυο πλευρές τους χαραγμένα κανάλια (διπολικές πλάκες). Επιπλέον κάθε πλάκα πρέπει να είναι ηλεκτρικά αγώγιμη ώστε το ρεύμα που δημιουργείτε κατά την ηλεκτροχημική αντίδραση να μπορεί να ρέει από τη μία κυψέλη στην επόμενη και τελικά να φθάνει τις μεταλλικές πλάκες από τις οποίες λαμβάνετε η ισχύς της συστοιχίας των κυψελών.



Εικόνα 2.2-2: Τα μέρη και τα υλικά μιας PEM κυψέλης καυσίμου.

Σε κάθε κυψέλη καυσίμου λαμβάνει χώρα μια αντίδραση οξειδοαναγωγής στα ηλεκτρόδια της. Στις κυψέλες καυσίμου τύπου PEM το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως καύσιμο και το οξυγόνο σαν οξειδωτικό. Η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρισμού έχει ως εξής:
Το υδρογόνο τροφοδοτεί την άνοδο της κυψέλης. Ερχόμενο σε επαφή με τον καταλύτη διαχωρίζεται σε θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια σύμφωνα με την αντίδραση:

$$2H_2 \longrightarrow 4H^+ + 4e^{(-)}$$

Τα ηλεκτρόνια τα οποία απελευθερωθήκαν μεταφέρονται μέσω εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος προς την κάθοδο δημιουργώντας έτσι ηλεκτρισμό.
Στην κάθοδο τα ηλεκτρόνια που λαμβάνονται από το ηλεκτρόδιο και τα θετικά φορτισμένα ιόντα του υδρογόνου τα οποία διαπερνούν τη μεμβράνη (ηλεκτρολύτη) ενώνονται με το οξυγόνο και παράγεται νερό:

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \longrightarrow 2H_2O$$

Η συνολική αντίδραση:

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O$$

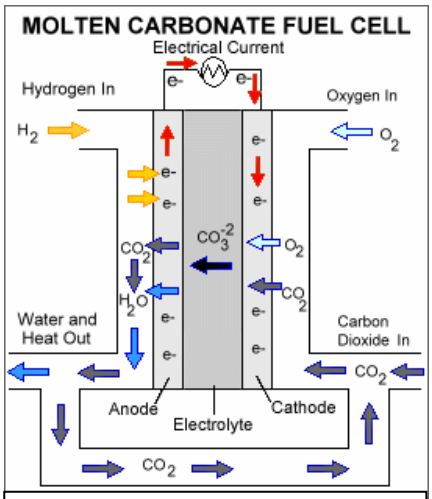
καταναλώνει ένα άτομο οξυγόνου και δύο άτομα υδρογόνου σχηματίζοντας δυο μόρια νερού. Τα παραπροϊόντα αυτής της αντίδρασης είναι ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα.

Οι κυψέλες καυσίμου PEMFCs λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, μεταξύ 60-80°C, γεγονός που τους επιτρέπει να έχουν γρήγορη εκκίνηση λειτουργίας και ταυτόχρονα περιορίζεται η φθορά των υλικών τους. Η απόδοση τους φτάνει στο 40 – 50% και διατηρείτε υψηλή για μεγάλο εύρος μεταβολής της ζήτησης ισχύος, πράγμα που τις κάνει να έχουν γρήγορη ανταπόκριση σε μεταβολές της ισχύος εξόδου. Η πυκνότητα ισχύος τους κυμαίνετε από 0,2 – 0,7 W/cm^2 αρκετά υψηλή ώστε να τις καθιστά συμπαγείς και ελαφριές. Επίσης έχει αποδειχθεί επαρκώς η διατήρηση σταθερής λειτουργίας τους για περισσότερο από 40.000 ώρες επιτρέποντας τους να είναι μια εμπορικά βιώσιμη εφαρμογή. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι μερικά από αυτά που καθιστούν αυτόν τον τύπο κυψέλης καυσίμου έναν αρκετά ιδανικό υποψήφιο για εφαρμογές κυρίως, στην αυτοκίνηση, σε μικρές οικιακές συσκευές και γενικά σε κινητές εφαρμογές, τομείς στους οποίους και υπάρχει μεγάλο ερευνητικό και επενδυτικό ενδιαφέρον.

Υπάρχουν, όμως, ακόμη ορισμένα τεχνοοικονομικά προβλήματα τα οποία πρέπει να ξεπεραστούν. Λόγο της μεμβράνης Nafion οι κυψέλες PEM λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες πράγμα που καθιστά αναγκαία την χρήση ευγενών μετάλλων (κυρίως λευκόχρυσου, Pt) ως καταλύτη. Στις θερμοκρασίες αυτές όμως το CO χημειοροφάται έντονα στο Λευκόχρυσο, υποβαθμίζοντας έτσι την καταλυτική του ενεργότητα, μειώνοντας την συνολική απόδοση της κυψέλης. Επομένως το καύσιμο υδρογόνο θα πρέπει να είναι υψηλής καθαρότητας αυξάνοντας έτσι σημαντικά το κόστος, κάτι που είναι ήδη επιβαρυμένο λόγο του υψηλού κόστους της μεμβράνης και των μετάλλων του καταλύτη. Για να ξεπεραστούν λοιπόν τα θέματα του κόστους, γίνονται έρευνες για καινούργιές μεμβράνες τύπου PBI (Πολυβενζιμιδαζόλη), οι οποίες λειτουργούν στους 120 – 200°C και νέους τρόπους εναπόθεσης του καταλύτη μειώνοντας σημαντικά την ποσότητα του μετάλλου που χρειάζεται. Επίσης ένα ακόμη σημαντικό πρόβλημα στις κυψέλες PEM είναι η διαχείριση του νερού, καθώς η μεμβράνη δεν πρέπει, ούτε να υπερχειλίζει ούτε να μένει χωρίς καθόλου υγρασία για να λειτουργεί σωστά. Με την συνεχή ανάπτυξη και την έρευνα που υπάρχει σύντομα αυτά τα προβλήματα θα ξεπεραστούν επιτρέποντας στις PEMFCs την ανάπτυξή της οικονομίας τους και την ευρεία παραγωγή τους.

2.3 Κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)

Οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFCs) ανήκουν στην κατηγορία των κυψελών καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών. Χρησιμοποιεί ως ηλεκτρολύτη τήγμα αλκαλικού μετάλλου ανθρακικού άλατος, το οποίο συγκρατείται σε κεραμική μήτρα. Αναπτύχθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1960, ωστόσο οι μέθοδοι κατασκευής, η απόδοση και η διάρκειά λειτουργίας τους έχουν βελτιωθεί σημαντικά. Σήμερα, αυτό το είδος κυψελών καυσίμου αναπτύσσεται για την κατασκευή μονάδων παραγωγής ισχύος για βιομηχανικές και στρατιωτικές εφαρμογές.



Εικόνα 2.3-1: Κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος.

Ο ηλεκτρολύτης των κυψελών καυσίμου MCFCs αποτελεί έναν συνδυασμό αλκαλικών ανθρακικών αλάτων, που διατηρούνται σε μια

κεραμική μήτρα από κράμα Οξείδιο του αργιλίου (Αλουμίνα) (Al_2O_3) και λιθίου $LiAlO_2$. Η μήτρα του ηλεκτρολύτη μπορεί να είναι είτε από α- $LiAlO_2$ είτε από γ-$LiAlO_2$. Οι κυψέλες καυσίμου MCFCs τηγμένων ανθρακικών αλάτων λειτουργούν σε θερμοκρασίες μεταξύ 600-700°C, όπου τα ανθρακικά άλατα σχηματίζουν ένα τηγμένο άλας, το οποίο είναι αγωγός ανθρακικών 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 ανθρακικό λίθιο Li_2CO_3 παρουσιάζει υψηλότερη ιοντική αγωγιμότητα από το ανθρακικό νάτριο (σόδα) Na_2CO_3 και το ανθρακικό κάλιο (ποτάσα) 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.

Λόγο των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν μη – πολύτιμα μέταλλα ως καταλύτες στα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου μειώνοντας αρκετά το κόστος. Έτσι στην άνοδο συνήθως χρησιμοποιείται κράμα νικελίου-χρωμίου (Ni-Cr) και στην κάθοδο οξείδιο του νικελίου (NiO).

Οι κυψέλες καυσίμου MCFCs δεν δηλητηριάζονται από το μονοξείδιο και το διοξείδιο του άνθρακα (CO,CO_2) αντιθέτως χρησιμοποιούν τα οξείδια του άνθρακα ως καύσιμο, επιτρέποντας τους έτσι 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. Ωστόσο, έχει ευρέως παρατηρηθεί ότι υπάρχει ευπάθεια δηλητηρίασης από το θείο (S) το οποίο και θα πρέπει να αφαιρεθεί πριν από την είσοδο του στην κυψέλη.

Η λειτουργία της MCFC κυψέλης είναι η εξής:
Στην κάθοδο το οξυγόνο (O_2) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) αντιδρούν μεταξύ τους και παράγουν ανθρακικά ιόντα (CO_3^{2-}) τα οποία διαπερνούν τον ηλεκτρολύτη της κυψέλης.

$$\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \longrightarrow CO_3^{2-}$$

Αυτά αντιδρούν με το υδρογόνο (H_2) στην άνοδο και παράγεται νερό, διοξείδιο του άνθρακα, ενώ τα ηλεκτρόνια μέσω εξωτερικού κυκλώματος οδηγούνται από την άνοδο στην κάθοδο παράγοντας ηλεκτρισμό.

$$H_2 + CO_3^{2-} \longrightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$$

Τα παραπροϊόντα της τελικής αντίδρασης είναι νερό, διοξείδιο του άνθρακα, ηλεκτρισμός και θερμότητα.

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 + CO_2 \longrightarrow H_2O + CO_2$$

Όπως φαίνεται και από τις χημικές αντιδράσεις, το διοξείδιο του άνθρακα ανακυκλώνεται από την άνοδο στην κάθοδο. Η μεταφορά του γίνεται, είτε μέσω της

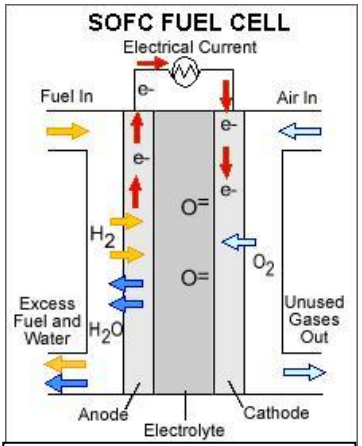
καύσης των καυσαερίων της ανόδου, με περίσσια αέρα απομακρύνοντας στη συνέχεια το νερό, είτε χρησιμοποιώντας συσκευή ανταλλαγής πρωτονίων για τον διαχωρισμό του διοξειδίου άνθρακα από τα καυσαέρια της ανόδου.

Η απόδοση της MCFC για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας φτάνει το 50 με 60%. Επίσης αν η αποβαλλόμενη θερμότητα, χρησιμοποιηθεί για επεξεργασία καυσίμου ή συμπαραγωγή ενέργειας, ο βαθμός απόδοσης μπορεί να φτάσει και το 85%.

Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας των MCFC παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα σε σχέση με τις χαμηλότερης θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι δεν απαιτούν εξωτερική συσκευή αναμόρφωσης του καυσίμου, για τη μετατροπή καυσίμων υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας σε υδρογόνο. Σε αυτή τη θερμοκρασία λειτουργίας η αναμόρφωση του καυσίμου μπορεί να προκύψει μέσα στην κυψέλη με μια διαδικασία που ονομάζεται «εσωτερική αναμόρφωση» εξαλείφοντας την ανάγκη ενός εξωτερικού επεξεργαστή καυσίμου, μειώνοντας σημαντικά το κόστος. Μπορούν έτσι να λειτουργήσουν με μια μεγάλη γκάμα από καύσιμα υδρογονανθράκων όπως το φυσικό αέριο, το βιοαέριο, το μεθάνιο και το προπάνιο ή καύσιμα προερχόμενα από γαιάνθρακα. Όντας πιο ανθεκτικές σε ακαθαρσίες απ' ότι άλλα είδη κυψελών καυσίμου, οι επιστήμονες πιστεύουν ότι θα μπορούσαν να είναι ικανές ακόμη και για εσωτερική αναμόρφωση γαιάνθρακα, υποθέτοντας ότι μπορούν να αποδειχθούν ανθεκτικές σε ακαθαρσίες όπως θείο και μόρια που προκύπτουν από τη μετατροπή γαιάνθρακα σε υδρογόνο. Επίσης ακόμη ένα πλεονέκτημα είναι η ικανότητα χρησιμοποίησης μη – ευγενών μετάλλων ως καταλύτη. Ωστόσο η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας και ο διαβρωτικός ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται επιταχύνουν την αστοχία και τη διάβρωση των υλικών, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής των κυψελών. Ακόμη, απαιτείται σημαντικός χρόνος για την επίτευξη των θερμοκρασιών λειτουργίας με αποτέλεσμα την αργή εκκίνηση, ενώ οι αποκρίσεις σε μεταβολές της ζητούμενης ισχύος είναι αργές. Η πυκνότητα ισχύος τους κυμαίνεται από 0,1 έως 0,15 W/cm^2 . Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν τις κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων, κατάλληλες για εφαρμογές σταθερής ισχύος και εφαρμογές συμπαραγωγής, τομείς στους οποίους και υπάρχουν σήμερα αρκετές εφαρμογές τους.

2.4 Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC)

Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFCs) έχουν την υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας απ' όλους τους άλλους τύπους κυψελών καυσίμου. Όπως και οι (MCFCs) ανήκουν στην κατηγορία κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας, παρουσιάζοντας πολλά κοινά χαρακτηριστικά και εφαρμογές. Η θερμοκρασία λειτουργίας τους κυμαίνεται από 800 έως 1000 °C . Σε αυτές τις υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να επιτευχθούν γρήγοροι ρυθμοί αντιδράσεων χωρίς την χρήση πολύτιμών μετάλλων ως καταλύτη ενώ υπάρχει και η δυνατότητα ο μετασχηματισμός του καυσίμου σε υδρογόνο να γίνεται εσωτερικά της κυψέλης με εσωτερική αναμόρφωση εξαλείφοντας την ανάγκη εξωτερικής μονάδας μετασχηματισμού του καυσίμου. Έτσι μειώνεται αρκετά το κόστος και δίνεται



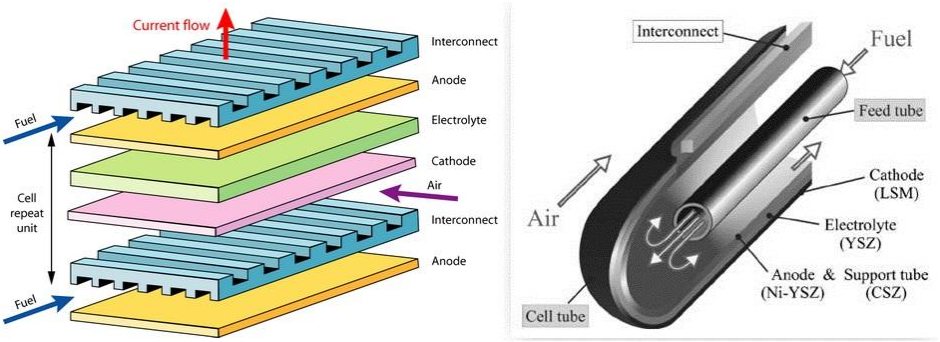
Εικόνα 2.4-1: Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου.

η ευχέρεια χρησιμοποίησης μεγάλου εύρους διαφόρων ειδών καυσίμων.

Οι (SOFCs) χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη ένα σκληρό, μη-πορώδες κεραμικό υλικό το οποίο άγει τα ανιόντα του οξυγόνου (O^{-2}) από την κάθοδο προς την άνοδο. Ο πλέον συνήθης στερεός ηλεκτρολύτης για κυψέλες καυσίμου SOFCs είναι το οξείδιο του ζιρκονίου (ZrO_2) σταθεροποιημένο με 8-9% οξείδιο του υττρίου (Y_2O_2) (Yttria Stabilized Zirconia - YSZ). Η YSZ εμφανίζει ικανοποιητική ιοντική αγωγιμότητα κυρίως σε υψηλές θερμοκρασίες (800-900°C). Για το λόγο αυτό, για την κατασκευή της συνολικής διάταξης της συστοιχίας SOFCs απαιτούνται ακριβά κράματα που να αντέχουν τις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, αυξάνοντας κατ' αυτό τον τρόπο αισθητά το κόστος. Για την μείωση αυτού του κόστους αναπτύχτηκαν και να εξετάστηκαν εναλλακτικά υλικά ως στερεοί ηλεκτρολύτες, όπως το οξείδιο του ζιρκονίου (ZrO_2) ενισχυμένο με οξείδιο του σκανδίου (Sc_2O_3), SDZ, οξείδιο του δημητρίου (CeO_2) ενισχυμένο με οξείδιο του γαδολινίου (Gd_2O_3), GDC και οξείδιο του βισμούθιου (Bi_2O_3), τα οποία μπορούν να επιτύχουν υψηλές τιμές, ιοντικής αγωγιμότητας σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (600 – 800 °C) δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο, τις λεγόμενες κυψέλες καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη μέσων θερμοκρασιών (IT-SOFCs).

Η άνοδος της SOFC κατασκευάζεται από σύνθετα κονιοποιημένα μίγματα κεραμικών υλικών στερεών ηλεκτρολυτών, όπως οι YSZ, GDC ή SDC και οξειδίου του νικελίου (κεραμομεταλλικά μίγματα, Ni-cermets). Η επιλογή του νικελίου γίνεται λόγω της υψηλής ηλεκτρικής του αγωγιμότητας και της σταθερότητας του κατά την διάρκεια των αντιδράσεων. Επίσης η χρησιμοποίηση του νικελίου και ως καταλύτη αναμόρφωσης, σε συνδυασμό με την υψηλή θερμοκρασία, δίνει την δυνατότητα της εσωτερικής αναμόρφωσης μέσα στην SOFC, κατευθείαν στην άνοδο. Όσον αφορά στην κάθοδο, ως ηλεκτρόδιο χρησιμοποιείται συνήθως το μικτό οξείδιο τύπου περοβσκίτη ($CaTiO_3$), Λανθανίου (La), Στροντίου (Sr), Μαγνησίου (Mg) (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 χρησιμοποιηθεί περοβσκιτικά οξείδια Λανθανίου-Στροντίου-Σιδήρου (LSF), Λανθανίου-Στροντίου-Κοβαλτίου-Σιδήρου (LSCF), Λανθανίου-Στροντίου-Μαγνησίου-Σιδήρου (LSMF) κ.α.) . Οι ηλεκτρικές διασυνδέσεις που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την διασύνδεση των μοναδιαίων κυψελών κατασκευάζονται συνήθως από κράματα χρωμίου (Cr) (οξείδιο του Χρωμίου ενισχυμένο με οξείδιο του Λανθανίου).

Αντίθετα από τους περισσότερους τύπους κυψελών καυσίμου ,οι SOFCs έχουν περισσότερους από ένα γεωμετρικό σχεδιασμό. Ένας είναι ο σχεδιασμός επίπεδης γεωμετρίας (planar SOFCs), η οποία είναι και η τυπική γεωμετρία τύπου σάντουιτς που χρησιμοποιείται από τους περισσότερους τύπους κυψελών καυσίμου, όπου ο ηλεκτρολύτης τοποθετείτε μεταξύ των ηλεκτροδίων. Ο άλλος είναι ο σχεδιασμός σωληνοειδούς γεωμετρίας (tubular SOFCs), όπου το καύσιμο διέρχεται μέσα από το εσωτερικό του σωλήνα και ο αέρας διέρχεται κατά μήκος του εξωτερικού του σωλήνα. Ο σωληνοειδής σχεδιασμός έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί πολύ πιο εύκολο να σφραγιστεί ο αέρας από το καύσιμο. Η απόδοση του επίπεδου σχεδιασμού όμως είναι σήμερα καλύτερη από την απόδοση του σωληνοειδούς σχεδιασμού. Επίσης η επίπεδη σχεδίαση έχει συγκριτικά χαμηλότερη αντίσταση.



Εικόνα 2.4-2: Τα μέρη μιας επίπεδης και μιας σωληνοειδούς SOFC.

Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε μία SOFC είναι οι ακόλουθες :

Άνοδος:

$$H_2 + O^{2-} \longrightarrow 3H_2O + 2e^- \ (1)$$

(1) Αντίδραση υδρογόνου ανεξαρτήτως καυσίμου.

$$CO + O^{2-} \longrightarrow CO_2 + 2e^- \ (2)$$

(2) Αντίδραση του μονοξειδίου του άνθρακα όταν χρησιμοποιείται υδρογονάνθρακας ως καύσιμο.

Κάθοδος:

$$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \longrightarrow O^{2-}$$

Συνδυάζοντας τις αντιδράσεις στην άνοδο και την κάθοδο, οι συνολικές αντιδράσεις είναι :

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O \ (1)$$

(1) Αντίδραση υδρογόνου ανεξαρτήτως καυσίμου.

$$CO + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow CO_2 \ (2)$$

(2) Αντίδραση του μονοξειδίου του άνθρακα όταν χρησιμοποιείται υδρογονάνθρακας ως καύσιμο.

Όπως φαίνεται από τις αντιδράσεις τα ιόντα οξυγόνου που σχηματίζονται στην κάθοδο μετακινούνται μέσω του αγώγιμου ηλεκτρολύτη στην άνοδο. Εκεί αντιδρούν με το υδρογόνο και το μονοξείδιο του άνθρακα που περιέχεται στο καύσιμο παράγοντας νερό και διοξείδιο του άνθρακα και απελευθερώνοντας πλεονάζουσα θερμότητα και ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια μέσω εξωτερικού κυκλώματος οδηγούνται από την άνοδο στην κάθοδο παρέχοντας ηλεκτρική ισχύ. Εκεί τα ηλεκτρόνια αντιδρούν με τα μόρια οξυγόνου του αέρα παράγοντας νέα ιόντα οξυγόνου.

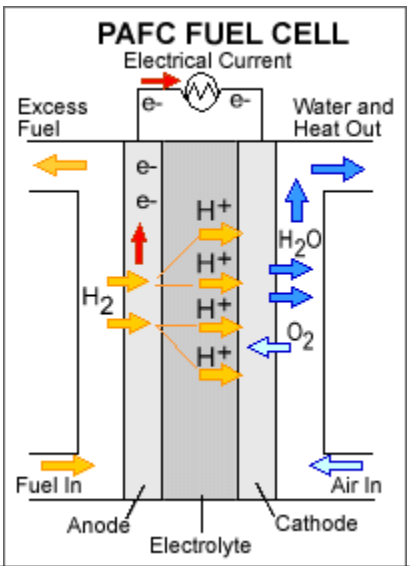
Η αποδοτικότητα λειτουργίας των SOFCs στην παραγωγή ηλεκτρισμού κυμαίνεται στο 50 – 60%. Επίσης, αν η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές συμπαραγωγής, η απόδοση είναι δυνατό να κυμανθεί μεταξύ 80 – 85%. Η πυκνότητα ισχύος τους κυμαίνεται από 0,15 έως 0,7 W/m^2 . Οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων απαιτούν σημαντικό χρόνο για να φθάσουν τη θερμοκρασία λειτουργίας τους και ανταποκρίνονται αργά σε μεταβολές της ζήτησης ηλεκτρισμού. Επομένως, θεωρούνται υποψήφιες για εφαρμογές υψηλής ισχύος, συμπεριλαμβανομένων βιομηχανικών σταθμών και κεντρικών υψηλής κλίμακας σταθμών παραγωγής ηλεκτρική ενέργειας.

Η πολύ ψηλή θερμοκρασία λειτουργίας των SOFCs παρουσιάζει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Από τη μία επιτρέπει τη χρήση σχετικά μη καθαρών καυσίμων όπως αυτά που προκύπτουν από την αεριοποίηση άνθρακα καθώς οι SOFCs δε μολύνονται από το CO, αναμορφώνοντάς τα εσωτερικά, ενώ δεν παρουσιάζει και ανάγκη χρήσης ακριβών καταλυτών. Επίσης, είναι σχετικά ανθεκτικότερες σε μικρές ποσότητες θείου στο καύσιμο, σε σύγκριση με άλλους τύπους κυψελών καυσίμου. Αυτές οι δυνατότητες μειώνουν σημαντικά το κόστος κατασκευής.

Από την άλλη, πέραν της αργής εκκίνησης και των αργών αποκρίσεων σε μεταβολές της ζητούμενης ηλεκτρικής ενέργειας, οι υψηλές θερμοκρασίες απαιτούν και σημαντική θερμική προστασία για τον περιορισμό της θερμότητας και την προστασία του προσωπικού. Οι απαιτήσεις αυτές καλύπτονται από εφαρμογές αναλώσιμων αλλά δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν σε εφαρμογές μετακινήσεων. Τέλος, απαιτούνται ακριβότερα υλικά κατασκευής, καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες προκαλούν και μεγαλύτερες φθορές. Η ανάπτυξη υλικών χαμηλού κόστους και μεγάλης ανθεκτικότητας σε αυτές τις συνθήκες λειτουργίας είναι η κυριότερη τεχνική πρόκληση που αντιμετωπίζει αυτή η τεχνολογία.

2.5 Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (Phosphoric - Acid Fuel Cells, PAFC)

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέως (PAFC) ήταν από τις πρώτες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου που εμπορευματοποιήθηκαν ευρέως. Αναπτύχθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1960 και ήδη από το 1970 προσέλκυσαν μεγάλο ερευνητικό και δοκιμαστικό πεδίο, με αποτέλεσμα να βελτιωθούν σημαντικά η σταθερότητα, η απόδοση και το κόστος τους, χαρακτηριστικά τα οποία τις κατέστησαν έναν καλό υποψήφιο για σταθερές, κυρίως, εφαρμογές αλλά και κινητές όπως μεγάλα οχήματα (π.χ. Αστικά λεωφορεία).



Εικόνα 2.5-1: Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος.

Χρησιμοποιούν έναν υγρό ηλεκτρολύτη ο οποίος αποτελείται από ένα πυκνό (μέχρι και 100%) διάλυμα φωσφορικού οξέως (H_3PO_4) το οποίο τοποθετείται σε μια μήτρα από καρβίδιο του πυριτίου (SiC) με πολυτετραφθοροαιθυλενίο (SiC-PTFE). Ο συγκεκριμένος ηλεκτρολύτης είναι αγώγιμος στα ιόντα του υδρογόνου (H^+). Η σχετική σταθερότητα του πυκνού διαλύματος H_3PO_4 είναι υψηλή, επιτρέποντας στις κυψέλες καυσίμου PAFCs να λειτουργούν σε θερμοκρασίες μέχρι τους 220°C, κατατάσσοντας τες έτσι στις μέσης

θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου. 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 χαμηλότερες θερμοκρασίες το φωσφορικό οξύ γίνεται κακός ιοντικός αγωγός και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) το οποίο σχηματίζεται πάνω στον καταλύτη δηλητηριάζει την άνοδο ρίχνοντας πάρα πολύ την απόδοση. Ωστόσο οι PAFCs μπορούν να ανεχθούν το CO σε συγκέντρωση περίπου 1,5 τοις εκατό, συγκέντρωση η οποία διευρύνει την επιλογή των καυσίμων που μπορούν να χρησιμοποιήσουν. Υψηλή ανεκτικότητα παρουσιάζουν επίσης και στο διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) καθώς και στις ακαθαρσίες των ορυκτών καυσίμων που έχουν μετασχηματιστεί σε υδρογόνο. Εντούτοις στην περίπτωση της συμβατικής βενζίνης πρέπει να απομακρυνθούν τα σουλφίδια (ενώσεις του θείου) .

Το ηλεκτρόδιο της ανόδου αποτελείται από Λευκόχρυσο, Pt, ο οποίος υποστηρίζεται σε πορώδη φύλλα άνθρακα. Η περιεκτικότητα σε Pt είναι περίπου ίση με 0,1 mg/cm^2 στην περίπτωση του ανοδικού ηλεκτροδίου και 0,50 mg Pt/cm^2 στο ηλεκτρόδιο της καθόδου. Επίσης, ως καθοδικά ηλεκτρόδια έχουν εξεταστεί μέταλλα μετάπτωσης (π.χ. σίδηρος (Fe), κοβάλτιο (Co)), 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.

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 υδρόθειο (H_2S) όσο και το CO μειώνουν δραματικά την ενεργότητα των χρησιμοποιούμενων καταλυτικών συστημάτων.

Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην άνοδο και την κάθοδο είναι οι εξής:

Το υδρογόνο τροφοδοτεί την άνοδο της κυψέλης. Ερχόμενο σε επαφή με τον καταλύτη διαχωρίζεται σε θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια σύμφωνα με την αντίδραση:

$$2H_2 \longrightarrow 4H^+ + 4e^-$$

Τα ηλεκτρόνια τα οποία απελευθερωθήκαν μεταφέρονται μέσω εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος προς την κάθοδο δημιουργώντας έτσι ηλεκτρισμό.

Στην κάθοδο τα ηλεκτρόνια που λαμβάνονται από το ηλεκτρόδιο και τα θετικά φορτισμένα ιόντα του υδρογόνου τα οποία διαπερνούν τον ηλεκτρολύτη ενώνονται με το οξυγόνο και παράγεται νερό:

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \longrightarrow 2H_2O$$

Η συνολική αντίδραση:

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O$$

καταναλώνει ένα άτομο οξυγόνου και δύο άτομα υδρογόνου σχηματίζοντας δυο μόρια νερού. Τα παραπροϊόντα αυτής της αντίδρασης είναι ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα.

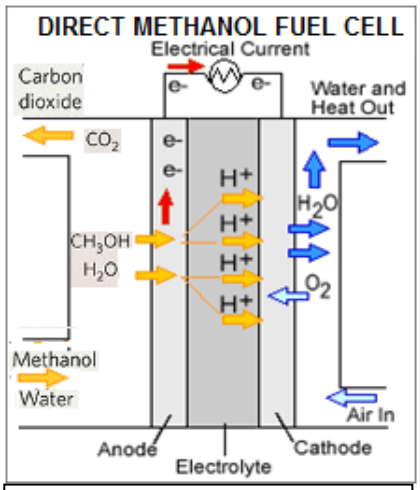
Η ηλεκτρική απόδοση των PA κυψελών καυσίμου κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα (37 – 42%) συγκριτικά με τους υπόλοιπους τύπους κυψελών καυσίμου. Ωστόσο όταν λειτουργούν σε εφαρμογές συμπαραγωγής (CHP, Combined Heat and Power / CCP, Combined Cycle Plants) η συνολική απόδοση φτάνει περίπου το 70 – 80%. Η διάρκεια τους έχει αποδειχθεί ότι προσεγγίζει τα 5 έτη, στα οποία η υποβάθμιση της απόδοσης τους δεν ξεπερνά το 5%. Η πυκνότητα ισχύος τους κυμαίνεται από 0,1 – 0,15 W/cm^2 .

Η υψηλή απόδοση σε εφαρμογές συμπαραγωγής είναι ένα από τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου κυψελών καυσίμου. Επίσης σημαντικό πλεονέκτημα είναι και η ανοχή η οποία παρουσιάζει, στο μονοξείδιο και το διοξείδιο του άνθρακα, καθώς και στις ακαθαρσίες του καυσίμου, επιτρέποντας του την χρησιμοποίηση αναμορφωμένων ορυκτών καυσίμων, όπως το φυσικό αέριο, το βιοαέριο κ.α.. Οι PAFCs διαθέτουν αρκετά υψηλή ωριμότητα σε επίπεδο ανάπτυξης και εμπορευματοποίησης βελτιώνοντας έτσι συνεχώς τα χαρακτηριστικά τους και μειώνοντας το κόστος.

Στα μειονεκτήματα αυτού του τύπου συγκαταλέγονται το μεγάλο μέγεθος και βάρος. Λόγο του ότι παράγουν χαμηλή ισχύς σε σχέση με άλλα είδη κυψελών καυσίμου, για διατάξεις ίδιου βάρους και όγκου, οι κυψέλες αυτές είναι συχνά μεγάλες και βαριές. Επίσης η θερμοκρασία λειτουργίας τους αποτελεί μειονέκτημα όσων αφορά το χρόνο εκκίνησης, καθώς χρειάζονται αρκετό χρόνο ώστε για να φθάσουν στις συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Ακόμα η χρησιμοποίηση ακριβών μετάλλων (λευκόχρυσος) ως καταλύτη και η απαίτηση εξωτερικής μονάδας αναμόρφωσης του καυσίμου, αυξάνουν σημαντικά το κόστος.

2.6 Κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης (Direct Methanol Fuel Cells, DMFC)

Σε όλες τις παραπάνω κυψέλες ως καύσιμο χρησιμοποιείται τελικά το υδρογόνο είτε αυτό προέρχεται από εσωτερική είτε από εξωτερική αναμόρφωση. Ωστόσο, ο συγκεκριμένος τύπος κυψελών χρησιμοποιεί ως καύσιμο κατευθείαν μεθανόλη χωρίς να απαιτεί τη μετατροπή της σε υδρογόνο. Σε αυτή την περίπτωση η μεθανόλη είναι αυτή που οξειδώνεται στην άνοδο. Η κατηγορία αυτή αποτελεί μια υποκατηγορία των κυψελίδων PEM και είναι η πιο πρόσφατη τεχνολογία στην ιστορία των κυψελών καυσίμου.



Εικόνα 2.6-1: Κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης.

Ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται είναι και εδώ όπως και στις PEMFCs μια πολυμερή μεμβράνη συνήθως από Nafion με την διαφορά ότι έχει μεγαλύτερο πάχος. Ως καταλύτης

χρησιμοποιείται λευκόχρυσος (Pt) ή κράματα λευκόχρυσου-ρουθηνίου (Pt-Ru). Η λειτουργία των DMFCs είναι παρόμοια με αυτή των κυψελών τύπου PEM μιας και ο ηλεκτρολύτης είναι ο ίδιος όπως και ο ανταλλάξιμος φορέας (ιόντα υδρογόνου H+). Ίδια είναι και η αντίδραση στην κάθοδο με την διαφορά να γίνεται στην άνοδο, η οποία έλκει μόνη της απευθείας το υδρογόνο από την υγρή μεθανόλη με την οποία τροφοδοτείται. Η μεθανόλη οξειδώνεται στην άνοδο παρουσία νερού δημιουργώντας διοξείδιο του άνθρακα, πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια μέσω εξωτερικού κυκλώματος οδηγούνται στην κάθοδο, παράγοντας ηλεκτρισμό. Τα πρωτόνια διαπερνούν την μεμβράνη και οδηγούνται στην κάθοδο όπου αντιδρούν με το οξυγόνο και σχηματίζουν νερό. Η συνολική αντίδραση καταναλώνει μεθανόλη και νερό σχηματίζοντας νερό και διοξείδιο του άνθρακα. Τα παραπροϊόντα αυτής της αντίδρασης είναι ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα.

Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στα ηλεκτρόδια είναι οι εξής:

Στην άνοδο:

$$CH_3OH + H_2O \longrightarrow 6H^+ + 6e^- + CO_2$$

Στην κάθοδο:

$$\frac{3}{2}O_2 + 6H^+ + 6e^- \longrightarrow 3H_2O$$

Συνολική αντίδραση:

$$CH_3OH + \frac{3}{2}O_2 \longrightarrow 2H_2O + CO_2$$

Οι DMFCs αναπτύχθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1990, η χαμηλή όμως απόδοση και πυκνότητα ισχύος τους μαζί με άλλα προβλήματα που παρουσίαζαν δεν βοήθησαν στην ανάδειξη της τεχνολογίας αυτής. Ωστόσο οι βελτιώσεις που έχουν γίνει μέχρι σήμερα, κυρίως στους καταλύτες που χρησιμοποιούνται και άλλες πρόσφατες εξελίξεις, έχουν αυξήσει την πυκνότητα ισχύος τους μέχρι και είκοσι φορές κάνοντας την να φτάνει και τα 0,25 W/cm^2 ενώ η απόδοσή τους μπορεί να φτάσει πλέον το 40%.

Η θερμοκρασία λειτουργίας τους κυμαίνεται από 50 – 120 °C όπου οι υψηλές θερμοκρασίες είναι συνήθως υπό πίεση. Όσο πιο αυξημένη η θερμοκρασία και η πίεση τόσο αυξάνεται και η απόδοση τους ωστόσο το πλεονέκτημα αυτό χάνεται λόγο των απωλειών που προκαλούνται τελικά στο πλήρες σύστημα με αποτέλεσμα να προτιμούνται διαμορφώσεις ατμοσφαιρικής πίεσης.

Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου προέρχονται κυρίως από το καύσιμο το οποίο χρησιμοποιείται. Η μεθανόλη προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα ως καύσιμο. Είναι φθηνή, αλλά έχει μια σχετικά υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, μπορεί εύκολα να μεταφερθεί και να αποθηκευθεί επίσης παρουσιάζει υψηλή σταθερότητα στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Ακόμη μπορεί να τροφοδοτείται στη μονάδα κυψελών καυσίμου από ένα δοχείο υγρού το οποίο μπορεί να συμπληρώνεται, ή από κασέτες οι οποίες μπορούν να αλλαχθούν γρήγορα. Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας σε συνδυασμό με την απουσία ανάγκης αναμορφωτή υδρογονανθράκων και τα πλεονεκτήματα της μεθανόλης που προαναφέρθηκαν καθιστούν τα κελιά καυσίμου άμεσης μεθανόλης εξαίρετους υποψήφιους για εφαρμογές μικρού και μέσου μεγέθους όπως κινητά τηλέφωνα και φορητούς υπολογιστές.

Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα αυτού του τύπου είναι ότι η οξείδωση της μεθανόλης σε χαμηλή θερμοκρασία απαιτεί πολύ ενεργό καταλύτη. Αυτό σημαίνει αυξημένη ποσότητα λευκόχρυσου (Pt) πράγμα που αυξάνει σημαντικά το κόστος. Άλλο ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι η μεθανόλη σε υψηλές συγκεντρώσεις έχει την τάση να διαχέεται μέσω της μεμβράνης προς την κάθοδο χωρίς να αντιδρά με τον καταλύτη, ένα φαινόμενο το οποίο ονομάζεται Cross-over current έτσι η μεθανόλη τροφοδοτείτε σαν ένα ασθενές διάλυμα από 1 έως 3M με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται το φαινόμενο Cross-over μειώνεται όμως σημαντικά η απόδοση. Ένα επιπλέον πρόβλημα αυτών των κελιών καυσίμου είναι η τοξικότητα της μεθανόλης. Έχει αρχίσει έτσι, να αναπτύσσεται ένας άλλος τύπος κυψέλης καυσίμου, οι κυψέλες καυσίμου καύσης αιθανόλης (Direct Methanol Fuel Cells, DEFCs) , οι οποίες βρίσκονται σε πολύ πρώιμο στάδιο με απόδοση περίπου στο μισό των κελιών καυσίμου μεθανόλης, πράγμα που με την περαιτέρω ανάπτυξή της τεχνολογίας αυτής αναμένεται να βελτιωθεί.

2.7 Άλλοι τύποι κυψελών καυσίμου

Εκτός από τους βασικούς τύπους κυψελών καυσίμου που αναπτύχθηκαν παραπάνω υπάρχουν και άλλες τεχνολογίες κυψελών οι οποίες όμως βρίσκονται κυρίως σε εργαστηριακό και μελετητικό επίπεδο. Οι πιο γνωστές από αυτές είναι:

Αναγεννώμενες (Ανανεώσιμες) ή αναστρέψιμης λειτουργίας κυψέλες καυσίμου (Regenerative or Reverse Fuel Cell, RFC)

Είναι μια αρκετά ελκυστική μορφή ηλεκτροπαραγωγής κλειστού βρόχου. Νερό διαχωρίζεται σε υδρογόνο και οξυγόνο μέσω ηλεκτρόλυσης η οποία τροφοδοτείτε από ηλιακή ενέργεια. Το υδρογόνο και το οξυγόνο διοχετεύονται στη συνέχεια στην κυψέλη καυσίμου, η οποία παράγει ηλεκτρισμό, θερμότητα και νερό. Το σχηματιζόμενο νερό επανακυκλοφορεί πίσω στον μηχανισμό ηλεκτρόλυσης, όπου η διαδικασία αρχίζει πάλι. Συστήματα PEM και SOFC αναγεννώμενων κυψελών καυσίμου βρίσκονται σήμερα σε εξέλιξη.

Μικροβιακές ή βιολογικές κυψέλες καυσίμου (Microbial or Biological Fuel Cell, MFC)

Χρησιμοποιούν την καταλυτική αντίδραση των μικροοργανισμών για να μετατρέψουν σχεδόν οποιαδήποτε οργανική ύλη (π.χ. γλυκόζη, οξικό, λύματα) σε καύσιμο. Οι οργανικές ενώσεις περικλείονται από ανόδους απουσία οξυγόνου και καταναλώνονται από τα βακτήρια ή άλλα μικρόβια. Κατά τη διαδικασία της πέψης ηλεκτρόνια διαχωρίζονται από την ένωση και οδηγούνται σε ένα κύκλωμα με τη βοήθεια ανόργανου διαμεσολαβητή. Οι MFCs λειτουργούν σε ήπιες συνθήκες μεταξύ 20 έως 40 °C. Τα συστήματα αυτά είναι ικανότητα απόδοσης μέχρι 50 τοις εκατό, και θα είναι κατάλληλα για μικρές και μικροσκοπικές εφαρμογές όπως ιατρικές συσκευές.

Κυψέλες καυσίμου Μετάλλου/Αέρα ή Ψευδαργύρου/Αέρα (Metal-Air or Zinc-Air Fuel Cells, MAFCs, ZAFCs)

Οι κυψέλες καυσίμου ψευδαργύρου-αέρα μοιράζονται κοινά χαρακτηριστικά με τις μπαταρίες. Συνδυάζουν σωματίδια ψευδαργύρου και το οξυγόνο από τον αέρα με έναν ηλεκτρολύτη για την παραγωγή ηλεκτρισμού, δημιουργώντας σημαντικά περισσότερη ισχύ από τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος του ίδιου βάρους. Τα συστήματα ZAFC έχουν δυνητική χρήση σε εφαρμογές μεταφορών.

Πίνακας 2-1:Συγκεντρωτικός πίνακας τύπων κυψελών καυσίμων με τα χαρακτηριστικά τους.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY | Energy Efficiency & Renewable Energy

FUEL CELL TECHNOLOGIES PROGRAM

Comparison of Fuel Cell Technologies

Fuel Cell Type	Common Electrolyte	Operating Temperature	Typical Stack Size	Efficiency	Applications	Advantages	Disadvantages
Polymer Electrolyte Membrane (PEM)	Perfluoro sulfonic acid	50-100°C 122-212°F typically 80°C	< 1kW–100kW	60% transportation 35% stationary	• Backup power • Portable power • Distributed generation • Transporation • Specialty vehicles	• Solid electrolyte reduces corrosion & electrolyte management problems • Low temperature • Quick start-up	• Expensive catalysts • Sensitive to fuel impurities • Low temperature waste heat
Alkaline (AFC)	Aqueous solution of potassium hydroxide soaked in a matrix	90-100°C 194-212°F	10–100 kW	60%	• Military • Space	• Cathode reaction faster in alkaline electrolyte, leads to high performance • Low cost components	• Sensitive to CO_2 in fuel and air • Electrolyte management
Phosphoric Acid (PAFC)	Phosphoric acid soaked in a matrix	150-200°C 302-392°F	400 kW 100 kW module	40%	• Distributed generation	• Higher temperature enables CHP • Increased tolerance to fuel impurities	• Pt catalyst • Long start up time • Low current and power
Molten Carbonate (MCFC)	Solution of lithium, sodium, and/or potassium carbonates, soaked in a matrix	600-700°C 1112-1292°F	300 kW-3 MW 300 kW module	45-50%	• Electric utility • Distributed generation	• High efficiency • Fuel flexibility • Can use a variety of catalysts • Suitable for CHP	• High temperature corrosion and breakdown of cell components • Long start up time • Low power density
Solid Oxide (SOFC)	Yttria stabilized zirconia	700-1000°C 1202-1832°F	1 kW–2 MW	60%	• Auxiliary power • Electric utility • Distributed generation	• High efficiency • Fuel flexibility • Can use a variety of catalysts • Solid electrolyte • Suitable for CHP & CHHP • Hybrid/GT cycle	• High temperature corrosion and breakdown of cell components • High temperature operation requires long start up time and limits

Κεφάλαιο 3

Μηχανισμός λειτουργίας

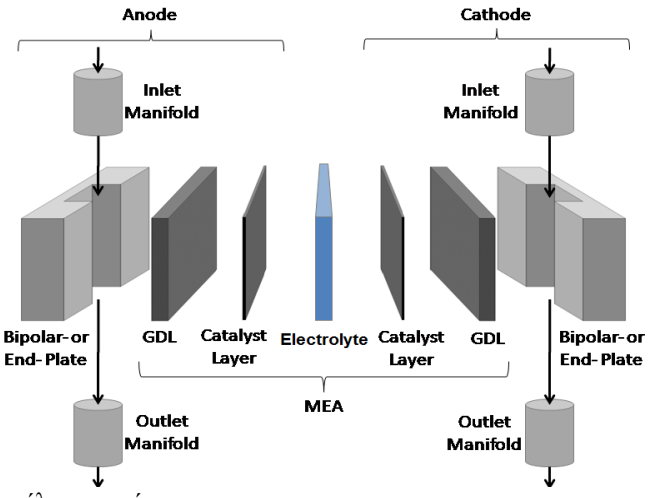
3.1 Εισαγωγή

Η βασική αρχή των κυψελών καυσίμου περιγράφεται ως η αντίστροφη διαδικασία από αυτήν της ηλεκτρόλυσης, στην οποία το νερό προσδίδοντας του ηλεκτρισμό διασπάτε σε υδρογόνο και οξυγόνο. Στις κυψέλες καυσίμου υδρογόνο και οξυγόνο συνενώνονται σχηματίζοντας νερό και παράγοντας ηλεκτρισμό. Γενικά μία κυψέλη καυσίμου μπορεί να περιγραφεί ως μια ηλεκτροχημική συσκευή που μετατρέπει απευθείας την χημική ενέργεια σε ηλεκτρική, εκλύοντας ως παραπροϊόντα αυτής της "μετατροπής" νερό και θερμότητα. Για όσο σ' αυτήν παρέχονται καύσιμο και οξειδωτικό συνεχίζουν να λαμβάνουν χώρα οι ηλεκτροχημικές της διεργασίες και έτσι συνεχίζει να λειτουργεί. Σε ηλεκτροχημικές διεργασίες βασίζεται επίσης και η αρχή λειτουργίας των μπαταριών, έχοντας όμως μια βασική διαφορά.

Αμφότερες οι μπαταρίες και οι κυψέλες καυσίμου μετατρέπουν την ενέργεια του χημικού δυναμικού σε ηλεκτρική και ως παραπροϊόν αυτής της διαδικασίας, αποβάλουν θερμική ενέργεια. Ωστόσο, μια μπαταρία αποθηκεύει ενέργεια σε συγκεκριμένη ποσότητα χημικών ουσιών που βρίσκονται στο εσωτερικό της και μόλις το χημικό δυναμικό αυτής της ποσότητας εξασθενήσει πρέπει να απορριφτεί ή να επαναφορτιστεί χρησιμοποιώντας μια εξωτερική παροχή ηλεκτρικού ρεύματος για να οδηγήσει την ηλεκτροχημική αντίδραση στην αντίστροφη κατεύθυνση. Μια κυψέλη καυσίμου, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιεί μια εξωτερική παροχή χημικής ενέργειας και μπορεί να λειτουργήσει επ 'αόριστον, εφ' όσον τροφοδοτείται από μια πηγή καυσίμου, το οποίο είναι κυρίως υδρογόνο ή άλλα καύσιμα πλούσια σε υδρογόνο (π.χ. φυσικό αέριο) ή ακόμη σε ορισμένους τύπους κυψελών μονοξείδιο του άνθρακα ή υδρογονάνθρακες και από μία πηγή οξυγόνου (συνήθως αέρα).

3.2 Δομή κυψέλης καυσίμου

Τα μέρη που αποτελούν την δομή μιας διάταξης κυψέλης καυσίμου είναι τα εξής:
- Ηλεκτρολύτης
- Ηλεκτρόδια-Καταλύτης
- Στρώμα διάχυσης αερίων (Gass Diffusion Layer, G.D.L.)
- Πλάκες ροής αερίων ή Διπολικές πλάκες



Εικόνα 3.2-1: Δομή κυψέλης καυσίμου.

Ηλεκτρολύτης

Είναι ένας αγωγός του ηλεκτρισμού, μέσα στον οποίο γίνεται μεταφορά ρεύματος από την κίνηση ιόντων. Βασικός ρόλος του είναι να επιτρέπει τη διέλευση ιόντων μέσα από το εσωτερικό του. Για το λόγο αυτό πρέπει να χαρακτηρίζεται από υψηλή ιοντική αγωγιμότητα. Ταυτόχρονα, εμποδίζει τη διέλευση ηλεκτρονίων περιορίζοντας τις απώλειες της κυψέλης. Σε περίπτωση που επιτραπεί η διέλευση ηλεκτρονίων μέσα από τον ηλεκτρολύτη η ομαλή λειτουργία της κυψέλης διακόπτεται λόγω φαινομένων βραχυκύκλωσης. Τέλος, λειτουργεί και σαν απομονωτής των αερίων. Έτσι, επιτυγχάνει το διαχωρισμό με φυσικό τρόπο του καυσίμου από το οξειδωτικό μέσο, αποτρέποντας ενδεχόμενη απευθείας αντίδρασή τους.

Ανάλογα με το είδος και τις χημικές ιδιότητες του ηλεκτρολύτη, τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της κυψέλης και η εσωτερική θερμοκρασία λειτουργίας της διαφέρουν. Επίσης, σε διαφορετικές κυψέλες καυσίμου η πόλωση των ιόντων και η κατεύθυνση μεταφοράς τους μπορεί να διαφέρει, καθορίζοντας αντίστοιχα την περιοχή παραγωγής νερού και απομάκρυνσής του. Αν τα ιόντα που παράγονται είναι θετικά, όπως στην περίπτωση που ο ηλεκτρολύτης είναι όξινος, τότε το νερό παράγεται στην κάθοδο ενώ αντίθετα αν τα ιόντα είναι αρνητικά, όπως στις κυψέλες καυσίμου αλκαλικού ηλεκτρολύτη, στερεών οξειδίων και στις κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων, τότε το νερό σχηματίζεται στην άνοδο, χωρίς ωστόσο αυτό να αναιρεί το γεγονός ότι ηλεκτρικό ρεύμα θα παραχθεί ως αποτέλεσμα της ροής των ηλεκτρονίων μέσα από το εξωτερικό κύκλωμα.

Ηλεκτρόδια-Καταλύτης

Τα ηλεκτρόδια είναι το μέρος της κυψέλης όπου λαμβάνουν χώρα οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις της κυψέλης και χαρακτηρίζονται από την άνοδο και την κάθοδο.

- **Άνοδος**

Το ηλεκτρόδιο της ανόδου αποτελεί το αρνητικό ηλεκτρόδιο της διάταξης. Ερχόμενο σε επαφή με το καύσιμο προκαλεί το διαχωρισμό του σε πρωτόνια τα οποία άγονται εντός του ηλεκτρολύτη προς την κάθοδο και ηλεκτρόνια, τα οποία και οδηγεί σε εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα, προκαλώντας τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος.

- **Κάθοδος**

Το ηλεκτρόδιο της καθόδου αποτελεί το θετικό ηλεκτρόδιο της διάταξης. Στην κάθοδο πραγματοποιείται η αντίδραση των ηλεκτρονίων που προέρχονται από το εξωτερικό κύκλωμα με το οξυγόνο και τα ιόντα που κινούνται μέσω του ηλεκτρολύτη από την άνοδο προς την κάθοδο για την παραγωγή νερού.

Για τις κυψέλες καυσίμου πρωτονιακής μεμβράνης και φωσφορικού οξέος, πρωτόνια μετακινούνται μέσω του ηλεκτρολύτη στην κάθοδο και συνδυάζονται με το οξυγόνο και τα ηλεκτρόνια, παράγοντας νερό και θερμότητα. Για τις αλκαλικές, τηγμένου ανθρακικού άλατος και στερεών οξειδίων κυψέλες καυσίμου, τα αρνητικά ιόντα ταξιδεύουν μέσω του ηλεκτρολύτη στην άνοδο όπου συνδυάζονται με το υδρογόνο για να παράγουν νερό και ηλεκτρόνια.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι τα ηλεκτρόδια πρέπει είναι διαπερατά από τα αέρια μόρια, τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια, ώστε να πραγματοποιηθούν οι παραπάνω αντιδράσεις και να δημιουργηθεί το ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του εξωτερικού κυκλώματος.

Η ταχύτητα των παραπάνω αντιδράσεων είναι αποφασιστικής σημασίας για τη λειτουργία και την απόδοση της κυψέλης καυσίμου και σχετίζεται με την ενεργό

επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Έτσι, πορώδη ηλεκτρόδια αυξάνουν την ενεργό επιφάνειά τους και κατ' επέκταση την ταχύτητα με την οποία λαμβάνουν χώρα οι αντιδράσεις.

Πέραν της αύξησης της επιφάνειας των ηλεκτροδίων, άλλες μέθοδοι για την αύξηση του ρυθμού των αντιδράσεων είναι η αύξηση της θερμοκρασίας και η προσθήκη καταλυτικών επενδύσεων επί των ηλεκτροδίων. Οι τελευταίες μειώνουν την απαιτούμενη ενέργεια ενεργοποίησης, επιτρέποντας στις αντιδράσεις να πραγματοποιηθούν ταχύτερα ή σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

Ο καταλύτης προστίθεται στη διάταξη σαν μια λεπτή στρώση, η οποία εναποτίθεται συνήθως στην πλευρά των ηλεκτροδίων που βλέπει προς την πλευρά του ηλεκτρολύτη. Είναι σκληρός και πορώδης ώστε η μέγιστη επιφάνεια του να μπορεί να εκτεθεί στο υδρογόνο και το οξυγόνο, τα οποία διασκορπίζονται προς αυτόν ομοιόμορφα. Ο καταλύτης που λειτουργεί καλύτερα σε άνοδο και κάθοδο είναι η πλατίνα (Pt), μέταλλο πολύ ακριβό, καθώς έχει την ιδιότητα να διασπά τόσο το υδρογόνο όσο και το οξυγόνο. Ο καταλύτης δεν καταναλώνεται, καθώς μετά την εκάστοτε αντίδραση μπορεί να ανακτηθεί από το αντιδρούν μίγμα χημικά αμετάβλητος.

Στρώμα Διάχυσης Αερίων (G.D.L.)

Το στρώμα ή τα στρώματα διάχυσης αερίων, κατασκευάζονται από υλικά με βάση τον άνθρακα, τα οποία μπορούν να άγουν τα ηλεκτρόνια που εξέρχονται από την άνοδο και εισέρχονται στην κάθοδο. Μπορούν να αποτελούν μέρος του ηλεκτροδίου ή να είναι ξεχωριστό στρώμα. Τοποθετούνται δίπλα στην άνοδο και την κάθοδο όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2-1. Η πορώδης φύση των υλικών τους εξασφαλίζει αποτελεσματική διάχυση κάθε αντιδρώντος αερίου στον καταλύτη, με κατεύθυνση της κίνησής του από μια περιοχή υψηλής συγκέντρωσης, δηλαδή την εξωτερική μεριά του στρώματος, προς μια περιοχή χαμηλής συγκέντρωσης, δηλαδή την εσωτερική μεριά του στρώματος που βρίσκεται δίπλα στο στρώμα του καταλύτη και όπου το αέριο καταναλώνεται κατά την αντίδραση.

Σκοπός του στρώματος διάχυσης αερίων είναι η μεγιστοποίηση του ρεύματος που μπορεί να παραχθεί από τη διάταξη ηλεκτρολύτη-ηλεκτροδίων. Ακόμη, δημιουργεί ηλεκτρική σύνδεση ανάμεσα σε καταλύτη και διπολικές πλάκες. Η πορώδης φύση του επιτρέπει στο αέριο να διασκορπιστεί ώστε όταν εισέλθει σε αυτό να είναι σε επαφή με ολόκληρη την επιφάνεια μεμβράνης-καταλύτη. Ακόμη, τα στρώματα διάχυσης βοηθούν στην διαχείριση του νερού που παράγεται κατά τη διάρκεια λειτουργίας της κυψέλης, εξασφαλίζοντας έτσι την επιθυμητή ποσότητα νερού ώστε να διασφαλίζονται οι κατάλληλες συνθήκες υγρασίας, αποτρέποντας παράλληλα «πλημμύρα» της κυψέλης από υπερβολική ποσότητα νερού.

Διπολικές Πλάκες

Οι διπολικές πλάκες τοποθετούνται στην εξωτερική επιφάνεια κάθε στρώματος διάχυσης αερίων. Σκοπός τους είναι η παροχή ομαλής ροής αερίων προς την κυψέλη, η απομάκρυνση του παραγόμενου νερού και η παραλαβή του παραγόμενου ρεύματος.

Σε μια απλή κυψέλη οι διπολικές πλάκες είναι το τελευταίο κατασκευαστικό μέρος της διάταξης. Κατασκευάζονται από ελαφρύ, σκληρό, αδιαπέραστο από αέρια και καλό αγωγό του ηλεκτρισμού υλικό. Γραφίτης ή μέταλλα χρησιμοποιούνται συχνά για την κατασκευή των διπολικών πλακών.

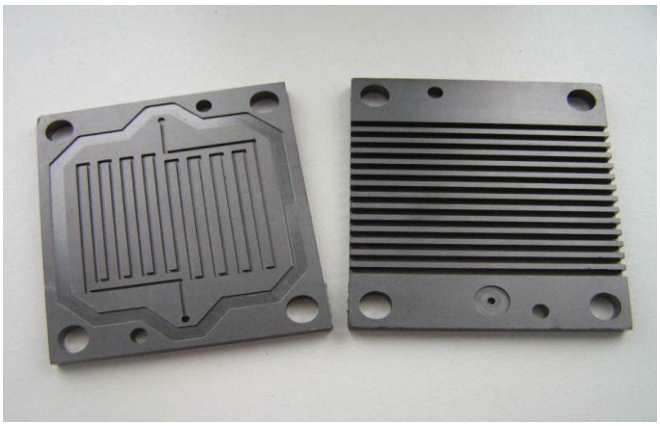
Ο πρώτος ρόλος που εξυπηρετεί κάθε πλάκα δηλαδή η παροχή πεδίου ροής αερίων επιτυγχάνεται με τον εξής τρόπο: Κανάλια χαράσσονται στην πλαϊνή

επιφάνεια κάθε πλάκας δίπλα στο στρώμα διάχυσης αερίων. Τα κανάλια μεταφέρουν το αντιδρών αέριο από το σημείο εισόδου του στην κυψέλη καυσίμου ως το σημείο απ' όπου θα εξέλθει. Το σχήμα των καναλιών καθώς και το πλάτος και το βάθος τους έχει μεγάλο αντίκτυπο στο κατά πόσο ομοιόμορφα τα αντιδρώντα αέρια θα εξαπλωθούν κατά μήκος της ενεργού περιοχής της διάταξης ηλεκτρολύτη-ηλεκτροδίων. Ακόμη, τα κανάλια αυτά εξυπηρετούν την παροχή και την αφαίρεση νερού από και προς την κυψέλη.

Κάθε πλάκα λειτουργεί ακόμη και ως συλλέκτης ρεύματος. Ηλεκτρόνια που παράγονται κατά την οξείδωση του υδρογόνου πρέπει να οδηγηθούν κατά μήκος της ανόδου, μέσω του στρώματος διάχυσης και της πλάκας πριν εξέλθουν από την κυψέλη. Παράλληλα, πρέπει να «ταξιδέψουν» μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος και να εισέλθουν στην κυψέλη από το ηλεκτρόδιο της πλάκας καθόδου.

Οι διπολικές πλάκες χρησιμεύουν ακόμη στην εν σειρά σύνδεση πολλών κυψελών καυσίμου, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας συστοιχίας κυψελών (fuel cell stack). Σε μια συστοιχία κυψελών, υδρογόνο εισέρχεται στα κανάλια της διπολικής πλάκας ανόδου κάθε κυψέλης και οξυγόνο στα κανάλια της διπολικής πλάκας καθόδου κάθε κυψέλης. Οι πλάκες συνδέουν ολόκληρη την επιφάνεια της καθόδου μιας κυψέλης με ολόκληρη την επιφάνεια της ανόδου της επόμενης. Τα ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται κατά την οξείδωση του υδρογόνου σε κάθε μία από τις επί μέρους κυψέλες δεν κινούνται προς την κάθοδο της, καθώς δεν υπάρχει εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα που να τις συνδέει. Αντιθέτως, κινούνται προς την ηλεκτρικά αγώγιμη διπολική πλάκα της προηγούμενης κυψέλης της συστοιχίας. Εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα επιτρέπει τη ροή ηλεκτρονίων από την άνοδο της πρώτης κυψέλης της συστοιχίας προς την κάθοδο της τελευταίας.

Η ιδανική διπολική πλάκα πρέπει να είναι λεπτή για τον περιορισμό της ηλεκτρικής αντίστασης και του μεγέθους της κυψέλης. Ωστόσο, το γεγονός αυτό περιορίζει τη ροή των αερίων στα κανάλια και καθιστά δυσκολότερη την εισαγωγή τους στην κυψέλη. Τέλος, οι διπολικές πλάκες διαθέτουν επιπλέον κανάλια για την εισαγωγή ψυκτικού υγρού. Το ψυκτικό αυτό υγρό χρησιμεύει στην απομάκρυνση θερμότητας από την περιοχή επαφής των διπολικών πλακών δύο κυψελών καυσίμου οι οποίες συνδέονται ώστε να σχηματίσουν μια συστοιχία.



Εικόνα 3.2-2: Διπολικές πλάκες.

Άλλα μέρη ενός συστήματος κυψελών καυσίμου

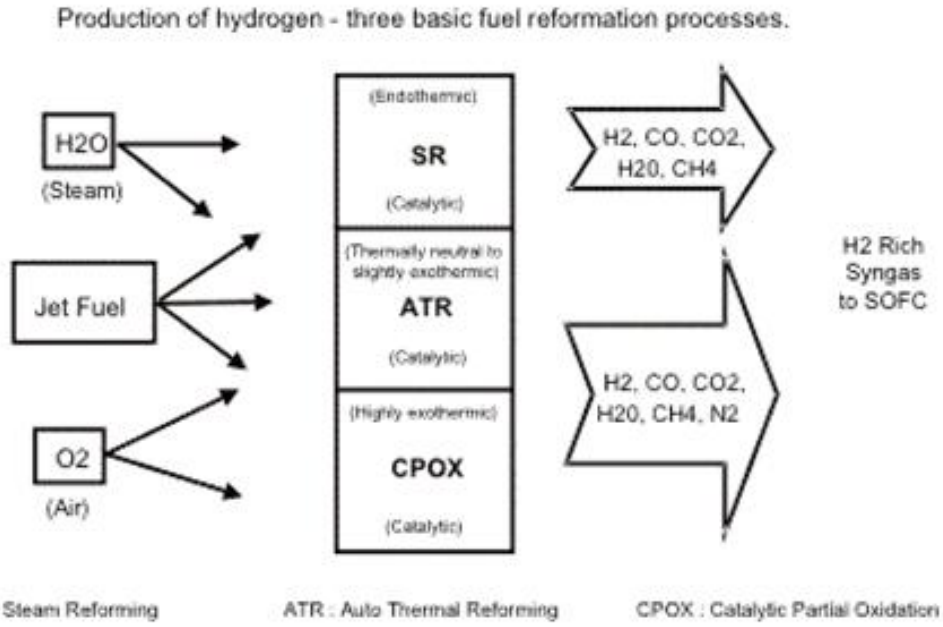
Τα παραπάνω μέρη αποτελούν τα κύρια κατασκευαστικά στοιχεία τα οποία απαρτίζουν μόνο την κυψέλη καυσίμου. Ωστόσο μια κυψέλη καυσίμου για να λειτουργήσει χρειάζεται αρκετά βοηθητικά μέρη ώστε να σχηματίζεται ένα πλήρες σύστημα. Τα πιο κύρια από αυτά είναι:

Ο αναμορφωτής καυσίμου

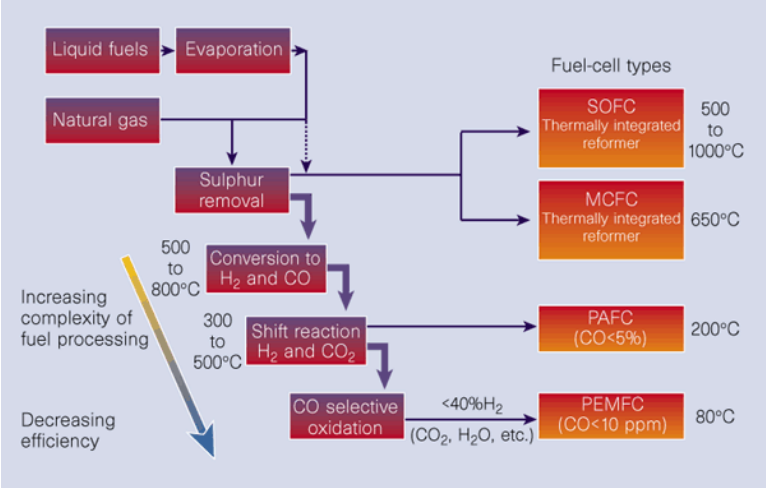
Για όλους τους τύπους κυψελών καυσίμου, ιδανικό καύσιμο αποτελεί το υδρογόνο, εξαιτίας της υψηλής δραστικότητάς του στην ηλεκτροχημική αντίδραση της ανόδου και επειδή το τελικό προϊόν της οξείδωσής του είναι το νερό που ασφαλώς δεν είναι ρύπος. Όμως το υδρογόνο δεν υπάρχει στη φύση με τη μορφή αέριου καυσίμου και ένας τρόπος για να το χρησιμοποιήσουμε είναι η παραγωγή του από άλλα διαθέσιμα καύσιμα. Αυτή λοιπόν η διαδικασία μετατροπής του αρχικού καυσίμου που παρέχεται σε μία κυψέλη, σε κατάλληλο γι' αυτήν καύσιμο, ονομάζεται αναμόρφωση και η συσκευή με την οποία συντελείται ονομάζεται αντίστοιχα αναμορφωτής.

Η αναμόρφωση είναι μια διαδικασία που εφαρμόζεται εδώ και πολλά χρόνια σε βιομηχανική κλίμακα (κυρίως στα διυλιστήρια) για την παραγωγή υδρογόνου σε μεγάλες ποσότητες. Το φυσικό αέριο είναι το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο καύσιμο για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται όμως σε μεγάλο βαθμό και πολλά από τα προϊόντα του αργού πετρελαίου όπως η βενζίνη, η κηροζίνη, το πετρέλαιο diesel και η νάφθα. Στην πραγματικότητα το τελικό προϊόν της αναμόρφωσης είναι το λεγόμενο syngas, ένα αέριο που αποτελείται κατά κύριο λόγο από υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα. Από αυτό το αέριο απομονώνεται το υδρογόνο για περαιτέρω χρήση σε πετροχημικά εργοστάσια και σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Το syngas αποτελεί επίσης το μέσο για τη σύνθεση δευτερευόντων καυσίμων όπως είναι η μεθανόλη και άλλες αλκοόλες, κάποιοι υγροί υδρογονάνθρακες μέσω της σύνθεσης Fischer-Tropsch, το οξικό οξύ κ.λ.π..

Οι βασικές τεχνολογίες αναμόρφωσης που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανική κλίμακα είναι η αναμόρφωση με ατμό (Steam Reforming – SR), η καταλυτική μερική οξείδωση (Catalytic Partial Oxidation - CPOX) και η αυτόθερμη αναμόρφωση (Auto Thermal Reforming – ATR). Η επιλογή τεχνολογίας αναμόρφωσης ενός καυσίμου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Ο παράγοντας που κυρίως καθορίζει την επιλογή αυτή είναι η περαιτέρω χρήση του υδρογόνου και οι ιδιαίτερες απαιτήσεις της.



Εικόνα 3.2-3: Τεχνολογίες αναμόρφωσης και τα παράγωγα τους.



Εικόνα 3.2-4: Επεξεργασία καυσίμου για τους διάφορους τύπους κυψελών καυσίμου.

Οι μετατροπείς και ελεγκτές ρεύματος

Διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος αποτελούμενες από DC – DC Converter και DC – AC Inverter οι οποίες διαμορφώνουν την παραγόμενη τάση και το παραγόμενο ρεύμα στις κατάλληλες συνθήκες οι οποίες απαιτούνται για την εκάστοτε χρήση.

Σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου

Τροφοδοτεί την κυψέλη με την κατάλληλη ποσότητα και τις απαραίτητες συνθήκες καυσίμου οι οποίες απαιτούνται .

Σύστημα διαχείρισης νερού

Μέσω αντλιών, σωληνώσεων και δεξαμενών εξασφαλίζει την κατάλληλη ποσότητα νερού επί της κυψέλης.

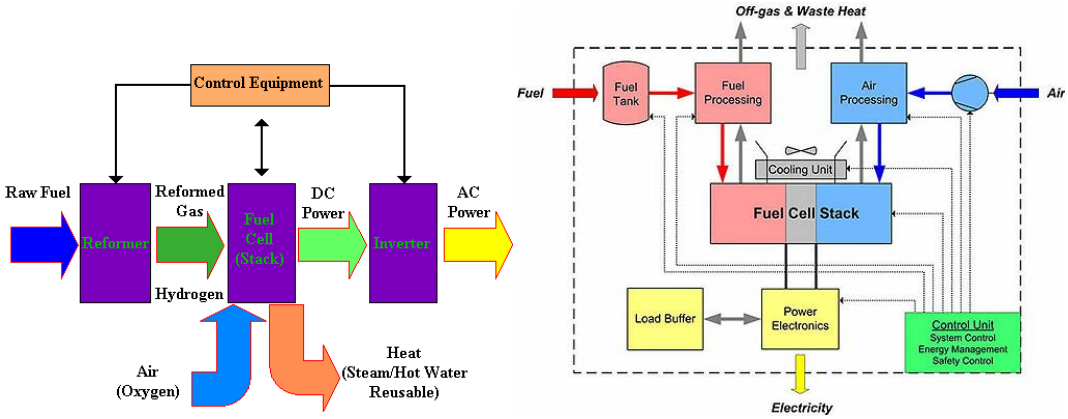
Σύστημα ψύξης και Σύστημα διαχείρισης θερμότητας

Το σύστημα ψύξης ψύχη την κυψέλη ώστε να λειτουργεί στη φυσιολογική της θερμοκρασία και να αποφεύγονται φθορές και αστοχίες υλικών λόγω θερμικής καταπόνησης.

Το σύστημα διαχείρισης θερμότητας συλλέγει την αποβαλλόμενη θερμότητα ώστε αυτή να αξιοποιηθεί σε συστήματα συμπαραγωγής, θέρμανση χώρων, παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, κύκλους ψύξης ή αντλίες θερμότητας κ.α..

Ελεγκτής λειτουργίας

Είναι ένα σύστημα ελέγχου το οποίο με τις κατάλληλες διατάξεις ελέγχει την σωστή λειτουργία όλων των υποσυστημάτων όπως είναι, η διαχείριση των υδάτων, η ροή του καυσίμου, η διαχείριση της θερμότητας και της θερμοκρασίας και η διαχείριση της παραγόμενης και της ζητούμενης ενέργειας.



Εικόνα 3.2-5: Ολοκληρωμένα συστήματα.

3.3 Αρχή λειτουργίας

Όπως προαναφέρθηκε ανάλογα με το είδος του ηλεκτρολύτη η αρχή λειτουργίας μια κυψέλης καυσίμου μπορεί να περιγράφεται σε δυο διαφορετικές περιπτώσεις, καθώς η πόλωση των ιόντων και η κατεύθυνση μεταφοράς τους μπορεί να διαφέρει, καθορίζοντας αντίστοιχα την περιοχή παραγωγής νερού και θερμότητας.

Περίπτωση θετικών ιόντων:

Το καύσιμο (συνήθως υδρογόνο) εισέρχεται στην κυψέλη στην πλευρά της ανόδου. Μέσω των καναλιών στις διπολικές πλάκες και του στρώματος διάχυσης αερίων διαχέεται ομοιόμορφα προς την επιφάνια του ηλεκτροδίου. Η πορώδης δομή του ηλεκτροδίου παρέχει την απαραίτητη επιφάνεια προκειμένου να ενισχυθούν οι αντιδράσεις καθώς επίσης και να διευκολυνθεί η μεταφορά μάζας των αντιδρώντων. Ερχόμενο σε επαφή το καύσιμο με το ηλεκτρόδιο, λαμβάνει χώρα η ηλεκτροχημική καύση του υδρογόνου, όπου με τη βοήθεια του καταλύτη το υδρογόνο διαχωρίζεται σε θετικά φορτισμένα ιόντα και ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια τα οποία απελευθερωθήκαν άγονται από το ηλεκτρόδιο και μεταφέρονται μέσω εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος προς την κάθοδο, δημιουργώντας ηλεκτρισμό. Τα θετικά ιόντα, (ιόντα υδρογόνου) άγονται από τον ηλεκτρολύτη και διαπερνώντας τον έρχονται σε επαφή με το θετικό ηλεκτρόδιο της διάταξης, την κάθοδο. Στην κάθοδο τροφοδοτείτε το οξειδωτικό μέσο (οξυγόνο, συνήθως από τον ατμοσφαιρικό αέρα) και λαμβάνει χώρα η ηλεκτροχημική αναγωγή του οξυγόνου. Με την βοήθεια του καταλύτη το οξυγόνο αντιδρά με τα ηλεκτρόνια τα οποία ρέουν από την άνοδο προς την κάθοδο μέσω του εξωτερικό κυκλώματος και με τα θετικά ιόντα τα οποία διαπέρασαν τον ηλεκτρολύτη σχηματίζοντας νερό σε υγρή ή ατμοποιημένη μορφή και παράγοντας θερμότητα. Οι παραπάνω αντιδράσεις είναι οι εξής:

Αντίδραση ανόδου:

$$H_2 \longrightarrow 2H^+ + 2e^- \qquad (3.3-1)$$

Αντίδραση καθόδου:

$$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2O \qquad (3.3-2)$$

Συνολική αντίδραση:

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O + (\text{ηλεκτρική ενέργεια} + \text{θερμότητα}) \qquad (3.3-3)$$

Περίπτωση αρνητικών ιόντων:

Το οξειδωτικό μέσο τροφοδοτείται στην κάθοδο όπου με την πρόσληψη ηλεκτρονίων από το εξωτερικό κύκλωμα ανάγεται σε αρνητικά ιόντα (ιόντα οξυγόνου). Τα ιόντα οξυγόνου μετακινούνται μέσω του αγώγιμου ηλεκτρολύτη στην άνοδο. Εκεί αντιδρούν με το καύσιμο το οποίο τροφοδοτείτε απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια και παράγοντας νερό και πλεονάζουσα θερμότητα. Τα ηλεκτρόνια μέσω εξωτερικού κυκλώματος οδηγούνται από την άνοδο στην κάθοδο παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα. Στην κάθοδο τα ηλεκτρόνια αντιδρούν με τα μόρια οξυγόνου παράγοντας νέα ιόντα οξυγόνου. Οι αντιδράσεις είναι οι εξής:

Αντίδραση ανόδου:

$$\mathrm{H_2 + O^{2-} \longrightarrow H_2O + 2e^-} \qquad (3.3-4)$$

Αντίδραση καθόδου:

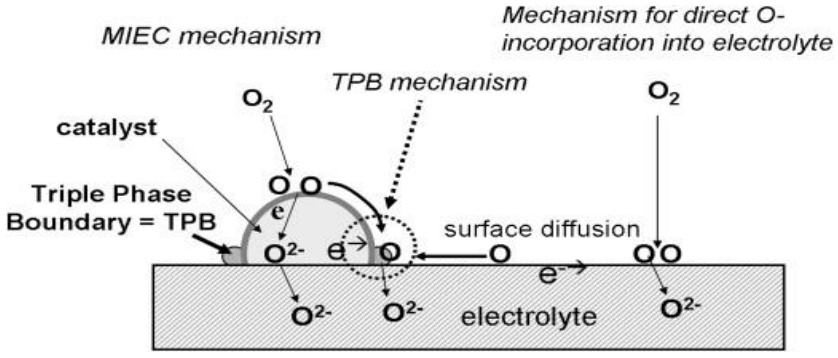
$$\frac{1}{2}\mathrm{O_2 + 2e^- \longrightarrow O^{2-}} \qquad (3.3-5)$$

Συνολική αντίδραση:

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O + (\text{ηλεκτρική ενέργεια} + \text{θερμότητα}) \qquad (3.3-6)$$

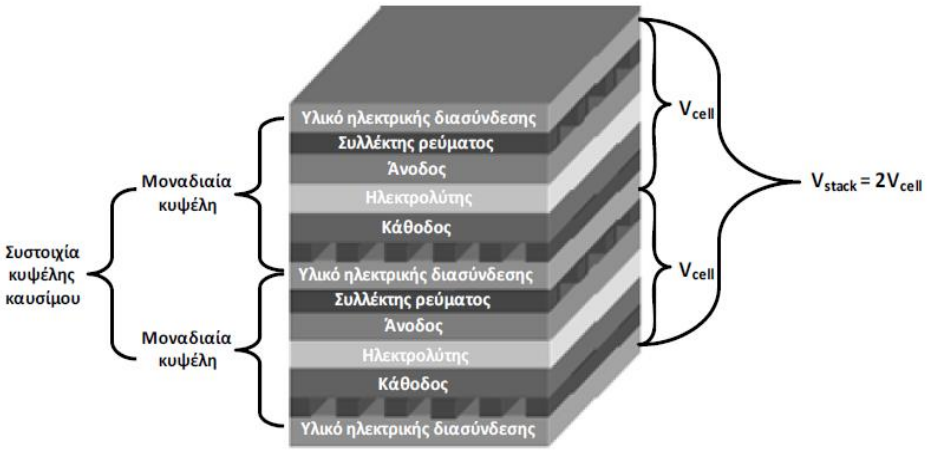
Γενικά, όπως φαίνεται από τα παραπάνω, ανεξάρτητα από το συγκεκριμένο τύπο κυψελών καυσίμου, τα αέρια καύσιμα (συνήθως υδρογόνο) και τα οξειδωτικά αέρια μίγματα (συνήθως ατμοσφαιρικός αέρας) τροφοδοτούνται συνεχώς στην άνοδο και στην κάθοδο, αντίστοιχα. Τα αέρια ρεύματα των αντιδρώντων δεν αναμιγνύονται, 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 (Three Phase Boundary, TPB) μεταξύ της αέριας φάσης, του ηλεκτρολύτη και του ηλεκτροδίου-καταλύτη.



Εικόνα 3.3-1: Όριο τριών φάσεων (Three Phase Boundary, TPB)

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–καύση του υδρογόνου διατηρεί μια διαφορά στο χημικό δυναμικό του ηλεκτρο–ενεργού είδους (το αγώγιμο 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.



Εικόνα 3.3-2: Απεικόνιση της δομής μίας συστοιχίας κυψελών καυσίμου επίπεδης γεωμετρίας.

Ο 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 3.3-2 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.

3.4 Θερμοδυναμική ανάλυση

Για να μελετηθεί η λειτουργία και η απόδοση της κυψέλης καυσίμου είναι αναγκαία η ανάλυση των θερμοδυναμικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία της. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η κυψέλη καυσίμου είναι συσκευή ηλεκτροχημικής μετατροπής ενέργειας. Αξιοποιεί την ενέργεια που εκλύεται από τη χημική αντίδραση του υδρογόνου και του οξυγόνου προς σχηματισμό νερού, παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και θερμότητας.

Το θερμοδυναμικό μέγεθος που αποτελεί τη βάση για την ενεργειακή ανάλυση των φαινομένων που συμβαίνουν σε ένα κελί καυσίμου και το οποίο δίνει τη δυνατότητα ποσοτικού προσδιορισμού της παραγόμενης από αυτό ηλεκτρικής ενέργειας, είναι η ελεύθερη ενέργεια Gibbs (G). Ως ελεύθερη ενέργεια Gibbs ορίζεται «η διαθέσιμη ενέργεια για την παραγωγή εξωτερικού έργου αμελώντας το έργο που καταναλώνεται από τις αλλαγές της πίεσης ή και του όγκου». Η ελεύθερη ενέργεια Gibbs αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ποσότητα "ωφέλιμης" ενέργειας που μπορεί να προσφερθεί από ένα σύστημα στο περιβάλλον, όταν η διεργασία που συμβαίνει σ' αυτό είναι αντιστρεπτή και συντελείται σε σταθερή πίεση και θερμοκρασία. Με τον όρο "ωφέλιμη ενέργεια" εννοείται κάθε μορφής ενέργεια που παράγεται από το σύστημα εκτός από την ενέργεια που συνδέεται με τη μεταβολή του όγκου ή/και της πίεσης του συστήματος.

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 → cC + dD:

$$\mathrm{Wel} = \Delta \mathrm{G} = -\mathrm{nFE} \qquad (3.4-1)$$

όπου n είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που συμμετέχουν στην αντίδραση, F είναι η σταθερά του Faraday (96485 Cb/mole) και E το αντιστρεπτό δυναμικό της κυψέλης ή το δυναμικό σε ισορροπία (δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος).

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

$$\Delta \mathrm{G} = \Delta \mathrm{H} - \mathrm{T}\Delta \mathrm{S} \qquad (3.4-2)$$

όπου το ΔH αποτελεί το συνολικό θερμικό περιεχόμενο της τροφοδοσίας και TΔS 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:

$$\Delta \mathrm{G} = \Delta \mathrm{G}^{\circ} + \mathrm{RT}\ln\frac{[\mathrm{C}]^{\mathrm{c}}[\mathrm{D}]^{\mathrm{d}}}{[\mathrm{A}]^{\mathrm{a}}[\mathrm{B}]^{\mathrm{b}}} \qquad (3.4-3)$$

Το αντιστρεπτό δυναμικό (reversible fuel cell potential) ή δυναμικό στην ισορροπία γίνεται ίσο με:

$$\mathrm{E} = -\frac{\Delta G^{o}}{nF} + \frac{\mathrm{RT}}{\mathrm{nF}}\ln\frac{[\mathrm{A}]^{\mathrm{a}}[\mathrm{B}]^{\mathrm{b}}}{[\mathrm{C}]^{\mathrm{c}}[\mathrm{D}]^{\mathrm{d}}} =$$

$$= \mathrm{E}^{\circ} + \frac{\mathrm{RT}}{\mathrm{nF}}\ln\frac{[\mathrm{A}]^{\mathrm{a}}[\mathrm{B}]^{\mathrm{b}}}{[\mathrm{C}]^{\mathrm{c}}[\mathrm{D}]^{\mathrm{d}}} \qquad (3.4-4)$$

Η Εξίσωση (3.4-4) αποτελεί την γενική μορφή της εξίσωσης Nernst, όπου το ΔG^{o} και το E° αναφέρονται στις πρότυπες συνθήκες δηλαδή σε θερμοκρασία 298 K (25 °C) και πίεση 1 atm. Η ιδανική απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου προσδιορίζεται από το δυναμικό που καθορίζεται από την εξίσωση Nernst. Ο Πίνακας 3.4-1 παρουσιάζει τις εξισώσεις Nernst που ποσοτικοποιούν τη συσχέτιση μεταξύ του

ιδανικού πρότυπου δυναμικού (E°) 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 (όπου R: η παγκόσμια σταθερά των αερίων με τιμή $8{,}314\frac{Joule}{mol\cdot K}$ και $p_{H_2}, p_{O_2}, \ p_{H_2O}$: οι μερικές πιέσεις του υδρογόνου του οξυγόνου και του νερού αντίστοιχα).

Πίνακας 3.4-1: Εξισώσεις Nernst και ιδανικά δυναμικά για τους διάφορους τύπους κυψελών καυσίμου.

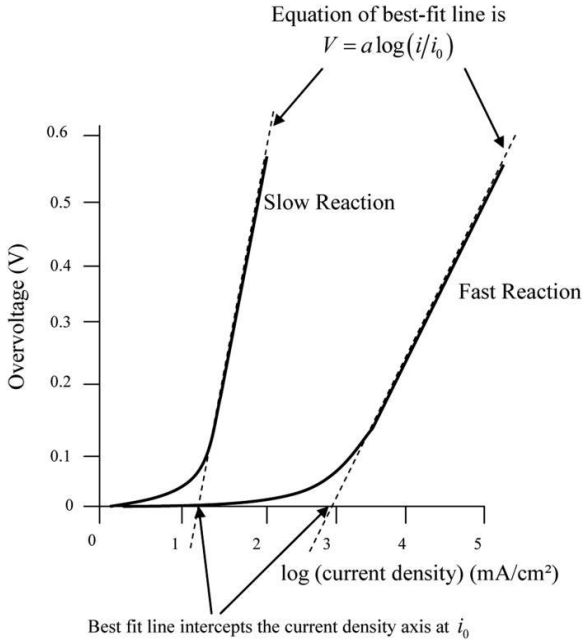
Τύπος	Συνολική αντίδραση	Εξίσωση Nernst	T, °C	E, V
AFC	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 + H_2O \longrightarrow 2H_2O$	$E = E° + \frac{RT}{2F} ln \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{1/2} p_{H_2O}^{anod}}{p_{H_2O} p_{H_2O}^{cath}}$	100	1,17
PEFC PAFC SOFC	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O$	$E = E° + \frac{RT}{2F} \ln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

Όπως εμφανίζει ο Πίνακας 3.4-1, 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, activation overpotential, η_{act}), ή/και από τις ωμικές απώλειες (ωμική υπέρταση, ohmic overpotential, 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, concentration overpotential, η_{conc}).

<u>Απώλειες ενεργοποίησης</u>

Οι απώλειες ενεργοποίησης οφείλονται στην αργή ταχύτητα των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Η συγκέντρωση των φορέων (πρωτόνια και ηλεκτρόνια) στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων και του ηλεκτρολύτη δημιουργούν ένα ‘’κινητικό φράγμα’’ το οποίο καθυστερεί τις χημικές αντιδράσεις. Γι` αυτό το λόγο ένα μέρος της τάσης που παράγεται χάνεται στην προσπάθεια να πραγματοποιηθούν οι χημικές αντιδράσεις που θα μεταφέρουν τα ηλεκτρόνια.

Το 1905 ο Julius Tafel παρατήρησε ότι η υπέρταση στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων ακολουθεί το ίδιο πρότυπο για μια μεγάλη ομάδα ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Αυτό το γενικό πρότυπο παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Διάγραμμα 3.4-1: Διάγραμμα του Tafel για αργές και γρήγορες ηλεκτροχημικές αντιδράσεις.

Το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει από την εξίσωση του Tafel, η οποία δίνει της τιμές της υπέρτασης:

$$V_{act} = A \cdot \ln(\frac{j}{j_o}) \qquad (3.4-5)$$

και ισχύει για $j > j_o$.

όπου
A: η σταθερά Tafel της ηλεκτροχημικής αντίδρασης
J: η πυκνότητα ρεύματος
Jo: η πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής

Για μια κυψέλη καυσίμου υδρογόνου στην οποία μεταφέρονται δύο ηλεκτρόνια ανά mol, η σταθερά A δίνεται από τη σχέση:

$$A = \frac{RT}{2\alpha F} \qquad (3.4-6)$$

Ο συντελεστής α καλείται συντελεστής μεταφοράς φορτίου (charge transfer coefficient) και είναι το κλάσμα της διαφοράς δυναμικού στην επιφάνεια ενός ηλεκτροδίου που βοηθά στην μείωση του ενεργειακού φράγματος που απαιτείται να ξεπεραστεί για να μπορέσει να συμβεί η ηλεκτροχημική αντίδραση. Οι τιμές του συντελεστή α κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1.0 και εξαρτώνται από το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένο το ηλεκτρόδιο. Για το ηλεκτρόδιο υδρογόνου και για μια μεγάλη ποικιλία υλικών η τιμή του συντελεστή α είναι 0.5. Στο ηλεκτρόδιο του οξυγόνου ο συντελεστής α παρουσιάζει μεγαλύτερη διακύμανση, αλλά οι τιμές του παραμένουν στην περιοχή μεταξύ 0.1 και 0.5.

Η πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής j_o είναι η πυκνότητα ρεύματος που παρατηρείται όταν η αντίδραση που συμβαίνει στο ηλεκτρόδιο είναι σε ισορροπία δηλαδή όταν οι ταχύτητες των αντιδράσεων της ανόδου και της καθόδου και κατά συνέπεια οι αντίστοιχες πυκνότητες ρεύματος, είναι ίσες χωρίς να είναι μηδενικές. Η τιμή που έχει η πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής σε μια ηλεκτροχημική αντίδραση,

είναι μεγαλύτερη όσο ταχύτερη είναι η ηλεκτροχημική αντίδραση που συμβαίνει και εξαρτάται από παράγοντες όπως η σύνθεση του ηλεκτροδίου, η τραχύτητά του, η θερμοκρασία και η συγκέντρωση των οξειδωτικών και αναγωγικών συστατικών στο σύστημα. Γενικά η τιμή της πυκνότητας ρεύματος ανταλλαγής έχει πολύ σημαντική επίδραση στην απόδοση των ηλεκτροδίων του κελιού καυσίμου και επιδιώκεται να είναι όσο υψηλότερη είναι εφικτό, μιας και αυτό ισοδυναμεί με χαμηλότερη πτώση τάσης.

Η σταθερά Α στην εξίσωση (3.4-5) εξαρτάται από την ταχύτητα της ηλεκτροχημικής δράσης και αυξάνεται όσο πιο βραδεία είναι η αντίδραση. Τέλος, να σημειωθεί ότι αν και από την εξίσωση (3.4-6) φαίνεται ότι η πτώση τάσης αυξάνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία, αυτό δεν ισχύει μιας και η αύξηση της θερμοκρασίας έχει επίδραση στην τιμή της j_o , επίδραση σημαντικότερη από τη μεταβολή που προκαλείται στην τιμή της σταθεράς Α. Στην πραγματικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες η υπέρταση ενεργοποίησης όχι απλώς δεν αυξάνεται αλλά γίνεται λιγότερο σημαντική.

<u>Ωμικές απώλειες</u>

Οι ωμικές απώλειες που παρατηρούνται σε ένα κελί καυσίμου προκύπτουν από την αντίσταση που προβάλλουν τα διάφορα στοιχεία που συνθέτουν την κυψέλη στη διέλευση του ηλεκτρικού φορτίου. Στην αντίσταση αυτή συμβάλλουν όλα τα στοιχεία που παρεμβάλλονται στη διαδρομή του φορτίου, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτροδίων, του ηλεκτρολύτη, του στρώματος καταλύτη, του στρώματος διάχυσης καυσίμου, των διπολικών πλακών και των επαφών διασύνδεσης. Γενικά οι προκαλούμενες απώλειες διακρίνονται κυρίως σε δύο είδη, στις απώλειες λόγω της αντίστασης που προβάλλεται στη ροή των μετακινούμενων ηλεκτρονίων e^- κατά μήκος της διαδρομής τους (R_{elec}) καθώς και στις απώλειες λόγω της αντίστασης που προβάλλει ο ηλεκτρολύτης στη ροή των ιόντων μέσα από αυτόν (R_{ionic}). Αυτό μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$V_{ohmic} = iR_{ohmic} = i(R_{elec} + R_{ionic}) \quad (3.4-7)$$

Στις περισσότερες κυψέλες καυσίμου, εκ των δύο αντιστάσεων η συμβολή της R_{ionic} είναι κυρίαρχη αν και η R_{elec} που μπορεί να παρουσιαστεί λόγω έλλειψης καλής επαφής μεταξύ των κελιών και των διαφόρων στρωμάτων αγωγής μπορεί επίσης να παίζει σημαντικό ρόλο. Αυτό συμβαίνει επειδή η μετακίνηση των ιόντων μέσα στον ηλεκτρολύτη είναι αρκετά πιο δύσκολη από τη μετακίνηση των ηλεκτρονίων κατά μήκος του σχηματιζόμενου κυκλώματος, με αποτέλεσμα οι κυριότερες ωμικές απώλειες να προκύπτουν από την αντίσταση που προβάλλεται στη ροή των ιόντων. Κοινές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μείωση των ωμικών απωλειών αποτελούν η κατασκευή ηλεκτρολυτών με όσο το δυνατόν μικρότερο πάχος καθώς και η χρήση υλικών υψηλής αγωγιμότητας με καλές διασυνδέσεις μεταξύ τους.
Η πτώση τάσης που προκύπτει λόγω ωμικών απωλειών εκφράζεται συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος j ως ακολούθως:

$$V_{ohmic} = j(A_{cell} R_{ohmic}) = j(ASR_{ohmic}) \quad (3.4-8)$$

Όπου: A_{cell} είναι η ενεργή επιφάνεια του κελιού καυσίμου (cm^2) και
ASR_{ohmic} (Ω cm^2) είναι η ανά επιφάνεια ειδική αντίσταση (area-specific resistance) κάθε κελιού καυσίμου.

Απώλειες συγκέντρωσης ή μεταφοράς μάζας

Απαραίτητη προϋπόθεση για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος σε μια κυψέλη καυσίμου είναι η συνεχής τροφοδοσία των κελιών της με καύσιμο και οξειδωτικό. Κατά τη λειτουργία ενός κελιού καυσίμου, λόγω των διεξαγόμενων αντιδράσεων η συγκέντρωση των παρεχόμενων αερίων υφίσταται μια διαρκή μείωση, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από την ποσότητα ρεύματος που παρέχεται στο τροφοδοτούμενο φορτίο καθώς και από φυσικούς παράγοντες που σχετίζονται με την αποτελεσματικότητα της κυκλοφορίας του κάθε αερίου. Η πτώση της συγκέντρωσης των αερίων προκαλεί αντίστοιχα πτώση στη μερική πίεσή τους, το οποίο συνεπάγεται την ύπαρξη απωλειών τάσης. Λόγω του γεγονότος ότι οι απώλειες αυτές οφείλονται στην αδυναμία του συστήματος τροφοδοσίας να καλύψει άμεσα την παρατηρούμενη πτώση στη συγκέντρωση των αερίων, οι απώλειες αυτές καλούνται απώλειες μεταφοράς μάζας (mass transport losses), ή αλλιώς απώλειες συγκέντρωσης (concentration losses). Η δράση των απωλειών αυτών γίνεται ιδιαίτερα εμφανής στις υψηλές πυκνότητες ρεύματος.

Για την εύρεση της σχέσης υπολογισμού της πτώσης τάσης λόγω απωλειών συγκέντρωσης V_{conc} ας θεωρηθεί μια μεταβολή στην τιμή της μερικής πίεσης του υδρογόνου από την τιμή P1 στην τιμή P2 , θεωρώντας ότι οι μερικές πιέσεις του οξυγόνου p_{O_2}και του νερού p_{H_2O} αντίστοιχα παραμένουν αμετάβλητες. Σύμφωνα με την εξίσωση (3.4-8), η πτώση τάσης που παρατηρείται θα είναι:

$$\Delta V = E_1 - E_2 =$$

$$= E° + \frac{RT}{2F} ln\left[\frac{p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}}\right] + \frac{RT}{2F} ln\left[p_{H_2(2)}\right] - E° - \frac{RT}{2F} ln\left[\frac{p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}}\right] - \frac{RT}{2F} ln\left[p_{H_2(1)}\right] =$$

$$= \frac{RT}{2F} ln(P_2) - \frac{RT}{2F} ln(P_1) =$$

$$= \frac{RT}{2F} ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \qquad (3.4-9)$$

Η παραπάνω εξίσωση συνδέει την πτώση τάσης του κελιού με τη μεταβολή στη μερική πίεση του τροφοδοτούμενου υδρογόνου. Η μεταβολή της μερικής πίεσης του υδρογόνου μπορεί να συνδεθεί με την πυκνότητα ρεύματος με τον ακόλουθο τρόπο. Αν υποτεθεί ότι η πυκνότητα ρεύματος j του κελιού είναι γραμμική συνάρτηση της μερικής πίεσης του υδρογόνου P και ότι το αέριο υδρογόνο που εισέρχεται στην άνοδο καταναλώνεται με ρυθμό ίσο με τον μέγιστο δυνατό ρυθμό παροχής του, τότε η μερική πίεσή του είναι μηδενική και το ρεύμα που παράγεται λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του j_{max} . Από την άλλη, αν P_{OC} είναι η πίεση που αντιστοιχεί στην τάση ανοιχτού κυκλώματος τότε το παραγόμενο ρεύμα στην πίεση αυτή θα είναι μηδενικό. Έτσι, γνωρίζοντας αυτά τα δύο σημεία της συνάρτησης $j(P)$, η εξίσωση της ευθείας της προκύπτει από τον αντίστοιχο τύπο:

$$j - j_{max} = \frac{j_{max} - 0}{0 - P_{OC}}(P - 0) \Rightarrow$$

$$\frac{P}{P_{OC}} = 1 - \frac{j}{j_{max}} \qquad (3.4-10)$$

Αν θεωρηθεί ότι η αρχική πίεση P_1 είναι η πίεση που αντιστοιχεί στην τάση ανοιχτού κυκλώματος P_{OC} ενώ η πίεση P_2 είναι η πίεση που αντιστοιχεί στην πυκνότητα ρεύματος j , τότε με βάση τις εξισώσεις (3.4-9) και (3.4-10) προκύπτει ότι

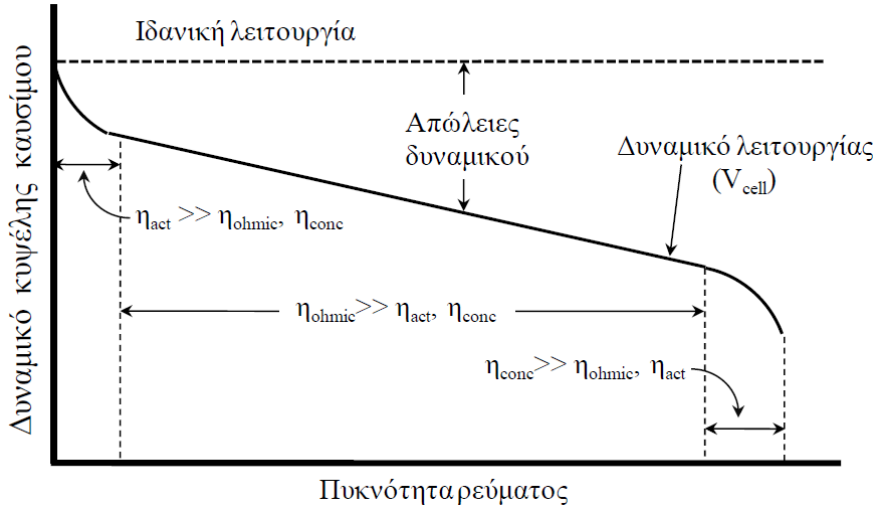
$$\Delta V = \frac{RT}{2F}\ln\left(\frac{P}{P_{OC}}\right) \Rightarrow$$

$$V_{conc} = \left|\frac{RT}{2F}\ln\left(1-\frac{j}{j_{max}}\right)\right| \Rightarrow$$

$$V_{conc} = -\frac{RT}{2F}\ln\left(1-\frac{j}{j_{max}}\right) \qquad (3.4-11)$$

Ο όρος $RT/2F$ είναι διαφορετικός για το κάθε αντιδρών αέριο, για παράδειγμα για το οξυγόνο θα είναι $RT/4F$. Γενικά, ο όρος αυτός στη γενική έκφραση των απωλειών συγκέντρωσης αντικαθίσταται από μια σταθερά B , η οποία εξαρτάται από το είδος του κελιού καυσίμου και τις συνθήκες λειτουργίας του. Έτσι, η εξίσωση υπολογισμού παίρνει την τελική της μορφή:

$$V_{conc} = -B\ln\left(1-\frac{j}{j_{max}}\right) \qquad (3.4-12)$$



Διάγραμμα 3.4-2: Ιδανικό και πραγματικό δυναμικό μίας κυψέλης καυσίμου.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω και παρατηρώντας το διάγραμμα (3.4-2) βλέπουμε ότι 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:

$$\mathrm{V_{cell}} = \left(\mathrm{E_{cath}} - \left|\eta_{\mathrm{act}}^{\mathrm{cath}}\right| - \left|\eta_{\mathrm{conc}}^{\mathrm{cath}}\right|\right) - \left(\mathrm{E_{anod}} + \left|\eta_{\mathrm{act}}^{\mathrm{anod}}\right| + \left|\eta_{\mathrm{conc}}^{\mathrm{anod}}\right|\right) - \mathrm{IR} \qquad (3.4-13)$$

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– Vcell (Διάγραμμα 3.4-2), η παραγόμενη πυκνότητα ισχύος (ισχύς ανά φαινόμενη επιφάνεια ηλεκτροδίου) υπολογίζεται από το γινόμενο του Vcell 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 στο διάγραμμα (3.4-3).

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 θερμογόνος δύναμη - heating value, HV).

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:

$$\eta_{\mathrm{ideal}} = \frac{\Delta \mathrm{G^o}}{\Delta \mathrm{H^o}} = \frac{-\mathrm{nFE^o}}{\Delta \mathrm{H^o}} \qquad (3.4-14)$$

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

$$\eta_{th} = \frac{-nFV_{cell}}{\Delta H^o} = \eta_{\mathrm{ideal}} \frac{-nFV_{cell}}{-nFE^o} = \eta_{\mathrm{ideal}} \frac{V_{cell}}{E^o} \qquad (3.4-15)$$

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.

Όμως, η παραπάνω σχέση μας δίνει την απόδοση της κυψέλης στην περίπτωση που όλο το καύσιμο που εισέρχεται σε αυτή αντιδρά. Στην πράξη δε συμβαίνει αυτό, γιατί ένα μέρος του υδρογόνου που εισέρχεται στην άνοδο δεν αντιδρά και είτε εξέρχεται από την άνοδο, οπότε μπορεί να εισαχθεί πάλι στην είσοδο της, είτε μέσω του φαινομένου διαρροής (crossover) περνά μέσα από τον ηλεκτρολύτη και καταλήγει στην κάθοδο όπου αντιδρά με το οξυγόνο. Έτσι, ορίζεται ένας συντελεστής (ή παράγοντας) χρησιμοποίησης. 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

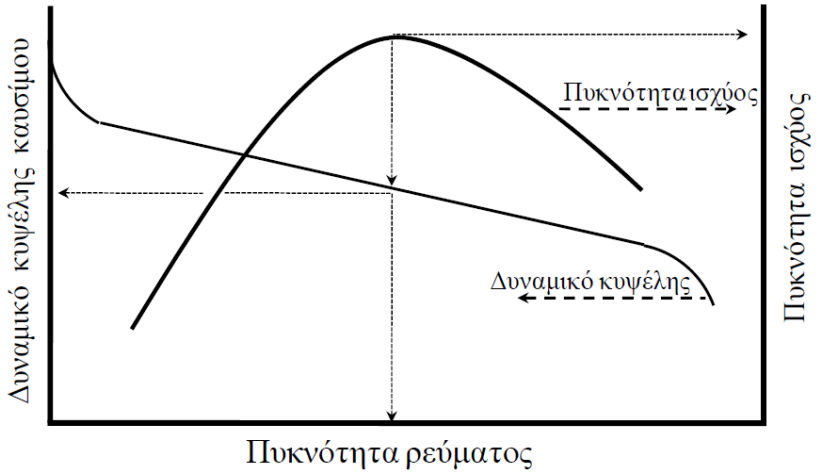
μοναδικό αντιδρών καύσιμο που λαμβάνει μέρος στην ηλεκτροχημική αντίδραση και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$u_f = \frac{H_{2_{in}} - H_{2_{out}}}{H_{2_{in}}} = \frac{H_{2_r}}{H_{2_{in}}} \qquad (3.4-16)$$

Όπου: $H_{2_{in}}$: το υδρογόνο που εισέρχεται στην άνοδο της κυψέλης.
$H_{2_{out}}$: το υδρογόνο που εξέρχεται στην κάθοδο.
H_{2_r}: το υδρογόνο που αντιδρά στο εσωτερικό της κυψέλης.

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης μειώνει την απόδοση της κυψέλης και η τελική πλέον απόδοση δίνεται από την σχέση:

$$n_{final} = n \cdot u_f \qquad (3.4-17)$$



Διάγραμμα 3.4-3: Εξάρτηση της πυκνότητας ισχύος από το δυναμικό 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 στο διάγραμμα (3.4-3), 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.

Για να αξιοποιήσουμε περεταίρω τα στοιχεία που είδαμε σ’ αυτό το κεφάλαιο έγκειται η χρησιμότητα μιας σύγκρισης των κυψελών καυσίμου όσων αναφορά τον βαθμό απόδοσης και άλλα πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα που παρουσιάζουν σχετικά με άλλες διαθέσιμές πηγές παραγωγής ενέργειας.

Κεφάλαιο 4

Σύγκριση των κυψέλων αέριων καυσίμων με άλλες πηγές παραγωγής ενέργειας.

4.1 Εισαγωγή

Κάθε φυσικό σύστημα περιέχει (ή εναλλακτικά αποθηκεύει) μία ποσότητα ενέργειας. Ως πηγή (ή «αποθήκη») ενέργειας χαρακτηρίζεται καθετί που μπορεί, άμεσα ή έμμεσα να προσφέρει ενέργεια. Ο συχνά χρησιμοποιούμενος όρος "Πηγές Ενέργειας" δεν ευσταθεί από επιστημονικής απόψεως διότι σύμφωνα με το νόμο διατήρησης της ενέργειας, η ενέργεια δεν μπορεί ούτε να δημιουργηθεί από το μηδέν, αλλά ούτε και να καταστραφεί. Απλώς αλλάζει μορφές, είτε με φυσικό τρόπο είτε τεχνητά, με διάφορους τρόπους. Γενικά όμως ο όρος Πηγές Ενέργειας περιγράφει τη δυνατότητα παραγωγής ενέργειας χρήσης.

Μια βασική διάκριση μεταξύ των ενεργειακών πηγών γίνεται με βάση την περιορισμένη ή όχι διαθεσιμότητά τους με την πάροδο του χρόνου. Έτσι οι γαιάνθρακες, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και τα πυρηνικά καύσιμα αποτελούν τις λεγόμενες "συμβατικές πηγές ενέργειας" (Σ.Π.Ε). Είναι δηλαδή πηγές που υπάρχουν αυτούσιες στη φύση σε ορισμένες ποσότητες και ανανεώνονται δύσκολα ή καθόλου. Αντίθετα υπάρχουν και οι λεγόμενες "ανανεώσιμές πηγές ενέργειας" (Α.Π.Ε.) οι οποίες υπάρχουν εν αφθονία στο φυσικό περιβάλλον και είναι κατά μια έννοια, ανεξάντλητες αφού προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ο ήλιος, ο άνεμος, οι υδατοπτώσεις, ο θαλάσσιος κυματισμός, η γεωθερμία και η βιομάζα. Οι "Πηγές Ενέργειας" διακρίνονται ακόμη σε αυτογενείς ή πρωταρχικές, δηλαδή πηγές ενέργειας οι οποίες είναι αποθηκευμένες ή υπάρχουν στη φύση (π.χ. πυρήνες ατόμων, ήλιος, γαιάνθρακες ή πετρέλαιο) και τεχνητές στις οποίες αποθηκεύεται ενέργεια με τεχνητό τρόπο (π.χ. αντλισιοταμιευτήρες, ηλεκτρικοί συσσωρευτές).

Τόσο οι Σ.Π.Ε. όσο και οι Α.Π.Ε. όπως εμφανίζονται στο αρχικό στάδιο μετατροπής (γαιάνθρακες, ορυκτό πετρέλαιο, πυρηνικά καύσιμα, ηλιακή ακτινοβολία) αποτελούν πρωτογενή ενέργεια $E_{πρωτ}$. (πίνακας 4.1-1). Από την πρωτογενή ενέργεια, με κατάλληλες ενεργειακές μετατροπές (όπως π.χ. καύση, πυρηνική σχάση, φωτοβολταϊκή μετατροπή κλπ.) λαμβάνεται η χρήσιμη ενέργεια στην επιθυμητή μορφή χρήσης της, δηλαδή η ενέργεια τελικής χρήσης $E_{τχ}$.. Σε πολλές περιπτώσεις μετά (ή παράλληλα με) την ενεργειακή μετατροπή, απαιτείται και μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας ή και δεύτερη μετατροπή της (π.χ. θερμική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρισμό και του ηλεκτρισμού πάλι σε θερμική ενέργεια). Κάθε ενεργειακή μετατροπή ή και μεταφορά συνοδεύεται από ενεργειακές απώλειες και χαρακτηρίζεται από ένα βαθμό απόδοσης (πίνακας 4.1-2)

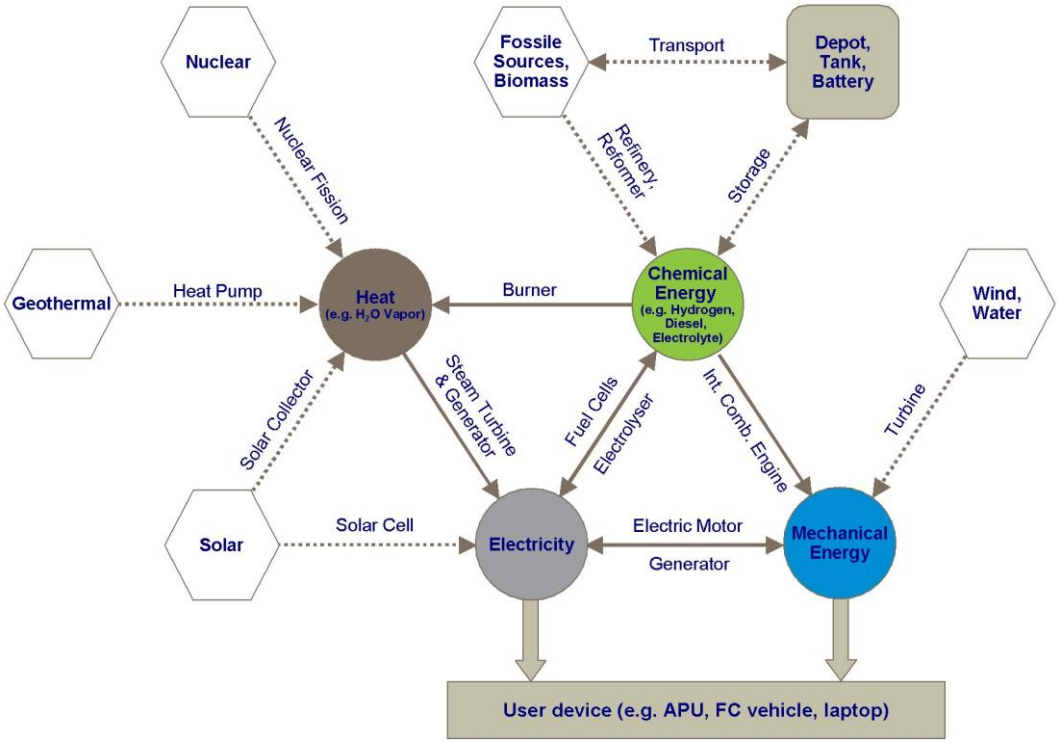
Σ.Π.Ε. - Συμβατικά καύσιμα	**Φυσικά** Φυσικό αέριο (κυρίως μεθάνιο) Πετρέλαιο (+βενζίνη κλπ.) Γαιάνθρακες (λιγνίτης, τύρφη κλπ.) **Τεχνητά** Υδρογόνο, υγραέριο, φωταέριο κλπ. Μεθανόλη, οινόπνευμα κλπ. Ξυλοκάρβουνα κλπ. **Πυρηνικά** Σχάσιμα υλικά (ουράνιο κλπ.)	**Α.Π.Ε.**	**Ηλιακή** Θερμική Φωτεινή **Αιολική** **Βιομάζα** **Γεωθερμία** **Θαλάσσια** Θερμική Κυματική **Υδραυλική**

Πίνακας 4.1-1: Πρωτογενής ενέργεια.

Πρωτογενής Ενέργεια $\mathbf{E_{πρωτ.} = E_{εισ.}}$
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΣ⇒⇒ ΑΠΩΛΕΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ + ΜΕΤΑΦΟΡΑΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
Βαθμός απόδοσης $\eta = \frac{\mathbf{E_{εξ.}}}{\mathbf{E_{εισ.}}} = \frac{\mathbf{E_{εισ.} - E_{απ.}}}{\mathbf{E_{εισ.}}}$
Ενέργεια Τελικής Χρήσης $\mathbf{E_{τχ.} = E_{εξ.}}$

Πίνακας 4.1-2: Ενεργειακές μετατροπές – βαθμός απόδοσης.

Η ενέργεια η οποία αποτελεί σήμερα κύριο ζητούμενο στην ενεργειακή ανάγκη του ανθρώπου και είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής του είναι η ηλεκτρική. Η ηλεκτρική ενέργεια θεωρείται ως η πιο "ευγενής" μορφή ενέργειας τελικής χρήσης επειδή μετατρέπεται εύκολα σε άλλες μορφές ενέργειας με σχετικά υψηλό βαθμό απόδοσης και έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που δεν έχουν άλλες μορφές. Σχεδόν όλες οι συσκευές χρήσης οι οποίες εξυπηρετούν τις ανθρώπινες ανέσεις βελτιώνοντας το βιοτικό επίπεδο του ανθρώπου αναπτύχθηκαν με βάση τον ηλεκτρισμό και στηρίζονται αποκλειστικά σ' αυτόν. Η ηλεκτρική ενέργεια όμως δεν υπάρχει φυσιολογικά σε οποιαδήποτε βολική μορφή και θα πρέπει να μετατραπεί από κάποια άλλη μορφή ενέργειας, όταν χρειάζεται (εικόνα 4-1).

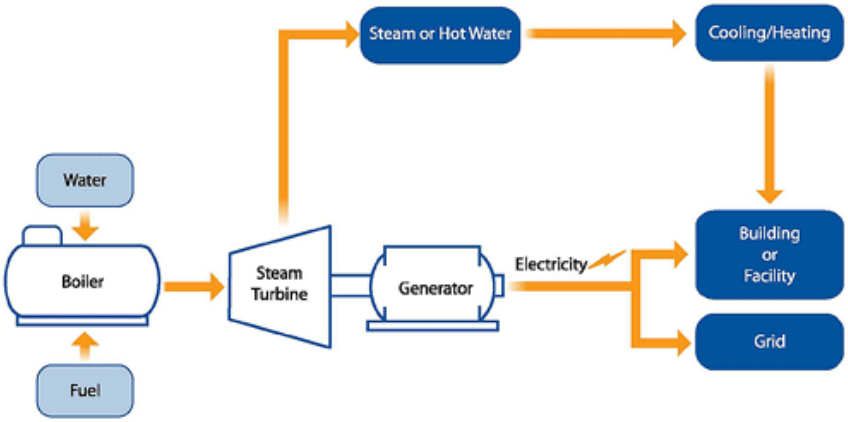


Εικόνα 4.1-1: Μετατροπή ενεργειών.

4.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Συμβατικές Πηγές Ενέργειας (Σ.Π.Ε.)

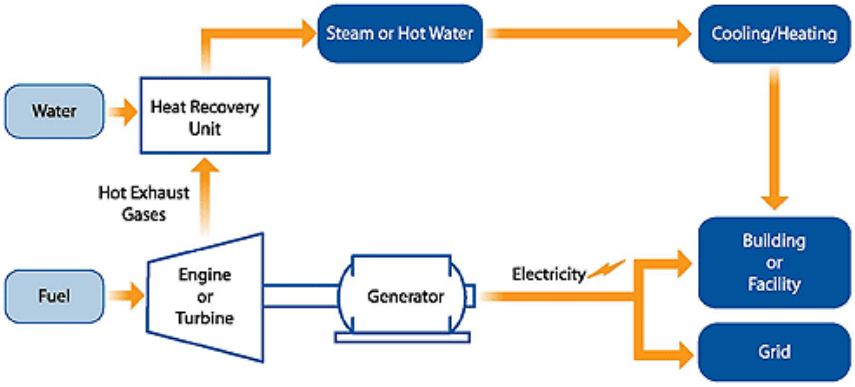
Ατμοηλεκτρικοί και Θερμοηλεκτρικοί Σταθμοί:

Καύσιμο όπως λιγνίτης ή ντίζελ μπορεί να καεί σε έναν καυστήρα θερμαίνοντας νερό για την παραγωγή ατμού ο οποίος θα κινήσει έναν ατμοστρόβιλο ο οποίος με την σειρά του θα στρέψει μια γεννήτρια παράγοντας ηλεκτρισμό (ΑΗΣ).



Εικόνα 4.2-1: Σχηματική διάταξη ΑΗΣ.

Ακόμη καύσιμο μπορεί να καεί σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ), όπως βενζίνη ή ντίζελ κινητήρα ή μία τουρμπίνα αερίου, η οποία οδηγεί στη συνέχεια μια ηλεκτρική γεννήτρια (ΘΗΣ).



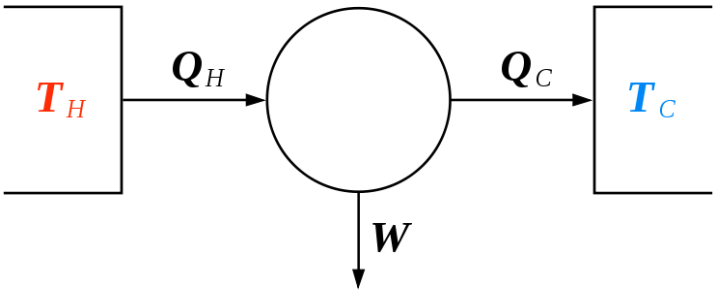
Εικόνα 4.2-2: Σχηματική διάταξη ΘΗΣ.

Και οι δύο αυτοί τρόποι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βασίζονται σε θερμοδυναμικούς κύκλους όπως ο κύκλος του Carnot και ο κύκλος του Rankine οι οποίοι υπόκεινται σε αρκετούς περιορισμούς. Η καύση του καυσίμου στην οποία στηρίζονται είναι μια μετατροπή η οποία παρουσιάζει πολλές απώλειες λόγω του ότι η θερμότητα που παράγει δεν είναι πλήρως εκμεταλλεύσιμη και επίσης είναι και μια πάρα πολύ ρυπογόνα διαδικασία παράγοντας ανεπιθύμητα παραπροϊόντα όπως διοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου κ.α. .

Όλες οι θερμικές μηχανές, συμπεριλαμβανομένου και των μηχανών εσωτερικής καύσης, περιορίζονται από την απόδοση του κύκλου Carnot. Σύμφωνα με αυτόν μια θερμική μηχανή δεν μπορεί να μετατρέψει όλη την παραγόμενη θερμική ενέργεια, σε μηχανική ενέργεια. Μέρος της θερμικής ενέργειας απορρίπτεται στο περιβάλλον. Σε μία θερμική μηχανή όπως για παράδειγμα σε μια μηχανή εσωτερικής

καύσης, παρέχεται θερμότητα σε υψηλή θερμοκρασία T_H (θερμή δεξαμενή), μέρος της ενέργειας μετατρέπεται σε μηχανικό έργο και το υπόλοιπο απορρίπτεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία T_C (ψυχρή δεξαμενή). Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας, τόσο μεγαλύτερη είναι η απόδοση. Η μέγιστη θεωρητική απόδοση δίνεται από τον τύπο:

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$



Εικόνα 4.2-3: Μετατροπή θερμικής ενέργειας σε μηχανικό έργο.

Όπου

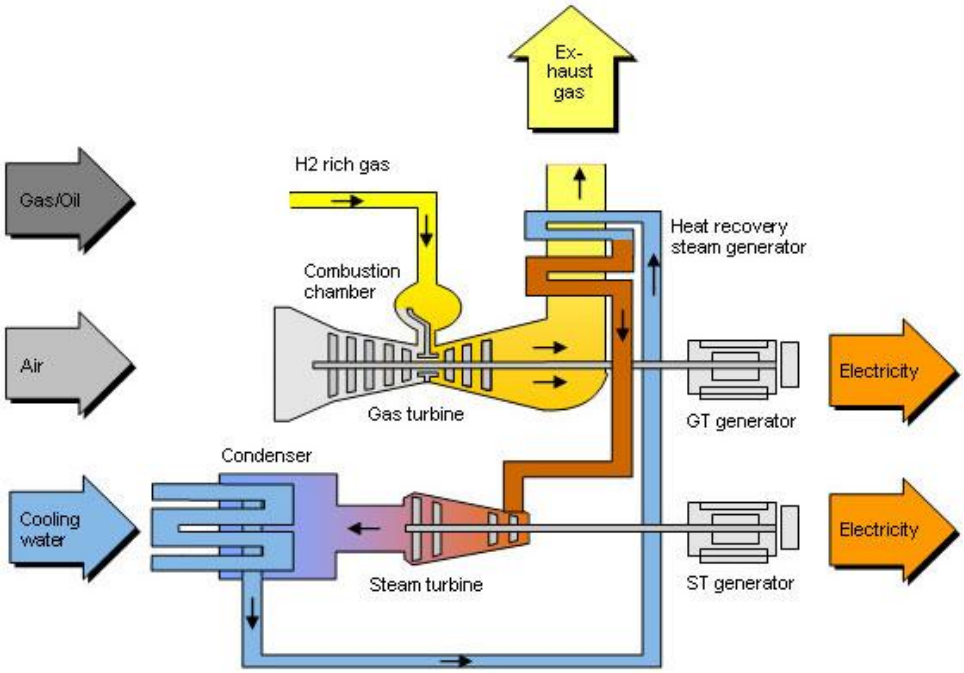
W: είναι το μηχανικό έργο
Q_H: η θερμότητα που εισάγεται
Q_C: η θερμότητα που αποβάλλεται
T_H: η θερμοκρασία θερμής δεξαμενής
T_C: η θερμοκρασία ψυχρής δεξαμενής

Τα (Q_H, Q_C, T_H, T_C) περιγράφονται σε κλίμακα Kelvin

Παρόλο που τα παραπάνω συστήματα χαρακτηρίζονται από χαμηλή απόδοση περίπου 30-35%, περιορισμένη ποσότητα διαθέσιμων καυσίμων και θέματα ρύπανσης του περιβάλλοντος καταλαμβάνουν σημαντικό ποσοστό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας λόγο του ότι είναι αρκετά ώριμες τεχνολογίες, εύκολα διαχειρίσιμες και τα καύσιμα τα οποία χρησιμοποιούν έχουν "προς το παρόν" σχετικά χαμηλό κόστος πράγμα που τα καθιστά μια αρκετά φθηνή πηγή ενέργειας.

Συστήματα συνδυασμένου κύκλου

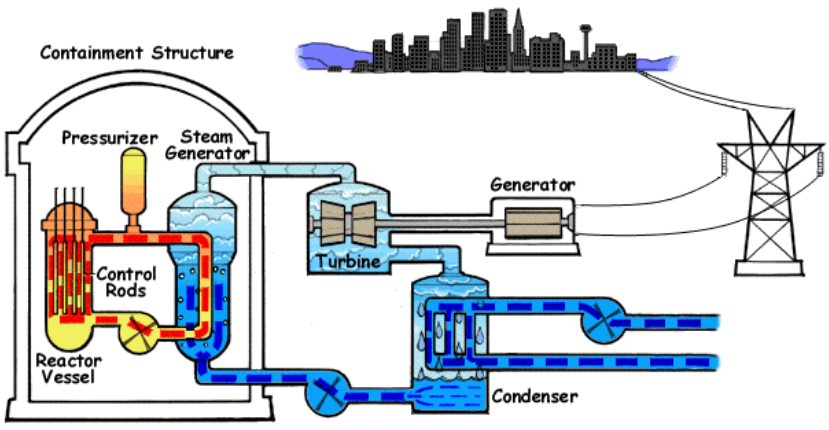
Για να βελτιώσουν το βαθμό απόδοσής τους τα παραπάνω συστήματα και να μειώσουν τους εκπεμπόμενους ρύπους προς την ατμόσφαιρα καθώς και την κατανάλωση καυσίμου αναπτύχθηκε μια νέα τεχνολογία αυτή του συνδυασμένου κύκλου (Combined Cycle Power Plants,CCPPs). Ο όρος "συνδυασμένος κύκλος" αναφέρεται σε συστήματα με δύο θερμοδυναμικούς κύκλους, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με κάποιο εργαζόμενο ρευστό και λειτουργούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Ο κύκλος υψηλής θερμοκρασίας (κορυφής) αποβάλλει θερμότητα, που ανακτάται και χρησιμοποιείται από τον κύκλο χαμηλής θερμοκρασίας (βάσης) για την παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ή μηχανικής ενέργειας, αυξάνοντας έτσι το βαθμό απόδοσης κατά περίπου 20%. Τα πιο διαδεδομένα συστήματα συνδυασμένου κύκλου είναι εκείνα με συνδυασμό αεριοστροβίλου - ατμοστροβίλου (κύκλοι Brayton - Rankine) και κινητήρα Diesel – ατμοστρόβιλου (κύκλοι Diesel – Rankine). Σ΄ αυτούς η θερμότητα από τα απαγόμενα καυσαέρια του αεριοστρόβιλου ή του κινητήρα ντίζελ χρησιμοποιείται για να παραχθεί ατμός ο οποίος θα στρέψει τον ατμοστρόβιλο που κινεί την γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρισμού.



Εικόνα 4.2-4: Σύστημα συνδυασμένου κύκλου αεριοστρόβιλου-ατμοστρόβιλου.

Πυρηνικοί Σταθμοί:

Οι πυρηνικοί σταθμοί είναι στην ουσία ΑΗΣ στους οποίους για την θέρμανση του νερού για παραγωγή ατμού χρησιμοποιούνται πυρηνικοί αντιδραστήρες (Α.Η.Π.Σ.). Στους πυρηνικούς αντιδραστήρες παράγεται πυρηνική ενέργεια με μια ελεγχόμενη αντίδραση σχάσης ατομικών πυρήνων. Το σχάσιμο υλικό είναι συνήθως ουράνιο. Κατά τη διάρκεια μιας αντίδρασης διάσπασης πυρήνων, πυρήνες με μεγάλο ατομικό αριθμό δηλαδή πυρήνες οι οποίοι αποτελούνται από πολλά πρωτόνια και νετρόνια, σπάνε σε μικρότερους πυρήνες και αποβάλλουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε διάφορα μήκη κύματος και μερικά ταχύτατα κινούμενα νετρόνια. Η ενέργεια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μετατρέπεται τελικά σε θερμική ενέργεια η οποία θερμαίνει ένα ρευστό μέσω. Στη συνέχεια αυτό οδηγείται σε ένα "εναλλάκτη θερμότητας" όπου προκαλεί βρασμό σε νερό που υπάρχει εκεί. Ο παραγόμενος ατμός στη συνέχεια θέτει σε κίνηση στροβίλους που παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα.



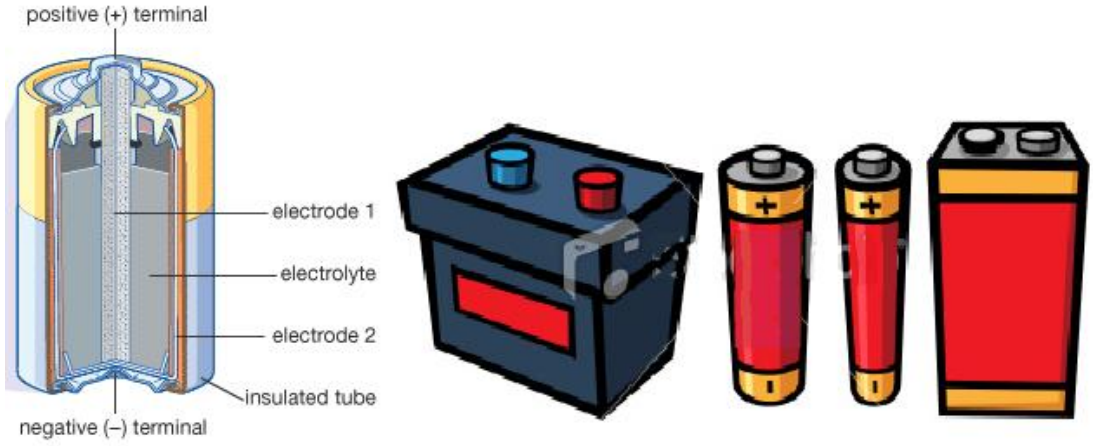
Εικόνα 4.2-5: Σχηματική απεικόνιση Ατμοηλεκτρικού Πυρηνικού Σταθμού.

Στις αρχές τις δεκαετίας του ΄50 η πυρηνική ενέργεια αποτελούσε τη νέα πηγή ενέργειας που θα κάλυπτε τις παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες με πολύ χαμηλό

κόστος. Εξαιτίας όμως των ατυχημάτων που συνέβησαν σε κάποιους πυρηνικούς σταθμούς με σοβαρότερο εκείνο του Τσερνόμπιλ τον Απρίλιο του 1986 και λόγο του ότι ήταν σχετικά πρώιμη τεχνολογία αποδείχθηκε μια πολύ δύσκολα διαχειρίσιμη μονάδα παραγωγής ενέργειας και οι εγκαταστάσεις της περιορίστηκαν. Σήμερα παρότι η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει ωριμάσει αρκετά και παρουσιάζει ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τη χρήση συμβατικών καυσίμων, όπως είναι οι μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και η μεγάλη σταθερότητα εφοδιασμού, παραμένουν ακόμα οι δυσκολίες της διαχείρισης λειτουργίας καθώς και το σοβαρό πρόβλημα της εναπόθεσης, ανακύκλωσης ή αποθήκευσης των καταλοίπων από τα χρησιμοποιούμενα υλικά (πυρηνικά απόβλητα). Επιπλέον οι πυρηνικοί σταθμοί έχουν υψηλό κόστος κατασκευής σε σύγκριση με τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ορυκτά καύσιμα.

Μπαταρίες ή ηλεκτρικοί συσσωρευτές:

Οι μπαταρίες είναι χημική πηγή ρεύματος, ικανή να αποθηκεύσει ηλεκτρική ενέργεια (αφού τη μετατρέψει σε χημική) και όταν χρειαστεί, να την αποδώσει σε εξωτερικό κύκλωμα. Η λειτουργία τους βασίζεται σε ηλεκτροχημικές αντιδράσεις παρακάμπτοντας έτσι τη διαδικασία της καύσης και της μηχανικής μετατροπής. Αποτελούνται από ένα δοχείο κατασκευασμένο από μονωτικό υλικό (εβονίτη, πλαστικό, γυαλί) με ηλεκτρολύτη (οξύ ή αλκάλιο), στο οποίο βυθίζονται τα ηλεκτρόδια. Η σύνδεσή τους σε εξωτερικό κύκλωμα προκαλεί σε αυτό διέλευση ρεύματος (εκφόρτιση του ηλεκτρικού συσσωρευτή). Έτσι, στον ηλεκτρικό συσσωρευτή γίνονται χημικές διεργασίες, που έχουν σχέση με τη μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Ο εκφορτισμένος ηλεκτρικός συσσωρευτής φορτίζεται όταν περάσει από αυτόν συνεχές ρεύμα από άλλη πηγή, ενώ γίνονται αντίστροφες χημικές διεργασίες, με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε χημική.



Εικόνα 4.2-6: Εσωτερικό μπαταρίας και σχηματική απεικόνιση διαφόρων μπαταριών.

Οι μπαταρίες χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση (70-90%) και σταθερότητα λειτουργίας έχουν όμως περιορισμένη διάρκεια ζωής και συχνά χρησιμοποιούνται ακριβά υλικά για την κατασκευή τους. Εξυπηρετούν συνήθως φορητές συσκευές λόγο της ευελιξίας που διαθέτουν ως προς το σχήμα τους και τον μικρό τους όγκο. Όταν όμως πρόκειται για σταθερές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας οι μπαταρίες αποτελούν μια ασύμφορη πηγή ενέργειας και έχουν μεγάλο όγκο και βάρος.

Σύγκριση των κυψελών καυσίμου με συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Όταν το καύσιμο με το οποίο τροφοδοτούνται οι κυψέλες καυσίμου προέρχεται από συμβατικές πηγές ενέργειας, τότε και αυτές συγκαταλέγονται στις συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλους τρόπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με συμβατικά καύσιμα λόγω του ότι όπως είδαμε και στο (κεφάλαιο 3) οι κυψέλες καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές διατάξεις που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια των καυσίμων απευθείας σε ηλεκτρική, παρακάμπτοντας την διαδικασία της καύσης, της θερμικής και της μηχανικής μετατροπής οι οποίες περιορίζονται από θερμοδυναμικούς κύκλους και διάφορες άλλες απώλειες (π.χ. μηχανικές απώλειες, θερμικές απώλειες, απώλειες μεταφοράς κ.α.) περιορίζοντας έτσι τον συνολικό βαθμό απόδοσης τους.

Πλεονεκτήματα:

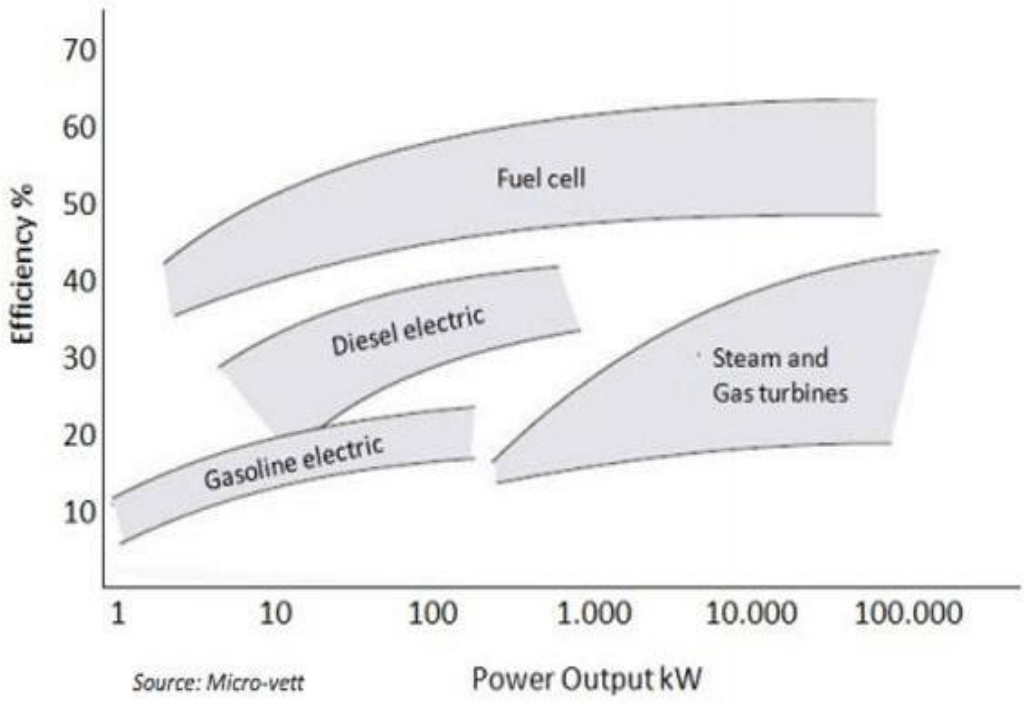
- Σε σύγκριση λοιπόν με τις τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που παρουσιάστηκαν παραπάνω οι κυψέλες καυσίμου εμφανίζουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης 40 έως 60% έναντι του 30 με 35% στο οποίο φτάνουν οι ατμοηλεκτρικοί, θερμοηλεκτρικοί και πυρηνικοί σταθμοί. Επίσης η απόδοση τους δεν αλλάζει ραγδαία κατά τις αλλαγές φορτίου παραμένοντας σε υψηλό ποσοστό ακόμη και όταν λειτουργούν σε συνθήκες μερικού φορτίου, αντίθετα με την απόδοση των θερμικών μηχανών η οποία πέφτει δραματικά όταν εξυπηρετούν μερικό φορτίο και όχι το ονομαστικό τους. Ακόμη αν λειτουργούν σε διατάξεις συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας ο βαθμός απόδοσης του φτάνει το 80-85%.
- Οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν με μηδενικές εκπομπές ρυπογόνων ενώσεων όπως υδρογονάνθρακες ή οξείδια του αζώτου όταν χρησιμοποιείται καθαρό υδρογόνο σαν καύσιμο. Στην περίπτωση όπου σαν καύσιμο χρησιμοποιείται μίγμα αερίων πλούσιο σε υδρογόνο, οι εκπομπές ρύπων είναι ασύγκριτα χαμηλότερες με αυτές των θερμικών μηχανών που χρησιμοποιούν συμβατικά ορυκτά καύσιμα. Παράγοντας λοιπόν ως παραπροϊόντα μόνο νερό και θερμότητα τα οποία όχι μόνο δεν αποτελούν ρύπους αλλά μπορούν να αξιοποιηθούν κιόλας, υπερτερούν έναντι των αέριων ρύπων των θερμικών μηχανών αλλά και των πυρηνικών αποβλήτων των πυρηνικών αντιδραστήρων ακόμη και των μη-επαναφορτιζόμενων μπαταριών οι οποίες δεν επαναφορτίζονται και πρέπει να ανακυκλωθούν για να μην αποτελέσουν ρύπο.
- Διαθέτουν ελάχιστα κινούμενα μηχανικά μέρη και τα οποία ανήκουν στα βοηθητικά εξαρτήματα ενός πλήρους συστήματος. Έτσι έχουν αρκετά χαμηλά επίπεδα θορύβου, η συντήρηση τους είναι ευκολότερη και παρουσιάζουν πιο αξιόπιστη λειτουργία. Επίσης σε σχέση με τις μπαταρίες έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.
- Ακόμη οι κυψέλες καυσίμου διαθέτουν ευελιξία ως προς το χρησιμοποιούμενο καύσιμο καθώς διαφορετικοί τύποι κυψελών μπορούν να λειτουργήσουν με ένα εύρος διαφορετικών καυσίμων, όπως για παράδειγμα καθαρό υδρογόνο, μεθανόλη και υδρογονάνθρακες όπως πετρέλαιο, προπάνιο, μεθάνιο και φυσικό αέριο.
- Ευνοούν την κατανεμημένη παραγωγή ενέργειας αφού μπορούν να λειτουργήσουν και σαν μικρότερες εγκαταστάσεις από αυτές των κεντρικών μονάδων παραγωγής έχοντας υψηλή απόδοση και δίνοντας την δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας στο σημείο χρήσης, ανεβάζοντας έτσι

κατακόρυφα την αποδοτικότητα των διατάξεων συμπαραγωγής σε σχέση με τις αντίστοιχες διατάξεις των κεντρικών μονάδων ηλεκτρισμού.

- Έχουν μεγάλο εύρος εφαρμογών λόγο του προσαρμοζόμενου σχεδιασμού που διαθέτουν και μπορούν να αποτελέσουν πηγή ενέργειας για πάρα πολλές εφαρμογές από φορητές συσκευές (κινητά τηλέφωνα, laptop κλπ.) μέχρι αυτοκίνητα και σταθερές μονάδες παραγωγής αρκετών MegaWatt.

Πίνακας 4.2-1: Συγκεντρωτικός πίνακας συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ενδεικτικοί βαθμοί απόδοσης τους.

		Συγκροτήματα μετατροπής	Ενδεικτικός βαθμός απόδοσης η
ΚΑΥΣΙΜΑ - ΚΑΥΣΗ	⇒	ΑΗΣ ή ΘΗΣ (Ατμ/λοι + Γεννήτριες ή Πετρ/νες + Γεννήτριες)	≈ 30% ⇒ (40%)
	⇒	ΣΥΝΔΙΑΣΜΕΝΟΙ ΚΥΚΛΟΙ (ΑΗΣ+ΘΗΣ)	≈ 50% ⇒ (60%)
ΠΥΡΗΝΙΚΑ	⇒	ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ	≈ 30% ⇒ (40%)
ΚΑΥΣΙΜΑ - ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΈΣ ΑΝΤΙΔΡΆΣΕΙΣ	⇒	ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ	≈ 75% ⇒ (90%)
	⇒	ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	≈ 50% ⇒ (60%)



Εικόνα 4.2-7: Βαθμός απόδοσης διαφόρων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με την ισχύ εξόδου.

Παρ' όλα τα πλεονεκτήματα που διαθέτουν οι κυψέλες καυσίμου έναντι άλλων πηγών παραγωγής ενέργειας με συμβατικά καύσιμα παρουσιάζουν και κάποια σοβαρά μειονεκτήματα τα οποία είναι και ο λόγος που η τεχνολογία αυτή δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί και δεν χρησιμοποιείται ευρέος.

Μειονεκτήματα:

- Ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου είναι το κόστος. Το κόστος κατασκευής των κυψελών καυσίμου είναι ακόμα πολύ υψηλό, κυρίως λόγο των ακριβών υλικών που χρησιμοποιούνται όπως είναι η πλατίνα ως καταλύτης, η μεμβράνη ηλεκτρολύτη κ.α.. Ακόμη επειδή οι κυψέλες καυσίμου χρειάζονται αρκετά βοηθητικά εξαρτήματα για να λειτουργήσουν, όπως αναμορφωτής (αν δεν τροφοδοτούνται με υδρογόνο), αντλίες, ελεγκτές λειτουργίας κ.α. το κόστος αυξάνεται ακόμα περισσότερο. Επίσης στην περίπτωση καθαρού υδρογόνου σαν καύσιμο η παραγωγή του από ορυκτά καύσιμα και η αποθήκευση του είναι ακόμα διαδικασίες με αρκετά υψηλό κόστος. Η δημιουργία κατάλληλων υποδομών για την ανάπτυξη κεντρικών δικτύων μεταφοράς και διανομής του υδρογόνου απαιτεί τεράστια κεφάλαια.
- Επίσης, η παραγωγή, η μεταφορά, η διανομή και η αποθήκευση του υδρογόνου παρουσιάζουν πολλές τεχνικές δυσκολίες.
- Το αέριο υδρογόνο έχει πολύ μεγάλο όγκο και αποθηκεύεται δύσκολα. Ακόμα και το υγρό υδρογόνο έχει πολύ μεγαλύτερο όγκο από ποσότητα πετρελαίου που αποδίδει την ίδια ποσότητα ενέργειας.
- Αν και στις περισσότερες των περιπτώσεων το υδρογόνο θεωρείται περισσότερο ασφαλές από οποιοδήποτε άλλο καύσιμο, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες μπορεί να γίνει εξαιρετικά επικίνδυνο.
- Συνυπολογίζοντας όλο τον εξοπλισμό που χρειάζονται για τη λειτουργία τους, τα συστήματα κυψελών καυσίμου είναι βαρύτερα και πιο ογκώδη από τις μηχανές εσωτερικής καύσης που είναι ικανές να παράγουν αντίστοιχη ποσότητα ενέργειας.
- Σε σύγκριση με τις θερμικές μηχανές έχουν μικρότερο χρόνο ζωής.
- Οι κυψέλες καυσίμου έχουν αδιάλειπτη λειτουργία εφόσον τροφοδοτούνται με καύσιμο και οξειδωτικό μέσο σε σύγκριση με τις μπαταρίες οι οποίες χρειάζονται επαναφόρτιση (όταν τα αντιδρώντα στοιχεία τους εξαντληθούν) ή αντικατάσταση.

4.3 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.)

Ηλιακή ενέργεια

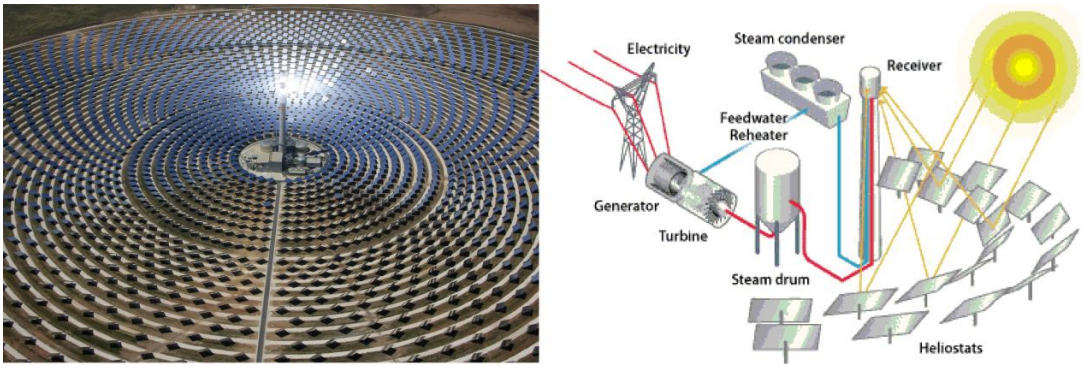
Η ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού με δύο τρόπους: με θερμικές και φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Η θερμική αξιοποίηση περιλαμβάνει συλλογή της ηλιακής ενέργειας για να παραχθεί θερμότητα κυρίως για θέρμανση νερού και μετατροπή του σε ατμό για την κίνηση ατμοστροβίλων. Στη δεύτερη εφαρμογή τα φωτοβολταϊκά συστήματα βασιζόμενα στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο μετατρέπουν άμεσα την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρισμό με τη χρήση φωτοβολταϊκών κυψελών ή συστοιχιών τους

Θερμικά ηλιακά συστήματα:

Τα θερμικά ηλιακά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βασίζονται στην ηλιακή συγκέντρωση (Concentrated Solar Power Plants, CSPPs). Τα συστήματα αυτά δεν έχουν ακόμη ευρεία χρήση και βρίσκονται κυρίως σε ερευνητικό στάδιο. Τα πιο γνωστά συστήματα ηλιακής συγκέντρωσης είναι τα εξής:

- Ηλιακοί πύργοι ισχύος (power towers).

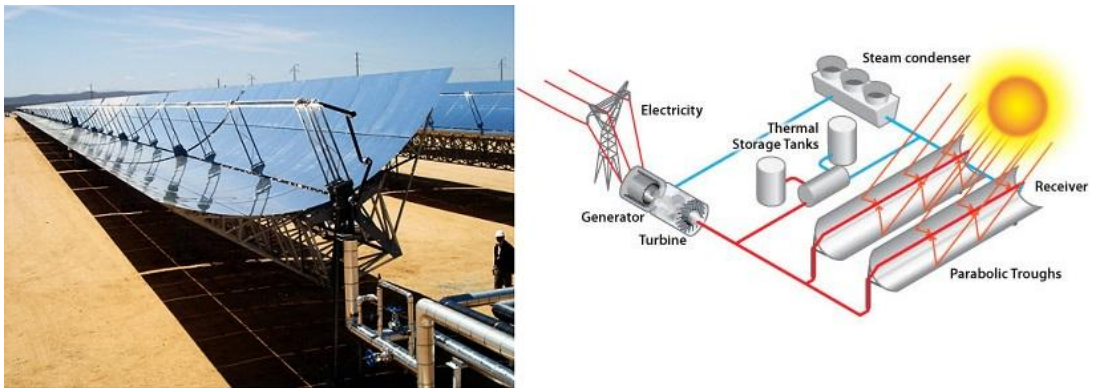
Στα συστήματα πύργου ισχύος, οι ηλιοστάτες παρακολουθούν την τροχιά του ήλιου ώστε το άμεσο ηλιακό φως να ανακλάται και να συγκεντρώνεται σε ένα κεντρικό δέκτη τοποθετημένο στην κορυφή ενός πύργου. Ο δέκτης περιέχει ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας το οποίο θερμαίνεται και στη συνέχεια διοχετεύεται στο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής. Εκεί θερμαίνει νερό για την παραγωγή ατμού και τελικά ηλεκτρισμού μέσω ατμοστροβίλου και γεννήτριας. Η απόδοση των συστημάτων πύργου ισχύος κυμαίνεται μεταξύ 14 και 19%.



Εικόνα 4.3-1: Ηλιακός πύργος ισχύος και σχηματική απεικόνιση των μερών του.

- Παραβολικά κοίλα κάτοπτρα (parabolic troughs)

Το ηλιακό πεδίο αποτελείται από πολλές παράλληλες σειρές ηλιακών συλλεκτών που ευθυγραμμίζονται οριζόντια ώστε να παρακολουθούν τον ήλιο κατά μήκος ενός άξονα - συνήθως κατά τον άξονα βορά-νότου. Κάθε ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από μια ανακλαστική επιφάνεια παραβολικού σχήματος η οποία συγκεντρώνει την άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε έναν σωληνωτό δέκτη που είναι τοποθετημένος κατά μήκος της εστιακής γραμμής του κοίλου. Ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας θερμαίνεται καθώς κυκλοφορεί διαμέσω του δέκτη και καταλήγει σε μια σειρά εναλλακτών θερμότητας (γεννήτρια ατμού) που παράγουν υπέρθερμο ατμό περίπου στους 400°C. Ο υπέρθερμος ατμός τροφοδοτείται μετά σε έναν συμβατικό ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η απόδοση τους κυμαίνεται μεταξύ 14% και 18%.



Εικόνα 4.3-2: Παραβολικά κοίλα κάτοπτρα ισχύος και σχηματική απεικόνιση των μερών τους.

- Συστήματα δίσκου/μηχανής (dish/engine system)

Στα συστήματα δίσκου/μηχανής ένας δίσκος παρακολουθεί τον ήλιο και συγκεντρώνει την άμεση ηλιακή ενέργεια σε έναν δέκτη στο εστιακό του σημείο, όπου απορροφάται και μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια. Μια θερμική μηχανή

(συνήθως η μηχανή Stirling) μετατρέπει τη θερμική ενέργεια σε μηχανική. Η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική με τη βοήθεια μιας γεννήτριας που είναι ενσωματωμένη πάνω στο δέκτη. Οι δίσκοι παρακολουθούν την τροχιά του ήλιου σε δύο άξονες και, για το λόγο αυτό, είναι τα πιο αποδοτικά συστήματα συλλεκτών, καθώς είναι συνεχώς στραμμένα προς τον ήλιο. Η απόδοση των συστημάτων δίσκου/μηχανής κυμαίνεται μεταξύ 18 και 23%.

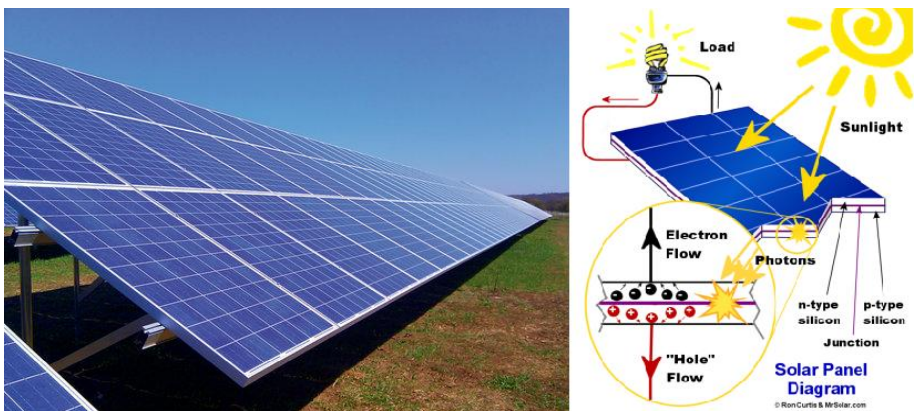


Εικόνα 4.3-3: Σύστημα δίσκου /μηχανής.

Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταικά συστήματα αποτελούν την βασικότερη τεχνολογία εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας καθώς είναι πλέον μια αρκετά ώριμη τεχνολογία ευρέος διαδεδομένη με μεγάλο εμπορικό και επενδυτικό ενδιαφέρον. Η λειτουργία των Φ/Β συστημάτων βασίζεται στο Φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή την άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας απευθείας από την ηλιακή ακτινοβολία. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με τη χρήση ημιαγώγιμων υλικών (με συνηθέστερο το πυρίτιο) τα οποία διαθέτουν την ιδιότητα να απορροφούν φωτόνια του ηλιακού φωτός απελευθερώνοντας στο εσωτερικό τους ηλεκτρόνια. Οι ηλιακές κυψέλες των πάνελ διαθέτουν μία θετικά και μία αρνητικά φορτισμένη στρώση πυριτίου. Όταν το ηλιακό φως προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό κύτταρο, μέρος της ακτινοβολίας διεγείρει ηλεκτρόνια τα οποία μπορούν να κινούνται σχετικά ελεύθερα μέσα στον ημιαγωγό και δημιουργείται ηλεκτρική τάση ανάμεσα στις δύο στρώσεις. Η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου υποχρεώνει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να κινηθούν προς συγκεκριμένη κατεύθυνση, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα.

Το σύνολο των φωτοβολταϊκών στοιχείων που συνδέονται ηλεκτρονικά μεταξύ τους ονομάζεται φωτοβολταϊκή γεννήτρια και το σύνολο των φωτοβολταϊκών γεννητριών συνδεδεμένων μεταξύ τους ονομάζεται φωτοβολταϊκή συστοιχία. Η φωτοβολταϊκή συστοιχία αποτελεί το βασικότερο μέρος του φωτοβολταϊκού συστήματος και συνοδεύεται από κατάλληλα ηλεκτρονικά κυκλώματα για έλεγχο και διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας, καθώς και από σύστημα αποθήκευσης (μπαταρίες). Το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα είναι συνεχούς τάσης και ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο με τη βοήθεια ενός αντιστροφέα τάσης. Η απόδοση των Φ/Β συστημάτων κυμαίνεται μεταξύ 10-20%.



Εικόνα 4.3-4: Ηλιακός πύργος ισχύος και σχηματική απεικόνιση των μερών του.

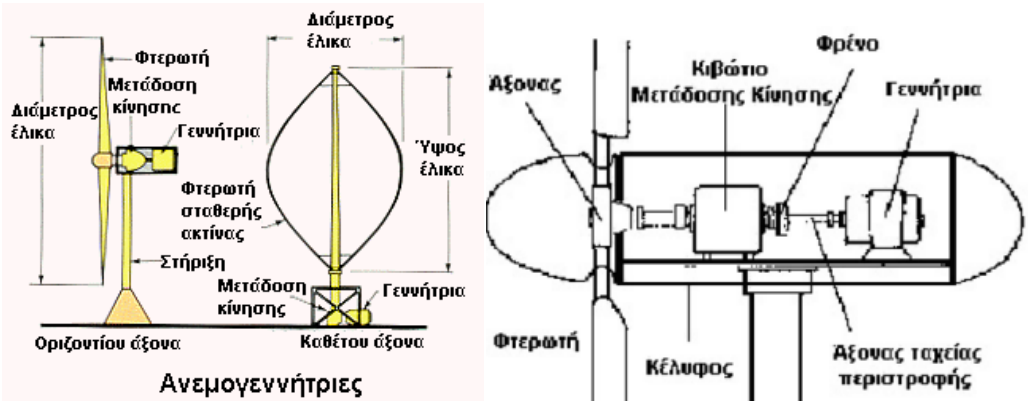
Αιολική ενέργεια

Ανεμογεννήτριες

Σήμερα η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας γίνεται σχεδόν αποκλειστικά με ανεμογεννήτριες. Οι ανεμογεννήτριες είναι μηχανές οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή αυτή γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, μέσω της πτερωτής, έχουμε την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική ενέργεια με την μορφή περιστροφής του άξονα της πτερωτής και στο δεύτερο στάδιο, μέσω της γεννήτριας, επιτυγχάνουμε την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Οι ανεμογεννήτριες κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα, όπου ο δρομέας είναι τύπου έλικας και ο άξονας μπορεί να περιστρέφεται συνεχώς παράλληλα προς τον άνεμο, και τις ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα ο οποίος παραμένει σταθερός. Στην παγκόσμια αγορά έχουν επικρατήσει οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα σε ποσοστό περίπου 90%.



Εικόνα 4.3-5: Ανεμογεννήτριες.

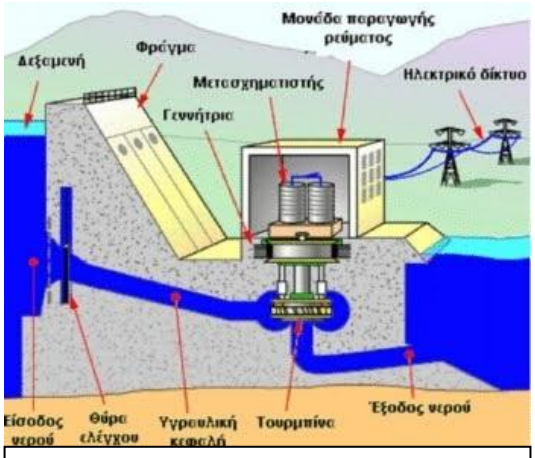


Εικόνα 4.3-6: Κάθετη και οριζόντια ανεμογεννήτρια και τα μέρη τους.

Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Υδροηλεκτρικοί σταθμοί (ΥΗΣ)

Η μετατροπή της ενέργειας των υδατοπτώσεων με τη χρήση υδροηλεκτρικών έργων (υδατοταμιευτήρας, φράγμα, κλειστός αγωγός πτώσεως, υδροστρόβιλος, ηλεκτρογεννήτρια, διώρυγα φυγής) παράγει την Υδροηλεκτρική Ενέργεια (Υ/Ε). Οι υδροηλεκτρικές μονάδες εκμεταλλεύονται τη φυσική διαδικασία του κύκλου του νερού για να μετατρέψουν τη δυναμική ενέργεια του νερού των λιμνών και της κινητικής ενέργειας του νερού των ποταμών σε ηλεκτρική

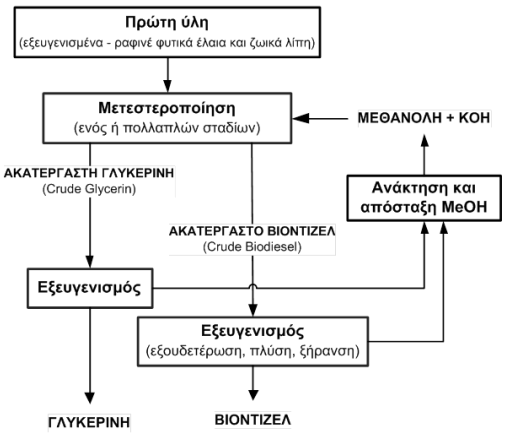


Εικόνα 4.3-7: Υδροηλεκτρικός σταθμός.

ενέργεια. Η λειτουργία των υδροηλεκτρικών μονάδων βασίζεται στην κίνηση του νερού λόγω διαφοράς μανομετρικού ύψους μεταξύ των σημείων εισόδου και εξόδου. Για το σκοπό αυτό κατασκευάζεται ένα φράγμα που συγκρατεί την απαιτούμενη ποσότητα νερού στον δημιουργούμενο ταμιευτήρα. Κατά τη διέλευσή του από τον αγωγό πτώσεως το νερό κινεί έναν στρόβιλο ο οποίος θέτει σε λειτουργία τη γεννήτρια. Η δέσμευση/ αποθήκευση ποσοτήτων ύδατος σε φυσικές ή τεχνητές λίμνες, για ένα υδροηλεκτρικό σταθμό, ισοδυναμεί πρακτικά με αποταμίευση υδροηλεκτρικής ενέργειας. Η προγραμματισμένη αποδέσμευση αυτών των ποσοτήτων ύδατος και η εκτόνωσή τους στους υδροστροβίλους οδηγεί στην ελεγχόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με δεδομένη την ύπαρξη κατάλληλων υδάτινων πόρων και τον επαρκή εφοδιασμό τους με τις απαραίτητες βροχοπτώσεις, η Υ/Ε καθίσταται μια σημαντικότατη εναλλακτική πηγή ανανεώσιμης ενέργειας.

Ενέργεια βιομάζας

Με τον όρο βιομάζα ορίζεται το σύνολο της ύλης που έχει οργανική (βιολογική) προέλευση, εξαιρώντας τα ορυκτά καύσιμα. Με βάση τον ορισμό αυτό, περιλαμβάνεται οποιοδήποτε υλικό προέρχεται άμεσα ή έμμεσα από φυτική ή ζωική ύλη, όπως φυτικές ύλες από φυσικά οικοσυστήματα ή από ενεργειακές καλλιέργειες, καθώς και τα υπολείμματα της εκμετάλλευσής τους, τα υποπροϊόντα της δασικής, γεωργικής, κτηνοτροφικής και αλιευτικής παραγωγής, αλλά και το βιολογικής προέλευσης μέρος των αστικών λυμάτων και απορριμμάτων. Η ενέργεια βιομάζας δημιουργείται με τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε χημική μέσω της φωτοσύνθεσης και αποταμιεύεται στις οργανικές δομές των ιστών των ζώντων οργανισμών.



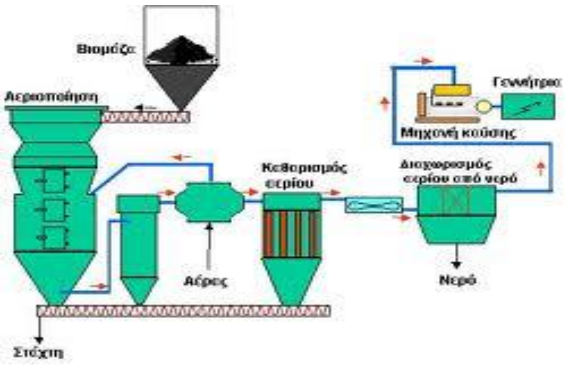
Εικόνα 4.3-8: Επί μέρους στάδια παραγωγής βιοντίζελ.

Η ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας γίνεται με τεχνολογίες:

- θερμικής επεξεργασίας της βιομάζας, η οποία παρέχει τη δυνατότητα

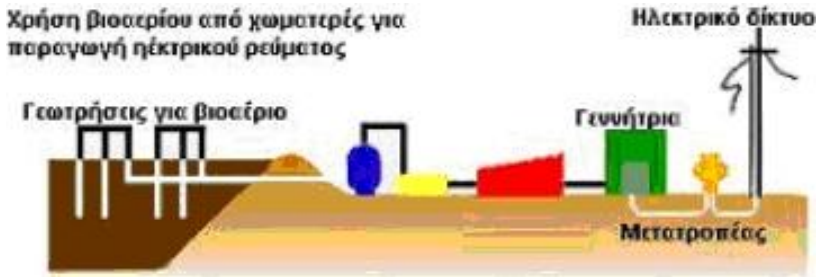
- είτε άμεσης εκμετάλλευσης του θερμικού περιεχομένου της σε μονάδες καύσης ή συνδυασμένης καύσης με ορυκτά καύσιμα,

- είτε έμμεσης εκμετάλλευσης σε εγκαταστάσεις θερμοχημικής μετατροπής της βιομάζας, αεριοποίησης ή πυρόλυσης όπου παράγεται αέριο προϊόν που μετά τον καθαρισμό του αποτελεί άριστη καύσιμη ύλη για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας.



Εικόνα 4.3-9: Μονάδα αεριοποίησης.

- βιοαποικοδόμησης της βιομάζας (ζύμωση-αερόβια/αναερόβια) μέσω της οποίας παράγεται καύσιμο βιοαέριο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αεριοστρόβιλους ή κινητήρες Μ.Ε.Κ. για την παραγωγή ηλεκτρισμού.



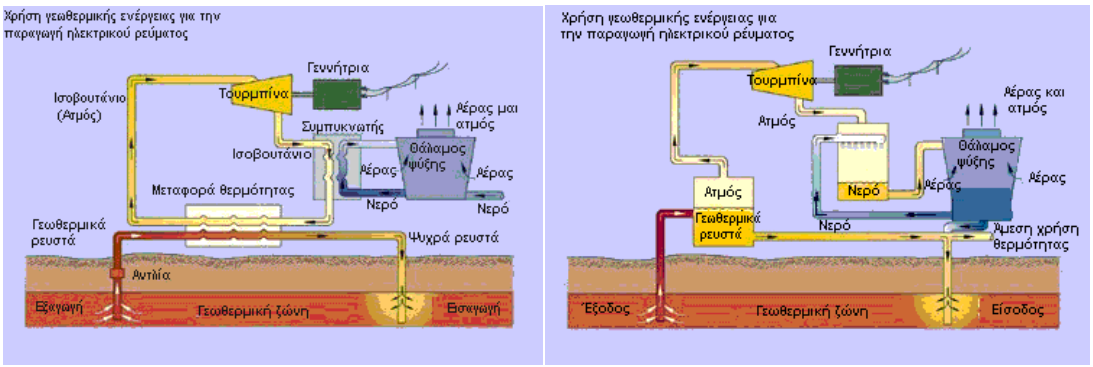
Εικόνα 4.3-10: Χρήση βιοαερίου από βιοαποικοδόμιση.

- φυσικής και χημικής επεξεργασίας της που οδηγεί στην παραγωγή υγρών και αέριων βιοκαυσίμων, όπως το βιοντίζελ, η βιοαιθανόλη, το βιο-υδρογόνο κ.α. που μπορούν να τροφοδοτήσουν θερμικές μηχανές για την παραγωγή ηλεκτρισμού (π.χ. ντιζελογεννήτριες).

<u>Γεωθερμική ενέργεια</u>

Ως γεωθερμική ενέργεια χαρακτηρίζεται η ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης, μεταφέρεται στην επιφάνεια με αγωγή θερμότητας και με την είσοδο στο φλοιό της γης λειωμένου μάγματος από τα βαθύτερα στρώματά της, και γίνεται αντιληπτή με τη μορφή θερμού νερού ή ατμού. Η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού ή ατμού, ποικίλει από περιοχή σε περιοχή, ενώ συνήθως κυμαίνεται από 25^{o}C μέχρι 360^{o}C. Στις περιπτώσεις που τα γεωθερμικά ρευστά έχουν υψηλή θερμοκρασία (πάνω από 150^{o}C), η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας συνίσταται στη χρήση της θερμότητας των γεωθερμικών ρευστών για την παραγωγή ηλεκτρισμού και τη θέρμανση νερού και χώρων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται διεργασίες τόσο ανοικτού όσο και κλειστού κυκλώματος. Στην πρώτη περίπτωση το γεωθερμικό ρευστό εκτονώνεται σε δοχείο διαχωρισμού ατμού-υγρού και ο παραγόμενος ατμός οδηγείται σε στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρισμού, ενώ το θερμό υγρό σε εναλλάκτη θερμότητας. Στην περίπτωση της διεργασίας κλειστού κυκλώματος το γεωθερμικό ρευστό οδηγείται σε εναλλάκτη θερμότητας προσδίδοντας θερμική ενέργεια σε κατάλληλο ρευστό το οποίο ατμοποιείται και οδηγείται στον στρόβιλο. Την απαιτούμενη παραγόμενη θερμότητα του κυκλώματος την αποδίδει σε συμπυκνωτή προτού διέλθει εκ νέου από τον εναλλάκτη του γεωθερμικού ρευστού.

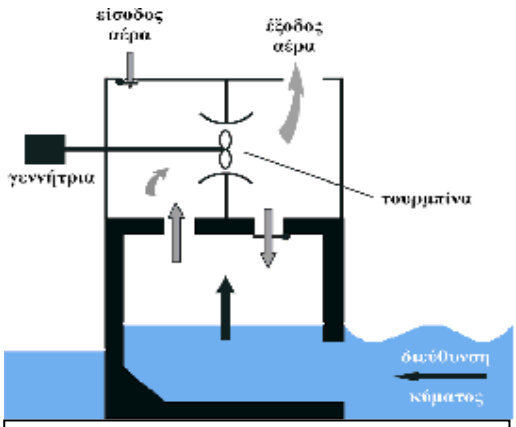


Εικόνα 4.3-11: Γεωθερμικές μονάδες κλειστού και ανοιχτού κύκλου αντίστοιχα.

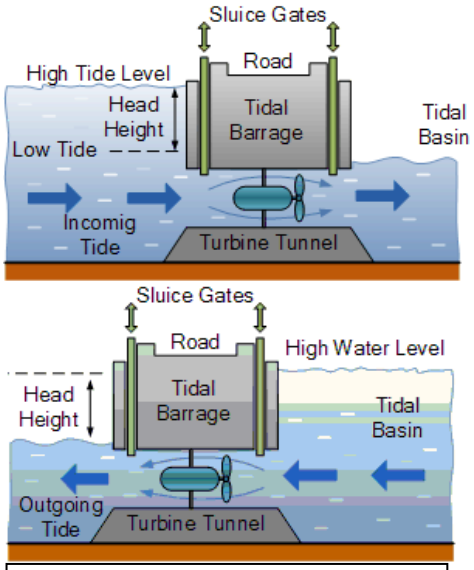
Ενέργεια των ωκεανών

Οι ωκεανοί μπορούν να μας προσφέρουν τεράστια ποσά ενέργειας. Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι για να εκμεταλλευτούμε την ενέργεια της θάλασσας:

α) Από τα κύματα: Η κινητική ενέργεια των κυμάτων μπορεί να περιστρέψει την τουρμπίνα, όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα. Η ανυψωτική κίνηση του κύματος πιέζει τον αέρα προς τα πάνω, μέσα στο θάλαμο και θέτει σε περιστροφική κίνηση την τουρμπίνα έτσι ώστε η γεννήτρια να παράγει ρεύμα. Αυτός είναι ένας μόνο τύπος εκμετάλλευσης της ενέργειας των κυμάτων. Η παραγόμενη ενέργεια είναι σε θέση να καλύψει τις ανάγκες μιας οικίας, ενός φάρου, κ.λπ.



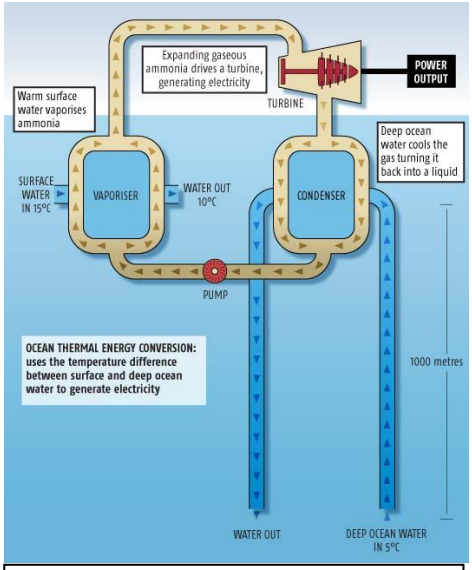
Εικόνα 4.3-12: Σύστημα εκμετάλλευσης των θαλάσσιων κυμάτων.



Εικόνα 4.3-13: Σύστημα εκμετάλλευσης της παλίρροιας.

β) Από τις παλίρροιες (μικρές και μεγάλες): Τα εισερχόμενα νερά της παλίρροιας στην ακτή κατά την πλημμυρίδα μπορούν να παγιδευτούν σε φράγματα, οπότε κατά την άμπωτη τα αποθηκευμένα νερά ελευθερώνονται και κινούν έναν υδροστρόβιλο, όπως στα υδροηλεκτρικά εργοστάσια. Τα πλέον κατάλληλα μέρη για την κατασκευή τέτοιων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής είναι οι στενές εκβολές ποταμών. Σήμερα οι μικροί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το θαλασσινό νερό βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο. Υπάρχουν και άλλα συστήματα εκμετάλλευσης της παλίρροιας από τα οποία αυτό που αναφέρθηκε είναι το απλούστερο.

γ) Από τις θερμοκρασιακές διαφορές του νερού: Η θερμική ενέργεια των ωκεανών μπορεί επίσης να αξιοποιηθεί με την εκμετάλλευση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του θερμότερου επιφανειακού νερού και του ψυχρότερου νερού του πυθμένα. Η διαφορά αυτή πρέπει να είναι τουλάχιστον 3,5^{o}C. Τα πλεονεκτήματα από τη χρήση της ενέργειας των ωκεανών, εκτός από "καθαρή" και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, με τα γνωστά ευεργετήματα, είναι το σχετικά μικρό κόστος κατασκευής των απαιτούμενων εγκαταστάσεων, η μεγάλη απόδοση (40-70 KW ανά μέτρο μετώπων κύματος) και η δυνατότητα παραγωγής υδρογόνου με



Εικόνα 4.3-14: Σύστημα της θερμοκρασιακής διαφοράς της θάλασσας.

ηλεκτρόλυση από το άφθονο θαλασσινό νερό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο. Στα μειονεκτήματα αναφέρεται το κόστος μεταφοράς της ενέργειας στη στεριά.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν έναν ανεξάντλητο (ανανεώσιμο) πόρο ενέργειας ο οποίος παρέχεται εν αφθονία από το φυσικό περιβάλλον του πλανήτη και η αξιοποίηση τους παρουσιάζει πάρα πολλά οφέλη και πλεονεκτήματα έναντι της χρήση των συμβατικών καυσίμων.

Πλεονεκτήματα

- Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν "καθαρές" πηγές ενέργειας καθώς κατά την χρήση τους δεν εκλύονται ρύποι που να επιβαρύνουν το φυσικό περιβάλλον. Ακόμη και στην περίπτωση της καύσης τους όπως στην περίπτωση της βιομάζας το ισοζύγιο του διοξειδίου του άνθρακα είναι μηδενικό αφού το ποσό που εκλύεται το έχουν δεσμεύσει οι βιολογικοί οργανισμοί κατά την ανάπτυξή τους.
- Δεν έχουν τον περιορισμό της εξάντλησης τους σε αντίθεση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας οι οποίες εμφανίζουν ήδη προβλήματα αξιοποιήσιμων αποθεμάτων.
- Για τον ίδιο λόγο διαθέτουν ένα πιο σταθερό οικονομικό περιβάλλον σε σχέση με τις συνεχείς διακυμάνσεις της οικονομίας του πετρελαίου.
- Τα συστήματα αξιοποίησης των ανανεώσιμών πηγών ενέργειας έχουν εύκολη συντήρηση και μεγάλο χρόνο ζωής.
- Επίσης είναι ευέλικτες εφαρμογές που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού, καταργώντας την ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής ενέργειας αλλά και για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.

Στα μειονεκτήματα των ΑΠΕ συγκαταλέγονται τα εξής:

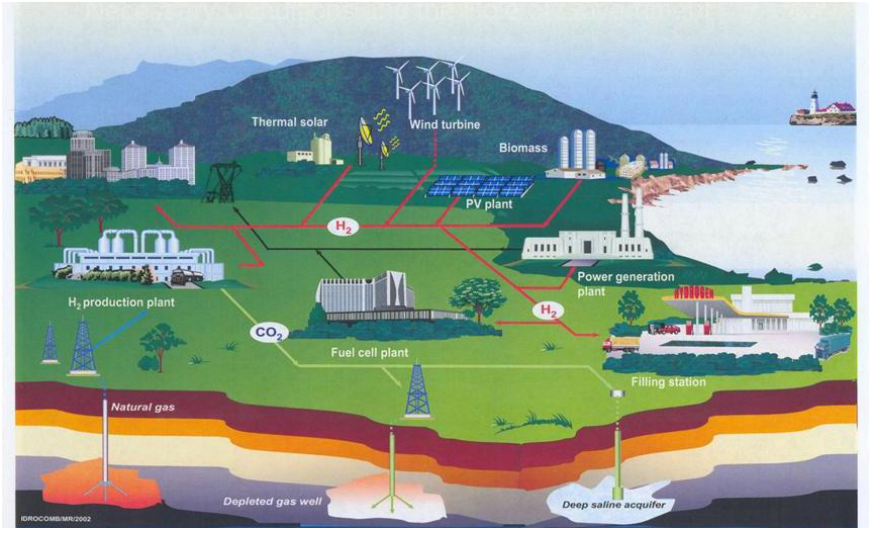
Μειονεκτήματα

- Οι τεχνολογίες αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν χαμηλό βαθμό απόδοσης και χαμηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας. Συνεπώς για μεγάλη παραγωγή απαιτούνται συχνά εκτεταμένες εγκαταστάσεις.
- Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος σε σύγκριση με τις σημερινές τιμές των συμβατικών καυσίμων παραμένει ακόμη υψηλό.
- Η παροχή και απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται. Αυτό καθιστά τις συγκεκριμένες πηγές ως αναξιόπιστες οι οποίες παρουσιάζουν ασυνεχή λειτουργία αδυνατώντας έτσι να καλύψουν την ενεργειακή ανάγκη σε σταθερή βάση, απαιτώντας την εφεδρεία άλλων ενεργειακών πηγών ή γενικά δαπανηρές μεθόδους αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας. Γι' αυτό το λόγο μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται σαν συμπληρωματικές πηγές ενέργειας.
- Ακόμη για μια μεγάλη μερίδα της κοινής γνώμης τα Φ/Β, τα αιολικά ακόμη και τα υδροηλεκτρικά συστήματα προκαλούν αισθητική αλλοίωση του περιβάλλοντα χώρου στον οποίο τοποθετούνται και προκαλούν όχληση στην πανίδα της περιοχής.

Σύγκριση των κυψελών καυσίμου με τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ).

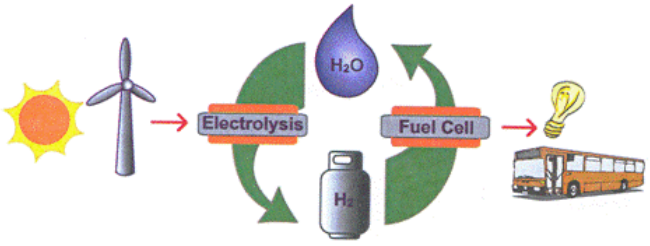
Όπως είδαμε παραπάνω ένα πολύ σημαντικό μειονέκτημα των ΑΠΕ είναι ότι το δυναμικό τροφοδοσίας τους (ηλιοφάνεια, ένταση του ανέμου, βροχόπτωση, κυματισμός της θάλασσας) δεν είναι σταθερής διάρκειας και έντασης με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν ασυνεχή λειτουργία. Επίσης η αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων της παραγόμενης ενέργειας για την χρησιμοποίησή της κατά την έλλειψη επαρκούς δυναμικού αποτελεί με τις ως τώρα ανεπτυγμένες μεθόδους αποθήκευσης (μπαταρίες, υδροταμιευτές) μια αρκετά ασύμφορη λύση. Το αποτέλεσμα που προκύπτει λόγο τις έλλειψης ενός επαρκούς αποθηκευτικού μέσου είναι ότι πολλές φορές και ενώ η ενεργειακή ζήτηση βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα να υπάρχει βέλτιστο δυναμικό και να παράγεται από τα συστήματα των ΑΠΕ διαθέσιμη πλεονάζουσα ενέργεια η οποία να μην αξιοποιείται και να απορρίπτεται.

Αυτή η απορριπτόμενη ενέργεια έρχεται να δώσει και να αποτελέσει ένα πολύ σημαντικό κίνητρο στην λεγόμενη «οικονομία του υδρογόνου». Η βασική ιδέα της οικονομίας του υδρογόνου είναι ότι το υδρογόνο θα μπορούσε να αποτελέσει το πιο κατάλληλο καύσιμο για να αντικαταστήσει σταδιακά την χρήση των μέχρι τώρα συμβατικών καυσίμων περιορίζοντας τα προβλήματα της ρύπανσης του περιβάλλοντος και της έλλειψης των αποθεμάτων.



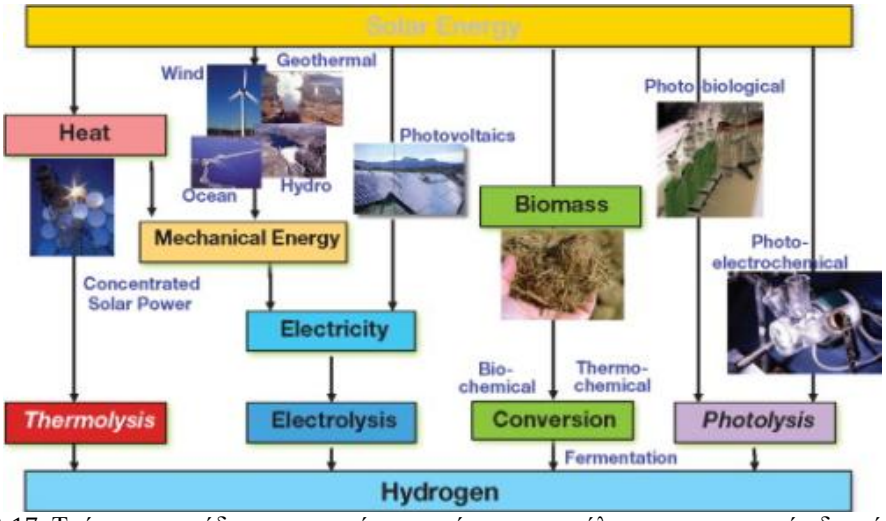
Εικόνα 4.3-15: Εικονικό πλάνο για την οικονομία του υδρογόνου.

Το υδρογόνο είναι ένας πολύ καλός φορέας ενέργειας αφού διαθέτει πολύ υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα βάρους, 120,7 kJ/gr το οποίο συγκριτικά είναι κατά 3 φορές μεγαλύτερο από αυτό της συμβατικής βενζίνης. Συνεπώς το υδρογόνο αποτελεί ιδανικό μέσο για την αξιοποίηση της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας των ΑΠΕ παράγοντας το μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού και αποθηκεύοντας το.



Εικόνα 4.3-16: Ο κύκλος του υδρογόνου από ΑΠΕ.

Ωστόσο έκτος από την ηλεκτρόλυση έχουν αναπτυχτεί και ερευνούνται πάρα πολλοί τρόποι παραγωγής «οικολογικού» υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται διάφοροι τρόποι παραγωγής υδρογόνου από ΑΠΕ.



Εικόνα 4.3-17: Τρόποι και στάδια μετατροπής της ενέργειας του ήλιου για παραγωγή υδρογόνου.

Καθώς λοιπόν όπως παρουσιάζεται και στα προηγούμενα κεφάλαια οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν το καλύτερο μέσω αξιοποίησης του υδρογόνου, με την χρήση του «οικολογικού» υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε αυτές, ενσωματώνονται στην τεχνολογία των κυψελών καυσίμου και όλα εκείνα τα προτερήματα που διαθέτουν οι ΑΠΕ μετατρέποντας τις κυψέλες καυσίμου σε μια "καθαρή" ανανεώσιμη μονάδα παραγωγής ενέργειας.

Σύγκριση των κυψελών καυσίμου με τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ).

Με το συνδυασμό παραγωγής υδρογόνου από ΑΠΕ και την χρησιμοποίηση κυψελών καυσίμου, προκύπτουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με την χρήση μόνο των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Πλεονεκτήματα

- Η παραγόμενη ενέργεια από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αξιοποιείται πλήρως χωρίς να απορρίπτεται.
- Ακόμη δίνεται η δυνατότητα μεγαλύτερης χρησιμοποίησης των συστημάτων παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ ξεπερνώντας τον περιορισμό που έχουν ως προς το ποσοστό διείσδυση τους στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο.
- Ευνοείται η κατανεμημένη παραγωγή ενέργειας καθώς το υδρογόνο μπορεί να παράγεται από μικρές μονάδες ΑΠΕ και να καταναλώνεται κοντά στον τόπο παραγωγής του.
- Οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ως παραπροϊόντα της λειτουργίας τους νερό και θερμότητα τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν προσελκύοντας έτσι μεγαλύτερο ενδιαφέρων στα συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.
- Οι κυψέλες καυσίμου σε σχέση με τις ΑΠΕ παρουσιάζουν σταθερή λειτουργία εφόσον τροφοδοτείται σε αυτές καύσιμο και οξειδωτικό μέσο, δίνοντας έτσι την δυνατότητα αξιόπιστης παροχής ισχύος.

- Έχουν υψηλό βαθμό απόδοσης και συντελεστή πυκνότητας ισχύος.
- Λειτουργούν σε πολύ χαμηλά επίπεδα θορύβου.

Τα βασικά μειονεκτήματα τα οποία υφίστανται είναι:

Μειονεκτήματα

- Το κόστος των κυψελών καυσίμου και των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας βρίσκονται ακόμη σε πολύ υψηλά επίπεδα.
- Οι κυψέλες καυσίμου είναι αρκετά πολύπλοκες εγκαταστάσεις.
- Η διαδικασία της ηλεκτρόλυσης του νερού είναι μια αρκετά ενεργοβόρα διαδικασία για την οποία χρειάζονται μεγάλα ποσά ενέργειας και έτσι έχει σημαντική χρησιμότητα μόνο στην περίπτωση στην οποία η ενέργεια που χρησιμοποιείται πρόκειται να απορριφθεί. Η χρήση της βιομάζας πάντως για παραγωγή υδρογόνου κατευθείαν μέσω αλγών ή από την αναμόρφωση των βιοκαυσίμων αποτελεί μια πολύ καλύτερη περίπτωση.
- Η αποθήκευση του υδρογόνου αποτελεί επίσης μια διαδικασία η οποία παρουσιάζει ακόμη πολλές τεχνικές δυσκολίες (υψηλές πιέσεις, διαρροή υδρογόνου κ.α). Ακόμα κατά την υλοποίηση της ανάλογά με τον τρόπο και τη μέθοδο αποθήκευσης του υδρογόνου (συμπιεσμένο υδρογόνο-φιάλες υψηλής πίεσης, υγρό υδρογόνο-κρυογονικές δεξαμενές, υδρίδια μετάλλων, νανοσωλήνες άνθρακα κ.α.) χρειάζονται αξιόλογα ποσά ενέργειας.

Κεφάλαιο 5

Εφαρμογές των κυψέλων καυσίμων

5.1 Εισαγωγή

Η εξέλιξη της τεχνολογίας του υδρογόνου και των τεχνολογιών των κυψελών καυσίμου σημειώνουν σημαντική πρόοδο προς την αντιμετώπιση πολλών από των βασικών προκλήσεων για την ευρεία εμπορευματοποίηση τους. Οι κυψέλες καυσίμου εκ κατασκευής είναι αρκετά ευέλικτα συστήματα και συνεπώς προσφέρονται για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από μεγάλες σταθερές μονάδες παραγωγής ενέργειας έως μικρές φορητές συσκευές. Έχουν τη δυνατότητα να αντικαταστήσουν τον κινητήρα εσωτερικής καύσης στα οχήματα και να παρέχουν ενέργεια σε σταθερές και φορητές εφαρμογές. Είναι ενεργειακά αποδοτικά συστήματα, με χαμηλά ή μηδενικά επίπεδα ρύπων και διαθέτουν μεγάλη ευελιξία ως προς το χρησιμοποιούμενο καύσιμο. Η βιομηχανία εστιάζει στην ανάπτυξη αξιόπιστων, χαμηλού κόστους και υψηλής απόδοσης συστημάτων κυψελών καυσίμου και το ενδιαφέρων επικεντρώνεται κυρίως σε εφαρμογές στις μεταφορές και στα κτίρια.

Η εμπορευματοποίηση των κυψελών καυσίμου αποτελείται από τρεις μεγάλες κατηγορίες εφαρμογών: σταθερές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, φορητές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής και εφαρμογές στις μεταφορές. Οι σταθερές μονάδες περιλαμβάνουν κάθε εφαρμογή στην οποία οι κυψέλες καυσίμου είναι εγκατεστημένες και λειτουργούν σε σταθερή θέση, είτε ως κύρια ή εφεδρική μονάδα ισχύος, είτε για τη συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού (CHP). Στις φορητές εφαρμογές χρησιμοποιούνται κυψέλες καυσίμου που δεν είναι μόνιμα εγκατεστημένες σε σταθερή θέση ή κυψέλες καυσίμου οι οποίες είναι τοποθετημένες σε φορητές συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα, laptops κ.α. . Οι εφαρμογές στις μεταφορές περιλαμβάνουν κυψέλες καυσίμου οι οποίες τροφοδοτούν με κινητήρια ισχύ αυτοκίνητα, λεωφορεία, ειδικά οχήματα (μοτοσικλέτες, ποδήλατα, μηχανάκια σκούτερ, σκάφη, υποβρύχια, σκάφη γιοτ, αεροπλάνα, περονοφόρα και ανυψωτικά οχήματα, ρυμουλκά οχήματα, αμαξάκια του γκολφ, αναπηρικά αμαξίδια) και άλλα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου (FCEV). Ακόμα χρησιμοποιούνται ως βοηθητικές μονάδες ισχύος (APU) σε αεροσκάφη και ειδικά οχήματα (φορτηγά ψυγεία, ρυμουλκά κ.α.).

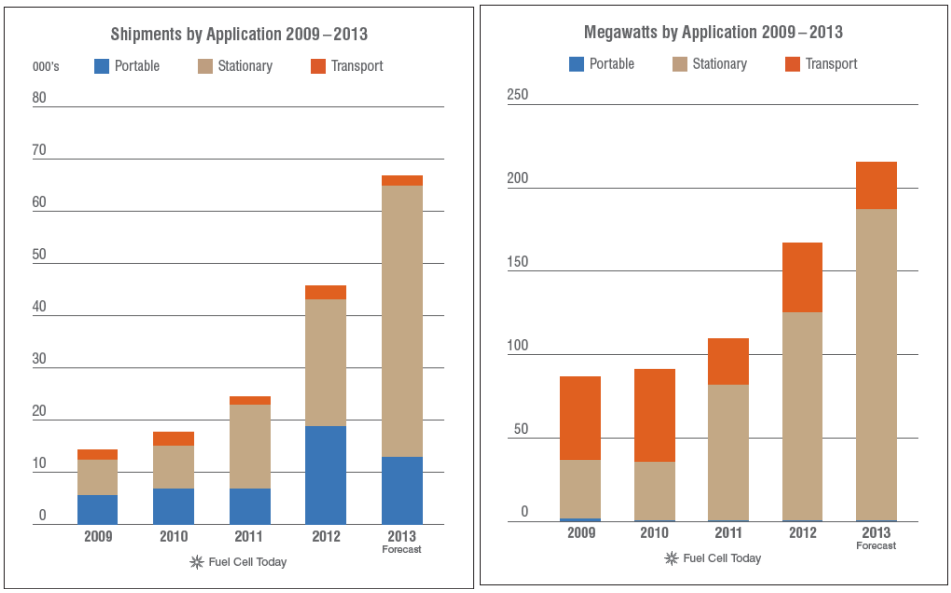
Application Type	Portable	Stationary	Transport
Definition	Units that are built into, or charge up, products that are designed to be moved, including auxiliary power units (APU)	Units that provide electricity (and sometimes heat) but are not designed to be moved	Units that provide propulsive power or range extension to a vehicle
Typical power range	5 W to 20 kW	0.5 kW to 400 kW	1 kW to 100 kW
Typical technology	PEMFC DMFC	MCFC PAFC PEMFC SOFC	PEMFC DMFC
Examples	- Non-motive APU (campervans, boats, lighting) - Military applications (portable soldier-borne power, skid-mounted generators) - Portable products (torches, battery chargers), small personal electronics (mp3 players, cameras)	- Large stationary combined heat and power (CHP) - Small stationary micro-CHP - Uninterruptible power supplies (UPS)	- Materials handling vehicles - Fuel cell electric vehicles (FCEV) - Trucks and buses

Πίνακας 5.1-1: Ορισμός, τυπική ισχύ, τυπική τεχνολογία και εφαρμογές ανά κατηγορία εφαρμογών.

Βέβαια για την πλήρη εμπορική ανάπτυξη της τεχνολογίας των κυψέλων καυσίμου απαιτείτε και μια επιπλέον κατηγορία η οποία αφορά τα καύσιμα και τις υποδομές τους, δηλαδή την παραγωγή, την αποθήκευση και τη διανομή των

καυσίμων για τις κυψέλες καυσίμου, καθώς αυτό είναι ζωτικής σημασίας για την υλοποίηση και την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας.

Οι κυψέλες καυσίμου αυξάνουν όλο και περισσότερο την εδραίωση τους σε αρκετές εφαρμογές της αγοράς, όπου και αναγνωρίζονται πλέον ως η καλύτερη επιλογή τεχνολογίας σε σχέση με τις συμβατικές γεννήτριες κινητήρα εσωτερικής καύσης ή τις μπαταρίες. Οι πωλήσεις των συστημάτων των κυψελών καυσίμου τα τελευταία χρόνια ακολουθούν συνεχώς μια αυξητική τάση σε όλο τον κόσμο. Συγκριτικά το 2011 σημειώθηκε αύξηση κατά 39% από το 2010 με το σύνολο των πωλήσεων να φτάνει τις 24.600 μονάδες. Το 2012 η αύξηση ήταν σχεδόν διπλάσια σε σχέση με το προηγούμενο έτος για να φτάσει συνολικά τις 45.700 μονάδες. Το πρώτο εξάμηνο του 2013 συνεχίστηκε η δυναμική των πωλήσεων για τα συστήματα κυψελών καυσίμου με προβλέψεις αυτό να συνεχιστεί όλο το χρόνο, και το 2013 να παρουσιάσει και πάλι ανάπτυξη για τον κλάδο, αυτή τη φορά της τάξης του 46%, με τις πωλήσεις να πλησιάζουν τις 67.000 μονάδες.

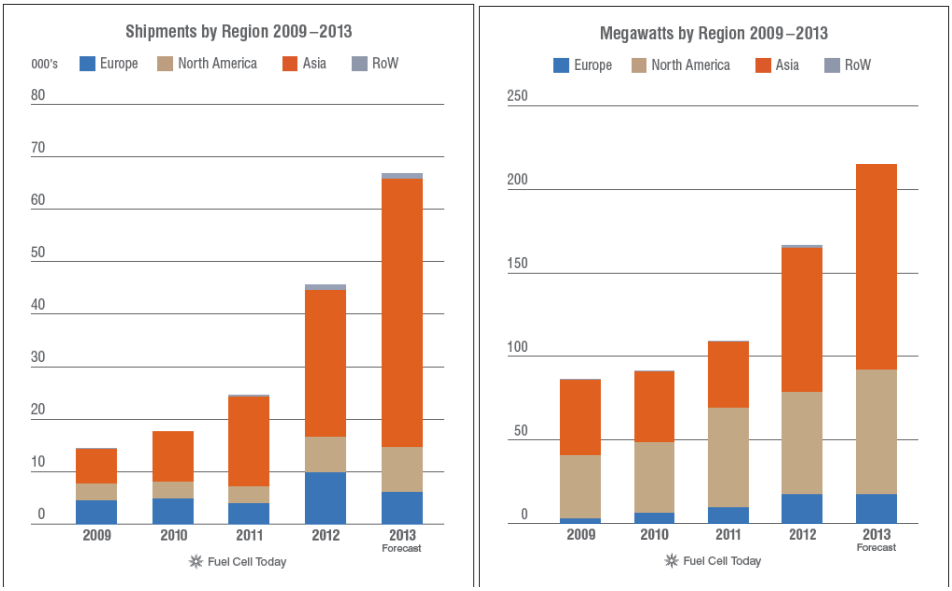


Διάγραμμα 5.1-1: Πωλήσεις και εγκατεστημένα MW ανά εφαρμογή.

Ο στατικός τομέας αποτελεί μακράν τον κυρίαρχο παράγοντα για την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου εφεδρικής ισχύος βρίσκοντας εφαρμογή σε όλες τις κλίμακες. Από τα μικρής κλίμακας διασυνδεδεμένα συστήματα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού (micro-CHP) για οικιακή χρήση, τα αυτόνομα συστήματα εφεδρικής ισχύος για παροχή αδιάλειπτης ισχύος κρίσιμων υποδομών και τα συστήματα κύριας ισχύος για κτίρια ή ακόμη και εγκαταστάσεις κλίμακας μεγαβάτ, σχεδιασμένα ως σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Και από άποψη μεγαβάτ ο στατικός τομέας συνεχίζει να οδηγεί την βιομηχανία των κυψελών καυσίμου χάρη στο μεγάλο μέγεθος των επιμέρους μονάδων. Το 2012 οι συνολικές πωλήσεις των συστημάτων έφτασαν τα 166,7 MW και οι προβλέψεις για το 2013 ήταν ότι θα ξεπεράσουν τα 215 MW.

Η ανάπτυξη αυτή οφείλεται κυρίως στο ότι πολλές κυβερνήσεις σε συνεργασία με εταιρίες κυψελών καυσίμου έχουν αρχίσει να υιοθετούν την οικονομία του υδρογόνου επενδύοντας και επιδοτώντας διάφορα προγράμματα για την χρήση των κυψελών καυσίμου. Η Ασία (κυρίως Ιαπωνία και Βόρεια Κορέα) κατέχει το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς και ακλουθούν η Βόρεια Αμερική και η Ευρώπη (κυρίως Γερμανία και Ηνωμένο Βασίλειο). Η Ασία υπήρξε πρωτοπόρος στην

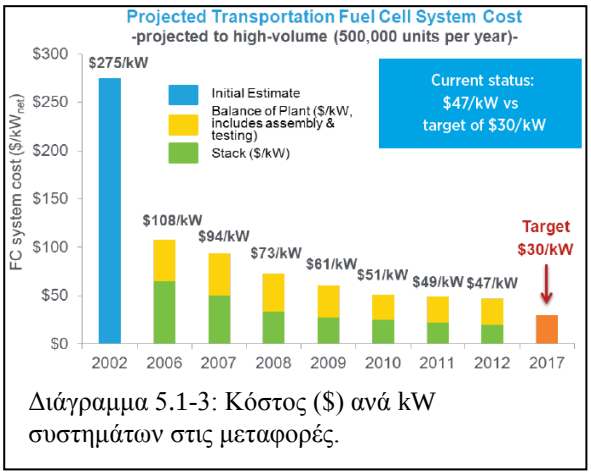
υιοθέτηση της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου κατά τα τελευταία πέντε χρόνια και η κυριαρχία της στον κλάδο συνεχίζει να αυξάνεται κάθε χρόνο, αφού το 2012 κατείχε το 61% των παγκόσμιων πωλήσεων (28.000 μονάδες) και οι προβλέψεις για το 2013 έδειχναν ότι θα φτάσει το 75%. Όσον αφορά τα μεγαβάτ όμως η κυριαρχία δεν είναι τόσο έντονη χάρη στην σημαντική αγορά μεγάλων σταθερών μονάδων κυψελών καυσίμου που υπάρχει στην βόρεια Αμερική. Παρ 'όλα αυτά, η Ασία συνέχισε να αντιπροσωπεύει το 52% των μεγαβάτ (86,1 MW) το 2012, και οι προσδοκίες ήταν αυτό να αυξηθεί σε 57% το 2013.



Διάγραμμα 5.1-2: Πωλήσεις και εγκατεστημένα MW ανά τον κόσμο.

Οι εταιρίες, Ballard Power Systems (Καναδά), Bloom Energy (ΗΠΑ), Ceramic Fuel Cell (Αυστραλία), FuelCell Energy (ΗΠΑ), Hydrogenics (Καναδά), Plug Power (ΗΠΑ), και SFC Energy (Γερμανία) αποτελούν τους πιο βασικούς παράγοντες αφού κατέχουν πάνω από το 50-60% της συνολικής αγοράς για την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου, ενώ το υπόλοιπο μοιράζεται σε όλες τις υπόλοιπες εταιρείες.

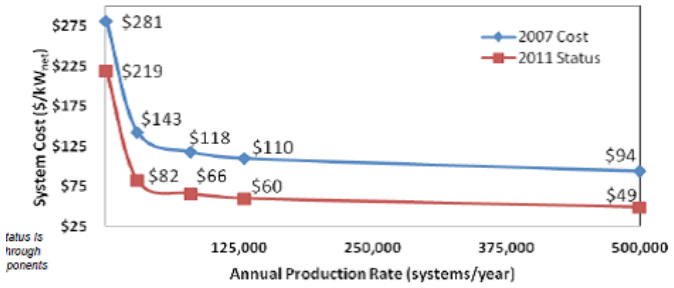
Καθώς λοιπόν η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου αναπτύσσεται το κόστος εξακολουθεί να μειώνεται σημαντικά. Σύμφωνα με το υπουργείο ενέργειας των ΗΠΑ, το κόστος των κυψελών που χρησιμοποιούνται στις μεταφορές μειώθηκε περισσότερο του 80% από το 2002 και 35% από το 2008. Η περιεκτικότητα της πλατίνας μειώθηκε κατά 5 φορές και βρίσκεται σήμερα σε λιγότερο από 0.2 gr/kilowatt (kW) με προβλεπόμενο στόχο να φτάσει στα 0.125 gr/kW. Ακόμη η αντοχή της κυψέλης καυσίμου έχει υπερδιπλασιαστεί.



Διάγραμμα 5.1-3: Κόστος ($) ανά kW συστημάτων στις μεταφορές.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5-3, το προβλεπόμενο κόστος ανά kW του συστήματος των κυψελών καυσίμου στις μεταφορές μειώθηκε κάτω από $50/kW για πρώτη φορά το 2011, με το περισσότερο από το κόστους αυτό να αφορά τα πρόσθετα

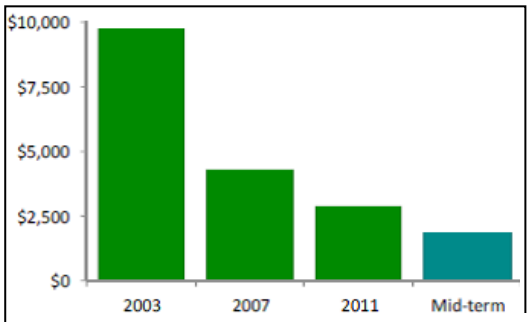
εξαρτήματα του συστήματος και όχι την ίδια την κυψέλη. Επιπλέον, σε σύγκριση με το 2007, το προβλεπόμενο κόστος των συστημάτων μεταφορών ανά kW για το 2011 είναι σημαντικά χαμηλότερο από ό, τι ήταν το 2007, σε ένα ευρύ φάσμα των ετήσιων ποσοστών παραγωγής. (Βλέπε διάγραμμα 5.1-4).



Διάγραμμα 5.1-4:Διακύμανση του κόστους ($) ανά kW συστημάτων μεταφορών την περίοδο 2007-2011.

Η Ballard Power Systems ανέφερε ότι μειώθηκε το κόστος των κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιούνται σε οχήματα διακίνησης υλικών κατά 55% από το 2008. Η Ballard προμηθεύει κατά κύριο λόγο κυψέλες καυσίμου την Plug Power, η οποία τις ενσωματώνει σε διάφορα συστήματα οχημάτων χειρισμού υλικών.

Παρόμοιες μειώσεις του κόστους πραγματοποιήθηκαν και στις σταθερές κυψέλες καυσίμου. Για τις μεγάλες σταθερές μονάδες η UTC Power αναφέρει σχεδόν 50% μείωση του κόστους για το σύστημα PureCell Model 400 το 2011, σε σύγκριση με το 2009. Η FuelCell Energy μείωσε το κόστος από σχεδόν $ 10,000 / kW το 2003 σε περίπου 3.000 $ / kW το 2011 (Βλέπε διάγραμμα 5.1-5) .



Διάγραμμα 5.1-5: Κόστος ($) ανά kW για την FuelCell Energy.

Όσον αφορά τις μικρές σταθερές κυψέλες καυσίμου η ReliOn ανέφερε ότι επιτυγχάνει 40% μείωση του κόστους με ένα νέας γενιάς τυπικό σύστημα κυψελών καυσίμου 4 kW το οποίο εγκαθίσταται σε εξωτερικούς χώρους με δεξαμενή υδρογόνου. Η Tokyo Gas εισήγαγε στην αγορά το 2011 μια ανανεωμένη έκδοση του οικιακού μοντέλου Ene-Farm επιτυγχάνοντας 30% μείωση του κόστους παραγωγής σε σύγκριση με το προηγούμενο μοντέλο. Η τιμή πώλησης του μειώθηκε κατά 21% σε 2,76 εκατομμύρια γεν (περίπου $ 34.000 δολαρίων).

Το κόστος για την παραγωγή και διανομή υδρογόνου συνεχίζει να μειώνεται. Για την κατανεμημένη παραγωγή, το προβλεπόμενο κόστος του υδρογόνου μέσω αναμόρφωσης του φυσικού αερίου είναι τώρα κάτω από $4 ανά ισοδύναμο γαλόνι βενζίνης (GGE). Το προβλεπόμενο κόστος του υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης και βιοκαυσίμων βρίσκεται σήμερα περίπου στα $ 6/GGE, κάτω από σχεδόν $ 8/GGE το 2006.

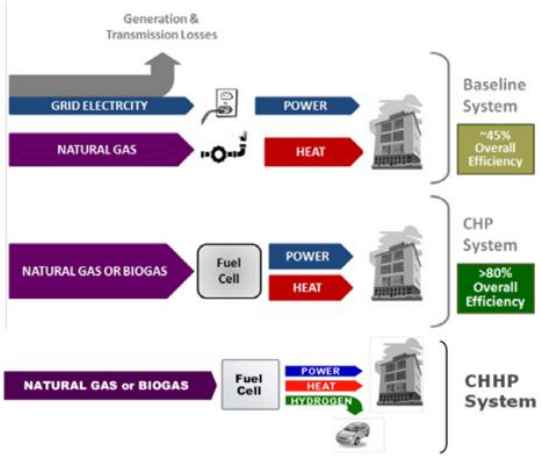
5.2 Χρησιμοποίηση της κυψέλης καυσίμου για συμπαραγωγή ενέργειας (Παραγωγή θερμότητας και ενέργειας για ξενοδοχεία, νοσοκομεία και σπίτια).

Τα συστήματα Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ, Combined Heat and Power, CHP) παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια και θέρμανση ταυτόχρονα, επιπλέον σε συνδυασμό με τη χρήση συστημάτων απορρόφησης μετατρέπονται σε μονάδες τρι-παραγωγής παρέχοντας και ψύξη. Είναι ιδανικά για

εγκαταστάσεις στον βιομηχανικό, τον εμπορικό και τον οικιακό τομέα. Μπορούν να εγκατασταθούν σε σπίτια, ξενοδοχεία, εμπορικά κτίρια, αθλητικά κέντρα, νοσοκομεία, δημόσια κτίρια και άλλες κτιριακές εγκαταστάσεις και να καλύψουν ένα ποσό ή και ολόκληρες τις θερμικές, ψυκτικές και ηλεκτρικές τους ανάγκες. Τα συστήματα συμπαραγωγής συνήθως έχουν ως σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας και όσον αφορά τα οικιακά συστήματα περισσότερο την κάλυψη των θερμικών αναγκών, μπορούν όμως να λειτουργήσουν και ως αυτόνομα συστήματα ή ως διασυνδεμένα στο δίκτυο για συν-τροφοδότηση ή πώληση τυχών περίσσιας ενέργειας.

Οι κυψέλες καυσίμου χάρη στον υψηλό βαθμό απόδοσης τους, τα χαμηλά επίπεδα θορύβου και κραδασμών κατά τη λειτουργία τους, τις χαμηλές ή και μηδενικές εκπομπές ρύπων και την ευελιξία που διαθέτουν ως προς το χρησιμοποιούμενο καύσιμο καθίστανται ένας ιδανικός υποψήφιος για εφαρμογές συμπαραγωγής και τρι-παραγωγής (ως συστήματα τρι-παραγωγής κυψελών καυσίμου – Tri-generation, or combined heat, hydrogen and power, CHHP – αναφέρονται και τα συστήματα που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, θερμότητα και υδρογόνο μέσω της εσωτερικής τους αναμόρφωσης συνήθως με κυψέλες καυσίμου SOFCs). Η τεχνολογία της συμπαραγωγής κυψελών καυσίμου έχει δοκιμαστεί με επιτυχία στην Κορέα και τις ΗΠΑ, σε βιομηχανική κλίμακα (>1MW) ενώ στην Ιαπωνία έχει πολύ μεγάλη ανάπτυξη στον οικιακό τομέα. Η ευρωπαϊκή αγορά έχει κάνει κι αυτή την είσοδο της στα συστήματα CHP κυψελών καυσίμου με την Γερμανία να έχει έναν μεγάλο αριθμό εγκατεστημένων οικιακών συστημάτων, αναμένεται να ακολουθήσει το Ηνωμένο Βασίλειο καθώς και μια σειρά από επενδύσεις και έργα βρίσκονται σε εξέλιξη για να προωθήσουν την εισαγωγή τους στην αγορά.

Τα συστήματα CHP κυψελών καυσίμου μπορούν να φτάσουν σε απόδοση μέχρι και το 80-85% (40-50% ηλεκτρική και το υπόλοιπο ως θερμική). Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFCs), τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFCs) και στερεών οξειδίων (SOFCs) χρησιμοποιούνται συνήθως σε μεγάλης κλίμακας βιομηχανικές εφαρμογές, ενώ κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFCs) και στερεών οξειδίων (SOFCs) χρησιμοποιούνται συνήθως σε μικρής κλίμακας οικιακές εφαρμογές. Μπορούν να λειτουργήσουν με τη σύνδεση τους στο υφιστάμενο δίκτυο φυσικού αερίου (NG) ή υγραερίου (LPG) ή με την τροφοδότηση τους με πλούσια σε υδρογόνο καύσιμα, χρησιμοποιώντας μια μονάδα αναμόρφωσης για τη μετατροπή του καυσίμου σε υδρογόνο, ελαχιστοποιώντας έτσι τις απαιτήσεις υποδομής. Αν το υδρογόνο παράγεται με ηλεκτρόλυση νερού με τη βοήθεια ΑΠΕ τότε η εγκατάσταση μπορεί να θεωρηθεί ως εγκατάσταση ΑΠΕ. Οι τρόποι εκμετάλλευσης της θερμικής ενέργειας μπορεί να είναι είτε για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης ή τη θέρμανση χώρων (οικιακή χρήση) είτε για την παραγωγή χαμηλής ή υψηλής πίεσης (LP-HP) ατμού (βιομηχανική χρήση).



Εικόνα 5.2-1: Εκμετάλλευση της ενέργειας σε συμβατικό, συμπαραγωγής και τρι-παραγωγής σύστημα.

Τα πλεονεκτήματα και τα οφέλη που προκύπτουν από την χρήση των συστημάτων συμπαραγωγής κυψελών καυσίμου είναι:

- Κατανεμημένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μακροπρόθεσμη εξοικονόμηση κόστους).
- Αποτελεσματικότερη αξιοποίηση της θερμότητας στο σημείο χρήσης (αύξηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος).
- Μειωμένη συχνότητα συντήρησης και αδιάλειπτη λειτουργία.
- Αμελητέα ποσότητα οξειδίων του αζώτου και του θείου (NOx, SOx) καθώς και στερεών σωματιδίων, δίνει την δυνατότητα εγκατάστασης σχεδόν σε οποιοδήποτε μέρος (π.χ. δίπλα από παιδικές χαρές, σε σπίτια πυκνοκατοικημένων περιοχών, σε νοσοκομεία).
- Πολύ χαμηλά επίπεδα θορύβου και κραδασμών, μειώνεται έτσι η ανάγκη για ηχομόνωση (εξοικονόμηση χρημάτων, μείωση του κόστους εγκατάστασης)
- Ποικιλομορφία καυσίμων (όπως το φυσικό αέριο, το αέριο επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, βιοαέριο και syngas).

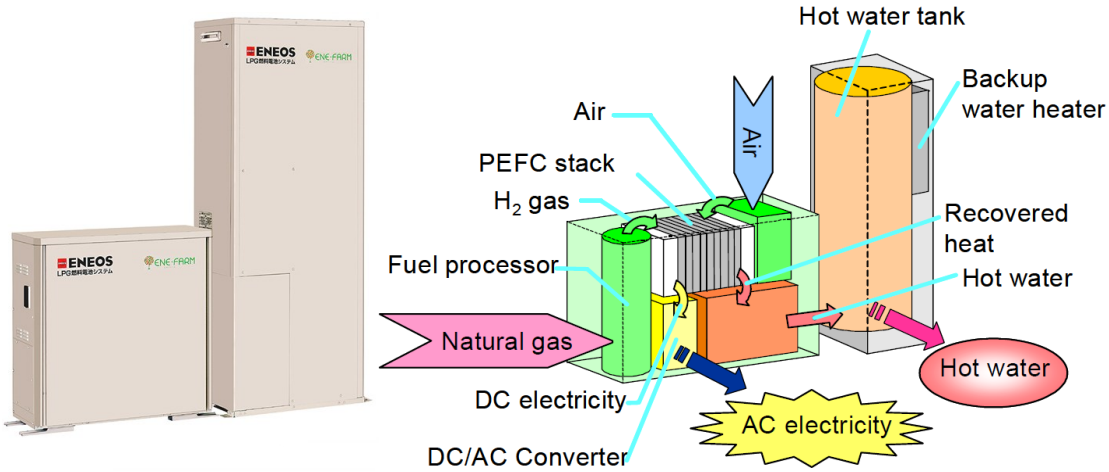
Μεγάλο ενδιαφέρον έχει δοθεί τα τελευταία χρόνια στα οικιακά συστήματα CHP κυψελών καυσίμου τα οποία ονομάζονται micro-CHP. Τα micro-CHP μπορούν να αντικαταστήσουν ή να συμπληρώσουν το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο και να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες σε σπίτια, σχολεία και μικρές επιχειρήσεις, παρέχοντας μια μορφή κατανεμημένης ενέργειας στο σημείο χρήσης της μειώνοντας σημαντικά τις απώλειες μεταφοράς της ενέργειας. Έχουν περίπου το μέγεθος ενός οικιακού ψυγείου και λειτουργούν σχεδόν αθόρυβα με αποτέλεσμα να μπορούν να εγκατασταθούν σχεδόν οπουδήποτε. Λειτουργούν συνήθως με τροφοδοσία φυσικού αερίου ή υγραερίου, τα οποία είναι ευρέως διαθέσιμα καύσιμα και υπάρχουν κεντρικά δίκτυα διανομής τους σε πολλές μεγάλες πόλεις. Παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα όμοιο με του δικτύου και θερμότητα για τη θέρμανση χώρων και την παραγωγή ζεστού νερού. Παρουσιάζουν συνολική απόδοση της τάξης του 90-95% η οποία σημαίνει χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου καθώς και μειωμένες εκπομπές ρύπων.

Οι κύριοι τύποι κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιούνται στα micro-CHP συστήματα είναι, οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), όπου και αποτελούν την πλειοψηφία των μέχρι τώρα εγκατεστημένων συστημάτων και οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC). Οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) μπορούν να λειτουργούν κατά τη διάρκεια της ημέρας όπου και η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού είναι αυξημένη και κατά την διάρκεια της νύκτας όπου και η ζήτηση μειώνεται μπορούν να απενεργοποιηθούν. Αυτή η διαδικασία on-off λειτουργίας λόγο των χαμηλών θερμοκρασιών λειτουργίας των PEMFC μπορεί να γίνει αυτόματα και χωρίς να δημιουργεί προβλήματα στην λειτουργία της κυψέλης αυξάνοντας έτσι και την συνολική αποδοτικότητα του συστήματος. Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) έχουν υψηλότερο ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης από τις PEMFC και λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανεκτικότητα στα επίπεδα ακαθαρσιών και μονοξειδίου του άνθρακα που περιέχονται στο καύσιμο και να διαθέτουν το πλεονέκτημα της εσωτερικής αναμόρφωσης, εξαλείφοντας την ανάγκη για μια ξεχωριστή μονάδα αναμόρφωσης, μειώνοντας έτσι την πολυπλοκότητα και το κόστος του συστήματος. Ωστόσο οι SOFC πρέπει να έχουν όσο το δυνατόν συνεχόμενη λειτουργία, προκειμένου να παραταθεί η διάρκεια ζωής του συστήματος, καθώς η start-stop λειτουργία μπορεί να

προκαλέσει καταστροφικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Το αποτέλεσμα είναι να υπάρχει συνεχόμενη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού ακόμα και όταν δεν υπάρχει ζήτηση. Έτσι η υψηλότερη θεωρητική αποδοτικότητα των συστημάτων SOFC είναι δύσκολο να υλοποιηθεί και σε πραγματική λειτουργία η αποτελεσματικότητα PEMFC και SOFC είναι παρόμοια.

Ένα τυπικό πλήρες micro-CHP σύστημα κυψελών καυσίμου αποτελείτε από τα εξής μέρη:

- Το κυρίως σύστημα της κυψέλης καυσίμου το οποίο αποτελείται από:
  - Μια συστοιχία κυψελών καυσίμου.
  - Ένα σύστημα επεξεργασίας καυσίμου (αναμορφωτής) για την μετατροπή του φυσικού αερίου ή άλλων υδρογονανθράκων σε υδρογόνο.
  - Έναν μετατροπέα συνεχούς τάσης DC σε εναλλασσόμενη AC (inverter) για την σύνδεση στο δίκτυο.
  - Ένα σύστημα εναλλακτών για την μεταφορά της αποβαλλόμενης θερμότητας από τα καυσαέρια και το ψυκτικό υγρό σε ένα εξωτερικό σύστημα.
  - Λοιπά εξαρτήματα (αντλίες, βαλβίδες, αισθητήρες, σωληνώσεις, συστήματα ηλεκτρονικού ελέγχου κ.λπ.).
- Το σύστημα διαχείρισης θερμικών φορτίων το οποίο αποτελείται από:
  - Έναν βοηθητικό λέβητα για την παροχή θερμότητας σε περιόδους ζήτησης αιχμής.
  - Μια δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού ώστε να παρέχει θερμική αδράνεια στο σύστημα και να μπορεί ακόμα και μια χαμηλής δυναμικότητας κυψέλη καυσίμου να καλύψει το μεγαλύτερο μέρος της θερμικής ζήτησης του κτιρίου.
- Τον πίνακα ελέγχου, ρυθμίσεων και πληροφοριών του συστήματος ο οποίος αποτελείται από:
  - Μια οθόνη.
  - Ένα σύστημα τηλεχειρισμού.
  - Έναν μετρητή παραγωγής/κατανάλωσης.



Εικόνα 5.2-2: Τυπικό οικιακό σύστημα συμπαραγωγής.

Οι χώρες οι οποίες αποτελούν τις κυριότερες αγορές και προωθούν την εμπορευματοποίηση των συστημάτων αυτών είναι η Ιαπωνία, η Γερμανία και η Νότια Κορέα. Επίσης το Ηνωμένο Βασίλειο άρχισε να επενδύει στην τεχνολογία των micro-

CHP. Οι ΗΠΑ αν και διαθέτουν βασικό μερίδιο στον τομέα της βιομηχανικής κλίμακας CHP συστημάτων στα micro-CHP συστήματα παρουσιάζουν σχετικά μικρή ανάπτυξη λόγω μη ελκυστικού οικονομικού περιβάλλοντος.

Μακράν η μεγαλύτερη δραστηριότητα έχει συμβεί στην Ιαπωνία στα πλαίσια του προγράμματος Ene-Farm. Μια σειρά έργων επίδειξης μεγάλης κλίμακας έχουν πραγματοποιηθεί από το 2003, με αποτέλεσμα την εγκατάσταση περίπου 3.000 μονάδων σε ιδιωτικές κατοικίες. Μετά την ολοκλήρωση αυτών των έργων το 2009, ξεκίνησε το εμπορικό μέρος του προγράμματος EneFarm με κύριο ενδιαφέρον στα συστήματα με βάση τις PEMFCs στο οποίο συμμετείχαν πολλές εταιρίες όπως η Panasonic, Eneos (JX Nippon Oil & Sanyo), Toshiba κ.α.. Πάνω από 20.000 συστήματα Ene-Farm πουλήθηκαν σε ιδιοκτήτες και κατασκευαστές κατοικιών στα τρία έτη μετά την έναρξη του προγράμματος, με τη βοήθεια των κρατικών επιδοτήσεων. Την επίδειξη των Ene-Farm συστημάτων με βάση τις SOFC "Ene-FarmType S" είχαν αναλάβει εταιρίες όπως η Kyocera, Osaka Gas, Toyota, Eneos, Nippon Oil, Toto κ.α. από το 2007 και το 2012 δυο μοντέλα των εταιριών Kyocera και Eneos μπήκαν στην αγορά έχοντας ήδη προπαραγγελμένα περίπου 300 συστήματα. Σήμερα ο διαχωρισμός είναι περίπου 80% συστήματα με βάση τις PEMFC και 20% με βάση τις SOFC.

Τα συστήματα του EneFarm με βάση τις ενεργειακές ανάγκες μιας μέσης κατοικίας στην Ιαπωνία έχουν ηλεκτρική ισχύ από 0,7 έως 1,0 kW (0,9-1,4 kW θερμικής) με αναμορφωτή καυσίμου ιδανικό είτε για φυσικό αέριο, υγραέριο ή κηροζίνη και δεξαμενή ζεστού νερού με ενσωματωμένο βοηθητικό λέβητα. Από την εισαγωγή τους τα συστήματα Ene-Farm βελτιώνονται συνεχώς. Η τελευταία έκδοση που προσφέρει η Tokyo Gas προσφέρει μια βελτίωση 3% στην ηλεκτρική απόδοση (LHV) και καταλαμβάνει 49% λιγότερο χώρο στο δάπεδο. Αυτές οι βελτιώσεις έγιναν, ενώ την ίδια στιγμή το κόστος μειώθηκε κατά 20% με την τιμή ενός συστήματος EneFarm 0,7 kW να κυμαίνεται στα $20.000-22.000 (τιμές 2011-12). Η συνεχής μείωση του κόστους θα είναι ζωτικής σημασίας για την μακροπρόθεσμη επιτυχία του συστήματος, αλλά και η αύξηση του όγκου των πωλήσεων μπορεί να βοηθήσει.



Εικόνα 5.2-3: Πρόγραμμα EneFarm.

Η κυβέρνηση της Νότιας Κορέας έχει θέσει τις κυψέλες καυσίμου ως τεχνολογία προτεραιότητας και υποστηρίζει την επίδειξη περίπου πεντακοσίων οικιακών γεννητριών (Residential Power Generators, RPGs) με επιδοτήσεις που προσφέρουν το 80% της τιμής αγοράς τους. Μετά από μια αρχική περίοδο δοκιμών συστημάτων RPGs του 1kW το 2004, τέσσερις εταιρείες της Κορέας (GS Fuel Cell, FuelCell Power, HyoSung και LS), άρχισαν την επίδειξη των κυψελών καυσίμου αυτών των δοκιμών, και εγκατέστησαν 210 μονάδες μεταξύ 2006 και 2009, με κόστος $18m δολάρια σε επιδοτήσεις. Ο χάρτης πορείας τους περιλαμβάνει τη

συνέχεια των δοκιμών μέχρι το 2014 και στη συνέχεια την επέκταση στις εμπορικές πωλήσεις από το 2015 και μετά.

Στην Γερμανία προς το παρών το μεγαλύτερο ευρωπαϊκό σχέδιο στον τομέα αυτό είναι το πρόγραμμα πρακτικών δοκιμών κυψελών καυσίμου CALLUX με συστήματα από τις Baxi Innotech, Hexis και Vaillant εγκαταστημένα σε επιλεγμένες κατοικίες (το σύστημα Baxi είναι PEMFC, τα Hexis και Vaillant είναι SOFC). Το CALLUX έχει εγκαταστήσει πάνω από 300 συστήματα κυψελών καυσίμου τα οποία έχουν ξεπεράσει στο σύνολο τους το ένα εκατομμύριο ώρες λειτουργίας. Αυτές οι ώρες καταγραφής και δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της απόδοσης των προϊόντων υπό πραγματικές συνθήκες ως βάση ανάπτυξης για περαιτέρω βελτιώσεις. Τα σημαντικά που προέκυψαν ήταν: Το CALLUX ανάφερε ότι οι δαπάνες των συσκευών μειώθηκαν κατά 60%, ενώ το κόστος για τη συντήρηση και τα ανταλλακτικά μειώθηκε κατά 90%. Η διαθεσιμότητα του συστήματος αυξήθηκε σε πάνω από 97%. Η ηλεκτρική απόδοση έχει αυξηθεί σε πάνω από 33% και η συνολική απόδοση σε πάνω από 96%. Επίσης σε όλα αυτά προστίθενται και το ότι τα συστήματα έχουν γίνει μικρότερα, ελαφρύτερα και πιο ανθεκτικά.

Το έργο έχει στόχο να θέσει σε λειτουργία περίπου 1.000 μονάδες και έχει προγραμματιστεί να λήξει το 2015 οπού και προβλέπεται ότι τα συστήματα θα είναι έτοιμα για την έναρξη της εμπορικής τους λειτουργίας. Το CALLUX υπάγεται στο Εθνικό Πρόγραμμα Καινοτομίας της Γερμανίας για το υδρογόνο και την τεχνολογία κυψελών καυσίμου (Germany's National Innovation Programme for Hydrogen and Fuel Cell Technology, NIP) το οποίο περιλαμβάνει, επίσης, χωριστές δοκιμές σε 50 (PEMFC) και 202 (SOFC) micro-CHP συστήματα, καθώς και άλλα έργα σε εξέλιξη.

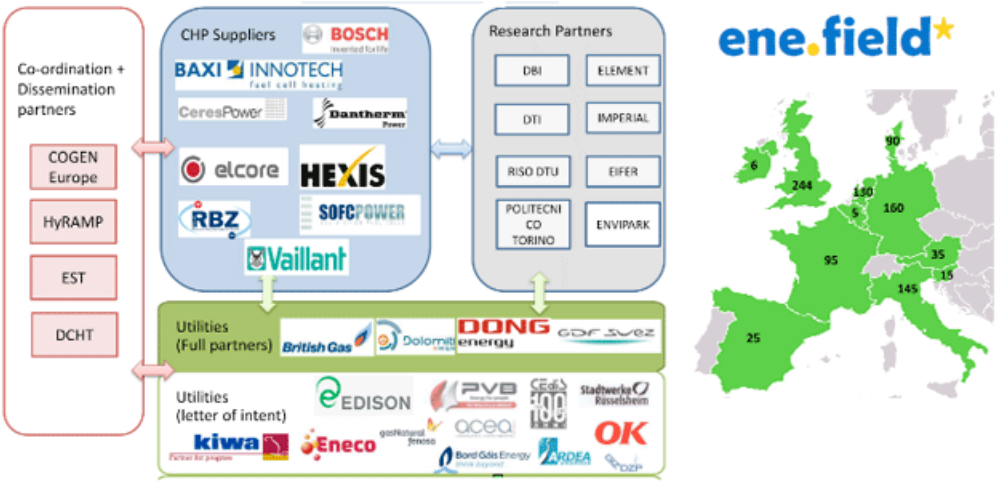


Εικόνα 5.2-4: Πρόγραμμα CALLUX.

Η Ceramic Fuel Cells Limited (CFCL) στοχεύει στην Ευρώπη ως μια πρώιμη αγορά για τα οικιακά συστήματα κυψελών καυσίμου και διαθέτει μια σειρά από μονάδες οι οποίες έχουν ήδη παραγγελθεί. Συμμετέχει επίσης σε ένα πρόγραμμα το οποίο συγχρηματοδοτείτε από την Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) και ονομάζεται SOFT-PACT με στόχο την επίδειξη 100 SOFC micro-CHP συστημάτων στην Ολλανδία, το Ηνωμένο Βασίλειο και τη Γερμανία. Συγκεκριμένα έχει σκοπό να δείξει ότι διαθέτει ένα σύστημα το οποίο μετατρέπει το 50% της ενέργειας του καυσίμου σε ηλεκτρισμό και μπορεί να λειτουργήσει αξιόπιστα κάτω από πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η πρώτη φάση του έργου χρησιμοποιεί 40 CFCL BlueGenTM συστήματα για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού μόνο. Στη δεύτερη φάση θα δοκιμαστεί ένα πρόσφατα ανεπτυγμένο σύστημα βασισμένο σε μια πρωτότυπη μονάδα κυψελών καυσίμου CFCL. Αυτό θα έχει την κυψέλη καυσίμου με ενσωματωμένη δεξαμενή ζεστού νερού ως θερμική αποθήκη και βοηθητικό λέβητα ώστε να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες θέρμανσης χώρων, ζεστού νερού και ηλεκτρισμού. Η απόδοση των δύο συστημάτων θα πρέπει να συγκριθεί για να προσδιοριστεί η βέλτιστη διαμόρφωση και αποτελεσματικότητα συνάρτηση του κόστους με στόχο την απελευθέρωση ενός προϊόντος στην αγορά, το συντομότερο δυνατό.

Προγράμματα δοκιμών micro-CHP κυψελών καυσίμου συστημάτων τρέχουν και σε άλλες ευρωπαϊκές χώρες με αξιοσημείωτο παράδειγμα το πρόγραμμα Micro Combined Heat & Power της Δανίας. Η δεύτερη φάση του προγράμματος κατέληξε σε ενθαρρυντικά συμπεράσματα μετά την επιτυχημένη δοκιμή εννέα πρωτότυπων συστημάτων από τις IRD Fuel Cells, Dantherm Power και Topsoe Fuel Cell σε ιδιωτικές κατοικίες, εμπορικά και δημόσια κτήρια. Για άλλη μια φορά, τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτίωση των συστημάτων πριν από την επόμενη φάση της επίδειξης.

Δοκιμές όπως αυτές χρησίμευσαν ως πολύτιμη και απαραίτητη απόδειξη της έννοιας των micro FC-CHP συστημάτων και άνοιξαν το δρόμο για μια πανευρωπαϊκή εξάπλωση σε ευρύτερη κλίμακα. Έτσι 2012 ξεκίνησε ένα πρόγραμμα για την υλοποίηση αυτής της ανάπτυξης. Το όνομα του ene.field, απηχώντας στο ιαπωνικό πρόγραμμα και με την προσδοκία να ακολουθήσει κι αυτό μια επιτυχημένη πορεία. Το πρόγραμμα περιλαμβάνει εννέα κατασκευαστές συστημάτων κυψελών καυσίμου (Baxi Innotech, Bosch, Ceres power , Dantherm power, Elcore, Hexis, RBZ, SOFC power και Vaillant) όπου θα εγκαταστήσουν περίπου χίλια συστήματα σε δώδεκα κράτη μέλη της ΕΕ τα οποία θα παρακολουθούνται στενά ώστε να αξιολογηθεί η απόδοσή τους για μια περίοδο τριών ετών σε κατοικίες σε όλο το φάσμα των οικιακών ευρωπαϊκών αγορών θέρμανσης, ειδών κατοικίας και κλιματικών ζωνών, οδηγώντας σε ένα πολύτιμο σύνολο δεδομένων για την οικιακή κατανάλωση ενέργειας και τις εφαρμογές micro FC-CHP σε ολόκληρη την Ευρώπη.



Εικόνα 5.2-5: Πρόγραμμα ene.field.

Τα κύρια αποτελέσματα του έργου ene.field θα είναι:

- Μια πραγματική επίδειξη μάθησης προς το καταναλωτικό κοινό των δυνατοτήτων της αγοράς καθώς και τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από την χρήση των micro FC-CHP συστημάτων.
- Μια ανεπτυγμένη αγορά η οποία θα εστιάζει στις προδιαγραφές των προϊόντων και στην εναρμόνιση κωδικών και προτύπων.
- Μια ώριμη αλυσίδα εφοδιασμού έτοιμη για την ανάπτυξη των micro FC-CHP συστημάτων στα 12 κράτη μέλη.
- Μια βάση δεδομένων με στοιχεία σχετικά με το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιδόσεις τα οποία θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να επιταχύνουν την πολιτική υποστήριξη από τις κυβερνήσεις και την έγκριση από τα μέσα των αγορών.

Στα πλαίσια του ene.field όπως μπορεί να φανεί και στο διπλανό διάγραμμα μια ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας επιτρέπει στους προμηθευτές να ξεπεράσουν το σημείο με το μεγαλύτερο κίνδυνο στην εμπορευματοποίηση των νέων προϊόντων όπου οι ποσότητες παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα και απαιτείται μια μείωση του κόστους προκειμένου να κινηθεί η τεχνολογία σε ένα εμπορικό κλήμα.

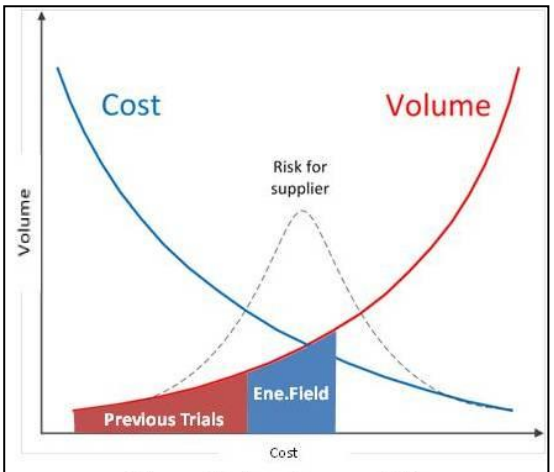


Figure - Cost, volume and risk

Διάγραμμα 5.2-1: Σημείο τομής για το ρίσκο εμπορευματοποίησης του διαθέσιμου προϊόντος σε σχέση με το κόστος.

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων που θα αναπτυχθούν στα πλαίσια του προγράμματος ene.field.

Technical characteristics	Summary table of products	
FC technology	LT PEM / HT PEM	SOFC / IT-SOFC
kW electrical	1 kW - 5kW	0.8kW – 2.5kW
kW thermal	1.4kW - 10 kW	1.4kW - 25kW
System efficiency (LHV)	85% - 90%	80-95%
Electrical efficiency (LHV)	35%	35%- 40%
System type	Floor	Wall or Floor
Certification	CE	CE

Πίνακας 5.2-1: Τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων που θα αναπτυχθούν μέσω του ene.field.

5.3 Αποκεντρωμένη παραγωγή ισχύος (Έρευνα και ανάπτυξη στη βιομηχανία)

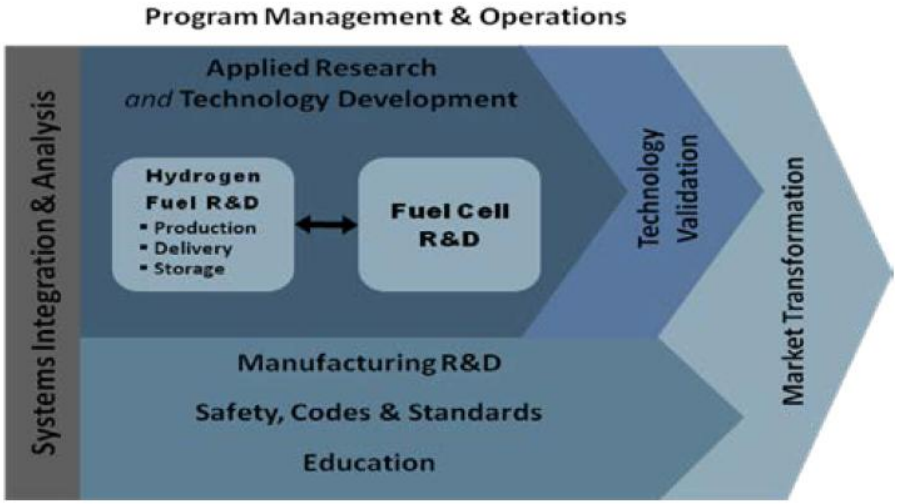
Οι κυψέλες καυσίμου και γενικά η τεχνολογία και η οικονομία του υδρογόνου βασίζονται κατά κύριο ρόλο σε ενεργειακά πλάνα τα οποία υποστηρίζουν και προωθούν την ιδέα της αποκεντρωμένης παραγωγής ισχύος. Οι κυψέλες καυσίμου είναι ιδανικά συστήματα για εγκαταστάσεις αποκεντρωμένης παραγωγής ισχύος λόγω του ότι είναι μια τεχνολογία η οποία, έχει την δυνατότητα να εγκατασταθεί σχεδόν παντού χωρίς ενοχλήσεις θορύβου και προβλήματα ρύπανσης, έτσι μπορεί να τοποθετηθεί πολύ κοντά στο σημείο κατανάλωσης της ενέργειας εξαλείφοντας τις απώλειες μεταφοράς της ενέργειας. Ακόμη οι κυψέλες καυσίμου διαθέτουν αρθρωτή (modular) δομή παρέχοντας την δυνατότητα επέκτασης του συστήματος και αύξησης της εγκατεστημένης ισχύος ανάλογα με την τοπική ενεργειακή ζήτηση. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα της παραγωγής του καυσίμου πολύ κοντά στην πηγή κατανάλωσης του (π.χ. παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης του νερού με

ενέργεια από μονάδες ΑΠΕ, παραγωγή βιοαερίου κ.α.) αποφεύγοντας έτσι τις απώλειες μεταφοράς του καυσίμου.

Τα τελευταία χρόνια κυβερνήσεις, εταιρίες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και κατασκευάστριες εταιρίες κυψελών καυσίμου συμφωνούν ότι η αποκεντρωμένη παραγωγή ισχύος παρέχει αρκετά οφέλη και πλεονεκτήματα (λιγότερες απώλειες ενέργειας και χαμηλότερα επίπεδα εκπεμπόμενων ρύπων με έμφαση κυρίως στο CO_2) με αποτέλεσμα να έχουν τεθεί σε εφαρμογή πάρα πολλά προγράμματα και έργα που έχουν ως βασικό στόχο την ανάπτυξη, την εξέλιξη και την ευρεία εμπορευματοποίηση της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου.

Παρόλο που η παγκόσμια οικονομική κρίση η οποία επικρατεί αποθάρρυνε την διαφημιστική εκστρατεία γύρω από την οικονομία του υδρογόνου, οι κυβερνήσεις, οι επιχειρηματίες και η βιομηχανία των κυψελών καυσίμου συνεχίζουν υποστηρίζουν την χρηματοδότηση για έρευνα και ανάπτυξη (Research and Development (R&D) Funding) των συστημάτων κυψελών καυσίμου. Για παράδειγμα κατά τη διάρκεια των τελευταίων δέκα ετών το υπουργείο ενέργειας των ΗΠΑ έχει δαπανήσει πάνω από 2 εκατομμύρια δολάρια περίπου το 1% του συνολικού προϋπολογισμού του στην έρευνα, την ανάπτυξη και τις δοκιμές συστημάτων κυψελών καυσίμου.

Ακαδημαϊκές και βιομηχανικές έρευνες σε όλο τον κόσμο συνεχίζουν να πειραματίζονται με νέους τρόπους κατασκευής φθηνότερων και αποδοτικότερων συστημάτων σημειώνοντας σημαντική πρόοδο. Ένας αυξανόμενος αριθμός επιχειρήσεων, τόσο στον ιδιωτικό όσο και το δημόσιο τομέα, πωλούν συστήματα κυψελών καυσίμου σε ένα ευρύ φάσμα πελατών, συμπεριλαμβανομένων επιχειρήσεων ηλεκτρισμού κοινής ωφέλειας, βιομηχανικών και εμπορικών επιχειρήσεων καθώς και δημόσιων και μη κερδοσκοπικών οργανώσεων. Σε αυτή τη λίστα προστίθενται τα σπίτια και οι ιδιοκτήτες των κτιρίων, οι οποίοι βλέπουν τις κυψέλες καυσίμου ως ένα πρακτικό και αξιόπιστο μέσω παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 5.3-1:Διαχείρηση και λειτουργία προγραμμάτων έρευνας και ανάπτυξης.

Η αποκεντρωμένη παραγωγή ισχύος αφορά κυρίως τις σταθερές κυψέλες καυσίμου και ο κτιριακός τομέας είναι αυτός ο οποίος κυριαρχεί σε αυτήν την κατηγορία εφαρμογών. Όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο ένα παράδειγμα αποκεντρωμένης παραγωγής ισχύος είναι τα συστήματα micro-CHP κυψελών καυσίμου τα οποία εγκαθίστανται σε μεμονωμένες κατοικίες παράγοντας το απαιτούμενο ενεργειακό φορτίο της εκάστοτε κατοικίας. Ένα άλλο παράδειγμα είναι

οι μονάδες κύριας ή βοηθητικής ισχύος μικρής και μεγάλης κλίμακας σχεδιασμένες ως σταθμοί παραγωγής ενέργειας οι οποίες μπορεί να είναι διασυνδεδεμένες ή μη-διασυνδεδεμένες στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο.

Η αγορά των σταθερών κυψελών καυσίμου διαθέτει διάφορα μεγέθη ισχύος και περιλαμβάνει διάφορους τομείς εγκατάστασης των συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων μεγάλης κλίμακας για κύρια ή εφεδρική ισχύ ή τη συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, τις μικρές μονάδες συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας micro-CHP για κατοικίες ή εμπορικές επιχειρήσεις καθώς και τα κύρια και εφεδρικά συστήματα για απομακρυσμένες εγκαταστάσεις όπως οι πύργοι τηλεπικοινωνιών. Οι σταθερές κυψέλες καυσίμου διατίθενται σε μια ποικιλία τύπων συμπεριλαμβανομένων των κυψελών καύσιμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC), στερεού οξειδίου (SOFC), φωσφορικού οξέος (PAFC), και χαμηλής και υψηλής θερμοκρασίας μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM). Τα σταθερά συστήματα κυψελών καυσίμου ξεπερνούν όλους τους άλλους τομείς εφαρμογών όσον αφορά τα μεγαβάτ των ετήσιων πωλήσεων με τις εταιρίες όπως η Bloom Energy, FuelCell Energy και ClearEdge Power πρώην UTC Power technology να αντιπροσωπεύουν το κυρίαρχο μερίδιο της αγοράς. Ο Πίνακας 5.3-1 παρέχει μια λίστα των εμπορικώς διαθέσιμων σταθερών συστημάτων του 2012.

Οι τρεις κυρίαρχες προμηθεύτριες εταιρίες είναι:

- Η Bloom Energy (SOFC)



Εικόνα 5.3-2: Εγκατεστημένα συστήματα της Bloom Energy.

- Η FuelCell Energy (MCFC), η οποία προμηθεύει με κυψέλες καυσίμου και την κορεάτικη εταιρία POSCO Energy μια από τους μεγαλύτερους προμηθευτές κυψελών καυσίμου για την κορεάτικη αγορά.



Εικόνα 5.3-3: Εκατεστημένο σύστημα της FuelCell Energy.

- Και η ClearEdge Power πρώην UTC Power technology (PAFC)



Εικόνα 5.3-4: Εγκατεστημένα συστήματα της ClearEdge Power.

- Επίσης η Ballard power systems (PEMFC), σημειώνει έναν σημαντικό αριθμό πωλήσεων ετησίως.



Εικόνα 5.3-5: Εγκατεστημένο σύστημα ClearGen™ 1MW στην Toyota Motor Sales USA, Inc. (TMS).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται όλες οι εταιρίες κυψελών καυσίμου με συστήματα κύριας ισχύος, micro-CHP, βοηθητικής και απομακρυσμένης ισχύος.

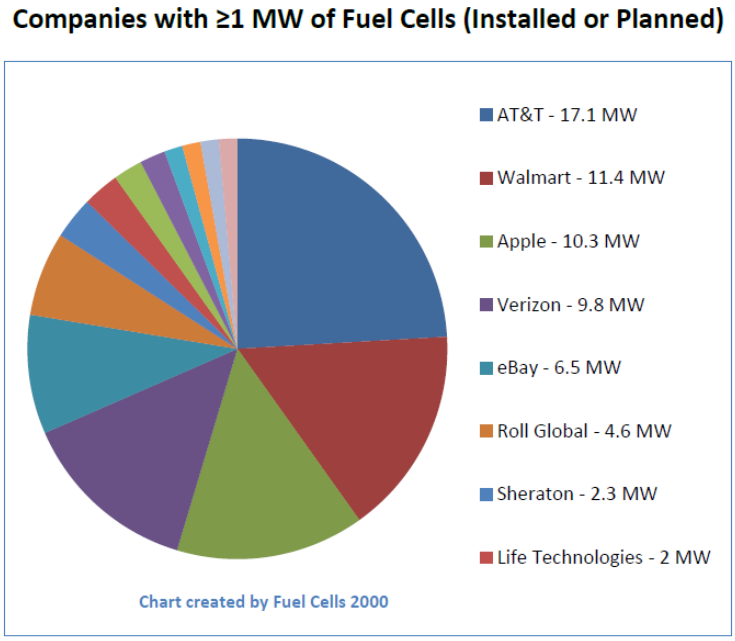
U.S. DEPARTMENT OF ENERGY | Energy Efficiency & Renewable Energy

Commercially Available Stationary Fuel Cells 2012			
Prime Power and m-CHP			
Manufacturer	**Product Name**	**Type**	**Output**
Ballard Power Systems, Canada	FCgen-1300	PEM	2-11 kW
	CLEARgen	PEM	Multiples of 500 kW
Bloom Energy, U.S.	ES-5400	SOFC	100 kW
	ES-5700	SOFC	200 kW
	UPM-570	SOFC	160 kW
Ceramic Fuel Cells, Australia	BlueGen	SOFC	2 kW
	Gennex	SOFC	1.5 kW
ClearEdge Power, U.S.	PureCell System Model 5	PEM	5 kW
	PureCell System Model 400	PAFC	400 kW
ENEOS CellTech, Japan	ENE-FARM	PEM	250-700 W
FuelCell Energy, U.S.	DFC 300	MCFC	300 kW
	DFC 1500	MCFC	1,400 kW
	DFC 3000	MCFC	2,800 kW
	DFC-ERG	MCFC	Multi-MW
Heliocentris Fuel Cells AG, Germany	Nexa 1200	PEM	1.2 kW
Horizon Fuel Cell Technologies, Singapore	GreenHub Powerbox	PEM	500 W-2 kW
Hydrogenics, Canada	HyPM Rack	PEM	2-200 kW
	CommScope FC cabinet	PEM	2-16 kW
Panasonic, Japan	ENE-FARM	PEM	250-700 W
Toshiba, Japan	ENE-FARM	PEM	250-700 W
Backup and Remote Power			
Manufacturer	**Product Name**	**Type**	**Output**
Altergy Systems, U.S.	Freedom Power System	PEM	5-30 kW
Ballard Power Systems, Canada	ElectraGen-ME	PEM	2.5-5 kW
	ElectraGen-H2	PEM	1.7, 2.5, & 5 kW
Dantherm Power, Denmark	DBX 2000	PEM	1.7 kW
	DBX 5000	PEM	5 kW
Horizon Fuel Cell Technologies, Singapore	H-Series	PEM	12W-5 kW
Hydrogenics, Canada	HyPM XR Power Modules	PEM	4.5, 8.5, and 12.5 kW
ReliOn, U.S.	E-200	PEM	175-525 W
	E-1000x	PEM	1-4 kW
	E-1100	PEM	1.1-4.4 kW
	E-1100v	PEM	1.1 kW
	E-2200x	PEM	2.2-17.5 kW
	E-2500	PEM	2.5-20 kW
	T-2000	PEM	100W-6 kW+
SFC Energy, Germany	EFOY Pro 800	DMFC	45 W
	EFOY Pro 2400	DMFC	110 W

Πίνακας 5.3-1: Εταιρίες κυψελών καυσίμου με συστήματα κύριας ισχύος, micro-CHP, βοηθητικής και απομακρυσμένης ισχύος.

Παρά τους προφανείς περισπασμούς και την αβεβαιότητα γύρω από το μέλλον των επιχειρήσεων των κυψελών καυσίμου, μια σειρά από πωλήσεις πραγματοποιούνται ετησίως στην Αμερική και την Ασία οι οποίες αποτελούν και τις κύριες αγορές παγκοσμίως. Ο κλάδος των κυψελών καυσίμου προσελκύει πελάτες από όλους τους τομείς του εμπορίου - υπολογιστών / λογισμικού, τηλεόρασης / μέσα μαζικής ενημέρωσης, κατασκευής ακινήτων, επεξεργασίας τροφίμων / ποτών, παντοπωλεία, ξενοδοχεία, αποθήκες / πρατήρια διανομής- και πολλά άλλα.

Στην Αμερική πάρα πολλές εταιρίες όπως κέντρα δεδομένων (Apple, eBay, Microsoft, Google) εταιρίες προϊόντων τεχνολογίας (AT&T, Verizon), εταιρίες ποτών και τροφίμων (Coca-Cola, Gills Onions) και άλλες έχουν τοποθετήσει συστήματα κυψελών καυσίμου και συνεχίζουν να τα επεκτείνουν. Οι δέκα πρώτες με τα περισσότερα εγκατεστημένα MW το 2013 ήταν:



Διάγραμμα 5.3-1: Οι δέκα πρώτες εταιρίες προιόντων τεχνολογίας σε εγκατεστημένα MW ισχύος.

Στην Ασία το ενδιαφέρον της Κορέας για τα μεγάλα συστήματα κυψελών καυσίμου παρέμεινε ισχυρό, με τη Samsung Everland να αγοράζει ένα αριθμό μονάδων για την εγκατάσταση σε διακεκριμένα κτίρια, όπως το Busan International Finance Center (διεθνές κέντρο οικονομικών Busan), (0,4 MW) και το Lotte World Tower (0,8 MW), μαζί με άλλα επτά συστήματα 3 MW τα οποία προορίζονται για εγκατάσταση στην εταιρία κοινής ωφελείας KOSEP. Η Ιαπωνία διαθέτει τα πρωτεία όσον αφορά τα συστήματα micro-CHP όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 5.2.

5.4 Εφαρμογές μικρής ισχύος (Φώτα απομακρυσμένων περιοχών, ταμπέλες δρόμων, σταθμοί επικοινωνιών και μετεωρολογικοί σταθμοί).

Οι κυψέλες καυσίμου είναι μια αρκετά ευέλικτη και επεκτάσιμη τεχνολογία και έχει τη δυνατότητα να εκπληρώσει τις απαιτήσεις ισχύος σχεδόν σε οποιαδήποτε εφαρμογή μπορεί να φανταστεί κανείς. Υπάρχουν εφαρμογές με συγκεκριμένες και εξειδικευμένες απαιτήσεις όπου οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν την ιδανικότερη λύση ανάμεσα σε άλλες τεχνολογίες. Τέτοιες εφαρμογές είναι εφαρμογές μικρής ισχύος κυρίως σε απομακρυσμένες περιοχές όπως, φώτα απομακρυσμένων περιοχών, ταμπέλες δρόμων, σταθμοί επικοινωνιών και μετεωρολογικοί σταθμοί και αφορούν

την τροφοδοσία τους με κύρια ή εφεδρική ισχύ. Υπάρχουν εγκατεστημένα αρκετά τέτοια συστήματα και παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.

Φώτα απομακρυσμένων περιοχών.



Εικόνα 5.4-1: H_2LT Fuel Cell Mobile Light.

Το H_2LT (Light Tower) Fuel Cell Mobile Light είναι ένα ρυμουλκούμενο όχημα της εταιρίας Multiquip το οποίο είναι εξοπλυσμένο με μια κυψέλη καυσίμου 5kW Proton Exchange Membrane (PEM) τροφοδοτούμενη από 4 κυλινδρικές φιάλες οι οποίες έχουν μέγιστη χωρητικότητα 8,4 kg υδρογόνου στα 5.000 psi. Διαθέτη πτυσόμενο πύργο ο οποίος φτάνει στα 10.3m με 4 προβολείς και 8 λάμπες πλάσμα που προσφέρουν 23.000 Lumens η κάθε μια. Μπόρει να χρησημοποιηθεί σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης, σε επιχηρήσεις διάσοσης ή σε δισπρόσητες περιοχές οπού δεν υπάρχει φωτισμός.

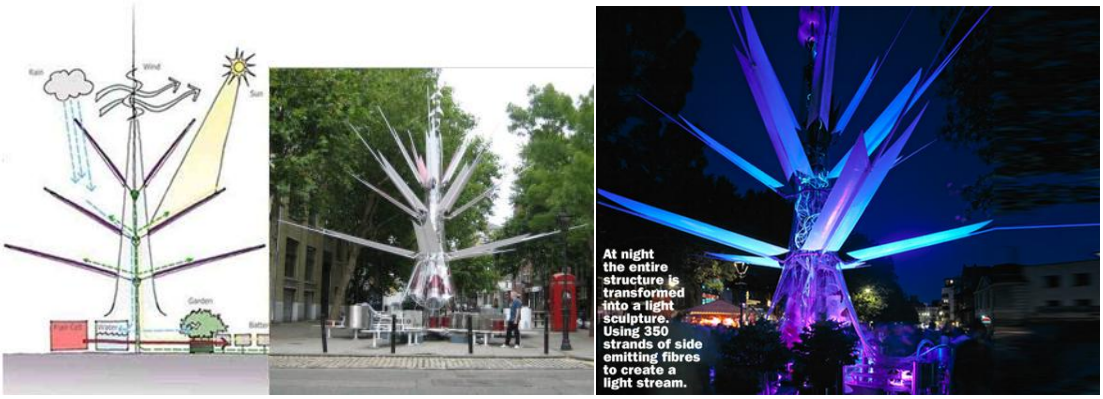


Εικόνα 5.4-2: Ρυμουλκούμενος πύργος φωτισμού Ecolite-H_2 και ο φάρος South Gare Lighthouse.

Παρόμοιο όχημα έχει κατασκευαστεί και από την εταιρία Youngman το Ecolite-H_2 και διαθέτει 4 προβολής LED. Στην εικόνα 5.4-2 απεικονίζεται ένας ιστορικός βρετανικός φάρος με το όνομα South Gare Lighthouse ο οποίος βρίσκεται κοντά Redcar της Αγγλίας και χρησημοποιεί κυψέλες καυσίμου για να τροφοδοτήσει

ένα 45-watt υψηλής έντασης LED το οποίο ακτινοβολεί ένα φως που είναι ορατό στο φάσμα των 22 ναυτικών μιλίων στη θάλασσα.

Φώτα και ταμπέλες δρόμων



Εικόνα 5.4-3: Αρχιτεκτονική κατασκευή London Oasis.

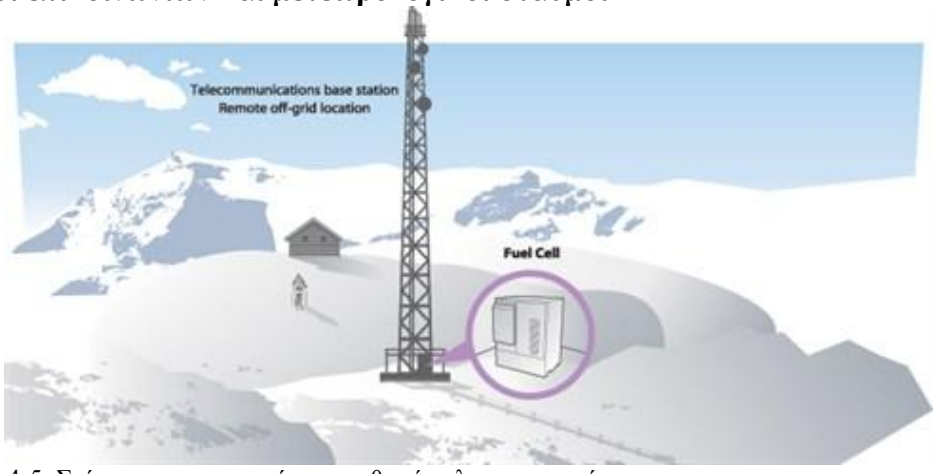
Το London Oasis βρίσκεται στο Clerkenwell μια περιοχή στο κέντρο του Λονδίνου. Σχεδιασμένο από τον αρχιτέκτονα Laurie Chetwood, το Oasis είναι μια απόδειξη της βιωσιμότητας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε συνεργασία με την αρχιτεκτονική και παρέχει μια γαλήνια όαση για το Λονδίνο. Κατά τη διάρκεια της ημέρας το ``λουλούδι´´ ανοίγει και κλείνει για να ``αποκαλύψει´´ την λειτουργία των φωτοβολταϊκών κυττάρων στα κλαδιά. Ο κεντρικός κορμός του Oasis είναι μια θερμική καμινάδα στο εσωτερικό της οποίας υπάρχει μια ανεμογεννήτρια που κινείτε με το ρεύμα αέρα που δημιουργείται. Για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας χρησιμοποιείται ένα σύστημα κυψελών καυσίμου το οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τον φωτισμό και την λειτουργία του Oasis.



Εικόνα 5.4-4: Εφαρμογές κυψελών καυσίμου σε ταμπέλες δρόμων.

Όπως και στους πύργους φωτισμού ρυμουλκούμενα συστήματα κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία φετινών σημάτων και προειδοποιητικών επιγραφών στους δρόμους. Επίσης κυψέλες καυσίμου μικρής ισχύος χρησιμοποιούνται για ταμπέλες δρόμων όπως στο παράδειγμα της εικόνας 5.4-4.

Σταθμοί επικοινωνιών και μετεωρολογικοί σταθμοί



Εικόνα 5.4-5: Σκίτσο απομακρυσμένου σταθμού τηλεπικοινωνιών.

Ιδίως όσον αφορά τους σταθμούς τηλεπικοινωνιών (Base Transceiver Station, BTS) στις αναπτυσσόμενες χώρες (περιοχές) η εγκατεστημένη ισχύ των κυψελών καυσίμου αναπτύσσετε ραγδαία τα τελευταία χρόνια. Η υιοθέτηση της κινητής τηλεφωνίας είναι στα ύψη σε αυτές τις περιοχές και η επαρκή δικτυακή κάλυψη γίνεται ζωτικής σημασίας για την οικονομική δραστηριότητα. Στην Ινδία υπάρχουν 65.000 BTS που εγκαθίσταται κάθε χρόνο. Ωστόσο, οι περιοχές αυτές υπόκεινται σε υπανάπτυκτα και αναξιόπιστα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, που απειλούν να θέσουν σε κίνδυνο τη συνδεσιμότητα, δημιουργώντας μια αυξανόμενη ζήτηση για μια αξιόπιστη λύση παροχή ενέργειας εκτός δικτύου.

Οι μεταβιομηχανικές χώρες όπως το Ηνωμένο Βασίλειο και οι ΗΠΑ ανέπτυξαν τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών τους πριν οι εκπομπές ρύπων αποκτήσουν έντονη ανησυχία για την ρύπανση του περιβάλλοντος και η πλειοψηφία των BTS στις χώρες αυτές βασίζονται σε ακριβές μπαταρίες μολύβδου-οξέος ή γεννήτριες ντίζελ για την εφεδρική ισχύ. Οι αρνητικές επιπτώσεις από τη χρήση γεννητριών ντίζελ είναι προφανείς και οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος δημιουργούν σημαντικές περιβαλλοντικές ανησυχίες στην κατασκευή και τη διάθεσή τους. Το 19% των BTS που έχουν εγκατασταθεί στην Ινδία τροφοδοτείται από υβριδικά συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αυτό είναι ενδεικτικό του πώς οι χώρες που αναπτύσσονται με ταχείς ρυθμούς συνδυάζουν την οικονομική πρόοδο με τα θέματα των περιβαλλοντικών τους ευθυνών.

Μέσα σε ένα τέτοιο πλαίσιο οι κυψέλες καυσίμου επωφελούν με δύο βασικούς τρόπους: παράγουν μικρές ή μηδενικές εκπομπές ρύπων κατά τη χρήση (ανάλογα με το καύσιμο) και προσφέρουν πιο ευέλικτη και αξιόπιστη απόδοση από τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος και τις γεννήτριες ντίζελ. Σε αυτά προστίθεται το μειωμένο κόστος κύκλου ζωής σε σύγκριση με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος (χάρη στη μειωμένη συντήρηση και τις ανάγκες αντικατάστασης). Για αυτούς τους λόγους τα συστήματα κυψελών καυσίμου έχουν γίνει δημοφιλείς στις αντικαταστάσεις των υφιστάμενων συστημάτων, ιδιαίτερα στις ΗΠΑ, όπου η ανεπάρκεια των υφισταμένων συστημάτων για εφεδρική ισχύ τονίστηκε κατά τη διάρκεια της μετά τον τυφώνα Κατρίνα. Η αξιοπιστία των εγκατεστημένων συστημάτων κυψελών καυσίμου αποδείχθηκε όταν οι εταιρίες Altergy και Ballard Power Systems ανέφεραν ότι τα συστήματα τους παρείχαν συνεχή ισχύ κατά την διάρκεια του τυφώνα Sandy.

Τον Ιανουάριο του 2013 η Ballard Power Systems δήλωσε ότι σε μια περίοδο έξι εβδομάδων είχε λάβει παραγγελίες για περισσότερα από 400 συστήματα κυψελών καυσίμου ElectraGen από τους συνεργάτες διανομής της για την ανάπτυξη

τηλεπικοινωνιακών δικτύων σε χώρες της Ασίας και της Αφρικής. Μέχρι εκείνη τη στιγμή η Ballard είχε αποστείλει περισσότερα από 2.000 backup συστήματα τηλεπικοινωνιών. Η Κίνα είναι μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες οικονομίες του κόσμου. Τον Απρίλιο του 2012 ανακοινώθηκε ότι το υπουργείο Βιομηχανίας Τεχνολογίας και Πληροφοριών της Κίνας είχε χορηγήσει την έγκριση στην VelaTel θυγατρική της VN Technologies για χρήση κυψελών καυσίμου σε κινέζικα BTS. Η εταιρεία έχει ολοκληρώσει με επιτυχία δοκιμές για την China Mobile και την China Telecom. Οι δυνατότητες της αγοράς είναι τεράστιες καθώς η China Mobile είναι η μεγαλύτερη εταιρεία κινητής τηλεφωνίας στον κόσμο, με 650 εκατομμύρια συνδρομητές και η China Telecom είναι η μεγαλύτερη εταιρία της χώρας σε σταθερές γραμμές τηλεφώνων με πάνω από 200 εκατομμύρια συνδρομητές.

Οι κυψέλες καυσίμου σταθμών τηλεπικοινωνίας και μετεωρολογικών σταθμών τροφοδοτούνται κατά παράδοση με υδρογόνο είτε σε φιάλες είτε σε ρυμουλκούμενες δεξαμενές επειδή όμως η επαναπλήρωση και η μεταφορά των φιαλών και των δεξαμενών ιδίως σε δυσπρόσιτες περιοχές είναι αδύνατη έχουν αναπτυχθεί συστήματα με αναμορφωτές καυσίμου από τις εταιρίες Ballard, ReliOn και Altergy για την χρήση μεθανόλης ένα ευκολότερο όσον αφορά το χειρισμό του καύσιμο από το υδρογόνο.

5.5 Μεταφορές (Διαστημόπλοια, υποβρύχια, τραίνα, λεωφορεία)

Οι αυστηροί στόχοι μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου (GHG) είναι ένα κοινό ζήτημα σε όλο τον κόσμο και ο τομέας των μεταφορών είναι ένας από τους πιο κρίσιμους τομείς που πρέπει να αντιμετωπιστούν, προκειμένου αυτοί οι στόχοι να επιτευχθούν. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση έχει γίνει δέσμευση για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 80% (από τα επίπεδα του 1990) έως το 2050, πράγμα που θα απαιτούσε μια μείωση 95% των εκπομπών από τις οδικές μεταφορές. Δύο καθοριστικοί παράγοντες για την επίτευξη αυτών των στόχων είναι: η αύξηση της χρήσης των μέσων μαζικής μεταφοράς και η προώθηση της χρήσης οχημάτων χαμηλών ή και μηδενικών εκπομπών ρύπων.

Οι κυψέλες καυσίμου είναι μια αρκετά ώριμη τεχνολογία όσον αφορά τις εφαρμογές στις μεταφορές. Υπάρχουν οχήματα κυψελών καυσίμου για όλο τον κλάδο των μεταφορών. Τα πιο διαδεδομένα είναι τα περονοφόρα οχήματα χειρισμού υλικών. Μεγάλο αγοραστικό κοινό στην Βόρεια Αμερική αγοράζει συστήματα κυψελών καυσίμου για εφαρμογές σε οχήματα διαχείρισης υλικών χωρίς κάποια κρατική επιδότηση, επίσης υπάρχει ένας αυξανόμενος αριθμός λεωφορείων που κυκλοφορούν σε πόλεις σε όλο τον κόσμο και λειτουργούν με κυψέλες καυσίμου και για πρώτη φορά τα αυτοκίνητα κυψελών καυσίμου έχουν στόχο την γραμμή μαζικής παραγωγής.

Οι κυψέλες καυσίμου για εφαρμογές στις μεταφορές μπορούν να χρησιμοποιηθούν με δύο τρόπους:

Είτε για να παρέχουν κινητήρια ισχύς:

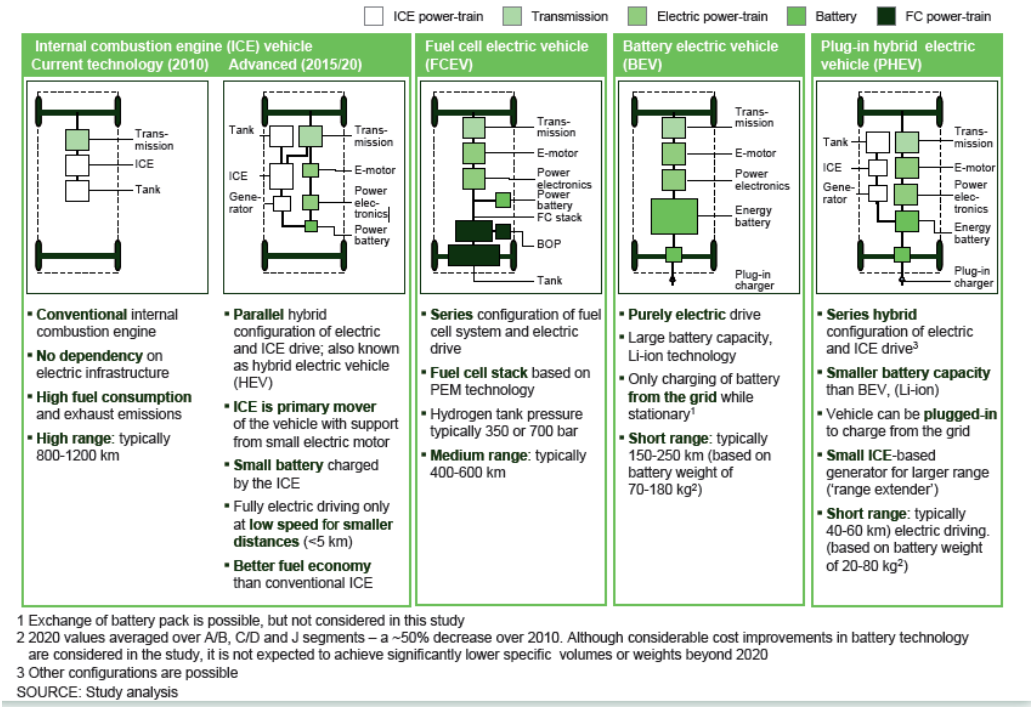
- Περονοφόρα, ανυψωτικά και άλλα οχήματα χειρισμού υλικών όπως οχήματα μεταφοράς αποσκευών αεροδρομίων κλπ.
- Επιβατηγά αυτοκίνητα.
- Δίτροχα και τρίτροχα οχήματα όπως σκούτερ κ.α..
- Λεωφορεία και φορτηγά.
- Τρένα και τραμ.
- Υποβρύχια, Ferries και μικρότερα σκάφη.

- Επανδρωμένα μικρά αεροσκάφη.
- Μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα Unmanned aerial vehicles (UAVs) και μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα unmanned undersea vehicles (UUVs), όπως για παράδειγμα, οχήματα αναγνώρισης περιοχών.

Είτε για παροχή βοηθητικής ισχύος:

- Βοηθητικές μονάδες ισχύος (APU) σε αεροσκάφη και ειδικά οχήματα (φορτηγά ψυγεία, ρυμουλκά κ.α.).
- Αεροναυτικές εφαρμογές (διαστημικά αεροσκάφη) και εφαρμογές ναυτιλίας, όπου η κινητήρια ισχύς παρέχεται από κύριες μηχανές.

Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις μεταφορές για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος που τροφοδοτεί έναν ηλεκτρικό κινητήρα. Ένα όχημα κυψελών καυσίμου (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV) είναι ένα σύστημα που συνδυάζει όλες τις απαιτούμενες λειτουργίες ενός οδικού οχήματος, με τη χρήση κυψελών καυσίμου ως μονάδα παραγωγής ενέργειας για την πρόωση του οχήματος. Στην ουσία, ένα όχημα κυψελών καυσίμου είναι ένα ηλεκτρικό όχημα, όπου, οι συμβατικές στήλες μπαταριών έχουν αντικατασταθεί από μια συστοιχία κυψελών καυσίμου.



Εικόνα 5.5-1: Συστήματα κίνησης οχημάτων.

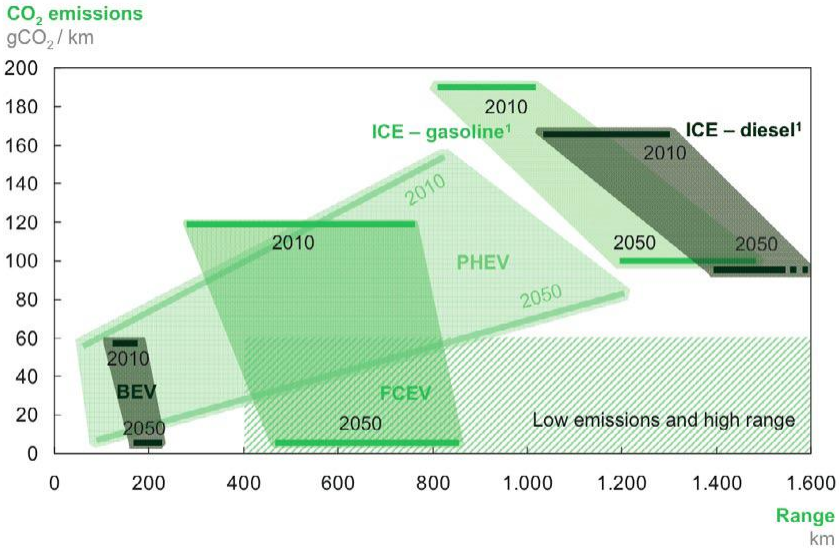
Τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου FCEV και τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (Battery Electric Vehicle, BEV) χρησιμοποιούν και τα δύο ηλεκτρικούς μηχανισμούς μετάδοσης κίνησης, τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας όμως τροφοδοτούν τον ηλεκτροκινητήρα τους αποκλειστικά και μόνο με τις μπαταρίες ενώ τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου είναι υβρίδια όπου το σύστημα τροφοδοτείται από μια κυψέλη καυσίμου και μια μικρή μπαταρία. Και οι δύο τύποι οχημάτων επωφελούνται από σχεδόν αθόρυβη λειτουργία, εξαιρετική οδική συμπεριφορά και μηδενικές εκπομπές ρύπων.

Τα BEV αποδίδουν καλύτερα ως μικρότερα αυτοκίνητα σε εφαρμογές οι οποίες απαιτούν μια συνεχόμενη λειτουργία για λιγότερα από 200 χιλιόμετρα όπως, η οδήγηση σε πόλη ή ως δεύτερο αυτοκίνητο. Το περιορισμένο αυτό εύρος χιλιομέτρων και οι μεγάλοι χρόνοι επαναφόρτισης έχουν περιορίσει την μέχρι σήμερα υιοθέτηση τους. Τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV) αποτελούν την γέφυρα μεταξύ των συμβατικών αυτοκινήτων και των ηλεκτρικών προσφέροντας ένα ηλεκτρικό σύστημα κίνησης με την ευκολία της χρήσης συμβατικών καυσίμων. Στην πραγματικότητα όμως τα οχήματα αυτά δεν μπορούν να έχουν μηδενικές εκπομπές.

Τα FCEV παρέχουν όλα τα οφέλη των ηλεκτρικών οχημάτων σε συνδυασμό με την χρησιμότητα ενός αυτοκινήτου με κινητήρα εσωτερικής καύσης: μπορούν να ανεφοδιάζονται μέσα σε λίγα λεπτά από τον οδηγό με ένα ακροφύσιο παρόμοιο με αυτό μίας συμβατική αντλίας καυσίμου και στη συνέχεια να οδηγούνται για εκατοντάδες χιλιόμετρα πριν χρειαστούν ξανά ανεφοδιασμό. Ο συνδυασμός των ανέσεων των συμβατικών με τα πλεονεκτήματα των ηλεκτρικών οχημάτων που μπορεί να προσφέρει ένα FCEV είναι μια συγκλονιστική πρόταση για την μετακίνηση.

Παρά τις βελτιώσεις τα τελευταία χρόνια στην οικονομία καυσίμου, η ικανότητα των ICEs για την μείωση των εκπομπών CO_2 είναι σημαντικά μικρότερη από εκείνη των BEVs και FCEVs, η οποία μπορεί να επιτύχει σχεδόν μηδενικές εκπομπές CO_2 (well-to-wheel, παραγωγή στον τροχό). Δεδομένου ότι το φάσμα των BEVs περιορίζεται για τα μεσαίου μεγέθους αυτοκίνητα και είναι ιδανικό για μικρότερα αυτοκίνητα και μικρότερες διαδρομές.

Το παρακάτω διάγραμμα (Διάγραμμα 5.5-2) παρουσιάζει το αναμενόμενο εύρος χιλιομέτρων και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από τις τεχνολογίες συστημάτων κίνησης μεταξύ του 2010 και του 2050. Τα BEV έχουν τις χαμηλότερες εκπομπές, αλλά θα συνεχίσουν να είναι περιορισμένου-εύρους το αντίθετο που ισχύει για τα ICE βενζίνης και ντίζελ. Τα PHEV ποικίλουν σημαντικά, ανάλογα με το επίπεδο υβριδισμού της μπαταρίας, αλλά όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος, τόσο μεγαλύτερο είναι το επίπεδο εκπομπών. Τα FCEV είναι το μόνο σύστημα μετάδοσης που μπορεί να επιτύχει ένα υψηλό εύρος με χαμηλές εκπομπές ρύπων.



1 ICE range for 2050 based on fuel economy improvement and assuming tank size stays constant. Assuming 6% CO2 reduction due to biofuels by 2020; 24% by 2050

Διάγραμμα 5.5-1: Αναμενόμενο εύρος χιλιομέτρων και εκπομπές CO_2/km διαφόρων τύπων τεχνολογιών κινητήρων και οι στόχοι για το 2050.

Αυτοκίνητα.

Η αυτοκινητοβιομηχανία είναι ένας από τους μεγαλύτερους υποστηρικτές των συστημάτων των κυψελών καυσίμου. Από την εποχή της εξέλιξης ακόμα της τεχνολογίας είχαν γίνει πολλές απόπειρες εφαρμογής κυψελών καυσίμου στα αυτοκίνητα. Την δεκαετία του 1990 πολλές αυτοκινητοβιομηχανίες είχαν κατασκευάσει από ένα πρότυπο μοντέλο επίδειξης αυτοκινήτου με κυψέλες καυσίμου. Παρά το γεγονός ότι ακόμη δεν υπάρχουν αυτοκίνητα κυψελών καυσίμου διαθέσιμα για εμπορική πώληση έχουν κυκλοφορήσει πάνω από 20 FCEVs πρότυπα αυτοκίνητα επίδειξης από το 2009. Αυτοκίνητα όπως το GM HydroGen4, το Honda FCX Clarity, το Toyota FCHV-adv και το Mercedes-Benz F-Cell είναι όλα προ-εμπορικά οχήματα και έχουν οδηγηθεί συνολικά για πάνω από 3.000.000 μίλια με περισσότερους από 27.000 ανεφοδιασμούς καυσίμου. Σήμερα έχουν παρουσιαστεί μοντέλα από όλες τις εταιρίες και έχουν ανακοινωθεί σχέδια και ημερομηνίες που τοποθετούν τα FCEV στην εμπορική γραμμή μαζικής παραγωγής.



Εικόνα 5.5-2: Πρωτότυπα μοντέλα αυτοκινήτων κυψελών καυσίμου.

Η σημασία της εμπορικής μαζικής παραγωγής οχημάτων για τον τομέα των κυψελών καυσίμου στο σύνολο της είναι αρκετά μεγάλη. Οι ποσότητες που συνδέονται με την μαζική παραγωγή αυτοκινήτων θα φέρουν στο προσκήνιο ευεργετικά οφέλη στην οικονομική κλίμακα για ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού, οδηγώντας σε συνιστώσες υψηλότερης ποιότητας και χαμηλότερου κόστους. Η προσέγγιση των αυτοκινητοβιομηχανιών για μείωση του κόστους θα είναι επιθετική, καθώς επιδιώκουν ισοτιμία του συνολικού κόστους ανάμεσα σε ένα όχημα κυψελών καυσίμου και ένα όχημα με κινητήρα εσωτερικής καύσης, ιδιαίτερα όσον αφορά την μείωση των ακριβών υλικών καταλύτη, όπως η πλατίνα, ο τελικός στόχος είναι ότι ένα ηλεκτρικό όχημα κυψελών καυσίμου (FCEV) δεν θα πρέπει να περιέχει περισσότερη πλατίνα από αυτήν που περιέχεται στους καταλυτικούς μετατροπείς που τοποθετούνται στις εξατμίσεις των αυτοκινήτων ντίζελ. Οι επιπτώσεις που θα επιφέρουν αυτές οι προσπάθειες θα ωφελήσουν κυρίως τους κατασκευαστές και τους προμηθευτές κυψελών καυσίμου PEMFC, λόγω του ότι αυτή είναι η κυρίαρχη τεχνολογία κυψελών καυσίμου σήμερα όσον αφορά τις μεταφορές καθώς

αντιπροσωπεύει το 88% των μονάδων που αποστάλθηκαν το 2012, όμως δεδομένο ότι σε κλίμακα ισχύος τείνουν να είναι μικρότερου μεγέθους αντιπροσωπεύουν μόνο το 41% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος

Το 2012 βρήκε την αυτοκινητοβιομηχανία να επαναπροσδιορίζει τους στόχους της και να πηγαίνει πιο πέρα από την φάση της επίδειξης των κυψελών καυσίμου προς την μαζική παραγωγή, σε μια περίοδο όπου με βάση τις αποστολές θα μπορούσε να χαρακτηριστεί αρκετά ήσυχη, με μία όμως αξιοσημείωτη εξαίρεση. Η αύξηση των αποστολών κατά 21% μεταξύ του 2011 και του 2012 συνέπεσε με μια αναταραχή της δραστηριότητας από τις αυτοκινητοβιομηχανίες, τις βιομηχανίες και τις κυβερνήσεις, καθώς όπως φαίνεται κατά τη διάρκεια του 2012 και εντός του 2013 όλοι είχαν προετοιμαστεί για την εισαγωγή των FCEV στην αγορά.

Οι συνεργασίες ήταν το πιο αξιοσημείωτο θέμα σε αυτήν την μετατόπιση της βιομηχανίας καθώς οι αυτοκινητοβιομηχανίες φαίνονται να συνενώνουν τους πόρους τους για να επιταχύνουν την μείωση του κόστους και να διευκολυνθεί η μαζική παραγωγή των συστημάτων των κυψελών καυσίμου. Μέσα στους πρώτους επτά μήνες του 2013 δημιουργήθηκαν τρείς συμμαχίες: η BMW με την Toyota, η Renault-Nissan με την Automotive Fuel Cell Cooperation (AFCC – Daimler και Ford) και η General Motors (GM) με την Honda.

Η BMW και η Toyota ανακοίνωσαν από κοινού τον Ιανουάριο του 2013 ότι θα πρέπει να μοιραστούν μια σειρά από τεχνολογίες για την συν-ανάπτυξη μιας θεμελιώδους πλατφόρμας οχήματος κυψελών καυσίμου έως το 2020, συμπεριλαμβανομένων όχι μόνο του συστήματος κυψελών καυσίμου αλλά και του ρεζερβουάρ υδρογόνου, του ηλεκτρικού κινητήρα και του συστήματος υποστήριξης μπαταρίας. Η Γερμανία είναι μια σημαντική αγορά για τα πρώιμα FCEV και η Toyota μπορεί να δανείσει στην BMW μια πολυετή εμπειρία και τεχνογνωσία στην ανάπτυξη των κυψελών καυσίμου και των ηλεκτροκίνητων μηχανισμών μετάδοσης. Η εξέλιξη αυτή ήταν ένα μεγάλο βήμα για την BMW, η οποία προηγουμένως είχε επικεντρωθεί στην ανάπτυξη ενός οχήματος με κινητήρα εσωτερικής καύσης με καύσιμο το υδρογόνο αποφεύγοντας σε μεγάλο βαθμό τις κυψέλες καυσίμου, ήταν όμως και η επιβεβαίωση της παγκοσμίως επικρατούσας άποψης ότι τα FCEV αποτελούν σημαντικό μέρος της αυτοκίνησης με μηδενικές εκπομπές.



Εικόνα 5.5-3: Αυτοκίνητο κυψελών καυσίμου της Toyota που προορίζεται για την γραμμή παραγωγής το 2015.

Η Toyota ωστόσο δεν θα περιμένει μέχρι το 2020 για να κυκλοφορήσει ένα όχημα κυψελών καυσίμου. Το 2011 ιαπωνικές αυτοκινητοβιομηχανίες και εταιρίες καυσίμων και ενέργειας υπέγραψαν συμφωνία να εργαστούν μαζί για να δημιουργήσουν ένα δίκτυο από περίπου 100 πρατήρια υδρογόνου σε τέσσερις μεγάλες μητροπολιτικές περιοχές μέχρι το 2015. Τον Σεπτέμβριο του 2012 η Toyota παρουσίασε μια νέα κυψέλη καυσίμου με την διπλάσια πυκνότητα ισχύος και το μισό βάρος και όγκο από αυτή που χρησιμοποιείσαι το 2008 στο FCHV-adv. Η Toyota σχεδιάζει την μαζική παραγωγή ενός FCEV πιθανόν βασισμένο στο μοντέλο Prius της εταιρία, το 2014 για την εισαγωγή στην αγορά της Ιαπωνίας, των ΗΠΑ και της Ευρώπης από το 2015. Μια έκδοση προ-παραγωγής του οχήματος αποκαλύφθηκε το Νοέμβριο του 2013 στο Tokyo Motor show, ακριβώς δυο χρόνια μετά τα αποκαλυπτήρια του FCV-R concept.

Η Daimler και η Ford αναπτύσσουν συστήματα κυψελών καυσίμου για δεκαετίες και στο τέλος του 2007 δημιούργησαν μια κοινοπραξία με την AFCC για να αγοράσουν τα περιουσιακά στοιχεία των συστημάτων κυψελών καυσίμου αυτοκινήτων της Ballard Power System’s. Τον Ιανουάριο του 2013 οι Renault Nissan Alliance δημιούργησαν μια συνεργασία σε τεχνολογικό πλαίσιο για να αναπτύξουν από κοινού ένα σύστημα κυψελών καυσίμου για κοινή χρήση σε διαφορετικά αυτοκίνητα μαζικής παραγωγής από το 2017. Το χρονοδιάγραμμα αυτό έρχεται μαζί με την απόφαση της Daimler να σταματήσει την παραγωγή των δεύτερης γενιάς προ-εμπορικών οχημάτων B-Class F-CELL και να επικεντρωθεί στην ανάπτυξη ενός πιο προσιτού οχήματος έως το 2017 όταν και οι υποδομές στην Γερμανία και σε άλλες χώρες θα είναι πιο ανεπτυγμένες. Η εταιρία αποστέλλει την τελευταία παρτίδα των B-Class F-CELL οχημάτων από το 2012 στην Γερμανία για το πρόγραμμα Clean Energy Partnership (CEP) και στην Καλιφόρνια για μίσθωση. Στο σύστημα μίσθωσης της Καλιφόρνιας οι πελάτες πληρώνουν $ 599 (£ 388) το μήνα (συμπεριλαμβανομένων των καυσίμων, συντήρησης και ασφάλισης) για μια περίοδο τριών ετών ή $ 849 (£ 550) το μήνα για μια περίοδο δύο ετών.



Εικόνα 5.5-4: Αυτοκίνητο κυψελών καυσίμου της Daimler (Mercedes-Benz) που προορίζεται για την γραμμή παραγωγής το 2014.

Η Ford εξακολουθεί να έχει άμεσα μακροπρόθεσμα σχέδια να κυκλοφορήσει ένα εμπορικό FCEV αλλά η συμμετοχή της στο AFCC διατηρεί την τεχνολογική πρωτοπορία για την αυτοκινητοβιομηχανία.



Εικόνα 5.5-5: Αυτοκίνητο κυψελών καυσίμου της Ford που προορίζεται για την γραμμή παραγωγής το 2020.

Το Σεπτέμβριο του 2012 η Nissan παρουσίασε το TeRRa concept μια σχεδιαστική μελέτη για την εξέλιξη των SUV μοντέλων της Juke και Qashqai σε οχήματα μηδενικών εκπομπών η οποία έδειξε την κατεύθυνση της εταιρίας προς τα εμπορικά FCEV.



Εικόνα 5.5-6: Αυτοκίνητο κυψελών καυσίμου της Nissan που προορίζεται για την γραμμή παραγωγής το 2016.

Στις αρχές Ιουλίου του 2013 η Honda και η General Motors ανακοίνωσαν ότι έχουν υπογράψει μια συμφωνία ώστε να αναπτύξουν από κοινού συστήματα κυψελών καυσίμου και αποθήκευσης υδρογόνου επόμενης γενιάς. Οι δύο εταιρίες θα επωφεληθούν από την κοινή πείρα και την οικονομική κλίμακα μόλις περάσουν στην φάση της παραγωγής.



Εικόνα 5.5-7: Αυτοκίνητο κυψελών καυσίμου της Chevrolet που προορίζεται για την γραμμή παραγωγής το 2015.

Η Honda σχεδιάζει να προωθήσει τον διάδοχο του FCX Clarity στην Ιαπωνία και τις ΗΠΑ από το 2015 και αργότερα και στην Ευρώπη, το όχημα αυτό θα χρησιμοποιεί όμως την σημερινή τεχνολογία κυψελών καυσίμου.



Εικόνα 5.5-8: Αυτοκίνητο κυψελών καυσίμου της Honda που προορίζεται για την γραμμή παραγωγής το 2015.

Η Volkswagen η δεύτερη μεγαλύτερη αυτοκινητοβιομηχανία στον κόσμο (με βάση την μονάδα παραγωγής) της οποίας η τελευταία επίδειξη κυψέλης καυσίμου ήταν μια έκδοση του μοντέλου της Tiguan το 2008, υπέγραψε το 2013 τετραετή συμφωνία με την Ballard Power Systems για την ανάπτυξη και την προώθηση μιας κυψέλης καυσίμου η οποία θα χρησιμοποιηθεί στο πρόγραμμα επίδειξης της. Αυτό σηματοδοτεί μια ταχεία επιστροφή για τις κυψέλες καυσίμου της Ballard στην αυτοκινητοβιομηχανία μετά την λήξη της πενταετούς απαγορεύσεως ανταγωνισμού που είχε οριστεί από την δημιουργία της AFCC (Automotive Fuel Cell Cooperation) όπου συμμετείχε η Ballard. Λίγο μετά την υπογραφή της συμφωνίας αναφέρθηκε ότι η Volkswagen είχε ξεκινήσει δοκιμές μιας κυψέλης καυσίμου όπου θα τροφοδοτούσε το μοντέλο της Audi A7 αργότερα μέσα στο 2013.

Μια αυτοκινητοβιομηχανία αποφάσισε να προχωρήσει μόνη της στην επιδίωξη μιας πρόωρης πλεονεκτικής θέσης στην αγορά των FCEV. Μετά από μια σειρά επιδείξεων το 2011 και το 2012, τον Σεπτέμβριο του 2012 η Hyundai αποκάλυψε την πρόθεση της να θέσει το μοντέλο της ix35 Fuel Cell σε μαζική παραγωγή με μια σειρά παραγωγής 1.000 οχημάτων μεταξύ του 2013 και του 2015, πριν την είσοδο στην μαζική παραγωγή η οποία με βάση την ζήτηση θα φτάνει και τις 10.000 μονάδες ετησίως. Τα οχήματα θα απευθύνονται σε φορείς του δημοσίου αλλά και του ιδιωτικού τομέα κυρίως στην Ευρώπη με τα περισσότερα οχήματα να κατασκευαστούν και να παραδοθούν μέσα στο 2014. Τα πρώτα 15 οχήματα παραδόθηκαν στον δήμο της Κοπεγχάγης τον Ιούνιο του 2013. Η Hyundai έχει υπογράψει μια συμφωνία με την Honda, την Toyota, την Nissan, τους κατασκευαστές υποδομών και σκανδιναβικές μη κυβερνητικές οργανώσεις συμφωνώντας να φέρει τα FCEV και τις υποδομές υδρογόνου στις σκανδιναβικές χώρες μεταξύ του 2014 και του 2017.



Εικόνα 5.5-9: Αυτοκίνητο κυψελών καυσίμου της Hyundai που προορίζεται για την γραμμή παραγωγής το 2015.

Με την προώθηση αυτών των 1.000 αυτοκινήτων η Hyundai ελπίζει να ενθαρρύνει του κατασκευαστές υποδομών για την κατασκευή σταθμών στο πλαίσιο της προετοιμασίας για την ευρύτερη εισαγωγή των FCEV στην αγορά λύνοντας έτσι το πρόβλημα που εμποδίζει την εμπορευματοποίηση των FCEV. Αυτή ήταν μια τολμηρή κίνηση της Κορεάτικης αυτοκινητοβιομηχανίας σε μια εποχή

αποκλιμάκωσης των σύγχρονων επιδείξεων. Η πεποίθηση ότι οι κυψέλες καυσίμου είναι το μέλλον της Hyundai είναι εμφανής σε ολόκληρη την εταιρία που όπως φαίνεται θέλει να κατακτήσει μια ηγετική θέση σε αυτήν την επόμενη γενιά των επιβατικών οχημάτων.

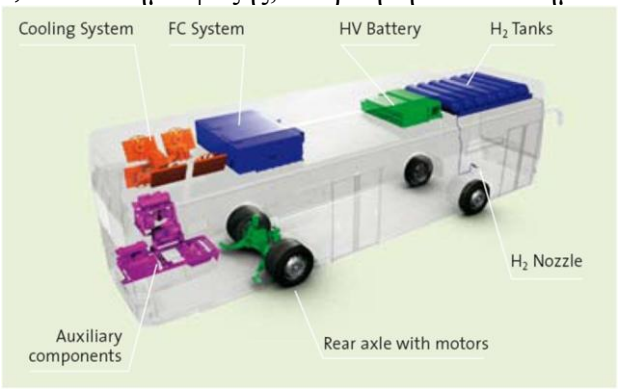
Λεωφορεία

Οι κυψέλες καυσίμου για εφαρμογές λεωφορείων έχουν προσελκύσει ένα τεράστιο ενδιαφέρον κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, δεδομένου ότι προσφέρουν την υπόσχεση ενός καθαρού, αποδοτικού συστήματος μεταφορών που δεν θα είναι πλέον εξαρτημένο από τα ορυκτά καύσιμα. Βέβαια για την εφαρμογή τους απαιτούνται σημαντικά νέες υποδομές, τεχνική υποστήριξη και προδιαγραφές κατάρτισης οι οποίες θα εξαρτηθούν από το είδος του καυσίμου που χρησιμοποιείται για τις κυψέλες καυσίμου. Τα περισσότερα διαθέσιμα λεωφορεία επίδειξης χρησιμοποιούν καθαρό υδρογόνο το οποίο αποθηκεύεται σε συμπιεσμένη μορφή αερίου.

Τα λεωφορεία κυψελών καυσίμου (Fuell Cell Buses, FCBs) μπορούν να προσφέρουν αισθητή βελτίωση της ποιότητας του αέρα στις πόλεις και είναι και ένας τρόπος με τον οποίο η πλειοψηφία των πολιτών μπορεί να έρθει για πρώτη φορά σε επαφή με ένα όχημα κυψελών καυσίμου. Με την λειτουργία τους στις καθιερωμένες διαδρομές σε μεγάλες πόλεις οι επιβάτες που επιβιβάζονται για πρώτη φορά σε ένα τέτοιο όχημα θα βιώσουν τα οφέλη της τεχνολογίας και θα σχηματίσουν μια θετική εντύπωση γύρο από αυτή. Η οικειότητα που θα δημιουργηθεί θα ενθαρρύνει το κοινό να εξετάσει τις κυψέλες καυσίμου που θα παρουσιαστούν στην καταναλωτική αγορά.

Δομή Fuel Cell Bus

Όλα τα οχήματα κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες για την κίνηση στους τροχούς, συνήθως αυτό επιτυγχάνεται μέσω συνδυασμού ενός ηλεκτρικού συστήματος αποθήκευσης μπαταρίας και ενός συστήματος κυψελών καυσίμου. Ανάλογα με το βαθμό του υβριδισμού, η μπαταρία μπορεί να παρέχει καθαρά "plug-in" ηλεκτρική ενέργεια για να οδηγείτε το όχημα σε μεγάλη απόσταση. Το σύστημα της μπαταρίας θα πρέπει να συμπληρώνεται από ένα σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου και κυψελών καυσίμου, με στόχο τη διεύρυνση του φάσματος οδήγησης στα 300 μίλια (483 χλμ.). Τα πιο πρόσφατα σχεδιασμένα λεωφορεία κυψελών καυσίμου περιέχουν ένα ηλεκτρικό σύστημα κίνησης, όπου η κυψέλη καυσίμου παράγει ηλεκτρική ενέργεια η οποία τροφοδοτεί κατευθείαν τον ηλεκτρικό κινητήρα. Μια νέα γενιά FCBs βασίζεται σε αυτήν την υβριδική σχεδίαση. Η παρακάτω εικόνα () δείχνει μια τυπική διάταξη των συστημάτων ενός FCB. Τα βασικά συστήματα του οχήματος είναι τα εξής: το σύστημα κυψελών καυσίμου, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, το σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου, το σύστημα κίνησης των τροχών, το σύστημα ψύξης, και βοηθητικά συστήματα.



Εικόνα 5.5-10: Τυπική διάταξη συστήματος λεωφορείου κυψελών καυσίμου.

Σύστημα κυψελών καυσίμου: Μια κυψέλη καυσίμου είναι μια τεχνολογία μετατροπής ενέργειας που επιτρέπει στην ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο υδρογόνο να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε ένα όχημα κυψελών καυσίμου, ένα ηλεκτρικό σύστημα κίνησης, το οποίο αποτελείται από τον μετατροπέα έλξης (inverter), τον ηλεκτρικό κινητήρα και το κιβωτίου ταχυτήτων, μετατρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από το σύστημα κυψελών καυσίμου σε μηχανική ισχύς για την πρόωση ενός λεωφορείου. Το σύστημα κυψελών καυσίμου και τα πρόσθετα εξαρτήματα του συνήθως τοποθετούνται στην οροφή του λεωφορείου.

Οι κυψέλες καυσίμου έχουν ταξινομηθεί με βάση τον ηλεκτρολύτη και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους. Για τις εφαρμογές στα οχήματα χρησιμοποιούνται κυρίως κυψέλες καυσίμου (PEM) οι οποίες λειτουργούν με υδρογόνο και οξυγόνο από τον αέρα. Έχουν μικρό βάρος και χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας. Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFCs) είναι μία από τις πιο ώριμες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου. Οι AFCs έχουν μια συνδυασμένη απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας που φτάνει το 60 %. Μια νεώτερη τεχνολογία κυψελών είναι κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλη (DMFC). Η DMFC χρησιμοποιεί καθαρή μεθανόλη η οποία αναμιγνύεται με ατμό. Η υγρή μεθανόλη έχει υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από το υδρογόνο, και για τη μεταφορά και την προμήθεια της μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι υπάρχουσες υποδομές.

Οι μεγαλύτεροι κατασκευαστές κυψελών καυσίμου οι οποίοι τροφοδοτούν την βιομηχανία των βαρέως τύπου οχημάτων είναι: η Ballard Power Systems και η Hydrogenics (Καναδά),η United Technologies Corporation (UTC) και η Enova Systems (ΗΠΑ), η Shanghai Shen-Li High Tech Co. Ltd. (Κίνα), η Siemens και η Proton Motor Fuel Cell GmbH (Γερμανία), η Toyota (Ιαπωνία) και η Hyundai Motor Co. (Νότια Κορέα).

Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας: Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας βασίζονται κυρίως σε συστοιχίες μπαταριών ή / και υπερπυκνωτές (περίπου μέχρι 100 kW). Η μέγιστη ισχύς και η ικανότητα αποθήκευσης ποικίλλουν ανάλογα με την υβριδική αρχιτεκτονική. Η τεχνολογία μπαταριών ιόντων λιθίου είναι η πιο κατάλληλη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας για χρήση στα λεωφορεία. Οι μπαταρίες τοποθετούνται συνήθως στην οροφή του λεωφορείου. Τα FCBs είναι επίσης εξοπλισμένα με αναγεννητική πέδηση.

Σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου: Το αέριο υδρογόνο που χρησιμοποιείται ως καύσιμο είναι αποθηκευμένο σε δεξαμενές συμπιεσμένου αερίου, ο αριθμός των οποίων είναι καθοριστικός για την μέγιστη αυτονομία του οχήματος, αλλά και περιορίζει την χωρητικότητα των επιβατών. Το σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου έχει συρρικνωθεί λόγο της βελτίωσης της αποδοτικότητας του συστήματος μετάδοσης κίνησης (drive train). Αυτό έχει οδηγήσει στην μείωση του συνολικού βάρους του λεωφορείου. Οι δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου που τοποθετούνται στο όχημα λειτουργούν σε μία αυξημένη πίεση περίπου 350 bar.

Σύστημα κίνησης των τροχών: Το σύστημα κίνησης των τροχών μπορεί να αποτελείται είτε από έναν κεντρικό ηλεκτροκινητήρα ο οποίος θα δίνει κίνηση στους τροχούς μέσω ενός κεντρικού διαφορικού είτε από ξεχωριστούς ηλεκτροκινητήρες τοποθετημένους σε κάθε τροχό οι οποίοι χρησιμεύουν επίσης ως γεννήτριες για την ανάκτηση της ενέργειας κατά το φρενάρισμα.

Σύστημα ψύξης: Με την λειτουργία της κυψέλης καυσίμου παράγεται νερό σε υψηλή θερμοκρασία. Ένα ποσοστό από αυτό βρίσκεται υπό μορφή ατμού και φεύγει αρκετά εύκολα μέσο ενός εξαερισμού αποβαλόντας θερμότητα από το σύστημα. Ωστόσο επειδή οι κυψέλες καυσίμου PEM είναι αρκετά επιρρεπείς στις υψηλές θερμοκρασίες και στην συσσώρευση του παραγόμενου νερού χρειάζονται ένα σύστημα ψύξης και διαχείρισης νερού. Η πλειοψηφία των κατασκευαστών κυψελών καυσίμου χρησιμοποιεί υγρόψυκτα συστήματα για την απομάκρυνση της θερμότητας.

Βοηθητικά εξαρτήματα: Τα βοηθητικά εξαρτήματα ενός FCB είναι ηλεκτρικά. Αυτό σημαίνει ότι λειτουργούν μόνο όταν χρειάζεται και όχι συνεχώς όπως τα μηχανικά εξαρτήματα. Αυτό είναι ένα χαρακτηριστικό που ενισχύει την υβριδική έννοια στην οποία βασίζονται τα FCBs και οδηγεί στη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και μικρότερη συντήρηση των εξαρτημάτων.

Εισαγωγή στην αγορά.

Η εισαγωγή των λεωφορείων κυψελών καυσίμου στις αστικές δημόσιες συγκοινωνίες είναι μια δύσκολη διαδικασία που περιλαμβάνει τον έλεγχο, την επίδειξη και την περιορισμένη παραγωγή, με την τάση να αυξηθεί ο αριθμός των οχημάτων. Τα FCBs λειτουργούν στη φάση επίδειξης σε δημόσιες υπηρεσίες μεταφορών σε διάφορες τοποθεσίες σε όλο τον κόσμο. Πολλά έργα επίδειξης έχουν ξεκινήσει τα τελευταία 10 χρόνια περιλαμβάνοντας διάφορα στάδια υλοποίησης. Μερικά από αυτά έχουν ολοκληρωθεί και κάποια άλλα βρίσκονται ακόμα σε εξέλιξη. Μια επισκόπηση των μεγαλύτερων έργων επίδειξης δίνεται παρακάτω:

- HyFLEET:CUTE (Clean Urban Transport for Europe): Το έργο αυτό αφορούσε την ανάπτυξη 47 λεωφορείων και την κανονική λειτουργία τους σε 10 πόλεις σε τρείς ηπείρους. Ξεκίνησε το 2006 και ολοκληρώθηκε στο τέλος του 2009. Συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή επιτροπή και 31 βιομηχανικούς εταίρους μέσο του $6^{ου}$ προγράμματος – πλαισίου της επιτροπής.

- ECTOS (Ecological City Transport System): Ήταν μια πρωτοβουλία για την δοκιμή τριών λεωφορείων Citaro στο σε Ρέικιαβικ της Ισλανδίας. Το έργο χρηματοδοτήθηκε από την ευρωπαϊκή επιτροπή, ξεκίνησε στα μέσα του 2003 και πλέον τα λεωφορεία αυτά έχουν παροπλιστεί.

- STEP (Sustainable Transport Energy Project): Ένα πρόγραμμα για την διεύρυνση της χρήσης εναλλακτικών πηγών ενέργειας στις μεταφορές. Διεξήχθη στο Περθ της Αυστραλίας και περιελάμβανε την λειτουργία τριών λεωφορείων Citaro. Χρηματοδοτήθηκε από την κυβέρνηση της Αυστραλίας και ξεκίνησε το 2003, τώρα τα λεωφορεία έχουν παροπλιστεί.

- CHIC (Clean Hydrogen In European Cities): Είναι ένα ενεργό έργο που περιλαμβάνει την ενσωμάτωση 26 FCBs στην καθημερινή λειτουργία των δημόσιων μεταφορών και δρομολογίων λεωφορείων σε πέντε τοποθεσίες σε όλη την Ευρώπη. Το έργο υποστηρίζεται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και έχει 25 εταίρους από όλη την Ευρώπη συμπεριλαμβανομένων βιομηχανικών εταίρων για την προμήθεια των οχημάτων και των υποδομών ανεφοδιασμού. Τα λεωφορεία του έργου CHIC θα πρέπει να παρέχονται από τρεις

διαφορετικούς κατασκευαστές - Mercedes-Benz (Γερμανία), Van Hool (Βέλγιο) και Wrightbus (Ηνωμένο Βασίλειο).

- "NaBuZ demo" (Sustainable Bus System of the Future – Demonstration): Ένα έργο Γερμανικής χρηματοδότησης για το οποίο η Hamburger Hochbahn AG έθεσε σε λειτουργία τέσσερα Mercedes-Benz Citaro Fuel Cell buses.

Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (National Renewable Energy Laboratory, NREL) δημοσίευσε μια έκθεση για την τεκμηρίωση της προόδου και των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται από τα προγράμματα επίδειξης των FCBs στις ΗΠΑ. Η έκθεση περιγράφει την κατάσταση και τις προκλήσεις των κυψελών καυσίμου για τις μεταφορές και συνοψίζει την εισαγωγή των λεωφορείων κυψελών καυσίμου στην Βόρεια Αμερική. Τα τρία μεγάλα προγράμματα που παρουσιάζει είναι:

- Το πρόγραμμα National Fuel Cell Bus Program (NFCBP) σε συνεργασία με τον οργανισμό Federal Transit Administration's (FTA) περιλαμβάνει την ανάπτυξη 11 λεωφορείων διευρύνοντας τους κατασκευαστές κυψελών καυσίμου καθώς πέρα από τις Ballard και UTC Power συμπεριλαμβάνει και τις Hydrogenics και Nuvera για την έρευνα διαφόρων μεγεθών λεωφορείων και σχεδίων υβριδικών συστημάτων.
- Zero Emission Bay Area (ZEBA): Το πρόγραμμα περιλαμβάνει την επίδειξη 12 λεωφορείων επόμενης γενιάς σχεδιασμένων από την Van Hool με σύστημα κυψελών καυσίμου από την UTC Power και ένα πλήρως ολοκληρωμένο υβριδικό σύστημα πρόωσης.

- BC Transit Fuel Cell Bus Demonstration: Περιλαμβάνει την επίδειξη 20 λεωφορείων στο Γουίστλερ του Καναδά. Τα λεωφορείων είναι κατασκευασμένα από την New Flyer με σύστημα κυψελών καυσίμου από την Ballard και διαθέτουν υβριδική πρόωσης από την ISE/Siemens.

Άλλα προγράμματα:

- Στην Κίνα περισσότερα από 50 FCBs χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια των Ασιατικών Αγώνων το 2010 και των Ολυμπιακών Αγώνων το 2008.

- Στην Ιαπωνία η Toyota-Hino έχει προμηθεύσει δεκάδες λεωφορεία από το 2003 και μετά.

- Στην Κορέα ένα FCB της Hyundai λειτουργεί από το 2006.

Αν και με αργό ρυθμό ο τομέας τον λεωφορείων έχει αρκετές θετικές εξελίξεις και δεν πρέπει να παραλείπεται ότι είναι μια αγορά που μόλις αρχίζει να εξέρχεται από το στάδιο της επίδειξης. Αρκετά προγράμματα έχουν αναπτυχθεί για την αύξηση του αριθμού και την διάθεση των λεωφορείων σε κανονική λειτουργία σε μεγάλες πόλεις. Η CT Transit έχει αγοράσει το πρώτο εμπορικά μη επιδοτούμενο λεωφορείο κυψελών καυσίμου. Η προμήθεια της CT Transit είναι ένα σημαντικό βήμα για την μετάβαση σε μια εμπορική αγορά πριν από την ευρεία υιοθέτηση η οποία θα μπορούσε να συμβεί ήδη από το 2014 χάρη στους υψηλούς στόχους των κατασκευαστών κυψελών καυσίμου για την μείωση του κόστους. Συνολικά υπήρξε

μια αύξηση του 86% στις μεταφορές με λεωφορείο μεταξύ του 2012 και του 2011 και αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό σε μια σειρά προγραμμάτων επίδειξης στην ΕΕ καθώς και σε όλες τις ΗΠΑ.



Εικόνα 5.5-11: Λεωφορείο κυψελών καυσίμου της CT Transit.

Η πλειοψηφία των λεωφορείων κυψελών καυσίμου που απεστάλησαν το 2012 προοριζόταν για ευρωπαϊκές περιοχές χάρη σε έργα επίδειξης που ξεκίνησαν με την χρηματοδότηση της Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) σύμπραξης του δημόσιο και ιδιωτικού φορέα που είναι υπεύθυνη για την κατανομή της χρηματοδότησης του πλαισίου – προγράμματος hydrogen and fuel cells της ΕΕ. Το Δεκέμβριο του 2012 η FCH JU παρουσίασε την έκθεση «Αστικά λεωφορεία: εναλλακτικά συστήματα για την Ευρώπη». Η έκθεση η οποία δημιουργήθηκε είναι ένα χαρτοφυλάκιο των κινητήρων για την Ευρώπη. Μια ανάλυση η οποία βασίζεται σε πραγματικές ενδείξεις και συγκεντρώνει ευρήματα από 40 εταιρίες και κυβερνητικούς οργανισμούς για οκτώ τεχνολογίες κινητήρων που διατίθενται για τα αστικά λεωφορεία από το 2012 έως το 2030. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν συγκριτική ανάλυση και εστιάζουν στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, την απόδοση και το συνολικό κόστος κτήσης (Total Cost of Ownership, TCO). Η έκθεση διαπιστώνει ότι είναι απίθανο ο κινητήρας ντίζελ να είναι σε θέση να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της αυστηρής νομοθεσίας για τις εκπομπές καυσαερίων των βαρέων επαγγελματικών οχημάτων μετά το 2015 και ότι το κόστος των λεωφορείων κυψελών καυσίμου αναμένεται να μειωθεί μέχρι το 2030. Επίσης τα λεωφορεία κυψελών καυσίμου είναι συγκριτικά καλύτερα από τις συμβατικές εκδόσεις κινητήρων που προσφέρουν παρόμοια χαρακτηριστικά όπως απόδοση, ευελιξία στις επιλογές διαδρομής και χαμηλό κόστος υποδομής ανά χιλιόμετρο, ενώ επιπλέον προσφέρουν χαμηλές εκπομπές ρύπων και θορύβου. Μετά την δημοσίευση της έκθεσης η FCH JU και οι συνεργάτες της εργάζονται για να δημιουργήσουν έναν χάρτη για την πορεία προς την εμπορική εξάπλωση των λεωφορείων κυψελών καυσίμου.

Μετά από δύο προηγούμενα ευρωπαϊκά προγράμματα επίδειξης λεωφορείων κυψελών καυσίμου (Clean Urban Transport for Europe, HyFLEET:CUTE και Ecological City TranspOrt System, ECTOS) το 2010 ξεκίνησε το έργο CHIC (Clean Hydrogen in European Cities) με στόχο την ενσωμάτωση 26 λεωφορείων κυψελών καυσίμου στην καθημερινή λειτουργία διαδρομών λεωφορείων δημόσιων μεταφορών σε πέντε πόλεις της Ευρώπης: Aargau (Ελβετία), Bolzano / Bozen (Ιταλία), Λονδίνο (Ηνωμένο Βασίλειο), Μιλάνο (Ιταλία), και Όσλο (Νορβηγία). Τα λεωφορεία έχουν τεθεί ήδη σε λειτουργία και στις πέντε πόλεις και το έργο θα τρέχει μέχρι το 2016. Ένα άλλο πρόγραμμα το οποίο θα τρέχει παράλληλα με το CHIC είναι το High V.LO-City, ξεκίνησε στις αρχές του 2012 και στοχεύει να αναπτύξει και να ενσωματώσει γρήγορα τις πιο πρόσφατες εξελίξεις των κυψελών καυσίμου

λεωφορείων σε στόλους λεωφορείων σε διάφορες περιοχές της Ευρώπης: Βρυξέλλες, Ιταλία, Βέλγιο και Σκωτία. Το έργο High V.LO-City έχει επίσης ως στόχο να εξετάσει το σύνολο του κόστους των λεωφορείων κυψελών καυσίμου συμπεριλαμβανομένων του κόστους συντήρησης και του κόστους δημιουργίας υποδομών υδρογόνου.



Εικόνα 5.5-12: Λεωφορείο κυψελών καυσίμου της Wrightbus στους δρόμους του Λονδίνου.

Στους ευρωπαίους κατασκευαστές που προμηθεύουν τα λεωφορεία κυψελών καυσίμου για τα προγράμματα επίδειξης συγκαταλέγονται οι εταιρίες: Van Hool, Rampini, VDL, APTS και Wrightbus οι οποίες στις περισσότερες των περιπτώσεων χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου από την Ballard, την UTC και την Hydrogenics και φυσικά η Daimler, η οποία χρησιμοποιεί τις δικές της κυψέλες καυσίμου. Η Van Hool έχει κάνει μια αρκετά μεγάλη αποστολή: έντεκα λεωφορεία για το πρόγραμμα επίδειξης Zero Emission Bay Area (Zeba) στην Καλιφόρνια από τις αρχές του 2011 και πέντε λεωφορεία για το Όσλο στην Νορβηγία, στα πλαίσια του CHIC τον Ιούνιο του 2012. Επίσης η Van Hool είναι βασικός εταίρος στο νέο σχέδιο High V.LO City.



Εικόνα 5.5-13: Συστήματα κυψελών καυσίμου για λεωφορεία.

Η Daimler συμμετέχει επίσης στο CHIC και τον Δεκέμβριο του 2011 παρείχε πέντε λεωφορεία κυψελών καυσίμου Mercedes-Benz Citaro για την πόλη Canton Aargau στην Ελβετία. Τα CHIC λεωφορεία του Λονδίνου έχουν αποσταλεί από την Wrightbus, ώστε να υπάρξει ένας καλός συνδυασμός των κατασκευαστών σε αυτό το έργο. Υπάρχουν και άλλα ευρωπαϊκά έργα. Για παράδειγμα, το Αμβούργο έχει

αναλάβει την παράδοση επτά λεωφορείων Citaro το 2011 – 2012 στα πλαίσια του έργου επίδειξης NaBuz, που χρηματοδοτείται από το γερμανικό πρόγραμμα NIP και συνεργάζεται με το CHIC. Δύο λεωφορεία Phileas της VDL έχουν αποσταλεί από την θυγατρική της την Advanced Public Transport Systems bv (APTS) στο Άμστερνταμ και την Κολωνία. Στο Aberdeen της Σκωτίας απεστάλησαν το 2014 δέκα λεωφορεία της Van Hool τα οποία κινούνται με κυψέλες καυσίμου της Ballard, μόλις τεθούν σε λειτουργία θα είναι ο μεγαλύτερος στόλος που υπάρχει σε Ευρωπαϊκή πόλη.



Εικόνα 5.5-14: Λεωφορείο κυψελών καυσίμου της Daimler.

Στη Βόρεια Αμερική το μη κερδοσκοπικό κέντρο μεταφορών και περιβάλλοντος (Center for Transportation and the Environment, CTE) στη Γεωργία ολοκλήρωσε μια σύμβαση με την CT Transit τον Απρίλιο του 2013 για την παράδοση ενός λεωφορείου κυψελών καυσίμου βαρέως τύπου σε συνεργασία με τις κατασκευάστριες εταιρίες ElDorado National, BAE Systems και Ballard Power Systems. Το λεωφορείο θα κατασκευαστεί και θα εμπορευματοποιηθεί με βάση καθορισμένες βιομηχανικές διαδικασίες ώστε να πληροί όλες τις απαιτούμενες προδιαγραφές και να είναι πλήρως εμπορεύσιμο. Η διαδικασία αυτή αντικατοπτρίζει την προμήθεια ενός προτύπου λεωφορείων και αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προς την πλήρη εμπορευματοποίηση των λεωφορείων κυψελών καυσίμου στις ΗΠΑ. Η συντριπτική πλειοψηφία των υφιστάμενων λεωφορείων που λειτουργούν στις ΗΠΑ έχουν κατασκευαστεί και αγοραστεί στα πλαίσια χρηματοδοτούμενων ερευνητικών προγραμμάτων και κυρίως του National Fuel Cell Bus Program (NFCBP). Το (CTE) αναμένεται να παραδώσει το λεωφορείο το 2014 και συμμετέχει επίσης σε ένα ακόμη έργο για την ενσωμάτωση κυψελών καυσίμου επόμενης γενιάς της Hydrogenics σε λεωφορεία της Proterra ένα έργο χρηματοδοτούμενο από το (NFCBP).



Εικόνα 5.5-15: Φουτουριστικό σκίτσο λεωφορείου κυψελών καυσίμου της Proterra.

Τον Μάιο του 2013 η Ballard υπέγραψε μια συμφωνία συνεργασίας με την κινέζικη εταιρία Azure Hydrogen για την ανάπτυξη λεωφορείων κυψελών καυσίμου. Η Azure σχεδιάζει να αναπτύξει λεωφορεία κυψελών καυσίμου με την τεχνική υποστήριξη της Ballard και την χρηματοδότηση από ιδιωτικές και κυβερνητικές πηγές. Αν αυτό γίνει με επιτυχία η Azure θα παράγει για πρώτη φορά στην Κίνα λεωφορεία κυψελών καυσίμου μετά από το προηγούμενο πρόγραμμα United Nations Development Programme (UNDP) του Κινεζικού υπουργείου επιστήμης και τεχνολογίας που έτρεξε από το 2002 έως το 2010 και ανέπτυξε 6 λεωφορεία κυψελών καυσίμου SAIC που χρησιμοποιήθηκαν κατά τους ολυμπιακούς αγώνες το 2008 και κατά την διάρκεια της World Expo το 2010.

Η Tata Motors, η μεγαλύτερη αυτοκινητοβιομηχανία της Ινδίας και η τρίτη μεγαλύτερη κατασκευάστρια βιομηχανία λεωφορείων στον κόσμο σε συνεργασία με το τμήμα επιστημονικής και βιομηχανικής έρευνας της κυβέρνησης της Ινδίας εντάχθηκαν στα πλαίσια του προγράμματος STARBUS – FUEL CELL CONCEPT για την ανάπτυξη ενός λεωφορείο κυψελών καυσίμου. Το όχημα παρουσιάστηκε στην έκθεση αυτοκινήτου στο New Delhi της Ινδίας το 2012 (Auto Expo 2012). Η Tata Motors έχει αναλάβει επίσης την ενσωμάτωση 12 κυψελών καυσίμου της Ballard σε λεωφορεία επίδειξης που θα χρησιμοποιηθούν σε διάφορες πόλεις της Ινδίας.



Εικόνα 5.5-16: Λεωφορείο κυψελών καυσίμου της Tata Motors.

Ενώ το κίνητρο για τον καθαρό αέρα στις πόλεις και την μείωση των εκπομπών καυσαερίων αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα για την υιοθέτηση των λεωφορείων κυψελών καυσίμου στις πόλεις για να υπάρξει πραγματική εμπορευματοποίηση πρέπει ακόμα να επιτευχθούν η μείωση του κόστους και η βελτίωση της αντοχής. Οι στόχοι που έχουν τεθεί είναι το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας ενός λεωφορείου κυψελών καυσίμου να είναι συγκρίσιμο με ένα ντίζελ υβριδικό λεωφορείο μέχρι το 2014 και η διάρκεια ζωής να ταιριάζει με εκείνη των κινητήρων εσωτερικής καύσης των συμβατικών λεωφορείων πράγμα που σημαίνει τουλάχιστον 30.000 ώρες λειτουργίας. Με το λεωφορείο της Proterra, τις κυψέλες

καυσίμου επόμενης γενιάς της Hydrogenics και το σύστημα κυψελών καυσίμου FCvelocity-HD7 της Ballard να βρίσκονται σε εξέλιξη ο τομέας των λεωφορείων κυψελών καυσίμου φαίνεται να γίνεται ολοένα και πιο ανταγωνιστικός προσπαθώντας να φτάσει πιο κοντά στους στόχους για το κόστος και την διάρκεια ζωής με τα συμβατικά λεωφορεία μειώνοντας έτσι την ανάγκη στήριξης μέσω χρηματοδοτήσεων.

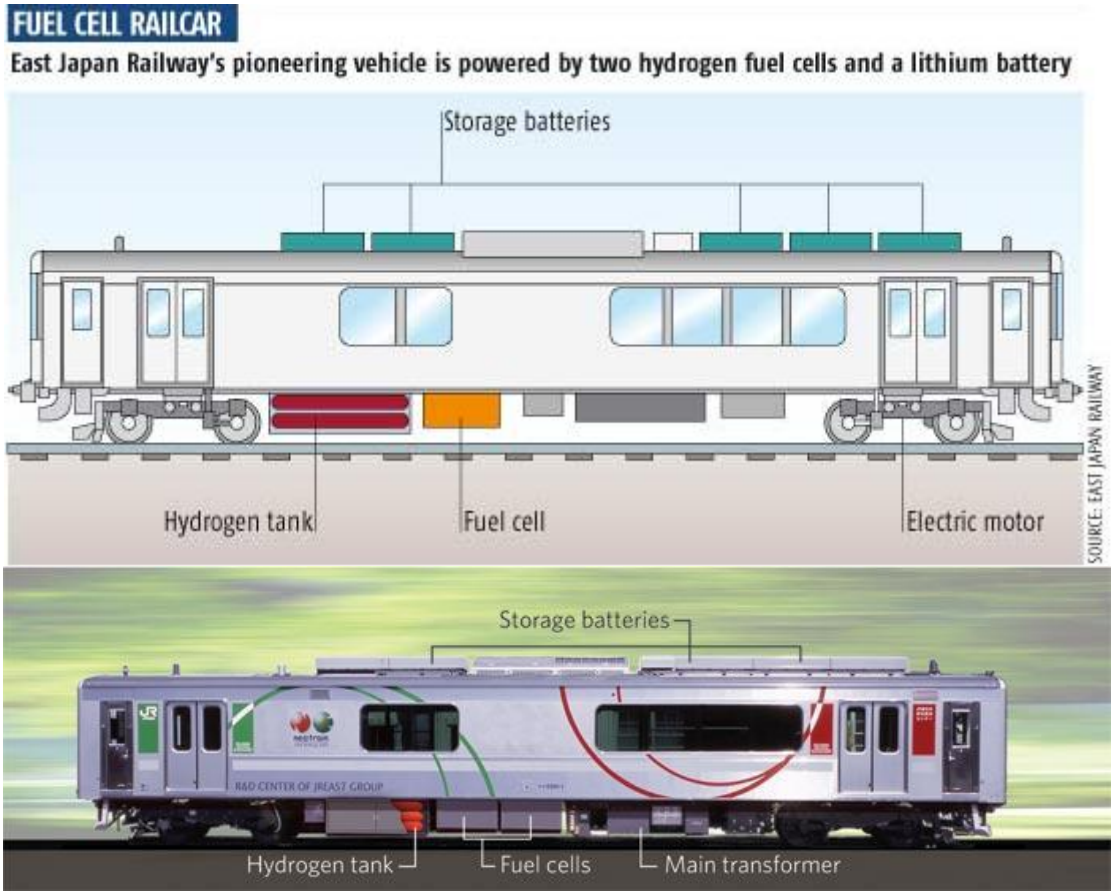
Τραίνα

Εκτός από τα λεωφορεία υπάρχουν και άλλα μέσα μαζικής μεταφοράς που εφαρμόζουν την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου. Μεγάλο ποσοστό τρένων, τραμ και τρόλεϊ λειτουργούν ήδη με ηλεκτρικά συστήματα κίνησης χρησιμοποιώντας τους συμβατικούς κινητήρες σε συνδυασμό με μια γεννήτρια για να φορτίσουν τις μπαταρίες που τροφοδοτούν τον ηλεκτρικό κινητήρα τους. Για την αντικατάσταση του πετρελαίου ντίζελ και των εναέριων καλωδίων που χρησιμοποιούν για την τροφοδοσία τους τρένα και τρόλεϊ μελετώνται ηλεκτρικά τρένα, τραμ και τρόλεϊ τα οποία χρησιμοποιούν τις κυψέλες καυσίμου για την φόρτιση των μπαταριών τους.

Τα οχήματα αυτά είναι γνωστά και με έναν πιο γενικό όρο που χρησιμοποιείται για τα οχήματα υδρογόνου που κινούνται πάνω σε ράγες τον όρο ``Hydrail´´ (γενικός όρος που χαρακτηρίζει όλες τις μορφές των σιδηροδρομικών οχημάτων, μικρές ή μεγάλες, που χρησιμοποιούν επί του σκάφους υδρογόνο ως πηγή ενέργειας) και για τα τρόλεϊ ή τραμ χρησιμοποιείται ο όρος ``hydrolley´´. Οι δοκιμές και η επίδειξη των οχημάτων αυτών βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο με τις περισσότερες εφαρμογές να αναπτύσσονται κυρίως στην Ασία (Κίνα, Ιαπωνία). Ωστόσο ενδιαφέρον έχουν εκδηλώσει και οι ΗΠΑ, η Δανία, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Ισπανία. Κάθε χρόνο διοργανώνεται ένα διεθνές συνέδριο όπου συμμετέχουν όλοι όσοι αναπτύσσουν και επενδύουν στην τεχνολογία των οχημάτων Hydrail. Βασικός διοργανωτής του συνεδρίου είναι το Appalachian State University της Βόρειας Καρολίνας και το πρώτο συνέδριο πραγματοποιήθηκε το 2005.

Η εφαρμογή των κυψελών καυσίμου στα τρένα σε σχέση με την εφαρμογή στα λεωφορεία έχει ένα επιπλέον πλεονέκτημα, αυτό των λιγότερων υποδομών εφοδιασμού, αφού ένα τρένο μπορεί να διαθέτει μια μεγάλη δεξαμενή υδρογόνου τοποθετημένη σε ένα βαγόνι ώστε να του εξασφαλίζει πολύ μεγάλη αυτονομία παρέχοντας του την δυνατότητα να χρειάζεται λίγα βασικά σημεία ανεφοδιασμού κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής.

Το 2006 η East Japan Railway Company παρουσίασε το πρώτο υβριδικό fuel-cell/battery Hydrail όχημα, ένα ηλεκτρικό τρένο με την ονομασία New Energy train (NE train). Το NE Train είναι μια πειραματική αμαξοστοιχία η οποία κατασκευάστηκε το 2003 από την Tokyu Car Corporation για να χρησιμοποιηθεί από το Railway Technical Research Institute (RTRI) και την East Japan Railway Company (JR East) σε δοκιμές εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Ξεκίνησε ως μια αμαξοστοιχία με ένα υβριδικό σύστημα ντιζελογεννήτριας και μπαταριών και το 2006 η ντιζελογεννήτρια αντικαταστάθηκε από κυψέλες καυσίμου. Το όχημα ήταν εφοδιασμένο με έξι δεξαμενές υδρογόνου (με συνολική χωρητικότητα 270 λίτρα), δυο κυψέλες καυσίμου τύπου PEM, με ισχύς 65 kW η κάθε μια και μπαταρίες ιόντων λιθίου με αυξημένη χωρητικότητα αποθήκευσης (19 kWh). Αυτά τροφοδοτούσαν τους δύο ηλεκτρικούς κινητήρες έλξης των 95 kW.



Εικόνα 5.5-17: Τρένο κυψελών καυσίμου της Railway.

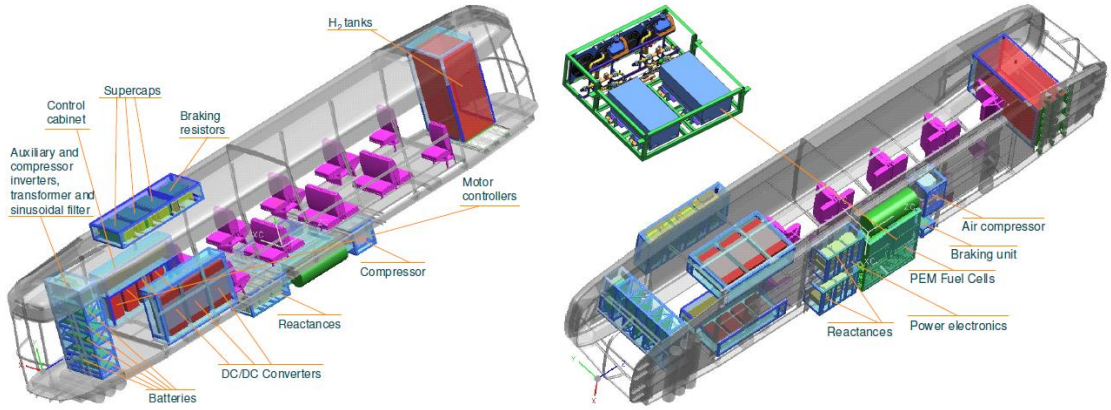
Η Ισπανική εταιρία FEVE (Ferrocarriles de Vía Estrecha) το 2009 παρουσίασε ένα τραμ το οποίο τροφοδοτείται από κυψέλες καυσίμου. Το τραμ μπορεί να μεταφέρει περίπου 20 έως 30 επιβάτες με τη μέγιστη ταχύτητα των 20 χιλιομέτρων την ώρα. Ο σχεδιασμός του οχήματος βασίστηκε στο τραμ series 3400 το οποίο κατασκεύαζε η εταιρία SNCV (Société Nationale des Chemins de fer Vicinaux) την δεκαετία του 1950



Εικόνα 5.5-18: Τραμ της FEVE και το σύστημα της κυψέλης καυσίμου του αναλυτικά.

Είναι εξοπλισμένο με δύο κυψέλες καυσίμου από την HYDROGENICS τύπου PEM 12 kW η κάθε μία και 12 δεξαμενές 200 bar συμπιεσμένου υδρογόνου των 50 λίτρων η κάθε μία. Οι κυψέλες καυσίμου μαζί με την αναγεννητική πέδηση φορτίζουν τις μπαταρίες χωρητικότητας 90 Ah και τους τρείς υπερ-πυκνωτές της

MAXWELL του οχήματος οπού τροφοδοτούν τους τέσσερις ηλεκτροκινητήρες των 30 kW ο κάθε ένας.

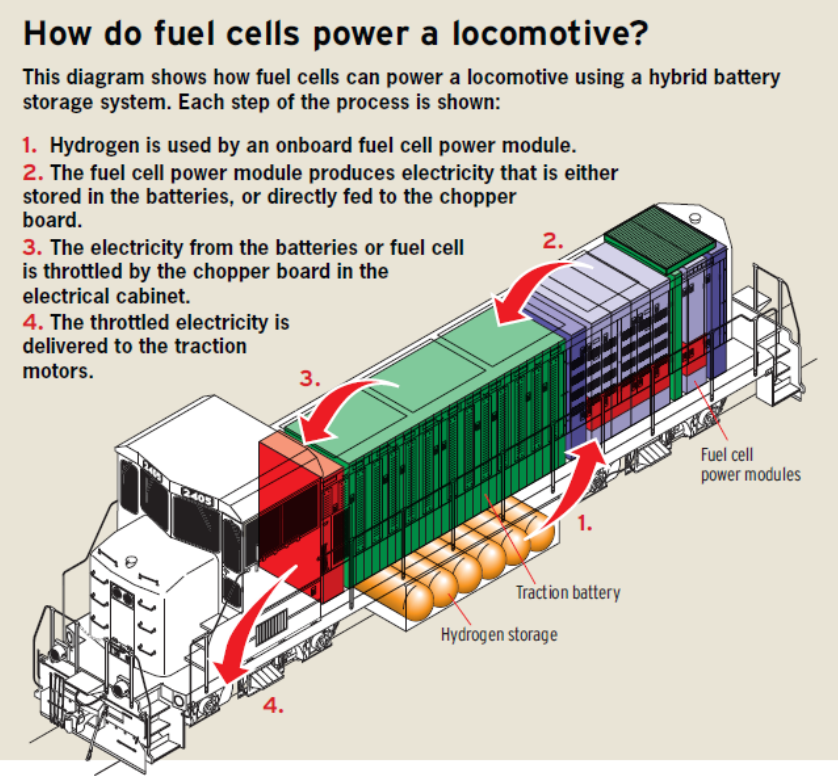


Εικόνα 5.5-19: Σχέδιο του τραμ της FEVE όπου φαίνονται τα επί μέρους συστήματα και η θέση τους.

Μια σύμπραξη δημοσίου και ιδιωτικού τομέα στην Βόρεια Αμερική αποτελούμενη από τις εταιρίες Vehicle Projects Inc, BNSF Railway Company και το Engineer Research and Development Center Construction Engineering Research Laboratory (ERDC-CERL), παρουσίασε το 2009 ένα εμπορικό υβριδικό τρένο. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 2006 με χρηματοδότηση από την BNSF και από το Υπουργείο Αμύνης της Αμερικής. Το πρωτότυπο παρουσιάστηκε στην Topeka του Κάνσας τον Ιανουάριο του 2009, στη συνέχεια ταξίδεψε στο Κολοράντο για πρόσθετες δοκιμές και στάλθηκε στην Καλιφόρνια το 2010. Τέλος δοκιμάστηκε στις εμπορικές σιδηροδρομικές εγκαταστάσεις του Λος Άντζελες στην περιοχή Hobart μέχρι το 2010 – 2011. Το τρένο είναι βασισμένο σε μια ήδη εμπορικά διαθέσιμη πλατφόρμα υβριδικού ντίζελ συστήματος εξοπλισμένο με δυο κυψέλες καυσίμου PEM από την Ballard Power Systems, Inc τροφοδοτούμενες από δεκατέσσερις δεξαμενές υδρογόνου κατασκευασμένες από ανθρακονήματα.



Εικόνα 5.5-20: Τρένο κυψέλων καυσίμου BNFS1205.



Εικόνα 5.5-21: Τα επί μέρους συστήματα του τρένου BNFS1205 .

Στην Κίνα παρουσιάστηκε το 2010 ένα τραίνο υψηλής ταχύτητας κατασκευασμένο από την εταιρία China North Vehicle Yongji Electric Motor Corporation και το πανεπιστήμιο Southwest Jiaotong University. Το τρένο αυτό χρησιμοποιεί προηγμένα συστήματα σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη και μετατροπέα συχνότητας σε συνδυασμό με κυψέλες καυσίμου.



Εικόνα 5.5-22: Τρένο κυψελών καυσίμου στην Κίνα.

Μηχανές και ποδήλατα

Όταν πρόκειται για κυψέλες καυσίμου μεταφορών οι περισσότεροι σκέφτονται τα λεωφορεία ή τα επιβατικά αυτοκίνητα. Αυτά αποτελούν σημαντικές αγορές για τις κυψέλες καυσίμου, η ματιά του κοινού όμως έχει στραφεί και σε μια επιπλέον ταχύτατα αναδυόμενη αγορά που αφορά τα δίτροχα οχήματα μηδενικών εκπομπών τα οποία αναπτύσσονται κυρίως στις εκβιομηχανιζόμενες περιοχές.

Η κυβέρνηση της Ταϊβάν έχει κυκλοφορήσει ένα πρότυπο μηχανάκι σκούτερ κυψελών καυσίμου και έχει εκδώσει νομοθεσία για την εγχώρια μαζική παραγωγή του ώστε να πληροί τις παγκόσμιες προδιαγραφές για τις μοτοσυκλέτες κυψελών καυσίμου. Τριάντα (30) APFCT σκούτερ κυψελών καυσίμου έχουν ολοκληρώσει μια σειρά από test drives διανύοντας πάνω από 120.000 χιλιόμετρα.



Εικόνα 5.5-23: APFCT Σκούτερ κυψελών καυσίμου.

Τα σκούτερ είναι ένα δημοφιλή και αποδοτικό μέσο μεταφοράς για το εσωτερικό των πόλεων σε όλο τον κόσμο, σε μεγάλες βιομηχανικές χώρες όπως η Ιταλία ή ακόμα πιο έντονα στις πρόσφατα εκβιομηχανιζόμενες χώρες όπως η Ινδία και η Κίνα, όπου ο γρήγορος ρυθμός αστικοποίησης έχει ως αποτέλεσμα την συμφόρηση των πόλεων και τα σκούτερ αποτελούν ένα πιο ευκίνητο μέσο προσωπικής μεταφοράς με πολύ χαμηλότερο κόστος από εκείνο των μποτιλιαρισμένων αυτοκινήτων. Σε αυτές τις πόλεις η ρύπανση του αέρα από τον συνεχώς αυξανόμενο αριθμό οχημάτων είναι ένα πραγματικό πρόβλημα και επηρεάζει αρνητικά την υγεία και την συνολική ποιότητα ζωής των κατοίκων. Αυτό δημιουργεί μια ισχυρή ζήτηση για τα σκούτερ μηδενικών εκπομπών την οποία οι κατασκευαστές κυψελών καυσίμου καλούνται να καλύψουν.

Μια εταιρία που έχει ακολουθήσει αυτή την αναδυόμενη ζήτηση είναι η Intelligent Energy στο Ηνωμένο Βασίλειο, η οποία το 2005 εισήγαγε στην αγορά την μοτοσικλέτα ENV (Emission Neutral Vehicle). Η μοτοσικλέτα αυτή τροφοδοτείται από μια PEMFC 1 kW και έχει αυτονομία για μια απόσταση 100 μιλίων με μέγιστη ταχύτητα τα 50 μίλια την ώρα (mph).



Εικόνα 5.5-24: Μοτοσικλέτες κυψελών καυσίμου ENV και Crosscage.

Η φουτουριστική αυτή μοτοσικλέτα τράβηξε το ενδιαφέρον της Ιαπωνικής Suzuki Motors η οποία μετά από μια περίοδο συνεργασίας και ανάπτυξης με την Intelligent Energy παρουσίασε την Crosscage fuel cell battery hybrid motorbike στο 40^{o} σαλόνι αυτοκινήτου του Τόκιο τον Οκτώβριο του 2007. Στην περίοδο αυτή διεξήχθησαν και μια σειρά από Ευρωπαϊκά προγράμματα επίδειξης σκούτερ κυψελών καυσίμου. Μια συνεργασία της Vespa, της Piaggio και του Ερευνητικού Κέντρου Ενέργειας της Ολλανδίας δοκίμασε με επιτυχία σε ιταλικό έδαφος ένα σκούτερ της Piaggio με κυψέλες καυσίμου τον Φεβρουάριο του 2006. Επίσης το 2006 μια ακόμη ιταλική εταιρία η GR Grafica κατασκεύασε κι αυτή ένα σκούτερ κυψελών καυσίμου το Hysyrider. Και ενώ διάφορες εταιρίες έκαναν τα πρώτα τους βήματα στην τεχνολογία των μοτοσικλετών και των σκούτερ η Intelligent Energy και η Suzuki προχώρησαν στην ανάπτυξη ενός νέου προϊόντος και δυο χρόνια μετά την αποκάλυψη του

Crosscage το 2009 παρουσίασαν το Suzuki Burgman Fuel Cell Scooter στο Tokyo Motor Show. Η μετάβαση από μια μοτοσυκλέτα στην κατασκευή ενός σκούτερ επέφερε αρκετές βελτιώσεις και έτσι το Burgman διαθέτει μια βελτιωμένη κυψέλη καυσίμου και έχει αυτονομία για 350 χιλιόμετρα. Η Ιαπωνική Nippon Steel παρέλαβε την πρώτη εμπορική παράδοση τον Μάρτιο του 2011. Επίσης ένας στόλος με πάνω από 5 Suzuki Burgman έχει ανατεθεί στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού προγράμματος HyTEC.



Εικόνα 5.5-25: Σκούτερ κυψελών καυσίμου της Suzuki.

Πίσω στην Ασία, η Ταϊβανέζικη Asia Pacific Fuel Cell Technologies (APFCT) αφού εντόπισε την ισχυρή εγχώρια ζήτηση ήταν απασχολημένη με την ανάπτυξη των δικών της fuel cell scooters. Έχοντας ολοκληρώσει με επιτυχία ένα τετραήμερο με 1.000 χιλιόμετρα δοκιμαστικής οδήγησης τον Μάιο του 2010 και την ανάπτυξη ενός στόλου από 10 σκούτερ APFCT κέρδισε ένα συμβόλαιο με το υπουργείο οικονομικών υποθέσεων της Ταϊβάν για την παραγωγή 80 επιπλέον σκούτερ επίδειξης τον Ιούλιο του 2011.

Την τάση αυτή της αγοράς ακολούθησαν και άλλες μεγάλες εταιρίες κατασκευής μοτοσικλετών όπως η Yamaha και η Honda παρουσιάζοντας πρότυπα μηχανάκια σκούτερ. Η Yamaha παρουσίασε το 2005 στην 39^{η} έκθεση Tokyo Motor Show το ``FC-me´´ ένα σκούτερ της κατηγορίας των 50cc το οποίο διαθέτει μια κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC) 1 kW της Yamaha και χρησιμοποιεί ως καύσιμο ένα υγρό διάλειμμα μεθανόλης – νερού δίνοντας του την δυνατότητα να λειτουργεί χωρίς κάποιο μετατροπέα καυσίμου μειώνοντας έτσι το βάρος του οχήματος το οποίο ζυγίζει μόνο 69 kg. Ένα χρόνο μετά, τον Οκτώβριο του 2006 η Yamaha παρουσίασε ένα άλλο σκούτερ μεγαλύτερου μεγέθους της τάξης των 125cc το ``FC-AQEL´´ στην 22^{η} έκθεση International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exposition στην Yokohama της Ιαπωνίας. Αυτή τη φορά το σκούτερ χρησιμοποιεί ως καύσιμο υδρογόνο το όποιο του το παρέχουν δυο φιάλες υψηλής πιέσεως (35MPa) οι οποίες είναι τοποθετημένες κάτω από το κάθισμα του οχήματος. Στον πίνακα 5.4-1 παρουσιάζονται τεχνικά χαρακτηριστικά του οχήματος.



Εικόνα 5.5-26: Το σκούτερ FC-me της Yamaha.

Πίνακας 5.5-1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του FC-AQEL.

Dimensions (overall L x W x H)	1,845mm x 770mm x 1,100mm
Fuel cell type	Polymer electrolyte fuel cell
Fuel	Compressed hydrogen gas
Hydrogen tank pressure	35MPa
Electric drive unit type	Synchronous motor
Secondary battery	Lithium-ion battery



Εικόνα 5.5-27: Το σκούτερ FC-AQEL της Yamaha.

Η Honda με βάση την επιτυχία της στην τεχνολογία των κυψελών καυσίμου αυτοκινήτου με το Honda FCX Clarity αποφάσισε να εφαρμόσει την τεχνολογία αυτή και στις μοτοσυκλέτες και έτσι τον Αύγουστο του 2004 παρουσίασε ένα σκούτερ κυψελών καυσίμου της κατηγορίας των 125cc βασισμένο σε ένα δημοφιλή μοντέλο της εταιρίας το Honda Spacy. Το σκούτερ αυτό έχει τοποθετημένο στο ψαλίδι του πίσω τροχού έναν ηλεκτρικό κινητήρα και στο κέντρο του οχήματος ένα Honda FC Stack, με τα βοηθητικά συστήματα συμπαγώς τοποθετημένα γύρω από αυτό.



Εικόνα 5.5-28: Σκούτερ κυψελών καυσίμου της Honda.

Συνεχίζοντας στην κατηγορία των δίκυκλων οχημάτων εκτός από τις μοτοσυκλέτες και τα σκούτερ οι κυψέλες βρίσκουν εφαρμογή και στα ηλεκτρικά ποδήλατα, οχήματα τα οποία είναι αρκετά δημοφιλείς κυρίως σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές όπου η κυκλοφορία είναι μια καθημερινή πρόκληση. Πολλές εταιρείες έχουν παρουσιάσει πρότυπα μοντέλα που χρησιμοποιούν την τεχνολογία κυψελών καυσίμου για την τροφοδοσία ηλεκτρικών ποδηλάτων.

Η Κινέζικη εταιρία Pearl Hydrogen Technology Co παρουσίασε το 2007 στην $9^{η}$ διεθνή έκθεση της κίνας για τον εξοπλισμό και τις εφαρμογές τεχνολογιών αερίου, το ηλεκτρικό ποδήλατο κυψελών καυσίμου ``ACTIVE´´. Το ποδήλατο αυτό έχει βάρος 32 Kg και η κυψέλη καυσίμου PEM με την οποία είναι εφοδιασμένο



Εικόνα 5.5-29: Το ποδήλατο ACTIVE.

τροφοδοτείται από δύο κυλινδρικές φιάλες οι οποίες του παρέχουν αυτονομία για περίπου 100 χιλιόμετρα με την τελική ταχύτητα των 25 km/h.

Το 2009 στο διεθνές αεροδρόμιο Kansai της Ιαπωνίας η εταιρία Iwatani παρουσίασε άλλο ένα ποδήλατο κυψελών καυσίμου στα πλαίσια του Ιαπωνικού προγράμματος Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project (JHFC). Το ποδήλατο διαθέτει μια κυψέλη καυσίμου τύπου PEM η οποία τροφοδοτείται από αφαιρούμενες φιάλες υδρογόνου τις οποίες έχει αναπτύξει η ίδια η Iwatani. Όταν η ισχύς της μπαταρίας είναι χαμηλή, το υδρογόνο παρέχεται αυτόματα από τις φιάλες υδρογόνου προς την κυψέλη καυσίμου, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια για την επαναφόρτιση της μπαταρίας, αναιρώντας έτσι την ανάγκη για ένα φορτιστή μπαταρίας. Δεδομένου ότι είναι δυνατή η επαναφόρτιση της μπαταρίας, εν λειτουργία του κινητήρα, το ποδήλατο είναι σε θέση να ταξιδεύει συνεχώς για μια απόσταση περίπου 45 χιλιομέτρων, 1,5 φορές μεγαλύτερη από ό, τι θα διάνυε μόνο με την μπαταρία. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αναλυτικά χαρακτηριστικά του ποδήλατου:



Εικόνα 5.5-30: Το ποδήλατο Iwatani.

Πίνακας 5.5-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά του ποδήλατου Iwatani.

Bicycle	Length	1,563mm	
	Weight	31.0kg	
Performance	Travel Distance	Approx. 45.0km	
	Continuous Power Supply	3 hours	
Power System	Fuel Cell Stack	Type	PEFC (Proton-Exchange Membrane Fuel)
		Output	60W class
	Battery	Type	Lithium-ion
		Capacity	26V-4Ah
Fuel	Hydrogen Cartridge	Fuel type	Pure hydrogen gas
		Storage type	Hydrogen storage alloy
		Cartridge capacity	80NL 80 litters (0 deg-C, 0.1 MPa)

Συμφώνα με τον ενθουσιασμό που παρατηρήθηκε τα τελευταία χρόνια γύρο από το ηλεκτρικό ποδήλατο η ALTER BIKE, μια σύμπραξη τριών Γαλλικών επιχειρήσεων (Cycleurope, Pragma Industries και Vente) παρουσίασε στις 30 Μαΐου του 2013 στο 20^{ο} συνέδριο της "Le club des Villes et Territoires Cyclables" στη Νίκαια της Γαλλίας το ηλεκτρικό ποδήλατο κυψελών καυσίμου υπό την εμπορική ονομασία Gitane. Η καινοτομία της ALTER BIKE στηρίζεται σε μια ομάδα τεχνολογικών λύσεων συμπεριλαμβανομένων της χρήσης μιας νέας γενιάς κυψελών καυσίμου, της αποθήκευση του υδρογόνο σε χημικά ανακυκλώσιμα δοχεία, καθώς και την χρήση υβριδικής ηλεκτρονικής αρχιτεκτονικής για την εξισορρόπηση των αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ της μπαταρίας Li-ion και της κυψέλης καυσίμου.



Εικόνα 5.5-31: Το ποδήλατο Gitane και ο τρόπος τοποθέτησης κασέτας ανεφοδιασμού καυσίμου.

Ειδικά οχήματα-οχήματα χειρισμού υλικών-Περονοφόρα κ.α.

Τα οχήματα χειρισμού υλικών (Materials Handling Vehicles, MHV) αποτελούν μια σημαντική εξειδικευμένη αγορά για την βιομηχανία των κυψελών καυσίμου. Οχήματα όπως ανυψωτικά μηχανήματα, παλετοφόρα, οχήματα ρυμούλκησης, αμαξάκια του γκολφ και μικρά φορτηγά και βαγόνια χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου. Τα περισσότερα από τα πρωτότυπα οχήματα μέχρι σήμερα έχουν χρησιμοποιήσει κυψέλες καυσίμου τύπου PEM σε συνδυασμό με μπαταρίες ή υπερ – πυκνωτές σχηματίζοντας υβριδικά plug-n-play συστήματα που μπορούν να αντικαταστήσουν το υπάρχον συμβατικό σύστημα μπαταρίας στα ηλεκτρικά περονοφόρα και ανυψωτικά μηχανήματα. Ωστόσο η βιομηχανία ερευνά και τις δυνατότητες της τεχνολογίας DMFC για τον τομέα αυτό.



Εικόνα 5.5-32: Παραδείγματα οχημάτων χειρισμού υλικών κυψελών καυσίμου.

Ο κλάδος της έρευνας και ανάπτυξης του υδρογόνου και των κυψελών καυσίμου για τα οχήματα χειρισμού υλικών περιλαμβάνει εταιρίες και οργανισμούς από όλο το φάσμα τις τεχνολογίας. Εταιρίες κατασκευής κυψελών καυσίμου όπως η Ballard, η Hydrogenics και η Nuvera αναζητούν τρόπους ώστε να προσαρμόσουν τα συστήματα τους σε αυτήν την κατηγορία οχημάτων. Εταιρίες κατασκευής και ενσωμάτωσης ολοκληρωμένων συστημάτων όπως η Plug Power, η Jülich Forschungzentrum και η H2 Logic αναπτύσσουν υβριδικές plug-n-play μονάδες κυψελών καυσίμου με μπαταρίες που μπορούν να τοποθετηθούν σε ανυψωτικά μηχανήματα, παλετοφόρα και άλλα παρόμοια οχήματα. Οι κατασκευαστές οχημάτων χειρισμού υλικών όπως η Raymond,η Crown, η Stiil και άλλες εργάζονται παράλληλα με την ενσωμάτωση ολοκληρωμένων συστημάτων κυψελών καυσίμου σε περονοφόρα οχήματα και προωθούν την τεχνολογία αυτή. Τέλος οι χρήστες των οχημάτων δοκιμάζουν και αξιολογούν τα οχήματα σε πραγματική λειτουργία στο χώρο εργασίας. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται μια περίληψη από μερικές εταιρίες που δραστηριοποιούνται στον τομέα της έρευνας και ανάπτυξης υδρογόνου και κυψελών καυσίμου οχημάτων χειρισμού υλικών καθώς και μερικές εταιρίες που χρησιμοποιούν τα συγκεκριμένα οχήματα.



Εικόνα 5.5-33: Εταιρίες - κυψελών καυσίμου, ολοκληρωμένων συστημάτων, οχημάτων χειρισμού υλικών και ιδιοκτήτες οχημάτων.

Η Hydrogenics και η Plug Power φαίνεται να έχουν τα πιο προηγμένα plug-n-play συστήματα κυψελών καυσίμου για τα περονοφόρα οχήματα της αγοράς. Η Hydrogenics χρησιμοποιεί δικές της κυψέλες καυσίμου ενώ η Plug Power αγοράζει κυψέλες καυσίμου από την Ballard. Το σύστημα της Hydrogenics ονομάζεται HyPX και μπορεί να αποθηκεύσει 1,6 kg υδρογόνου στα 350 bar, ενώ το σύστημα της Plug Power, που ονομάζεται GenDrive, αποθηκεύει το υδρογόνο στα 700 bar. Τοσο η Hydrogenics όσο και η Plug Power έχουν συμμετάσχει σε πολυάριθμες δοκιμές στόλων περονοφόρων οχημάτων σε όλη τη Βόρεια Αμερική από το 2005.



Εικόνα 5.5-34: Συστήματα GenDrive για όλους τους τύπους περονοφόρων οχημάτων.

Στην Ευρώπη η Proton Motor, η Jülich Forschungszentrum και η H2 Logic συμμετέχουν σε προγράμματα έρευνας και ανάπτυξης για την προετοιμασία προς την εμπορευματοποίηση των κυψελών καυσίμου που τροφοδοτούν οχήματα χειρισμού υλικών. Τα συστήματα της Proton και της H2 Logic λειτουργούν με υδρογόνο ενώ η Jülich αναπτύσσει συστήματα DMFC για χρήση μεθανόλης. Η εταιρία Nuvera έχει υιοθετήσει μια ελαφρός διαφορετική προσέγγιση από τις άλλες εταιρίες ολοκληρωμένων συστημάτων προτιμώντας να συνεργάζεται με κατασκευαστές μπαταριών που θα χρησιμοποιούν τις κυψέλες καυσίμου της σε υβριδικές μονάδες ισχύος. Στις ΗΠΑ η Nuvera συνεργάζεται με την East Penn Manufacturing, ενώ στην Ευρώπη με την Hoppecke Batterien.

Πίνακας 5.5-3: Εμπορικός διαθέσιμα συστήματα κυψελών καυσίμου οχημάτων χειρισμού υλικών.

Manufacturer	Product Name	Type	Output
H2Logic, Denmark	H2Drive	PEM	~10 kW
Hydrogenics, Canada	HyPX Power Packs	PEM / hybrid	N/a
Nuvera Fuel Cells, U.S.	Orion	PEM	10-30 kW
Oorja Protonics, U.S.	OorjaPac Model III	DMFC	20 kWh/day
Plug Power, U.S.	GenDrive Series 1000	PEM	8–10 kW
	GenDrive Series 2000	PEM	8–10 kW
	GenDrive Series 3000	PEM	1.8–3.2 kW

Οι Nuvera, Hydrogenics και H2 Logic αναπτύσσουν επίσης και συστήματα επί τόπου παραγωγής υδρογόνου για τον ανεφοδιασμό των περονοφόρων οχημάτων δίνοντας μια λύση στο θέμα της υποδομής υδρογόνου. Το σύστημα της Nuvera, γνωστό ως PowerTap, παράγει υδρογόνο από φυσικό αέριο. Τα συστήματα Hydrogenics και H2 Logic παράγουν υδρογόνο με ηλεκτρόλυση.

Η έρευνα και ανάπτυξη του υδρογόνου και των κυψελών καυσίμου για τα περονοφόρα οχήματα άρχισε στα τέλη της δεκαετίας του 1990, με την παρουσίαση του πρώτου πρωτότυπου περονοφόρου οχήματος κυψελών καυσίμου από την εταιρία Linde το 1997. Έκτοτε ο αριθμός των εταιρειών που επενδύουν σε αυτό τον τομέα εφαρμογής έχει αυξηθεί. Η Toyota παρουσίασε το 2005 στην έκθεση CeMAT ένα



Εικόνα 5.5-35: Σταθμός ανεφοδιασμού της Nuvera.

πρωτότυπο υβριδικό περονοφόρο όχημα κυψελών καυσίμου. Το όχημα αυτό ήταν εφοδιασμένο με μια κυψέλη καυσίμου 30 kW και σύστημα αποθήκευσης αέριου υδρογόνου στα 350 bar. Το πρωτότυπο αυτό όχημα παρουσιάστηκε τα τελευταία χρόνια σε πολλές εμπορικές εκθέσεις σε όλο τον κόσμο. Το 2013 η Toyota αποκάλυψε μια βελτιωμένη έκδοση του οχήματος που αναπτύχθηκε σε συνεργασία με την Toyoda Gosei Co. στα πλαίσια του προγράμματος ``Kitakyushu Smart Community Creation Project΄΄ του ιαπωνικού υπουργείου Japanese Ministry of Economy Trade and Industry (METI).



Εικόνα 5.5-36: Περονοφόρο κυψελών καυσίμου της Toyota στην έκθεση 2014 Kobe Eco & Safety.

Η εστίαση στην ανάπτυξη για αυτόν τον τομέα εφαρμογής των κυψελών καυσίμου οφείλεται στις δοκιμές στόλων περονοφόρων κυψελών καυσίμου σε αποθήκες και κέντρα διανομής. Τα δεδομένα από τις δοκιμές χρησιμοποιούνται από τους κατασκευαστές των περονοφόρων και των ολοκληρωμένων συστημάτων για την βελτίωση των προϊόντων τους. Οι δοκιμές βοηθούν επίσης να αυξηθεί η ζήτηση των περονοφόρων κυψελών καυσίμου με αρκετούς χρήστες να κάνουν παραγγελίες για να υποστηρίξουν περαιτέρω δοκιμές.



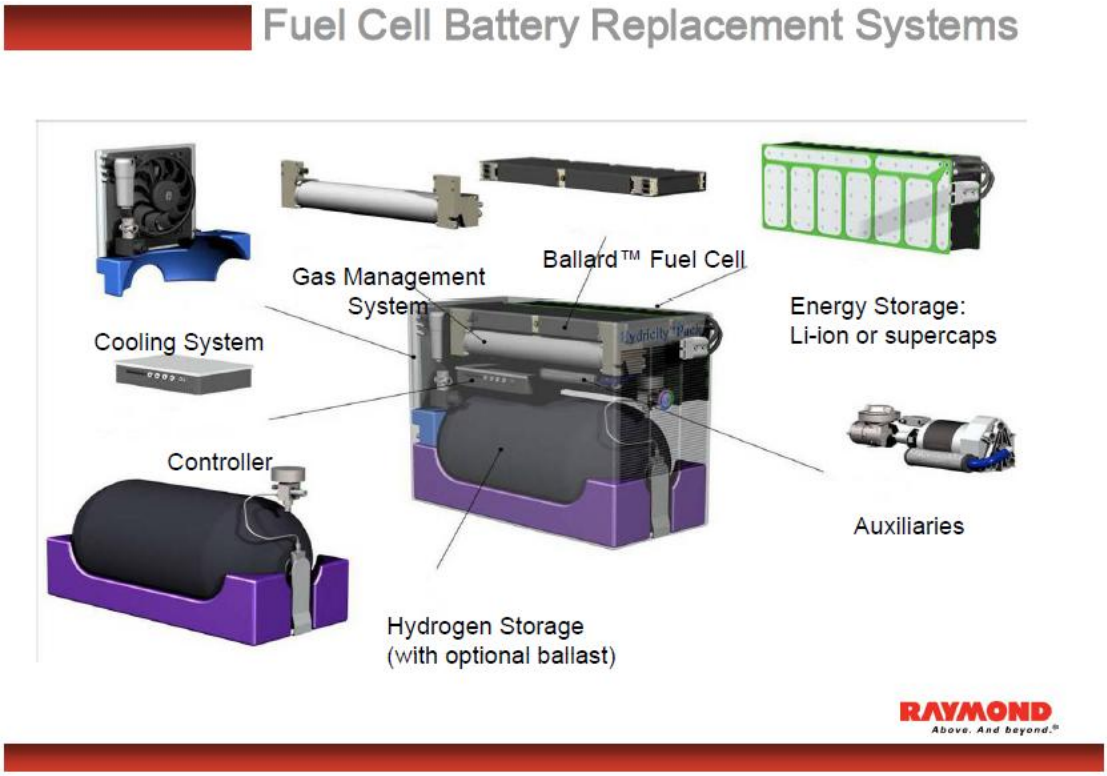
Εικόνα 5.5-37: Εγκατεστημένο σύστημα GenDrive στο εργοστάσιο της Raymond.

Ένα αξιοσημείωτο έργο έρευνας και ανάπτυξης έγινε από την Raymond Corporation οπού δημιούργησε ένα εργαστήριο δοκιμών περονοφόρων οχημάτων κυψελών καυσίμου στο εργοστάσιο της στο Greene της Νέας Υόρκης στις ΗΠΑ. Το έργο ξεκίνησε το 2007 μετά την λήψη χρηματοδότησης από το New York State Energy Research & Development Authority (NYSERDA). Στη Raymond δοκιμάζουν αρκετά ανυψωτικά μηχανήματα κυψελών καυσίμου και παλετοφόρα σε ένα πραγματικό περιβάλλον λειτουργίας. Τα προϊόντα κυψελών καυσίμου έχουν παρασχεθεί από τις εταιρίες Ballard, Hydrogenics, Nuvera και Plug Power. Αρχικά συμπεράσματα από αυτές τις δοκιμές δημοσιεύθηκαν τον Δεκέμβριο του 2007 από τα οποία προέκυπταν τα εξής:

- Τα περονοφόρα ανυψωτικά μηχανήματα κυψελών καυσίμου είχαν συγκρίσιμες επιδόσεις με τα περονοφόρα μπαταριών παρουσιάζοντας ίση απόσταση πέδησης, εύρος λειτουργίας και ταχύτητες ανύψωσης.

- Είχαν αισθητά μειωμένο χρόνο ανεφοδιασμού. Χρειάστηκαν μερικά λεπτά για να ανεφοδιαστούν τα συστήματα κυψελών καυσίμου με υδρογόνο σε σύγκριση με τον χρόνο των 20 λεπτών που χρειαζόταν ένα περονοφόρο όχημα μπαταρίας για επαναφόρτιση.

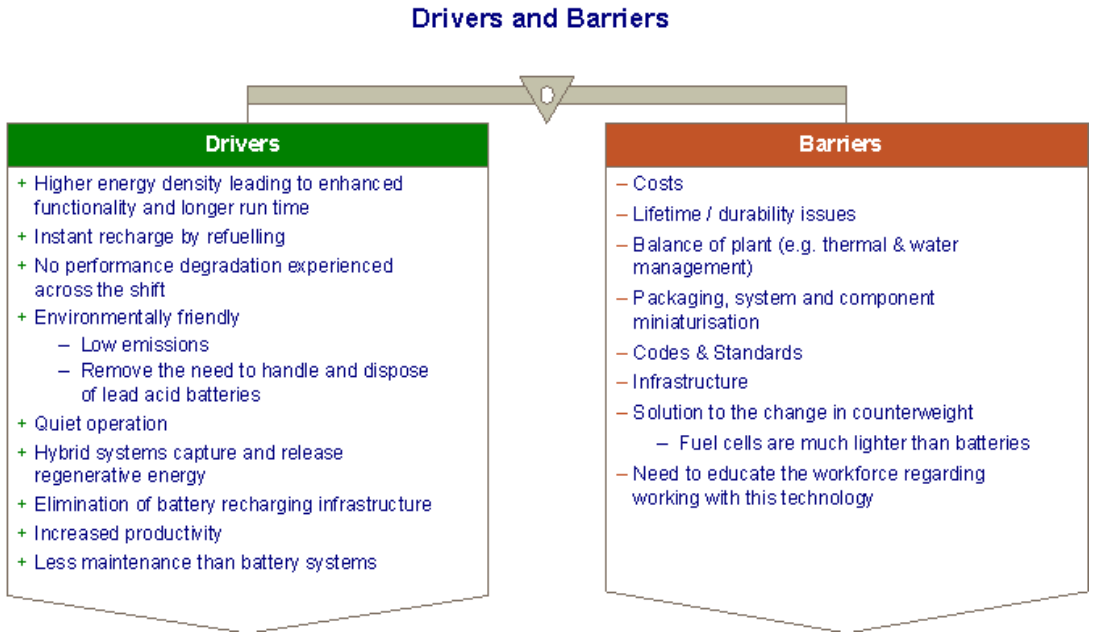
- Απαιτήθηκε προσθήκη πρόσθετου βάρους ώστε το κέντρο ισορροπίας του περονοφόρου κυψελών καυσίμου να είναι ίδιο με το κέντρο ισορροπίας του περονοφόρου μπαταρίας (το πρόβλημα αυτό λύθηκε με τον κατάλληλο σχεδιασμό της μονάδας κυψέλης καυσίμου και πλέον τα συστήματα κυψέλης καυσίμου μπορούν να αντικαταστήσουν απευθείας το σύστημα μπαταρίας).



Εικόνα 5.5-38: Τυπική διάταξη συστήματος κυψελών καυσίμου για περονοφόρο όχημα.

Η χρήση των κυψελών καυσίμου στα οχήματα χειρισμού υλικών προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα. Οι κυψέλες καυσίμου συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των συστημάτων μπαταριών (χαμηλές εκπομπές ρύπων, αθόρυβη λειτουργία) με εκείνα των ICE συστημάτων (γρήγορος ανεφοδιασμός, περισσότερος χρόνος λειτουργίας). Για παράδειγμα, παίρνει λίγα λεπτά για να ανεφοδιαστούν με καύσιμο υδρογόνο ή μεθανόλη σε σύγκριση με τα 20-45 λεπτά που χρειάζεται για να φορτίσει η μπαταρία ενός ηλεκτρικού περονοφόρου. Επίσης, η απόδοση του περονοφόρο κυψελών καυσίμου δεν θα υποβαθμιστεί καθ' όλη τη διάρκεια μιας βάρδιας λειτουργίας, σε αντίθεση με μια μπαταρία που καθώς πλησιάζει στο χρόνο επαναφόρτισης λειτουργεί με μειωμένη απόδοση. Τα πλεονεκτήματα αυτά συμβάλλουν στο να αναπτυχθεί ένα πραγματικό επιχειρηματικό ενδιαφέρον των επιχειρήσεων για την εφαρμογή της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου στα περονοφόρα και παλετοφόρα οχήματα

μπαταρίας. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά από τα πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα της εφαρμογής αυτής της τεχνολογίας.



Πλεονεκτήματα

- Υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα που οδηγεί σε αύξηση της λειτουργικότητας και μεγαλύτερη διάρκεια λειτουργίας.
- Άμεση επαναφόρτιση με τον ανεφοδιασμό.
- Μηδενική υποβάθμιση της απόδοσης σε όλη την διάρκεια λειτουργίας.
- Χαμηλές εκπομπές ρύπων.
- Καταργούν την ανάγκη για την διαχείριση των μπαταριών (ανακύκλωση ή απόθεση).
- Αθόρυβη λειτουργία.
- Προώθηση των υβριδικών συστημάτων αναγεννητικής ενέργειας.
- Εξάλειψη της υποδομής επαναφόρτισης μπαταριών.
- Αύξηση της παραγωγικότητας.
- Λιγότερη συντήρηση.

Μειονεκτήματα

- Υψηλό κόστος.

- Θέματα ζωής / ανθεκτικότητας.

- Δεν έχουν αναπτυχθεί πλήρως οι κώδικες και τα πρότυπα πιστοποίησης.

- Έλλειψη υποδομών υδρογόνου.

- Ανάγκη για εκπαίδευση του εργατικού δυναμικού για τον χειρισμό και την εργασία με αυτή την τεχνολογία.

Η εταιρία Linde η οποία είναι ένας μεγάλος προμηθευτής περονοφόρων ανυψωτικών οχημάτων δραστηριοποιείται στην προώθηση των συστημάτων κυψελών καυσίμου καθώς και στην μετατροπή στόλων συμβατικών περονοφόρων οχημάτων αναφέρει τα εξής οφέλη από την χρήση της τεχνολογίας αυτής:

- **Βελτίωση της παραγωγικότητας** : Ενώ τα ανυψωτικά οχήματα μπαταρίας χάνουν περίπου το 14% της ταχύτητάς τους κατά το τελευταίο ήμισυ της ανάγκης για επαναφόρτιση της μπαταρίας, οι μονάδες ισχύος κυψελών καυσίμου διατηρούν σταθερή ισχύ ανά πάσα στιγμή. Αυτό κάνει τα οχήματα να κινούνται με πλήρη ταχύτητα, μέχρι τον ανεφοδιασμό.

- **Δεν χρειάζεται αλλαγή, φόρτιση και διαχείριση των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος** : Τα οχήματα υδρογόνου μπορούν να κινούνται μέσα σε λίγα λεπτά, μειώνοντας σημαντικά το χρόνο διακοπής της λειτουργίας που χρειάζεται για την αλλαγή ή την επαναφόρτιση της μπαταρίας.

- **Ευκολία στη χρήση** : Οι χρήστες των οχημάτων έχουν αναφέρει ότι έχουν την αίσθηση μιας πλήρως φορτισμένης μπαταρίας ανά πάσα στιγμή. Αυτό αυξάνει την ευκολία οδήγησης, το χειρισμό και την παραγωγικότητα, και οι χειριστές μπορούν να ανεφοδιάσουν με καύσιμα τις μονάδες τους σε 60 δευτερόλεπτα.

- **Περισσότερος επαγγελματικός χώρος** : Οι μικροί σταθμοί ανεφοδιασμού αντικαθιστούν τις αίθουσες φόρτισης των μπαταριών, ελευθερώνοντας πολύτιμο αποθηκευτικό χώρο.

- **Μηδενικές εκπομπές** : Η ασφαλής, καθαρή και αποδοτική λειτουργία των κυψελών καυσίμου παράγει μηδενικές εκπομπές ρύπων.

- **Ευκολία μετατροπής** : Οι μονάδες ισχύος κυψελών καυσίμου ταιριάζουν απόλυτα στο χώρο που καταλαμβάνεται από τις μπαταρίες, καθιστώντας την μετατροπή μια απλή και οικονομικώς αποδοτική λύση για τους πελάτες.

Μεγάλη ώθηση στην εφαρμογή των κυψελών καυσίμου για τα περονοφόρα οχήματα δόθηκε το 2009 χάρη στη χρηματοδότηση που χορηγήθηκε από την Αμερικανική κυβέρνηση μέσω του American Recovery and Reinvestment Act η οποία προώθησε την επιδοτούμενη πώληση περονοφόρων οχημάτων εξοπλισμένων με κυψέλες καυσίμου στις αποθήκες μεγάλων Αμερικανικών εταιριών όπως, η BMW Manufacturing, η Coca-Cola, η FedEx, η Wal-Mart και άλλες. Το 2011 άρχισαν να παρουσιάζονται μη επιδοτούμενες παραγγελίες περονοφόρων ανυψωτικών κυψελών καυσίμου και η τάση αυτή συνεχίστηκε από το 2012 και έπειτα.

Το εργοστάσιο παραγωγής της BMW στο Spartanburg της Νότιας Καρολίνας διαθέτει έναν αρκετά μεγάλο στόλο περονοφόρων κυψελών καυσίμου στη Βόρεια Αμερική με πάνω από 275 οχήματα της Crown εφοδιασμένα με συστήματα κυψελών καυσίμου της Plug Power να λειτουργούν στις αίθουσες συναρμολόγησης για τα μοντέλα X3, X5 και X6 της εταιρίας. Το υδρογόνο για τα οχήματα αυτά το προμηθεύει η εταιρία Linde αν και η BMW εξετάζει την επί τόπου παραγωγή υδρογόνου με χρήση μεθανίου από έναν κοντινό χώρο υγειονομικής ταφής. Μεθάνιο από την ίδια περιοχή χρησιμοποιείται ήδη για να καλύπτει περίπου το 50% των ενεργειακών αναγκών της περιοχής και αποτελεί μέρος της φιλοδοξίας της BMW για να καταστεί η πλέον βιώσιμη κατασκευάστρια εταιρία αυτοκινήτων στη Βόρεια Αμερική. Τον μεγαλύτερο στόλο περονοφόρων κυψελών καυσίμου στην Βόρεια Αμερική τον διαθέτει η εταιρία Sysco με πάνω από 700 οχήματα. Στην διπλανή εικόνα παρουσιάζονται οι δέκα μεγαλύτεροι στόλοι εταιριών.



Εικόνα 5.5-39: Top 10 εταιριών με τα περισσότερα περονοφόρα κυψελών καυσίμου.

Την εισαγωγή της έχει κάνει και η Ευρωπαϊκή αγορά MHV αφού μετά την επιτυχία των οχημάτων αυτών στην Βόρεια Αμερική ξεκίνησαν οι προσπάθειες για την συνέχιση της και στην Ευρώπη. Το 2011 δημιουργήθηκε η κοινοπραξία HyPulsion από τις εταιρίες Plug Power και Air Liquide για την ανάπτυξη Ευρωπαϊκών περονοφόρων οχημάτων κυψελών καυσίμου. Η πρώτη της σημαντική παραγγελία έγινε τον Μάιο του 2013 από τον όμιλο IKEA για τον εφοδιασμό 20 περονοφόρων οχημάτων και την εγκατάσταση ενός σταθμό παραγωγής υδρογόνου στις κεντρικές αποθήκες εφοδιασμού του ομίλου οπού βρίσκονται κοντά στη Λυών της Γαλλίας. Τον ίδιο μήνα η Air Liquide αύξησε τις μετοχές της στην HyPulsion (80% Air Liquide, 20% Plug Power) και δημιούργησε μια σύμβαση για υπηρεσίες τεχνικής υποστήριξης. Η Infintium Fuel Cell Systems σε συνεργασία με την ITM Power κατάφεραν τον Ιανουάριο του 2013 να πάρουν ευρωπαϊκή πιστοποίηση (CE) για τα προϊόντα της Infintium με σκοπό την έναρξη των πωλήσεων στην ευρωπαϊκή αγορά.



Εικόνα 5.5-40: Σταθμός ανεφοδιασμού της Air Liquide σε αποθήκες του ΙΚΕΑ.

Έργα επίδειξης όπως το HyLIFT αναδεικνύουν την τεχνολογία των MHV στην Ευρώπη αλλά χωρίς ένα ισχυρό χρηματοδοτικό πρόγραμμα ώστε να γίνουν εκτεταμένες δοκιμές μεγάλης κλίμακας αναμένεται η ανάπτυξη στην αγορά αυτή να έχει αργούς ρυθμούς. Υπάρχει βέβαια και η μεμονωμένη κυβερνητική υποστήριξη όπως για παράδειγμα η χρηματοδότηση από το Ομοσπονδιακό Υπουργείο Μεταφορών Καινοτομίας και Τεχνολογίας της Αυστρίας η οποία οδήγησε στην παράδοση δέκα Linde/Fronius παλετοφόρων οχήματων κυψελών καυσίμου στην εταιρία διεθνών υπηρεσιών logistics DB Schenker.



Εικόνα 5.5-41: Λογότυπο του έργου HyLIFT.

Μια άλλη εφαρμογή όπου τα MHV κυψελών καυσίμου μπορούν να επιφέρουν ένα συγκεκριμένο όφελος είναι η χρήση τους στα αεροδρόμια. Τα αεροδρόμια εκλύουν ένα μεγάλο ποσοστό εκπομπών το οποίο οφείλεται στα πολλά αεροσκάφη που απογειώνονται και τροχοδρομούν. Προς το παρών δεν υπάρχει εύκολη λύση για να μειωθούν ουσιαστικά οι εκπομπές αυτές, βραχυπρόθεσμα όμως υπάρχει και μια άλλη σημαντική πηγή εκπομπών στα αεροδρόμια προερχόμενη από τα οχήματα εξυπηρέτησης εδάφους όπως, τα οχήματα ρυμούλκησης, μεταφοράς αποσκευών και άλλα οχήματα για την εξυπηρέτηση των αεροσκαφών πριν και μετά την πτήση. Για παράδειγμα στο Διεθνές Αεροδρόμιο Χίθροου στο Λονδίνο το 37% των συνολικών εκπομπών NO_X προέρχονται από τα οχήματα εξυπηρέτησης. Τα συστήματα μπαταριών για τα οχήματα αυτά έχουν γίνει η πιο δημοφιλής εφαρμογή ωστόσο οι ίδιοι περιορισμοί που παρουσιάστηκαν στα περονοφόρα μπαταρίας όπως ο χρόνος φόρτισης το βάρος των μπαταριών κ.α. δίνουν και εδώ το κίνητρο για χρήση των κυψελών καυσίμου. Το Σεπτέμβριο του 2012 η Vision Industries Corp. και η Balqon Corporation σύναψαν συμφωνία για μια από κοινού κατασκευή ενός υβριδικού οχήματος έλκυσης με την ονομασία Zero Emission Terminal Tractor (ZERO-TT) για την χρήση του σε κέντρα διανομής, σιδηροδρομικές εγκαταστάσεις και εμπορικά λιμάνια.


Εικόνα 5.5-42: Το όχημα ZERO-TT.


Εικόνα 5.5-43: Τα οχήματα της STILL με φόντο το σταθμό ανεφοδιασμού της Linde.

Το Νοέμβριο του 2012 η Plug Power έλαβε χρηματικό βραβείο από το αμερικάνικο υπουργείο ενέργειας DOE για την μετατροπή 15 ηλεκτρικών ελκυστήρων ρυμούλκησης με συστήματα κυψελών καυσίμου GenDrive για την χρήση τους σε δύο από τα αεροδρόμια εσωτερικού της FedEx στο Τεννεσί και την Καλιφόρνια. Στο αεροδρόμιο του Αμβούργου

στα πλαίσια του έργου "Hamburg Airport mit Wasserstoff (H2) unterwegs" που ξεκίνησε στα τέλη του 2006 λειτουργούν δυο οχήματα ρυμούλκησης που χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μεταφορά αποσκευών από και προς το αεροσκάφος, κατασκευασμένα από την STILL. Το υδρογόνο για τα οχήματα αυτά παρέχει η Linde Gas μέσω ενός σταθμού ανεφοδιασμού που λειτουργεί με φιάλες.



Εικόνα 5.5-44: Γκάμα οχημάτων κυψελών καυσίμου της STILL.

Αεροπλάνα

Εταιρίες όπως η Boeing και η Lange Aviation ασχολούνται με την ανάπτυξη επανδρωμένων και μη αεροσκαφών με την χρήση κυψελών καυσίμου για παραγωγή κινητήριας ισχύος. Το Φεβρουάριο και τον Μάρτιο του 2008 η εταιρία Boeing Research & Technology Europe (BR&TE) διεξήγαγε πειραματικές δοκιμές πτήσεων σε ένα επανδρωμένο αεροπλάνο το οποίο τροφοδοτούταν από μια κυψέλη καυσίμου σε συνδυασμό με ελαφριές μπαταρίες.

Το αεροπλάνο ήταν ένα διθέσιο Dimona κατασκευασμένο από την Diamond Aircraft Industries of Austria με άνοιγμα φτερών 16,3 μέτρα τροποποιημένο από την ομάδα μηχανικών της Boeing Research & Technology Europe (BR&TE) στη Μαδρίτη με τη βοήθεια των βιομηχανικών της εταίρων από την Αυστρία, τη Γαλλία, τη Γερμανία, την Ισπανία, το Ηνωμένο Βασίλειο και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Το σύστημα του περιελάμβανε μια κυψέλη καυσίμου τύπου PEM σε συνδυασμό με μπαταρίες ιόντων λιθίου για την τροφοδοσία ενός ηλεκτρικού κινητήρα συνδεδεμένο με μια συμβατική έλικα. Η επανδρωμένη πτήση έφθασε σε ένα ύψος 3.300 ποδιών, χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό της ισχύος της μπαταρίας και της ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου και



Εικόνα 5.5-45: Αεροπλάνο κυψελών καυσίμου της Boeing.

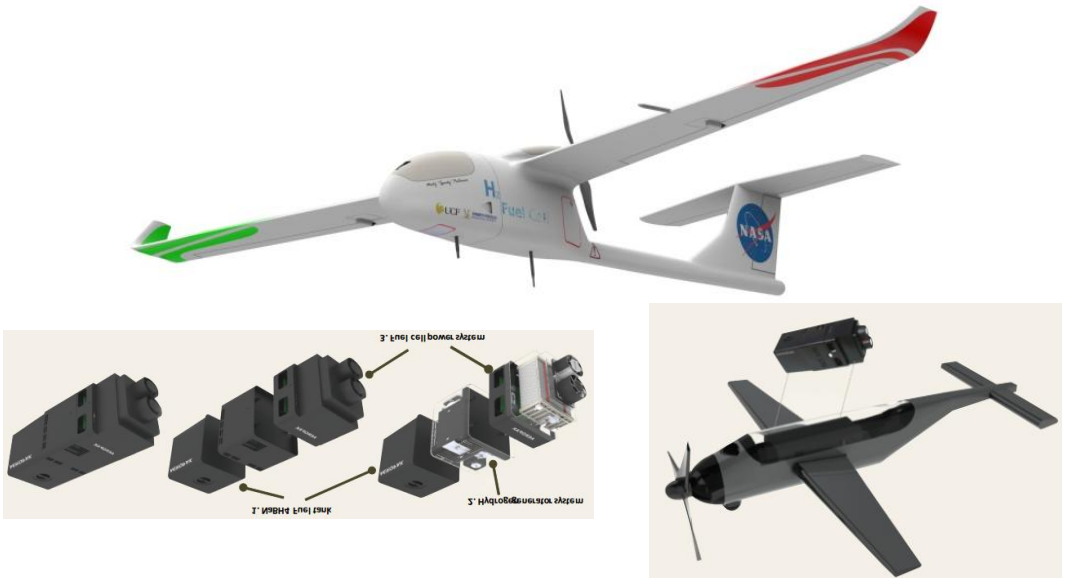
στη συνέχεια πέταξε για επιπλέον 20 λεπτά μονό με την ενέργεια από την κυψέλη καυσίμου με ταχύτητα 60 μιλιών την ώρα. Η κυψέλη καυσίμου PEM για την επίδειξη του αεροσκάφους ήταν από την βρετανική εταιρεία Intelligent Energy.



Εικόνα 5.5-46: Τα επιμέρους εξαρτήματα του συστήματος του αεροπλάνου και η θέση τους.

Η Boeing υποστηρίζει ότι οι κυψέλες καυσίμου είναι απίθανο να είναι σε θέση να παρέχουν ισχύ σε ένα μεγαλύτερο εμπορικό επίπεδο, αλλά σίγουρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μικρότερα αεροπλάνα, μη επανδρωμένα αεροσκάφη και ως βοηθητικές μονάδες ισχύος για τα δευτερεύοντα συστήματα των μεγάλων αεροπλάνων καλύπτοντας όλες τις ηλεκτρικές τους ανάγκες. Η Boeing εξετάζει επίσης κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων για βοηθητικές μονάδες ισχύος.

Για μη επανδρωμένα μικρά αεροπλάνα υπάρχουν συστήματα όπως για παράδειγμα τα συστήματα AEROPAK και AEROSTAK της εταιρίας Horizon Energy Systems. Η NASA χρησιμοποίησε τα συστήματα της Horizon για να κατασκευάσει το 2012 σε συνεργασία με το Rocket University ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος. Το αεροσκάφος αυτό ήταν εξοπλισμένο με μία μικρή φωτογραφική μηχανή η οποία θα χρησιμοποιούταν για να συλλάβει ακριβείς εικόνες και στατιστικά στοιχεία σχετικά με τα άγρια ζώα του Εθνικού Καταφύγιου Άγριας Ζωής Merritt Island στις ΗΠΑ.

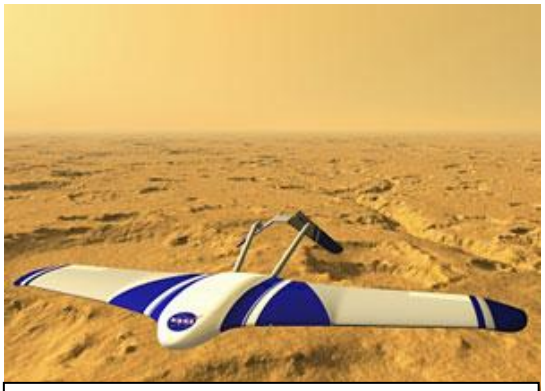

Εικόνα 5.5-47: Μη επανδρωμένο αεροπλάνο της NASA με σύστημα κυψελών καυσίμου της Horizon και το σύστημα AEROPAK σε κομμάτια με μια ενδεικτική θέση τοποθέτησης.

Διαστημόπλοια

Η χρήση των κυψελών καυσίμου στα διαστημικά οχήματα ήταν η πρώτη εμπορική εφαρμογή τους όταν η NASA χρησιμοποίησε τα συστήματα αυτά στις αποστολές Gemini και Apollo για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και πόσιμου νερού στις διαστημικές ατράκτους. Για τον ίδιο λόγο αλλά σε ένα πιο ανεπτυγμένο τεχνολογικό επίπεδο συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα οι κυψέλες καυσίμου στις διαστημικές αποστολές. Ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός (International Space Station, ISS) χρησιμοποιεί σε μόνιμη βάση και ερευνά κυψέλες καυσίμου για την κάλυψη ηλεκτρικών αναγκών του.



Εικόνα 5.5-48: Ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός (ISS).

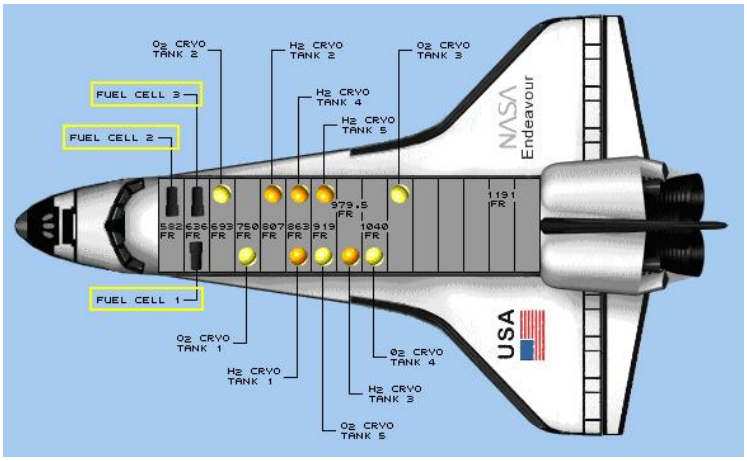


Εικόνα 5.5-49: Μη επανδρωμένο διαστημικό όχημα σχεδιασμένο για πτήσεις στον ΑΡΗ.

Η τεχνολογία που κυριαρχεί στις διαστημικές εφαρμογές είναι κυρίως οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου, η NASA όμως τελευταία έχει στρέψει το ερευνητικό της ενδιαφέρον και σε άλλες τεχνολογίες και κυρίως στις αναγεννητικές κυψέλες καυσίμου. Το ερευνητικό κέντρο Glenn της NASA ερευνά και αναπτύσσει κυψέλες καυσίμου για διαστημικές εφαρμογές. Το Glenn συνέβαλε στην ανάπτυξη αλκαλικών κυψελών καυσίμου που αποτελούν την κύρια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας για τα διαστημικά λεωφορεία και ανέπτυξε κυψέλες καυσίμου για τα ηλεκτρικά διαστημικά οχήματα και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Οι ερευνητές του Glenn συνεχίζουν να αναζητούν τρόπους για να βελτιώσουν τις κυψέλες καυσίμου. Το Glenn αναπτύσσει και ερευνά κυψέλες καυσίμου για αεροσκάφη μηδενικών εκπομπών, για τον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό, για επαναχρησιμοποιούμενα οχήματα εκτόξευσης, για το διαστημικό αεροπλάνο Mars Flyer, για την αναβάθμιση του διαστημικού λεωφορείου, καθώς και για συστήματα για την παραγωγή και την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας στη Σελήνη και τον Άρη.

Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου είναι η πρωταρχική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας στα συστήματα για τις επανδρωμένες διαστημικές πτήσεις για πάνω από τέσσερις δεκαετίες. Ωστόσο είναι μια αρκετά δαπανηρή τεχνολογία λόγω της αυξανόμενης γήρανσης και πρέπει να γίνει αρκετή δουλειά ακόμα πριν οι

βελτιωμένες κυψέλες καυσίμου που αναπτύσσει το Glenn μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν στα διαστημικά οχήματα τα οποία λειτουργούν σε μεγάλα υψόμετρα και ακραίες θερμοκρασίες.



Εικόνα 5.5-50:Ο ι θέσεις τοποθέτησης κυψελών καυσίμου σε Διαστημικό λεωφορείο της NASA.

Το Glenn ερευνά τρεις τύπους κυψελών καυσίμου: κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFCs), αναγεννητικές κυψέλες καυσίμου (RFC) και κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC). Η NASA ανέπτυξε για πρώτη φόρα PEMFCs για την αποστολή Gemini, επειδή όμως οι PEMFCs είχαν πρόβλημα με την διαχείριση του νερού για την διατήρηση της σωστή υγρασίας της μεμβράνης, οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούνται από την δεκαετία του 1990. Οι βελτιωμένες PEMFCs υπόσχονται να είναι πιο ισχυρές, πιο ελαφριές, πιο ασφαλείς, με πιο απλή λειτουργία και πιο αξιόπιστες. Θα έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, καλύτερες επιδόσεις και μπορεί να κοστίζουν και πολύ λιγότερο από την τρέχουσα τεχνολογία των αλκαλικών κυψελών καυσίμου. Οι PEMFCs της NASA θα μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια για διαστημικές στολές, αεροπλάνα, μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα, και επαναχρησιμοποιήσιμα οχήματα εκτόξευσης. Οι ερευνητές του Glenn έχουν αναπτύξει νέου τύπου RFCs για την αποθήκευση ενέργειας στον διεθνή διαστημικό σταθμό. Οι SOFCs εξετάζονται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και της χρήσης στο διάστημα, λόγω της υψηλής τους απόδοσης, της υψηλής πυκνότητας ισχύος, και της εξαιρετικά χαμηλής ρύπανσης. Έχουν στιβαρή κατασκευή και μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές θερμοκρασίες και με άλλα πιο εύκολα στην μεταφορά καύσιμα αντί του καθαρού υδρογόνου.

Σκάφη και Υποβρύχια

Σύμφωνα με μια έκθεση από την Det Norske Veritas (DNV) ο τομέας της ναυτιλίας αντιπροσωπεύει το 2% των παγκόσμιων εκπομπών CO_2, το 4-6% των εκπομπών SOx και το 10-15% των εκπομπών NOx. Η τεχνολογία του υδρογόνου και των κυψελών καυσίμου μπορεί να συμβάλει στην μείωση των τοπικών και περιφερειακών εκπομπών που προκαλούνται από τα θαλάσσια σκάφη.

Οι τύποι κυψελών καυσίμου PEMFC, SOFC και MCFC είναι αυτοί που εξετάζονται κυρίως για ναυτικές εφαρμογές. Τα περισσότερα από τα πρωτότυπα συστήματα που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι υβρίδια, με τη χρήση της κυψέλης καυσίμου σε συνδυασμό με μπαταρίες ή υπέρ-πυκνωτές. Οι εφαρμογές αφορούν το σύνολο του θαλάσσιου τμήματος και περιλαμβάνουν μονάδες APUs για πολυτελή γιοτ και εμπορικά πλοία, κινητήριες μονάδες για επιβατηγά οχηματαγωγά πλοία και

τουριστικά σκάφη και κινητήριες μονάδες για μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα και υποβρύχια.

Η εταιρία Wärtsilä είναι ένας από τους κύριους βιομηχανικούς παράγοντες στον κλάδο της ναυτιλίας που επενδύουν στην τεχνολογία των κυψελών καυσίμου. Συμμετέχει σε μια σειρά Ευρωπαϊκών προγραμμάτων όπως το METHAPU και το FellowSHIP τα οποία θέτουν σε επίδειξη μονάδες APUs για εμπορικά πλοία, βασισμένες σε SOFC και MCFC τεχνολογίες. Η Wärtsilä διαθέτει ένα πρωτότυπο σύστημα SOFC 20 kW για σταθερές βιομηχανικές εφαρμογές. Αυτό το σύστημα αναπτύχθηκε από την Topsøe Fuel Cell A/S και είναι πιθανό ότι η Wärtsilä θα προσαρμόσει αυτή την μονάδα για θαλάσσιες εφαρμογές. Η Voller και η Proton Motor είναι δύο ακόμα εταιρίες που δραστηριοποιούνται στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου τους για ναυτικές εφαρμογές. Το 2007 η Voller τοποθέτησε το σύστημα Emerald PEM APU στο Beneteau Oceanis yacht που ταξίδεψε στον Ατλαντικό ωκεανό στα πλαίσια δοκιμών του συστήματος. Η Proton Motor προμηθεύει κυψέλες καυσίμου για το ευρωπαϊκό πρόγραμμα Zemships.

Στην Ευρώπη υπάρχουν μια σειρά από κοινοπραξίες του κλάδου ανάπτυξης κυψελών καυσίμου πλοίων κυρίως για την τουριστική βιομηχανία. Στην Ισλανδία η Icelandic New Energy στα πλαίσια του προγράμματος Smart H2 το 2 τοποθέτησε ένα APU σύστημα κυψελών καυσίμου σε ένα τουριστικό πλοίο με την ονομασία Elding το οποίο χρησιμοποιείται για να πηγαίνει τους τουρίστες να παρακολουθούν φάλαινες σε κοντινή απόσταση. Η βασική ιδέα ήταν, το σύστημα κυψελών καυσίμου εκτός από την τροφοδοσία των οργάνων και του φωτισμού του πλοίου να κινεί και το ίδιο το πλοίο με έναν ηλεκτρικό κινητήρα για αθόρυβη λειτουργία ώστε να πλησιάζει πιο κοντά στις φάλαινες.



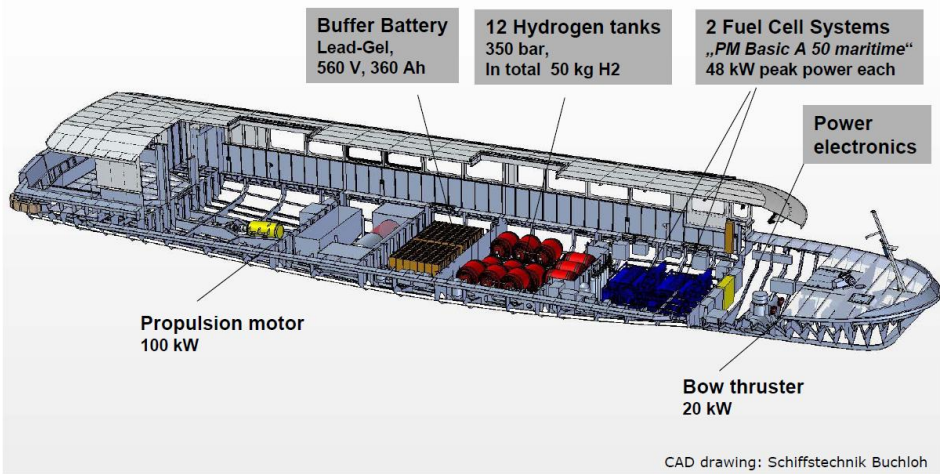
Εικόνα 5.5-51: Το πλοίο Elding.

Στο Αμβούργο στα πλαίσια του προγράμματος Zemships το 2008 τέθηκε σε λειτουργία το τουριστικό πλοίο Alsterwasser στη λίμνη Alster. Το πρωτότυπο πλοίο Alsterwasser έχει μήκος περίπου 25 και μπορεί να χωρέσει έως 100 επιβάτες. Χρησιμοποιεί 2 συστήματα κυψελών καυσίμου της Proton Motor με ισχύ 48 kW το κάθε ένα και διαθέτει δεξαμενές υδρογόνου πίεσης 350 bar που του παρέχουν αυτονομία για περίπου τρείς ημέρες λειτουργίας.


Εικόνα 5.5-52: κυψέλη καυσίμου PM Basic A 50 maritime



Εικόνα 5.5-53: Το τουριστικό πλοίο Alsterwasser.

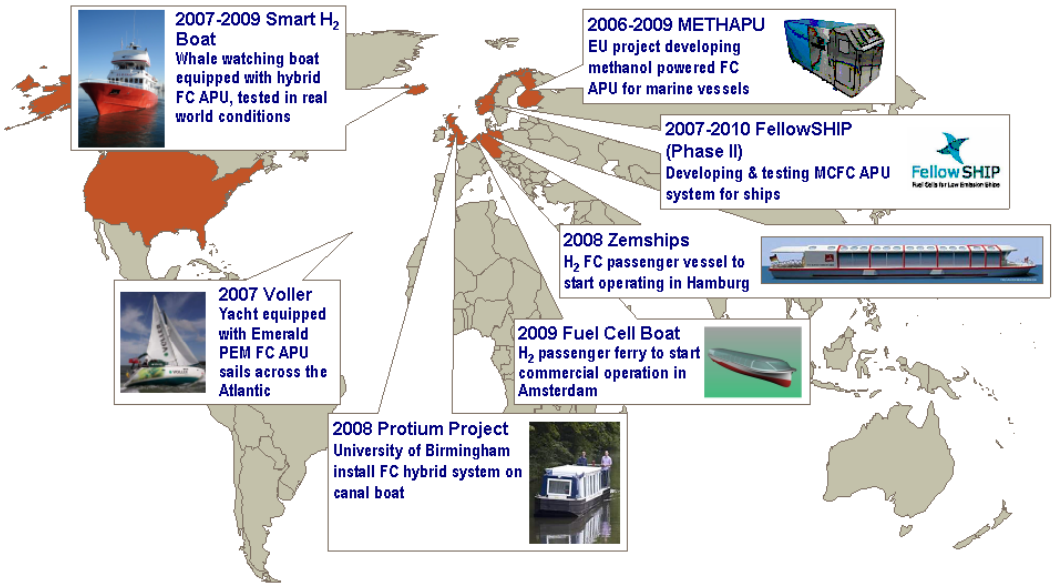


Εικόνα 5.5-54: Οι θέσεις τοποθέτησης των επιμέρους συστημάτων του Alsterwasser.

Ο στόχος του προγράμματος Zero emissions ships (Zemships) ήταν να αναπτύξει και να υλοποιήσει το πρώτο υδρογονοκίνητο επιβατηγό πλοίο χωρητικότητας πάνω από 100 άτομα με ηλεκτρικό κινητήρα ο οποίος θα τροφοδοτείται από κυψέλες καυσίμου παρέχοντας τα προνόμοια των μηδενικών τοπικών εκπομπών ρύπων, τα χαμηλα επίπεδα θορύβου και την υψηλή ενεργειακή απόδοση χωρίς τον κυνδινο ρύπανσης των υδάτων. Στο Άμστερνταμ στα πλαίσια του προγράμματος Fuel Cell Boat το 2009 κατασκευάστηκε ένα παρόμοιο πλοίο με το Alsterwasser, το Nemo H_2. Το σκάφος αυτό μπορεί να αποθηκεύσει 24kg αέριο υδρογόνο σε κάθε μία από τις 6 δεξαμενές του υπό υψηλή πίεση και μπορεί να πλεύσει με ένα μέγιστο φορτίο των 88 ατόμων.



Εικόνα 5.5-55: Το πλοίο Nemo H_2.

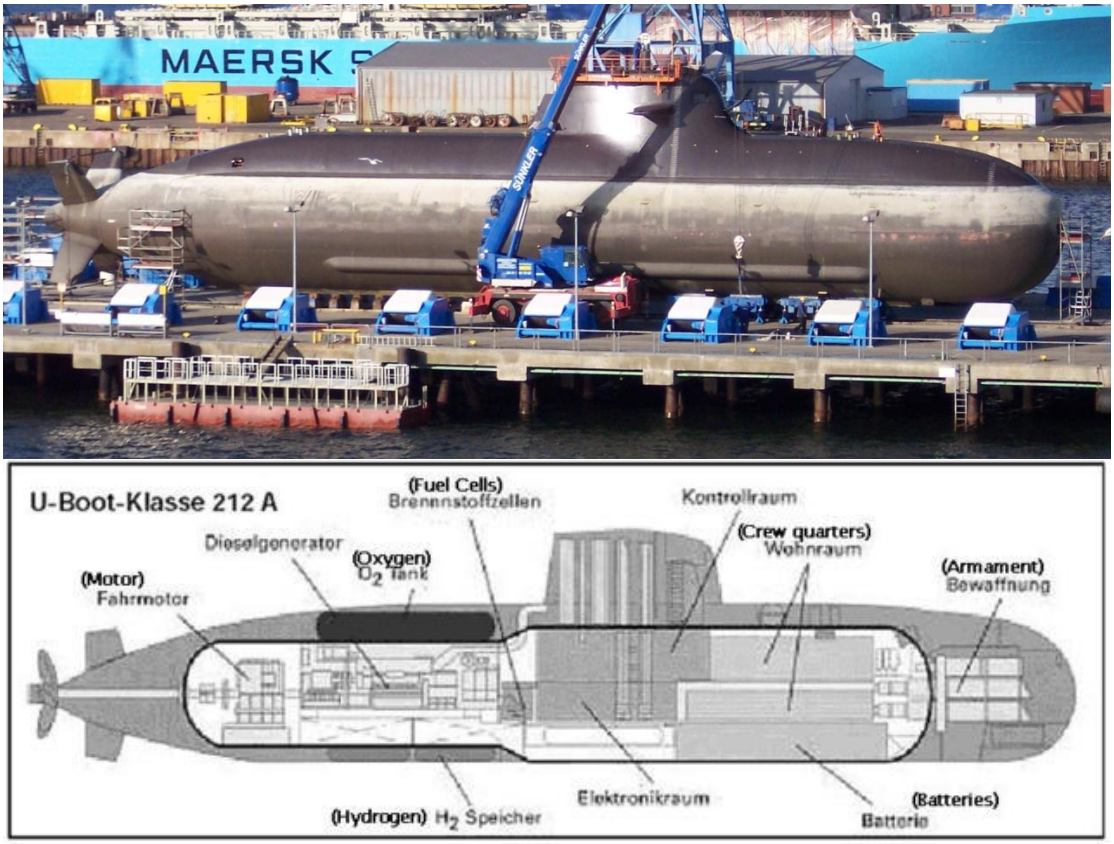


Εικόνα 5.5-56: Χάρτης με τα κυριότερα έργα κυψελών καυσίμου για σκάφη.

Στη Βόρεια Αμερική, η ανάπτυξη της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου για τον τομέα της ναυτιλίας φαίνεται να επικεντρώνεται σε στρατιωτικές εφαρμογές, όπως τα υποβρύχια και τα μη επανδρωμένα υποθαλάσσια οχήματα (UUVs). Η Γερμανία επίσης φαίνεται να δραστηριοποιείται στην ανάπτυξη συστημάτων κυψελών καυσίμου για υποβρύχια. Οι εταιρείες που εμπλέκονται στον τομέα αυτό είναι:

• ITM Power (UK)
• Siemens Industrial Solutions and Services Group (Germany)
• Versa Power Systems, Inc. (USA)

Η πιο αξιοσημείωτη ενσωμάτωση κυψελών καυσίμου σε υποβρύχια μέχρι σήμερα ήταν η ανάπτυξη υποβρυχίων U212-class (Type 212) για λογαριασμό του Γερμανικού Ναυτικού. Τα σκάφη αυτά μπορούν διανύσουν αρκετά μεγάλες αποστάσεις υποβρύχιας πλεύσης (έως και 18 ημέρες) χωρίς την ανάγκη ατμοσφαιρικού αέρα χάρη σε ένα προηγμένο σύστημα πρόωσης με την ονομασία Air-independent propulsion (AIP). Το AIP στα U212 βασίζεται σε ένα σύστημα της Siemens, το BZM SINAVYCIS το οποίο διαθέτει 9 κυψέλες καυσίμου PEM ισχύος 34 kW η κάθε μία και βρίσκεται σε εξέλιξη από το Γερμανικό ναυτικό από το 1985. Υπάρχουν και άλλα AIP συστήματα τα οποία μπορεί να βασίζονται σε: κινητήρες ντίζελ κλειστού κύκλου, ατμοστρόβιλους κλειστού κύκλου και μηχανές κύκλου Stirling.



Εικόνα 5.5-57: Το υποβρύχιο U212A και οι θέσεις των επιμέρους συστημάτων του.

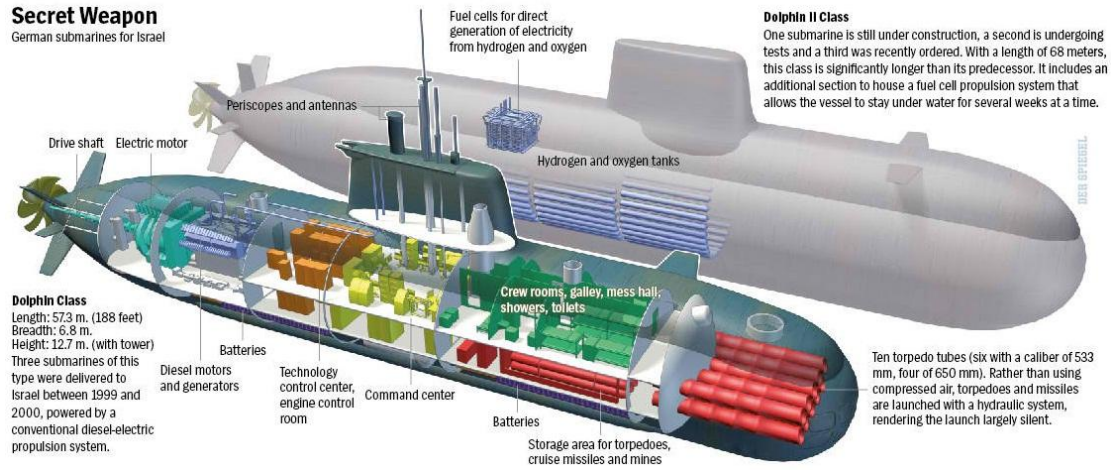
Το σύστημα AIP το χρησιμοποιούν τα μη-πυρηνικά υποβρύχια τα οποία διαθέτουν έναν υβριδικό σχεδιασμό οπού για γρήγορη πλεύση χρησιμοποιούν ένα συμβατικό σύστημα ντιζελογεννήτριας με μπαταριές μολύβδου οξέος όπου κινούν

έναν ηλεκτροκινητήρα και για αργή πλεύση χωρίς την ανάγκη για ατμοσφαιρικό αέρα χρησιμοποιούν το σύστημα AIP οπού οι κυψέλες καυσίμου φορτίζουν τις μπαταρίες του σκάφους. Αυτό προσφέρει μια ήσυχη πλεύση με μειωμένους κραδασμούς θορύβους και θερμοκρασίες έναντι του συμβατικού συστήματος κάτι που είναι αρκετά επιθυμητό από στρατηγικής άποψης λόγο της μείωσης ανιχνευσιμότητας.

Το πρώτο U212 το U31 κατασκευάστηκε από τις εταιρίες Howaldtswerke-Deutsche Werft GmbH (HDW) και Thyssen Nordseewerke GmbH (TNSW), ξεκίνησε τον Μάρτιο του 2002 και ανατέθηκε τον Οκτώβριο του 2005 μαζί με το αδελφικό του σκάφος το U32 όπου ξεκίνησε τον Δεκέμβριο του 2003. Δύο ακόμη υποβρύχια που περιλαμβάνονται σε αυτή την πρώτη έκδοση ανατέθηκαν τον Ιούνιο του 2006 και τον Μάρτιο του 2007. Μια δεύτερη σειρά για δυο ακόμη σκάφη υπεγράφη στα τέλη του 2006 με την παράδοση τους τον Νοέμβριο του 2011 και τον Μάιο του 2013.

Το Γερμανικό ναυτικό ακολούθησαν και άλλες ναυτικές δυνάμεις. Το Ιταλικό ναυτικό ανέθεσε στην εταιρία Fincantieri δυο U212 υποβρύχια τον Ιούνιο του 2005 με την ονομασία Todaro και τον Φεβρουάριο του 2007 με την ονομασία Scire. Άλλα δύο δρομολογήθηκαν από την Ιταλική κυβέρνηση το 2008 για παράδοση το 2015 και 2016. Το Ισραηλινό ναυτικό έχει παραγγείλει συνολικά έξι U212 με το πέμπτο σκάφος έχει παραδοθεί το 2013.

Η Siemens συνέχισε να βελτιώνει το σύστημα SINAVYCIS και ανέπτυξε μια έκδοση με κυψέλες καυσίμου ισχύος 120 kW η κάθε μία αυτή τη φορά για ενσωμάτωση σε μεγαλύτερα υποβρύχια όπως (το Dolphin class εικόνα 5.5-58) οπού χρησιμοποιούν δύο από αυτές τις κυψέλες καυσίμου. Οι παραγγελίες υποβρυχίων U214 μια παραλλαγή του U212 με αυξημένο βάθος κατάδυσης δόθηκαν από την Νότια Κορέα (τρία σκάφη), Ελλάδα (τέσσερα σκάφη), Τουρκία (έξι σκάφη), Πορτογαλία (δύο σκάφη).



Εικόνα 5.5-58: Το υποβρύχιο Dolphin Class.

Το Ρωσικό ναυτικό έχει αναπτύξει επίσης υποβρύχια με AIP σύστημα κυψελών καυσίμου με το έργο 677 Lada class υποβρυχίων σχεδιασμένα από την Rubin Design Bureau. Το πρώτο υποβρύχιο αυτού του τύπου το δρομολογήθηκε τον Οκτώβριο του 2004 και παραδόθηκε τον Απρίλιο του 2010. Ακόμη δύο υποβρύχια βρίσκονται υπό κατασκευή με σχέδια για την κατασκευή οχτώ Lada-class υποβρυχίων. Μια παραλλαγή του έργου 667 το έργο 1650 Amur Class έχει σχεδιαστεί για την εξαγωγή του με στόχο να πουλήσει στις αγορές της Ασίας, όπως η Ινδία και η Κίνα.

5.6 Φορητές συσκευές ισχύος (Φορητά τηλέφωνα, Laptop , κάμερες και φορητές συσκευές ήχου).

Φορητά συστήματα κυψελών καυσίμου ορίζονται εκείνα τα οποία έχουν κατασκευαστεί για να τροφοδοτούν ή να επαναφορτίζουν προϊόντα τα οποία έχουν σχεδιαστεί να μετακινούνται. Αυτά περιλαμβάνουν, στρατιωτικές εφαρμογές (φορητές στρατιωτικές συσκευές – π.χ. ασύρματοι επικοινωνίας, GPS, κλπ – και μικρές γεννήτριες), Βοηθητικές μονάδες ισχύος (APU) (π.χ. για παροχή ισχύος σε οχήματα αναψυχής – τροχόσπιτα –), μικρά ηλεκτρονικά προϊόντα (mp3 players, κινητά τηλέφωνα, κάμερες κλπ), μεγάλα ηλεκτρονικά προϊόντα (φορητοί υπολογιστές, εκτυπωτές, ραδιόφωνα κλπ), εκπαιδευτικά κιτ και παιχνίδια.



Εικόνα 5.6-1: Φορητές εφαρμογές.

Για να τροφοδοτήσουν όλο αυτό το φάσμα προϊόντων οι φορητές κυψέλες καυσίμου κατασκευάζονται σε ένα ευρύ φάσμα μεγεθών ισχύος που κυμαίνεται μεταξύ των λιγότερων από 5 W έως 500 kW. Τα συστήματα APU εκπροσωπούν το μεγαλύτερο μερίδιο σε κλίμακα MW του τομέα αυτού με πολύ επιτυχημένες υλοποιήσεις συστημάτων DMFC σε όλο τον ευρωπαϊκό τομέα των οχημάτων αναψυχής. Στα φορητά συστήματα κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούνται κυρίως PEM και DMFC τεχνολογίες κυψελών καυσίμου και συνήθως αντικαθιστούν ή συνεργάζονται με την τεχνολογία της μπαταρίας. Οι PEM κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν καθαρό υδρογόνο χωρίς τοπικές εκπομπές ρύπων ενώ οι DMFCs εκπέμπουν μικρές ποσότητες CO_2 .

Οι κύριοι παράγοντες που καθιστούν τις κυψέλες καυσίμου κατάλληλες για φορητές εφαρμογές είναι:

- Δυνατότητα λειτουργίας εκτός δικτύου.
- Μεγαλύτερος χρόνος λειτουργίας σε σύγκριση με τις μπαταρίες.
- Γρήγορη επαναφόρτιση (ανεφοδιασμός).
- Σημαντικές δυνατότητες λόγο μειωμένου βάρους σε σύγκριση με τις μπαταρίες (ιδίως για τις ατομικές ανάγκες ισχύος στρατιωτικού προσωπικού).
- Ισχύουν επίσης άνεση στη μεταφορά, αξιόπιστη λειτουργία και χαμηλό κόστος λειτουργίας.

Υπάρχουν πολλές εφαρμογές για μικρές ή πολύ μικρές κυψέλες καυσίμου. Ο πρώτος τομέας με εμπορική επιτυχία μικρών κυψελών καυσίμου είναι τα εκπαιδευτικά πακέτα και παιχνίδια, με τουλάχιστον δύο εταιρίες να πωλούν

εκπαιδευτικά πακέτα κυψελών καυσίμου σε παγκόσμιο επίπεδο. Η αμέσως επόμενη αλλά πρώιμη ακόμα αγορά είναι αυτή των φορτιστών μπαταριών. Υπάρχουν αρκετά τέτοια προϊόντα στην αγορά και συνεχώς παρουσιάζονται και νέα στοχεύοντας στο να γίνουν αρκετά αποδεκτά από το καταναλωτικό κοινό ακλουθώντας μια εμπορική επιτυχία. Οι στρατιωτικές εφαρμογές είναι άλλος ένας βασικός τομέας εφαρμογής για τις φορητές κυψέλες καυσίμου. Αρκετές χώρες όπως οι ΗΠΑ, το Ηνωμένο Βασίλειο και η Γερμανία επενδύουν στην ανάπτυξη προϊόντων κυψελών καυσίμου για χρήση σε στρατιωτικές εφαρμογές. Τα ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης επίσης ένας σημαντικός τομέας εφαρμογών για τις πολύ μικρές κυψέλες καυσίμου για χρήση σε φορητούς υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα, MP3 players και άλλα τέτοια προϊόντα. Υπάρχουν πολλές εταιρίες κυψελών καυσίμου που αναπτύσσουν προϊόντα για τον τομέα αυτό. Ωστόσο αν και κατά την διάρκεια των τελευταίων ετών έχουν παρουσιαστεί πολλά πρωτότυπα τέτοια προϊόντα σε βιομηχανικές εκθέσεις τα εμπορικός διαθέσιμα προϊόντα είναι ελάχιστα. Στα φορητά συστήματα συνήθως χρησιμοποιούνται οι τεχνολογίες PEM και DMFC κυψελών καυσίμου και πολλές από τις εταιρίες κατασκευής κυψελών καυσίμου αναπτύσσουν επίσης μονάδες ανεφοδιασμού και αποθήκευσης επί των συστημάτων. Αρκετές εταιρίες που αναπτύσσουν προϊόντα κυψελών καυσίμου για φορητές εφαρμογές είναι σχετικά νεοσύστατες που ιδρύθηκαν την τελευταία δεκαετία. Μια επισκόπηση ορισμένων από τους κυριότερους παράγοντες σε αυτόν τον τομέα εφαρμογών παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5.6-2: Κατασκευαστές συστημάτων ανά κατηγορία φορητών εφαρμογών.

Εκπαιδευτικά κιτ και παιχνίδια.

Από το 2007 εταιρίες όπως, η Horizon Fuel Cell Technologies, η Heliocentris, η h-tec και άλλες, έχουν βοηθήσει να αυξηθεί η επίγνωση και η κατανόηση της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου από το κοινό μέσω της εμπορευματοποίησης και της μαζικής αποστολής παιχνιδιών και κιτ εκπαιδεύσεως κλίμακας milliwatt PEM κυψελών καυσίμου. Η σημασία αυτών των προϊόντων είναι αρκετά μεγάλη καθώς επιτρέπουν στους μελλοντικούς καταναλωτές να κατανοήσουν την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου κάτι το οποίο αποτελεί βασικό παράγοντα για την μακροπρόθεσμη εξέλιξη της βιομηχανίας. Πράγματι η πώληση και η επίδειξη αυτών των συστημάτων ήταν ένας πρόδρομος για την εμπορευματοποίηση των πιο πρακτικών και βιομηχανικών κυψελών καυσίμου κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών.

Οι κυψέλες καυσίμου για εκπαιδευτικούς σκοπούς συνεχίζουν να έχουν σημαντικές πωλήσεις βελτιώνοντας τα ήδη υπάρχοντα συστήματα και

παρουσιάζοντας νέα βελτιωμένα προϊόντα. Η Horizon Fuel Cell Technologies ένας από τους μεγαλύτερος προμηθευτές των συστημάτων αυτών έχει αναπτύξει μια τεράστια γκάμα από εκπαιδευτικά κιτ για αίθουσες διδασκαλίας αλλά και εκπαιδευτικά παιχνίδια.



Εικόνα 5.6-3: Εκπαιδευτικά κιτ και παιχνίδια από την Horizon.

Πρόσφατα παρουσίασε ένα τηλεκατευθυνόμενο αυτοκίνητο το οποίο έχει σχεδιαστεί να ελέγχετε μέσω smartphone με τη βοήθεια μιας εφαρμογής αντικαθιστώντας το κλασικό τηλεχειριστήριο. Το αυτοκίνητο παρέχετε μαζί με έναν σταθμό ανεφοδιασμού ο οποίος μπορεί να παράγει υδρογόνο με ηλεκτρόλυση είτε μέσω ενός ηλιακού πάνελ που περιλαμβάνετε στο πακέτο είτε μέσω της τροφοδοσίας από μια USB θύρα.



Specifications

	Toy car	Refueling Station	Solar Panel
Length (cm)	23	13.5	21.5
Width (cm)	8.7	12.8	9.5
Material	PC	PC	PC
Color	Blue & Black	Blue & Black	White & Black

USB charging time (for refueling station)	Approx. 6h
Solar panel charging time (for refueling station)	Approx. 16h under strong sunlight
Max. speed	10km/h
Max. running time (full tank of hydrogen)	10min
Fuel cell power	0.76W
Fuel cell voltage	1.2V
Solar panel power	1W

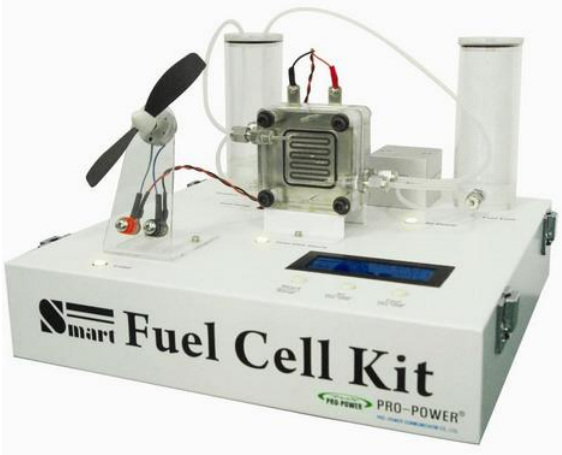
Εικόνα 5.6-4: Τηλεκατευθυνόμενο αμαξάκι της Horizon και τα χαρακτηριστικά του.

Η Thames & Kosmos μια ακόμη μεγάλη εταιρία στον τομέα των εκπαιδευτικών κιτ διαθέτει επίσης μια μεγάλη γκάμα από προϊόντα. Κιτ όπως το fuel cell 10 car & experiment kit, το fuel cell X7 hydrogen powered car κ.α. χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας διδάσκοντας στους χρήστες βασικές λειτουργίες και χαρακτηριστικά αυτής της τεχνολογίας.



Εικόνα 5.6-5: Εκπαιδευτικά κιτ Fuel Cell 10 και Fuel Cell X7 από την Thames & Kosmos.

Η PRO-POWER CO LTD αναπτύσσει επίσης εκπαιδευτικά κιτ χρησιμοποιώντας τεχνολογία DMFC.



SPECIFICATIONS

Power Source	Free Voltage(100~240VAC)
Fuel	3.2% Methanol & 96.8% Distrilled Water
Power Output	Max 0.2W at 30
Type of Fuel Cell	Direct Methnol Fuel Cell Electrode Size: 3×3(Area 9) Bipolarplate Size: 7×7(Area 49)
Fuel Pump	< 200mA(at 60cc/min with DC12V)
Air Pump	DC12V, < 300mA
Fan (Electric Load)	0.5VDC
Capacity of Fuel Tank	160
Display	Character LCD 20 by 4
Dimensions	300mm(L)×300mm(W)×247mm(H)
Weight	5.86kg

Εικόνα 5.6-6: Εκπαιδευτικό κιτ από την Pro Power και τα χαρακτηριστικά του.

Auxiliary Power Units

Η SFC Energy (SFC) ήταν μια από τις πρώτες εταιρίες που εμπορεύτηκαν με επιτυχία καταναλωτικά προϊόντα κυψελών καυσίμου και η πρώτη που το έκανε στον τομέα των APU μονάδων. Μια γκάμα από προϊόντα APU τεχνολογίας DMFC κυψελών καυσίμου τα οποία απευθύνονται σε βιομηχανικό και στρατιωτικό καταναλωτικό κοινό κυριαρχούν στον τομέα αυτό χάρη στο αποτελεσματικό μάρκετινγκ το οποίο χρησιμοποιεί η εταιρία και χάρη στη δημιουργία μια υποδομής λιανικής πώλησης και διανομής μεθανόλης με την οποία η εταιρία προμηθεύει μεθανόλη σε δοχεία ανάλογα με την επιθυμητή ποσότητα (βλ. εικόνα 5.6-7).



Technical Data Fuel Catridges

Fuel Catridges	M5	M10	M28 (only with M28-Adapter)
Volume	5 l (1.32 gallons)	10 l (2.64 gallons)	28 l (7.4 gallons)
Weight	4.3 kg (9.5 lbs)	8.4 kg (18.5 lbs)	22 kg (48.5 lbs)
Nominal Capacity	5.5 KWh	11.1 kWh	31.1 kWh
Dimensions L x W x H	190 x 145 x 283 mm	230 x 193 x 318 mm	420 x 280 x 360 mm
Autonomy @ 50 W	110 h	220 h	622 h

Εικόνα 5.6-7: Εμπορικός διαθέσιμα δοχεία μεθανόλης από την SFC και τα χαρακτηριστικά τους.

Η SFC διαθέτει τη σειρά EFOY COMFORT ένα σύστημα APU το οποίο προορίζεται για χρήση σε οχήματα αναψυχής απευθυνόμενο στην high-end αγορά κάμπινγκ.



EFOY COMFORT	80	140	210
Maximum power	40 W	72 W	105 W
Charge capacity / day	80 Ah	140 Ah	210 Ah
Nominal voltage	12 V	12 V	12 V
Charge current @ 12 V	3.3 A	6.0 A	8.8 A
Nominal consumption / kWh	0.24 US gal / 0.9 l		
Connectable batteries	12 V rechargeable batteries (lead acid, lead gel, AGM or LiFePO4)		
Weight	15.7 lbs / 7.1 kg	17.2 lbs / 7.8 kg	18.7 lbs / 8.5 kg
Dimensions (L x W x H)	17.44 x 7.95 x 11.34 in / 44.3 x 20.2 x 28.8 cm		
Operating temperature	-4°F to +104°F / -20 to + 40 °C		
Warranty[1]	2 years[2]	2 years[2]	2 years[2]

[1] The valid warranty conditions apply

[2] Warranty can be extended to 5 years as an option

Εικόνα 5.6-8: Το σύστημα EFOY COMFORT και τα τεχνικά του χαρακτηριστικά.

Για τον βιομηχανικό τομέα η SFC διαθέτει την σειρά EFOY Pro η οποία έχει αποδειχθεί αποτελεσματικό προϊόν για χρήστες που απαιτούν μια συνεχής, διακριτική και χωρίς εκπομπές χρήση. Μια δημοφιλής χρήση του EFOY Pro είναι στα οχήματα άμεσης επέμβασης. Η Volkswagen Commercial Vehicles εγκατέστησε έναν μεγάλο

αριθμό συστημάτων σε οχήματα επιθεώρησης διοδίων από το 2009 έως το 2012. Στο Ηνωμένο Βασίλειο η UK Yorkshire Ambulance Service έκανε εγκατάσταση EFOY Pro συστημάτων σε πάνω από εκατό ασθενοφόρα μετά από μια επιτυχημένη δοκιμή.



Technical Data EFOY Pro

Fuel Cells	EFOY Pro 800	EFOY Pro 800 Duo	EFOY Pro 2400	EFOY Pro 2400 Duo
Max. Nominal Power	45 W	45 W	110 W	110 W
Min. Nominal Power[1]	25 W	25 W	80 W	80 W
Nominal Voltage	12 V dc / 24 V dc	12 V dc / 24 V dc	12 V dc / 24 V dc	12 V dc / 24 V dc
Min. Nominal charging current at 12 V / 24 V	2.1 A / 1.05 A	2.1 A / 1.05 A	6.7 A / 3.3 A	6.7 A / 3.3 A
Recommended battery capacity[2] at 12 V Recommended battery capacity[1] at 24 V	40 to 160 Ah 10 to 100 Ah	40 to 160 Ah 10 to 100 Ah	60 to 350 Ah 30 to 175 Ah	60 to 350 Ah 30 to 175 Ah
Weight	8.0 kg (17.6 lbs)	8.3 kg (18.3 lbs)	9.0 kg (19.8 lbs)	9.3 kg (20.5 lbs)
Connectable cartridges (with DCS1)	1(2)	2(4)	1(2)	2(4)
Length fuel cartridge connector	70 cm			
Switching threshold for automatic battery charging at 12 V / 24 V[2]	On: <12.3 V / <24.6 V Off: > 14.2 V / > 28.4 V			
Required start-up voltage at 12 V / 24 V	>9 V / >18.5 V			
Noise level (at 1m / 7m distance)	42 / 25 dB(A)			
Quiescent current draw	20 mA			
Nominal Consumption[3]	0.9 l / kWh			
Operating temperature	-20 °C to +50 °C (-4 °F to +122 °F)			
Recommend altitude	Standard up to 1500 m (4920 ft), up to 2000m (6561 ft) possible			
Dimensioins L x W x H	433 x 188 x 278 mm (17 x 8 x 11 in)			
Inclination along the roll axis	Permanent: max 35°; temporary (<10 min); max 45°			
Inclination along the lateral axis	Permanent: max 20°			
User-Interface	At the unit or via Operating Panel OP2 with text display			
Data-Interface	RJ-45 plug for accessories (e.g. Interface adapter)			
Electrical Interface	MNL-plug 4-pins (e.g. Tyco Electronics Universal Mate-N-Lok - Nr. 350779)			

[1] Nominal power varies by ±10 %, decreases with the operation hours. Specification valid within warranty period.
[2] Depends on battery type and application - bigger batteries possible, if additional energy source available (e.g. solar)
[3] Effective consumption depends on operating conditions

Εικόνα 5.6-9: Η σειρά συστημάτων EFOY Pro και τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά.

Με πολλές βιομηχανικές χρήσεις που μπορούν να επωφεληθούν από τις κυψέλες καυσίμου η χρήση των συστημάτων APU αποτελεί έναν σημαντικό τομέα για τους

κατασκευαστές κυψελών καυσίμου και άλλους φορείς του κλάδου αυτού. Η DMFC είναι μια σχετικά ακριβή τεχνολογία κυψελών καυσίμου και είναι περισσότερο αποδοτική σε μικρής κλίμακας χαμηλής ισχύος συστήματα κάτω από 100 Watt. Υπάρχουν όμως αρκετές εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερη APU ισχύ από αυτή. Έτσι υπάρχουν εταιρίες οπού αναπτύσσουν διάφορους τύπους κυψελών καυσίμου για παράδειγμα, η Δανική εταιρία Serenergy χρησιμοποιεί ως καύσιμο μεθανόλη με την βοήθεια αναμόρφωσης σε μια υψηλής θερμοκρασίας PEMFC (HT PEMFC) κυψέλη καυσίμου απευθυνόμενη σε εφαρμογές με απαιτήσεις υψηλότερης ισχύος. Η εταιρία Horizon για τον τομέα των συστημάτων APU διαθέτει μια φορητή γεννήτρια με κυψέλη καυσίμου τύπου PEM, 50 kW με την εμπορική ονομασία Hydropack.



Εικόνα 5.6-10: Το σύστημα HYDROPAK με δοχεία ανεφοδιασμού και τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά.

Η εταιρία BOC διαθέτει επίσης μια φορητή γεννήτρια κυψέλης καυσίμου με την εμπορική ονομασία Hymera. Η Hymera διαθέτει μια κυψέλη καυσίμου τύπου PEM η οποία μπορεί να αποδώσει μέχρι και 200 W μέγιστης ισχύς. Διατίθεται σε τρεις εκδόσεις στα 14 V DC και στα 110 V AC και 230 V AC. Το 2011 η BOC παρουσίασε μια φιάλη υδρογόνου την 54-ZH ώστε να προωθήσει ένα ολοκληρωμένο πακέτο APU σε συνδυασμό με την Hymera. Η φιάλη έχει συνολικό βάρος 10 Kg με χωρητικότητα 2 m^3 υδρογόνου και διαθέτει ρυθμιστική βαλβίδα πιέσεως από 0 – 10 bar. Σε συνδυασμό με την 54-ZH η Hymera DC μπορεί να παρέχει 2-3 kWh ενέργειας.



Εικόνα 5.6-11: Εμπορικός διαθέσιμα συστήματα της Hymera (14V, 110V και 230V αντίστοιχα) και η φιάλη ανεφοδιασμού 54-ZH.

Specifications

Rated output power (W) continuous	150W AC/DC
Peak output power (W) short term	200W
AC output voltage	230Vac / 110Vac
AC output voltage waveform	Synthetic Sinewave
DC output voltage	13.3 - 14.2 V
Maximum DC output current (A)	12 A
Required inlet hydrogen pressure range	4-10 bar
Purity rating of fuel gas	High purity
Start up time (typical)	35 secs
Typical gas consumption rate @ 100W	~1 litre/min
Efficiency (based on lower heating value)	> 50% @ 100W and above
Minimum sustaining duration w/o hydrogen with fully charged internal battery	2 mins
Operating temperature range (degrees C)*	0-35°C
Humidity range (%) RH	0 – 95 (%) RH
IP rating (ingress protection)	IP43
Lifetime accumulative working hours or Start/Stop cycles*	1000 Hours/450 Start/Stop
Dimension (LxWxH in mms)	450 x 180 x200
Volume (cubic meters)	< 0.0165m³
Weight (kg)	7.38 kg
Noise Level db @ 1 m distance	60dB max 45dB typical

Εικόνα 5.6-12: Τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος Hymera.

Στρατιωτικές εφαρμογές.

Στρατιωτικοί οργανισμοί σε όλο τον κόσμο συνεχίζουν να δείχνουν ενδιαφέρον για την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου αξιολογώντας τη ως μέσω για να μειωθεί σημαντικά το βάρος που μεταφέρεται από τους στρατιώτες στο πεδίο αποστολών. Η εταιρία UltraCell με την βοήθεια του Αμερικανικού και Αυστραλιανού στρατού ανέπτυξε μια γεννήτρια κυψελών καυσίμου την XX55 η οποία συνοδεύεται από έναν σταθμό ανεφοδιασμού τον CliC-It methanol filling station. Η γεννήτρια αυτή δοκιμάστηκε στα εργαστήρια των ένοπλων δυνάμεων της Νέας Ζηλανδίας (New Zealand Defence Forces, NZDF) από το 2012 έως το 2013. Η εταιρία Protonex διεξήγαγε επίσης δοκιμές σε κυψέλες καυσίμου για στρατιωτική χρήση για διάρκεια τριών ετών και αρχίζει να κάνει κι αυτή την εισαγωγή της στην παραγωγή και την ανάπτυξη συστημάτων. Η SFC Energy έχει μια μεγάλη ιστόρια στην ανάπτυξη κυψελών καυσίμου που τροφοδοτούνται με μεθανόλη και τα συστήματα που διαθέτει για στρατιωτικές εφαρμογές το JENNY και το EMILY συνεχίζουν να έχουν επιτυχία στον τομέα. Η SFC προμήθευσε την Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ με το σύστημα JENNY μια



Εικόνα 5.6-13: Στρατιωτική φορητή γεννήτρια XX55.



Εικόνα 5.6-14: Στρατιωτική φορητή γεννήτρια JENNY.



Εικόνα 5.6-15: Στρατιωτική φορητή γεννήτρια EMILY.

γεννήτρια κυψέλης καυσίμου τύπου DMFC με ισχύς 50 W. Μια νέα έκδοση της γεννήτριας JENNY η EMILY ξεκίνησε την επίδειξη της με αυξημένη κατά 35% ισχύς φτάνοντας τα 125 W.

Ηλεκτρονικά προϊόντα.

Οι φορητές κυψέλες καυσίμου για τα ηλεκτρονικά προϊόντα παραμένουν μια πρόκληση για την τεχνολογία αυτή με τα προβλήματα που αφορούν την σμίκρυνση ενός ολοκληρωμένου συστήματος να εμποδίζουν την κατασκευή και την εμπορική διάθεση μιας ολοκληρωμένης συσκευής. Πιστεύεται ότι για να αναπτυχθούν εμπορικά οι κυψέλες καυσίμου σε αυτόν τον τομέα θα πρέπει να είναι σε θέση να ενσωματωθούν στις ηλεκτρονικές συσκευές με τον ίδιο τρόπο που ενσωματώνονται οι μπαταρίες ώστε να μπορούν να τις αντικαταστήσουν. Μέχρι σήμερα έχουν γίνει πολλές απόπειρες και έχουν παρουσιαστεί πολλά προϊόντα σε εκθέσεις χωρίς όμως κανένα να σημειώσει εμπορική επιτυχία.

Η Toshiba είχε παρουσιάσει το 2005 ένα mp3 player με ενσωματωμένη μια κυψέλη καυσίμου DMFC που θα μπορούσε να λειτουργεί έως και 60 ώρες ανεφοδιάζοντας το με 10 ml μεθανόλης.



Εικόνα 5.6-16: mp3της Toshiba.



Εικόνα 5.6-17: Κινητό τηλέφωνο της Motorola.

Το 2008 η Angstrom εντυπωσίασε την δημοσιότητα με την ενσωμάτωση ενός συστήματος κυψελών καυσίμου σε ένα κινητό τηλέφωνο της Motorola.

Πολλές εταιρίες συμπεριλαμβανομένων της Antig, της CMR Fuel Cells, της Nomadic Fuel Cells, της Samsung κ.α. έχουν προσπαθήσει να αναπτύξουν φορητές κυψέλες καυσίμου κατά τα τελευταία χρόνια για την ενσωμάτωση τους σε φορητούς υπολογιστές αλλά τελικά είτε ακολούθησαν άλλο τομέα εφαρμογών είτε αποσύρθηκαν από την αγορά των κυψελών καυσίμου λόγο της έλλειψης ενός εμπορικά βιώσιμου προϊόντος.



Εικόνα 5.6-18: Συστήματα κυψελών καυσίμου της Antig και της Samsung ενσωματωμένα σε laptop.

Ένα πρωτότυπο σύστημα κυψέλων καυσίμου ενσωματωμένο σε έναν υπολογιστή tablet παρουσιάστηκε στην έκθεση Consumer Electronics Show το 2011 από μια νεοσύστατη εταιρία την Fluid Computer Systems (FCS). Το πρωτότυπο αυτό σύστημα χρησιμοποιούσε μια κυψέλη καυσίμου της Horizon. Η FCS αναζητούσε αναπτυξιακούς εταίρους με στόχο την εμπορική πώληση από το 2012. Δυστυχώς η FCS αναγκάστηκε να σταματήσει την δραστηριότητα της μετά την απόσυρση των

χρηματοδοτών της οι οποίοι επικαλέστηκαν ανησυχίες για τον ανταγωνισμό με τις μεγάλες βιομηχανίες στην αγορά των tablet.

Ως αποτέλεσμα των προβλημάτων της προσπάθειας για ενσωμάτωση των κυψελών καυσίμου πάνω στις συσκευές οι μονάδες που βρίσκονται πιο κοντά στην εμπορευματοποίηση είναι οι εξωτερικοί φορτιστές. Οι μονάδες αυτές στοχεύουν στην εξωτερική χρήση σε απομακρυσμένες περιοχές όπως για παράδειγμα στην πεζοπορία και την κατασκήνωση οπού η άμεση πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια είναι δύσκολη. Οι κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούνται για την φόρτιση ηλεκτρονικών συσκευών με τη μορφή μίνι φορτιστών σημειώνουν εμπορική επιτυχία και κυκλοφορούν από πολλές εταιρίες.

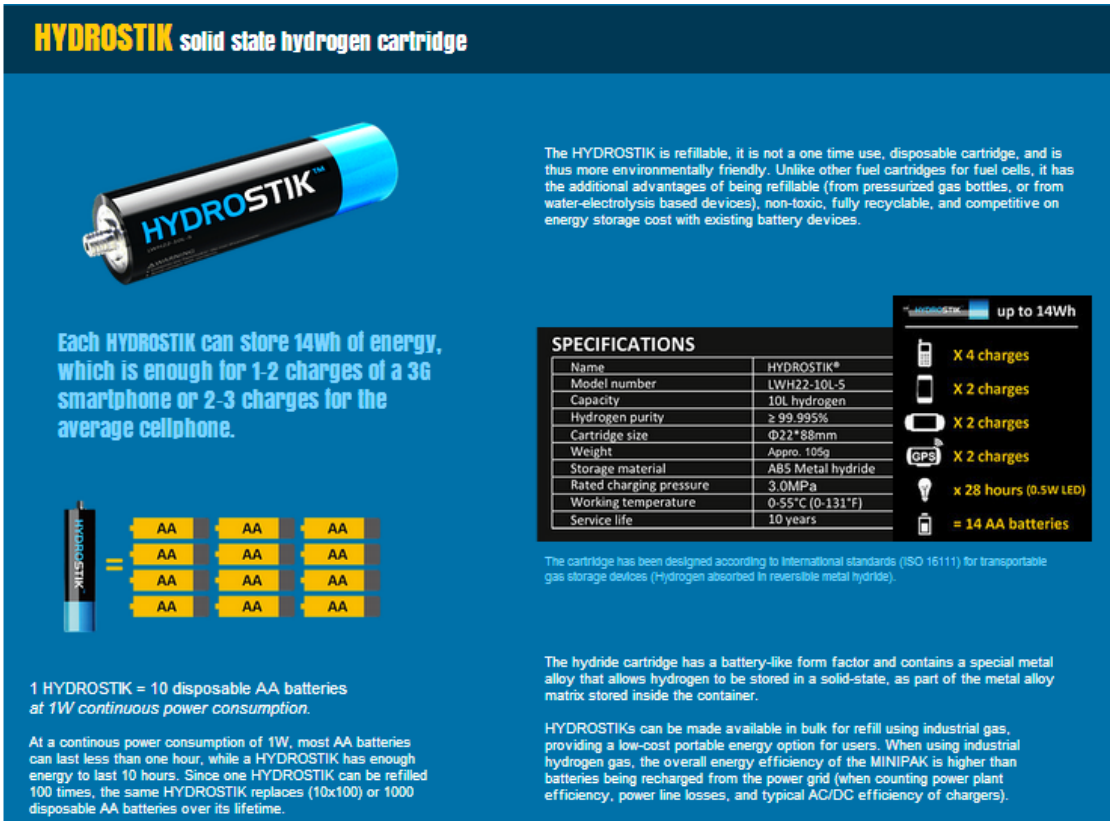
Το 2010 η Horizon Fuel Cell Technologies παρουσίασε στην έκθεση Consumer Electronics Show που έγινε στο Λας Βέγκας έναν φορτιστή τσέπης κυψελών καυσίμου με την ονομασία MiniPak. Ο φορτιστής αυτός χρησιμοποιεί μια κυψέλη καυσίμου τύπου PEM η οποία τροφοδοτείται από φυσίγγια καυσίμου και προσφέρει μια τροφοδοσία 2 Watt συνεχούς ρεύματος μέσω μιας τυπικής θύρας USB. Τα φυσίγγια ανεφοδιασμού με την εμπορική ονομασία HYDROSTIK είναι δεξαμενές υδρογόνου στερεάς κατάστασης που μπορούν να αποθηκεύσουν έως και 14 Wh καθαρής ενέργειας και ξαναγεμίζουν από μια επιτραπέζια συσκευή ηλεκτρόλυσης με την εμπορική ονομασία HYDROFILL. Τον Αύγουστο του 2012 η Horizon άρχισε τις εμπορικές πωλήσεις του MiniPak μέσω της REI της μεγαλύτερης αλυσίδας λιανικού εμπορίου στην Βόρεια Αμερική καθώς και σε πολλά άλλα Ευρωπαϊκά και Ασιατικά καταστήματα λιανικής πώλησης. Η Horizon συνέχισε την παγκόσμια εξάπλωση του MiniPak και πλέον προσφέρει επιλογές προσαρμογής για του εταίρους λιανικής πώλησης και τους αγοραστές. Στις ΗΠΑ ένα ανθεκτικότερο και μεγαλύτερης διάρκειας σύστημα MiniPak πωλείται από την Brunton ενώ η βασική έκδοση συνεχίζει να πωλείται από την REI. Επίσης η Air Liquide παρουσιάζει MiniPaks στα πλαίσια του Blue Hydrogen concept.



Εικόνα 5.6-19: Φορητός φορτιστής MiniPak της Horizon.



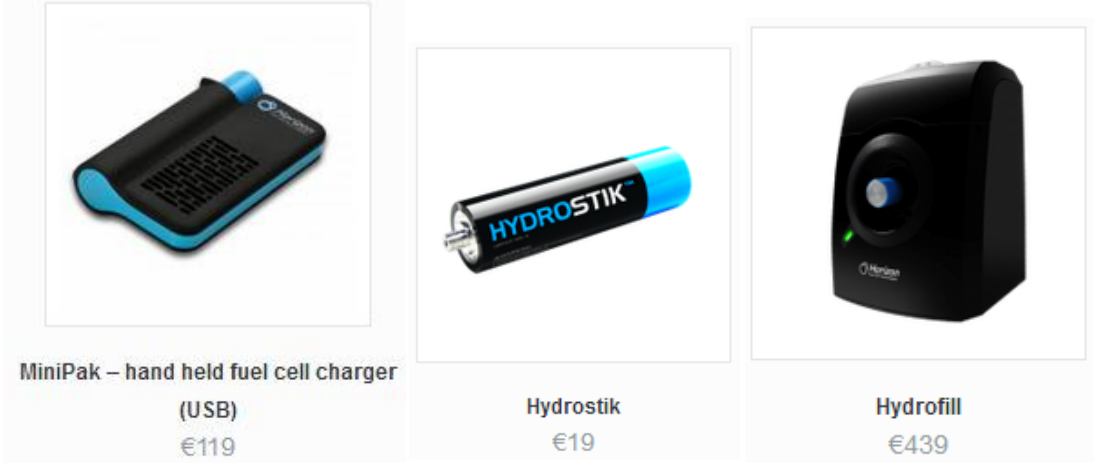
Εικόνα 5.6-20: Ο MiniPak με το πρόσθετο εξάρτημα φακού και τα τεχνικά του χαρακτηριστικά.



Εικόνα 5.6-21: Το φυσίγγιο καυσίμου HYDROSTIK της Horizon και τα τεχνικά του χαρακτηριστικά.



Εικόνα 5.6-22: Σταθμός ανεφοδιασμού HYDROFILL της Horizon και τα τεχνικά του χαρακτηριστικά.



Εικόνα 5.6-23: Ενδεικτικές τιμές του συστήματος της Horizon.



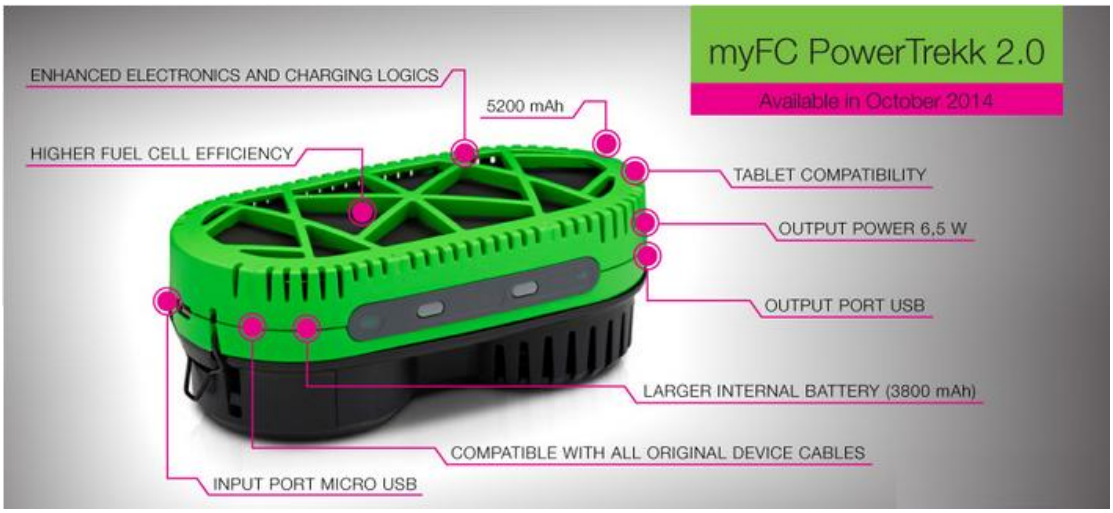
Εικόνα 5.6-24: Φορητός φορτιστής POWERTREKK

Στις αρχές του 2011 η Σουηδική εταιρία myFC εισήγαγε στην αγορά, με την παρουσίαση σε δύο εκθέσεις στην Mobile World Congress στη Βαρκελώνη και στην FC Expo στην Ιαπωνία, τον φορτιστή PowerTrekk τεχνολογίας PEM κυψελών καυσίμου συνοδευόμενο από κασέτες καυσίμου με την ονομασία PowerPukk. Χρησιμοποιώντας πυριτιούχο νάτριο για την αποθήκευση του υδρογόνου οι κασέτες ενεργοποιούνται από μια μικρή ποσότητα νερού και παράγουν 4 λίτρα υδρογόνου. Τον Μάιο του 2012 άρχισαν οι πρώτες εμπορικές πωλήσεις της συσκευής

PowerTrekk της myFC η οποία κυκλοφόρησε σε δεκατρείς μεγάλες παγκόσμιες αγορές όπου παρουσιάστηκε αρκετά μεγάλη ζήτηση για το σύστημα αυτό. Η μονάδα PowerTrekk είναι διαθέσιμη στις ΗΠΑ από την REI και επίσης στην Κίνα και την Ιαπωνία. Το PowerTrekk θα κυκλοφορήσει σε νέα βελτιωμένη έκδοση PowerTrekk 2.0 από τον Οκτώβριο του 2014 και θα είναι έως και τρεις φορές πιο ισχυρό από τον προκάτοχο του.



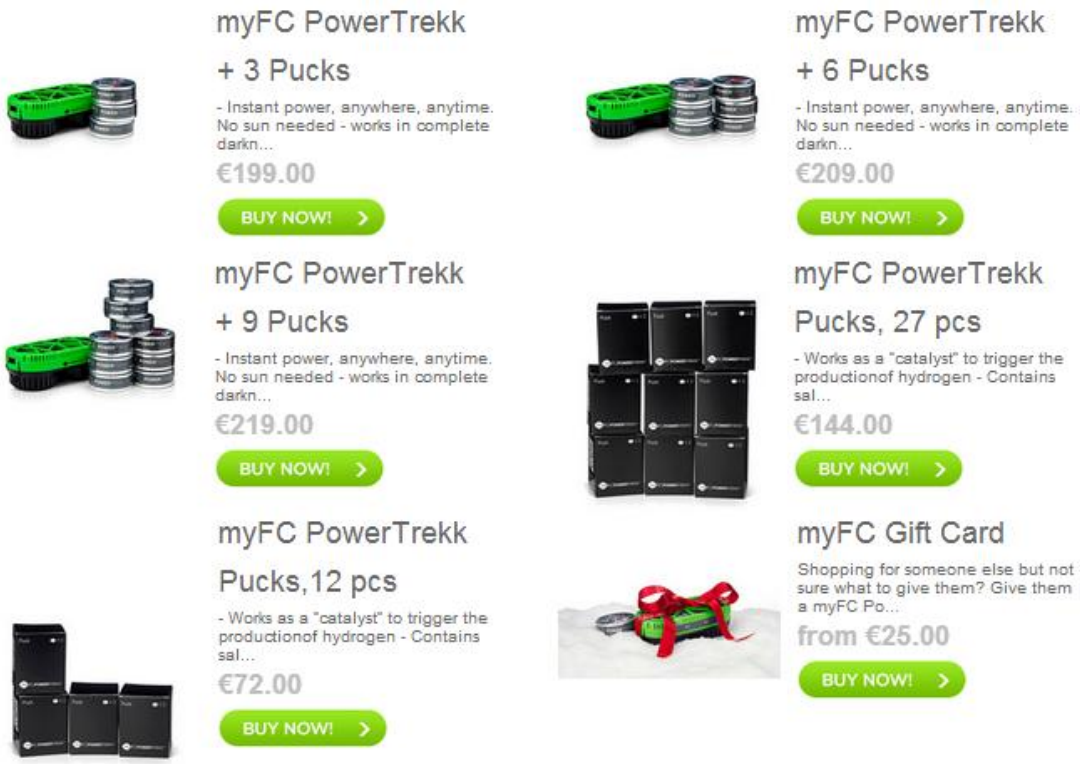
Εικόνα 5.6-25: POWERTREKK.



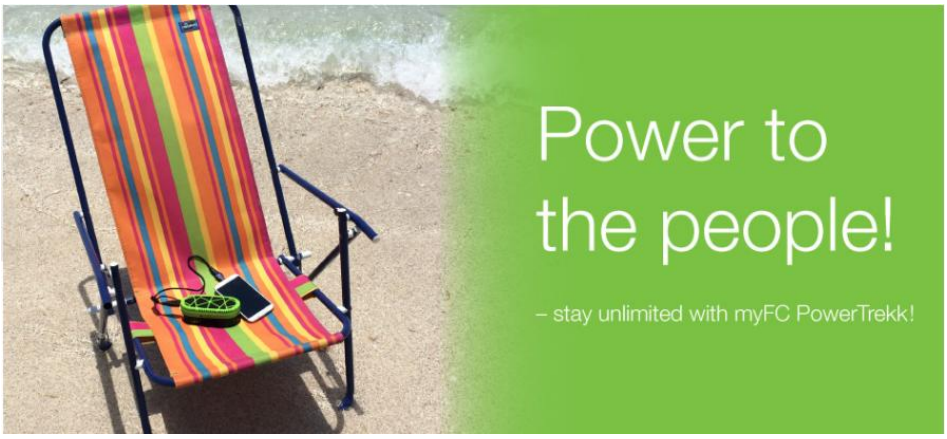
Εικόνα 5.6-26: Το νέο μοντέλο POWERTREKK 2.0 και τα χαρακτηριστικά του.



Εικόνα 5.6-27: Τρόπος λειτουργίας του POWERTREKK.



Εικόνα 5.6-28: Ενδεικτικές τιμές του συστήματος POWERTREKK.



Εικόνα 5.6-29: Διαφημιστικό λογότυπο του POWERTREKK.

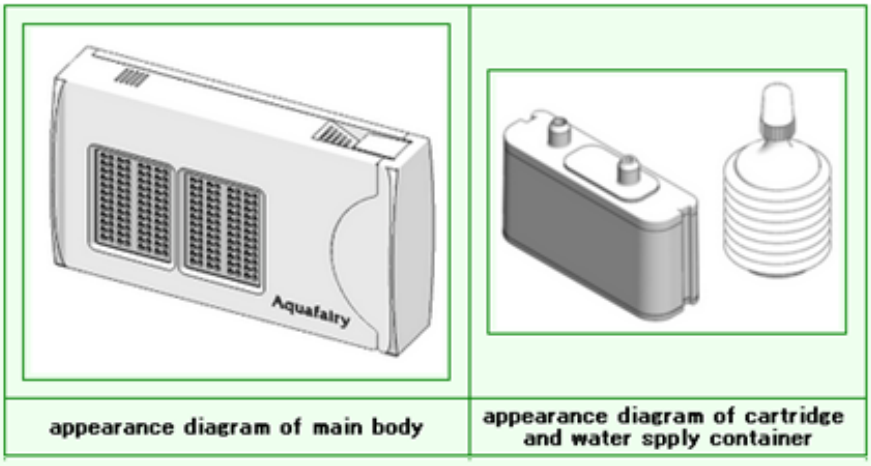
Η Ιαπωνική Aquafairy παρουσίασε το 2011 έναν φορητό φορτιστή στην έκθεση FC Expo στην Ιαπωνία και στην έκθεση Mobile World Congress στη Βαρκελώνη. Η μονάδα είναι εφοδιασμένη με μια κυψέλη καυσίμου τύπου PEM η οποία τροφοδοτείται με υδρογόνο που παράγεται από την προσθήκη νερού σε μια κασέτα που χρησιμοποιεί ένα υδρίδιο μετάλλου για την αποθήκευση υδρογόνου. Ένα έλασμα τριών γραμμαρίων ανθρακικού ασβεστίου παράγει 4,5 λίτρα υδρογόνου και η συσκευή φορτίζει πλήρως ένα smartphone μέσα σε δύο ώρες. Η Aquafairy άρχισε εγχώριες πωλήσεις του συστήματος AF-M3000 τον Απρίλιο του 2011 και σχεδίαζε να κυκλοφορήσει και ένα φθηνότερο δεύτερης γενιάς προϊόν για μαζική παραγωγή. Το 2012 η


Εικόνα 5.6-30: Ο φορητός φορτιστής AF-M3000 της Aquafairy.

Aquafairy ένωσε τις δυνάμεις τις με την Rohm για μια περαιτέρω ανάπτυξη στην φορητή τεχνολογία κυψελών καυσίμου. Οι δύο εταιρίες αναπτύσσουν φορτιστές ηλεκτρονικών ειδών και συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έκτακτης ανάγκης κυψελών καυσίμου σε μια σειρά διαφόρων στυλ σχεδιασμού και τεχνολογιών συμπεριλαμβάνοντας την υπόθεση φόρτισης smartphone.

Primary specification

Main body	
Max. output	3.5W
Output voltage	5.2V
Size	H67.6xW118.6xD21.0mm
Weight	128g (only the main body)
Remarks	Output time and output capacity may vary depending on the condition of use.
Fuel cartridge	
Output outline	more than 1Wx90 minutes (@25℃)
Size	H28.8xW53.5xD15.5mm
Weight	16.8g
Output time	about 120 minutes/one cartridge
Output capacity	about 3Wh/one cartridge
Accessory	water supply container (water 5.5cc)
Remarks	Output time and output capacity may vary depending on the condition of use.



appearance diagram of main body | appearance diagram of cartridge and water spply container

Εικόνα 5.6-31: Τεχνικά χαρακτηριστικά του AF-M300 και σχηματική εικόνα του.

Οι εταιρίες Lilliputian Systems και eZelleron ανέπτυξαν δύο προϊόντα SOFC για την αγορά φορτιστών κυψελών καυσίμου. Το σύστημα της Lilliputian λειτουργεί με φυσίγγια βουτανίου και πωλείται στις ΗΠΑ μέσω της εταιρίας λιανικής πώλησης Brookstone. Το σύστημα της eZelleron θα μπορεί να τροφοδοτείται με συμβατικά καύσιμα τα οποία χρησιμοποιούνται και στους αναπτήρες και ένα εμπορικό λανσάρισμα αναμένεται μέσα στα επόμενα χρόνια. Η Lilliputian Systems, Inc. (LSI) συνέχισε την ανάπτυξη του SOFC συστήματος παρουσιάζοντας τον φορτιστή Nectar™ Mobile Power System ο οποίος έχει προγραμματιστεί να πωλείται από την Brookstone. Η LSI έχει την οικονομική στήριξη της εταιρίας Intel και χρησιμοποιεί τις εγκαταστάσεις της για την κατασκευή του συστήματος της. Το Nectar έκανε το ντεμπούτο του το 2013 στην έκθεση Consumer Electronics Show στο Λας Βέγκας κερδίζοντας μια σειρά από βραβεία.

Ο Nectar™ αποδίδει 55.000 mWh ενέργειας η οποία είναι ικανή να καλύψει περίπου 10 επαναφορτίσεις ενός τυπικού smartphone και έχει βάρος 168 γραμμάρια.



Εικόνα 5.6-32: Ο φορητός φορτιστής Nectar.



Εικόνα 5.6-33: Ο φορητός φορτιστής της Ezelleron.

Η Neah Power Systems, Inc. είναι μια ακόμη εταιρία οπού ανέπτυξε το 2013 έναν φορτιστή κυψελών καυσίμου τον PowerPlay™ σε συνεργασία με την Fortune 110 company.



Εικόνα 5.6-34: Ο φορτιστής PowerPlay™

Η Intelligent Energy ανέπτυξε επίσης το 2014 ένα φορητό φορτιστή με την ονομασία UPP. Το σύστημα Upp χωρίζεται σε δύο μέρη: Την κασέτα καυσίμου που περιέχει το καύσιμο υδρογόνο το οποίο αποθηκεύεται σε υψηλή πυκνότητα σε ένα υδρίδιο μετάλλου και την κυψέλη καυσίμου τύπου PEM. Και τα δυο μέρη ζυγίζουν συνολικά 620 γραμμάρια. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό αυτής της συσκευής είναι ότι από μία εφαρμογή για iOS και Android συσκευές. Η εφαρμογή δείχνει τον εκτιμιώμενο χρόνο χρήσης που απομένη στην κινητή συσκευή και όταν αυτή συνδεθεί με το Upp εμφανίζει την στάθμη του καυσίμου που απομένει στην κασέτα καυσίμου καθώς και την τάση και το ρεύμα που αποδίδει η κυψέλη καυσίμου.



Εικόνα 5.6-35: Ο φορητός φορτιστής UPP.

Specifications

- Voltage 5V
- Maximum output current 1A
- Rated power 5W
- Electrical interface USB
- Fuel cell type Proton Exchange Membrane (PEM)
- Cartridge capacity 25Wh
- Fuel type Hydrogen
- Storage medium Metal hydride
- Dimensions 119.5 x 40 x 48mm (fuel cell), 90.5x 40 x 48mm (cartridge)
- Weight 235g (fuel cell), 385g (cartridge)

Βιβλιογραφία

[1] High Level Group. Loyola de Palacio, Philippe Busquin. Hydrogen Energy and Fuel Cells A vision of our future. Office for Official Publications of the European Communities. 2003.

[2] Noriko Hikosaka Behling. Fuel Cells: Current Technology Challenges and Future Research Needs. Elsevier. 2012.

[3] James Larminie and Andrew Dicks. Fuel Cell Systems Explained, Second Edition. John Wiley & Sons Ltd. 2003.

[4] EG&G Technical Services, Inc.. Fuel Cell Handbook, Seventh Edition. U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory. 2004.

[5] GEORG W. A. KAHLBAUM and FRANCIS V. DARBISHIRE. THE LETTERS OF FARADAY AND SOKENBEIN 1836-1862 WITH NOTES. COMMENTS AND REFERENCES TO CONTEMPORARY LETTERS. M. WERNER-RIEHM, BALE.

[6] W. R. Grove. (1839). On a small Voltaic Battery of great energy, some Observations on Voltaic Combinations and forms of Arrangement, and on the Inactivity of a Copper positive Electrode in Nitro-Sulphuric Acid. THE LONDON, EDINBURGH and DUBLIN PHILOSOPHICAL MAGAZINE AND JOURNAL OF SCIENCE, VOL. XV, 287-292.

[7] W. R. Grove. (1838). On a new Voltaic Combination. THE LONDON, EDINBURGH and DUBLIN PHILOSOPHICAL MAGAZINE AND JOURNAL OF SCIENCE, VOL. XII, 430.

[8] W. R. Grove. (1839). On the Inaction of Amalgamated Zinc in acidulated Water. THE LONDON, EDINBURGH and DUBLIN PHILOSOPHICAL MAGAZINE AND JOURNAL OF SCIENCE, VOL. XV, 81-84.

[9] Dr. C. F. SCHCENBEIN.(1839). Notice on some peculiar Voltaic Arrangements. THE LONDON, EDINBURGH and DUBLIN PHILOSOPHICAL MAGAZINE AND JOURNAL OF SCIENCE, VOL. XV, 136-145.

[10] W. R. Grove. (1842). On a Gaseous Voltaic Battery. THE LONDON, EDINBURGH and DUBLIN PHILOSOPHICAL MAGAZINE AND JOURNAL OF SCIENCE, THIRD SERIES, 417-420.

[11] W. R. Grove.(1844). On a Gaseous Voltaic Battery. THE LONDON, EDINBURGH and DUBLIN PHILOSOPHICAL MAGAZINE AND JOURNAL OF SCIENCE, VOL. XXIV,268-278, 346-353, 422-431.

[12] A. Boudghene Stambouli, E. Traversa. Fuel cells, an alternative to standard sources of energy. Elsevier. 2001.

[13] http://americanhistory.si.edu/fuelcells/index.htm

[14] Dr Denis Gross. (2010). Fuel Cells: 170 years of technology development – and Space Age experience!. Cleantech magazine.

[15] http://energy-21.blogspot.gr/

[16] http://www.yesterdaystractors.com/articles/artint207.htm

[17]

[18] Charles Stone, Anne E. Morrison. (2002). From curiosity to ‘‘power to change the worldR’’. Elsevier.

[19] Patrick G. Grimes, Grimes Associates. (2000). The New Electric Century. IEEE AES Systems Magazine.

[20] Dr. Marvin Warshay. (2012). 1976-The First National Fuel Cell Seminar. Fuel Cell Seminar

[21] November 8, 2012.
[22] Cutler J. Cleveland. (2013). Bacon, Francis Thomas. http://www.eoearth.org/.
[23] http://www.fuelcelltoday.com/
[24] http://www.fuelcellmarkets.com/
[25] http://www.fuelcells.org/
[26] http://energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-technologies-office
[27] http://energy.gov/
[28] http://www.nasa.gov/
[29] http://www.sofccenter.com/
[30] http://www.nedstack.com/
[31] http://www.fchea.org/
[32] http://www.cfcl.com.au/assets/files/5._history_of_fuel_cells_-_rev.4_apr11.pdf
[33] Hiroko Sotouchi. ALKALINE FUEL CELLS. Encyclopedia of Life Support Systems(EOLSS).
[34] M. Cifrain and K. Kordesch. (2003). Hydrogen/oxygen (Air) fuel cells with alkaline
[35] Electrolytes. John Wiley & Sons, Ltd.
[36] http://www.nist.gov/
[37] http://www.sofccenter.com/
[38] http://ingsman.com/
[39] http://www.che.sc.edu/
[40] http://www2.dupont.com/FuelCells/en_US/
[41] Σπυρίδων Βουτετάκης, Ευθύμιος Κικκινίδης, Γεώργιος Μαρνέλλος, Λεωνίδας Ντζιαχρήστος, Ιωάννης Παναπακίδης. (2010). Υπάρχουσες τεχνολογίες και τελικές χρήσεις του "καυσίμου του μέλλοντος" - Η2. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος Τμήμα Δυτικής Μακεδονίας.
[42] Lorenz Gubler. (2001). Operating Polymer Electrolyte Fuel Cells with Reformed Fuel. Διδακτορική διατριβή.
[43] Ryan O'Hayre, David M. Barnett, Fritz. B. Prinz. The Pt/Nafion/Air Triple Phase Boundary: Model, Experiment, and Implications for PEM Fuel Cells. Stanford University Rapid Prototyping Laboratory.
[44] Matthew M. Mench. Fuel Cell Engines. John Wiley & Sons, Ltd.2008.
[45] http://asmedigitalcollection.asme.org/
[46] L.J.M.J. Blomen, M.N. Mugerwa. Fuel Cell Systems. Springer Science & Business Media. 1993.
[47] Χ. Χαραλαμπίδου, Ι. Κ. Κούκος. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΕΡΕΟΥ ΟΞΕΙΔΙΟΥ. 9ο ΠΕΣΧΜ: Η Συμβολή της Χημικής Μηχανικής στην Αειφόρο Ανάπτυξη. 2013.
[48] James W. Darbyshire, Lawrence J. Borle. AN ELECTROCHEMICALLY BASED ELECTRICAL FUEL CELL MODEL. Australasian Universities Power Engineering Conference. 2004.
[49] http://jes.ecsdl.org/
[50] http://solarcellcentral.com/csp_page.html#
[51] http://www.epa.gov/chp/index.html
[52] http://www.cie.org.cy/sxoliko.html#
[53] http://www.neesc.org/

[54] Elgowainy and M.Q. Wang. Fuel Cycle Comparison of Distributed Power Generation Technologies. Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory. 2008.
[55] http://www.biomassenergy.gr/
[56] http://www.energypress.gr/
[57] http://www.alternative-energy-tutorials.com/
[58] EURELECTRIC "Preservation of Resources" Working Group's " Upstream" Sub-Group in collaboration with VGB. Efficiency in Electricity Generation. Union of the Electricity Industry – EURELECTRIC, VGB. 2003.
[59] Κτενιαδάκης Μ.. ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΙΣΗ & ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. ΤΕΙ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ. 1999.
[60] Φούντη Μ., Βουρλιωτάκης Γ.. ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ και ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ. 2007.
[61] http://www.europeanfuelcell.it/index.html
[62] http://www.nuvera.com/
[63] http://www.fuelcellenergy.com/
[64] http://www.clearedgepower.com/
[65] http://www.ballard.com/
[66] http://www.new-ig.eu/
[67] http://enefield.eu/
[68] http://www.acalenergy.co.uk/
[69] http://www.topsoefuelcell.com/
[70] http://www.cfcl.com.au/
[71] http://www.bluegen.info/
[72] http://www.callux.net/
[73] http://www.cogeneurope.eu/
[74] http://www.hysasystems.org/
[75] http://www.ird.dk/
[76] http://www.tokyo-gas.co.jp/
[77] http://www.nrel.gov/
[78] http://www.ecuity.com/
[79] http://www.baxi.co.uk/index.htm
[80] Rainer Bróderle MdB, Dr. Peter Ramsauer. Germany: Lead Market for Energy Storage & Fuel Cell Systems A Profile of Selected Market and Research Opportunities. Germany Trade & Invest.
[81] http://www.multiquip.com/multiquip/h2lt.htm
[82] Graham Hillier. Introduction to CPI and the Fuel Cells Application Facility (FCAF) H2Net. www.uk-cpi.com & Confidential to The Centre for Process Innovation Ltd.
[83] Jon Helliwell. Realising the Promise: Getting Fuel Cell and Low Carbon Technology to Market. University of Newcastle. 2012
[84] http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/12-13/PEM_fuel_cell/PEM%20FUEL%20CELL.html
[85] http://www.youngmangroup.com/products/lighting-towers/ecolite-h2
[86] http://highvlocity.eu/
[87] http://chic-project.eu/
[88] http://www.iwatani.co.jp/eng/newsrelease/detail.php?idx=32
[89] http://openfuelcell.com/
[90] http://world.honda.com/news/2004/2040824_03.html

[91] http://www.buses.tatamotors.com/
[92] http://english.people.com.cn/90001/90776/90882/7215009.html#dingtop
[93] http://www.global-hydrogen-bus-platform.com/Home
[94] http://global.yamaha-motor.com/news/2006/1019/fc-aqel.html
[95] http://www.netinform.net/
[96] http://www.alibaba.com/product-detail/Smart-Fuel-Cell-Kit_113707744.html
[97] http://www.greencarcongress.com/
[98] Bob Jennings. Turning green with ENV. http://www.drive.com.au/. 2005.
[99] http://www.cidaut.es/
[100] http://www.vanhool.be/
[101] http://www.railwaygazette.com/
[102] http://www.h2euro.org/2011/a-portfolio-of-power-trains-for-europe-a-fact-based-analysis
[103] http://www.intechopen.com/books/new-generation-of-electric-vehicles/the-application-of-electric-drive-technologies-in-city-buses
[104] L.L. Gaines, A. Elgowainy, and M.Q. Wang. Full Fuel-Cycle Comparison of Forklift Propulsion Systems. Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory. 2008.
[105] http://www.roads2hy.com/
[106] Steve Medwin. Fuel Cells and Electric Forklift Trucks. The Raymond Corporation. 2011.
[107] http://www.fta.dot.gov/
[108] Tom Koehler. Boeing makes history with flights of Fuel Cell Demonstrator Airplane. BOEING FRONTIERS. 2008.
[109] http://www.naval-technology.com/
[110] http://www.efoy.com/
[111] http://powertrekk.com/
[112] http://www.horizonfuelcell.com/
[113] http://www.ezelleron.eu/en/
[114] http://www.intelligent-energy.com/