

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
Τ. Ε. Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ**

ΣΧΟΛΗ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

Επιβλέπων: ΠΕΤΡΟΣ Γ. ΒΕΡΝΑΔΟΣ, Καθηγητής

Συνεπιβλέπουσα: ΕΡΙΕΤΤΑ Ι. ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΑΔΟΥ, Εργ. Συνεργάτης

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΕ Η/Υ ΜΕ
ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ HOMER ENERGY**

**OPTIMIZATION STUDY AND SIMULATION OF A HYDROGEN
GENERATION AND STORAGE SYSTEM COMBINED WITH WIND
ENERGY, USING THE HOMER ENERGY SOFTWARE**

**Πτυχιακή Εργασία:
Εμμανουήλ Π. Αγγελαδά (Α.Μ. 37883)**

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2013



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΕ Η/Υ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ HOMER ENERGY

OPTIMIZATION STUDY AND SIMULATION OF A HYDROGEN
GENERATION AND STORAGE SYSTEM COMBINED WITH WIND
ENERGY, USING THE HOMER ENERGY SOFTWARE

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εμμανουήλ Π. Αγγελαδάς

Επιβλέπων: Βερνάδος Γ. Πέτρος
Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Πειραιά

Συνεπιβλέπουσα: Ζουντουρίδου Ι. Εριέττα
Εργαστηριακή συνεργάτης

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2013

.....
Εμμανουήλ Π. Αγγελαδάς

Πτυχιούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Τ.Ε.Ι. Πειραιά

Copyright © EMMANOYHΛ Π. ΑΓΓΕΛΑΔΑΣ 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Βασικός σκοπός του ανθρώπου ανά τους αιώνες πέραν της εξασφάλισης της επιβιώσής του, ήταν και είναι η βελτίωση της ποιότητας ζωής. Με την ανακάλυψη του ηλεκτρισμού και των εξαρτώμενων από αυτόν εφαρμογών του η καθημερινότητα του ανθρώπου βελτιώθηκε σχεδόν σε όλους τους τομείς, ώστε να αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της σύγχρονης ζωής τους τελευταίους αιώνες. Έτσι, λοιπόν, αν και ο ηλεκτρισμός αποτελεί τον μεγαλύτερο μηχανισμό ανάπτυξης, η επίδραση του στη φύση είχε αρνητικά αποτελέσματα καθώς συνέβαλε σημαντικά στη μόλυνση του πλανήτη.

Τις τελευταίες δεκαετίες γίνεται προσπάθεια μείωσης του περιβαλλοντικού προβλήματος που οφείλεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με την ανάπτυξη και εισαγωγή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στον ενεργειακό τομέα. Μία από τις πιο πρόσφατες τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν λίγες δεκαετίες νωρίτερα αλλά σήμερα μελετάται η ευρεία εφαρμογή της στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, είναι οι κυψέλες καυσίμου που βασίζουν την λειτουργία τους στη χρήση υδρογόνου το οποίο παράγεται από Α.Π.Ε. και αποθηκεύεται σε ειδικές δεξαμενές.

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη του συστήματος παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου με χρήση αιολικής ενέργειας στην περιοχή του Λαυρίου, που πραγματοποιείται από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος RES2H2. Πέραν της μελέτης, ακολουθεί προσομοίωση και βελτιστοποίηση του συστήματος αυτού με τη χρήση H/Y και τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος Homer Energy.

Συγκεκριμένα στο 1^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η σχέση ανθρώπου – ενέργειας ανά τους αιώνες και η σταδιακή μετάβαση στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Ακολουθεί ιστορική αναδρομή γύρω από την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου, από την ανακάλυψή τους μέχρι σήμερα, και αναλύεται η βασική αρχή λειτουργίας τους.

Εν συνεχεία, στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στα καύσιμα των κυψελών καυσίμου και κυρίως στην εξέλιξη της τεχνολογίας του υδρογόνου και των τρόπων παραγωγής του, ενώ στο επόμενο κεφάλαιο η μελέτη επικεντρώνεται στα μέσα αποθήκευσης του υδρογόνου (κλασικές και νέες τεχνολογίες) και στο πως μπορεί να μεταφερθεί.

Ιδιαίτερη έμφαση στα δύο επόμενα κεφάλαια δίνεται στο θερμοδυναμικό μοντέλο των κυψελών καυσίμου και γίνεται σύγκρισή τους με τις μηχανές εσωτερικής καύσης. Αναλύονται τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους, γίνεται διαχωρισμός τους ανάλογα με την περιοχή χρήσης, την θερμοκρασία λειτουργίας και αναφέρονται οι εμπορικές εφαρμογές τους.

Ακόμη, παρουσιάζεται η διεύθυνση της αιολικής ενέργειας στα συστήματα Α.Π.Ε. και μελετάται το απαραίτητο μαθηματικό υπόβαθρο. Παρουσιάζεται η εγχώρια και παγκόσμια ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας και γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στην υπεράκτια

εγκατάσταση ανεμογεννητριών, που αποτελεί καινοτομία στον τομέα της παραγωγής ενέργειας από τη δύναμη του ανέμου. Στη συνέχεια, γίνεται μία πιο λεπτομερής περιγραφή της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών, που έχει να κάνει με τα σχεδιαστικά και τα λειτουργικά κριτήρια, αλλά και με τις εφαρμογές τους.

Τέλος, στο 8^ο και 9^ο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή του συστήματος παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου με χρήση αιολικής ενέργειας που είναι εγκατεστημένο στο Λαύριο, παρουσιάζεται η χρησιμότητα και ο χώρος δραστηριοποίησης του προγράμματος Homer Energy και καταγράφονται τα συμπεράσματα της προσομοίωσης και της βελτιστοποίησης του συστήματος.

Λέξεις κλειδιά

Υδρογόνο, Αποθήκευση, Μεταφορά, Κυψέλη Καυσίμου, Αιολική Ενέργεια, Ανεμογεννήτριες, Θερμοδυναμικό Μοντέλο, Προσομοίωση, Βελτιστοποίηση, Homer Energy

ABSTRACT

The main goal of man over the centuries in addition to ensuring survival was to improve the quality of life. With the discovery of electricity and all of the applications linked to it, man's everyday life has improved almost in all areas, making electricity the cornerstone of modern life in the past centuries. Despite electricity being the largest deployment mechanism, its effect on nature has had negative results and has contributed significantly to the pollution of the planet.

In recent decades, attempts are being made to reduce the environmental problem caused by the production of the electricity, with the introduction and development of renewable energy sources in the energy sector. One of the latest technologies, developed a few decades ago, that are widely considered for power generation nowadays, are fuel cells, which function using hydrogen produced from R.E.S and stored in special tanks.

The aim of this thesis is to study the system of production and storage of hydrogen using wind energy in the region of Lavrion, conducted by the Center of Renewable Energy Sources in the European program RES2H2. The study includes simulation and optimization of the system using a PC (Personal Computer) and the assistance of the Homer Energy software.

More specifically, the first chapter presents the relationship between man and energy over the centuries and the gradual transition to Renewable Energy Sources. The following passage is a historical review of the fuel cell technology from its discovery to date, while in addition, analyzing the basic principle of its function.

Subsequently, in the second chapter there is an extensive reference to the fuels used in fuel cells and especially in the development of hydrogen technology and production methods, while the next chapter focuses on the study of hydrogen storage means (traditional and new technologies) and in the ways it can be transferred.

In the next two chapters particular emphasis is given to the thermodynamic model of the fuel cells and a comparison is made between them and the internal combustion engines. An analysis of the structural characteristics has also been made, distinguishing them according to the area of use, the operating temperature and their commercial use.

Furthermore, the penetration of wind energy in Renewable Energy Systems is presented and the necessary mathematical background is studied. The domestic and global wind energy development is also presented and a particular reference is made to offshore wind turbine installations, which is an innovation in the field of wind energy production from wind power. Subsequently, a more detailed description of the wind turbines technology is made, which refers to their design and operational criteria and their applications.

Finally, in the 8th and 9th chapter, a detailed description of the production and storage of the hydrogen system using wind power established in Lavrion is been made. Also, the usefulness and the operational area of the Homer Energy software is presented and the conclusions of the simulation and optimization of the system are recorded.

Key words

Hydrogen, Storage, Transportation, Fuel Cells, Wind Energy, Wind Turbines, Thermodynamic Model, Simulation, Optimization, Homer Energy

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Καθηγήτριά μου κυρία ΕΡΙΕΤΤΑ ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΔΟΥ υπό την επίβλεψη της οποίας πραγματοποιήθηκε η παρούσα πτυχιακή εργασία, καθώς και για την συνέπεια και συνεργασία της σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της. Επίσης, θα ήθελα να την ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε δίνοντάς μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία ΤΖΕΝ ΕΥΤΥΧΙΑ, τον κύριο ΔΡΟΥΓΚΑ ΝΙΚΟ τον κύριο ΜΑΝΩΛΗ ΖΟΥΛΙΑ και τον κύριο ΤΖΑΜΑΛΗ ΓΙΩΡΓΟ από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας και τα τμήματα Αιολικής Ενέργειας και Τεχνολογιών Υδρογόνου, για τις πολύτιμες συμβουλές τους και την παροχή όλων των απαραίτητων πληροφοριών και πηγών που συντέλεσαν στην διεξαγωγή της πτυχιακής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον πατέρα μου ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ ΑΓΓΕΛΑΔΑ και την μητέρα μου ΕΛΕΝΗ ΦΑΛΑΤΑΚΗ που με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2013
ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Π. ΑΓΓΕΛΑΔΑΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	14
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
1.2 ΑΝΘΡΩΠΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	14
1.3 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	16
1.4 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	17
1.5 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΚΑΥΣΙΜΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	23
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΚΟΣΜΟ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	23
2.1.1 ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	23
2.1.2 ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΚΑΙ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	24
2.2 ΚΑΥΣΙΜΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	25
2.2.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	25
2.2.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΕΝΑΝΤΙ ΤΩΝ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	28
2.2.3 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΕΝΑΝΤΙ ΤΩΝ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	30
2.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	31
2.3.1 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ	32
2.3.1.1 ΠΑΡΑΓΓΗ ΑΠΟ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ	32
2.3.1.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΕ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ	34
2.3.1.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΕ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ	34
2.3.1.4 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΕ ΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΥΓΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	35
2.3.1.5 ΥΨΗΛΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΥΔΑΤΟΣ – ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ ΥΔΑΤΟΣ	35
2.3.2 ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ	35
2.3.2.1 ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	36
2.3.2.2 ΥΨΗΛΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ	36
2.3.3 ΦΩΤΟΛΥΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ	37
2.3.3.1 ΦΥΤΟΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΝΕΡΟΥ	37
2.3.3.2 ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΝΕΡΟΥ	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	39
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	39
3.2 ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟ ΑΕΡΙΟ	42

3.3 ΚΡΥΟΓΟΝΙΚΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ.	43
3.4 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ ΤΟΥ ΣΕ ΥΛΙΚΑ.	45
3.4.1 ΧΗΜΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.	45
3.4.2 ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΥΔΡΙΔΙΑ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΔΡΙΔΙΑ.	46
3.4.2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΥΔΡΙΔΙΩΝ.	47
3.4.3 ΥΛΙΚΑ ΒΑΣΙΣΜΕΝΑ ΣΕ ΑΝΘΡΑΚΑ – ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ.	49
3.4.3.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ.	50
3.4.3.2 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ.	51
3.5 ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.	52

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ. 53

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΚΟΣΜΟ ΤΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.	53
4.2 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕ ΚΥΚΛΟ CARNOT.	54
4.2.1 ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.	55
4.2.2 ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ CARNOT.	56
4.2.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ.	57
4.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.	59
4.3.1 ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΗΣ.	60
4.3.2 ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ – ΚΑΤΑΛΥΤΗΣ.	63
4.3.3 ΣΤΡΩΜΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΑΕΡΙΩΝ.	64
4.3.4 ΔΙΠΟΛΙΚΕΣ ΠΛΑΚΕΣ.	65
4.3.5 ΑΛΛΑ ΜΕΡΗ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.	67
4.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	69

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΤΥΠΟΙ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ. 72

5.1 ΤΥΠΟΙ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.	72
5.2 ΑΛΚΑΛΙΚΕΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (AFC)	77
5.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.	77
5.2.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.	77
5.2.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.	78
5.2.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ.	78
5.2.5 ΕΜΠΟΡΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.	79
5.3 ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC)	80
5.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.	80
5.3.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.	80
5.3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.	81
5.3.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ.	81
5.3.5 ΕΜΠΟΡΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.	82

5.4 ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΑΜΕΣΗΣ ΜΕΘΑΝΟΛΗΣ (DMFC)	84
5.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	84
5.4.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	84
5.4.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	85
5.4.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	85
5.4.5 ΕΜΠΟΡΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	86
5.5 ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΦΩΣΦΟΡΙΚΟΥ ΟΞΕΟΣ (PAFC)	87
5.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	87
5.5.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	87
5.5.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ	88
5.5.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	88
5.5.5 ΕΜΠΟΡΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	89
5.6 ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΗΓΜΑΤΟΣ ΑΝΘΡΑΚΙΚΩΝ ΑΛΑΤΩΝ (MCFC)	90
5.6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	90
5.6.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	91
5.6.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ	92
5.6.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	92
5.6.5 ΕΜΠΟΡΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	93
5.7 ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΕΡΕΩΝ ΟΞΕΙΔΙΩΝ (SOFC)	94
5.7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	94
5.7.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	94
5.7.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ	95
5.7.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	96
5.7.5 ΕΜΠΟΡΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	96
5.8 ΑΛΛΑ ΕΙΔΗ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	98
5.8.1 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (RFC)	98
5.8.2 ΜΙΚΡΟΒΙΑΚΕΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (MFC)	98
5.8.3 ΠΡΩΤΟΝΙΚΕΣ ΚΕΡΑΜΙΚΕΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (PCFC)	98
5.8.4 ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ – ΑΕΡΑ (ZAFC)	99

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

6.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	100
6.2 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	100
6.2.1 Η ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ	101
6.2.2 Η ΦΥΣΗ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ	102
6.2.3 Η ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟΝ ΚΟΣΜΟ	102
6.2.4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	106
6.3 ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ – ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	109
6.3.1 Η ΔΥΝΑΜΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ	109
6.3.2 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΙΕΣΗ	110
6.3.3 Η ΠΙΕΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ	110
6.3.4 ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΙΣΧΥΣ	111
6.4 ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	113
6.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	115

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ	117
7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΕΣ.....	117
7.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	117
7.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	119
7.3.1 ΤΥΠΟΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	119
7.3.1.1 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ.....	119
7.3.1.2 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΚΑΘΕΤΟΥ ΑΞΟΝΑ.....	123
7.3.2 ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	126
7.3.3 ΤΥΠΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ. .	127
7.4 Η ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ.....	132
7.5 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΓΧΩΡΙΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	134
7.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	134
7.7 ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ON – GRID).....	135

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΑΠΟ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΟ ‘ΚΕΝΤΡΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΚΑΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ’ ΣΤΟ ΛΑΥΡΙΟ ΑΤΤΙΚΗΣ	137
8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	137
8.2 ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	139
8.3 ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΤΜΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	141
8.3.1 ΜΟΝΑΔΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ.....	141
8.3.2 ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΔΡΙΔΙΩΝ (ΜΕΤΑΛΛΟΥΔΡΙΔΙΩΝ).....	142
8.3.3 ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	144
8.3.4 ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	144
8.3.5 ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΦΙΑΛΩΝ.....	145
8.3.6 ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΑ.....	145
8.3.7 ΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	147
8.3.8 ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ.....	147

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ‘HOMER ENERGY’, ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ, Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ - ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	150
9.1 HOMER ENERGY–ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	150
9.1.1 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ.....	151
9.1.2 ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ‘ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ’ ΩΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	152

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.	
9.1.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ, ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ, ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ.	153
9.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΧΡΗΣΤΗ.	154
9.3 ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΟΙ ΠΕΛΑΤΕΣ – ΧΡΗΣΤΕΣ.	155
9.4 ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.	156
9.5 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΙΑ ΠΑΡΟΜΟΙΑ ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.	174
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.	176
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.	184
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.	185
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.	190

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

1.1 Εισαγωγή

Η ενέργεια αποτελεί ένα αγαθό πάνω στο οποίο στηρίζεται όλη η τεχνολογική ανάπτυξη και η σύγχρονη ζωή. Ανέκαθεν το ενεργειακό ζήτημα, λόγω της διεθνούς αγοράς που έχει διαρθρωθεί πάνω σε αυτό, είχε πολιτικές, οικονομικές και κοινωνικές διαστάσεις. Τα τελευταία χρόνια, έχει αρχίσει να αποκτά μια πολιτική διάσταση που στην ουσία ήταν ξεχασμένη από την εποχή της πετρελαϊκής κρίσης του 1985. Η απότομη αύξηση των τιμών από το 2000, σε συνδυασμό με τις γεωπολιτικές εντάσεις και τις πρωτοβουλίες για την προστασία του περιβάλλοντος, έχουν σαν συνέπεια, οι επιλογές των ενεργειακών πηγών και των τιμών της ενέργειας να είναι όχι μόνο στην πρώτη γραμμή της επικαιρότητας αλλά και να αποσχολούν τους καταναλωτές. Οι επαναλαμβανόμενες κρίσεις και διακρατικές εντάσεις από το 2006 και μετά, επιρεάζουν πρώτιστα την αγορά ενέργειας και εγείρουν προβληματισμούς, σχετικά με το θέμα της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού.

Η ενεργειακή διαχείριση ως στρατηγική καλείται να αντιμετωπίσει και να δώσει απαντήσεις πάνω σε καίρια ζητήματα όπως, το μέγεθος της τιμής των ενεργειακών προϊόντων που θα οδηγήσει στην επίτευξη των νέων στόχων της Ευρωπαϊκής Ενεργειακής Πολιτικής, το είδος των ενεργειακών επενδύσεων που πρέπει να πραγματοποιηθούν στο μέλλον και η μορφή του πλαισίου λειτουργίας της ενεργειακής αγοράς.

Οι εγχώριοι στόχοι θα πρέπει να εναρμονιστούν γύρω από δύο βασικούς άξονες. Πρώτον, η ενέργεια θα πρέπει να είναι φυσικά και οικονομικά εφικτή και δεύτερον, η χρήση και η παραγωγή της ενέργειας θα πρέπει να συμβαδίζει με τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης. [1]

1.2 Άνθρωπος και ενέργεια

Η εξέλιξη της ανθρωπότητας είναι στενά συνδεδεμένη με τη χρήση ενέργειας. Δεν είναι τυχαίο ότι οι ονομασίες των ιστορικών περιόδων της ανθρωπότητας, λίθινη εποχή, εποχή του σιδήρου, εποχή του χαλκού, προέκυψε από την δυνατότητα των ανθρώπων να διαχειρίζονται διαφορετικές μορφές ενέργειας.

Πιθανότατα πριν από 500.000 χρόνια ο άνθρωπος έμαθε να χειρίζεται τη φωτιά. Την λίθινη εποχή πριν από 30.000 χρόνια, ο άνθρωπος άρχισε να χρησιμοποιεί τη φωτιά στο μαγείρεμα, για να ζεσταθεί και για φωτισμό, ενώ με το πέρασμα των χρόνων η φωτιά βρήκε εφαρμογή στην υαλουργία και τη μεταλλουργία. Αργότερα, ο άνθρωπος ανακάλυψε τη δύναμη του ανέμου (αιολική ενέργεια), την οποία χρησιμοποίησε ως μηχανική ενέργεια για την ύδρευση και την άδρευση, την άλεση των δημητριακών και τις θαλάσσιες μεταφορές.

Οι πρώτες προσπάθειες κατασκευής και χρήσης πιο πολύπλοκων μηχανών εμφανίζεται το 300 π.Χ. Ο Αρχιμήδης αναφέρεται ανάμεσα στους πρώτους εφευρέτες, καθώς το 212 π.Χ. με τα κοίλα κάτοπτρα που κατασκεύασε, εκμεταλλεύτηκε την ηλιακή ενέργεια και έκαψε τα ρωμαϊκά πλοία κατά την πολιορκία των Συρακουσών. Ο Ήρων ο Αλεξανδρεύς το 130 π.Χ κατασκευάζει την πρώτη θερμική μηχανή που αποτελείται από μια περιστρεφόμενη σφαίρα με δύο ακροφύσια και εκμεταλλεύεται τη δύναμη του ατμού.

Κατά τη διάρκεια του Μεσαίωνα (467 – 1453 μ.Χ.) και της Αναγέννησης (1454 – 1700 μ.Χ), εμφανίζονται μερικές από τις σπουδαιότερες εφευρέσεις, όπως το υγρό πυρ (7^{ος} αιώνας Καλλίνικος), την πυξίδα (1180 Δυναστεία των Χαν – Κίνα), το τηλεσκόπιο (1608 Χανς Λιπερσέι και Ζαχαρίας Γιάνσεν – Ολλανδία), το εκκρεμές (1673 Κρίστιαν Χόιγκενς), ενώ διατυπώνονται οι πρώτοι νόμοι της φυσικής (νόμος βαρύτητας, νόμος παγκόσμιας έλξης, νόμοι διατήρησης της ενέργειας).

Από το 3000 π.Χ. αναφέρεται ήδη η χρήση του άνθρακα στην Κίνα, ενώ το 100 μ.Χ. στην Αγγλία ο άνθρακας χρησιμοποιείται για μαγείρεμα. Στα μέσα του 17^{ου} αιώνα, ξεκίνησε εκτεταμένα η εξόρυξη του, ενώ το 1600 το εμπόριο του άνθρακα απέκτησε διεθνή διάσταση. Παρότι η χρήση του άνθρακα πυροδότησε σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα, η αναγκαιότητα της χρήσης του κατέστησε αδύνατη την αποσύνδεση της οικονομίας από τον άνθρακα. Ο 18^{ος} αιώνας σηματοδεύτηκε από την ανακάλυψη της πρώτης ατμομηχανής από τον Thomas Newcomen, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την άντληση νερού. Το 1765, ο James Watt βελτιώνει σημαντικά την ατμομηχανή, δίνοντας της την δυνατότητα εκτός από άντληση νερού, να μπορεί να κινεί μηχανές. Το 1799 ο Alessandro Volta, ανακαλύπτει την πρώτη μπαταρία, δίνοντας τη δυνατότητα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε αδιάλειπτο χρόνο.

Στις αρχές του 19^{ου} αιώνα η χρησιμοποίηση ατμομηχανών στην βιομηχανική παραγωγή αγαθών, οδηγεί την οικονομία των χωρών της βορειοδυτικής Ευρώπης στη 'Βιομηχανική Επανάσταση'. Έτσι, για πρώτη φορά στη παγκόσμια ιστορία, η ενέργεια μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε κάθε χώρο, κάθε ώρα και σε μεγάλες ποσότητες. Παράλληλα, η χρήση της ατμομηχανής επεκτείνεται και στα μέσα μεταφοράς, το 1804 στο σιδηρόδρομο και το 1807 στη ναυτιλία.

Η πρώτη εξόρυξη πετρελαίου λαμβάνει χώρα το 1960 στη Βόρεια Αμερική, αλλά η χρήση του ήταν πολύ περιορισμένη. Η ανακάλυψη των κοιτασμάτων πετρελαίου οδήγησε τον τεχνικό κόσμο του 20^{ου} αιώνα στην ανάγκη εφεύρεσης συστημάτων ικανών να αξιοποιήσουν το καινούριο καύσιμο. Η πρώτη μηχανή εσωτερικής καύσης κατασκευάζεται το 1860 από τον Γάλλο Jean – Joseph Etienne Lenoir και τελειοποιήθηκε το 1876 από τον Γερμανό μηχανικό Nikolaus – August Otto, ο οποίος κατασκεύασε την πρώτη τετράχρονη μηχανή. Το 1886 ο Γερμανός μηχανικός Daimler κατασκευάζει το πρώτο τετράτροχο αυτοκίνητο με μηχανή εσωτερικής καύσης.

Το 1901 γενικεύεται η πετρελαιοκινούμενη μεταφορά. Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα γενικοποιείται η χρήση του ηλεκτρισμού και μεταμορφώνεται ποιοτικά η ζωή των ανθρώπων, ενώ η βιομηχανία παρουσιάζει την μέγιστη ακμή της. Το 1942 ο Ιταλός φυσικός Enrico

Fermi σχεδιάζει και θέτει σε λειτουργία τον πρώτο πυρηνικό αντιδραστήρα στις Ηνωμένες Πολιτείες.

Ο 20^{ος} αιώνας όμως χαρακτηρίζεται από την τρομακτική αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας ενώ συσσωρεύονται πολλά προβλήματα στο περιβάλλον, ειδικά με τη χρήση πυρηνικής ενέργειας από το 1970. Για αυτό και τις τελευταίες δεκαετίες το ενδιαφέρον στρέφεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθώς η άλλη πολλά υποσχόμενη τεχνολογία της πυρηνικής σύντηξης δεν έχει αποφέρει τα αναμενόμενα αποτελέσματα. [2][3]

1.3 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τις λιγότερες δυνατές εκπομπές αποτελεί φλέγον ζήτημα εξαιτίας της ήδη επιβαρυνμένης κατάστασης του περιβάλλοντος. Η σταδιακή αποδέσμευση από τους συμβατικούς τρόπους παραγωγής που βασίζονται στην εκμετάλλευση ορυκτών καυσίμων είναι επιτακτική ανάγκη. Η λύση λοιπόν, μπορεί να δοθεί με στροφή προς τις 'Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας', καθώς όχι μόνο είναι φιλικές προς το περιβάλλον, αλλά επιπλέον είναι και ανεξάντλητες. Η αιολική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμική ενέργεια, η ενέργεια από τα θαλάσσια κύματα και τη βιομάζα, τα μικρά υδροηλεκτρικά και οι κυψέλες καυσίμου είναι οι κυριότερες μορφές ΑΠΕ. [4]

Η ανάγκη απεξάρτησης από τα συμβατικά καύσιμα οδήγησε τους επιστήμονες στη μελέτη σύγχρονων εναλλακτικών τρόπων μετασχηματισμού άλλων μορφών ενέργειας σε ηλεκτρική. Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν σήμερα μία ελκυστική δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κυρίως από υδρογόνο και συγκαταλέγονται μεταξύ των πιο ελπιδοφόρων τεχνολογιών του μέλλοντος για την αντικατάσταση των συσσωρευτών. Η λειτουργία τους στηρίζεται σε απευθείας μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Το ενδιαφέρον προς τις κυψέλες καυσίμου εμφανίστηκε τις τελευταίες δεκαετίες λόγω των πολλών περιβαλλοντικά αρνητικών συνεπειών που παρουσιάζει η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικά ορυκτά καύσιμα. Μερικές από αυτές τις αρνητικές συνέπειες είναι η σοβαρή μόλυνση του περιβάλλοντος που επιφέρουν, καθώς και οι οικονομικές επιπτώσεις που προκαλούνται από την εξάντληση των αποθεμάτων των συμβατικών ορυκτών καυσίμων.

Οι κυψέλες καυσίμου προσφέρουν 'καθαρή' ηλεκτρική ενέργεια με υψηλό βαθμό απόδοσης και μεγάλη βιωσιμότητα. Οι λόγοι αυτοί οδήγησαν στη λεπτομερή μελέτη της νέας αυτής τεχνολογίας, η οποία αντιμετωπίζεται πλέον ως μία ελπιδοφόρα δυνατότητα παραγωγής ενέργειας. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να καλύψουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπως, η ηλεκτροδότηση ενός σπιτιού ή τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης που παρουσιάζουν άμεσο ενδιαφέρον, δηλαδή η εφαρμογή σε ηλεκτρικά και υβριδικά συστήματα. [5]

1.4 Ιστορική αναδρομή κυψελών καυσίμου

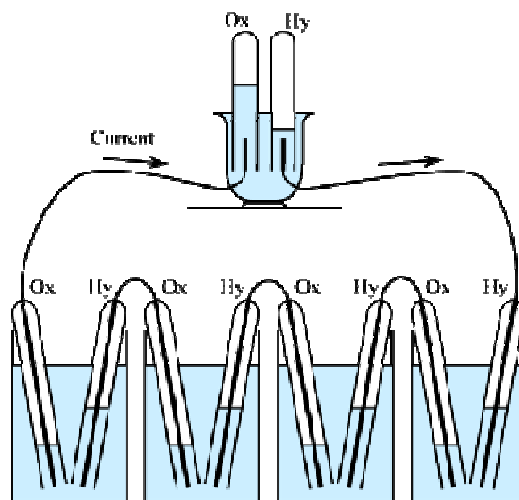


Ο Sir William Robert Grove (11 Ιουλίου 1811 – 1 Αυγούστου 1896) ήταν ένας Ουαλός δικαστής και φυσικός επιστήμονας. Είχε προβλέψει τη γενική θεωρία της διατήρησης της ενέργειας και ήταν πρωτοπόρος της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου. Το 1839, ο Grove ανέπτυξε μία πρώτυπη μορφή ηλεκτρικών κυψελών, την κυψέλη Grove, η οποία χρησιμοποιούσε ηλεκτρόδια από ψευδάργυρο και λευκόχρυσο που εκτίθονταν σε δύο οξέα διαχωρισμένα από ένα πορώδες κεραμικό δοχείο.

Οι δοκιμές της έρευνάς του περιελάμβαναν την εν σειρά και εν παραλλήλω συνδεσμολογία αυτού του ισχυρού συσσωρευτή. [6] [8] [12]

Εικόνα 1. Sir William Grove.

Ο Grove ανακοίνωσε την τελευταία αυτή εξέλιξη των ερευνών του στην Ακαδημία των Επιστημών στο Παρίσι το 1839. Το 1842, ο Sir William Grove ανέπτυξε την πρώτη κυψέλη καυσίμου, την οποία ο ίδιος αποκαλούσε 'αέρια βολταϊκή μπαταρία', η οποία παρήγαγε ηλεκτρική ενέργεια με συνδιασμό υδρογόνου και οξυγόνου. Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης της κυψέλης καυσίμου ο Grove κατάλαβε πως ο ατμός θα μπορούσε να διαχωριστεί σε οξυγόνο και υδρογόνο, καθώς και ότι η διαδικασία αυτή είναι αντιστρέψιμη. Ήταν λοιπόν, ο πρώτος άνθρωπος που αποδέχτηκε τη θερμική διάσπαση των μορίων στα συστατικά τους άτομα. Ο Faraday, ο Gassiot και ο Edward William Brayley ήταν οι πρώτοι στους οποίους ο Grove έκανε επίδειξη των αποτελεσμάτων του. Η επιστημονική του έρευνα τον οδήγησε επίσης σε πρόωρες γνώσεις σχετικά με την φύση του ιονισμού. [7] [8]



Εικόνα 2. Το διάγραμμα της βολταϊκής μπαταρίας αερίου του Grove, 1839.

Το 1893, ο Friedrich Wilhelm Ostwald ένας από τους ιδρυτές στο χώρο της φυσικοχημείας, κατανόησε σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο λειτουργίας των κυψελών καυσίμου. Προσδιόρισε πειραματικά τους διασυνδεδεμένους ρόλους των διαφόρων συνιστωσών των κυψελών καυσίμου: ηλεκτρόδια, ηλεκτρολύτη, οξειδωτικά και αναγωγικά μέσα, ανιόντα και κατιόντα.

Ο Grove είχε σκεφτεί ότι η δράση στη μπαταρία αερίου εμφανιζόταν στο σημείο επαφής μεταξύ των ηλεκτροδίων, του αερίου και του ηλεκτρολύτη, αλλά ήταν μια απώλεια που δεν μπορούσε να εξηγήσει. Ο Ostwald με βάση την πρωτοποριακή εργασία του που αφορούσε τις φυσικές ιδιότητες και τις χημικές αντιδράσεις, έλυσε το αίνιγμα της μπαταρίας αερίων του Grove. Η έρευνά του από την πλευρά της χημείας των κυψελών καυσίμου, έθεσε τα θεμέλια για τους μετέπειτα ερευνητές των κυψελών καυσίμου. [9]

Ο όρος 'κυψέλη καυσίμου' χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1889 από τον Charles Langer και τον Ludwig Mond, οι οποίοι ερευνούσαν κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούσαν αέριο άνθρακα ως καύσιμο. Περαιτέρω προσπάθειες για τη μετατροπή του άνθρακα απευθείας σε ηλεκτρισμό έγιναν στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, αλλά η τεχνολογία γενικά παρέμεινε ασαφής.

Το 1932, ο καθηγητής μηχανικής του Cambridge Francis Bacon, τροποποίησε τον εξοπλισμό του Langer και του Mond για να αναπτύξει την πρώτη αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC). Το 1959 ο Bacon παρουσίασε το πρώτο πρακτικό σύστημα κυψελών καυσίμου ισχύος 5 kW. Σε μικρό χρονικό διάστημα, ο Harry Karl Ihrig τοποθέτησε μία τροποποιημένη σε σχέση με του Bacon κυψέλη καυσίμου, ισχύος 15 kW στο τρακτέρ του Allis Chalmers. Στη συνέχεια ο Allis Chalmers σε συνεργασία με την πολεμική αεροπορία των Ηνωμένων Πολιτειών, ανέπτυξαν μία σειρά από οχήματα που κινούνταν με κυψέλες καυσίμου συμπεριλαμβανομένου, ενός ανυψωτικού μηχανήματος και ενός υποβρύχιου σκάφους.

Στη συνέχεια αλκαλικές κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιήθηκαν στις διαστημικές αποστολές της NASA, στα προγράμματα Gemini, Apollo και Spacelab. Η κίνηση αυτή ενθάρρυνε τους επιστήμονες ανά τον κόσμο να ξεκινήσουν εκτεταμένες έρευνες γύρω από τις κυψέλες καυσίμου τόσο σε πανεπιστήμια και σε εργαστήρια, όσο και σε βιομηχανίες. Ωστόσο, ο αρχικός ενθουσιασμός εξασθένησε σύντομα εξ' αιτίας του υψηλού κόστους. Τα επόμενα χρόνια αναπτύχθηκαν διάφορα είδη κυψελών καυσίμου και ο στόχος ήταν να γίνει πρακτικά δυνατή η κατασκευή κυψελών που να μπορούν να παράγουν αρκετά MW και κυψελών οικονομικά προσητών και αποδοτικών ώστε να χρησιμοποιηθούν στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Η Αμερική και η Ιαπωνία ξεκίνησαν ερευνητικά προγράμματα γύρω από αυτή την πρωτοπόρα τεχνολογία με τις κυβερνήσεις να προσφέρουν τεράστια οικονομικά ποσά, την ώρα που οι χώρες της Ευρώπης παρέμεναν σε αδράνεια μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1980 όπου κάποια ερευνητικά προγράμματα έκαναν την εμφάνισή τους. Επίσης, στη δεκαετία του 1980 το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ ανέθεσε μελέτες σχετικές με τη χρήση κυψελών καυσίμου σε υποβρύχια, αφού η τεχνολογία αυτή ήταν πολύ αποδοτική, με

μηδενικές εκπομπές και προσέφερε σημαντικά λειτουργικά πλεονεκτήματα και αθόρυβη λειτουργία. Το 1983, η Καναδική εταιρεία Ballard άρχισε έρευνες γύρω από τις κυψέλες καυσίμου και έμελλε να γίνει ένας από τους σημαντικότερους φορείς σε ότι αφορά την κατασκευή σταθερών και φορητών κυψελών καυσίμου.

Στη δεκαετία του 1990, η τεχνολογική προσοχή στράφηκε στις 'κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων' (PEMFC) και τις 'κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων' (SOFC), ιδιαίτερα για μικρές σταθερές εφαρμογές. Αυτοί οι δύο τύποι κυψελών καυσίμου φάνηκε να προσφέρουν μια πιο άμεση εμπορική δυνατότητα, λόγω του χαμηλού κόστους ανά μονάδα και την αύξηση του αριθμού των δυνητικών αγορών. Η Γερμανία, η Ιαπωνία και το Ηνωμένο Βασίλειο αφιέρωσαν σημαντικές κρατικές επιχορηγήσεις στην ανάπτυξη των PEMFC και SOFC ώστε να βρουν εφαρμογή σαν εφεδρικές μονάδες ισχύος σε τηλεπικοινωνιακές εγκαταστάσεις και σε συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού – θερμότητας (ΣΗΘ). Την ίδια περίοδο εξελίχθηκαν και οι 'κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης' (DMFC), οι οποίες προσαρμόστηκαν σε φορητές συσκευές που λειτουργούν με χρήση μεθανόλης. Οι DMFC χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για να προσφέρουν ηλεκτρική ισχύ σε ηλεκτρονικό εξοπλισμό στρατιωτών σε απομακρυσμένες βάσεις, αλλά και σαν παροχή ισχύος σε φορητές συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα και φορητοί υπολογιστές.

Η περιβαλλοντική ευαισθησία οδήγησε τους ερευνητές στην ανάπτυξη των κυψελών καυσίμου για να μειώσουν την χρήση των συμβατικών πηγών ενέργειας. Ο στόχος ήταν και είναι μέχρι σήμερα η τεχνολογική τελειοποίηση και εφαρμογή των κυψελών καυσίμου στην βαριά βιομηχανία, την βιομηχανία οχημάτων και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς προσφέρουν υψηλή απόδοση, υψηλή παραγωγή πυκνότητας ρεύματος και μηδενική εκπομπή ρύπων στο περιβάλλον. [10] [11]

Σήμερα, εν έτει 2013 πολλές εταιρείες έχουν εξελίξει και προσαρμόσει κυψέλες καυσίμου σε ηλεκτρικά οχήματα. Ωστόσο, η αυτονομία που προσφέρουν δεν θεωρείται ακόμα ικανοποιητική και το κόστος είναι μεγάλο ώστε να προχωρήσουν οι αυτοκινητοβιομηχανίες σε μαζική παραγωγή. Τα λεωφορεία ήταν και εξακολουθούν να είναι μία πολλά υποσχόμενη αγορά για τις κυψέλες καυσίμου, λόγω του συνδιασμού υψηλής απόδοσης, μηδενικών εκπομπών ρύπων και την ευκολία του ανεφοδιασμού, καθώς τα οχήματα αυτά κινούνται συνέχεια σε καθορισμένες διαδρομές και ο ανεφοδιασμός τους με υδρογόνο γίνεται τακτικά στις βάσεις τους. Οι μεγαλύτερες κατασκευάστριες εταιρείες αυτοκινήτων και λεωφορείων που χρησιμοποιούν τεχνολογία κυψελών καυσίμου και καύσιμο υδρογόνο είναι οι εξής:

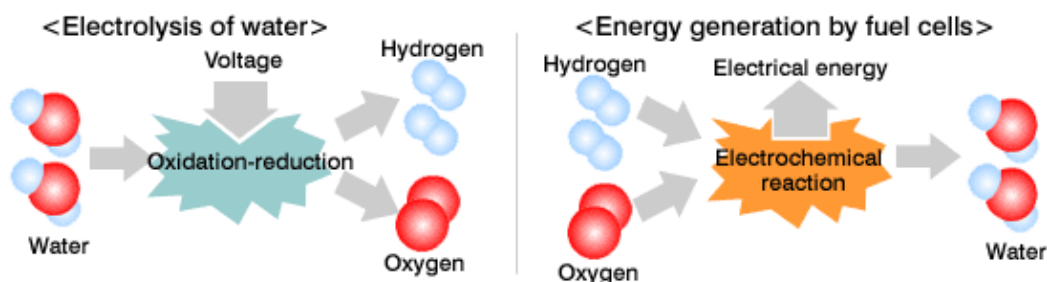
Ευρωπαϊκές → Audi, BMW, Daimler Benz, Fiat, Alfa Romeo, Morgan, Peugeot, Citroen, Renault, Volvo, VW

Αμερικανικές → Ford, GM, Chrysler

Ασιατικές → Daihatsu, Honda, Hyundai, Kia, Mazda, Mitsubishi, Nissan, Suzuki, Toyota [11]
[13]

1.5 Αρχή λειτουργίας

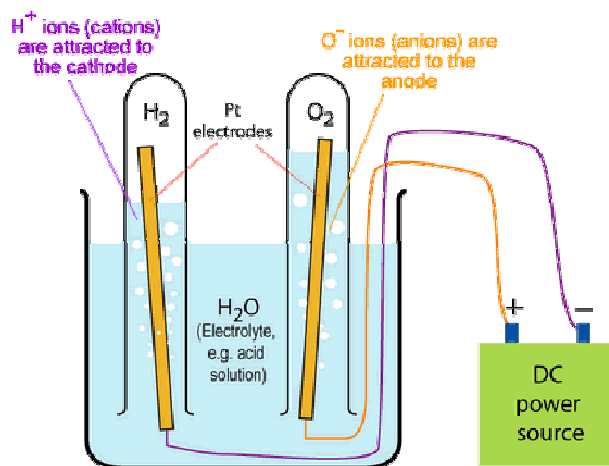
Η βασική αρχή λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου, θα μπορούσαμε να πούμε πως είναι το αντίθετο της ηλεκτρόλυσης. Ηλεκτρόλυση είναι η διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο, όταν μέσα από αυτό ρέει ηλεκτρικό ρεύμα. Στις κυψέλες καυσίμου, το υδρογόνο 'ξαναενώνεται' με το οξυγόνο παράγοντας νερό και ηλεκτρικό ρεύμα.



Εικόνα 3. Αριστερά η σχηματική απεικόνιση της ηλεκτρόλυσης. Δεξιά η σχηματική απεικόνιση της αντίστροφης διαδικασίας που συντελείται από τις κυψέλες καυσίμου.

Οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν παρόμοια με μία μπαταρία. Μπορούν να ταξινομηθούν βάση του τύπου του ηλεκτρολύτη τον οποίο χρησιμοποιούν. Το πιο γνωστό είδος είναι η κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM). Η δομή και η αρχή λειτουργίας των κυψελών καυσίμου έχει ως εξής:

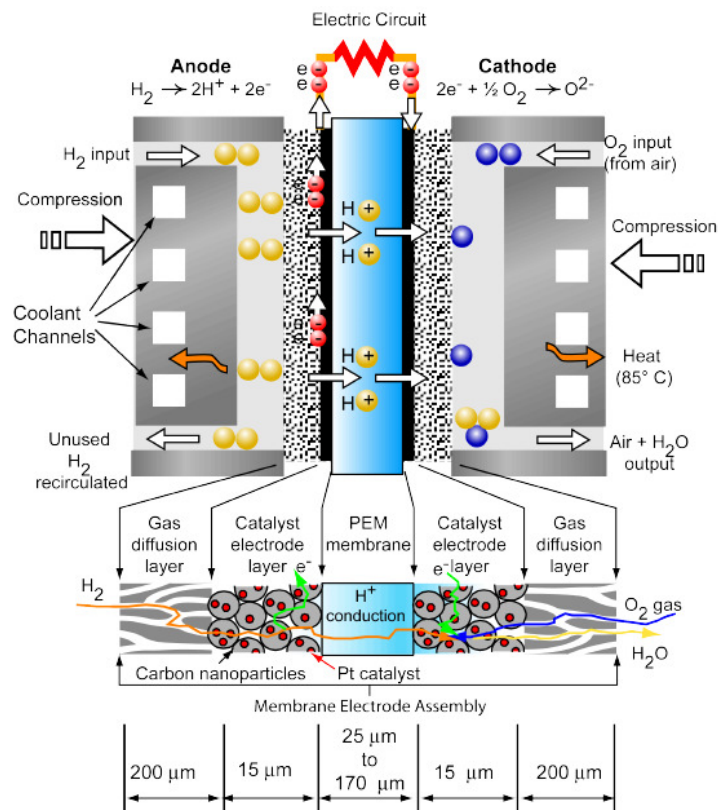
Δύο ηλεκτρόδια διαχωρίζονται από μία μεμβράνη η οποία έχει το ρόλο του ηλεκτρολύτη. Μεταξύ του ηλεκτρολύτη και των ηλεκτροδίων υπάρχει ένα στρώμα καταλύτη. Συνοπτικά, η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρισμού περιγράφεται από τα παρακάτω επιμέρους στάδια.



Εικόνα 4. Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτρόλυσης νερού.

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

Τα θετικά φορτισμένα ιόντα του υδρογόνου διαπερνούν τον ηλεκτρολύτη και ενώνονται με το οξυγόνο το οποίο τροφοδοτεί την κάθοδο, το θετικό φορτισμένο ηλεκτρόδιο, και παράγεται νερό. Την ομογενή διάχυση του οξυγόνου στον καταλύτη εξασφαλίζει η κατασκευή του ηλεκτροδίου. Ο καταλύτης αναλαμβάνει την επιτάχυνση της δημιουργίας του νερού από τα συστατικά του. Στο σχηματισμό του νερού συμμετέχουν εκτός των μορίων του οξυγόνου και των ιόντων του υδρογόνου, τα ηλεκτρόνια τα οποία διοχετεύτηκαν μέσω του εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος στην κάθοδο, στην αρχή της διαδικασίας.



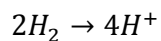
Εικόνα 5. Το ηλεκτρικό κύκλωμα και οι διαδικασίες που συντελούνται στην είσοδο και την έξοδο του εσωτερικού μίας κυψέλης καυσίμου.

Τα δύο στρώματα καταλύτη χρησιμεύουν στην αύξηση της ταχύτητας των αντιδράσεων διάσπασης του μορίου του υδρογόνου και της ένωσης υδρογόνου – οξυγόνου για τη δημιουργία νερού, στην άνοδο και στην κάθοδο αντίστοιχα. Συνήθως, αποτελείται από ένα

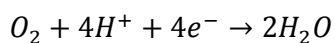
πολύ λεπτό στρώμα λευκόχρυσου (Pt) πάνω σε επιφάνεια άνθρακα. Το στρώμα αυτό είναι και το μέρος του καταλύτη το οποίο βρίσκεται σε επαφή με τη μεμβράνη. Ο καταλύτης είναι τραχύς και πορώδης ώστε να μεγιστοποιεί την εκτεθειμένη επιφάνειά του.

Οι χημικές αντιδράσεις οι οποίες χαρακτηρίζουν τα παραπάνω βήματα, συνοψίζονται ως εξής:

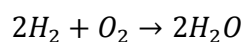
Στην άνοδο:



Στην κάθοδο:



Ολική αντίδραση:



Οι παραπάνω αντιδράσεις σε μία απλή κυψέλη καυσίμου παράγουν περίπου 0.7 Volts. Προκειμένου να παραχθούν μεγαλύτερες και πρακτικά αξιοποιήσιμες τάσεις, χρησιμοποιούνται περισσότερες κυψέλες σε σειρά (fuel cell stack). [14]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΚΑΥΣΙΜΑ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

2.1 Εισαγωγή στον κόσμο του υδρογόνου

Στα μέσα του 2004, αν κοιτάζε κανείς στην μηχανή αναζήτησης 'Google' την φράση 'χρήση του Υδρογόνου', θα έβρισκε περίπου 1.910.000 καταχωρήσεις. Αυτό, καλύτερα από οποιοδήποτε άλλο στατιστικό στοιχείο, πιστοποιεί το τεράστιο ενδιαφέρον που υπάρχει γύρω από το συγκεκριμένο αέριο. Για την παραγωγή της αμμωνίας και μόνο, υπήρξε 46 φορές αύξηση στη χρήση του υδρογόνου από το 1946 έως το 2003, όταν πάνω από 19 εκατομμύρια τόνους του αερίου αυτού παραγόταν για αυτόν και μόνο τον σκοπό.

Η επικείμενη μαζική εισαγωγή των κυψελών καυσίμου (fuel cells) στην οικονομία θα προκαλέσει αύξηση της ζήτησης για υδρογόνο και η παραγωγή του θα αυξηθεί πολύ πιο γρήγορα στο εγγύς μέλλον. Τεχνικές για μαζική παραγωγή αλλά και για τοπική παραγωγή (ειδικά σε οχήματα), θα τελειοποιηθούν από τις καθιερωμένες στο χώρο του υδρογόνου βιομηχανίες και από ένα πλήθος νέων παραγωγών που θα προσπαθήσουν να βγάλουν κέρδος από αυτή την νέα αγορά.

Είναι σημαντικό να αρχίσουμε με την σαφή κατανόηση ότι αν και εξαιρετικά άφθονο, το υδρογόνο, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, δεν είναι πηγή ενέργειας. Μεγάλο μέρος του υφιστάμενου υδρογόνου είναι σε μορφή νερού – τέφρα υδρογόνου – και απαιτείται σημαντική ενέργεια για την εκχύλιση του επιθυμητού στοιχείου. Το υδρογόνο είναι στην καλύτερη περίπτωση, ένας εξαιρετικός φορέας ενέργειας και πολλά υποσχόμενο σε εφαρμογές, όπως:

1. Καύσιμο για χερσαία και θαλάσσια οχήματα, ειδικά όταν χρησιμοποιείται σε κυψέλες καυσίμου υψηλής απόδοσης.
 2. Καύσιμο για διαστημόπλοια λόγω της υψηλής αναλογίας ενέργειας προς βάρος, όταν είναι σε κρυογονική μορφή.
 3. Βιομηχανικό και εγχώριο καύσιμο για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας.
 4. Ένα μέσο για τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.
- [15]

2.1.1 Οικονομία υδρογόνου

Ως 'Οικονομία υδρογόνου' καλούμε ένα είδος συστημάτων όπου οι κυψέλες υδρογόνου λειτουργούν παράλληλα με ηλεκτρολύτες και τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως ηλιακή ή αιολική, για τη δημιουργία ενός συστήματος κλειστού βρόχου απολύτως

φιλικού προς το περιβάλλον. Σε μια τέτοια διάταξη οι κυψέλες καυσίμου θα διαδραματίσουν πρωτεύοντα ρόλο, με κυριότερο πλεονέκτημα την προσαρμοστικότητα τους. Όταν υπάρχει ηλιοφάνεια ή φυσάει ικανοποιητικός αέρας, ο ηλεκτρισμός που παράγεται μέσω της ηλιακής και αιολικής ενέργειας χρησιμοποιείται για την κάλυψη της ζήτησης, ενώ το πλεόνασμα ενέργειας παράγει υδρογόνο με τη βοήθεια του ηλεκτολύτη. Το υδρογόνο αυτό αποθηκεύεται και όταν η ηλιακή ή αιολική ενέργεια δεν θα επαρκεί για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, οι κυψέλες τίθενται σε λειτουργία, καταναλώνουν υδρογόνο και παρέχουν την απαραίτητη ισχύ. Από ένα τέτοιο σύστημα τα ορυκτά καύσιμα αποκλείονται εντελώς.

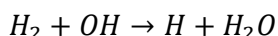
Προς το παρόν, είναι αβέβαιο πότε η 'οικονομία υδρογόνου' θα γίνει πραγματικότητα. Πολλές μελέτες έχουν εξετάσει τα τεχνοοικονομικά εμπόδια που παρουσιάζονται και καθιστούν σαφές ότι η μετάβαση στην 'οικονομία υδρογόνου' θα είναι χρονοβόρα, δύσκολη και δαπανηρή. Ωστόσο, είναι σημαντικό να συνειδητοποιήσουμε πως σε έναν κόσμο ορυκτών καυσίμων οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να παρέχουν αυξημένη απόδοση, μεγαλύτερη ευελιξία, μειωμένες εκπομπές ρύπων και άλλα πλεονεκτήματα συγκρινόμενες με τις συμβατικές τεχνολογίες ισχύος. [18]

2.1.2 Υδρογόνο και φαινόμενο του θερμοκηπίου

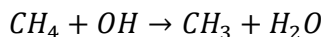
Η πλειοψηφία εκπομπών H_2 προέρχονται από την οξείδωση υδρογονανθράκων καθώς και την καύση βιομάζας. Συνήθως όταν το υδρογόνο απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα δεν καίγεται με οξυγόνο επειδή η συγκέντρωση και η θερμοκρασία του είναι συνήθως πολύ χαμηλές για να ευνοήσουν την αντίδραση. Από τη στιγμή που θα απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα, το υδρογόνο υπολογίζεται πως έχει χρόνο ζωής 2 με 10 χρόνια. [17]

Αν οι κυψέλες καυσίμου γίνουν ευρέως διαδεδομένες, οι ποσότητες υδρογόνου στην ατμόσφαιρα θα πολλαπλασιαστούν. Διαρροές υδρογόνου μπορούν να προκύψουν κατά τη διάρκεια της παραγωγής του, της συμπίεσης, της αποθήκευσης και της χρήσης του σε οχήματα. Ακόμη, υδρογόνο μπορεί να διαρρεύσει κατά τη μεταφορά του, ιδιαίτερα όταν αυτή γίνεται σε μεγάλες αποστάσεις με τη βοήθεια αγωγών. Επειδή το υδρογόνο είναι από τα μικρότερα μόρια, είναι πιο πιθανό να διαφύγει από μικρές εσοχές, σε σχέση με άλλα καύσιμα. Πέραν των διαρροών, υδρογόνο μπορεί να απελευθερωθεί επίτηδες στον αέρα, όπως γίνεται για παράδειγμα σε ορισμένες κυψέλες καυσίμου που το χρησιμοποιούν σαν μηχανισμό απομάκρυνσης υλικών – κατά κύριο λόγο νερού – από την περιοχή αντίδρασης της ανόδου, ή όπως γίνεται σε ταμειυτές αποθήκευσης του για την αποσυμφόρηση της πίεσης.

Έτσι, γίνεται μια προσπάθεια εκτίμησης των αποτελεσμάτων του ελεύθερου υδρογόνου στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ένας μηχανισμός μέσω του οποίου θα μπορούσε το υδρογόνο να οδηγήσει σε περαιτέρω υπερθέρμανση του πλανήτη είναι με την απευθείας αύξηση του CH_4 , ενός εκ των σημαντικότερων αερίων του θερμοκηπίου. Στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας (τροπόσφαιρα), το H_2 αντιδρά με υδροξείδιο (OH), ως εξής:



Αν το υδροξείδιο δεν καταναλωνόταν από το υδρογόνο μέσω της παραπάνω αντίδρασης, θα μπορούσε να μειώσει την ποσότητα του CH₄ με την παρακάτω διαδικασία:



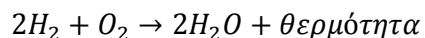
Ωστόσο, υπάρχουν πολλές ακόμη αντιδράσεις οι οποίες θα έπρεπε να ληφθούν υπ' όψιν και η εμπλοκή του υδρογόνου στο φαινόμενο του θερμοκηπίου εξακολουθεί να αποτελεί αντικείμενο μελέτης. [16]

2.2 Καύσιμα κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν αέρια ή υγρά καύσιμα, όπως το υδρογόνο, τους υδρογονάνθρακες, βιοκαύσιμα, αλκοόλες και το φυσικό αέριο. Όταν το καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο, το μόνο παραπροϊόν είναι το νερό και η θερμότητα. Το οξειδωτικό μέσο είναι αέριο οξυγόνο ή ατμοσφαιρικός αέρας. [19]

2.2.1 Ιδιότητες υδρογόνου

Το υδρογόνο αποτελεί το 90% της συνολικής μάζας του σύμπαντος και είναι το ελαφρύτερο στοιχείο που υπάρχει στη φύση. Σε καθαρή μορφή (αέρια) στο περιβάλλον της γης σπάνια συναντάται, αλλά δεσμευμένο, υπάρχει σχεδόν σε όλα τα ορυκτά της. Το υδρογόνο απαντάται και σε πολλές σημαντικές δομικές οργανικές ενώσεις έμβιων όντων της γης, μεταξύ αυτών των οργανικών ενώσεων στην κερατίνη, στα ένζυμα που συντελούν στη πέψη και στα μόρια του DNA. Επίσης, υπάρχει άφθονο και στις διάφορες τροφές που καταναλώνει ο άνθρωπος, υπό την μορφή των λιπών, των πρωτεϊνών και των υδατανθράκων. Λόγω του μικρού του βάρους, δεν αποτελεί περισσότερο από το 1% της συνολικής μάζας της γης. Καθώς το υδρογόνο συντήκεται, παράγονται διάφορα βαρύτερα στοιχεία από αυτό, με σημαντικότερο μεταξύ άλλων το Ήλιο (He). Η συγκεκριμένη διαδικασία της σύντηξης του υδρογόνου παράγει την ενέργεια που εκλύουν τα άστρα μέσα στο σύμπαν, ενώ βάση αυτής πιστεύεται ότι δημιουργήθηκε αρχικά και το ίδιο το σύμπαν. Σε συνήθη θερμοκρασία περιβάλλοντος, το υδρογόνο βρίσκεται πάντα σε αέρια φάση, στην οποία σαν υλικό είναι άχρωμο, άοσμο και εύφλεκτο. Όταν καίγεται με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα (ή και με το καθαρό οξυγόνο), το υδρογόνο σχηματίζει νερό και παράγει θερμότητα σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση.



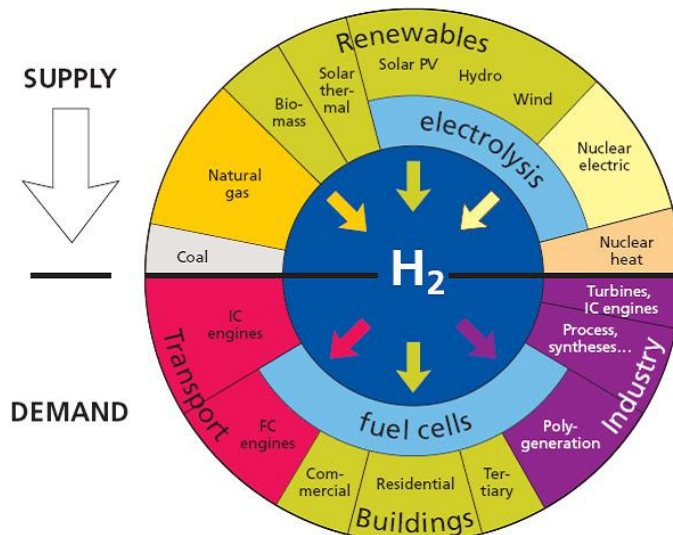
Η ονομασία του οφείλεται στον Γάλλο χημικό Antoine Lavoisier και προέρχεται από τη σύμπτηξη δύο αρχαιοελληνικών λέξεων: ύδωρ και γίγνομαι. Ως ξεχωριστό χημικό στοιχείο αναγνωρίστηκε για πρώτη φορά από τον Άγγλο χημικό Henry Cavendish το 1766. Το υδρογόνο κατέχει την πρώτη θέση στον περιοδικό πίνακα των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

πρωτόνιο και από ένα ηλεκτρόνιο, ενώ κατά την ένωση δύο διαφορετικών ατόμων του παράγεται ένα μόριο υδρογόνου με μοριακό τύπο H_2 . Το υδρογόνο μπορεί να συνδιαστεί χημικά με σχεδόν οποιοδήποτε άλλο χημικό στοιχείο και έτσι δίνει τις περισσότερες χημικές ενώσεις από οποιοδήποτε άλλο του περιοδικού πίνακα. Στις σημαντικότερες από τις ενώσεις του συγκαταλέγονται το νερό, οι ενώσεις του με τον άνθρακα (οργανικές ενώσεις) και οι διάφοροι φυσικοί υδρογονάνθρακες όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Ακόμη, το υδρογόνο έχει την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα βάρους, λόγω όμως της χαμηλής πυκνότητάς του, έχει χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου, ταιριάζει επομένως σε εφαρμογές όπου το βάρος παρά ο όγκος έχει σημασία.

Σήμερα, υπάρχουν αρκετές μέθοδοι με τις οποίες μπορεί να παραχθεί οικονομικά και σε μαζικές ποσότητες (εμπορικές μέθοδοι παραγωγής του υδρογόνου). Οι κυριότερες από αυτές είναι οι εξής:

- Η αναμόρφωση των υδρογονανθράκων με ατμό, μεταξύ αυτών κυρίως του φυσικού αερίου.
- Η μερική οξειδωση (ή αεριοποίηση) των βαρέων υδρογονανθράκων ή του γαιάνθρακα.
- Η ηλεκτρόλυση του νερού.

Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος κατάλληλα τροποποιημένων τεχνολογιών καύσης όπως, καταλυτικούς λέβητες, λέβητες αερίου, αεριοστρόβιλους και κινητήρες εσωτερικής καύσης. Η καύση του υδρογόνου παράγει νερό, αλλά, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών καύσης, παράγονται και οξείδια του αζώτου. Ακόμη, το υδρογόνο καίγεται στον αέρα σε πολύ μεγαλύτερο εύρος συγκεντρώσεων από ότι το μεθάνιο και τα όρια έκρηξής του είναι μεγαλύτερα, αλλά διαχέεται πιο γρήγορα από το μεθάνιο και τη βενζίνη. Είναι ελαφρύτερο του αέρα και επομένως ανεβαίνει γρήγορα ψηλά, σε αντίθεση με το προπάνιο και τους ατμούς της βενζίνης που παραμένουν στο έδαφος. Κατά συνέπεια, η χρήση του ενδείκνυται για εξωτερικούς ή καλά αεριζόμενους χώρους.



Εικόνα 6. Υδρογόνο – πρωτογενείς πηγές ενέργειας, μετατροπείς ενέργειας και εφαρμογές.

Βραχυπρόθεσμα, η ενεργειακή χρήση του υδρογόνου προβλέπεται ότι θα αυξηθεί στη βιομηχανία και στον οικιακό τομέα, προκειμένου να διευκολυνθεί εκεί η παραγωγή και αποθήκευση της ενέργειας, ενώ στη συνέχεια οι εφαρμογές του προβλέπεται ότι θα επεκταθούν και στον τομέα των μεταφορών. Η μετάβαση όμως, από το υπάρχον σύστημα παραγωγής και διανομής της ενέργειας που επί σειρά δεκαετιών βασίζεται κατά κύριο λόγο στα ορυκτά καύσιμα, σε ένα νέο το οποίο θα έχει σαν κύριο μέσο του το υδρογόνο, απαιτεί χρόνο, γενναία και δαπανηρά βήματα από κυβερνήσεις και παραγωγούς της ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα.

Παρακάτω ακολουθούν οι φυσικές ιδιότητες και οι ιδιότητες καύσης του υδρογόνου:

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	H₂
Πυκνότητα [kg/m ³]	0.09
Σχετική πυκνότητα αέρα	0.07
Σημείο βρασμού [°C]	-252.7
Συντελεστής διάχυσης στον αέρα [cm ² /s]	0.61
Κινηματικό ιξώδες [10 ⁻⁶ m ² /s]	106
Υψηλότερη θερμοαντική αξία [MJ/Nm ³]	12.7
Υψηλότερη θερμοαντική αξία [MJ/kg]	141
Χαμηλότερη θερμοαντική αξία [MJ/Nm ³]	10.8
Χαμηλότερη θερμοαντική αξία [MJ/kg]	120
Μοριακή μάζα [kg/mol]	2.016
Σταθερά αερίου [J/kgK]	4.124
Μοριακός όγκος [Nm ³ /mol]	22.43
Σταθερά συμπίεσης	1.0006
Ειδική χωρητικότητα Cp [kg/kgK]	14.2
Ειδική χωρητικότητα Cv [kg/kgK]	10.08

Πίνακας 1: Οι ιδιότητες του υδρογόνου σε συνθήκες 0°C και 1 atm.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΗΣ	H₂
Θερμοκρασία αυτανάφλεξης (°C)	530
Όρια ανάφλεξης (vol.%)	4.0 – 75.0
Όρια έκρηξης (vol.%)	13 – 65
Ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης (mJ)	0.02
Θερμοκρασία φλόγας (°C)	2.086
Ταχύτητα φλόγας (cm/s)	346
Δείκτης Wobbe (MJ/Nm ³)	48.34

Πίνακας 2: Ιδιότητες καύσης υδρογόνου σε συνθήκες 0°C και 1 atm.

Ο δείκτης Wobbe, είναι ένα μέτρο για την ικανότητα ανταλλαγής των αερίων στους καυστήρες αερίου και συνεπώς καθορίζει εάν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οικιακές συσκευές. Ορίζεται ως εξής:

$$W_s = \frac{H_s}{\sqrt{d}}$$

Όπου: W_s ο δείκτης Wobbe (MJ/Nm³)
 H_s η υψηλότερη θερμαντική αξία (MJ/Nm³)
 d η σχετική πυκνότητα συγκρινόμενη με του αέρα

Ο δείκτης Wobbe χρησιμοποιείται για να συγκρίνει την παραγωγή ενέργειας διαφορετικών αερίων στη διάρκεια της καύσης σε μια συσκευή. Εάν δύο καύσιμα έχουν τους ίδιους δείκτες Wobbe για δεδομένες συνθήκες πίεσης, η ενεργειακή παραγωγή θα είναι επίσης ίδια. Χαρακτηριστικά, παραλλαγές μέχρι 5% επιτρέπονται δεδομένου ότι αυτές δεν θα ήταν αξιόπροσεχτες από τον καταναλωτή. [20]

2.2.2 Πλεονεκτήματα του υδρογόνου έναντι των συμβατικών πηγών ενέργειας

Στη συνέχεια θα αναφέρουμε τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το υδρογόνο σαν μέσο παραγωγής ενέργειας, έναντι των συμβατικών ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούνται σήμερα για τον σκοπό αυτό:

- Χαμηλή ρύπανση. Το υδρογόνο καίγεται καθαρά, παράγοντας μόνο νερό. Είναι αλήθεια ότι, ανάλογα με τη θερμοκρασία της φλόγας όταν το υδρογόνο καίγεται στον αέρα, μικρές ποσότητες οξειδίων του αζώτου μπορεί επίσης να παράγονται. Ωστόσο, η ρύπανση μπορεί να σχετίζεται με ορισμένες μεθόδους παραγωγής υδρογόνου.
- Ελεγχιμότητα. Σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, το υδρογόνο αντιδρά εξαιρετικά αργά με το οξυγόνο. Καταλύτες επιτρέπουν τη ρύθμιση της ταχύτητας της αντιδράσεως σε ένα μεγάλο εύρος, από πολύ χαμηλές θερμοκρασίες φλόγας έως πολύ έντονες.
- Δυνατότητα αποθήκευσης της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η μετατροπή όλης ή της επιπλέον ενέργειας που θα παράγεται από αιολικές ή φωτοβολταϊκές πηγές σε υδρογόνο, μπορεί να εξομαλύνει την αστάθεια παροχής των πηγών αυτών και τον συγχρονισμό τους με την ζήτηση.
- Πλήρης εκμετάλλευση της θερμότητας του δύναμης. Αν χρησιμοποιείται για εφαρμογές θέρμανσης, μπορεί να γίνει πλήρης εκμετάλλευση της θερμότητας που απελευθερώνεται κατά την καύση του (όπως μπορεί να γίνει και με το φυσικό αέριο) με συμπύκνωση του ατμού των καυσαερίων (λέβητες τύπου condenser). Στους

λέβητες πετρελαίου, αναγκάζομαστε να κρατάμε τη θερμοκρασία των αποβαλλόμενων καυσαερίων σε υψηλές τιμές (>200°C) για να αποφύγουμε το σχηματισμό διαβρωτικού θειϊκού οξέος στα τοιχώματα, από το θείο που περιέχει το πετρέλαιο.

- Δεν είναι τοξικό σε περίπτωση διαρροής.
- Η παραγωγή του μπορεί να γίνει στη χώρα κατανάλωσής. Αντίθετα τα κοιτάσματα των ορυκτών καυσίμων είναι συγκεντρωμένα σε συγκεκριμένες περιοχές του πλανήτη. Αυτό θα ωφελήσει φτωχότερα και λιγότερο ανεπτυγμένα κράτη τα οποία σήμερα εξαρτώνται ενεργειακά από άλλα ισχυρότερα.
- Εύκολη μεταφορά και τροφοδοσία του στους κινητήρες. Το υδρογόνο προσφέρει σημαντική ευκολία σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα στην τροφοδοσία κινητήρων, καθώς μπορεί να διατεθεί σε υγρή ή σε αέρια μορφή.
- Μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής ενέργειας. Σε σχέση με οποιοδήποτε συμβατικό καύσιμο, το υδρογόνο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής ενέργειας ανά μονάδα βάρους του, η οποία ισούται περίπου με 120.7 kJ/kg. Η ενέργεια αυτή είναι περίπου τρεις φορές μεγαλύτερη από την ενέργεια που προσφέρει 1 kg συμβατικής βενζίνης.
- Μεγάλη τιμή πυκνότητας ενέργειας ανά kg βάρους. Συγκριτικά με τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές.
- Μείωση ρυθμού κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων. Μπορεί να συμβάλει σταδιακά στη μείωση του ρυθμού κατανάλωσης των ορυκτών καυσίμων, επιφέροντας έτσι σημαντικές ωφέλειες στον περιβαλλοντικό, στον ενεργειακό αλλά και στον οικονομικό τομέα, μέσω της δημιουργίας νέων θέσεων εργασίας. Αν και σε πολλές περιπτώσεις αυτά τα ίδια καύσιμα χρησιμοποιούνται για την παρασκευή υδρογόνου το ενεργειακό όφελος είναι μεγάλο. Μάλιστα η πιο συμφέρουσα οικονομικά αυτή τη στιγμή μέθοδος παρασκευής υδρογόνου βασίζεται στη μετατροπή του μεθανίου του φυσικού αερίου.
- Ασφάλεια. Η φήμη του υδρογόνου ως επικίνδυνο αέριο προέρχεται κυρίως από την θεαματική έκρηξη του Hindenburg, το 1937 στο Lakehurst, όπου 36 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους. Ωστόσο, το συγκεκριμένο ατύχημα, μπορούμε να πούμε πως ήταν ένα καλό παράδειγμα που απέδειξε πόσο ασφαλές είναι το υδρογόνο. Το Hindenburg, που ήταν ένα αερόπλοιο τύπου (ζέπελιν) μετέφερε 200.000 κυβικά μέτρα υδρογόνο, ισοδύναμα με 2.5×10^{12} Joules ενέργειας. Μια ενεργειακά ισοδύναμη ποσότητα

βενζίνης, θα αντιστοιχούσε σε παραπάνω από 80 κυβικά μέτρα βενζίνης, τα οποία θα μπορούσαν να αποτελέσουν πηγή μίας πύρινης λαίλαπας έκτασης ίσης με 15 γήπεδα ποδοσφαίρου.

- Όντας το ελαφρύτερο όλων των αερίων, ανυψώνεται γρήγορα και διασκορπίζεται, ενώ τα υγρά καύσιμα δημιουργούν μεγάλες κηλίδες στις οποίες μπορεί να εξαπλωθεί η φωτιά.
- Η μικρότητα του μορίου του υδρογόνου, κάνει αυτό το αέριο να διαρρέει εύκολα από μικρές ρωγμές και οπές, καθιστώντας δύσκολο να συσσωρευτούν μεγάλες εκρηκτικές συγκεντρώσεις.
- Λόγω της χαμηλής πυκνότητάς του, ένας δεδομένος όγκος υδρογόνου περιέχει λίγη ενέργεια και έτσι εμφανίζει πολύ μικρότερο κίνδυνο από ότι το φυσικό αέριο ή την βενζίνη.
- Σε 1 ατμόσφαιρα, η θερμοκρασία αυτοανάφλεξης για το υδρογόνο είναι περίπου 580°C, ενώ για την βενζίνη είναι πολύ πιο χαμηλά στους 260 °C. Η πιθανότητα τυχαίας έναρξης μιας πυρκαγιάς είναι πολύ μεγαλύτερη με το τελευταίο καύσιμο.
- Μίγματα υδρογόνου/αέρα με λιγότερο από 4.1% καύσιμο (κατ' όγκο) δεν θα πάρουν φωτιά, ενώ το όριο ανάφλεξης της βενζίνης είναι 1%.
- Η καθαρή φλόγα υδρογόνου ακτινοβολεί λιγότερη ενέργεια, κάτι που επιτρέπει στους πυροσβέστες να πλησιάσουν πολύ περισσότερο στο χώρο της πυρκαγιάς.
- Το υδρογόνο είναι εντελώς μη τοξικό και μπορεί να εισπνέεται σε υψηλές συγκεντρώσεις (φυσικά μπορεί να προκαλέσει ασφυξία και μπορεί επίσης να προκαλέσει εσωτερική έκρηξη αν το υδρογόνο που έχει εισπνεύσει κάποιος, τυχαία αναφλεγεί).

2.2.3 Μειονεκτήματα του υδρογόνου έναντι των συμβατικών πηγών ενέργειας

Τα μειονεκτήματα του υδρογόνου έναντι των υπολοίπων συμβατικών πηγών ενέργειας, έχουν να κάνουν με την σχετικά πρόσφατη στροφή της έρευνας προς την αξιοποίηση του υδρογόνου ως καύσιμο. Το αποτέλεσμα είναι να μην έχουν εξελιχθεί ακόμα οι κατάλληλες τεχνικές, ώστε να είναι ικανό να αξιοποιηθεί σε μαζική κλίμακα στην πράξη. Τα μειονεκτήματα είναι τα εξής:

- Σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει το υδρογόνο σαν καύσιμο παραγωγής ενέργειας είναι το γεγονός ότι το παγκόσμιο δίκτυο διανομής του προς το παρόν δεν υφίσταται, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μαζική κλίμακα και σε όλες τις χώρες του κόσμου. Επιπλέον, λόγω της ανυπαρξίας του δικτύου διανομής του, το κόστος ανεφοδιασμού του υδρογόνου σε παγκόσμια κλίμακα παραμένει ακόμα υψηλό, μιας και οι διάφορες τεχνολογίες παραγωγής του μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν έχουν εξελιχθεί ακόμα σε ικανοποιητικό βαθμό.

- Ένα ακόμη πρόβλημα που αντιμετωπίζει σήμερα το υδρογόνο σαν καύσιμο, είναι αυτό της αποτελεσματικής και ασφαλούς αποθήκευσής του. Δεδομένου ότι το υδρογόνο είναι ένα στοιχείο που σε αέρια κατάσταση είναι πολύ ελαφρύ, η συμπίεση μεγάλης ποσότητας του σε πολύ μικρού μεγέθους δεξαμενές είναι ακόμα αρκετά δύσκολη, εξαιτίας των υψηλών πιέσεων που χρειάζονται γι' αυτό (ή αντίστοιχα εξαιτίας των πολύ χαμηλών θερμοκρασιών που χρειάζονται για την αποθήκευσή του σαν υγρό). Εκτός από αυτό, οι ακραίες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που απαιτούνται για την αέρια ή την υγρή του αποθήκευση, συνεπάγονται και την κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας για την επίτευξή τους, με αποτέλεσμα η αέρια ή η υγρή αποθήκευση του υδρογόνου να είναι αρκετά δαπανηρή.
- Η τιμή του είναι σχετικά υψηλή σε σύγκριση με αυτή της βενζίνης ή του πετρελαίου. Η περισσότερο διαδεδομένη, λόγω χαμηλού κόστους, μέθοδος παραγωγής υδρογόνου αυτή τη στιγμή, είναι η μετατροπή φυσικού αερίου. Ωστόσο όσο εξελίσσονται νέοι μέθοδοι, όπως η μετατροπή της αιολικής ενέργειας, το κόστος θα συνεχίσει να μειώνεται.
- Αν και στις περισσότερες των περιπτώσεων το υδρογόνο θεωρείται περισσότερο ασφαλές από οποιοδήποτε άλλο καύσιμο, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες μπορεί να γίνει εξαιρετικά επικίνδυνο.
- Ένα τελευταίο πρόβλημα που αντιμετωπίζει σήμερα το υδρογόνο σαν καύσιμο μαζικής παραγωγής ενέργειας, είναι και το αυξημένο κόστος των διαφόρων ενεργειακών διατάξεων που χρησιμοποιούνται για την αξιοποίηση του σαν καύσιμο (κυψέλες καυσίμου). Η τεχνολογία των διατάξεων αυτών, δεν μπορεί να θεωρηθεί ακόμα ολοκληρωτικά αξιόπιστη, καθώς κατά την εφαρμογή τους παρουσιάζονται ορισμένα τεχνικής και οικονομικής φύσης προβλήματα, που δεν καθιστούν ικανή την μαζική χρησιμοποίησή τους. Για παράδειγμα διάφορες κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, εμφανίζουν ακόμη προβλήματα ανοχής, όταν τα υδρογονούχα καύσιμα δεν είναι 'καθαρά', δηλαδή σε καύσιμα που δεν περιέχουν μεγάλες περιεκτικότητες υδρογόνου. [21] [22] [23]

2.3 Παραγωγή υδρογόνου

Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη ενότητα, το υδρογόνο δεν υπάρχει ελεύθερο στη φύση παρά μόνο σε σύνθετη μορφή με άλλα στοιχεία. Για αυτό το λόγο απαιτείται η κατανάλωση ενέργειας για την εξαγωγή του, πριν διατεθεί και αυτό με τη σειρά του για παραγωγή ενέργειας. Οι μέθοδοι για την παραγωγή υδρογόνου, που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα είναι οι εξής:

1. Χημικές διαδικασίες
2. Ηλεκτρολυτικές διαδικασίες
3. Θερμικές διαδικασίες
4. Φωτολυτικές διαδικασίες
5. Βιολογικές διαδικασίες

Από τις παραπάνω μεθόδους αυτές που χρησιμοποιούνται κατά κόρον για την παραγωγή υδρογόνου, είναι οι τεχνικές ηλεκτρόλυσης του νερού, της αναμόρφωσης ή διάσπασης των υδρογονανθράκων με θερμικές διαδικασίες και οι φωτολυτικές διαδικασίες. [15]

2.3.1 Θερμικές διαδικασίες

Οι θερμικές διαδικασίες χρησιμοποιούν ενέργεια από διάφορες πηγές όπως είναι το φυσικό αέριο, ο άνθρακας και η βιομάζα, απελευθερώνοντας έτσι υδρογόνο που είναι μέρος της μοριακής τους δομής. Σε άλλες διαδικασίες, η θερμότητα σε συνδιασμό με κλειστούς χημικούς κύκλους, παράγουν υδρογόνο από πρώτες ύλες όπως το νερό.

Η εξαγωγή του υδρογόνου από το φυσικό αέριο, αποσπώντας 4 άτομα υδρογόνου από κάθε άτομο άνθρακα, είναι πολύ καθαρή και αποδοτική, οδηγώντας σε υποτριπλασιασμό των εκπομπών άνθρακα στο περιβάλλον, σε σχέση με τη συμβατική χρήση. Η ενέργεια που απαιτείται για τη διαδικασία αυτή αντιστοιχεί στο 20 – 30 % του υδρογονάνθρακα που αναμορφώνεται, αλλά το κόστος είναι μόνο 4 €/GJ, καθιστώντας αυτή τη μέθοδο την πιο συμφέρουσα οικονομικά.

Ο αναμορφωτής καυσίμου (reformer) είναι η συσκευή παραγωγής υδρογόνου, μέσω αναμόρφωσης υδρογονανθράκων. Το υδρογόνο που παράγεται με τη μέθοδο αυτή είναι χαμηλής καθαρότητας, γεγονός που το κάνει απογορευτικό για χρήση σε συστήματα κυψελών καυσίμου. Τα λοιπά στοιχεία που περιέχονται σε αέριο χαμηλής καθαρότητας υδρογόνου, δρουν ως δηλητήριο για την κυψέλη καυσίμου, μειώνοντας το χρόνο ζωής της. Αντίθετα, υδρογόνο υψηλής καθαρότητας (πάνω από 99%) δεν δημιουργεί προβλήματα στην κυψέλη. Για αυτό και μεταξύ της κυψέλης καυσίμου και του αναμορφωτή καυσίμου, τοποθετείται μία ειδική συσκευή καθαρισμού του υδρογόνου.

2.3.1.1 Παραγωγή από φυσικό αέριο

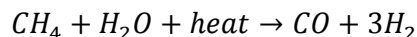
Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από φυσικό αέριο με τη βοήθεια τριών διαφορετικών χημικών διαδικασιών:

- Παραγωγή με αναμόρφωση φυσικού αερίου (Steam methane reforming)
- Μερική οξείδωση φυσικού αερίου (Partial oxidation)
- Αυτοθερμική αναμόρφωση (Autothermal reforming)

Έχουν αναπτυχθεί και διάφορες νέες ιδέες παραγωγής, καμία από αυτές δεν είναι κοντά στην εμπορευματοποίηση.

Παραγωγή με αναμόρφωση φυσικού αερίου (Steam methane reforming)

Η αναμόρφωση του ατμού γίνεται με την ενδόθερμη μετατροπή του μεθανίου και του υδρατμού σε μονοξείδιο, υδρογόνο και άνθρακα.

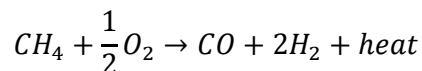


Η θερμότητα παρέχεται συχνά από την καύση του μεθανίου. Η διαδικασία εμφανίζεται χαρακτηριστικά στις θερμοκρασίες μεταξύ 700 – 850 °C και σε πιέσεις 3 – 25 bar. Το προϊόν περιέχει 12% αέριο CO, το οποίο μπορεί να μετατραπεί στη συνέχεια σε CO₂ και H₂ μέσω της αντίδρασης του νερού και του αερίου CO.

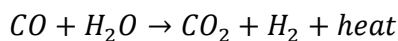


Μερική οξείδωση φυσικού αερίου (Partial oxidation)

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

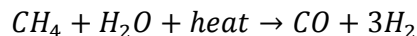


Σε αυτή την διαδικασία, η θερμότητα παράγεται με μια εξώθερμη αντίδραση και ως εκ τούτου ένα πιο συμπαγές σχέδιο είναι δυνατό, δεδομένου ότι δεν υπάρχει καμία ανάγκη για οποιαδήποτε εξωτερική θέρμανση του αντιδραστήρα. Το μονοξείδιο του άνθρακα που παράγεται, μετατρέπεται περαιτέρω σε υδρογόνο όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση.



Αυτοθερμική αναμόρφωση (Autothermal reforming)

Η αυτοθερμική αναμόρφωση είναι ένας συνδυασμός ανασύνθεσης ατμού και μερικής οξείδωσης, που περιγράφεται από τις εξής χημικές αντιδράσεις:



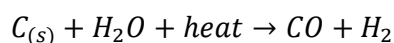
Η συνολική αντίδραση είναι εξώθερμη, άρα απελευθερώνει θερμότητα. Η θερμοκρασία εξόδου από τον αντιδραστήρα είναι μεταξύ 950 – 1100 °C και η πίεση των αερίων μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 100 bar. Επίσης, το CO μετατρέπεται σε H₂ μέσω της αντίδρασής του με τους υδρατμούς.



Η ανάγκη να καθαριστούν τα αέρια παραγωγής προσθέτει σημαντικά στις δαπάνες εγκαταστάσεων και μειώνει τη συνολική αποδοτικότητα.

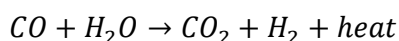
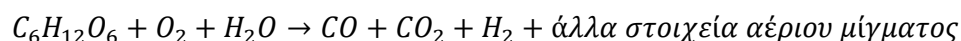
2.3.1.2 Παραγωγή με αεριοποίηση άνθρακα

Η αεριοποίηση ή απανθράκωση ανθράκων είναι η παλαιότερη μέθοδος παραγωγής υδρογόνου. Περιλαμβάνει θέρμανση άνθρακα στους 900 °C με υδρατμούς και καθαρό οξυγόνο, που το διασπών σε υγρά, αέρια και στερεά προϊόντα. Το αέριο είναι κυρίως υδρογόνο. Στην πράξη, οι διαδικασίες ροής υψηλών θερμοκρασιών ευνοούνται για να μεγιστοποιήσουν τη μετατροπή του άνθρακα σε αέριο. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται ο σχηματισμός σημαντικών ποσών προσροφητικού άνθρακα, πίσσας και φαινολών. Το κόστος υπολογίζεται γύρω στα 10 €/GJ. Μία χαρακτηριστική αντίδραση της παραπάνω διαδικασίας, όπου ο άνθρακας μετατρέπεται σε μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο, είναι η εξής:



2.3.1.3 Παραγωγή με αεριοποίηση βιομάζας

Η βιομάζα μετατρέπεται σε ένα αέριο μίγμα υδρογόνου, μονοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ενώσεων δημιουργώντας θερμότητα υπό πίεση παρουσία ατμού και ενός ελεγχόμενου ποσού οξυγόνου (η μονάδα αυτή ονομάζεται εξαερωτής). Η βιομάζα διασπάται χημικά από τη θερμότητα του εξαερωτή σε ατμό και οξυγόνο, προκαλώντας χημικές αντιδράσεις που παράγουν ένα μίγμα αερίου με υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα και διοξείδιο του άνθρακα. Το μονοξείδιο του άνθρακα αντιδρά στη συνέχεια με το νερό, για να σχηματιστεί το διοξείδιο του άνθρακα και περισσότερο υδρογόνο. Ειδικές μεμβράνες που έχουν κατασκευαστεί διαχωρίζουν το υδρογόνο από το υπόλοιπο αέριο μίγμα.



Όταν η αεριοποίηση της βιομάζας λαμβάνει χώρα ελλείψει του οξυγόνου, ονομάζεται πυρόλυση. Γενικά, η βιομάζα δεν εξαερώνεται τόσο εύκολα όσο ο άνθρακας και παράγει άλλες ενώσεις υδρογονανθράκων στο αέριο μίγμα που βγαίνει στον εξαερωτή.

Η τεχνολογία αεριοποίησης βιομαζών είναι η καταλληλότερη για τη συγκεντρωτική παραγωγή υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα, λόγω της φύσης του χειρισμού των μεγάλων ποσοτήτων βιομάζας και του σχετικά χαμηλού οικονομικού κόστους της διαδικασίας αυτής.

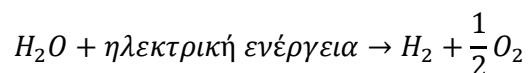
2.3.1.4 Παραγωγή με αναμόρφωση ανανεώσιμων υγρών καυσίμων

Η βιομάζα μπορεί να μετατραπεί σε αιθανόλη, βιο – λάδια, ή άλλα υγρά καύσιμα που μπορούν να μεταφερθούν με σχετικά χαμηλό κόστος σε ένα σταθμό ανεφοδιασμού ή σε κάποιο άλλο σημείο και να αναδομηθεί για την παραγωγή υδρογόνου. Η αναμόρφωση των ανανεώσιμων υγρών σε υδρογόνο, είναι παρόμοια με την αναμόρφωση φυσικού αερίου. Το υγρό καύσιμο αντιδρά με τον ατμό στις υψηλές θερμοκρασίες παρουσία ενός καταλύτη και παράγει ένα αέριο που αποτελείται από υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα. Το πρόσθετο υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα παράγονται από την αντίδραση του μονοξειδίου του άνθρακα με τον ατμό υψηλής θερμοκρασίας στην αντίδραση μετατόπισης νερού – αερίου. Τέλος, το υδρογόνο διαχωρίζεται και καθαρίζεται.

Τα παραγόμενα υγρά από βιομάζα, όπως η αιθανόλη και τα βιο – λάδια, μπορούν να παραχθούν σε μεγάλες ποσότητες σε κεντρικές εγκαταστάσεις που βρίσκονται κοντά στις πηγές βιομάζας, ώστε να μειωθεί το κόστος μεταφοράς. Τα υγρά έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και μπορούν να μεταφερθούν με χαμηλότερο κόστος στους σταθμούς ανεφοδιασμού ή στις περιοχές παραγωγής ενέργειας για να αναμορφωθούν σε υδρογόνο.

2.3.1.5 Υψηλής θερμοκρασίας διαχωρισμός ύδατος – ηλεκτρόλυση ύδατος

Ο διαχωρισμός ύδατος με υψηλή θερμοκρασία (θερμοχημική διαδικασία) είναι μια μακροπρόθεσμη τεχνολογία στα αρχικά στάδια ανάπτυξης. Η ηλεκτρόλυση ύδατος είναι η διαδικασία με την οποία το νερό διαχωρίζεται σε υδρογόνο και οξυγόνο, μέσω της εφαρμογής ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαδικασία της αντίδρασης είναι η εξής:



Η συνολική ενέργεια που απαιτείται για την ηλεκτρόλυση ύδατος αυξάνεται ελαφρώς με τη θερμοκρασία, ενώ η απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια μειώνεται. Μια υψηλής θερμοκρασίας διαδικασία ηλεκτρόλυσης, προτιμάται όταν η θέρμανση σε υψηλή θερμοκρασία είναι δυνατή με αποβαλλόμενη θερμότητα από άλλες διαδικασίες. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται, είναι βασισμένο σε ορυκτούς πόρους με σχετικά χαμηλές αποδόσεις. Ο διαχωρισμός ύδατος σε υψηλή θερμοκρασία είναι ο καταλληλότερος τρόπος για παραγωγή υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα.

2.3.2 Ηλεκτρολυτικές διαδικασίες

Οι ηλεκτρολυτικές διαδικασίες χρησιμοποιούν την ηλεκτρική ενέργεια για να διασπάσουν το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο, μία διαδικασία που πραγματοποιείται σε μια διάταξη ηλεκτρόλυσης. Οι διατάξεις ηλεκτρόλυσης, όπως και οι κυψέλες καυσίμου, αποτελούνται

από την άνοδο, την κάθοδο και τον ηλεκτρολύτη που τις διαχωρίζει. Ο ηλεκτρολύτης είναι αυτός που καθορίζει τον τύπο της διάταξης ηλεκτρόλυσης, καθώς και τις συνθήκες λειτουργίας της.

Το υδρογόνο που παράγεται μέσω της ηλεκτρόλυσης, μπορεί να οδηγήσει σε μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ανάλογα με την πηγή της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται. Οι δύο πλέον ενδιαφέρουσες μέθοδοι ηλεκτρόλυσης για την ευρείας κλίμακας παραγωγή υδρογόνου με σχεδόν μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι οι εξής:

- Ηλεκτρόλυση με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας
- Υψηλής θερμοκρασίας πυρηνική ηλεκτρόλυση

Ανάμεσα στις προκλήσεις για αποδοτική ηλεκτρολυτική παραγωγή υδρογόνου, σε ότι έχει να κάνει με το κόστος, είναι η μείωση του κόστους κεφαλαίου των διατάξεων ηλεκτρόλυσης – ιδιαίτερα χαμηλού κόστους άνοδοι και κάθοδοι – και η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας.

2.3.2.1 Ηλεκτρόλυση με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική και γεωθερμική, μπορεί να παραχθεί ηλεκτρισμός. Αυτή η μορφή παραγωγής υδρογόνου προσφέρει ευκαιρίες για σύμπραξη με διάφορες μορφές παραγωγής ισχύος. Συμπαράγωγή υδρογόνου και ηλεκτρικής ισχύος θα μπορούσε να ολοκληρωθεί σε ένα αιολικό πάρκο, επιτρέποντας έτσι ευελιξία και παρέχοντας τη δυνατότητα μεταβολής της παραγωγής ώστε να ταιριάζει με την ζήτηση της αγοράς ηλεκτρικής ισχύος και με τις λειτουργικές ανάγκες του συστήματος.

Η ανάκτηση υδρογόνου από την ηλεκτρόλυση του νερού με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι απόλυτα αβλαβής για το περιβάλλον για τους εξής λόγους:

- Το νερό βρίσκεται σε ανεξάντλητες ποσότητες στη γη.
- Η παραγωγή του υδρογόνου γίνεται με πηγές ενέργειας, οι οποίες είναι επίσης ανεξάντλητες.
- Η οξειδωσή του για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε συστήματα κυψελών καυσίμου, παράγει καθαρό νερό το οποίο μπορεί να ανακυκλωθεί άμεσα.

2.3.2.2 Υψηλής θερμοκρασίας πυρηνική ηλεκτρόλυση

Στην υψηλής θερμοκρασίας πυρηνική ηλεκτρόλυση, θερμότητα από ένα πυρηνικό αντιδραστήρα παράγει ατμό υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης, που ηλεκτρολύεται για να παράξει υδρογόνο και οξυγόνο. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία τόσο μειώνεται η

ποσότητα του ηλεκτρισμού που απαιτείται για τον διαχωρισμό των μορίων του νερού. Καθώς η θερμότητα είναι ένα παραπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας πυρηνικής ενέργειας και επειδή δεν εκπέμπονται αέρια του θερμοκηπίου κατά τη διαδικασία των αντιδράσεων, η υψηλής θερμοκρασίας πυρηνική ηλεκτρόλυση μπορεί να αποτελέσει μία αποδοτική μέθοδο για την παραγωγή υδρογόνου από νερό. Ωστόσο, η χρήση πυρηνικής ενέργειας ως μέθοδος παραγωγής υδρογόνου εγκαταλείπεται λόγω των κινδύνων των αποβλήτων ή ενδεχομένων πυρηνικών ατυχημάτων που περιλαμβάνει.

2.3.3 Φωτολυτικές διαδικασίες

Οι φωτολυτικές διαδικασίες χρησιμοποιούν την ήπιας μορφής ενέργεια για να διασπάσουν το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο. Όντας σε πολύ αρχικά στάδια έρευνας, αυτές οι διαδικασίες προσφέρουν μακροπρόθεσμη δυνατότητα για τη βιώσιμη παραγωγή υδρογόνου με χαμηλή περιβαλλοντική επίδραση.

2.3.3.1 Φωτοβιολογική διάσπαση νερού

Κατά τη φωτοβιολογική διάσπαση νερού, το υδρογόνο παράγεται από το νερό χρησιμοποιώντας το φως του ήλιου και ειδικούς μικροοργανισμούς, όπως τα πράσινα άλγη και τα κυανοβακτήρια. Ακριβώς, όπως τα φυτά παράγουν οξυγόνο κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης, αυτοί οι μικροοργανισμοί καταναλώνουν το νερό και παράγουν υδρογόνο ως υποπροϊόν των φυσικών μεταβολικών διαδικασιών τους.

Ο φυτοβιολογικός διαχωρισμός ύδατος αποτελεί μια μακροπρόθεσμη τεχνολογία. Μέχρι στιγμής τα συγκεκριμένα μικρόβια διαχωρίζουν το νερό με πολύ αργούς ρυθμούς, πράγμα που καθιστά αδύνατη τη χρησιμοποίησή τους σε εμπορική και αποδοτική παραγωγή υδρογόνου. Οι επιστήμονες έχουν στρέψει την έρευνά τους, ώστε να τροποποιήσουν αυτούς τους μικροοργανισμούς ή να βρουν άλλα φυσικά μικρόβια που να μπορούν να παράγουν υδρογόνο σε υψηλότερα ποσοστά. Η φυτοβιολογική διάσπαση νερού βρίσκεται σε πολύ αρχικά επίπεδα έρευνας, ωστόσο προσφέρει μακροπρόθεσμη δυνατότητα για βιώσιμη παραγωγή υδρογόνου με χαμηλή περιβαλλοντική επιβάρυνση.

2.3.3.2 Φωτοηλεκτροχημική διάσπαση νερού

Κατά τη φωτοηλεκτροχημική διάσπαση του νερού, το υδρογόνο παράγεται από το νερό χρησιμοποιώντας το φως του ήλιου σε συνδυασμό με ειδικούς ημιαγωγούς που ονομάζονται φωτοηλεκτροχημικά υλικά. Στο φωτοηλεκτροχημικό σύστημα, ο ημιαγωγός χρησιμοποιεί την ήπιας μορφής ενέργεια του ήλιου για να διασπάσει άμεσα τα μόρια του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο. Τα διαφορετικά υλικά ημιαγωγών λειτουργούν στα ιδιαίτερα μήκη κύματος του φωτός. Η επιστημονική έρευνα εστιάζει στην εύρεση ημιαγωγών κατάλληλων ώστε να διασπούν το νερό, αλλά να μην χάνουν και την σταθερότητά τους όταν έρχονται σε επαφή με

αυτό. Η φωτοηλεκτροχημική διάσπαση του νερού, όπως και η φωτοβιολογική διάσπαση του νερού, είναι μία τεχνολογία που είναι σε πρωταρχικά στάδια εξέλιξης και εφαρμογής. Ωστόσο, αποτελεί μία ελπιδοφόρα μέθοδο για παραγωγή υδρογόνου σε ικανοποιητικές εμπορικά ποσότητες στο εγγύς μέλλον και φέρει το σημαντικό προνόμιο να είναι φιλική προς το περιβάλλον. [15] [16] [19]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

3.1 Εισαγωγή στην αποθήκευση και μεταφορά υδρογόνου

Σε συνήθεις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, δηλαδή τους 25 °C και 1 atm, το υδρογόνο σαν στοιχείο είναι αέριο. Σαν αέριο το υδρογόνο χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλους όγκους για περιορισμένες ποσότητες μάζας του, γεγονός που οφείλεται στην πολύ χαμηλή του πυκνότητα. Για το λόγο αυτό, προκειμένου να αποθηκευτεί σε συνήθεις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, θα πρέπει να μειωθεί ο πολύ μεγάλος όγκος του, γεγονός που συνεπάγεται την ταυτόχρονη αύξηση της πίεσής του ή την ταυτόχρονη μείωση της θερμοκρασίας του. Για τον λόγο αυτό, προκειμένου να αξιοποιηθεί πρακτικά, θα πρέπει να μειωθεί ο πολύ μεγάλος του όγκος υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες, δηλαδή να αυξηθεί η πολύ μικρή του πυκνότητα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των διαφόρων τεχνικών αποθήκευσης του σε κατάλληλες διατάξεις ή σε διάφορα υλικά.

Η αύξηση της πυκνότητας της αέριας μάζας του (ή αντίστοιχα η μείωση του αέριου όγκου του) που αυτό διαθέτει υπό συνήθεις συνθήκες περιβάλλοντος, επιτυγχάνεται με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Πρώτον, μέσω της αύξησης της πίεσης του. Δεύτερον, μέσω της μείωσης της θερμοκρασίας του και τρίτον, μέσω της μείωσης της άπωσης που ασκείται μεταξύ των μορίων του, κατά τη διοχέτευση του σε διάφορα στερεά υλικά (μεταλλικά υδρίδια, νανοσωλήνες κ.α.). Ωστόσο, το ζητούμενο κατά την αύξηση της πυκνότητας του υδρογόνου, αποτελεί το γεγονός κατά πόσο η μέθοδος αποθήκευσής του (όποια έχουμε ακολουθήσει) μπορεί να αναστραφεί. Δηλαδή, κατά πόσο το αποθηκευμένο υδρογόνο δύναται να ανακτηθεί κατά τη φάση της κατανάλωσής του. [24]

Η αποθήκευση υδρογόνου μέσα σε οχήματα, θεωρείται η μεγαλύτερη τεχνική πρόκληση για την ευρεία εμπορευματοποίηση των υδρογονοκίνητων οχημάτων. Σημερινές προσεγγίσεις περιλαμβάνουν συμπιεσμένες δεξαμενές αερίου υδρογόνου και αποθήκευση υδρογόνου σε υλικά. Η έρευνα εστιάζει στη βελτίωση του βάρους, του όγκου και του κόστους των συστημάτων αποθήκευσης υδρογόνου, καθώς και στην εύρεση και ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που μπορούν να επιτύχουν λειτουργία και κόστος σε επίπεδα παρόμοια με αυτά των σημερινών συστημάτων αποθήκευσης βενζίνης. [25]

Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί ως ένα στοιχείο ή μπορεί να εξαχθεί, όταν είναι απαραίτητο, από κάποια ουσία πλούσια σε υδρογόνο χρησιμοποιώντας τις παρακάτω διαδικασίες εκχύλισης:

1. Διαδικασίες που μεταβάλλουν την κατάσταση ή τη φάση του υδρογόνου (μόνο συστήματα υδρογόνου):

1.1 Συμπίεση του αερίου, ή ένας συνδιασμός συμπίεσης και ψύξης.

1.2 Υγροποίηση του στοιχείου. Λόγω της χαμηλής κρίσιμης θερμοκρασίας του, το υδρογόνο πρέπει να ψύχεται σε περίπου 20 °K ώστε να παραμείνει υγρό σε δοχεία που δεν είναι υπό πίεση.

2. Διαδικασίες που συνδέουν το υδρογόνο με άλλες ουσίες:

2.1 Προσρόφιση του αερίου σε κάποιο κατάλληλο υπόστρωμα όπως ο ενεργός άνθρακας.

2.2 Χημικό συνδιασμό του υδρογόνου, έτσι ώστε να δημιουργηθεί μία πλούσια σε υδρογόνο ένωση. Τέτοιες ενώσεις μπορεί να είναι:

2.2.1 Ενώσεις στις οποίες το H₂ είναι στενά συνδεδεμένο και απαιτεί μια σχετικά πολύπλοκη χημική μέθοδο για την ανάκτηση του αερίου. Ωστόσο, συμπεριλαμβάνονται ουσίες όπως, μεθανόλη, αιθανόλη, αμμωνία και το ίδιο το νερό που μπορεί να θεωρηθεί φορέας υδρογόνου.

2.2.2 Ενώσεις οι οποίες μπορούν να είναι αναστρέψιμα μετατρέψιμες σε άλλες ουσίες με υψηλότερη (ή χαμηλότερη) περιεκτικότητα υδρογόνου.

2.2.3 Μεταλλικά υδρίδια που αποτελούν ενώσεις μετάλλου – υδρογόνου, που μπορούν να απελευθερώσουν και να απορροφήσουν υδρογόνο αντίστροφα, με απλή μεταβολή της θερμοκρασίας.

Υπάρχει ένας αριθμός χαρακτηριστικών που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν κατά την αξιολόγηση συστημάτων αποθήκευσης υδρογόνου. Αυτά περιλαμβάνουν τα εξής:

- Βαρυμετρική συγκέντρωση (Gravimetric concentration, GC). Αποτελεί τον λόγο της μάζας του αποθηκευμένου υδρογόνου προς τη συνολική μάζα του (φορτίου) συστήματος αποθήκευσης και ανάκτησης. Ο συντελεστής είναι kg ανά kg και αποτελεί μία αδιάστατη παράμετρο.
- Ογκομετρική συγκέντρωση (Volumetric concentration, VC). Αποτελεί το λόγο της μάζας του αποθηκευμένου υδρογόνου προς το συνολικό όγκο του συστήματος αποθήκευσης και ανάκτησης. Ο συντελεστής είναι kg ανά m³ [ML⁻³].
- Απόδοση ανάκαμψης (Turnaround efficiency). Αποτελεί την αναλογία του ανακτώμενου υδρογόνου προς την ποσότητα του υδρογόνου στην είσοδο, ή τον λόγο της ενέργειας που ανακτάται προς την ενέργεια που προσφέρεται στην είσοδο.
- Αδράνεια (Dormancy). Αποτελεί την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί το υδρογόνο για μεγάλο χρονικό διάστημα. [15]

Από την άλλη, η διανομή του υδρογόνου παίζει ξεχωριστό ρόλο στην ανάπτυξη και εδραίωση της οικονομίας του υδρογόνου. Ο τρόπος συγκρότησης του δικτύου διανομής του υδρογόνου, τόσο σε τοπικό όσο και σε ευρύτερο επίπεδο, διαφέρει σημαντικά από αυτόν που χρησιμοποιείται σήμερα, σε παγκόσμια κλίμακα, για τη διανομή των διαφόρων συμβατικών ορυκτών καυσίμων. Τα περισσότερα συμβατικά ορυκτά καύσιμα που καταναλώνονται σήμερα, μεταφέρονται αποκλειστικά σε υγρή ή σε αέρια μορφή. Το γεγονός αυτό καθιστά τις υπάρχουσες υποδομές μεταφοράς ακατάλληλες για τη μεταφορά του υδρογόνου, το οποίο σε συνθήκες συνθήκες περιβάλλοντος είναι αέριο.

Ακόμα και αν το υδρογόνο μετατρέπεται σε υγρό, μέσω συμπίεσης και μεταφερόταν από το σημερινό υπάρχον σύστημα μαζικής διανομής των υγρών ορυκτών καυσίμων, η μεταφορά αυτή θα σήμαινε αφενός την κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας για τη μετατροπή του σε υγρό και αφετέρου θα παρουσίαζε αυξημένα προβλήματα ασφάλειας και αξιοπιστίας, εξαιτίας των ιδιαίτερων συνθηκών που επικρατούν κατά τη μεταφορά του υδρογόνου σε υγρή μορφή (υψηλές πιέσεις). Επίσης, η υποδομή που υπάρχει σήμερα στο παγκόσμιο δίκτυο διανομής φυσικού αερίου είναι ανεπαρκής για τη μεταφορά αερίου υδρογόνου λόγω των συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας που απαιτούνται για την ασφαλή μεταφορά του. [26]

Μπορούμε να συμπεράνουμε λοιπόν, πως η μελλοντική διανομή του υδρογόνου με ασφαλή και αποτελεσματικό τρόπο, μπορεί να γίνει μόνο μέσω ειδικού σχεδιασμού του μελλοντικού δικτύου μεταφοράς του, ο οποίος αναγκαστικά θα είναι μεγαλύτερων απαιτήσεων από αυτόν που εφαρμόζεται σήμερα για τη μεταφορά των συμβατικών υγρών ή αέριων ορυκτών καυσίμων. Σε αυτή την εκδοχή, τα κέντρα παραγωγής θα βρίσκονται μακριά από τις τοπικές πηγές κατανάλωσής του και θα χαρακτηρίζεται ως κεντροποιημένος. Μία δεύτερη προσέγγιση της πιθανής μελλοντικής συγκρότησης του δικτύου διανομής του υδρογόνου, αναφέρεται σε μία μη κεντροποιημένη διανομή του υδρογόνου. Το υδρογόνο θα παράγεται μελλοντικά απευθείας στα διάφορα τοπικά σημεία της κατανάλωσής του, δηλαδή στα διάφορα τοπικά κέντρα ζήτησης, μέσω της εκάστοτε μεθόδου παραγωγής που θα κρίνεται κατάλληλη για κάθε περιοχή ξεχωριστά. [27]

Όσον αφορά την ασφάλεια των μελλοντικών δικτύων διανομής του υδρογόνου και των κέντρων παραγωγής και διοχέτευσής του, υπάρχουν ακόμα αρκετά σημαντικά ζητήματα που πρέπει να επιλυθούν, πρώτου αυτά λειτουργήσουν πρακτικά και με αξιόπιστο τρόπο. Οι αγωγοί μεταφοράς και οι διάφοροι σταθμοί ανεφοδιασμού θα πρέπει να εξοπλιστούν με κατάλληλες τεχνολογίες διαχείρισής του. Επίσης, όλες οι τεχνικές προφυλάξεις ανίχνευσης πιθανής διαρροής, που εφαρμόζονται σήμερα στις εγκαταστάσεις φυσικού αερίου θα πρέπει να προσαρμοστούν και να εφαρμοστούν στο δίκτυο διανομής του υδρογόνου, καθώς μια διαρροή είναι το ίδιο επικίνδυνη με αυτή του φυσικού αερίου και μπορεί να οδηγήσει σε έκρηξη.

Τέλος, παρά τις διάφορες τεχνικές δυσκολίες που υπάρχουν ακόμη για την ευρύτερη εφαρμογή της διανομής του υδρογόνου, αρκετά τεχνολογικά προηγμένα κράτη της Ευρώπης, αλλά και άλλων ηπείρων, έχουν ήδη αρχίσει να αναπτύσσουν τις πρώτες μικρής κλίμακας υποδομές διανομής και ανεφοδιασμού υδρογόνου που στοχεύουν κυρίως στον ανεφοδιασμό

αστικών μεταφορικών οχημάτων, που η λειτουργία τους βασίζεται στο υδρογόνο. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυριότεροι μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου που αναπτύσσονται, βελτιώνονται και χρησιμοποιούνται σήμερα. [28]

3.2 Συμπιεσμένο αέριο

Για δοχεία συμπιεσμένου αερίου, το κύριο φυσικό μέγεθος που μας ενδιαφέρει είναι η βαρυμετρική συγκέντρωση, δηλαδή ο λόγος της μάζας της μέγιστης ποσότητας του αερίου που μπορεί να αποθηκευτεί στη μάζα (M_{cont}) του δοχείου, όπου η μέγιστη ποσότητα αερίου αντιστοιχεί σε αυτήν ακριβώς πριν φτάσουμε στην έκρηξη (p_{burst}) του δοχείου. Η σχέση αυτή είναι ανάλογη ως προς το συντελεστή απόδοσης, PF, του δοχείου:

$$PF = \frac{p_{burst} V}{M_{cont}}$$

Στο διεθνές σύστημα μονάδων, ο συντελεστής απόδοσης μετριέται σε Joules ανά kilograms.

Για ένα δεδομένο υλικό και για μία δεδομένη τεχνολογία κατασκευής δοχείων συμπιεσμένου αερίου, η μάζα του δοχείου είναι ανάλογη προς την πίεση, έτσι ώστε η αναλογία μάζας του αποθηκευμένου αερίου προς τη μάζα του δοχείου να είναι ανεξάρτητη από την πίεση αποθήκευσης. Συνεπώς, ο μόνος τρόπος για να βελτιωθεί ο συντελεστής απόδοσης, είναι η χρήση καλύτερων υλικών και καλύτερης τεχνολογίας κατά την κατασκευή.

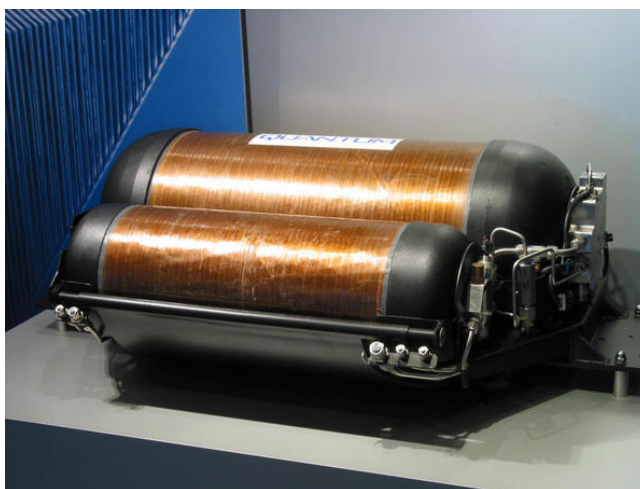
Μικρές ποσότητες υδρογόνου, όπως αυτές που χρησιμοποιούνται σε χημικά εργαστήρια, μπορούν εύκολα να αποθηκευτούν σε απλούς χαλύβδινους κυλίνδρους, συνήθως υπό πίεση 150 ατμοσφαιρών. Για τα οχήματα κυψελών καυσίμου (FCV), το συμπιεσμένο υδρογόνο μπορεί να αποτελέσει ένα πρακτικό τρόπο για να μεταφερθεί η απαραίτητη ποσότητα καυσίμου. Είναι σίγουρα το πιο απλό σύστημα αποθήκευσης και δεν απαιτεί ειδικό εξοπλισμό για την ανάκτηση του αερίου. Το μόνο που χρειάζεται είναι να κατασκευαστούν δοχεία – δεξαμενές καυσίμου με ικανοποιητικό συντελεστή απόδοσης.

Νέες τεχνολογίες δεξαμενών αλουμινίου, οι οποίες ενισχύονται από ένα περιτύλιγμα από ίνες άνθρακα, φαίνονται πολλά υποσχόμενες. Μπορούν να αποθηκεύσουν αέριο υδρογόνο σε πίεση που φτάνει τις 500 ατμόσφαιρες και είναι σχετικά ελαφριές. Τέτοιες δεξαμενές παρουσιάζουν βαρυμετρική συγκέντρωση της τάξης του 6.7%, ποσοστό πολύ ευνοϊκό και συγκρίσιμο με αυτό των συστημάτων αποθήκευσης μεταλλικών υδριδίων που θα συζητήσουμε παρακάτω σε αυτό το κεφάλαιο. Η λειτουργική αποτυχία αυτών των δεξαμενών είναι σχετικά ήπια, καθώς δεν εκρήγνυνται σε θραύσματα αλλά με την αποκόλληση του περιτυλίγματος ανθρακικών ινών. Έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να προκαλείται διαρροή του υδρογόνου πριν αυτό εκραγεί.

Για πολύ μεγάλης κλίμακας αποθήκευση, μπορεί να είναι δυνατό το υδρογόνο να κρατηθεί στο εσωτερικό υπόγειων σχηματισμών, όπως πορώδη πετρώματα, σπήλαια, παλιά

μεταλλεία, υδροφόρους ορίζοντες και εξαντλημένα κοιτάσματα φυσικού αερίου. Επί του παρόντος, υπάρχει μικρή εμπειρία στην υπόγεια αποθήκευση του υδρογόνου. Ωστόσο, τα αποτελέσματα αποθήκευσης Ηλίου (He) στην περιοχή Amarillo του Texas δείχνουν πως θα υπάρχει μία μικρή δυσκολία με την τεχνολογία αυτή.

Μία άλλη διάταξη αποθήκευσης του υδρογόνου θα είναι οι πολλοί αγωγοί μεταφοράς που χρησιμοποιούνται σήμερα για τη μεταφορά του φυσικού αερίου. Ένας τυπικός κορμός αγωγών ξεπερνάει τα 1000 km σε μήκος, μπορεί να έχει διάμετρο 1.2 m και να λειτουργεί σε πίεση έως 60 ατμόσφαιρες. Το υδρογόνο που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα τέτοιο αγωγό θα αντιστοιχεί σε ενέργεια 1000 TJ. [15]



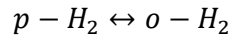
Εικόνα 7. Δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου τύπου συμπιεσμένου αερίου της Quantum Co.

3.3 Κρυογονικό υδρογόνο

Αν και το υδρογόνο υγροποιήθηκε πρώτη φορά το 1989 μέσω των προσπαθειών της NASA, μόλις πρόσφατα αναπτύχθηκε η τεχνολογία για την παραγωγή και αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων του. Η μεγαλύτερη μονάδα αποθήκευσης που υπάρχει είναι στο ακρωτήριο Canaveral, με χωρητικότητα 3375 m^3 . Δεδομένου ότι η πυκνότητα του υγρού υδρογόνου είναι 71 kg m^{-3} η εγκατάσταση μπορεί να συσσωρεύσει 240.000 kg υγρού υδρογόνου.

Υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη μορίων υδρογόνου: το παραϋδρογόνο και το ορθοϋδρογόνο. Στην πρώτη μορφή, η στροφορμή (spin) των δύο ατόμων που συνιστούν το μόριο είναι σε αντίθετες κατευθύνσεις, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η στροφορμή έχει την ίδια κατεύθυνση. Στην υγρή κατάσταση, το παραϋδρογόνο (p - H₂) έχει χαμηλότερη ενθαλπία από τη μορφή του ορθοϋδρογόνου (o - H₂). Στο σημείο βρασμού του υδρογόνου (20.4 K σε 0.1 MPa), η διαφορά είναι $1,406 \text{ MJ kmole}^{-1}$.

Στο υδρογόνο, σε αέρια ή σε υγρή μορφή, η αντίδραση συνεχίζεται συνεχώς και μία συγκέντρωση ισορροπίας του κάθε είδους εγκαθίσταται.



Το 'φρέσκο' συμπυκνωμένο υδρογόνο, ακόμα και αν φυλλάσσεται σε απόλυτα αδιαβατική δεξαμενή, θα χάσει το 1% της μάζας του κατά τη διάρκεια της πρώτης ώρας και 50% κατά τη διάρκεια της πρώτης εβδομάδας. Για την ελαχιστοποίηση αυτών των απωλειών, το ορθοϋδρογόνο μετατρέπεται καταλυτικά σε παραϋδρογόνο κατά τη διάρκεια της διαδικασίας υγροποίησης. Επίπεδα της τάξης του 95% σε παραϋδρογόνο θεωρούνται ικανοποιητικά.

Το υγρό υδρογόνο έχει θεωρηθεί ως κατάλληλο καύσιμο για αεροσκάφη. Ωστόσο, αερολάνα που λειτουργούν με τη χρήση υδρογόνου δύσκολα θα εμφανιστούν στο άμεσο μέλλον. Οι παρούσες προσπάθειες σχεδιασμού για μεταγωγικά αεροπλάνα που θα μπορούν να φτάσουν την ταχύτητα των 3 Mach, γίνονται με βάση τους κινητήρες που χρησιμοποιούν υγρά ορυκτά καύσιμα (κυροζίνη). Ωστόσο, η επιστημονική έρευνα για χρήση διαστημικών αεροπλάνων που θα αντικαταστήσουν τα μεταγωγικά αεροπλάνα, συγκλίνει στη χρήση υδρογόνου ως καύσιμο. Η μεταφορά θα είναι υπερηχητική (ίσως και 8 Mach) και το διαστημικό λεωφορείο θα μπορεί να απωγειωθεί από συμβατικούς αεροδιαδρόμους και να επιτύχει τροχιακή πτήση. Ένα από τα προβλήματα που προκύπτει στις υψηλές ταχύτητες μέσα στην ατμόσφαιρα, είναι οι υψηλές θερμοκρασίες που δημιουργούνται (θερμοκρασία στασιμότητας – stagnation temperature) οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε έκρηξη.

Τέλος, οι ενεργειακές απαιτήσεις για την υγροποίηση υδρογόνου είναι υψηλές και ο βρασμός πρέπει να ελαχιστοποιηθεί ή και να εξαλειφθεί εντελώς ώστε το σύστημα να γίνει αποδοτικό ως προς το κόστος και την ενέργεια. Οι δεξαμενές υγρού υδρογόνου μπορούν να αποθηκεύσουν μεγαλύτερες ποσότητες σε συγκεκριμένο όγκο, σε σχέση με τις δεξαμενές συμπιεσμένου αερίου. [15] [16]



Εικόνα 8. Δεξαμενή αποθήκευσης κρυογονικού υδρογόνου της εταιρίας Linde. Τα μεγέθη κυμαίνονται από 3.000 – 100.000 λίτρα.

3.4 Αποθήκευση υδρογόνου με προσρόφησή του σε υλικά

Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί εντός της δομής ή επί της επιφάνειας συγκεκριμένων υλικών. Αμφότερα, τα μόρια του υδρογόνου και του μεθανίου μπορούν εύκολα να απορροφηθούν από τον άνθρακα. Τα αέρια συγκρατούνται στη θέση τους από τις ασθενείς δυνάμεις Van der Waals και έτσι η ενέργεια που χρειάζεται για να ανακτηθεί το καύσιμο είναι μικρή.

Τα συστήματα άνθρακα μπορούν να συνδιαστούν με άλλες τεχνικές, όπως το αέριο να είναι υπό πίεση και να μειωθεί αρκετά η θερμοκρασία. Τυπικά, ένα σύστημα προσρόφησης με χρήση ενεργού άνθρακα απαιτεί πίεση ίση με 20 έως 40 ατμόσφαιρες και θερμοκρασία ίση με αυτή του υγρού αζώτου, για να συγκρατήσει το υδρογόνο. Οι απαιτήσεις αυτές περιορίζουν αισθητά την πρακτική εφαρμογή των συστημάτων αυτών. Ακόμη, επιτυγχάνουν 5 – 6% βαρυμετρική συγκέντρωση, δηλαδή περίπου την ίδια με εκείνη των καλών συστημάτων μεταλλικών υδριδίων. Οι νανοσωλήνες άνθρακα υπόσχονται μια πολύ πιο αποτελεσματική προσρόφηση υδρογόνου σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Οι νανοσωλήνες άνθρακα ενός τοιχώματος έχουν δώσει συγκεντρώσεις έως και 10% όταν λειτουργούν σε θερμοκρασία 120 °K και 0.4 ατμόσφαιρες. Όλα αυτά τα συστήματα απαιτούν χαμηλές θερμοκρασίες ή υψηλές πιέσεις. Παρακάτω αναφέρονται τα υλικά που χρησιμοποιούνται περισσότερο σήμερα για την απορρόφηση και αποθήκευση υδρογόνου. [15]

3.4.1 Χημική αποθήκευση υδρογόνου

Η χημική αποθήκευση του υδρογόνου είναι η τεχνολογία κατά την οποία το υδρογόνο αποθηκεύεται και απελευθερώνεται μέσω χημικών αντιδράσεων. Συνηθισμένες αντιδράσεις, περιλαμβάνουν αντιδράσεις χημικών υβριδίων με νερό και αλκοόλες. Τα χημικά υβρίδια μπορούν να βρίσκονται σε υγρή ή στερεή κατάσταση και τα άτομα υδρογόνου μπορούν να συνδέονται με μεταλλικά ή μη μεταλλικά είδη.

Οι απαραίτητες χημικές αντιδράσεις για την απελευθέρωση του υδρογόνου, παράγουν ένα παραπροϊόν που μπορεί να αναπαραχθεί ή να επαναφορτιστεί συνήθως με την προσθήκη θερμότητας, υδρογόνου και ίσως άλλων αντιδρώντων.

Συστήματα αποθήκευσης χημικών υβριδίων απαιτούν διαχείριση της παραγόμενης θερμότητας στην αντίδραση παραγωγής υδρογόνου, καθώς και απομάκρυνση των παραπροϊόντων ή χρησιμοποιημένων καυσίμων που δημιουργούνται όταν το υδρογόνο απελευθερώνεται. Αντιδράσεις υδρόλυσης (διάσπαση των χημικών δεσμών μιας ένωσης παρουσία νερού), υδρογόνωσης (προσθήκη υδρογόνου σε μια ένωση), απυδρογόνωσης (αφαίρεση υδρογόνου από μία ένωση) καθώς και κάποιες άλλες νέες χημικές προσεγγίσεις, όπως η αλκοόλυση (το αντίστοιχο της υδρόλυσης για αλκοόλες αντί νερού), βρίσκονται υπό εξέταση. [16]

3.4.2 Μεταλλικά υδρίδια – μεταλλοϋδρίδια

Γενικώς, υδρίδιο καλείται μια χημική ένωση περιέχουσα υδρογόνο και τουλάχιστον ένα ακόμη στοιχείο. Τα μεταλλοϋδρίδια μπορούν να αποθηκεύσουν υδρογόνο μέσω απορρόφησης. Τα υδρίδια μετάλλων είναι συγκεκριμένοι συνδιασμοί μεταλλικών κραμάτων τα οποία δρουν σαν ένα σφουγγάρι που απορροφά νερό. Τα υδρίδια μετάλλων έχουν τη μοναδική ικανότητα να απορροφούν υδρογόνο και να το ελευθερώνουν αργότερα, είτε σε θερμοκρασία δωματίου είτε μέσω θέρμανσης του δοχείου. Η συνολική ποσότητα του υδρογόνου που απορροφάται είναι γενικά 1 – 2 % του συνολικού βάρους του δοχείου. Μερικά μεταλλοϋδρίδια τελευταίας γενιάς είναι σε θέση να αποθηκεύσουν 7 – 10 % του δικού τους βάρους, αλλά μόνο όταν θερμαίνονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Το ποσοστό του αερίου που απορροφάται στον βαθμό του μετάλλου είναι ακόμα σχετικά χαμηλό, αλλά τα υδρίδια προσφέρουν μια αξιόπιστη λύση για την αποθήκευση υδρογόνου.

Τα υδρίδια μετάλλων προσφέρουν τα πλεονεκτήματα της ασφαλούς μεταφοράς υδρογόνου κάτω από συνεχή πίεση. Η διάρκεια ζωής του δοχείου αποθήκευσης μεταλλικών υδριδίων είναι άμεσα συνδεδεμένη με την καθαρότητα του υδρογόνου όταν αποθηκεύεται. Τα κράματα δρουν σαν σφουγγάρι, τα οποία απορροφούν υδρογόνο, αλλά επίσης απορροφούν και τους ρύπους που εισάγονται στο δοχείο μέσω του υδρογόνου. Το αποτέλεσμα είναι το υδρογόνο που απελευθερώνεται από το δοχείο να είναι εξαιρετικά καθαρό, αλλά η διάρκεια ζωής του δοχείου και η ικανότητά του να αποθηκεύει υδρογόνο μειώνεται καθώς οι ρύποι μένουν και γεμίζουν τα κενά στο μέταλλο, τα οποία κατείχε το υδρογόνο. [29]

Στοιχεία που σχηματίζουν ασταθή υδρίδια (υδρίδια που μπορούν εύκολα να αντιστραφούν) είναι το μαγνήσιο, ο σίδηρος, το τιτάνιο, το ζirkόνιο, το ύτριο, το λανθάνιο και το παλλάδιο. Τα υδρίδια που αποτελούνται από τα παραπάνω στοιχεία ονομάζονται δυαδικά. Τα τριμερή υδρίδια, υδρίδια που σχηματίζονται από τον συνδιασμό υδρογόνου με μια δυαδική ένωση, φαίνεται να είναι περισσότερο ελπιδοφόρα. Η προσθήκη ενός τρίτου στοιχείου οδηγεί σε τεταρτοταγή υδρίδια, αυξάνει ακόμη περισσότερο τον βαθμό ελευθερίας στην επιλογή των χαρακτηριστικών του συστήματος. Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός συνδιασμός στοιχείων που είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί. Η έρευνα σε αυτή τη νέα τεχνολογία είναι ακόμα σε πρωταρχικό επίπεδο.

Η ανταλλαγή υδρογόνου με ένα στερεό ονομάζεται προσρόφηση. Εάν το υδρογόνο σταθεροποιηθεί, η αντίδραση ονομάζεται απορρόφηση. Εάν το υδρογόνο απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα λέγεται εκρόφηση. Τα χαρακτηριστικά των υδριδίων εξετάζονται καλύτερα αν μελετήσουμε την πίεση συναρτήσεως συγκεντρώσεων υδρογόνου, ισόθερμα για το υλικό. Πολλά κράματα απαιτούν ενεργοποίηση η οποία περιλαμβάνει τη θέρμανση κόκκων του υλικού σε θερμοκρασία 300 – 500 °C εν κενώ για να απομακρυνθούν οι φυσαλίδες, και κατόπιν, την έκθεσή τους σε υδρογόνο υψηλής καθαρότητας. Επίσης, δεν προκαλεί έκπληξη ότι η σταθερά πλέγματος του υδριδίου δεν είναι η ίδια με εκείνη του μητρικού υλικού και ότι η απορρόφηση του υδρογόνου συνοδεύεται από αύξηση του όγκου.

Η τάση που εμφανίζει το υδρίδιο για επέκταση κατά τη διάρκεια της απορρόφησης του υδρογόνου μπορεί να οδηγήσει σε μηχανικές δυσκολίες. Κατά τη διάρκεια της εκρόφησης, τα συμβαλλόμενα σωματίδια αποτελούν μία πιο συμπαγή σκόνη που μπορεί να συγκεντρώσει την ύλη της σε νέες θέσεις μέσα στο δοχείο, και κατά την μετέπειτα επέκταση της μπορεί να προκαλέσει σοβαρές ρωγμές στα τοιχώματά του. Ακόμη, η θεωρητική ογκομετρική συγκέντρωση του υδρογόνου σε υδρίδια μπορεί να είναι μεγαλύτερη από εκείνη του υγρού υδρογόνου. Αυτά τα δεδομένα, ωστόσο, υπερεκτιμούν την συγκέντρωση και κατά συνέπεια, υπερεκτιμούν την αντίστοιχη συγκέντρωση ενέργειας επειδή η ογκομετρική πυκνότητα της σκόνης του υδριδίου είναι πολύ μικρότερη από εκείνη του υδριδίου λόγω της ατελούς συσσώρευσης των μεμονωμένων κόκκων.



Εικόνα 9. Συστοιχία δεξαμενών μεταλλικών υδριδίων της εταιρείας PalPac.

3.4.2.1 Χαρακτηριστικά των υλικών υδριδίων

Μερικά από τα διακριτικά χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιούνται σε συστήματα υδριδίου είναι:

Κλίση πλατώ (Plateau slope)

Απλές θερμοδυναμικές σχέσεις προβλέπουν τα οριζόντια πλατώ. Στην πράξη, η πίεση του πλατώ ανεβαίνει με την αύξηση της περιεκτικότητας του υδρογόνου. Η κλίση που οφείλεται στην πίεση του πλατώ μπορεί να εκφραστεί από την παράμετρο της κλίσης ($d \ln(p_a) / d(H/M)$).

Υστέρηση προσρόφησης (Sorption hysteresis)

Η πίεση του πλατώ κατά τη διάρκεια της απορρόφησης είναι συνήθως κάπως μεγαλύτερη από ότι κατά την εκρόφηση. Με άλλα λόγια, υπάρχει μια υστέρηση προσρόφησης όταν το κράμα ανακυκλώνεται. Η υστέρηση είναι μια μη αντιστρεπτή διαδικασία η οποία προκαλείται από τη θερμότητα που παράγεται από την πλαστική παραμόρφωση του

κρυστάλλου όταν το πλέγμα διαστέλλεται ή συστέλλεται κατά τη διάρκεια του κύκλου προσρόφησης. Κοινώς θεωρείται ότι ο βαθμός της υστέρησης είναι σχετικά ανεξάρτητος της θερμοκρασίας.

Ωφέλιμη χωρητικότητα (Usable capacity)

Η ωφέλιμη χωρητικότητα ορίζεται, κάπως αισιόδοξα, ως η αλλαγή στην αναλογία 'Υδρογόνου/Μετάλλου' σε ένα υδρίδιο, όταν η πίεση μειώνεται από 10 φορές την πίεση πλατώ σε 0.1 φορές της πίεσης πλατώ. Αυτό είναι ένα εύρος πίεσης της τάξης 100:1. Ένας περισσότερο ρεαλιστικός ορισμός θα πρέπει να βασίζεται σε μία περιορισμένη (πολύ μικρότερη) περιοχή πίεσης.

Θερμική ισχύς (Heat capacity)

Τα συστήματα υδριδίων ενεργοποιούνται από τις αλλαγές της θερμοκρασίας. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε την θερμική ισχύ (χωρητικότητα) των διαφορετικών κραμάτων, προκειμένου να σχεδιαστούν σωστά τα συστήματα.

Εξάρτηση πίεσης πλατώ από την θερμοκρασία (Plateau pressure dependence on temperature)

Η εξάρτηση της πίεσης πλατώ από τη θερμοκρασία είναι μία συνάρτηση των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του υλικού. Με την τροποποίηση της σύνθεσης του κράματος, είναι δυνατόν τα χαρακτηριστικά του υλικού, να ταιριάζουν σε πολλές διαφορετικές εφαρμογές. Η αντίδραση του υδρογόνου με μεταλλικές ενώσεις περιλαμβάνει φυσικά, μεταβολές ενθαλπίας: οι απορροφήσεις αποτελούν εξώθερμες αντιδράσεις και οι εκροφήσεις αποτελούν ενδόθερμες αντιδράσεις. Οι μεταβολές της ενθαλπίας μπορεί να προσδιορισθούν με θερμοδομετρικές τεχνικές. Ωστόσο, σύνηθες είναι, ο προσδιορισμός να γίνεται βάση της πίεσης συναρτήσει της ισοθερμικής συγκεντρώσεως.

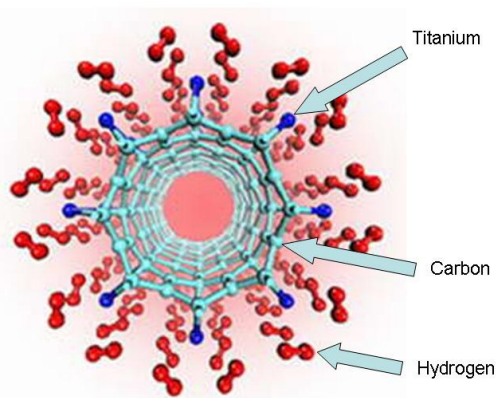
Όσον αφορά την εφαρμογή της τεχνολογίας αποθήκευσης υδρογόνου σε μεταλλοϋδρίδια, στον χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας, υπάρχουν ορισμένες σημαντικές λεπτομέρειες που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν τόσο στην εφαρμογή σε υπάρχοντα συστήματα όσο και στη μελλοντική βελτίωση και κατασκευή νέων συστημάτων. Ένα αυτοκίνητο που κινείται βάση μίας κυψέλης καυσίμου και μεταλλοϋδριδίων για την αποθήκευση του υδρογόνου (της τρέχουσας τεχνολογίας) έχει το πλεονέκτημα να είναι ελαφρύτερο σε σχέση με ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο που χρησιμοποιεί προηγμένες μπαταρίες. Επιπλέον, ένα πρακτικό ζήτημα είναι η ταχύτητα με την οποία ένα σύστημα αποθήκευσης υδριδίου μπορεί να φορτιστεί και να αποφορτιστεί. Αυτό εξαρτάται φυσικά τα κινητικά χαρακτηριστικά της αντίδρασης, τα οποία μπορούν να βελτιωθούν με την προσθήκη νικελίου ως καταλύτη. Μία διέγερση της τάξης του 5% σε νικέλιο βοηθά ήδη αισθητά, αλλά συνήθως χρησιμοποιείται ως καταλύτης ένα πολύ μεγαλύτερο ποσοστό νικελίου. Επίσης, εάν απαιτούνται γρήγοροι ρυθμοί αναπλήρωσης, το συνολικό ποσό του απορροφηθέντος υδρογόνου μπορεί να είναι μικρότερο από αυτό που θα είχε απορροφηθεί από τα μεταλλικά υδρίδια στην περίπτωση της βραδείας φόρτισης. Τέλος, η χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης καθορίζεται από τη μέγιστη ποσότητα του υδρογόνου που μπορεί να διαλυθεί στο κράμα. Κάθε προσπάθεια να εκχυλιστεί περισσότερο υδρογόνο συνοδεύεται από μεγάλη πτώση στην πίεση του υδρογόνου. [15]

3.4.3 Υλικά βασισμένα σε άνθρακα – νανοσωλήνες

Υλικά βασισμένα σε άνθρακα αποθηκεύουν υδρογόνο μέσω απορρόφησης, κατά την οποία μόρια ή άτομα υδρογόνου επισυνάπτονται στην επιφάνεια της νανοδομής του άνθρακα. Αυτή η κατηγορία υλικών, τα οποία μπορούν να βρίσκονται είτε ως στερεά είτε σε μορφή σκόνης ή δισκίων, περιλαμβάνουν ένα εύρος υλικών βασισμένων σε άνθρακα, συμπεριλαμβανομένων νανοσωλήνων, νανοπαπύρων και νανοϊνών, στερεού αφρού και δομών σφαιρικών κελιών. [15]

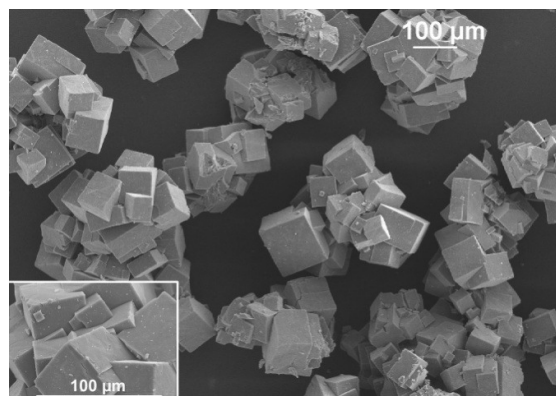
Οι νανοσωλήνες άνθρακα (carbon nanotubes, CNTs) ανακαλύφθηκαν το 1991 από τον Sumio Iijima στα εργαστήρια της εταιρείας NEC. Είναι ομόκεντροι κύλινδροι γραφίτη, κλειστοί σε κάθε άκρο με πενταμελείς δακτυλίους. Οι νανοσωλήνες μπορούν να είναι πολυφλοιϊκοί με ένα κεντρικό σωλήνα να περιβάλλεται από ένα ή περισσότερα στρώματα γραφίτη, ή μονοφλοιϊκοί όπου υπάρχει μόνο ένας σωλήνας και καθόλου επιπλέον στρώματα γραφίτη. Οι νανοσωλήνες έχουν τη δυνατότητα να ομαδοποιηθούν και να σχηματίσουν τις λεγόμενες συστοιχίες νανοσωλήνων.

Όσον αφορά την δομή τους, στους πολυφλοιϊκούς νανοσωλήνες, οι εσωτερικοί σωλήνες έχουν διάμετρο της τάξης μερικών nm (νανόμετρων), ενώ οι εξωτερικοί μπορεί να έχουν διάμετρο πολλές φορές πολλαπλάσια. Στα άκρα των κυλίνδρων γραφίτη δεν υπάρχουν ελεύθεροι δεσμοί, αλλά αυτά καλύπτονται από κατάλληλες ημισφαιρικές δομές παρόμοιες με αυτές των φουλερένιων. Μπορούμε να φανταστούμε έναν νανοσωλήνα ως ένα στρώμα γραφίτη το οποίο έχει τυλιχτεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε η αρχή και το τέλος του να συμπέσουν. Η απόσταση μεταξύ των δύο διαδοχικών στρωμάτων άνθρακα στους πολυφλοιϊκούς νανοσωλήνες, μπορεί να πάρει διάφορες τιμές. Οι νανοσωλήνες χαρακτηρίζονται τόσο από πενταμελείς όσο και από εξαμελείς δακτυλίους άνθρακα. Ωστόσο, απόκλιση από τον εξαμελή αποτελούν οι επταμελείς δακτύλιοι, οι οποίοι σε αντίθεση με τους πενταμελείς δίνουν αρνητική καμπυλότητα στο νανοσωλήνα. Αν πενταμελείς δακτύλιοι βρίσκονται απέναντι από επταμελείς τότε ο νανοσωλήνας αποκτά κυρτότητα. Επίσης, σωστός συνδυασμός πενταμελών και επταμελών δακτυλίων μπορούν να κάνουν εφικτή την ένωση ενός νανοσωλήνα με κάποιον άλλο, διαφορετικής δομής. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να δημιουργήσουν ετεροεπαφές, όπως αυτές μετάλλου ημιαγωγού ή $p - n$, εξ' ολοκλήρου από νανοσωλήνες. [16] [17]



Εικόνα 10. Σχηματική αναπαράσταση προσρόφησης υδρογόνου σε νανοσωλήνα άνθρακα.

Εικόνα 11. Φωτογραφία από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο στην οποία φαίνονται οι δεσμοί που αναπτύσει το υδρογόνο στα εσωτερικά τοιχώματα νανοσωλήνων άνθρακα.



Νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν να κατασκευαστούν μέσω των παρακάτω τεχνικών σύνθεσης:

- Εξάχνωση ηλεκτροδίων άνθρακα με τη χρήση ηλεκτρικού τόξου εκκένωσης.
- Φωτοδιάσπαση γραφίτη με τη χρήση λέιζερ. Ένα κομμάτι άνθρακα εξατμίζεται με ακτινοβολία από λέιζερ σε υψηλή θερμοκρασία και αδρανή ατμόσφαιρα. Οι παραγόμενοι σωλήνες έχουν μικρή διασπορά ως προς τη διάμετρο.
- Καταλυτική χημική απόθεση από ατμό. Αέριες ενώσεις του άνθρακα (συνήθως υδρογονανθράκων ή μονοξειδίου του άνθρακα) διασπώνται καταλυτικά με τη χρήση μεταλλικών καταλυτών, υποστηριγμένων σε υποστρώματα οξειδίων μετάλλων ή αιωρούμενων στην αέρια φάση. [15]

Τα προϊόντα μπορεί να είναι πολυφλοιϊκοί νανοσωλήνες ή μονοφλοιϊκοί ανάλογα με τις παραμέτρους της μεθόδου. Οι μονοφλοιϊκοί νανοσωλήνες για να συντεθούν χρειάζονται την παρουσία ενός καταλύτη, ενώ στην περίπτωση των πολυφλοιϊκών ο καταλύτης δεν είναι απαραίτητος. Μάλιστα, το μέγεθος των καταλυτικών σωματιδίων καθορίζει και τη διάμετρο του νανοσωλήνα. Έχουν κατασκευαστεί νανοσωλήνες με αναλογία μήκους προς διάμετρο μέχρι 132.000.000:1, σημαντικά μεγαλύτερη από οποιοδήποτε άλλο υλικό. [31] Τα κυλινδρικά αυτά μόρια άνθρακα έχουν ασυνήθιστες ιδιότητες, οι οποίες είναι πολύτιμες για την ηλεκτρική – ηλεκτρονική, την νανοτεχνολογία, την οπτική και σε άλλους τομείς της επιστήμης των υλικών και της τεχνολογίας. Ειδικότερα, λόγω της εξαιρετικής θερμικής αγωγιμότητας και των μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν οι νανοσωλήνες, βρίσκουν εφαρμογή ως προσθήκες σε διάφορα δομικά υλικά. [30]

3.4.3.1 Ηλεκτρικές ιδιότητες νανοσωλήνων

Λόγω της συμμετρίας και της μοναδικής ηλεκτρικής δομής του γραφίτη, η δομή του νανοσωλήνα επηρεάζει έντονα τις ηλεκτρικές του ιδιότητες. Οι νανοσωλήνες ανάλογα με την σύνθεση τους μπορεί να είναι μεταλλικοί, μπορεί να είναι ημιαγωγοί με πολύ μικρό διάκενο ζώνης, ή να είναι ημιαγωγοί μέτριας ισχύος. Ωστόσο, υπάρχουν και εξαιρέσεις, καθώς η καμπυλότητα σε μικρής διαμέτρου νανοσωλήνες μπορεί να επηρεάσει έντονα τις ηλεκτρικές

του ιδιότητες. Θεωρητικά, οι μεταλλικοί νανοσωλήνες μπορούν να μεταφέρουν ηλεκτρικό ρεύμα πυκνότητας $4 \times 10^9 \text{ A/cm}^2$, η οποία είναι περισσότερο από 1000 φορές μεγαλύτερη από εκείνες των μετάλλων όπως ο χαλκός. Λόγω της εγκάρσιας διατομής τους σε επίπεδα νανοκλίμακας, τα ηλεκτρόνια διαδίδονται μόνο κατά μήκος του άξονα του σωλήνα μεταφοράς ηλεκτρονίων, συμπεριλαμβανομένων των κβαντικών φαινομένων. Ως αποτέλεσμα, οι νανοσωλήνες άνθρακα αναφέρονται συχνά ως μονοδιάστατοι αγωγοί. Επίσης, έχουν υπάρξει αναφορές για ενδογενή υπεραγωγιμότητα σε νανοσωλήνες άνθρακα, όμως πολλά πειράματα που έγιναν για να διαπιστωθεί εάν όντως υφίσταται δεν έδωσαν θετικά αποτελέσματα. Η υπεραγωγιμότητα των νανοσωλήνων μελετάται ακόμα και αποτελεί σημαντικό αντικείμενο συζήτησης στους επιστημονικούς κύκλους. [32] [33]

3.4.3.2 Αποθήκευση υδρογόνου

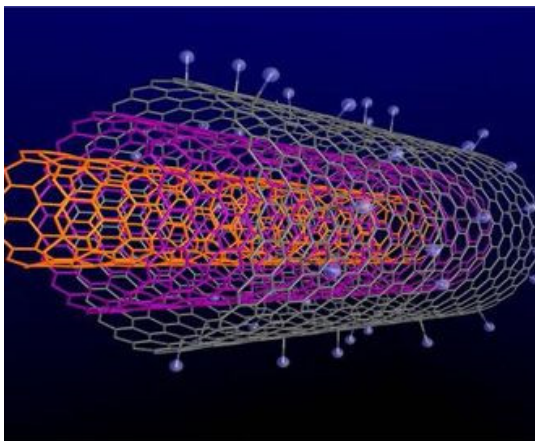
Οι νανοσωλήνες άνθρακα, εκτός από το ότι είναι σε θέση να αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια, υπήρξαν αντικείμενο μελέτης για το αν μπορούν να αποθηκεύσουν υδρογόνο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή καυσίμου. Η έρευνα απέδειξε πως σε μικρούς νανοσωλήνες άνθρακα, είναι δυνατόν να συμπεκνωθούν αέρια σε υψηλή πυκνότητα στο εσωτερικό τοίχωμα μονοφλοιϊκών νανοσωλήνων. Αυτό επιτρέπει σε αέρια, κυρίως υδρογόνο (H_2), να αποθηκεύονται σε υψηλές πυκνότητες χωρίς να συμπεκνωθούν πρώτα σε υγρό. Ενδεχομένως, αυτή η μέθοδος αποθήκευσης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε οχήματα στη θέση των δεξαμενών καυσίμου αερίου για ένα υδρογονοκίνητο αυτοκίνητο. Ένα τρέχον ζήτημα που αφορά τα υδρογονοκίνητα οχήματα είναι ο τρόπος με τον οποίο θα τοποθετηθούν τέτοιες δεξαμενές πάνω στα αυτοκίνητα..

Τρέχουσες μέθοδοι αποθήκευσης συνεπάγονται την ψύξη και συμπίκνωση του αερίου H_2 σε υγρή κατάσταση, η οποία ωστόσο προκαλεί απώλεια του δυναμικού ενέργειας (25-45%) σε σύγκριση με την ενέργεια που σχετίζεται με την αέρια κατάσταση. Αποθήκευση χρησιμοποιώντας μονοφλοιϊκούς νανοσωλήνες θα επιτρέψει την διατήρηση του υδρογόνου στην αέρια κατάστασή του, αυξάνοντας έτσι την αποδοτικότητα της αποθήκευσης. Αυτή η μέθοδος, επιτρέπει μια αναλογία όγκου προς ενέργεια ελαφρώς μικρότερη από εκείνη των μηχανοκίνητων οχημάτων που κινούνται με φυσικό αέριο, αλλά παραμένει σε συγκρίσιμα επίπεδα.

Περιοχή διαμάχης και συχνού πειραματισμού, αφορά η αποθήκευση του υδρογόνου με προσρόφηση του σε νανοσωλήνες άνθρακα και κατά συνέπεια η αποτελεσματικότητα με την οποία η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα. Η αποτελεσματικότητα της αποθήκευσης υδρογόνου αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της χρήσης του ως κύρια πηγή καυσίμου, δεδομένου ότι το υδρογόνο περιέχει μόνο το ένα τέταρτο της ενέργειας ανά μονάδα όγκου συγκριτικά με την βενζίνη.

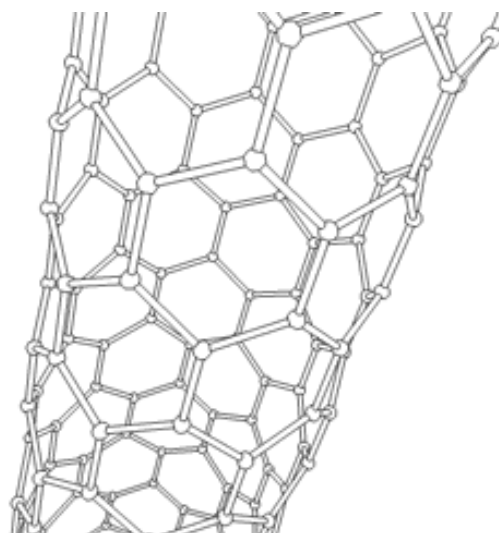
Στόχος της επιστημονικής έρευνας στο χώρο της τεχνολογίας υλικών είναι η εις βάθος κατανόηση των δομικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων των νανοσωλήνων άνθρακα, καθώς και η θεωρητική μελέτη της διαδικασίας προσρόφησης αερίων και κυρίως υδρογόνου. Βεβαίως,

επόμενο βήμα είναι η παρασκευή νανοσωλήνων και νανοπαπύρων άνθρακα που θεωρητικά θα παρουσιάζουν μεγαλύτερη απορροφητικότητα υδρογόνου, καθώς και η πειραματική μέτρηση της προσρόφησης αυτής. Τέλος, αν επαληθευτούν οι θεωρητικές προβλέψεις τα νέα αυτά υλικά θα δοκιμαστούν κάτω από πραγματικές συνθήκες ως μπαταρίες υδρογόνου σε αυτοκίνητα. [34]



Εικόνα 12. Αναπαράσταση πολυφλοιϊκού νανοσωλήνα άνθρακα.

Εικόνα 13. Νανοσωλήνας – νανοπάπυρος άνθρακα. Η δομή του αποτελείται από συσσώρευση πολλών εξαμελών δακτυλίων άνθρακα.



3.5 Νέες τεχνολογίες αποθήκευσης υδρογόνου

Οι επιστήμονες ερευνούν νέα υλικά και τεχνολογίες αποθήκευσης, με την προοπτική να αναπτύξουν αναστρέψιμες διαδικασίες αποθήκευσης υδρογόνου. Η έρευνα σε αυτόν τον τομέα έχει δείξει πως στρέφεται προς τα αγωγίμα πολυμερή υλικά. Αρχικές μελέτες δείχνουν ότι σημαντικά μεγάλη ποσότητα υδρογόνου μπορεί να αποθηκευτεί – ενσωματωθεί στη δομή αγωγίμων πολυμερών. Ωστόσο, η έρευνα για την αποθήκευση του υδρογόνου πρέπει να στραφεί στον τρόπο με τον οποίο θα εφαρμοστεί στα οχήματα (αυτοκίνηση), καθώς θα αποτελεί το μεγαλύτερο τεχνολογικό στοίχημα των τελευταίων δύο δεκαετιών. [16]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

4.1 Εισαγωγή στον κόσμο των κυψελών καυσίμου

Λέγεται ότι ο 19^{ος} ήταν ο αιώνας της μηχανολογίας, ο 20^{ος} αυτός των ηλεκτρονικών και ο 21^{ος} ανήκει στην ανάπτυξη της βιολογίας. Στην πραγματικότητα, ο 20^{ος} αιώνας θα μπορούσε κάλλιστα να είναι γνωστός ως ο αιώνας της μηχανικής θερμικής μηχανής. Αν μετρήσουμε τα αυτοκίνητα, τα φορτηγά και τα λεωφορεία, οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής μόνες τους, έχουν κατασκευάσει από το 1900 έως το 1999 λίγο περισσότερα από 600 εκατομμύρια οχήματα. Αν προσθέσουμε την παραγωγή αυτοκινήτων, μοτοσυκλετών, χλοοκοπτικών μηχανών, σκαφών, αεροσκαφών, μηχανών σιδηροδρόμων και των μηχανισμάτων βαρέων κατασκευών σε ολόκληρο τον κόσμο, η παραγωγή μηχανών εσωτερικής καύσης τον 20^ο αιώνα έφτασε τα 2 δισεκατομμύρια.

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούν τη θερμότητα που ελευθερώνεται από την αντίδραση μιας χημικής ουσίας (καύσιμο) με οξυγόνο (συνήθως από τον αέρα). Η θερμότητα κατόπιν αναβαθμίζεται σε μηχανική ενέργεια μέσω πολύπλοκων μηχανισμών. Αυτά τα συστήματα είναι εκ φύσεως αναποτελεσματικά και δύσχρηστα. Είναι η τελική έκβαση του αγώνα του ανθρώπου μετά από χιλιάδες χρόνια να ελένξει τη φωτιά. Ωστόσο, μετατρέποντας την χημική ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια είναι μία περισσότερο απλοποιημένη διαδικασία, ιδιαίτερα εν όψει της ηλεκτρικής φύσης του χημικού δεσμού που συγκρατεί τα άτομα σε ένα μόριο. Οι συσκευές που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια, ονομάζονται **ηλεκτροχημικές κυψέλες**. Οι μπαταρίες των αυτοκινήτων, οι φακοί που χρησιμοποιούν μπαταρίες και οι κυψέλες καυσίμου είναι όλα παραδείγματα ηλεκτροχημικών κυψελών.

Επειδή οι ηλεκτροχημικές κυψέλες μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική απευθείας, χωρίς να χρειάζεται μία ενδιάμεση υποβάθμιση θερμότητας, δεν περιορίζεται η απόδοσή τους από τον κύκλο Carnot. Οι λέξεις 'κυψέλη' και 'μπαταρία', στη σύγχρονη διάλεκτο είναι εναλλάξιμα. Η λέξη 'κυψέλη' εισάγει μία ενιαία μονάδα (αν και η 'κυψέλη καυσίμου' συνήθως αποτελείται από έναν αριθμό μονάδων συνδεδεμένων εν σειρά). Με τη λέξη 'μπαταρία' εννοείται ένας αριθμός μονάδων, αλλά και μία μόνο μονάδα των 1.5 Volt είναι κοινώς ονομαζόμενη ως μπαταρία.

Εάν η μπαταρία δεν αξίζει τη διατήρησή της μετά την πρώτη εκφόρτιση της, τότε είναι μία **αναλώσιμη** (επίσης ονομάζεται πρωτογενής) μπαταρία. Εάν η συσκευή είναι επαναχρησιμοποιήσιμη μετά την εκφόρτισή της, μπορεί να εμπίπτει σε μία από τις δύο ακόλουθες κατηγορίες:

- **Επαναφορτιζόμενη** (επίσης ονομάζεται δευτερογενής) συσκευή, της οποίας η δραστηριότητα αποκαθίσταται με την βοήθεια ενός ηλεκτρικού ρεύματος **φόρτισης**, όπως είναι η περίπτωση των μπαταριών των αυτοκινήτων.
- **Ανεφοδιάσιμη συσκευή** (κυψέλη καυσίμου), η οποία παρέχει μία σταθερή έξοδο επειδή τα αναλώσιμα μέρη της αναπληρώνονται. Για να διευκολυνθεί η εν λόγω αναπλήρωση, τα αναλώσιμα είναι συνήθως ρευστά, αν και ορισμένες κυψέλες καυσίμων χρησιμοποιούν στερεά αναλώσιμα όπως στην περίπτωση των κυψελών ψευδαργύρου – αέρα.

$$\text{Ηλεκτροχημικές κυψέλες} \begin{cases} \text{Αναλώσιμες} \\ \text{Μη αναλώσιμες} \end{cases} \begin{cases} \text{Επαναφορτιζόμενες} \\ \text{Ανεφοδιάσιμες} \end{cases}$$

Αν και οι κυψέλες καυσίμου χρονολογούνται από το 1839 όταν ο Sir William Groves παρουσίασε έναν 'ηλεκτρολυτικό συσσωρευτή αερίων', μέχρι πρόσφατα παρέμεναν στην 'τεχνολογικά νηπιακή τους ηλικία'. Ωστόσο, η NASA αναθεώρησε την έρευνα γύρω από τις κυψέλες καυσίμου: τα διαστημικά λεωφορεία Gemini και Apollo χρησιμοποιούσαν κυψέλες καυσίμων. Οι πιο σημαντικές εφαρμογές των κυψελών καυσίμου στο εγγύς μέλλον, είναι η χρησιμοποίηση τους ως πηγές ενέργειας σε αυτοκίνητα και λεωφορεία, ως κεντρικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στην διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (συμπεριλαμβανομένων των κατοικιών) και τέλος ως πηγές ενέργειας για κινητά τηλέφωνα και άλλες μικρές ηλεκτρονικές συσκευές. [15]

4.2 Θερμοδυναμική σύγκριση κυψελών καυσίμου με κύκλο Carnot

Όλες οι θερμικές μηχανές, συμπεριλαμβανομένων και των μηχανών εσωτερικής καύσης, περιορίζονται από την απόδοση του κύκλου Carnot. Η θερμική μηχανή δεν μπορεί να μετατρέψει όλη την παραγόμενη θερμική ενέργεια, σε μηχανική ενέργεια. Μέρος της θερμικής ενέργειας απορρίπτεται στο περιβάλλον. Σε μία μηχανή εσωτερικής καύσης, παρέχεται θερμότητα σε υψηλή θερμοκρασία T_1 , μέρος της ενέργειας μετατρέπεται σε μηχανικό έργο και το υπόλοιπο απορρίπτεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία T_2 . Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας, τόσο μεγαλύτερη είναι η απόδοση.

Σύμφωνα με τους νόμους της θερμοδυναμικής, η θερμική απόδοση της θερμικής μηχανής είναι, ο λόγος του μηχανικού έργου που παράγεται, προς το ποσό της θερμότητας που εισάγεται αρχικά σε θερμοκρασία T_1 .

$$n \leq 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Όπου οι θερμοκρασίες T_1 , T_2 δίνονται σε Kelvin. [5]

4.2.1 Βαθμός απόδοσης κυψελών καυσίμου

Για κάθε διαδικασία κατά την οποία η εισαγόμενη ενέργεια μετατρέπεται σε έργο, η βασική έκφραση του θερμικού βαθμού απόδοσης ορίζεται ως το παραγόμενο έργο (εξόδου) διαιρούμενο με τη θερμότητα εισόδου.

$$n = \frac{W_{out}}{Q_{in}}$$

Για να ερμηνεύσουμε την έκφραση αυτή για μια ειδική συσκευή, οι όροι του έργου και της θερμότητας πρέπει να αξιολογηθούν με βάση τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής. Ο πρώτος νόμος, ορίζεται ως η αλλαγή της εσωτερικής ενέργειας, η οποία ισούται με το άθροισμα της μεταφοράς θερμότητας του συστήματος, και το έργο που παράγεται από το σύστημα αυτό.

$$dU = dQ - dW \quad (1^{ος} \text{ θερμοδυναμικός νόμος})$$

Για την κυψέλη καυσίμου, το έργο μπορεί να χωριστεί σε έργο του εργαζόμενου μέσου 'pdV' και ηλεκτρικό έργο έτσι ώστε ο πρώτος νόμος να γίνει:

$$dU = dQ - pdV - dW_{elec}$$

Θεωρώντας ότι η πίεση παραμένει σταθερή και ορίζοντας την ενθαλπία ως:

$$H = U + pV \quad (\text{ενθαλπία})$$

ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος γίνεται:

$$dH = dQ - dW_{elec}$$

Στην ιδανική περίπτωση της αντιστρεπτής διεργασίας ισχύει:

$$dQ = T dS \quad (\text{όπου } S \text{ ορίζεται η εντροπία})$$

και επομένως ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος γίνεται:

$$dH - T dS = -dW_{elec}$$

Όμως γνωρίζουμε ότι από το αριστερό μέλος της παραπάνω εξίσωσης είναι η αλλαγή της ενέργειας Gibbs ($G = H - TS$) για σταθερή θερμοκρασία.

Επομένως προκύπτει ότι το καθαρό παραγόμενο έργο είναι:

$$W_{out} = -\Delta G_R$$

όπου $\Delta G_R = G(T, \text{προϊόντα}) - G(T, \text{αντιδρώντα})$ και R δηλώνει την αλλαγή σε όλη τη διάρκεια της αντίδρασης. Η αλλαγή της ενέργειας του Gibbs αναφέρεται στη θερμοκρασία λειτουργίας των κυψελών καυσίμου. Με άλλα λόγια, το καθαρό παραγόμενο έργο σε μια κυψέλη καυσίμου ισούται με την αλλαγή της ενέργειας Gibbs της αντίδρασης που λαμβάνει χώρα στη κυψέλη καυσίμου.

Η θερμότητα εισόδου είναι η θερμομητική αξία του καυσίμου, η οποία είναι η μεταβολή της ενθαλπίας της αντίδρασης. Οπότε προκύπτει:

$$Q_{in} = -\Delta H_R \quad (\text{θερμότητα εισόδου})$$

Έτσι, ο θερμικός βαθμός απόδοσης γίνεται αναλογία των αλλαγών της ενέργειας Gibbs και της ενθαλπίας:

$$\eta_{fc} = \frac{\Delta G_R}{\Delta H_R} = \frac{\Delta H_R - T * \Delta S_R}{\Delta H_R} = 1 - T * \left(\frac{\Delta S_R}{\Delta H_R} \right)$$

Η αλλαγή της ενθαλπίας για οποιαδήποτε αντίδραση που ελευθερώνει ενέργεια είναι αρνητική. Όμως, η αλλαγή της εντροπίας, ενώ συνήθως είναι αρνητική, μπορεί να είναι θετική για ορισμένες αντιδράσεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο βαθμός απόδοσης είναι μεγαλύτερος της μονάδας, αυτό όμως δεν είναι λογικό γιατί παραβιάζεται ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος. Εδώ λοιπόν, πρέπει να συνυπολογίσουμε ότι σε τέτοιες περιπτώσεις, η επιπλέον ενέργεια που παρέχεται από το περιβάλλον πρέπει να περιλαμβάνεται στο Q_{in} . Ένας γενικότερος ορισμός της Q_{in} με βάση το πρόσημο της εντροπίας είναι ο εξής:

$$Q_{in} = \begin{cases} -\Delta H_R, & \Delta S_R \leq 0 \\ -\Delta H_R + T * \Delta S_R, & \Delta S_R > 0 \end{cases}$$

Όταν $\Delta S_R > 0$, τότε ο θερμικός βαθμός απόδοσης των κυψελών καυσίμου είναι:

$$\eta_{fc} = \frac{-\Delta G_R}{-\Delta H_R + T * \Delta S_R} = \frac{\Delta H_R - T * \Delta S_R}{\Delta H_R - T * \Delta S_R} = 1$$

Και ο μέγιστος βαθμός απόδοσης γίνεται μονάδα για οποιαδήποτε κυψέλη καυσίμου όπου $\Delta S_R > 0$. Αυτό είναι ένα πολύ πιο ικανοποιητικό αποτέλεσμα σε σχέση με τις θερμικές μηχανές.

4.2.2 Βαθμός απόδοσης μηχανής Carnot

Ο κύκλος Carnot, είναι ο κύκλος που παράγει έργο λόγω του φαινομένου της μεταφοράς θερμότητας που εμφανίζεται ανάμεσα σε δύο δεξαμενές διαφορετικής θερμοκρασίας. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι το καθαρό παραγόμενο έργο διαιρούμενο με τη θερμότητα εισόδου. Το καθαρό παραγόμενο έργο υπολογίζεται ολοκληρώνοντας τον πρώτο

θερμοδυναμικό νόμο θεωρώντας ότι η διεργασία μας είναι ένας συνεχόμενος κύκλος. Λόγω αυτού η εσωτερική ενέργεια δεν αλλάζει και έτσι προκύπτει:

$$\oint dU = 0 = \oint dQ - \oint dW$$

Προκύπτει λοιπόν, ότι το καθαρό παραγόμενο έργο είναι:

$$W_{out} = Q_H - Q_L$$

όπου οι δείκτες H και L αναφέρονται στην υψηλή και τη χαμηλή θερμοκρασία αντίστοιχα. Από τον ορισμό τους Q_H και Q_L είναι θετικές. Η θερμότητα εισόδου στον κύκλο είναι Q_H και έτσι ο θερμικός βαθμός απόδοσης γίνεται:

$$n_{carnot} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H}$$

Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής αναφέρει ότι για αντιστρεπτή διεργασία η μεταφορά θερμότητας είναι $dQ = T * dS$. Για σταθερή θερμοκρασία η θερμότητα που προστίθεται και απορρίπτεται είναι $Q_H = T_H * \Delta S$ και $Q_L = T_L * \Delta S$. Δεδομένου ότι η αλλαγή της εντροπίας σε αυτόν τον ιδανικό κύκλο είναι η ίδια και για τις δύο δεξαμενές (υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας) κατά τη μεταφορά θερμότητας, ΔS απλοποιείται, αφήνοντας έτσι την κλασική έκφραση για τον βαθμό απόδοσης του κύκλου Carnot.

$$n_{carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Δεδομένου ότι η T_L ορίζεται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, η έκφραση του βαθμού απόδοσης του κύκλου Carnot μας δείχνει ότι για να αυξηθεί η τιμή του, πρέπει το εργαζόμενο μέσο να έχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη θερμοκρασία. Συνεπώς παρατηρούμε ότι όταν $T_H \rightarrow \infty$ τότε $n_{carnot} \rightarrow 1$. [53]

4.2.3 Συμπεράσματα σύγκρισης

Οι κυψέλες καυσίμου μετατρέπουν απευθείας τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια, χωρίς να περιλαμβάνουν το στάδιο της μετατροπής της θερμότητας σε μηχανική ενέργεια, η οποία εν συνεχεία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτός είναι και ο λόγος όπου η απόδοση των κυψελών καυσίμου, μπορεί να υπερβαίνει το όριο του κύκλου Carnot, ακόμα και όταν αυτές λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες, π.χ. στους 80°C.

Ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης των κυψελών καυσίμου είναι:

$$n = \frac{\Delta G}{\Delta H}$$

όπου ΔG : είναι η ελεύθερη ενέργεια του Gibbs

ΔH : είναι η μεταβολή της ενθαλπίας

Όταν το παραγόμενο νερό είναι σε υγρή μορφή: $\Delta G = 237.13 \text{ kJ/mol}$ και $\Delta H = 238.13 \text{ kJ/mol}$.

Όταν το παραγόμενο νερό είναι σε αέρια μορφή: $\Delta G = 228.57 \text{ kJ/mol}$ και $\Delta H = 241.82 \text{ kJ/mol}$.

Άρα ο μέγιστος θεωρητικός βαθμός απόδοσης είναι:

$$n = 83\% \text{ (υγρό)}$$

$$n = 94.5\% \text{ (αέριο)}$$

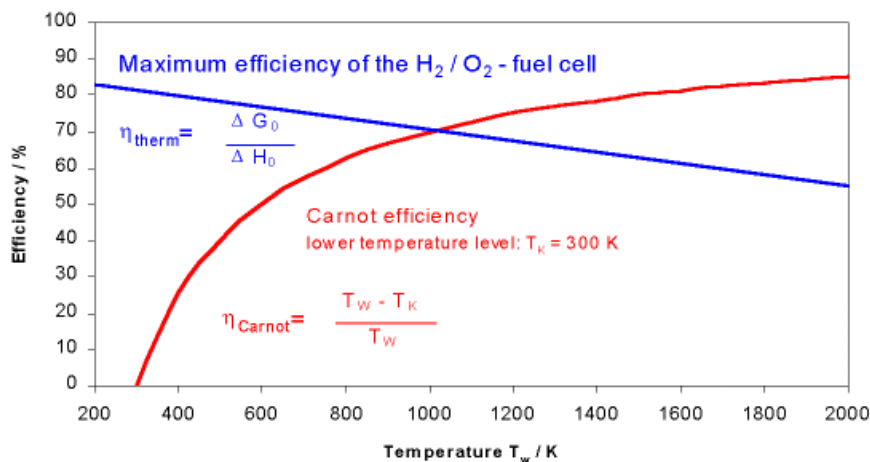
Στην πράξη ο βαθμός απόδοσης είναι μικρότερος, λόγω της εσωτερικής αντίστασης των κυψελών καυσίμου.

Έτσι ο βαθμός απόδοσης γίνεται:

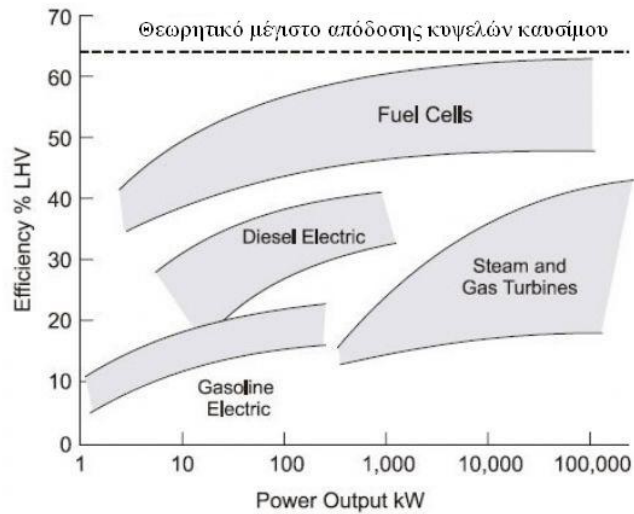
$$n_{el} = \frac{V_{cell}}{\frac{\Delta H}{2F}}$$

Όπου V_{cell} : είναι η τάση των κυψελών καυσίμου (V)

F: είναι η σταθερά Faraday (Cb/mol) [5]



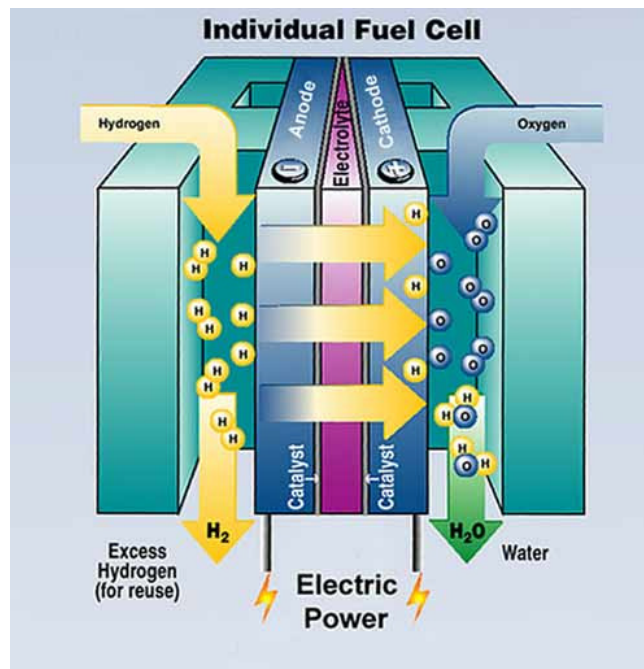
Εικόνα 14. Διάγραμμα σύγκρισης απόδοσης κυψελών καυσίμου και μηχανών εσωτερικής καύσης.



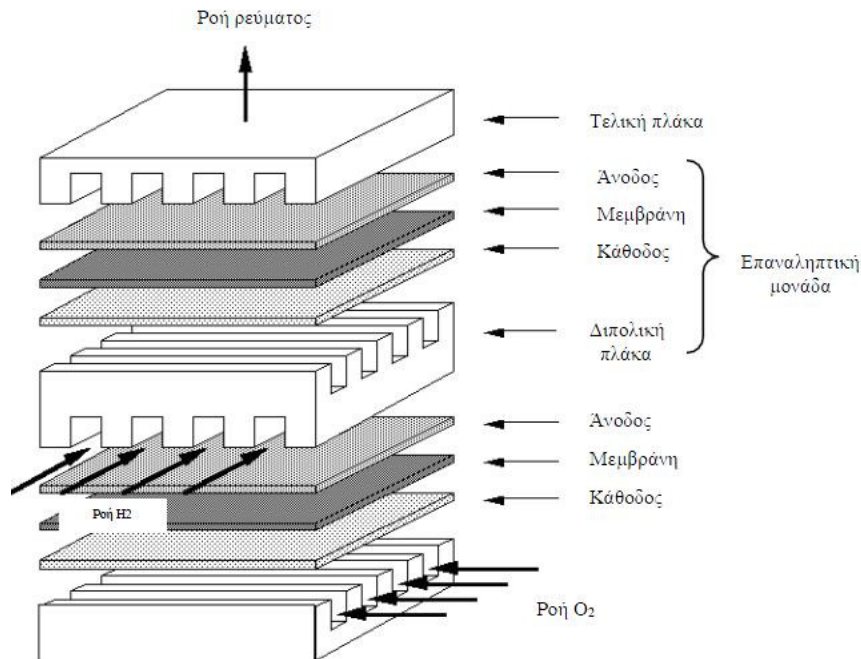
Εικόνα 15. Παρουσίαση θεωρητικού μεγίστου απόδοσης κυψελών καυσίμου και σύγκρισή τους με τις μηχανές εσωτερικής καύσης.

4.3 Κατασκευαστικά στοιχεία κυψέλης καυσίμου

Τα κυριότερα δομικά συστατικά μιας κυψέλης καυσίμου είναι, ο ηλεκτρολύτης (electrolyte), τα ηλεκτρόδια (electrodes), οι διπολικές πλάκες (bipolar plates) και το στρώμα διάχυσης αερίων (gas diffusion layers).



Εικόνα 16. Κατασκευαστική δομή κυψέλης καυσίμου.



Εικόνα 17. Συστοιχία κυψελών καυσίμου.

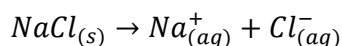
Στα δύο παραπάνω σχήματα φαίνεται η δομή μιας εν λειτουργία κυψέλης καυσίμου. Ξεκινώντας από το κέντρο προς τα άκρα φαίνεται ο ηλεκτρολύτης, όπου όπως θα αναλύσουμε παρακάτω η κατασκευή του ποικίλει ανάλογα με το υλικό κατασκευής. Τα ηλεκτρόδια έχουν καταλυτική επιφάνεια και ακολουθεί το στρώμα διάχυσης αερίων. Η κυψέλη καυσίμου τελειώνει στις διπολικές πλάκες ανόδου και καθόδου, από τις οποίες εισέρχονται και εξέρχονται τα αντιδρώντα και τα προϊόντα των αντιδράσεων. [42]

4.3.1 Ηλεκτρολύτης

Ο ηλεκτρολύτης είναι η καρδιά της κυψέλης καυσίμου. Η βασική του λειτουργία στηρίζεται στην ιδιότητα που έχει να επιτρέπει την μετακίνηση ιόντων στο εσωτερικό του. Ο ηλεκτρολύτης θα πρέπει να διαθέτει μεγάλη ιοντική αγωγιμότητα και παράλληλα να εμποδίζει τη διέλευση των ηλεκτρονίων, ώστε να μην υπάρχουν απώλειες και να διατηρείται η ομαλή λειτουργία της κυψέλης καυσίμου. Εάν ο ηλεκτρολύτης επιτρέπει τη διέλευση των ηλεκτρονίων, τότε παρουσιάζονται προβλήματα βραχυκύκλωσης, με αποτέλεσμα τη μη ομαλή λειτουργία του στοιχείου. Παράλληλα ο ηλεκτρολύτης λειτουργεί και σαν διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα στο οξειδωτικό και το καύσιμο, έτσι ώστε να αποφεύγεται η απευθείας αντίδρασή τους. [12]

Ένας ηλεκτρολύτης είναι ένα υγρό ή γέλη που περιέχει ιόντα που μπορούν να αποσυντεθούν με ηλεκτρόλυση, όπως για παράδειγμα σε μια μπαταρία. Συνήθως οι ηλεκτρολύτες είναι διαλύματα οξέων, βάσεων ή αλάτων. Επιπλέον, μερικά αέρια μπορούν να δράσουν ως ηλεκτρολύτες υπό συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας ή χαμηλής πίεσης.

Διαλύματα ηλεκτρολυτών, μπορούν επίσης να προκύψουν από τη διάλυση ορισμένων βιολογικών (π.χ. πολυπεπίδια DNA) και συνθετικά πολυμερή (π.χ. σουλφονικό πολυστερόλιο), που ονομάζονται πολυηλεκτρολύτες, οι οποίοι περιέχουν φορτισμένες λειτουργικές ομάδες. Επίσης, διαλύματα ηλεκτρολυτών δημιουργούνται όταν ένα άλας τοποθετηθεί μέσα σε έναν διαλύτη, όπως το νερό, και τα μεμονωμένα συστατικά δίστανται λόγω των θερμοδυναμικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ διαλύτη και των μορίων της διαλυμένης ουσίας, μία διαδικασία που ονομάζεται επιδυαλύτωση. Για παράδειγμα, όταν επιτραπέζιο αλάτι 'NaCl', τοποθετηθεί μέσα σε νερό, το άλας (στερεό) διαλύεται στα ιόντα που το απαρτίζουν.



Αξίζει να σημειωθεί ότι και τετηγμένα άλατα μπορούν να είναι ηλεκτρολύτες. Για παράδειγμα, όταν το χλωριούχο νάτριο είναι τετηγμένο, το υγρό άγει τον ηλεκτρισμό. Η ηλεκτρόλυση σε ένα διάλυμα μπορεί να περιγραφεί ως συμπεκνωμένη αν υπάρχει μια υψηλή συγκέντρωση ιόντων, ή αραιή αν υπάρχει χαμηλή συγκέντρωση ιόντων. Εάν ένα υψηλό ποσοστό του διαλυμένου σώματος δίσταται προς σχηματισμό ελεύθερων ιόντων, τότε ο ηλεκτρολύτης είναι ισχυρός. Εάν όμως το μεγαλύτερο μέρος της διαλυμένης ουσίας δεν διασπάται, τότε ο ηλεκτρολύτης είναι αδύναμος. Οι ιδιότητες των ηλεκτρολυτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσω της διαδικασίας της ηλεκτρόλυσης, για να εξάγουμε συστατικά στοιχεία και ενώσεις που περιέχονται εντός των διαλυμάτων.

Όταν ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε έναν ηλεκτρολύτη και μία τάση εφαρμόζεται, ο ηλεκτρολύτης θα άγει τον ηλεκτρισμό. Τα ζεύγη ηλεκτρονίων συνήθως δεν μπορούν να περάσουν μέσα από τον ηλεκτρολύτη. Αντίθετα, μια χημική αντίδραση λαμβάνει χώρα στην κάθοδο που καταναλώνει ηλεκτρόνια από την άνοδο, ενώ μια άλλη αντίδραση λαμβάνει χώρα στην άνοδο που παράγει ηλεκτρόνια που τελικά οδηγούνται στην κάθοδο. Ως αποτέλεσμα, ένα αρνητικά φορτισμένο σύννεφο αναπτύσσεται στον ηλεκτρολύτη και γύρω από την κάθοδο, ενώ ένα θετικά φορτισμένο σύννεφο αναπτύσσεται γύρω από την άνοδο. Τα ιόντα του ηλεκτρολύτη εξουδετερώνουν αυτές τις φορτίσεις, ώστε να συνεχιστεί τόσο η ροή των ηλεκτρονίων, όσο και οι χημικές αντιδράσεις.

Σε ορισμένες κυψέλες καυσίμου, ένας στερεός ηλεκτρολύτης ή ένας αγωγός πρωτονίων συνδέει ηλεκτρικά τις πλάκες, παράλληλα όμως διατηρεί τα αέρια καύσιμα του υδρογόνου και του οξυγόνου διαχωρισμένα. Οι περισσότεροι στερεοί ηλεκτρολύτες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- Ηλεκτρολύτες τύπου τζελ (jel). Μοιάζουν πολύ με τους υγρούς ηλεκτρολύτες. Είναι ουσιαστικά υγρά τοποθετημένα μέσα σε ένα ευέλικτο πλαίσιο πλέγματος. Συχνά εφαρμόζονται και πρόσθετα εξαρτήματα στους ηλεκτρολύτες αυτούς για να αυξηθεί η αγωγιμότητά των συστημάτων αυτών. [54]
- Ξηροί πολυμερείς ηλεκτρολύτες. Διαφέρουν από τους υγρούς ηλεκτρολύτες και τους ηλεκτρολύτες γέλης, με την έννοια ότι το άλας διαλύεται άμεσα στο στερεό μέσο. Συνήθως, είναι ένα πολυμερές με υψηλή διηλεκτρική σταθερά (PEO, PMMA, PAN, σιλοξάνες, πολυφωσφαζένια, κ.α.) και ένα άλας με χαμηλή ενέργεια πλέγματος.

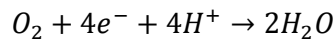
Προκειμένου να αυξηθεί η μηχανική αντοχή και η αγωγιμότητα τέτοιων ηλεκτρολυτών, πολύ συχνά χρησιμοποιούνται συνθετικά, όπως τα αδρανή κεραμικά. Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες τέτοιων ηλεκτρολυτών, τα πολυμερή μέσα σε κεραμικά και τα κεραμικά μέσα σε πολυμερή.

- Στερεοί κεραμικοί ηλεκτρολύτες. Σε αυτό το είδος ηλεκτρολυτών, τα ιόντα 'μεταναστεύουν' διαμέσου της κεραμικής φάσης μέσω των κενών, ή διαφεύγουν εντός του πλέγματος. Υπάρχουν επίσης ηλεκτρολύτες ύαλου – κεραμικού. [75]

Κατάλληλα για τον ηλεκτρολύτη είναι κάποια αλκαλικά και όξινα διαλύματα και στερεά σώματα. Στην άνοδο ενός όξινου ηλεκτρολύτη, το υδρογόνο ιονίζεται στο ηλεκτρόδιο, απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια και δημιουργώντας πρωτόνια.

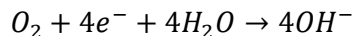


Η αντίδραση απελευθερώνει ενέργεια. Στην κάθοδο, το οξυγόνο αντιδρά με τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια, σχηματίζοντας νερό.

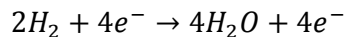


Το οξύ είναι υγρό με ελεύθερα ιόντα υδρογόνου (πρωτόνια H^+), έτσι ο όξινος ηλεκτρολύτης εκτελεί με επιτυχία το σκοπό του, δηλαδή τη μετακίνηση των ιόντων υδρογόνου από την άνοδο στην κάθοδο. Ορισμένα πολυμερή, μπορούν επίσης να περιέχουν κινούμενα ιόντα υδρογόνου. Αυτά τα πολυμερή ονομάζονται μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων, παίρνοντας το όνομά τους από το ιόν του υδρογόνου ή αλλιώς πρωτόνιο.

Στους αλκαλικούς ηλεκτρολύτες οι αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια είναι διαφορετικές. Στην κάθοδο το οξυγόνο αντιδρά με τα ηλεκτρόνια που έρχονται από την άνοδο και μαζί με το νερό, σχηματίζουν ανιόντα υδροξυλίου.



Τα ανιόντα υδροξυλίου περνούν μέσα από τον ηλεκτρολύτη από την κάθοδο στην άνοδο. Στην άνοδο το υδρογόνο αντιδρά με τα ανιόντα υδροξυλίου απελευθερώνοντας ενέργεια και ηλεκτρόνια και παράγοντας νερό.



Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε, πως στον όξινο ηλεκτρολύτη, το μεταφερόμενο ιόν από την άνοδο στην κάθοδο είναι το κατιόν του υδρογόνου και η παραγωγή του νερού γίνεται στην κάθοδο. Στον αλκαλικό ηλεκτρολύτη, το μεταφερόμενο ιόν από την κάθοδο στην άνοδο είναι το ανιόν υδροξυλίου και το νερό σχηματίζεται στην άνοδο.

Ο ηλεκτρολύτης προσδιορίζει τις συνθήκες λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου. Έτσι η θερμοκρασία λειτουργίας, εξαρτάται άμεσα από το είδος του ηλεκτρολύτη που αυτή διαθέτει. Στις κυψέλες καυσίμου που έχουν υγρό ηλεκτρολύτη, όπως ο αλκαλικός και αυτός του φωσφορικού οξέος, η θερμοκρασία λειτουργίας είναι σχετικά χαμηλή (<250 °C). Ο περιορισμός αυτός είναι αναγκαίος, καθώς αν η κυψέλη καυσίμου λειτουργήσει σε υψηλότερες θερμοκρασίες, ο υγρός ηλεκτρολύτης θα αλλοιωθεί λόγω εξάτμισης. Εξαιτίας, αυτών των χαμηλών θερμοκρασιών, οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν ακριβούς ηλεκτρολύτες για την επαρκή κατάλυση της αντίδρασης, με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους τους. Αντίθετα όταν ο ηλεκτρολύτης είναι σε στερεά κατάσταση, η θερμοκρασία λειτουργίας ξεπερνάει τους 650 °C, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται η χρήση ακριβού καταλύτη, αφού σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες οι αντιδράσεις καταλύονται επαρκώς και από λιγότερο δραστικούς καταλύτες, ενώ παράλληλα αυξάνεται η ιοντική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη. [12]

4.3.2 Ηλεκτρόδια – καταλύτης

Είναι το μέρος της κυψέλης όπου γίνεται η μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Τα ηλεκτρόδια είναι δύο, η άνοδος και η κάθοδος:

➤ Άνοδος

Το ηλεκτρόδιο της ανόδου αποτελεί το αρνητικό ηλεκτρόδιο της διάταξης. Ερχόμενο σε επαφή με το υδρογόνο προκαλεί το διαχωρισμό του σε κατιόντα και ηλεκτρόνια, τα οποία και οδηγεί στο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα, προκαλώντας τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος.

➤ Κάθοδος

Το ηλεκτρόδιο της καθόδου αποτελεί το θετικό ηλεκτρόδιο της διάταξης. Σε αυτό πραγματοποιείται η αντίδραση των ηλεκτρονίων που προέρχονται από το εξωτερικό κύκλωμα με το οξυγόνο και τα κατιόντα υδρογόνου που κινούνται μέσω της μεμβράνης από την άνοδο προς την κάθοδο για την παραγωγή νερού.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε την ανάγκη τα ηλεκτρόδια να 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 αντιδράσεων είναι αποφασιστικής σημασίας για την λειτουργία και την απόδοση της κυψέλης καυσίμου και σχετίζεται με την ενεργό επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Έτσι, πορώδη ηλεκτρόδια αυξάνουν την ενεργό επιφάνεια τους και κατ' επέκταση την ταχύτητα με την οποία λαμβάνουν χώρα οι παραπάνω 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,

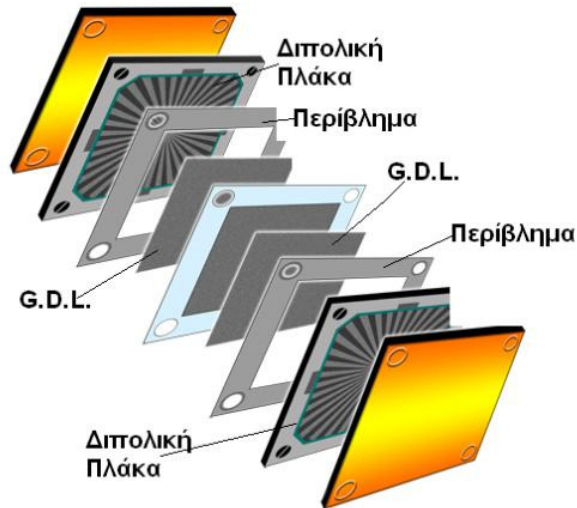
επιτρέποντας στις αντιδράσεις να πραγματοποιηθούν ταχύτερα ή σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

Ο καταλύτης προστίθεται στην διάταξη σαν μία λεπτή στρώση, η οποία εναποτίθεται στην πλευρά των ηλεκτροδίων που βλέπει προς την πλευρά του ηλεκτρολύτη. Είναι σκληρός και πορώδης ώστε η μέγιστη επιφάνεια να μπορεί να εκτεθεί στο υδρογόνο και το οξυγόνο, τα οποία διασκορπίζονται προς αυτόν ομοιόμορφα, χάρη σε κανάλια χαραγμένα επί των ηλεκτροδίων. 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. Ακόμη χρησιμοποιείται και ρουθίνιο (Ru). Ο καταλύτης δεν καταναλώνεται, καθώς μετά την εκάστοτε αντίδραση μπορεί να ανακτηθεί από το αντιδρούν μίγμα χημικά αμετάβλητος.

4.3.3 Στρώμα διάχυσης αερίων

Το στρώμα διάχυσης αερίων ή ορθότερα 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 και συνήθως έχουν πάχος που αντιστοιχεί σε 4 έως 12 σελίδες χαρτί. 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.

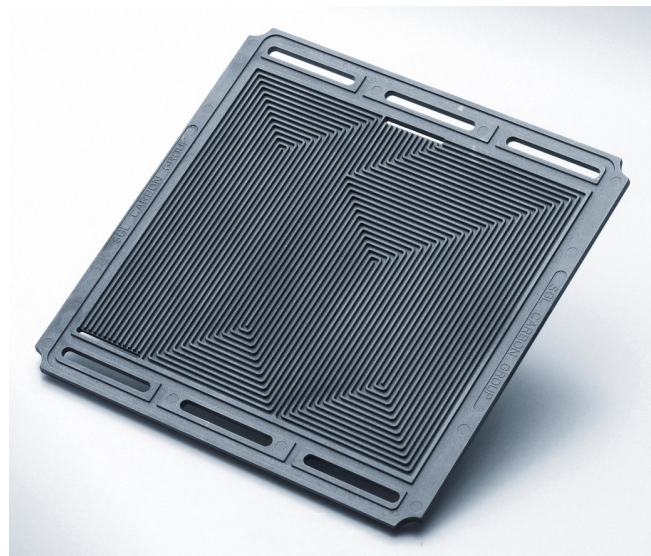
Σκοπός του στρώματος διάχυσης αερίων είναι η μεγιστοποίηση του ρεύματος που μπορεί να παραχθεί από τη διάταξη ηλεκτρολύτη – ηλεκτροδίων. Ακόμη, δημιουργεί ηλεκτρική σύνδεση ανάμεσα σε καταλύτη και διπολικές πλάκες. Η πορώδης φύση του επιτρέπει στο αέριο να διασκορπιστεί, ώστε όταν εισέλθει σε αυτό να είναι σε επαφή με ολόκληρη την επιφάνεια μεμβράνης – καταλύτη. Επίσης, τα στρώματα διάχυσης βοηθούν στην αντιμετώπιση του παραγόμενου νερού κατά τη λειτουργία της κυψέλης, εξασφαλίζοντας την ποσότητα νερού που θα κρατήσει τη μεμβράνη σε κατάλληλες συνθήκες υγρασίας, αποτρέποντας παράλληλα ‘πλημμύρα’ της κυψέλης από υπερβολική ποσότητα νερού. [42]



Εικόνα 18. Στρώμα διάχυσης αερίων.

4.3.4 Διπολικές πλάκες

Οι διπολικές πλάκες τοποθετούνται στην εξωτερική επιφάνεια κάθε στρώματος διάχυσης αερίων. Εξυπηρετούν σαν πεδίο ροής αερίων προς την κυψέλη αλλά και σαν συλλέκτης 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 διπολικών πλακών, ενώ στις μέρες μας αναπτύσσονται συνθετότερα υλικά.

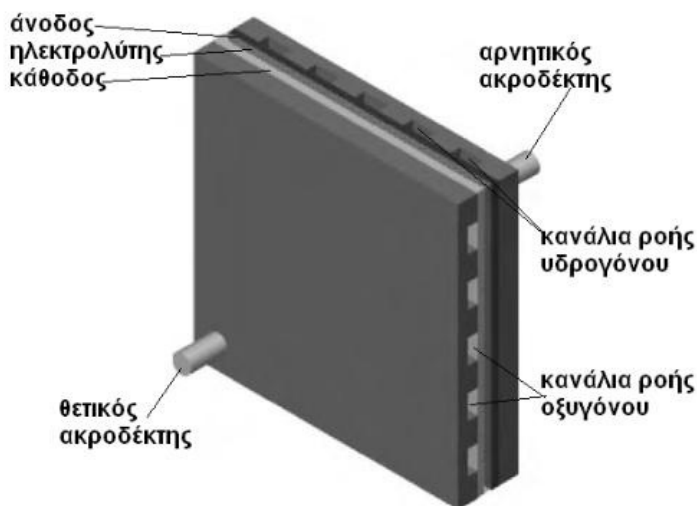


Εικόνα 19. Διπολική πλάκα από πολυμερές υγρών κρυστάλλου (Vectra LCP) της εταιρείας Ticona.

Ο πρώτος ρόλος που εξυπηρετεί κάθε πλάκα είναι η παροχή πεδίου ροής αερίων. Κανάλια χαράσσονται στην πλαϊνή επιφάνεια κάθε πλάκας δίπλα στο στρώμα διάχυσης αερίων. Τα

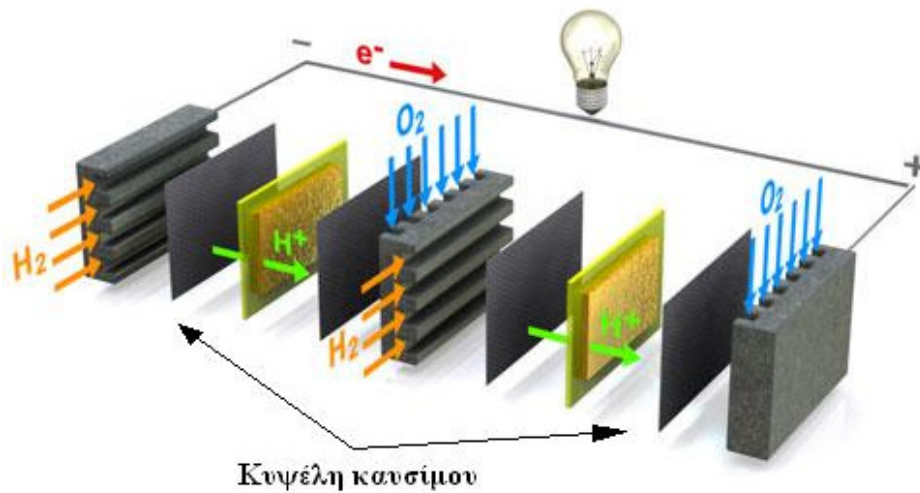
κανάλια μεταφέρουν το αντιδρών αέριο από το σημείο εισόδου του στη κυψέλη καυσίμου ως το σημείο απ' όπου θα εξέλθει. Το σχήμα των καναλιών καθώς και το πλάτος και το βάθος τους έχει μεγάλο αντίκτυπο στο κατά πόσο ομοιόμορφα τα αντιδρώντα αέρια θα εξαπλωθούν κατά μήκος της ενέργου περιοχής της διάταξης ηλεκτρολύτη – ηλεκτροδίων. Συνήθως, η διπολική πλάκα της ανόδου έχει κατακόρυφα κανάλια για την παροχή υδρογόνου και η διπολική πλάκα της καθόδου παράλληλα κανάλια, απ' όπου εισέρχεται το οξυγόνο. Ακόμη, επιρεάζουν την παροχή νερού στη μεμβράνη καθώς και την αφαίρεση νερού από την κάθοδο.

Κάθε πλάκα λειτουργεί ακόμα 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.



Εικόνα 20. Απλή κυψέλη με διπολικές πλάκες.

Οι διπολικές πλάκες χρησιμεύουν επίσης, στην εν σειρά σύνδεση πολλών κυψελών καυσίμου, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας συστοιχίας κυψελών. 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 κάθοδό της, καθώς δεν υπάρχει εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα που να τις συνδέει. Αντιθέτως, κινούνται προς την ηλεκτρικά αγώγιμη διπολική πλάκα της προηγούμενης κυψέλης της συστοιχίας. Το εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα επιτρέπει τη ροή ηλεκτρονίων από την άνοδο της πρώτης κυψέλης της συστοιχίας προς την κάθοδο της τελευταίας. [42]



Εικόνα 21. Συστοιχία κυψελών καυσίμου.

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 επαφών δύο κυψελών καυσίμου οι οποίες συνδέονται ώστε να σχηματίσουν μια συστοιχία. [12]

4.3.5 Άλλα μέρη ενός συστήματος κυψελών καυσίμου

Τα παραπάνω κατασκευαστικά στοιχεία αποτελούν την καρδιά για τη λειτουργία μιας κυψέλης καυσίμου. Ωστόσο, υπάρχουν αρκετά ακόμα μέρη που καλύπτουν ένα σημαντικό κομμάτι ενός ευρύτερου συστήματος κυψελών καυσίμου και τα οποία σε αρκετές περιπτώσεις κάνουν την ίδια την κυψέλη να φαντάζει μικρής σημασίας για τη λειτουργία του συστήματος. Τα στοιχεία αυτά εξαρτώνται κατά πολύ από τον τύπο κυψέλης που χρησιμοποιεί και ακόμα περισσότερο από το είδος του καυσίμου.

Το συνεχές ρεύμα που παράγεται από την συστοιχία μέσω των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων για να μετατραπεί σε αξιοποιήσιμο χρειάζεται να εισέλθει σε κάποιον μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος. Ανυψωτές DC/DC και DC/AC αντιστροφείς, παράγουν το επιθυμητό αποτέλεσμα.

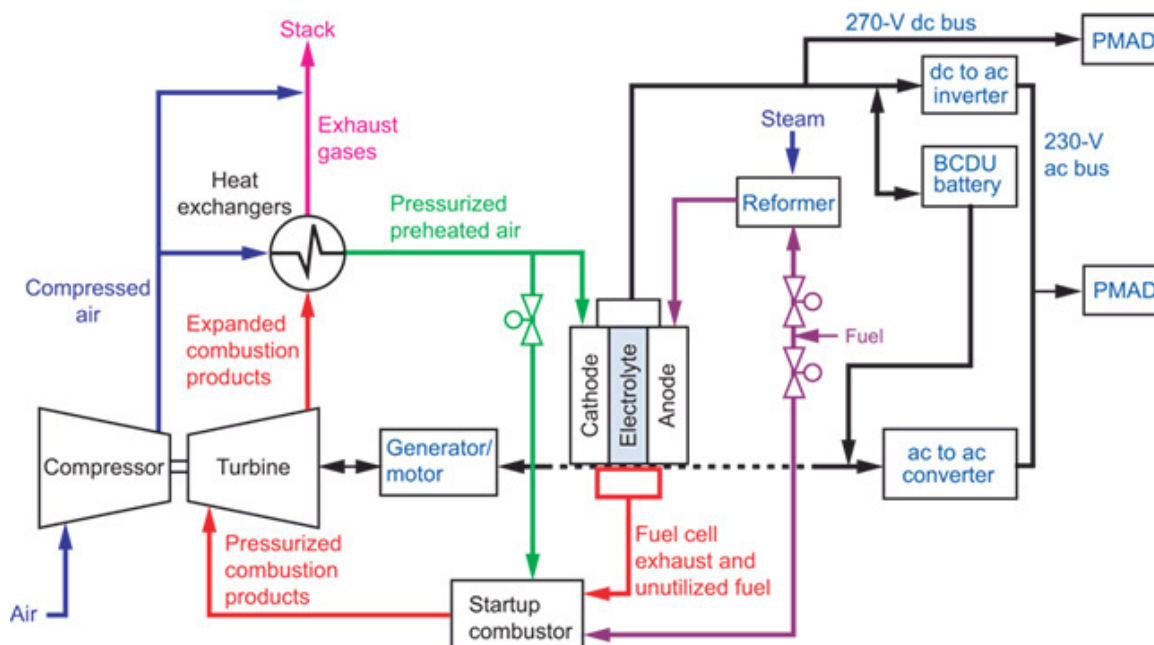
Αντλίες χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά καυσίμου και οξειδωτικού μέσου, προς και μέσα στη συστοιχία κυψελών καυσίμου, ενώ σε συνδυασμό με συμπιεστές, βαλβίδες ελέγχου και ρυθμιστές πίεσης εξασφαλίζουν τις απαραίτητες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας για

την σωστή λειτουργία των κυψελών. Ηλεκτρικοί κινητήρες είναι απαραίτητοι για την λειτουργία των υποσυστημάτων αυτών.

Η παροχή και αποθήκευση καυσίμου είναι ένα σημαντικό πρόβλημα κατά τη λειτουργία των κυψελών, ενώ αν το χρησιμοποιούμενο καύσιμο δεν είναι υδρογόνο απαραίτητη είναι η λειτουργία ενός επεξεργαστή καυσίμου. Οι επεξεργαστές αυτοί αποτελούν συχνά μεγάλες και πολύπλοκες διατάξεις, αναλόγως το καύσιμο από το οποίο θέλουμε να παράξουμε υδρογόνο.

Ελεγκτές λειτουργίας είναι απαραίτητοι για το συντονισμό ολόκληρου του συστήματος και την αντιμετώπιση δυσκολιών κατά την έναρξη και τον τερματισμό της λειτουργίας του. Ακόμη, αντιμετωπίζουν απότομες μεταβολές του φορτίου και μεταβατικές καταστάσεις με στόχο την ομαλή και απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος.

Τέλος, για τις περισσότερες, εκτός από τις μικρότερες κυψέλες καυσίμου, απαραίτητο είναι ένα σύστημα ψύξης, το οποίο συχνά αποκαλείται ανταλλάκτης θερμότητας. Σκοπός του παραπάνω συστήματος, είναι η απαγωγή της θερμότητας από την διάταξη που θα δημιουργούσε προβλήματα στη λειτουργία της, η διατήρηση μιας σταθερής θερμοκρασίας λειτουργίας καθώς και η χρήση της πλεονάζουσας αυτής ενέργειας σε άλλες διαδικασίες και διατάξεις, όπως για παράδειγμα σε συστήματα συμπαραγωγής. Ανταλλάκτες ισχύος χρησιμοποιούνται κατά βάση από κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας. [42]



Εικόνα 22. Διάγραμμα λειτουργίας κυψελών καυσίμου και υποσυστημάτων.

4.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα συγκρινόμενες με τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Αν και κάποια από τα χαρακτηριστικά τους ισχύουν για συγκεκριμένους τύπους κυψελών καυσίμου, τα περισσότερα πλεονεκτήματα τους είναι γενικότερα. Ωστόσο, υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα που περιορίζουν την γρήγορη ανάπτυξη των κυψελών καυσίμου, αλλά και ολόκληρης της τεχνολογίας υδρογόνου, και τα οποία ελπίζουμε στο μέλλον να εξαλειφθούν.

Πλεονεκτήματα

- Υψηλή απόδοση. Οι κυψέλες καυσίμου παράγουν μέσω ηλεκτροχημικών διεργασιών ενέργεια και θερμότητα διαθέσιμες απ' ευθείας για χρήση. Έτσι επιτυγχάνουμε υψηλότερους δείκτες απόδοσης, της τάξης του 65%, αλλά και απόδοση που αγγίζει το 90% σε συστήματα συμπαραγωγής ενέργειας – θερμότητας.
- Χαμηλές εκπομπές ρύπων. Η χρήση υδρογόνου έχει σαν αποτέλεσμα την εκπομπή μόνο νερού, ενώ και η χρήση υδρογονανθράκων οδηγεί στην εκπομπή πολύ λιγότερων αερίων θερμοκηπίου, σε σχέση με άλλες τεχνολογίες βασισμένες στην καύση. Η υψηλότερη αποδοτικότητα των κυψελών καυσίμου, απαιτεί μικρότερες ποσότητες καυσίμου για την παραγωγή ίδιας ποσότητας ενέργειας. Αξίζει επίσης να σημειώσουμε, πως η απουσία καύσης σημαίνει αμελητέες εκπομπές NO_x και SO_x.
- Αξιοπιστία και συντήρηση. Οι κυψέλες καυσίμου περιέχουν πολύ λίγα κινητά μέρη, τα περισσότερα εκ των οποίων εμπλέκονται με νερό, αέρα και θερμότητα. Έτσι εξασφαλίζονται λιγότερες απαιτήσεις συντήρησης και χαμηλότερο κόστος λειτουργίας.
- Πλεονεκτήματα υδρογόνου. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί οπουδήποτε υπάρχει νερό και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί ή να αποθηκευτεί για μελλοντική χρήση. Μπορεί να μεταφερθεί και να φυλαχτεί με ευκολία. Η μεταφορά του είναι πιο οικονομική από αυτή της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ σε περίπτωση ατυχήματος κατά τη μεταφορά οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι μηδαμινές. Αποτελεί το ασφαλέστερο καύσιμο, καθώς σε περίπτωση διαρροής διαχέεται ταχέως στην ατμόσφαιρα, σε αντίθεση με άλλα καύσιμα που παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό επικινδυνότητας έως να απομακρυνθούν από τη θέση τους.
- Ευελιξία καυσίμου. Διαφορετικοί τύποι κυψελών καυσίμου μπορούν να λειτουργήσουν με ένα εύρος διαφορετικών καυσίμων, όπως για παράδειγμα καθαρό υδρογόνο, μεθανόλη, αλλά και υδρογονάνθρακες όπως πετρέλαιο, φυσικό αέριο, προπάνιο και μεθάνιο.

- Χαμηλό επίπεδο θορύβου και δονήσεων. Ο μικρός αριθμός κινητών μερών σημαίνει και χαμηλά επίπεδα θορύβου καθώς και πολύ μικρό ποσοστό δονήσεων στην κυψέλη.
- Διανεμημένη παραγωγή και συνδιασμός θερμότητας – ισχύος. Οι κυψέλες καυσίμου προσφέρουν τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας σε απομακρυσμένα – απομονωμένα σημεία χρήσης, ανεβάζοντας κατακόρυφα την αποδοτικότητα των διατάξεων συμπαραγωγής.
- Περιορισμός οικονομικών εξαρτήσεων. Οι κυψέλες καυσίμου δεν χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα όπως το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο και έτσι περιορίζουν τις οικονομικές εξαρτήσεις σε πολιτικά ασταθείς χώρες.
- Εύκολη ανατροφοδότηση. Οι κυψέλες καυσίμου επαναφορτίζονται εύκολα απλώς με την παροχή περαιτέρω καυσίμου, αντιθέτως με τις μπαταρίες οι οποίες μετά τη χρήση τους πρέπει να πεταχτούν ή να επαναφορτιστούν για μεγάλο χρονικό διάστημα.
- Μεγάλη διάρκεια λειτουργίας. Διπλασιασμός του χρόνου λειτουργίας σημαίνει διπλασιασμός της ποσότητας καυσίμου που τροφοδοτείται και όχι του μεγέθους της διάταξης, όπως για παράδειγμα συμβαίνει στις μπαταρίες.
- Μεγάλο εύρος εφαρμογών. Ο σχεδιασμός των κυψελών καυσίμου είναι προσαρμοσμένος για εφαρμογές από λίγα Watt έως και για αρκετά Megawatt.

Μειονεκτήματα

- Εκπομπές αερίων. Η παραγωγή υδρογόνου από υδρογονάνθρακες με τη βοήθεια αναμορφωτή καυσίμου, δεν είναι απολύτως φιλική προς το περιβάλλον. Οι διαρροές υδρογόνου ίσως δημιουργήσουν σοβαρό πρόβλημα τις επόμενες δεκαετίες στο στρώμα του όζοντος
- Διαρροές υδρογόνου. Σύμφωνα με υπολογισμούς οι διαρροές υδρογόνου από τα μέσα αποθήκευσής του αγγίζει το 20%, καθιστώντας οικονομικά δυσμενέστερη την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου.
- Μέγεθος. Το μέγεθος των κυψελών καυσίμου αποτελεί ακόμη και σήμερα πρόβλημα. Βέβαια, μέσα από προσπάθειες που γίνονται τα τελευταία χρόνια διαρκώς και μειώνεται το μέγεθός τους, αφήνοντας πολλές υποσχέσεις για το μέλλον.

- Κόστος. Το κόστος κατασκευής κυψελών καυσίμου αποτελεί ακόμη σημαντικό πρόβλημα και περιορίζει τη χρήση τους σε εξειδικευμένες εφαρμογές. Επίσης, σε ορισμένες περιπτώσεις το κόστος παραγωγής του υδρογόνου ξεπερνά το κέρδος από την τελική παραγωγή ενέργειας.

- Τροφοδοσία. Η παραγωγή, η μεταφορά και κυρίως η διανομή και αποθήκευση του υδρογόνου, αποτελεί ακόμα ένα σημαντικό ανασταλτικό παράγοντα στην μαζική χρησιμοποίησή του.

- Χρόνος εκκίνησης οχημάτων με εγκατάσταση κυψελών καυσίμου. Ο χρόνος εκκίνησης οχημάτων που ηλεκτροδοτούνται από κυψέλες καυσίμου είναι μεγάλος, ενώ και η απόσταση που μπορεί να καλυφθεί είναι περιορισμένη. [11] [23] [42] [51] [55] [56] [57]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΤΥΠΟΙ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

5.1 Τύποι κυψελών καυσίμου

Ανάλογα με την περιοχή χρησιμοποίησης, οι κυψέλες καυσίμου διακρίνονται σε έξι κύριους τύπους. Τα ονόματα των κυψελών προσδιορίζουν το είδος του μεταφερόμενου ιόντος που διέρχεται από τον ηλεκτρολύτη. Η βασική δομή των κυψελών αυτών είναι όμοια, διαφοροποιούνται όμως ως προς το είδος του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν, τη θερμοκρασία λειτουργίας, τους καταλύτες, την καθαρότητα των αντιδρώντων και τις επιμέρους χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται. Οι κυριότεροι τύποι κυψελών καυσίμου είναι:

- Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC)
- Κυψέλες καυσίμου πολυμερών ηλεκτρολυτών (PEFC)
- Κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC)
- Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)
- Κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC)
- Κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC)

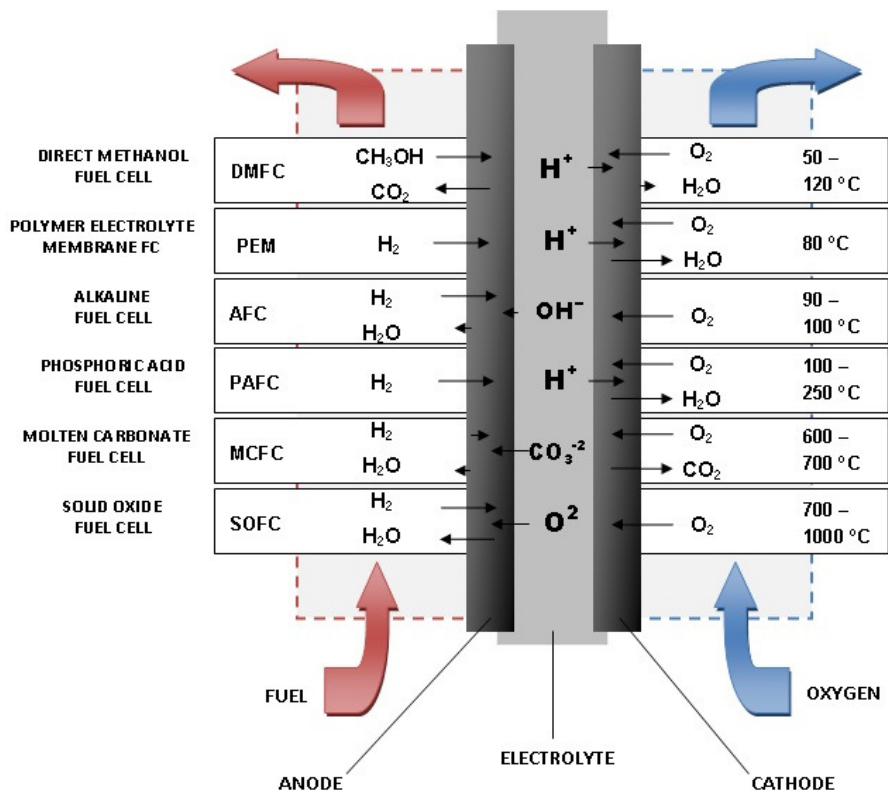
Ένας άλλος τρόπος διάκρισης των κυψελών καυσίμου, είναι η θερμοκρασία λειτουργίας:

Χαμηλής θερμοκρασίας είναι οι Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (Alkaline fuel cell), οι κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (Direct methanol fuel cell) και οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton exchange membrane fuel cell).

Μεσαίας θερμοκρασίας είναι οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (Phosphoric acid fuel cell).

Υψηλής θερμοκρασίας είναι οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (Molten carbonate fuel cell) και οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (Solid oxide fuel cell). [12]

Οι κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας, χρησιμοποιούν ως καύσιμο καθαρό υδρογόνο. Η παρουσία μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και αερίων που περιέχουν θείο (S) στη ροή του καυσίμου, προκαλούν την καταστροφή της ανόδου και υποβάθμισης της λειτουργίας της κυψέλης.



Εικόνα 23. Θερμοκρασίες λειτουργίας και παράγωγα χημικών αντιδράσεων των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου.

Στις κυψέλες καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών, δηλαδή στερεών οξειδίων (SOFC) και τήγατος ανθρακικών αλάτων (MCFC), μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ευρύτερη ποικιλία καυσίμων γιατί η χημική διεργασία στο ηλεκτρόδιο είναι εντονότερη και η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας μειώνει την ανάγκη ηλεκτροκαταλυτικής δράσης. Επίσης σε αυτές τις κυψέλες, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας, η επεξεργασία του καυσίμου μπορεί να γίνει εσωτερικά στην κυψέλη και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατευθείαν άλλα καύσιμα που περιέχουν υδρογονάνθρακες.

Η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου τήγατος ανθρακικών αλάτων (MCFC), καθορίζεται από το σημείο τήξεως του ηλεκτρολύτη, ενώ η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC), καθορίζεται από την ιοντική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη.

Στις κυψέλες καυσίμου χαμηλής πίεσης, τα αρχικά φορτία είναι είτε πρωτόνια (θετικό φορτίο), είτε ιόντα υδροξυλίου (αρνητικό φορτίο), ενώ στις κυψέλες υψηλής πίεσης τα αρχικά φορτία είναι ιόντα άνθρακα και όξινα ιόντα. [35]

Πίνακας 3. Χημικές αντιδράσεις για κάθε τύπο κυψελών καυσίμου.

Κυψέλη καυσίμου	Αντίδραση ανόδου	Μεταφερόμενο ιόν	Αντίδραση καθόδου
AFC	$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	OH^-	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$
PEMFC	$H_2 \rightarrow 2H_2 + 2e^-$	H^+	$O_2 + 4H^+ \rightarrow 2H_2O$
DMFC	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$	H^+	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
PAFC	$H_2 \rightarrow 2H_2 + 2e^-$	H^+	$O_2 + 4H^+ \rightarrow 2H_2O$
MCFC	$H_2 + CO_3^- \rightarrow H_2O + 2e^-$	CO_3^-	$O_2 + 2CO_2 + 4e^- \rightarrow CO_3^-$
SOFC	$H_2 + O^- \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O_2 \rightarrow CO_2 + 2e^-$	O^-	$O_2 + e^- \rightarrow 2O^-$

Σημείωση: Στον τύπο της κυψέλης AFC το νερό σχηματίζεται στην άνοδο αλλά χρειάζεται για την αντίδραση στην κάθοδο. Στον τύπο της κυψέλης MCFC, το CO₂ χρειάζεται για την αντίδραση στην κάθοδο και χρειάζεται να επανακυκλοφορήσει στην άνοδο.

Στις επόμενες δύο σελίδες παρουσιάζεται ο **‘Πίνακας 4’**, στον οποίο παραθέτονται οι τύποι κυψελών καυσίμου που θα αναλύσουμε στη συνέχεια του κεφαλαίου, καθώς και τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους, όπως το είδος του ηλεκτρολύτη και των ηλεκτροδίων, η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου, η ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της κυψέλης και οι τομείς στους οποίους βρίσκουν εφαρμογή.

ΤΥΠΟΙ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΤΑ ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥΣ

	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Ηλεκτρολύτης	Υδροξείδιο του καλίου	Πολυμερές	Πολυμερές	Φωσφορικό οξύ	Μίγμα ανθρακικών αλκαλίων	Σταθεροποιημένο ζιρκόνιο
Κατάσταση Ηλεκτρολύτη	Υγρός	Στερεός	Στερεός	Ακίνητοποιημένο υγρό	Ακίνητοποιημένο υγρό	Στερεός
Θερμοκρασία Λειτουργίας (°C)	60 – 90	70 – 100	90	150 – 220	600 – 700	650 – 1000
Βαθμός Απόδοσης	50 – 70%	40 – 50%	25 – 40%	40 – 45%	50 – 60%	50 – 60%
Δυναμική Απόδοση	Γρήγορη	Γρήγορη	Γρήγορη	Αργή	Αργή	Γρήγορη (όταν είναι ζεστή)
Χρόνος Εκκίνησης	Άμεσος	Άμεσος	Άμεσος	Μετά από 30 λεπτά	Αρκετές ώρες	Αρκετές ώρες
Ισχύς	<20kW	<250kW	<10kW	>50kW	>1MW	>200kW

Ανοδος	Νικέλιο (Ni) ή Λευκόχρυσος (Pt)	Λευκόχρυσος (Pt)	Λευκόχρυσος (Pt) ή Ρουθίνιο (Ru)	Λευκόχρυσος (Pt)	Λευκόχρυσος (Pt) ή Ρουθίνιο (Ru)	Λευκόχρυσος (Pt)	Οξειδίο του Νικελίου (NiO) ή του χρωμίου	Στερεός
Κάθοδος	Λευκόχρυσος ή οξειδίο του Νικελίου	Λευκόχρυσος (Pt)	Λευκόχρυσος (Pt) ή Ρουθίνιο (Ru)	Λευκόχρυσος (Pt) ή Ρουθίνιο (Ru)	Λευκόχρυσος (Pt)	Λευκόχρυσος (Pt)	Οξειδίο του Νικελίου (NiO)	Σταθεροποιημένο ζιρκόνιο
Κάσμιο	H ₂	H ₂ , CH ₄ , CH ₃ OH	Διάλυμα H ₂ O/CH ₃ OH	H ⁺	H ₂ , CH ₄	H ₂ , CH ₄	CH ₄	H ₂ , CH ₄
Ανταλλάξιμο Φορτίο	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Θερμότητα Συμπαγωγής	Καθόλου	Μη αποδεκτή	Καθόλου	Καθόλου	Αποδεκτή για αρκετές εφαρμογές	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή
Πλεονεκτήματα	Γρήγορη αντίδραση καθόδου	Απλή δομή, χαμηλή θερμοκρασία	Απλή δομή, χαμηλή θερμοκρασία	Απλή δομή, χαμηλή θερμοκρασία	Μεγάλος βαθμός απόδοσης	Ευελιξία καυσίμου, υψηλή θερμοκρασία	Ευελιξία καυσίμου, υψηλή θερμοκρασία	Ευελιξία καυσίμου, υψηλή θερμοκρασία
Μειονεκτήματα	Πολύπλοκη απομάκρυνση του CO ₂	Ακριβός καταλύτης	Ακριβός καταλύτης	Ακριβός καταλύτης	Μικρή ισχύς, ογκώδες και βαρύ	Μικρή βιοσιμότητα	Μικρή βιοσιμότητα	Μικρή βιοσιμότητα
Εφαρμογές	Οχήματα, υποβρύχια, διαστημική τεχνολογία	Οχήματα, υποβρύχια, διαστημική τεχνολογία, κινητές εφαρμογές	Οχήματα, κινητές εφαρμογές, ηλεκτρονικά	Οχήματα, κινητές εφαρμογές, ηλεκτρονικά	Συμπαγωγή, παρπαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	Παρπαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, συμπαγωγή θερμότητας	Παρπαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, συμπαγωγή θερμότητας	Παρπαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, συμπαγωγή θερμότητας

Πίνακας 4: Τύποι κυψελών καυσίμου και τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους.

5.2 Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC)

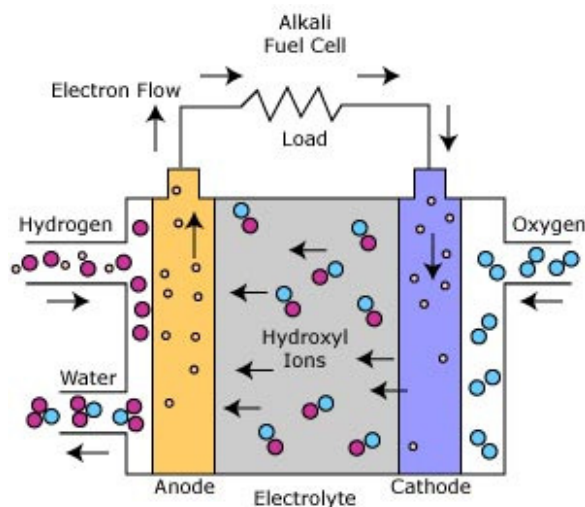
5.2.1 Εισαγωγή

Στην αλκαλική κυψέλη καυσίμου, ο ηλεκτρολύτης είναι υδροξείδιο του καλίου (KOH), λόγω της υψηλής αγωγιμότητας των ιόντων υδροξυλίου. Το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι καθαρό υδρογόνο. Η κυψέλη λειτουργεί σε θερμοκρασίες 60 – 100 °C και σε ατμοσφαιρική πίεση. Ωστόσο, νέα μοντέλα αλκαλικών κυψελών λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, 23 – 70 °C. Η τυπική πυκνότητα ισχύος είναι 0.2 – 0.3 W/cm². Οι προβλεπόμενες ώρες λειτουργίας είναι πάνω από 10000 ώρες, ενώ το κόστος προβλέπεται να είναι 160 €/kW. [12]

5.2.2 Αρχή λειτουργίας

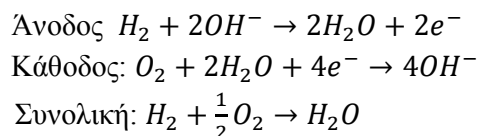
Στη κάθοδο το οξυγόνο αντιδρά με τα ηλεκτρόνια που έρχονται από την άνοδο και μαζί με το νερό, σχηματίζουν ανιόντα υδροξυλίου. Τα ανιόντα υδροξυλίου περνούν μέσα από τον ηλεκτρολύτη από την κάθοδο στην άνοδο. Στην άνοδο το υδρογόνο αντιδρά με τα ανιόντα υδροξυλίου απελευθερώνοντας ενέργεια και ηλεκτρόνια και παράγοντας νερό.

Η δομή της αλκαλικής κυψέλης καυσίμου (AFC) φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 24. Αλκαλική κυψέλη καυσίμου.

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται είναι:



5.2.3 Περιγραφή της κυψέλης καυσίμου

Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH) ως ηλεκτρολύτη και μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια ποικιλία πολύτιμων ή μη μετάλλων ως καταλύτες στην άνοδο και την κάθοδο. Έτσι στην άνοδο ο καταλύτης μπορεί να είναι από νικέλιο (Ni) ή λευκόχρυσο (Pt), ενώ στην κάθοδο ο καταλύτης είναι από λευκόχρυσο (Pt) ή οξειδία του νικελίου. Οι αλκαλικές κυψέλες είναι ανάμεσα στις πλέον αποδοτικές στην παραγωγή ηλεκτρισμού με αποδόσεις που μπορούν να φτάσουν το 60%.

Τα δύο ηλεκτρόδια διαχωρίζονται από μία πορώδη μήτρα κορεσμένη με ένα υδατικό αλκαλικό διάλυμα. Τα υδατικά αλκαλικά διαλύματα δεν απορρίπτουν το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και έτσι η κυψέλη καυσίμου μετατρέπεται σε 'πηγή δηλητηρίασης', μέσω της μετατροπής του υδροξειδίου του καλίου σε ανθρακικό κάλιο. Εξαιτίας αυτού, οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου λειτουργούν με καθαρό οξυγόνο ή τουλάχιστον σε καθαρισμένο αέρα και θα ενσωματώνουν και ένα 'καθαριστήρα - φίλτρο' που σκοπό έχει να καθαρίσει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος του διοξειδίου του άνθρακα. Γίνεται ωστόσο συζήτηση της επιστημονικής κοινότητας γύρω από το θέμα για το αν η δηλητηρίαση είναι μόνιμη ή αναστρέψιμη. Οι κύριοι μηχανισμοί της δηλητηρίασης είναι, ο φραγμός των πόρων στην κάθοδο με ανθρακικό κάλιο, διαδικασία μη αναστρέψιμη, και η μείωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του ηλεκτρολύτη, που είναι αναστρέψιμη διαδικασία.

Μεταξύ των αντιδράσεων στην άνοδο και στην κάθοδο, η αντίδραση της καθόδου είναι η πιο αργή, αφού χρειάζεται περισσότερος χρόνος για να πραγματοποιηθεί από αυτή της ανόδου. Παρόλα αυτά σε αυτή την κυψέλη καυσίμου, η αντίδραση στο ηλεκτρόδιο της καθόδου, πραγματοποιείται πολύ πιο γρήγορα από ότι στους άλλους τύπους κυψελών, με αποτέλεσμα η τάση λειτουργίας κάθε κυψέλης να φτάνει τα 0.875 Volt, αρκετά υψηλότερη από τις υπόλοιπες κυψέλες καυσίμου. [36] [37] [38]

5.2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αλκαλικών κυψελών καυσίμου

Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου παρουσιάζουν σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των υπολοίπων κυψελών λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας, χαρακτηριστικό που τις κάνει πολύ γρήγορες στην εκκίνησή τους. Ωστόσο, λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας, είναι ζωτικής σημασίας οι μέθοδοι απομάκρυνσης του νερού και της θερμότητας. Επίσης, σημαντικό πλεονέκτημα είναι πως η υπέρταση που σημειώνεται στην κάθοδο κατά την ενεργοποίηση, είναι αρκετά μικρότερη από το αν είχαμε έναν ηλεκτρολύτη οξέος, που αποτελεί και την σημαντικότερη αιτία απώλειας τάσης στις κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας. [39]

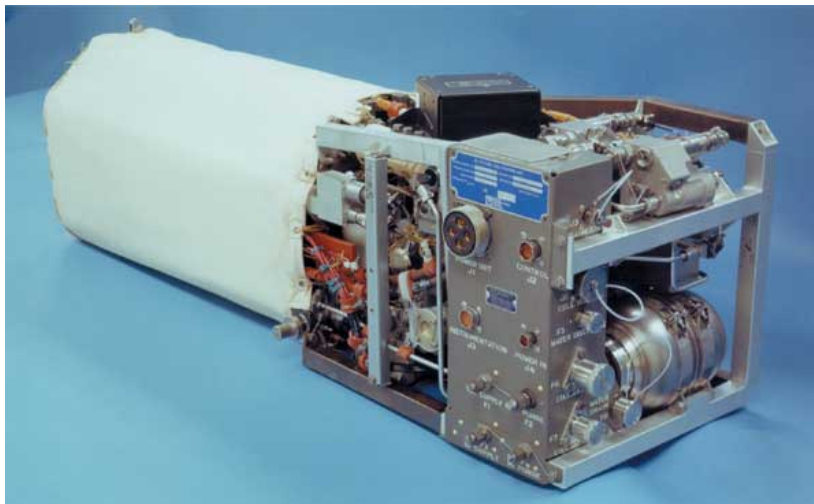
Πλεονέκτημα μεγάλης σημασίας είναι το κόστος του συστήματος, το οποίο μπορεί να παραμείνει σε χαμηλά επίπεδα, αφού το υδροξείδιο του καλίου είναι υλικό με πραγματικά

χαμηλό κόστος. Έτσι, λοιπόν, το κόστος των ηλεκτρολυτών των αλκαλικών κυψελών καυσίμου είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους κυψελών και έτσι θα παραμείνει. Επίσης, τα ηλεκτρόδια και κυρίως η κάθοδος μπορεί να κατασκευαστεί από μη πολύτιμα μέταλλα. Άρα και τα ηλεκτρόδια είναι σημαντικά φθηνότερα σε σύγκριση με άλλα και δεν υπάρχει λόγος να υποθέσουμε πως αυτό θα αλλάξει στο εγγύς μέλλον.

Σοβαρά μειονεκτήματα είναι όπως αναφέραμε και παραπάνω, η ευαισθησία της στο διοξείδιο του άνθρακα, κάνοντας απαραίτητη τη χρήση ειδικού εξοπλισμού για απομάκρυνση κάθε ίχνους διοξειδίου του άνθρακα από τον ατμοσφαιρικό αέρα που χρησιμοποιείται. Ένα ακόμα μειονέκτημα είναι η χρήση διαβρωτικού ηλεκτρολύτη, που έχει σαν αποτέλεσμα να διαβρώνει τα υλικά γύρω του και μειώνει τη διάρκεια ζωής της κυψέλης και άρα και την συντήρησή της. Τέλος, το κόστος είναι αυξημένο στην περίπτωση που είναι υποχρεωτικό, για διάφορους παράγοντες, να γίνει χρήση ακριβού καταλύτη όπως λευκόχρυσος. [50] [51]

5.2.5 Εμπορικές προοπτικές

Οι Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC) έχουν χρησιμοποιηθεί από την NASA σε διαστημικές αποστολές από τα μέσα του 1960, στα διαστημόπλοια της σειράς Apollo. Οι κυψέλες καυσίμου αυτού του τύπου βρίσκουν ολοένα και περισσότερο εφαρμογή σε στρατιωτικά προγράμματα. [12]



Εικόνα 25. Αλκαλική κυψέλη καυσίμου από αποστολές της NASA.

Επίσης, τον Ιούνιο του 2000 στον ποταμό Ρήνο, κοντά στη Βόννη της Γερμανίας έκανε το ντεμπούτο του το πρώτο σκάφος (χωρητικότητας 22 ατόμων) που η λειτουργία του βασίζεται στο υδρογόνο. Συγκεκριμένα, το σκάφος αυτό ήταν υποβοηθούμενο από έναν ηλεκτροκινητήρα ο οποίος σαν τροφοδοσία χρησιμοποιούσε αλκαλικές κυψέλες καυσίμου. [38]

Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου βρίσκουν εφαρμογή σε φορητές γεννήτριες μικρής ισχύος, αλλά με σημαντικά μεγαλύτερη απόδοση από αυτές που λειτουργούν με βενζίνη και πετρέλαιο. [12]

Στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας συζητάται σοβαρά η χρήση του συγκεκριμένου τύπου κυψελών καυσίμου, καθώς διαθέτουν έναν αρκετά οικονομικό καταλύτη, που χρησιμοποιεί νικέλιο στην άνοδο και οξείδιο του νικελίου στην κάθοδο. Ωστόσο, δεν χρησιμοποιούνται ακόμα, καθώς η ευαισθησία τους στη μόλυνση αποτελεί αξεπέραστο εμπόδιο προς το παρόν. [52]

5.3 Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)

5.3.1 Εισαγωγή

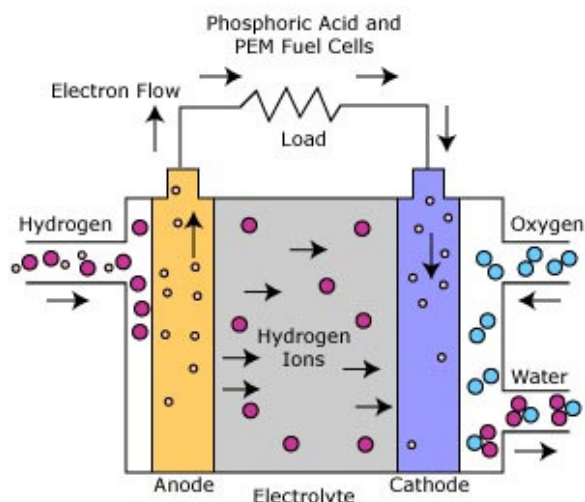
Η κυψέλη καυσίμου στερεού πολυμερούς (SPFC), γνωστή και ως κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), χρησιμοποιεί στερεή πολυμερή μεμβράνη ως ηλεκτρολύτη. Η μεμβράνη βρίσκεται ανάμεσα σε δύο πορώδη ηλεκτρόδια κατασκευασμένα από άνθρακα, την άνοδο και την κάθοδο, στα οποία ο καταλύτης είναι από λευκόχρυσο. Η θερμοκρασία λειτουργίας κυμαίνεται μεταξύ των 50 – 100 °C και η πίεση ατμοσφαιρική ή λίγο μεγαλύτερη. Η πυκνότητα ισχύος είναι 0.35 – 0.6 W/cm². Η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής της είναι πάνω από 40000 ώρες και το κόστος της εκτιμάται ότι θα είναι 160 €/kW. [12]

5.3.2 Αρχή λειτουργίας

Το πολυμερές των PEMFC είναι διαπερατό από πρωτόνια όταν διαποτίζεται από νερό, αλλά δεν άγει ηλεκτρόνια. Το καύσιμο για τις κυψέλες αυτές είναι το υδρογόνο και το ανταλλάξιμο φορτίο το κατιόν υδρογόνου. [36]

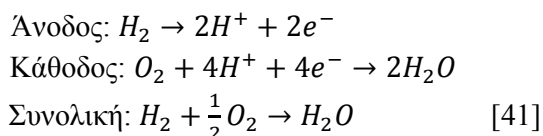
Στην άνοδο τα μόρια υδρογόνου διαχωρίζονται σε κατιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια. Τα κατιόντα υδρογόνου περνούν μέσω του ηλεκτρολύτη προς την κάθοδο ενώ τα ηλεκτρόνια οδηγούνται μέσω εξωτερικού κυκλώματος και παράγουν ηλεκτρική ισχύ. Το οξυγόνο, συνήθως στη μορφή ατμοσφαιρικού αέρα, παρέχεται στην κάθοδο και συνδιάζεται με τα ηλεκτρόνια και τα κατιόντα υδρογόνου για την παραγωγή νερού. Εκτός από τη χρήση καθαρού υδρογόνου, ως καύσιμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί φυσικό αέριο ή βενζίνη, με τη χρήση κατάλληλου εξωτερικού αναμορφωτή καυσίμου. [37] [40]

Η δομή της κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 26. Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων.

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται είναι:



5.3.3 Περιγραφή της κυψέλης

Ο πολυμερής ηλεκτρολύτης είναι κατασκευασμένος σαν μεμβράνη 180 μm και έχει την όψη περιτυλίγματος από σελοφάν. Όταν έχει την κατάλληλη υγρασία, άγει τα θετικά ιόντα (πρωτόνια υδρογόνου) και μπλοκάρει τα αρνητικά. Τα αρνητικά ιόντα (ηλεκτρόνια) τότε, πρέπει να ακολουθήσουν έναν αγωγίμο δρόμο, για να κλείσουν κύκλωμα γύρω από το πολυμερές. Ο καταλύτης είναι αναγκαίος για την επιτάχυνση της αντίδρασης οξείδωσης και αναγωγής στα ηλεκτρόδια. Λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας, ο καταλύτης πρέπει να είναι από λευκόχρυσο. [42]

5.3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων

Συγκρινόμενες με άλλα είδη κυψελών καυσίμου, οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) παράγουν μεγαλύτερη ισχύ για δεδομένο βάρος ή όγκο της διάταξης. Αυτή η υψηλή πυκνότητα ισχύος τις καθιστά συμπαγείς και ελαφριές. Ακόμη, η

θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι χαμηλότερη των 100 °C, γεγονός που τους επιτρέπει γρηγορότερη εκκίνηση, ενώ περιορίζει και τη φθορά των υλικών τους.

Επίσης σημαντικά πλεονεκτήματα πηγάζουν από τη στερεή μορφή του ηλεκτρολύτη τους. Η στεγανοποίηση των αερίων ανόδου και καθόδου είναι απλούστερη υπό την ύπαρξη στερεού ηλεκτρολύτη και επομένως λιγότερο δαπανηρή για την υλοποίησή της. Επίσης ο στερεός ηλεκτρολύτης αντιμετωπίζει λιγότερα προβλήματα από διαβρώσεις συγκρινόμενος με άλλα είδη ηλεκτρολυτών και οδηγεί σε μεγαλύτερο χρόνο ζωής της κυψέλης και της συστοιχίας.

Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων για κάποιες εφαρμογές, είναι η λειτουργία τους σε χαμηλές θερμοκρασίες. Θερμοκρασίες κοντά στους 100 °C δεν είναι αρκετά υψηλές για να επιτρέψουν λειτουργία συμπαραγωγής. Ακόμη, επειδή ο ηλεκτρολύτης για να λειτουργήσει πρέπει να είναι εμποτισμένος σε νερό για να λειτουργεί βέλτιστα, καθιστάται πολύ σημαντικός ο έλεγχος της υγρασίας των ρευμάτων των αερίων σε άνοδο και κάθοδο.

Τέλος, ένα ακόμη μειονέκτημα είναι η χρήση ευγενούς μετάλλου για την κατασκευή του καταλύτη (συνήθως λευκόχρυσος), αυξάνοντας έτσι το κόστος του συστήματος. Αυτό το είδος καταλύτη είναι και ιδιαίτερα ευαίσθητο σε μόλυνση από μονοξειδίο του άνθρακα, καθιστώντας απαραίτητη τη μείωση του CO στο αέριο καύσιμο αν το υδρογόνο εξάγεται από κάποια αλκοόλη ή κάποιον υδρογονάνθρακα. Κατασκευαστές ερευνούν τη χρήση καταλυτών λευκόχρυσου – ρουθηνίου, οι οποίοι θα είναι πιο ανθεκτικοί σε αυτές τις μολύνσεις. [50] [51]

5.3.5 Εμπορικές προοπτικές

Οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) πιστεύεται ότι αποτελούν το καλύτερο είδος κυψελών καυσίμου για την αντικατάσταση της βενζίνης και των μηχανών εσωτερικής καύσης ως πηγή ενέργειας των οχημάτων. Χρησιμοποιήθηκαν πρώτη φορά τη δεκαετία του 1960 για το πρόγραμμα Gemini της NASA, ενώ σήμερα αναπτύσσονται και επιδεικνύονται για συστήματα ισχύος από 1 W έως λίγα kW. Τα τελευταία χρόνια έχουν κατασκευαστεί μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, για χρήση σε αυτοκίνητα, αλλά και στη βιομηχανία. Οι μικρότερες μονάδες είναι κατάλληλες για να αντικαταστήσουν τους συσσωρευτές στους φορητούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές. [12] [52]

Σε οικιακό επίπεδο η πρώτη εγκατάσταση με κυψέλες καυσίμου αυτού του τύπου είχε ισχύ 7 kW και εγκαταστάθηκε στη Νέα Υόρκη από την εταιρεία Plug Power. Ωστόσο, όπως αναφέραμε και πριν οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων είναι κατάλληλες για χρήση σε αυτοκίνητα. Έτσι, με πρωτοπόρο την εταιρεία Ballard από τον Καναδά και σε συνεργασία με αρκετές αυτοκινητοβιομηχανίες ανά τον κόσμο σήμερα κατασκευάζονται αυτοκίνητα και λεωφορεία που χρησιμοποιούν ως μέσο για την κίνησή τους την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου. [12]



Εικόνα 27. Daimler – Benz Neocar II, το πρώτο αυτοκίνητο με κυψέλες καυσίμου PEM.



Εικόνα 28. Λεωφορείο που η λειτουργία του βασίζεται στο υδρογόνο και στις κυψέλες καυσίμου.

5.4 Κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC)

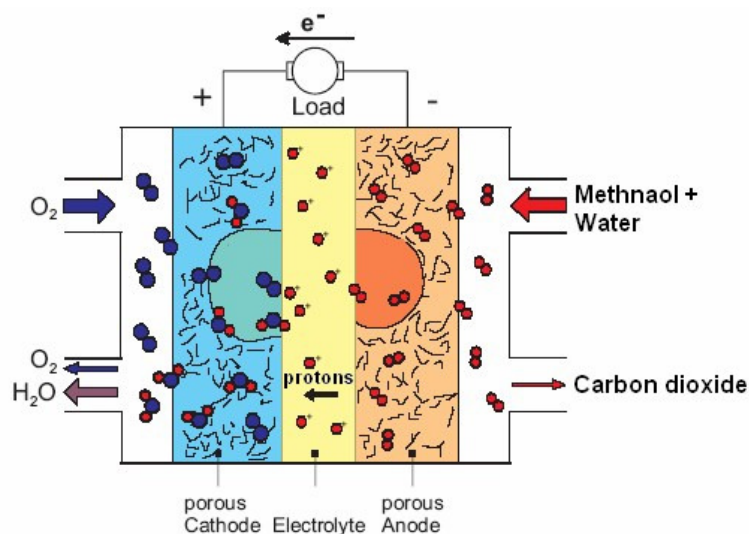
5.4.1 Εισαγωγή

Οι κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC) είναι ο νεότερος τύπος κυψελών καυσίμου, αλλά ουσιαστικά αποτελεί μια παραλλαγή των κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), με την διαφορά πως αντί για υδρογόνο χρησιμοποιείται μεθανόλη ως καύσιμο. Δεν εμφανίζουν προβλήματα αποθήκευσης όπως άλλα είδη κυψελών χάρη στη μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα της μεθανόλης συγκριτικά με το υδρογόνο. Η θερμοκρασία λειτουργίας της κυμαίνεται μεταξύ 50 – 100 °C σε ατμοσφαιρική πίεση και δίνει πυκνότητα ισχύος 0.04 – 0.23 W/cm². Η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής είναι πάνω από 10000 ώρες και το κόστος της υπολογίζεται στα 160 €/kW. [12] [36]

5.4.2 Αρχή λειτουργίας

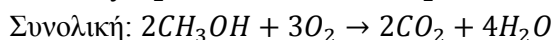
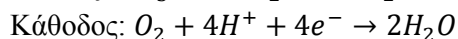
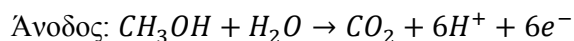
Στην άνοδο η μεθανόλη αντιδρά με το νερό, δίνοντας ηλεκτρόνια, πρωτόνια και διοξείδιο του άνθρακα. Η ύπαρξη του νερού στην άνοδο είναι απαραίτητη, ωστόσο, το νερό στην κάθοδο παράγεται πολύ πιο γρήγορα. Αυτό σημαίνει, πως ενώ το καύσιμο είναι καθαρή μεθανόλη, θα πρέπει να αποθηκεύεται και νερό στην κυψέλη το οποίο θα προστίθεται στην μεθανόλη στην άνοδο. Στην κάθοδο, το οξυγόνο ενώνεται με τα πρωτόνια που έρχονται από την άνοδο μέσω του ηλεκτρολύτη και τα ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα, και έτσι έχουμε την παραγωγή νερού. [37]

Η δομή της κυψέλης καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC) φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 29. Κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης.

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται είναι:



5.4.3 Περιγραφή της κυψέλης

Σε αντίθεση με τις κυψέλες καυσίμου έμμεσης μεθανόλης, όπου η μεθανόλη αντιδρά με υδρογόνο που προέρχεται από αναμόρφωση ατμών, οι κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης χρησιμοποιούν ένα διάλυμα μεθανόλης (περίπου 3% κατά βάρος) για τη μεταφορά του αντιδρώντος εντός της κυψέλης. Οι κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης είναι το ίδιο αποτελεσματικές σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, αλλά αυτές οι συνθήκες καταλήγουν στο αποτέλεσμα να έχουμε μεγάλα ποσοστά απωλειών. Οπότε, οι διαμορφώσεις των κυψελών αυτών σε επίπεδο ατμοσφαιρικής πίεσης είναι προτιμητέες.

Επίσης, λόγω της 'διασταύρωσης' μεθανόλης, ένα φαινόμενο κατά το οποίο μεθανόλη διαχέεται διαμέσου της μεμβράνης χωρίς να αντιδρά, η μεθανόλη θεωρείται ένα ασθενές διάλυμα. Αυτό μειώνει σημαντικά την αποδοτικότητα, από τη στιγμή που η μεθανόλη περνάει στην κάθοδο και διασταυρώνεται με τον αέρα, όπου και αντιδρά μαζί του. Το τελικό αποτέλεσμα όλων αυτών των αντιδράσεων μέσα στην κυψέλη είναι η μείωση της τάσεως του στοιχείου. Το εν λόγω φαινόμενο, επιδρά στην απώλεια της μισής ποσότητας της μεθανόλης, αυξάνοντας έτσι την αναποτελεσματικότητα. [37] [39]

Ο ηλεκτρολύτης είναι μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM), όμως στις κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης έχει μεγαλύτερο πάχος. Ο καταλύτης στην άνοδο είναι διμεταλλικός από λευκόχρυσο ή ρουθίνιο και στην κάθοδο από λευκόχρυσο ή ρουθίνιο. Στην άνοδο, ο καταλύτης μόνος του έλκει το υδρογόνο, από το υγρό μεθάνιο. [43]

5.4.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου άμεσης μεθανόλης

Η μεθανόλη είναι το απλούστερο οργανικό καύσιμο, το οποίο πολύ οικονομικά και αποδοτικά μπορεί να παραχθεί σε μεγάλη κλίμακα, από καύσιμα όπως το κάρβουνο και το φυσικό αέριο. Επίσης, η μεθανόλη είναι υγρό καύσιμο, κάτι που κάνει πολύ εύκολη την αποθήκευση και τη διανομή της, τομείς όπου το υδρογόνο πάσχει.

Σημαντικό πλεονέκτημα των κυψελών καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC) είναι η υψηλή πυκνότητα ισχύος. Ακόμη, η χρήση στερεού ηλεκτρολύτη, μειώνει τη διάβρωση που δέχονται τα υλικά και δεν απαιτείται ειδική διαχείριση των υγρών, όπως με τους υγρούς ηλεκτρολύτες. Ωστόσο, δεν χρειάζεται αναμορφωτή για τη λειτουργία της, κάτι που μειώνει

σημαντικά το κόστος και παρουσιάζει μεγάλη διάρκεια ζωής. Βελτιώσεις στου καταλύτες και άλλες πρόσφατες εξελίξεις, έχουν αυξήσει την πυκνότητα ισχύος τους είκοσι φορές, ενώ η απόδοσή τους μπορεί να φτάσει το 40%.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα αυτής της κατηγορίας κυψελών καυσίμου είναι η αργή αντίδραση της ανόδου, γιατί η οξείδωση της μεθανόλης είναι πολυπλοκότερη από αυτή του υδρογόνου και πραγματοποιείται πιο αργά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η ισχύς να είναι πολύ μικρή συγκριτικά με το μέγεθος της κυψέλης. [12] [50] [51]

5.4.5 Εμπορικές προοπτικές

Οι πρόσφατες εξελίξεις στην ανάπτυξη των κυψελών καυσίμου άμεσης μεθανόλης, συμπεριλαμβανομένων των πρόσφατων συστημάτων επίδειξης δείχνουν ότι η ισχύς των 60 mW/cm² της επιφάνειας του ηλεκτροδίου είναι εφικτή, αλλά πολύ δύσκολο να ξεπεραστεί. Η απόδοση αυτή είναι σημαντικά μικρότερη από την απόδοση των κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το υδρογόνο, περιορίζοντας έτσι αισθητά το πεδίο εφαρμογής αυτού του τύπου κυψελών.

Οι κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης είναι κατάλληλες για εφαρμογές όπου χρειάζεται μέση ισχύς μερικών Watt, αλλά η ισχύς αυτή πρέπει να παρέχεται για μεγάλο χρονικό διάστημα. Υπάρχουν πολλά τέτοια παραδείγματα εφαρμοφών, κυρίως ηλεκτρονικές συσκευές όπως τα κινητά τηλέφωνα και τα PDA's, που συνδιάζουν τον εξοπλισμό επικοινωνίας, την εξ' αποστάσεως παρακολούθηση και ανίχνευση, συστήματα κίνησης και πλοήγησης, φορητοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές, φωτογραφικές μηχανές κ.α. Αντίθετα, για να εφαρμοστεί στο τομέα της ηλεκτροκίνησης και κυρίως στην βιομηχανία των αυτοκινήτων θα πρέπει να κατασκευαστούν κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης, με υψηλότερη πυκνότητα ισχύος και χαμηλότερο κόστος, ώστε να θεωρηθούν εμπορικές.



Εικόνα 30, 31. Portable media player και κινητό τηλέφωνο, με κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης.

Συσκευές σαν αυτές που φαίνονται στα παραπάνω σχήματα χρησιμοποιούν για τη λειτουργία ή τη φόρτησή τους, κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης. Σκοπός τους είναι η

αντικατάσταση των μπαταριών λιθίου, γιατί φορτίζονται πιο γρήγορα απλά βάζοντας μεθανόλη στην ειδική δεξαμενή στο εσωτερικό της συσκευής. [12] [52]

5.5 Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)

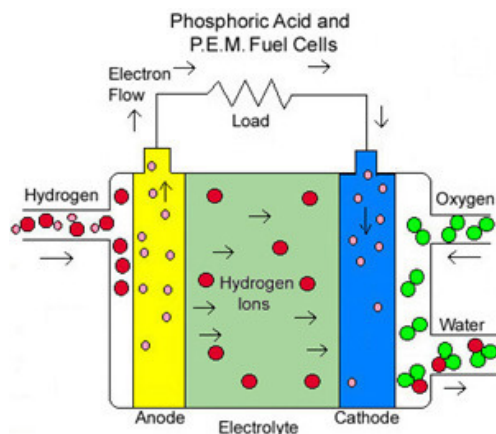
5.5.1 Εισαγωγή

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) ήταν οι πρώτες που εμπορευματοποιήθηκαν. Αναπτύχθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1960 και δοκιμάζονται από το 1970, έχοντας βελτιώσει σημαντικά την σταθερότητά τους. Ο ηλεκτρολύτης που φέρουν, είναι πορώδης και αγωγίμος στα ιόντα υδρογόνου, ενώ ο καταλύτης στην άνοδο και την κάθοδο είναι από λευκόχρυσο ή από κράματα λευκόχρυσου. Οι κυψέλες αυτές λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες, που κυμαίνονται μεταξύ 150 – 220 °C και σε ατμοσφαιρική πίεση ή λίγο μεγαλύτερη. Η παραγόμενη πυκνότητα ισχύος είναι 0.2 – 0.25 W/cm². Η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής είναι πάνω από 40000 ώρες και το κόστος αναμένεται να είναι μεγαλύτερο από 800 €/kW. [12] [36]

5.5.2 Αρχή λειτουργίας

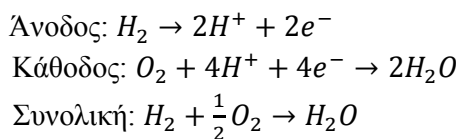
Το πολυμερές των PAFC είναι διαπερατό από πρωτόνια όταν διαποτίζεται από νερό, αλλά δεν άγει ηλεκτρόνια. Το καύσιμο για τις κυψέλες αυτές είναι το υδρογόνο και το ανταλλάξιμο φορτίο το κατιόν υδρογόνου. Στην άνοδο τα μόρια υδρογόνου διαχωρίζονται σε κατιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια. Το οξυγόνο, συνήθως στη μορφή ατμοσφαιρικού αέρα, παρέχεται στην κάθοδο και συνδιάζεται με τα ηλεκτρόνια και τα κατιόντα υδρογόνου για την παραγωγή νερού. Εκτός από τη χρήση καθαρού υδρογόνου, ως καύσιμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί φυσικό αέριο ή μεθανόλη, με τη χρήση κατάλληλου εξωτερικού αναμορφωτή καυσίμου. [37]

Η δομή της κυψέλης καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 32. Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος.

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται είναι:



5.5.3 Περιγραφή της κυψέλης

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) χρησιμοποιούν έναν ηλεκτρολύτη που αποτελείται από φωσφορικό οξύ σε συγκέντρωση 100%. Χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου τύπου ηλεκτρολύτη είναι η ιδιαίτερη αντοχή του στο διοξείδιο του άνθρακα CO₂ που βρίσκεται στο καύσιμο και στο οξειδωτικό μέσο. Το ανταλλάξιμο φορτίο είναι κατιόν υδρογόνου, ομοίως με τις κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), όπου το υδρογόνου που παρέχεται στην άνοδο διαχωρίζεται σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Τα πρωτόνια μετακινούνται μέσω του ηλεκτρολύτη και συνδιάζονται με οξυγόνο – συνήθως από αέρα – στην κάθοδο για να σχηματίσουν νερό. Τα ηλεκτρόνια οδηγούνται μέσω εξωτερικού κυκλώματος.

Το φωσφορικό οξύ είναι άχρωμο παχύρευστο υγρό και έχει σημείο πήξεως τους 42 °C. Για την προστασία της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου από το ψύχος, θα πρέπει η θερμοκρασία να διατηρείται πάνω από αυτό το όριο. Το φωσφορικό οξύ πλαισιώνεται από πορώδεις ανθρακικό υλικό τυλιγμένο με Teflon, που το συγκρατεί κατά τη διαδικασία των χημικών αντιδράσεων, διευκολύνει την παροχή των αερίων στις επιφάνειες αντίδρασης, αλλά και την διαφυγή τους από τον ηλεκτρολύτη. Η θερμοκρασία στις κυψέλες αυτού του τύπου πρέπει να είναι διπλάσια από αυτή της λειτουργίας των κυψελών καυσίμου PEM, ώστε το νερό να εξέρχεται της κυψέλης υπό τη μορφή ατμού. Ωστόσο η θερμοκρασία δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη των 220 °C γιατί το φωσφορικό οξύ αρχίζει να αποσυντίθεται. [37] [44]

5.5.4 Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου φωσφορικού οξέος

Σημαντικό πλεονέκτημα των κυψελών καυσίμου φωσφορικού οξέος είναι ότι η απόδοση τους ξεπερνά το 40% στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν λειτουργούν σε εφαρμογές συμπαραγωγής η συνολική απόδοση φτάνει περίπου το 85%. Επίσης, στη θερμοκρασία λειτουργίας τους η πλεονάζουσα θερμότητα είναι ικανή να θερμάνει νερό ή να παράξει ατμό σε ατμοσφαιρική πίεση. [50]

Ένα ακόμη πλεονέκτημα των PAFC είναι πως το διοξείδιο του άνθρακα CO₂ δεν επιρεάζει τον ηλεκτρολύτη ή τη λειτουργία της κυψέλης και μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί με αναμορφωμένα ορυκτά καύσιμα. Το μειωμένο κόστος επεξεργασίας του καυσίμου μειώνει το κόστος όλης της μονάδας και της δίνει τη δυνατότητα να λειτουργήσει

με άλλα καύσιμα, προερχόμενα είτε από τα αέρια των χωματερών είτε από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού και επεξεργασίας λυμάτων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η μοναδική αλλαγή που απαιτείται είναι μικρές προσαρμογές στο σύστημα παροχής και επεξεργασίας καυσίμου. Η απλή κατασκευή, η χαμηλή πτητικότητα του ηλεκτρολύτη και η μακρά σε χρονική διάρκεια σταθερότητα, είναι επιπλέον πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου φωσφορικού οξέος. Έτσι, λοιπόν, η συνεχόμενη ανάπτυξη κυψελών καυσίμου φωσφορικού οξέος τα τελευταία 20 χρόνια έχει μειώσει το κόστος και έχει αυξήσει την απόδοση.

Στα μειονεκτήματα των PAFC συγκαταλέγεται η χαμηλή ισχύς τους σε σχέση με άλλα είδη κυψελών καυσίμου, για διατάξεις ίδιου βάρους και όγκου. Έτσι, οι κυψέλες καυσίμου αυτού του είδους είναι συχνά μεγάλες και βαριές. Ακόμη, οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος είναι ακριβές, καθώς απαιτούν καταλύτη λευκόχρυσου που ανεβάζει περαιτέρω το κόστος. Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας είναι ταυτόχρονα μειονέκτημα, καθώς υπάρχει περίοδος αναμονής, μέχρι η κυψέλη να ζεσταθεί και να λειτουργήσει σωστά. [51] [52]

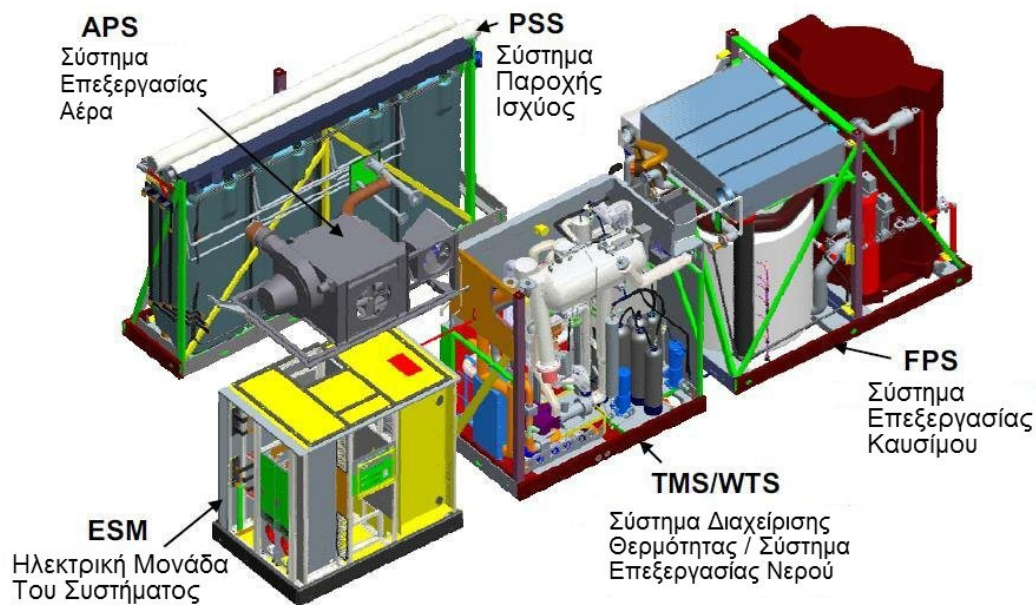
5.5.5 Εμπορικές προοπτικές

Μέχρι σήμερα περίπου 60 MW ικανότητας παραγωγής ισχύος από κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος έχουν εγκατασταθεί και λειτουργούν, για αυτό και αποτελούν τον πιο εμπορικό τύπο κυψελών καυσίμου. Τυπικές εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν κτήρια όπως, νοσοκομεία, γηροκομεία, σχολεία, ξενοδοχεία αλλά και εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη, την Ιαπωνία και τις Η.Π.Α.

Στην παρακάτω φωτογραφία φαίνεται η μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας της εταιρείας United Technologies Company (UTC Power). Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει την ονομασία Model 400 PureCell[®] System και έχει τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 400 kW/471 kVA και παραγωγή θερμότητας που φτάνει τα 1.5 εκατομμύρια Btu/hour. Πρόσθετα χαρακτηριστικά είναι ο μεγάλος βαθμός απόδοσης συμπαραγωγής που αγγίζει το 90%, τα χαμηλά επίπεδα θορύβου και η διάρκεια ζωής των 20 ετών.



Εικόνα 33. Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος, 400kW, της UTC Power.



Εικόνα 34. Πέντε υποσυστήματα της PAFC PureCell System Model 400.

Οι έρευνες γύρω από τα συστήματα κυψελών καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC), επικεντρώνονται στη διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Το μεγαλύτερο εργοστάσιο αυτού του είδους κυψελών λειτουργεί στην Ιαπωνία για την Tokyo Electric Power Company. Η ισχύς του είναι 11 MW και έχει κατασκευαστεί από τις εταιρείες Toshiba και International Fuel Cell Corporation. [45] [46]

5.6 Κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC)

5.6.1 Εισαγωγή

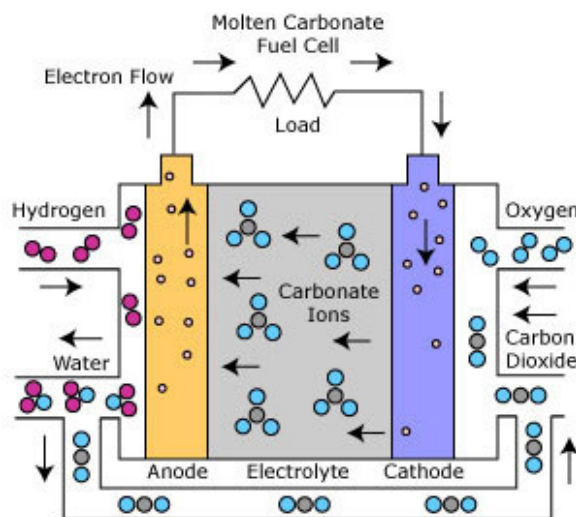
Οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC) λειτουργούν αρκετά διαφορετικά σε σχέση με τα άλλα είδη κυψελών καυσίμου. Αναπτύχθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1960, ενώ οι μέθοδοι κατασκευής, η απόδοση και η διάρκειά τους έχουν βελτιωθεί σημαντικά. Χρησιμοποιούν ηλεκτρολύτη αποτελούμενο από μίγμα ανθρακικών αλάτων (λιθίου, νατρίου ή ποτάσας), το οποίο συγκρατείται από κεραμική μήτρα. Η άνοδος είναι κατασκευασμένη από κράμα νικελίου – χρωμίου και η κάθοδος από οξείδιο του νικελίου. Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι της τάξεως των 650 °C και σε ατμοσφαιρική πίεση. Η παραγόμενη πυκνότητα ισχύος κυμαίνεται μεταξύ 0.1 – 0.2 W/cm² και η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής ξεπερνάει τις 40000 ώρες. Το κόστος των κυψελών καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων ανέρχεται στα 800 €/kW. [12] [36]

5.6.2 Αρχή λειτουργίας

Στην κάθοδο το οξυγόνο (O_2) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) του αέρα αντιδρούν μεταξύ τους και παράγουν ανθρακικά ιόντα (CO_3^{2-}), τα οποία περνούν μέσα από τον ηλεκτρολύτη της κυψέλης. Αυτά αντιδρούν με το υδρογόνο (H_2) ή το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) στην άνοδο. Έτσι έχουμε παραγωγή νερού και (H_2O), διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και τα ηλεκτρόνια μέσω εξωτερικού κυκλώματος μετακινούνται από την άνοδο στην κάθοδο.

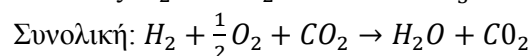
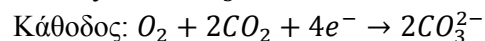
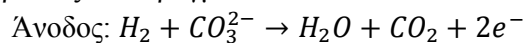
Από τις χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στην κυψέλη και τις οποίες παραθέτουμε παρακάτω, παρατηρούμε ότι το διοξείδιο του άνθρακα ανακυκλώνεται από την άνοδο στην κάθοδο. Η μεταφορά γίνεται με δύο τρόπους, είτε μέσω της καύσης των καυσαερίων στην κάθοδο και την αφαίρεση του νερού, είτε χρησιμοποιώντας συσκευή ανταλλαγής προϊόντων για τον διαχωρισμό του διοξειδίου του άνθρακα από τα καυσαέρια της ανόδου. [37] [39]

Η δομή της κυψέλης καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC) φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 35. Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων.

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται είναι:



5.6.3 Περιγραφή της κυψέλης

Οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC) ανήκουν στην κατηγορία κυψελών καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών. Η υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας τους επιτρέπει να χρησιμοποιούν φυσικό αέριο απευθείας χωρίς την ανάγκη επεξεργαστή καυσίμου, ενώ έχουν ακόμη χρησιμοποιηθεί με χαμηλής ισχύος αέριο καύσιμο από βιομηχανικές διαδικασίες και άλλες πηγές καυσίμων. Οι MCFC λειτουργούν αρκετά διαφορετικά από τα υπόλοιπα είδη κυψελών καυσίμου. [47]

Χρησιμοποιούν ηλεκτρολύτη αποτελούμενο από μίγμα ανθρακικών αλάτων. Δύο μίγματα χρησιμοποιούνται αυτή τη στιγμή: ανθρακικό λίθιο με ανθρακικό κάλιο και ανθρακικό λίθιο με ανθρακικό νάτριο. Για την τήξη των ανθρακικών αλάτων και την επίτευξη υψηλής κινητικότητας ιόντων διαμέσου του ηλεκτρολύτη, οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες της τάξεως των 650 °C. Σε αυτές τις θερμοκρασίες τα άλατα λιώνουν και γίνονται αγωγά στα ανθρακικά ιόντα. Τα ιόντα αυτά κινούνται από την κάθοδο προς την άνοδο, όπου συνδιάζονται με υδρογόνο και παράγουν νερό, διοξείδιο του άνθρακα και ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά οδηγούνται μέσω εξωτερικού κυκλώματος πίσω στην κάθοδο, παράγοντας ηλεκτρισμό και θερμότητα ως παραπροϊόν.

Το κύριο πρόβλημα με την κατασκευή και λειτουργία των κυψελών καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων, σχετίζεται με το σχεδιασμό και την κατασκευή των ηλεκτροδίων τους, τα οποία χρησιμοποιούν καταλύτη από νικέλιο. Τα ηλεκτρόδια αυτά πρέπει να είναι ανθεκτικά στο θερμό και οξειδωτικό περιβάλλον του ηλεκτρολύτη. Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος αυτού, όταν χρησιμοποιείται σε συνδιασμένο κύκλο φτάνει το 50%. [37] [50]

5.6.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων

Η υψηλότερη θερμοκρασία των MCFC παρουσιάζει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα σε σχέση με τις χαμηλότερης θερμοκρασίας αλκαλικές κυψέλες καυσίμου και τις κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. Σε υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας η αναμόρφωση καυσίμου του φυσικού αερίου μπορεί να προκύψει εσωτερικά, εξαλείφοντας την ανάγκη ενός εξωτερικού επεξεργαστή καυσίμου. Ακόμη, στα πλεονεκτήματα συμπεριλαμβάνεται η ικανότητα χρήσης σταθερών υλικών για την κατασκευή, από ανοξείδωτο ατσάλι, ενώ επιτρέπεται η χρήση καταλυτών βασισμένων σε νικέλιο για τα ηλεκτρόδια. [50]

Επίσης, οι κυψέλες καυσίμου αυτού του τύπου δεν είναι ευαίσθητες σε μονοξείδιο του άνθρακα, κάτι που τις κάνει ελκυστικές για εφοδιασμό με καύσιμα παραγόμενα από κάρβουνο. Όντας πιο ανθεκτικές σε ακαθαρσίες απ' ό,τι 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 τα μόρια που προκύπτουν από τη μετατροπή γαιάνθρακα σε υδρογόνο. Ακόμη, η πλεονάζουσα θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ατμού υψηλής πίεσης που μπορεί να αξιοποιηθεί σε πολλές βιομηχανικές και εμπορικές εφαρμογές, επιτυγχάνοντας αποδόσεις καυσίμου της τάξεως του 85%.

Η υψηλή θερμοκρασία και η χημεία του ηλεκτρολύτη έχουν επίσης και μειονεκτήματα. Πρωταρχικό πρόβλημα αποτελεί η ανθεκτικότητα. Οι υψηλές θερμοκρασίες και ο διαβρωτικός ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται, επιταχύνουν την αστοχία και τη διάβρωση των υλικών, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής των κυψελών. Ακόμη, σημαντικός χρόνος απαιτείται για την επίτευξη των θερμοκρασιών λειτουργίας, ενώ οι αποκρίσεις σε μεταβολές της ζητούμενης ισχύος είναι αργές. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν κατάλληλες τις κυψέλες αυτού του τύπου για εφαρμογές σταθερής ισχύος. Τέλος, καθώς το CO₂ καταναλώνεται στην άνοδο και μεταφέρεται στην κάθοδο, η παροχή του και η επιρροή του στο ρεύμα του αέρα αποτελούν θέματα ερευνών για την επίτευξη ιδανικής λειτουργίας, αδύνατη για οποιοδήποτε άλλο είδος κυψέλης. [51] [52]

5.6.5 Εμπορικές προοπτικές

Οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων χρησιμοποιούνται ως μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ισχύς τους ξεκινάει από τα 300 kW και φτάνει έως τα 1.5 MW. Μέχρι σήμερα η μεγαλύτερη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που βασίζεται σε κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων έχει κατασκευαστεί από την εταιρεία Fuel Cell Energy, που αποτελεί και την μεγαλύτερη εταιρεία στον χώρο των MCFC, και την G3 Power Systems. Η μονάδα αυτή έχει εγκατασταθεί στη Νότια Κορέα και έχει τη δυνατότητα παραγωγής 4.8 MW.



Εικόνα 36. Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων στη Νότια Κορέα, ισχύος 4.8MW.

Άλλες παρόμοιες μονάδες παραγωγής ισχύος MCFC έχουν κατασκευασθεί στο Κονέκτικατ και στην Καλιφόρνια. Ο βαθμός απόδοσης τους φτάνει το 47% για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος και σε περίπτωση συμπαραγωγής μπορεί να φτάσει το 60%. Σε αυτές τις μονάδες το φυσικό αέριο αναμορφώνεται εσωτερικά, εξαλείφοντας τη ανάγκη για μεγάλες εξωτερικές μονάδες αναμόρφωσης. [48]

5.7 Κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC)

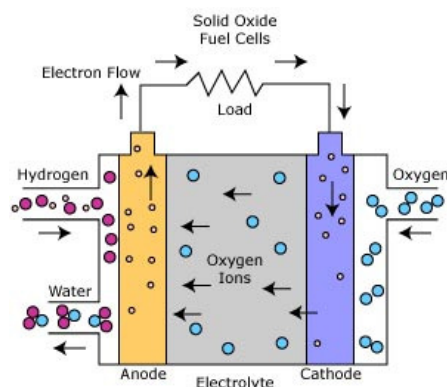
5.7.1 Εισαγωγή

Οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC), είναι εξ' ολοκλήρου στερεές κατασκευές. Αποτελούν αυτή τη στιγμή τις πλέον υψηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου που αναπτύσσονται. Μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα εύρος θερμοκρασιών μεταξύ 600 – 1000 °C και πίεση ατμοσφαιρική, επιτρέποντας έτσι τη χρήση ενός πλήθους διαφορετικών καυσίμων. Για να επιτρέψει τη λειτουργία σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες ο ηλεκτρολύτης αποτελείται από ένα λεπτό στερεό κεραμικό υλικό (στερεό οξείδιο), το οποίο άγει τα ιόντα οξυγόνου. Αποτελεί την πιο απλή διάταξη κυψελών καυσίμου. Η παραγόμενη πυκνότητα ισχύος είναι 0.24 – 0.3 W/cm², η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής ξεπενά τις 40000 ώρες και το κόστος ανέρχεται στα 1200 €/kW. [12] [36]

5.7.2 Αρχή λειτουργίας

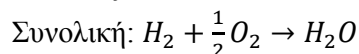
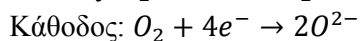
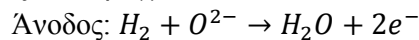
Όντας στερεός ο ηλεκτρολύτης δεν επιτρέπει την κίνηση αερίων από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο. Το ανταλλάξιμο φορτίο είναι το ανιόν οξυγόνου. Στην κάθοδο τα μόρια οξυγόνου του αέρα διασπώνται σε ιόντα οξυγόνου με την προσθήκη τεσσάρων ηλεκτρονίων. Τα ιόντα οξυγόνου οδηγούνται μέσω του ηλεκτρολύτη και συνδιάζονται με υδρογόνο στην άνοδο απελευθερώνοντας τα τέσσερα ηλεκτρόνια. Αυτά κινούνται μέσω εξωτερικού κυκλώματος παρέχοντας ηλεκτρική ισχύ και παράγοντας πλεονάζουσα θερμότητα. [37]

Η δομή της κυψέλης καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC) φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 37. Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων.

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται είναι:



5.7.3 Περιγραφή της κυψέλης

Οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων αναπτύσσονται από το τέλος της δεκαετίας του 1950 και έχουν δύο υλοποιήσεις οι οποίες ερευνούνται: την επίπεδη και την κυλινδρική. Η λειτουργία τους είναι παρόμοια με αυτή των κυψελών καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων, δηλαδή τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα οξυγόνου μεταφέρονται από την κάθοδο μέσω του ηλεκτρολύτη στην άνοδο. Έτσι το παραγόμενο νερό σχηματίζεται στην άνοδο. [39]

Οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων αναπτύσσονται από το 1899, όταν ο Nerst πρώτος περιέγραψε το οξείδιο του ζirkονίου (ZrO_2) σαν αγωγό των ανιόντων του οξυγόνου. Όλες οι SOFC βασίζονται στον ηλεκτρολύτη από ζirkόνιο, με προσθήκη μικρού ποσοστού υτρίας (Y_2O_3). Σε θερμοκρασίες κοντά στους 800 °C, το ζirkόνιο γίνεται αγωγός των ανιόντων του οξυγόνου. Στην κάθοδο χρησιμοποιείται μαγγανίτης λανθανίου ποτισμένος με στρόντιο. Η άνοδος είναι κεραμικό μείγμα ζirkονίου. Η επιλογή του νικελίου γίνεται λόγω της υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της σταθερότητάς του κατά τη διάρκεια των αντιδράσεων. Η χρησιμοποίηση του νικελίου και ως καταλύτη αναμόρφωσης σε συνδιασμό με την υψηλή θερμοκρασία, δίνει το πλεονέκτημα της εσωτερικής αναμόρφωσης μέσα στην κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων, κατευθείαν στην άνοδο.

Η αποδοτικότητα της λειτουργίας των SOFC στην παραγωγή ηλεκτρισμού είναι ανάμεσα στις υψηλότερες για κυψέλες καυσίμου και κυμαίνεται στο 60%. Ακόμη, η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας επιτρέπει εφαρμογές συμπαραγωγής για τη δημιουργία ατμού υψηλής πίεσεως που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές. Ο συνδιασμός κυψέλης υψηλής θερμοκρασίας με τουρμπίνα μέσα σε μια υβριδική κυψέλη καυσίμου, αυξάνει περαιτέρω τη συνολική απόδοση παραγωγής ηλεκτρισμού με την προοπτική για αποδόσεις πάνω από 70%. [12]

Οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων απαιτούν σημαντικό χρόνο για να φθάσουν τη θερμοκρασία λειτουργίας τους και ανταποκρίνονται αργά σε μεταβολές της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος. Επομένως, θεωρούνται υποψήφιος για εφαρμογές υψηλής ισχύος, συμπεριλαμβανομένων βιομηχανικών σταθμών και κεντρικών – υψηλής κλίμακας – σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι βασικοί σχεδιασμοί της SOFC είναι δύο, είτε με βάση τον ηλεκτρολύτη είτε με βάση τα ηλεκτρόδια. Στην πρώτη περίπτωση ο ηλεκτρολύτης είναι μεγάλο εξάρτημα και αποτελεί τη βάση της κατασκευής. Αυτές οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούνται μόνο στις υψηλές θερμοκρασίες, όπου οι μεγάλες ωμικές απώλειες μπορούν να μειωθούν. Στη δεύτερη

περίπτωση, οι κυψέλες κατασκευάζονται με σκοπό τη μείωση των ωμικών απωλειών στις χαμηλότερες θερμοκρασίες. Σε αυτές τις κυψέλες ένα από τα δύο ηλεκτρόδια είναι το μεγαλύτερο εξάρτημα και στηρίζει την κατασκευή, ενώ ο ηλεκτρολύτης πρέπει να έχει υψηλή ιοντική αγωγιμότητα και να είναι λεπτός. [49] [51]

5.7.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου στερεών οξειδίων

Η πολύ υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας των SOFC 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 κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων δεν μολύνονται από το διοξείδιο του άνθρακα – αναμορφώνοντας τα εσωτερικά, ενώ δεν παρουσιάζουν και ανάγκη χρήσης ακριβών καταλυτών. Οι δυνατότητες αυτές μειώνουν σημαντικά το κόστος κατασκευής.

Στα μειονεκτήματα, εκτός από την αργή εκκίνηση και την αργή απόκριση σε μεταβολές της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος, είναι ότι 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, ακριβά υλικά κατασκευής απαιτούνται 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. [50] [52]

5.7.5 Εμπορικές προοπτικές

Οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων, έχουν εύρος ισχύος από 1 kW έως 1 MW. Οι εφαρμογές τους εστιάζονται, σε μεγάλες μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, δεδομένου ότι οι κυψέλες αυτού του τύπου έχουν τη μεγαλύτερη θερμοκρασία λειτουργίας από όλους τους τύπους κυψελών καυσίμου.



Εικόνα 38. Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων 5kW της εταιρείας Apros.

Η μεγαλύτερη κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων έχει κατασκευαστεί από την Siemens Westinghouse και είναι ισχύος 250 kW. Παραπάνω στην Εικόνα 29 φαίνεται μία SOFC ισχύος 5 kW της εταιρείας Apros η οποία έχει εγκατασταθεί στο κέντρο τεχνολογικών ερευνών της Φινλανδίας και μέχρι το 2007 όπου και τερματίστηκε η λειτουργία της είχε συμπληρώσει 7000 ώρες λειτουργίας.

Κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων για οικιακή χρήση κατασκευάζει η Γερμανική εταιρεία Sulzer για ισχύ έως 2 kW και δυνατότητα χρήσης σε συστήματα συνδιασμένου κύκλου.



Εικόνα 39. Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων της Sulzer.

5.8 Άλλα είδη κυψελών καυσίμου

Εκτός από τις βασικές κατηγορίες κυψελών καυσίμου, υπάρχουν και κάποια άλλα είδη που αναφέρονται ως ‘κυψέλες καυσίμου’, χωρίς να είναι στην πραγματικότητα. Η διαφορά στις περισσότερες των περιπτώσεων αυτών των κυψελών είναι το γεγονός ότι τα ηλεκτρόδια ή ο ηλεκτρολύτης καταναλώνονται κατά τη λειτουργία των διατάξεων αυτών.

5.8.1 Αναγεννώμενες κυψέλες καυσίμου

Η αναγεννώμενη κυψέλη καυσίμου (Regenerative Fuel Cell – RFC) είναι ένα σύστημα που μπορεί να λειτουργεί σε κλειστό βρόχο και να αποτελεί τη βάση μιας οικονομίας υδρογόνου. Παράγει ηλεκτρισμό από υδρογόνο και οξυγόνο, καθώς και θερμότητα και νερό σαν παραπροϊόντα, όπως ακριβώς και οι υπόλοιπες κυψέλες καυσίμου. Ωστόσο, ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιήσει ηλεκτρισμό από ηλιακή ενέργεια ή κάποια άλλη ανανεώσιμη πηγή για να διαχωρίσει το πλεονάζον νερό σε οξυγόνο και υδρογόνο – η γνωστή διαδικασία της ηλεκτρόλυσης.

5.8.2 Μικροβιακές κυψέλες καυσίμου

Οι μικροβιακές κυψέλες καυσίμου (Microbial Fuel Cells – MFCs) χρησιμοποιούν την καταλυτική αντίδραση μικροοργανισμών όπως τα βακτηρίδια για να μετατρέψουν οποιοδήποτε οργανικό υλικό σε καύσιμο. Κοινές ενώσεις αποτελούν η γλυκόζη, ο οξικός εστέρας και τα υγρά απόβλητα. Κατά τη διαδικασία της πέψης ηλεκτρόνια διαχωρίζονται από την ένωση και οδηγούνται σε κάποιο κύκλωμα με τη βοήθεια ανόργανου διαμεσολαβητή. Οι MFCs λειτουργούν καλά σε ήπιες συνθήκες σχετικά με άλλα είδη κυψελών καυσίμου, όπως 20°C με 40°C και είναι ικανές για αποδόσεις πάνω από 50%.

5.8.3 Πρωτονικές κεραμικές κυψέλες καυσίμου

Οι πρωτονικές κεραμικές κυψέλες καυσίμου (Protonic Ceramic Fuel Cells – PCFCs) παρουσιάζουν παρόμοια θερμικά και κινητικά πλεονεκτήματα λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες όπως 700°C με τις κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων και τήγματος ανθρακικών αλάτων, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζουν όλα τα εγγενή πλεονεκτήματα της πρωτονικής αγωγιμότητας των κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων και φωσφορικού οξέος.

Αυτό το νέο είδος κυψελών καυσίμου βασίζεται σε έναν ηλεκτρολύτη κατασκευασμένο από κεραμικό υλικό, ο οποίος παρουσιάζει μεγάλη πρωτονική αγωγιμότητα σε υψηλές θερμοκρασίες. Αεριώδη μόρια υδρογονανθρακικού καυσίμου απορροφώνται στην επιφάνεια

της ανόδου υπό την παρουσία υδρατμών ενώ τα άτομα υδρογόνου απορροφώνται από τον ηλεκτρολύτη. Βασικό προϊόν της αντίδρασης αποτελεί το διοξείδιο του άνθρακα. Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας είναι απαραίτητη για την επίτευξη πολύ υψηλής ηλεκτρικής απόδοσης του καυσίμου. Οι PCFCs μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές θερμοκρασίες και να οξειδώσουν ηλεκτροχημικά ορυκτά καύσιμα απευθείας στην άνοδο. Το γεγονός αυτό εξαλείφει το ενδιάμεσο βήμα παραγωγής υδρογόνου μέσω της δαπανηρής διαδικασίας αναμόρφωσης καυσίμου.

5.8.4 Κυψέλες καυσίμου ψευδαργύρου – αέρα

Οι κυψέλες καυσίμου ψευδαργύρου-αέρα (Zinc-Air Fuel Cells – ZAFCS) μοιράζονται κοινά χαρακτηριστικά με πολλές από τις άλλες κυψέλες καυσίμου καθώς και με τις μπαταρίες. Ο ηλεκτρολύτης τους είναι στερεό κεραμικό που χρησιμοποιεί το ανιόν υδροξειδίου σαν ανταλλάξιμο φορτίο.

Για να επιτύχουν υψηλή ηλεκτρική απόδοση με καύσιμα υδρογονανθράκων και υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα για το ανταλλάξιμο φορτίο, οι ZAFCS λειτουργούν σε θερμοκρασίες κοντά στους 700°C. Η άνοδος αποτελείται από ψευδάργυρο και τροφοδοτείται με υδρογόνο ή ακόμη και υδρογονάνθρακες. Η κάθοδος διαχωρίζεται από την παροχή αέρα μέσω ενός ηλεκτροδίου διάχυσης αερίων, μιας διαπερατής μεμβράνης που επιτρέπει στο ατμοσφαιρικό οξυγόνο να τη διαπεράσει. Αφότου το οξυγόνο έχει μετατραπεί σε ανιόντα υδροξειδίου και νερό, τα παραπάνω ιόντα θα μετακινηθούν μέσω του ηλεκτρολύτη και θα φτάσουν στην άνοδο. Εκεί θα αντιδράσουν με τον ψευδάργυρο, σχηματίζοντας οξείδιο του ψευδαργύρου. [42]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

6.1 Ιστορικά στοιχεία

Η ενέργεια του ανέμου χρησιμοποιήθηκε από τον άνθρωπο ήδη από την αρχαιότητα. Μάλιστα, τόσο είχε εκτιμηθεί η σπουδαιότητα και η χρησιμότητα των ανέμων, ώστε ο ίδιος ο Δίας, κατά την ελληνική μυθολογία, είχε ορίσει 'ειδικό διαχειριστή' των ανέμων τον Αίολο, ο οποίος τους κατεύθυνε από τη μυθική νήσο του, την Αιολία. Εξάλλου, ο εγκλωβισμός των ανέμων στον ασκό του Αιόλου, κατά τον Όμηρο, δείχνει ακριβώς την ανάγκη των ανθρώπων να διαθέτουν τους ανέμους στον τόπο και χρόνο όπου οι ίδιοι θα ήθελαν.

Για πολλές εκατοντάδες χρόνια, η κίνηση των πλοίων στηριζόταν στη δύναμη του ανέμου, ενώ η χρήση του ανεμόμυλου ως κινητήριας μηχανής κυρίως στον αγροτικό τομέα, εγκαταλείπεται μόλις στα μέσα του 20^{ου} αιώνα. Είναι η εποχή που εξαπλώνεται ραγδαία η χρήση των συμβατικών καυσίμων και ο ηλεκτρισμός φθάνει ως τα πιο απομακρυσμένα σημεία.

Το ενδιαφέρον για την εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου, κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, εκδηλώθηκε έντονα περί τα μέσα της δεκαετίας του '70 και ήταν αποτέλεσμα της πετρελαϊκής κρίσης που είχε εν τω μεταξύ ξεσπάσει. Από τότε, μέχρι σήμερα, υπάρχει μια συνεχώς αυξανόμενη τάση για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της εκμετάλλευσης της ενέργειας του ανέμου.

6.2 Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια είναι μία μορφή ενέργειας, που δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία. Η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μία περιοχή στην άλλη, δημιουργεί δηλαδή τους ανέμους. Ο άνεμος είναι δυνατό να περιστρέφει ανεμοτροχούς, να προωθεί ιστιοφόρα πλοία ή να κινεί αντικείμενα, μπορεί δηλαδή η ενέργειά του να καταστεί εκμεταλλεύσιμη.

Η πηγή αυτής της ενέργειας είναι πρακτικά ανεξάντλητη, ανανεούμενη συνεχώς, για αυτό και ονομάζεται ανανεώσιμη. Εάν υπήρχε η δυνατότητα με τη σημερινή τεχνολογία, να καταστεί εκμεταλλεύσιμο το συνολικό αιολικό δυναμικό της γης, εκτιμάται ότι η παραγόμενη σε ένα χρόνο ηλεκτρική ενέργεια από τον άνεμο θα ήταν υπερδιπλάσια από τις ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια της ανθρωπότητας στο ίδιο διάστημα. Δυστυχώς, μόνο ένα μικρό ποσοστό της τεράστιας αυτής ποσότητας ενέργειας είναι σήμερα εκμεταλλεύσιμη. Εντούτοις, υπολογίζεται ότι στο 25% της επιφάνειας της γης επικρατούν άνεμοι μέσης ετήσιας ταχύτητας πάνω από 5,1 μέτρα το δευτερόλεπτο, σε ύψος 10 μέτρων πάνω από το έδαφος. Όταν σε μια περιοχή οι άνεμοι πνέουν με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή την τιμή, τότε το

αιολικό δυναμικό του τόπου θεωρείται εκμεταλλεύσιμο και οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις μπορούν να καταστούν οικονομικά βιώσιμες, σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα. [58]

Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα μια ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής. Το 'καύσιμο' είναι άφθονο, αποκεντρωμένο και δωρεάν. Δεν εκλύονται αέρια θερμοκηπίου και άλλοι ρύποι, και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι μικρές σε σύγκριση με τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικά καύσιμα. Επιπλέον, τα οικονομικά οφέλη μιας περιοχής από την ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας είναι αξιοσημείωτα.

6.2.1 Η φύση του ανέμου

Σε ένα αιολικό σύστημα η πρωτογενής πηγή ενέργειας μεταβάλλεται με την ταχύτητα του ανέμου, οπότε η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας απαιτεί την πλήρη κατανόηση των βασικών χαρακτηριστικών του ανέμου. Σε όλα τα στάδια ανάπτυξης και χρήσης της αιολικής τεχνολογίας, από την επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας και τις μελέτες απόδοσης μιας αιολικής εγκατάστασης, μέχρι το σχεδιασμό των ανεμογεννητριών και την αλληλεπίδραση των αιολικών πάρκων με τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, η διερεύνηση των μηχανισμών στους οποίους υπόκεινται οι μεταβολές του ανέμου είναι ζωτικής σημασίας.

Η μεταβλητότητα του ανέμου, τόσο γεωγραφικά όσο και χρονικά, κυμαίνεται σε μεγάλες χρονικές και χωρικές κλίμακες. Σε μεγάλη κλίμακα, η χωρική μεταβλητότητα ενδεικνύει την ποικιλία κλιματικών περιοχών στον κόσμο, με κάποιες να παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερο αιολικό δυναμικό από άλλες. Αυτές οι περιοχές ορίζονται σε μεγάλο βαθμό από το γεωγραφικό πλάτος που καθορίζει και την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Σε μικρότερη κλίμακα, η φυσική γεωγραφία της κάθε κλιματικής περιοχής ορίζει και την αυξημένη μεταβλητότητα μέσα στα όρια της.

Σε σχέση με τη χρονική μεταβλητότητα μπορεί να γίνει διάκριση ανάμεσα στις μακροπρόθεσμες μεταβολές ανέμου, που αναφέρονται σε κλίμακα ενός έτους έως και δεκαετίας, και στις βραχυπρόθεσμες, οι οποίες αναφέρονται ως συνοπτικές μεταβολές και σχετίζονται με την εναλλαγή των καιρικών συστημάτων. Στις μεν μακροπρόθεσμες μεταβολές υπάρχει μεγάλη δυσκολία πρόγνωσης, ενώ αντίθετα στις βραχυπρόθεσμες έχει αναπτυχθεί ήδη σημαντική τεχνογνωσία που παρέχει τη δυνατότητα αξιόπιστων προβλέψεων, γεγονός που ευνοεί τον ασφαλή προγραμματισμό των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Σε ακόμα μικρότερες χρονικές κλίμακες λεπτών ή δευτερολέπτων, η μεταβλητότητα αναφέρεται ως τύρβη και έχει σημαντικές επιπτώσεις στη λειτουργία των ανεμογεννητριών και των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας στα οποία συνδέονται αυτές, με αποτέλεσμα να λαμβάνονται υπ' όψιν κατά το σχεδιασμό των αιολικών διατάξεων.

6.2.2 Η φύση της τύρβης

Οι διακυμάνσεις σε σχετικά μικρή χρονική κλίμακα, συνήθως μικρότερη από 10 λεπτά, αντιστοιχούν στο φασματικό μέγιστο της μέγιστης συχνότητας. Οι μηχανισμοί δημιουργίας τύρβης συνδέονται με την τριβή που προκαλείται σε σχέση με την επιφάνεια της γης και με θερμικά φαινόμενα που διαμορφώνουν κάθετες μετακινήσεις αέριων μαζών. Ιδιότητες όπως θερμοκρασία, υγρασία, ένταση και πίεση πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν κατά την αναπαράσταση του φαινομένου της τύρβης μέσω φυσικών νόμων. Κυρίως λόγω της πολυπλοκότητας μιας τέτοιας διαδικασίας αλλά και της αβεβαιότητας που υπεισέρχεται σε θέματα πρόβλεψης, εφαρμόζεται η προσέγγιση των στατιστικών ιδιοτήτων της τύρβης.

Η ένταση της τύρβης είναι ένα ενδεικτικό μέγεθος και ορίζεται ως εξής:

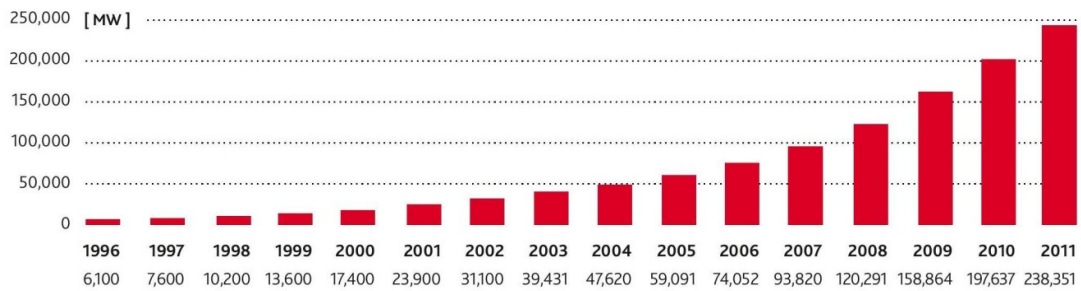
$$I = \frac{\sigma}{\bar{U}}$$

όπου 'σ' είναι η απόκλιση των διακυμάνσεων στην ταχύτητα ανέμου γύρω από τη μέση ταχύτητα 'U' που ορίζεται συνήθως σε 10 λεπτά ή μία ώρα. Η ένταση της τύρβης εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας του εδάφους και το υψόμετρο. Προφανώς, τοπικά τοπογραφικά χαρακτηριστικά διαμορφώνουν την εξέλιξη του φαινομένου μέσα στο χρόνο. Το μέρος της ατμόσφαιρας, όπου η επιφάνεια της γης καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τα φαινόμενα που σχετίζονται με τις διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου, ονομάζεται οριακό στρώμα. Σε αυτή την περιοχή, η τραχύτητα της επιφάνειας, τα θερμικά φαινόμενα και τα φαινόμενα *Coriolis* εξ' αιτίας της περιστροφής της γης, είναι μερικές από τις ιδιότητες που διαμορφώνουν το πλαίσιο μοντελοποίησης των παραγόντων σχετικά με τις μεταβολές στον άνεμο. [59]

6.2.3 Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στον κόσμο

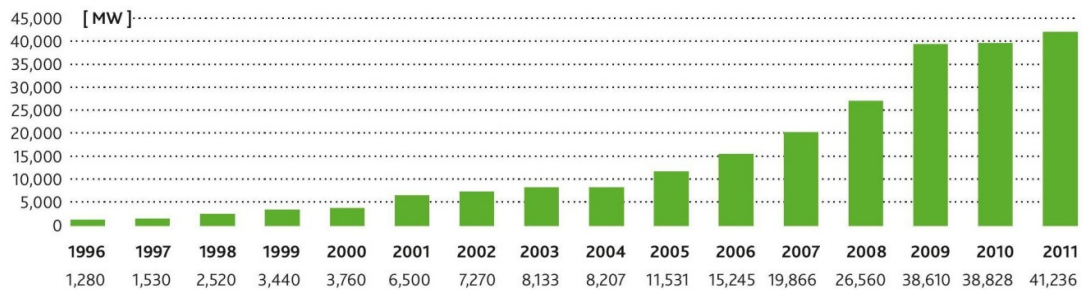
Από τα μέσα της δεκαετίας του '70, οπότε άρχισε η εγκατάσταση των πρώτων ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μέχρι τα τέλη του 2011, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς σε όλο τον κόσμο άγγιξε τα 238.351 MW. Από αυτά τα 96.616 MW βρίσκονται στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Το 1994, οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης υποσκέλησαν τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής σε συνολική εγκατεστημένη ισχύ, με πρωτοπόρες τη Δανία, την Ολλανδία και της Αγγλία. Η Γερμανία εισήλθε δυναμικά στο χώρο και από 60 MW το 1990 έφθασε τα 29.060 MW εγκατεστημένης ισχύος στο τέλος του 2011. Μεγάλη πρόοδο έχει σημειώσει και η Ισπανία, η οποία, κατόρθωσε να εγκαταστήσει 21.674 MW μέχρι το τέλος του 2011 και να είναι η δεύτερη Ευρωπαϊκή χώρα με την μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ, αφήνοντας πίσω τις υπόλοιπες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης με εγκατεστημένη ισχύ μικρότερη από 6.800 MW. [58]

ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΑΙΟΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ 1996 - 2011



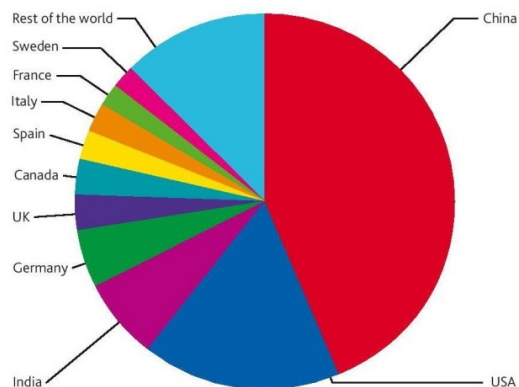
Εικόνα 40. Παγκόσμια αθροιστική εγκατεστημένη αιολική ισχύς 1996 – 2011.

ΕΤΗΣΙΑ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 1996 - 2011



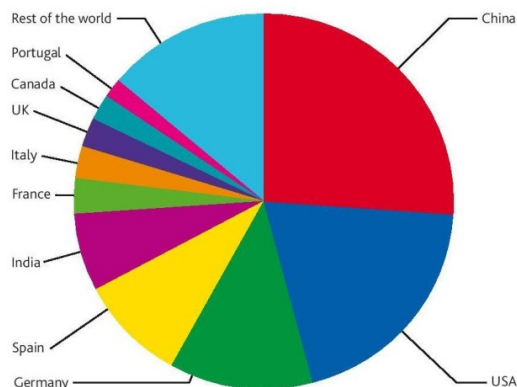
Εικόνα 41: Ετήσια παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας 1996 – 2011.

10 ΚΟΡΥΦΑΙΕΣ ΝΕΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ ΙΑΝ - ΔΕΚ 2011



Country	MW	% SHARE
China**	18,000	44
USA	6,810	17
India	3,019	7
Germany	2,086	5
UK	1,293	3.1
Canada	1,267	3.1
Spain	1,050	2.5
Italy	950	2.3
France**	830	2.0
Sweden	763	1.9
Rest of the world	5,168	12.5
Total TOP 10	36,068	87.5
World Total	41,236	100.0

10 ΚΟΡΥΦΑΙΕΣ ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ ΔΕΚ 2011



Country	MW	% SHARE
China**	62,733	26.3
USA	46,919	19.7
Germany	29,060	12.2
Spain	21,674	9.1
India	16,084	6.7
France**	6,800	2.9
Italy	6,747	2.8
UK	6,540	2.7
Canada	5,265	2.2
Portugal	4,083	1.7
Rest of the world	32,446	13.6
Total TOP 10	205,905	86.4
World Total	238,351	100.0

Εικόνα 42, 43: Οι δέκα κορυφαίες νέες εγκαταστάσεις ισχύος για το έτος 2011 και οι δέκα κορυφαίες αθροιστικά εγκαταστάσεις ισχύος μέχρι τον Δεκέμβριο του 2011.

ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (MW) - ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

	End 2010	New 2011	Total End 2011
AFRICA & MIDDLE EAST			
Cape Verde	2	23	24
Morocco	286	5	291
Iran	90	3	91
Egypt	550	-	550
Other ⁽¹⁾	137	-	137
Total	1,065	31	1,093
ASIA			
China**	44,733	18,000	62,733
India	13,065	3,019	16,084
Japan	2,334	168	2,501
Taiwan	519	45	564
South Korea	379	28	407
Vietnam	8	29	30
Other ⁽²⁾	69	9	79
Total	61,106	21,298	82,398
EUROPE			
Germany	27,191	2,086	29,060
Spain	20,623	1,050	21,674
France**	5,970	830	6,800
Italy	5,797	950	6,747
UK	5,248	1,293	6,540
Portugal	3,706	377	4,083
Denmark	3,749	178	3,871
Sweden	2,163	763	2,970
Netherlands	2,269	68	2,328
Turkey**	1,329	470	1,799
Ireland	1,392	239	1,631
Greece	1,323	311	1,629
Poland	1,180	436	1,616
Austria	1,014	73	1,084
Belgium	886	192	1,078
Rest of Europe ⁽³⁾	2,807	966	3,708
Total Europe	86,647	10,281	96,616
of which EU-27 ⁽⁴⁾	84,650	9,616	93,957
LATIN AMERICA & CARIBBEAN			
Brazil	927	583	1,509
Mexico**	519	354	873
Chile	172	33	205
Argentina	50	79	130
Costa Rica	119	13	132
Honduras	-	102	102
Dominican Republic	-	33	33
Caribbean ⁽⁵⁾	91	-	91
Others ⁽⁶⁾	118	10	128
Total	1,997	1,206	3,203
NORTH AMERICA			
USA	40,298	6,810	46,919
Canada	4,008	1,267	5,265
Total	44,306	8,077	52,184
PACIFIC REGION			
Australia	1,990	234	2,224
New Zealand	514	108	622
Pacific Islands	12	-	12
Total	2,516	342	2,858
WORLD TOTAL	197,637	41,236	238,351

Source: GWEC

Εικόνα 44: Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας.

6.2.4 Ανάπτυξη και προοπτικές αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα

Η χώρα μας διαθέτει εξαιρετικά πλούσιο αιολικό δυναμικό και η αιολική ενέργεια μπορεί να γίνει σημαντικός μοχλός ανάπτυξης της. Από τις πλέον πρόσφορες περιοχές για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών είναι οι περιοχές της ηπειρωτικής Ελλάδας και τα νησιά του Αιγαίου στα οποία συχνά πνέουν ισχυροί άνεμοι, πολλές φορές εντάσεως 8 και 9 μποφόρ.

Οι πρώτες δραστηριότητες για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα άρχισαν το 1975, με την πραγματοποίηση από τη Δ.Ε.Η. μετρήσεων των ανεμολογικών στοιχείων σε πολλές περιοχές της χώρας. Η κίνηση αυτή ήταν η ενδεδειγμένη, δεδομένου ότι η ύπαρξη καλών ανεμολογικών στοιχείων για μια σειρά πιθανών περιοχών εγκατάστασης, είναι βασικός παράγοντας για την ορθή επιλογή της θέσης των αιολικών πάρκων.

Η Δ.Ε.Η. Ανανεώσιμες αξιοποιεί τη δύναμη του ανέμου δημιουργώντας αιολικά πάρκα σε νησιωτικές περιοχές της Ελλάδας. Πέρα από τα περιβαλλοντικά οφέλη που απορρέουν από τη συγκεκριμένη δραστηριότητα, ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι η δημιουργία αιολικών πάρκων σε νησιωτικές περιοχές συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην ενεργειακή αυτονομία τους. Ενδεικτικό είναι ότι η λειτουργία ενός αιολικού πάρκου ισχύος 10 MW προσφέρει ετησίως την ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζονται 7.250 νοικοκυριά και συμβάλλει στην εξοικονόμηση περίπου 7.000 τόνων πετρελαίου.

Στους δύο παρακάτω πίνακες παρουσιάζεται το αιολικό δυναμικό σε διάφορες ηπειρωτικές και νησιωτικές περιοχές της Ελλάδας, με βάση τους επίσημους πίνακες της Δ.Ε.Η. Ανανεώσιμες.

ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ που έχουν εγκατασταθεί	
Περιοχή	Ισχύς (MW)
ΑΠ Μελανιός Χίου	2,48
ΑΠ Αγ. Σώζων Λήμνου	1,80
ΑΠ Αγ. Ιωάννης Καρπάθου	0,28
ΑΠ Ακούμια Ρεθύμνου	7,20
ΑΠ Βουναρός Λήμνου	0,44
ΑΠ Καλυβάρι Άνδρου	1,58
ΑΠ Καμάρες Πάρου	3,60
ΑΠ Κάστρο Βοιωτίας	17,70
ΑΠ Κατταβιά Ρόδου	5,40

ΑΠ Κω Δωδεκανήσου	2,06
ΑΠ Λέρου Δωδεκανήσου	2,06
ΑΠ Μαραθόκαμπος Σάμου ΙΙ	1,80
ΑΠ Μαρμάρι Ευβοίας	5,10
ΑΠ Μονή Τοπλού Σητείας	6,60
ΑΠ Ξηρολίμνη Ι, ΙΙ, ΙΙΙ Κρήτη	13,20
ΑΠ Ποταμιά Χίου	1,00
ΑΠ Προφήτης Ηλίας Ψαρών	2,03
ΑΠ Πυθαγόρειου Σάμου	2,03
ΑΠ Σιγρί Λέσβου	2,03
ΑΠ Σκαλοχώρι Λέσβου	2,70
ΣΥΝΟΛΟ 81,09	

Πίνακας 5. Εγκατεστημένα αιολικά πάρκα στην Ελλάδα.

ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ υπό ανάπτυξη	
Περιοχή	Ισχύς (MW)
ΑΠ Καρδίτσας	30,00
ΑΠ Βορεινό Πέλλης	14,00
ΑΠ Καλόν Όρος Λευκάδος	10,00
ΑΠ Κοπρινό Ρεθύμνου	9,90
ΑΠ Μακροτάναλος Άνδρου	11,50
ΑΠ Μαμάδου Τήνου	4,50
ΑΠ Ξερακιά Κεφαλλονιάς	10,00
ΑΠ Πυθαγόρειο Σάμου	0,90
ΑΠ Τηγάνι Μυκόνου	1,80
ΑΠ Τραγουδιστή Σίφνου	1,80
ΣΥΝΟΛΟ 94,90	

Πίνακας 6. Ελληνικά αιολικά πάρκα υπό ανάπτυξη.

Από τα στοιχεία των παραπάνω πινάκων και από τις μετρήσεις που αφορούν το αιολικό δυναμικό της Ελλάδας προκύπτει ότι η χώρα μας διαθέτει ορισμένες από τις καλύτερες θέσεις παγκοσμίως για εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου. Συνολικά, η εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών πάρκων της Δ.Ε.Η. Ανανεώσιμες ανέρχεται περίπου σε 81,09 MW. Κατά το 2011 η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανήλθε σε 125.174 MWh και κατά συνέπεια μέσω της λειτουργίας των αιολικών πάρκων αποφεύχθηκε η εκπομπή 86.617 τόνων CO₂, καλύπτοντας τις ανάγκες σε ενέργεια 34.150 ελληνικών νοικοκυριών.

Από το 1982 όπου εγκαταστάθηκε από τη Δ.Ε.Η. το πρώτο αιολικό πάρκο στην Κύθνο και μέχρι σήμερα δεν έχουν σταματήσει να δημιουργούνται ολοένα και περισσότερα αιολικά πάρκα τα περισσότερα όμως με χρηματοδοτήσεις και επενδύσεις ξένων ιδιωτών και εταιρειών.[58] Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται κατά σειρά μεγέθους παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος τα δέκα μεγαλύτερα αιολικά πάρκα στον Ελλαδικό χώρο που έχουν αδειοδοτηθεί από την *Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας* – ως τομείς Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας –, έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή τους και βρίσκονται σε λειτουργία τα τελευταία χρόνια. [74]

Τα 10 μεγαλύτερα Αιολικά Πάρκα στην Ελληνική επικράτεια			
Περιφέρεια	Νομός	Δήμος Καλλικρατικός	Ισχύς (MW)
Ηπείρου - Θεσσαλίας	Ιωαννίνων - Τρικάλων	Μετσόβου - Καλαμπάκας	144
Νοτίου Αιγαίου	Δωδεκανήσων	Αστυπάλαιας - Λέρου	150
Νοτίου Αιγαίου	Δωδεκανήσων	Αστυπάλαιας - Ανάφης	150
Δυτικής Μακεδονίας	Καστοριάς	Νεστορίου	163,8
Ανατολικής Μακεδονίας & Θράκης	Έβρου	Αλεξανδρούπολης	216
Δυτικής Μακεδονίας	Κοζάνης - Ημαθίας	Εορδαίας - Νάουσας	300
Νοτίου Αιγαίου	Κυκλάδων	Αμοργού – Ανάφης – Αστυπάλαιας – Ιητών	317,4
Βορείου Αιγαίου	Σάμου	Ικαρίας	330
Νοτίου Αιγαίου	Δωδεκανήσων	Καλύμνου – Λέρου – Κω	348
Βορείου Αιγαίου	Λέσβου	Λήμνου	498,15

Πίνακας 7. Τα 10 μεγαλύτερα Αιολικά Πάρκα στην Ελληνική επικράτεια.

6.3 Αρχές της αεροδυναμικής – μαθηματικό υπόβαθρο

Σε αυτό το κεφάλαιο, το σύμβολο P αντιπροσωπεύει τόσο την ισχύ όσο και την πυκνότητα ισχύος (ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας), ανάλογα με τα συμφραζόμενα. Το ' ρ ' γραμμμένο με πεζά γράμματα, αναφέρεται στην πίεση. Έτσι, λοιπόν, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι δείκτες:

$P_w = \frac{1}{2}\rho v^3$	Ή πυκνότητα ενέργειας από τον άνεμο. Είναι η ποσότητα ενέργειας που μεταφέρεται σε μια μονάδα επιφάνειας στη μονάδα του χρόνου.
$P_A = \frac{16}{27} \times \frac{1}{2}\rho v^3$	Ή διαθέσιμη πυκνότητα ισχύος. Είναι το θεωρητικά μέγιστο ποσό ισχύος που μπορεί να εξαχθεί από τον άνεμο.
$P_D = \frac{16}{27} \times \frac{1}{2}\rho v^3 A_\eta$	Ή παραδοθείσα ισχύς. Είναι η ισχύς που παραδίδει η ανεμογεννήτρια στο φορτίο της.

6.3.1 Η δύναμη του ανέμου

Έαν η μέση μάζα των μορίων του αερίου είναι m , τότε η μέση ενέργεια ενός μορίου, η οποία οφείλεται στον παρασυρόμενο όγκο της (δεν οφείλεται στη κίνηση λόγω θερμότητας), είναι $\frac{1}{2}mv^2$. Η ποσότητα της ενέργειας που μεταφέρεται σε μια μονάδα επιφάνειας στη μονάδα του χρόνου, αποτελεί την πυκνότητα ισχύος του ανέμου:

$$P_w = \frac{1}{2}mv^2\varphi = \frac{1}{2}mnv^3 = \frac{1}{2}\rho v^3 \quad (Wm^{-2})$$

Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι η πυκνότητα ισχύος είναι ανάλογη της ταχύτητας του ανέμου στον κύβο. Η ποσότητα, ρ , είναι η πυκνότητα του αερίου, δηλαδή η μάζα ανά μονάδα όγκου:

$$\rho = mn \quad (kg \ m^{-3})$$

Σε σταθερή θερμοκρασία και πίεση, η πίεση του ανέμου είναι:

$$\rho = \frac{0.2 \times 32 + 0.8 \times 28}{22.4} = 1.29 \quad (kg \ m^{-3})$$

Ο αριθμητής είναι η μέση μοριακή μάζα του αέρα που περιέχει 20% O₂ και 80% N₂, κατ' όγκον. Ο παρανομαστής είναι ο αριθμός των κυβικών μέτρων ανά κιλομόλ, σε σταθερή θερμοκρασία και πίεση:

Από τον τέλειο νόμο των αερίων, σε κανονικές συνθήκες, έχουμε:

$$V = \frac{RT}{p} = \frac{8314 \times 273.3}{1.013 \times 10^5} = 22.4 \text{ (m}^3\text{)}$$

6.3.2 Δυναμική πίεση

Δεδομένου ότι το 1 m³ αερίου περιέχει n μόρια και κάθε μόριο φέρει $\frac{1}{2}mv^2$ Joules ενέργειας που οφείλονται στην κίνηση του όγκου, η συνολική πυκνότητα ενέργειας – δηλαδή η συνολική ενέργεια ανά μονάδα όγκου, είναι:

$$W_d = \frac{1}{2}nmv^2 = \frac{1}{2}\rho v^2 \text{ (J m}^{-3} \text{ ή N m}^{-2}\text{)}$$

Η ενέργεια ανά μονάδα όγκου έχει τις διαστάσεις της δύναμης ανά μονάδα επιφάνειας, δηλαδή της πίεσης. Έτσι το μέγεθος W_d αναφέρεται ως δυναμική πίεση.

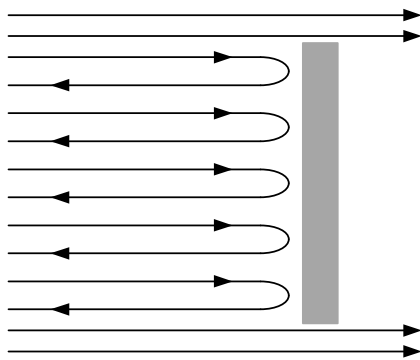
6.3.3 Η πίεση του ανέμου

Ο άνεμος ασκεί πίεση σε οποιαδήποτε επιφάνεια εκτεθεί σε αυτόν και το μοτίβο της ροής του απεικονίζεται παρακάτω στην Εικόνα 45 (Σχήμα 1). Η υπόθεση είναι ότι οποιοδήποτε μόριο προσκρούει στην επιφάνεια, ανακλάται και επιστρέφει πίσω ενάντια στον αέρα χωρίς να δημιουργείται κάποια παρεμβολή με τα εισερχόμενα μόρια.

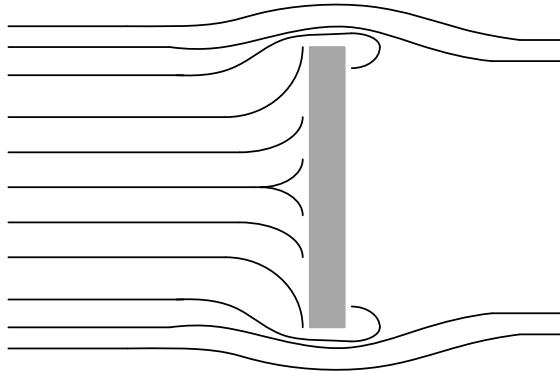
Σύμφωνα με μια τέτοια απλουστευμένη υπόθεση, κάθε μόριο συνεισφέρει στην επιφάνεια ορμή, $2mu$, επειδή η αλλαγή της ταχύτητάς της είναι $2u$ (προσκρούει με ταχύτητα u και ανακλάται πίσω με ταχύτητα $-u$). Δεδομένου ότι η ροή είναι ρu , ο ρυθμός της ροής που μεταφέρεται ανά μονάδα επιφάνειας είναι $2mu \times \rho u = 2\rho u^2$. Η υπόθεση αυτή ισχύει μόνο σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις αερίου, όταν, μάλιστα, ένα μόριο που αναπηδάει πίσω μπορεί να αποφύγει την κρούση με ένα που κατευθύνεται προς την επιφάνεια.

Σε ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο ροής, τα ανακλώμενα μόρια θα διαταράξουν την εισερχόμενη ροή, η οποία κατόπιν θα μοιάζει με αυτή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 45 (Σχήμα 2). Αυτό οδηγεί σε μία πίεση μικρότερη από εκείνη της περίπτωσης ιδανικής ροής, μία πίεση που εξαρτάται από το σχήμα του αντικειμένου. Για να αντιμετωπίσουν αυτό το πολύπλοκο πρόβλημα, οι αεροδυναμιστές υπέθεσαν πως η πραγματική πίεση είναι ίση με την

δυναμική πίεση πολλαπλασιασμένη από έναν πειραματικό συντελεστή διόρθωσης, C_D , που ονομάζεται συντελεστής οπισθέλκουσας.



Σχήμα 1: Απλοϊκή μορφή της ροής



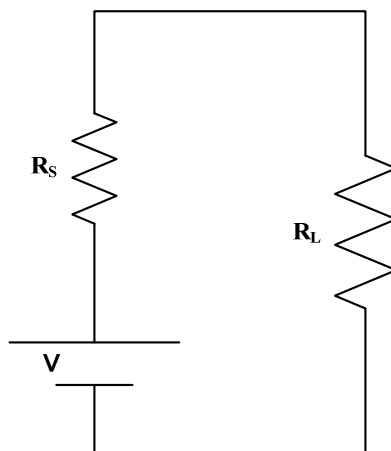
Σχήμα 2: Ρεαλιστική μορφή της ροής

Εικόνα 45: Σχηματική απεικόνιση της ροής του ανέμου.

Ο συντελεστής οπισθέλκουσας εξαρτάται από το σχήμα του αντικειμένου και σε ορισμένο βαθμό, από το μέγεθός του και από την ταχύτητα της ροής. Αυτό βέβαια σημαίνει, ότι η πίεση που ασκείται από τον άνεμο σε μια επιφάνεια, δεν είναι αυστηρά ανάλογη της ταχύτητας u^2 . Ο συντελεστής ταχύτητας για μια μεγάλη επίπεδη πλάκα, σε χαμηλές υποχημητικές ταχύτητες, λαμβάνεται συνήθως ως $C_D=1.28$.

6.3.4 Διαθέσιμη ισχύς

Οι ηλεκτρολόγοι μηχανικοί είναι εξοικειωμένοι με την έννοια της διαθέσιμης ισχύος. Εάν μια πηγή παρουσιάζει τάση ανοικτού κυκλώματος V και μια εσωτερική αντίσταση R_s , η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παραδώσει σε ένα φορτίο είναι $V^2/4R_s$. Αυτό συμβαίνει όταν $R_L = R_s$.



Εικόνα 46: Ηλεκτρική πηγή και το φορτίο της.

Το ίδιο ερώτημα προκύπτει όταν θέλουμε να εξάγουμε ισχύ από τον άνεμο. Αν η επιφάνεια που αλληλεπιδρά με τον άνεμο είναι στάσιμη, δεν έχουμε εξαγωγή ισχύος γιατί δεν υπάρχει κίνηση. Αν στην επιφάνεια επιτραπεί να παρασυρθεί καθοδικά χωρίς καμία αντίσταση πάλι δεν έχουμε εξαγωγή ισχύος γιατί ο άνεμος δεν ασκεί καμία δύναμη σε αυτή. Έτσι, λοιπόν, γίνεται κατανοητό πως πρέπει να υπάρχει μία ταχύτητα ώστε να εξαχθεί η μέγιστη ισχύς από τον άνεμο.

Η πυκνότητα ισχύος P , που εξάγεται από τον άνεμο, είναι προϊόν της πίεσης p , επί της επιφάνειας και της ταχύτητας w , με την οποία η επιφάνεια παρασύρεται καθοδικά. Η πίεση του αέρα είναι:

$$p = \frac{1}{2} \rho C_D (u - w)^2$$

ως εκ τούτου,

$$P = pw = \frac{1}{2} \rho C_D (u - w)^2 w$$

Θέτοντας $\partial P / \partial w$ στο μηδέν, βρίσκουμε ένα ακρότατο του P . Αυτό είναι ένα μέγιστο και εμφανίζεται για $w = u/3$ ανεξάρτητα από την τιμή του C_D . Έτσι:

$$P_{max} = \frac{2}{27} \rho C_D u^3 \quad (W \ m^{-2})$$

Ο λόγος της μέγιστης εξαγόμενης ισχύος προς την ισχύ του ανέμου δίνεται από την εξής σχέση:

$$\frac{P_{max}}{P_w} = \frac{\frac{2}{27} \rho C_D u^3}{\frac{1}{2} \rho u^3} = \frac{4}{27} C_D$$

Η μεγαλύτερη δυνατή τιμή του C_D είναι αυτή που προβλέπεται από την απλοϊκή φόρμουλα που αναφέραμε παραπάνω, θέτοντας $p = 2\rho v^2$, που σημαίνει ότι $C_D=4$. Έτσι, στην καλύτερη περίπτωση, είναι δυνατόν να εξάγουμε 16/27 ή αλλιώς 59.3% από την 'ισχύ του ανέμου'. Αυτή είναι η διαθέσιμη πυκνότητα ισχύος από τον άνεμο, που δίνεται από τον παρακάτω τύπο: [15]

$$P_A = \frac{16}{27} \times \frac{1}{2} \rho v^3$$

6.4 Υπεράκτια αιολική ενέργεια

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια αφορά την κατασκευή αιολικών πάρκων σε υδάτινα συστήματα, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο. Η ταχύτητα του ανέμου που είναι διαθέσιμη στα παράκτια αιολικά πάρκα είναι καλύτερη από αυτή που συναντάμε στις χερσαίες – ηπειρωτικές περιοχές, οπότε η υπεράκτια αιολική ενέργεια συμβάλει σε μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το δυναμικό της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας είναι τεράστιο, τόσο που θα μπορούσε να ικανοποιήσει τη ζήτηση ενέργειας στην Ευρώπη έως και επτά φορές πάνω, ενώ θα μπορούσε να καλύψει και τη ζήτηση των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής έως και τέσσερις φορές πάνω. Η υπεράκτια αιολική ενέργεια είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία και αρκετά ακριβή, ωστόσο με το πέρασμα των χρόνων το κόστος θα μειωθεί και η τεχνολογία θα προχωρήσει, κάνοντας έτσι την υπεράκτια αιολική ενέργεια πιο αποτελεσματική και οικονομικά ανταγωνιστική στο προσεχές μέλλον. [60]

Περισσότερο από το 90% της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας σε ολόκληρο τον κόσμο είναι εγκατεστημένη στη Βόρεια Ευρώπη και πιο συγκεκριμένα στη Βόρεια θάλασσα, τη Βαλτική θάλασσα, τη θάλασσα της Μάγχης και τη θάλασσα της Ιρλανδίας. Το υπόλοιπο 10% αποτελείται κυρίως από εγκαταστάσεις ‘επίδειξης’ υπεράκτιας αιολικής ενέργειας στις ανατολικές ακτές της Κίνας. Για την Ευρώπη η υπεράκτια αιολική ενέργεια εκτός από ουσιαστικό πρόγραμμα ανάπτυξης αποτελεί και έναν δεσμευτικό στόχο ώστε το 20% της τελικής καταναλισκόμενη ισχύος των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης να προέρχεται μόνο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η Κίνα από την πλευρά της έχει ως στόχο μέχρι τα τέλη του 2020 να παράγει 30 GW ηλεκτρικής ισχύος μόνο από τα παράκτια αιολικά πάρκα που θα είναι εγκατεστημένα στα ανοιχτά των ακτών της. Οι Ηνωμένες Πολιτείες, έχουν ένα εξαιρετικό αιολικό δυναμικό με πολλά έργα υπό κατασκευή αλλά με κανένα που να έχει τεθεί ήδη υπό λειτουργία.



Εικόνα 47: Υπεράκτιο αιολικό πάρκο στο Middelgrunden της Δανίας.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας είναι τα εξής:

- Η πηγή υπεράκτιας αιολικής ενέργειας είναι τόσο μεγάλη, δημιουργώντας έτσι περισσότερη ενέργεια από λιγότερες ανεμογεννήτριες.
- Οι περισσότερες από τις μεγαλύτερες πόλεις του κόσμου βρίσκονται κοντά σε ακτές, κάνοντας έτσι την υπεράκτια αιολική ενέργεια κατάλληλη για την ανάπτυξη της κοντά στα μεγάλα αστικά κέντρα ζήτησης, αποφεύγοντας έτσι την ανάγκη για μεγάλες και δαπανηρές γραμμές μεταφοράς.
- Κατασκευάζοντας υπεράκτια αιολικά πάρκα κοντά σε πυκνοκατοικημένες παράκτιες περιοχές με υψηλές τιμές ακινήτων, έχει σαν αποτέλεσμα την γρηγορότερη ανάπτυξη και στη ενδοχώρα όπου πολλές φορές από οικονομική άποψη είναι ασύμφορο και μερικές φορές οδηγεί στην αντίθεση της κοινωνικής γνώμης.

- Η υπεράκτια αιολική ενέργεια μπορεί να συμβάλει στη μείωση των εισαγωγών ενέργειας, μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και αερίων του θερμοκηπίου, εκτοπίζοντας τα ορυκτά καύσιμα από την παραγωγή ενέργειας.
- Δημιουργία νέων και πολλών θέσεων εργασίας, καθώς και τοπικών επιχειρηματικών ευκαιριών.

Παρά το γεγονός ότι η υπεράκτια αιολική ενέργεια αποτελεί τα τελευταία χρόνια τον πιο πολυσυζητημένο τομέα γύρω από την αιολική ενέργεια, σήμερα αντιστοιχεί σε λιγότερο από το 2% της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος. Για το 2011, εγκαταστάσεις αυτού του είδους αγγίζουν περίπου τα 1.000 MW και αντιπροσωπεύουν μόνο το 2,5% της ετήσιας αγοράς ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα. Ωστόσο μελέτες και προβλέψεις μας δείχνουν ότι μέχρι το 2020 η υπεράκτια αιολική ενέργεια θα αποτελεί το 10% της παγκόσμιας εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος, αλλά θα έχει μειωθεί και το κόστος κατασκευής τέτοιων αιολικών πάρκων, καθώς και θα έχουν μειωθεί, ίσως και εξαλειφθεί τα προβλήματα εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης που υφίστανται σήμερα. [61]

6.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αιολικής ενέργειας

Απορρέοντας από τον άνεμο, η αιολική ενέργεια είναι μια καθαρή πηγή ενέργειας. Η αιολική ενέργεια δεν μολύνει την ατμόσφαιρα όπως τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρισμού τα οποία στηρίζονται στην καύση ορυκτών καυσίμων, όπως άνθρακα, πετρέλαιο ή φυσικό αέριο. Οι ανεμογεννήτριες δεν εκλύουν χημικές ουσίες στο περιβάλλον οι οποίες προκαλούν όξινη βροχή ή αέρια του θερμοκηπίου. Ένα ακόμα πλεονέκτημα που έχει άμεση σχέση με τον Ελλαδικό χώρο είναι ότι οι ανεμογεννήτριες μπορούν να στηθούν σε αγροκτήματα, ωφελώντας έτσι την οικονομία των αγροτικών περιοχών όπου βρίσκονται οι περισσότερες από τις καλύτερες τοποθεσίες, από άποψη ανέμου. Επίσης, οι ιδιοκτήτες των εγκαταστάσεων για την παραγωγή αιολικής ενέργειας πληρώνουν ενοίκιο στους αγρότες για τη χρήση της γης. Η αιολική ενέργεια πλεονεκτεί έναντι των υπολοίπων πηγών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς θεωρείται μία από τις πιο οικονομικές. Η παραγόμενη κιλοβατώρα κοστίζει από 5 έως 10 cents και εξαρτάται από την ύπαρξη – παροχή ανέμου στην εκάστοτε περιοχή και από τη χρηματοδότηση ή μη του κάθε προγράμματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ισχυρότερη πρόκληση και κατ'έκταση μειονέκτημα στη χρησιμοποίηση του ανέμου ως πηγή ενέργειας είναι ότι ο άνεμος είναι περιοδικά διακοπτόμενος και δεν φυσάει πάντα όταν απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια. Η αιολική ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί εκτός αν χρησιμοποιηθούν μπαταρίες, όμως με την υπάρχουσα τεχνολογία το μέγεθος τους θα ήταν πολύ μεγάλο και το κόστος τους δυσθεώρητο. Επιπλέον, δεν μπορούν όλοι οι άνεμοι να τιθασευτούν ώστε να καλυφθούν τη στιγμή που προκύπτουν, οι ανάγκες σε ηλεκτρισμό. Ένα

ακόμα μειονέκτημα είναι πως τα κατάλληλα σημεία για αιολικά πάρκα συχνά βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές, μακριά από πόλεις που χρειάζεται ο ηλεκτρισμός.

Η ανάπτυξη της εκμετάλλευσης του ανέμου ως φυσικού πόρου μπορεί ίσως να συναγωνιστεί άλλες χρήσεις της γης και αυτές οι εναλλακτικές χρήσεις ίσως χαίρουν μεγαλύτερης εκτιμήσεως από ότι η παραγωγή ηλεκτρισμού. Η αιολική ενέργεια μέχρι και σήμερα μειονεκτεί στον τομέα του κόστους σε σχέση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας και αυτό εξαρτάται από το πόσο ενεργητική ως προς τον άνεμο είναι η τοποθεσία εγκατάστασης του αιολικού πάρκου. Παρότι το κόστος της αιολικής ενέργειας έχει μειωθεί δραματικά τα τελευταία δέκα χρόνια, η τεχνολογία απαιτεί μια αρχική επένδυση υψηλότερη από εκείνη των γεννητριών που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα.

Τέλος, αν και τα αιολικά πάρκα έχουν σχετικά μικρή επίπτωση στο περιβάλλον, υπάρχει ένας προβληματισμός για τον θόρυβο που παράγεται από τις λεπίδες του ηλεκτρικού κινητήρα (ρότορα), για την αισθητική (οπτική) επίπτωση και για τα πουλιά που έχουν σκοτωθεί μερικές φορές καθώς πετούσαν προς τους ηλεκτρικούς κινητήρες. Τα περισσότερα από αυτά τα προβλήματα έχουν επιλυθεί ή έχουν μειωθεί μέσω της τεχνολογικής ανάπτυξης ή μέσω της επιλογής κατάλληλων περιοχών για τη δημιουργία αιολικών πάρκων. Σε κάθε περίπτωση πριν τη δημιουργία ενός αιολικού πάρκου ή και οποιασδήποτε εγκατάστασης Α.Π.Ε. θα πρέπει να έχει προηγηθεί *Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων*. [60] [61] [62] [63] [64] [65]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

7.1 Εισαγωγή

Οι ανεμογεννήτριες είναι μηχανές που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική, μια διαδικασία που έγινε γνωστή ως αιολική ενέργεια. Εάν η μηχανική ενέργεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η συσκευή μετατροπής μπορεί να ονομάζεται ανεμογεννήτρια ή αιολικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής. Εάν η μηχανική ενέργεια χρησιμοποιείται για την οδήγηση μηχανημάτων, όπως για το άλεσμα σιτηρών ή την άντληση νερού, η συσκευή ονομάζεται ανεμόμυλος ή αντλία νερού αντίστοιχα. Ομοίως, όταν χρησιμοποιείται για τη φόρτιση μπαταριών μπορεί να ονομαστεί φορτιστής ανέμου (*wind charger*).

Μετά από μία χιλιετία ανάπτυξης του ανεμόμυλου αλλά και της σύγχρονης τεχνολογίας, σήμερα κατασκευάζεται ένα ευρύ φάσμα ανεμογεννητριών κάθετου και οριζόντιου άξονα. Οι μικρότερες από τις ανεμογεννήτριες που υπάρχουν στην αγορά σήμερα, χρησιμοποιούνται για εφαρμογές όπως η φόρτιση μπαταριών και παραγωγή βοηθητικής ισχύος σε πλοία. Ωστόσο οι μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες αποτελούν συστοιχίες πολλών διασυνδεδεμένων ανεμογεννητριών, συνήθως αναφέρονται ως αιολικά πάρκα, και γίνονται ολοένα η πιο σημαντική πηγή αιολικής ενέργειας και κατ' επέκταση της εμπορικά εκμεταλλεύσιμης ηλεκτρικής παραγωγής. [66]

7.2 Ιστορική αναδρομή

Ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν από το 200π.Χ. στην περιοχή της Περσίας (σημερινό Ιράν) για το άλεσμα των σιτηρών. Η αιολόσφαιρα του Ήρωνα της Αλεξάνδρειας σηματοδοτεί ένα από τα πρώτα στην ιστορία γνωστά παραδείγματα όπου ο άνεμος τροφοδοτεί μια μηχανή. Ωστόσο, η πρώτη γνωστή πρακτικά χρήσιμοι ανεμόμυλοι χτίστηκαν στο Σιστάν, μια περιοχή μεταξύ του Αφγανιστάν και του Ιράν, από τον 7^ο αιώνα. Ήταν ανεμόμυλοι κάθετου άξονα, κατασκευασμένοι από μεγάλα κάθετα ημιαξόνια με ορθογώνιες λεπίδες και είχαν από 6 έως 12 πανιά που καλύπτονταν από ψάθες ή ύφασμα. Αυτού του είδους οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν για το άλεσμα σιτηρών και στην βιομηχανία ζαχαροκάλαμου εκείνης της εποχής. [76] Ανεμόμυλοι εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στην Ευρώπη κατά την διάρκεια του Μεσαίωνα. Τα ιστορικά στοιχεία αναφέρουν πως κατά τον 11^ο και 12^ο αιώνα εμφανίστηκαν οι πρώτοι ανεμόμυλοι στην Αγγλία, ενώ από τον 14^ο αιώνα έχουμε την χρησιμοποίηση ανεμόμυλων στην Ολλανδία για την αποστράγγιση περιοχών του δέλτα του Ρήνου. Ακόμα και στην περιοχή της Συρίας υπήρχαν ανεμόμυλοι, για την ύπαρξη των οποίων γνωρίζουμε από χειρόγραφα Γερμανών Σταυροφόρων που έμαθαν να τους χρησιμοποιούν κατά την παραμονή τους στα εδάφη της Συρίας, περίπου το 1190 μ.Χ. [77]

Η πρώτη ανεμογεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ήταν μια μηχανή που χρησιμοποιήθηκε για την φόρτιση μπαταριών, ώστε να παρέχει φωτισμό στην εξόχικη κατοικία του Σκωτσέζου ακαδημαϊκού James Blyth, ο οποίος και την εγκατέστησε τον Ιούλιο του 1887. Μερικούς μήνες αργότερα ο Αμερικανός εφευρέτης Charles Brush, κατασκεύασε το πρώτο σύστημα αυτόματης λειτουργίας ανεμογεννήτριας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στο Κλίβελαντ του Οχάιο. Ήταν μια ανεμογεννήτρια ύψους 18 μέτρων που ζύγιζε 4 τόνους και τροφοδοτούσε μια γεννήτρια 12kW.

Στη Δανία, το 1900 υπήρχαν περίπου 2.500 ανεμόμυλοι για μηχανικά φορτία, όπως αντλίες και ελαιοτριβεία, όπου η συνδιασμένη υπολογισμένη μέγιστη ισχύς άγγιζε τα 30 MW. Οι μεγαλύτερες μηχανές στηρίζονταν σε πύργους ύψους 24 μέτρων και η διάμετρος των φτερωτών έφταναν τα 23 μέτρα. Μέχρι το 1908 στις Ηνωμένες Πολιτείες λειτουργούσαν περίπου 72 ηλεκτρικές γεννήτριες τις οποίες οδηγούσαν ανεμογεννήτριες και κυμαίνονταν από 5 kW έως 25 kW. Από τη δεκαετία του 1930, η εμφάνιση ανεμογεννητριών για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ήταν κοινή σε αγροκτήματα, κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες, όπου τα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας δεν είχαν εγκατασταθεί ακόμη. Σε αυτή τη χρονική περίοδο, ο χάλυβας υψηλής αντοχής ήταν φθηνός και οι γεννήτριες άρχισαν να τοποθετούνται στην κορυφή προκατασκευασμένων ανοιχτού πλέγματος χάλυβα πύργων.

Ένας πρόδρομος των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα είναι αυτή που κατασκευάστηκε στην Γιάλτα, ΕΣΣΔ το 1931. Ήταν μια γεννήτρια ισχύος 100 kW τοποθετημένη σε έναν πύργο ύψους 30 μέτρων, που συνδεόταν απ'ευθείας με το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας των 6,3 kV. Έχει γίνει αναφορά πως η ετήσια δυναμικότητα αυτής της ανεμογεννήτριας έφθανε έως και το 32% , κάτι που την κάνει να μην διαφέρει πολύ από την απόδοση των μεταγενέστερων ανεμογεννητριών. [78] Το φθινόπωρο του 1941 η πρώτη ανεμογεννήτρια κλάσης μεγκαβάτ (MW) συγχρονίστηκε με το ηλεκτρικό δίκτυο στο Βερμόντ. Η Smith – Putnam ανεμογεννήτρια λειτούργησε μόνο για 1.100 ώρες πριν υποστεί μια κρίσιμη βλάβη και λόγω του πολέμου και της έλλειψης ανταλλακτικών και υλικών δεν επισκευάστηκε. Στο Ηνωμένο Βασίλειο, η πρώτη ανεμογεννήτρια που συνδέθηκε στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας κατασκευάστηκε από τον John Brown & Company το 1951 στις Νήσους Orkney. [79]

Σήμερα, υπάρχουν πολλές εταιρείες που ασχολούνται με την μελέτη και κατασκευή ανεμογεννητριών με σημαντικότερες τις *General Electric*, *Siemens Windpower*, *Enercon*, *Suzlon*, *Sinovel*, *Nordex*, *Goldwind* και *Gamesa*. Οι περισσότερες από αυτές εδρεύουν στον Ευρωπαϊκό χώρο όμως τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερο έδαφος κερδίζουν εταιρείες από την Κίνα και την Ινδία, καθώς η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτές της χώρες αυξάνεται συνεχώς. Ωστόσο, η εταιρεία που κατέχει την πρώτη θέση στο χώρο των ανεμογεννητριών και αποτελεί τον μεγαλύτερο κατασκευαστή παγκοσμίως είναι η Δανική *Vestas*.

7.3 Τεχνολογία ανεμογεννητριών

Τα σύγχρονα συστήματα εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας αφορούν σχεδόν αποκλειστικά μηχανές που μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική και ονομάζονται ανεμογεννήτριες. Υπάρχουν πολλών ειδών ανεμογεννήτριες οι οποίες με βάση τα σχεδιαστικά τους κριτήρια και την διαμόρφωση του ηλεκτρικού τους εξοπλισμού διαχωρίζονται σε επιμέρους κατηγορίες και διαφορετικούς τύπους.

7.3.1 Τύποι ανεμογεννητριών

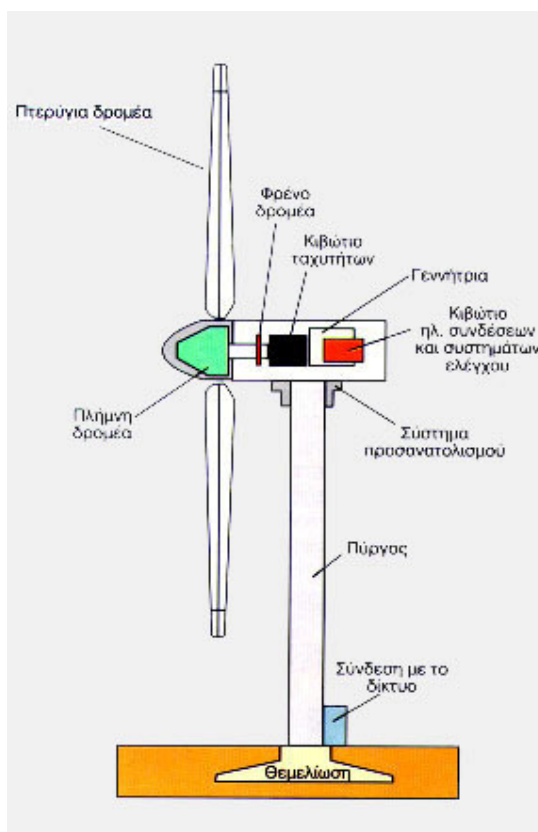
Υπάρχουν πολλών ειδών ανεμογεννήτριες, οι οποίες κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- *Τις ανεμογεννήτριες με οριζόντιο άξονα*, των οποίων ο δρομέας είναι τύπου έλικας και στις οποίες ο άξονας μπορεί να περιστρέφεται ώστε να βρίσκεται συνεχώς παράλληλα προς τον άνεμο.
- *Τις ανεμογεννήτριες με κατακόρυφο άξονα*, ο οποίος και παραμένει σταθερός. [58]

7.3.1.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWT), έχουν τον κύριο ρότορα της ατράκτου και την ηλεκτρική γεννήτρια στην κορυφή του πύργου, και πρέπει να σημαδεύουν προς την κατεύθυνση που φυσάει ο άνεμος. Οι μικρές ανεμογεννήτριες αλλάζουν κατεύθυνση με τη βοήθεια ενός μικρού ανεμοδείκτη, ενώ οι μεγάλες χρησιμοποιούν έναν αισθητήρα ανέμου σε συνδιασμό με ένα σερβοκινητήρα. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες έχουν ένα κιβώτιο ταχυτήτων, το οποίο περιστρέφει την αργή κίνηση των λεπίδων σε μια ταχύτερη περιστροφή που είναι καταλληλότερη για να οδηγήσει μια ηλεκτρική γεννήτρια. [80]

Οι συνιστώσες μιας τυπικής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 48: Επιμέρους τμήματα ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.

Γενικά μια ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα αποτελείται από τα παρακάτω δομικά στοιχεία:

- Το δρομέα, με δύο ή τρία πτερύγια συνήθως, πολύ σπάνια και με ένα, τα οποία κατασκευάζονται από ενισχυμένο πολυεστέρα. Τα πτερύγια προσδένονται πάνω σε πλήμνη, είτε σταθερά είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από τον διαμήκη άξονα τους, μεταβάλλοντας το βήμα της πτερύγωσης.
- Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, αποτελούμενο από τον κύριο άξονα, τα έδρανά του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή κατά την κανονική λειτουργία της μηχανής.
- Την ηλεκτρογεννήτρια, σύγχρονη ή επαγωγική, με 4 ή 6 πόλους, η οποία συνδέεται με την έξοδο του κιβωτίου πολλαπλασιασμού στροφών μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου.

- Το σύστημα πέδης, το οποίο είναι ένα συνηθισμένο δισκόφρενο που τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας.
- Το σύστημα προσανατολισμού, το οποίο αναγκάζει συνεχώς τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου.
- Τον πύργο, πάνω στον οποίο εδράζεται όλη η ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση. Ο πύργος είναι συνήθως μεταλλικός, σωληνωτός ή δικτυωτός και, σπανίως, από οπλισμένο σκυρόδεμα, ενώ το ύψος του είναι τέτοιο, ώστε ο δρομέας να δέχεται την αδιατάρακτη από το έδαφος ροή του ανέμου.
- Τον ηλεκτρονικό πίνακα και τον πίνακα ελέγχου, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στη βάση του πύργου. Το σύστημα ελέγχου ρυθμίζει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας. [58]

Δεδομένου ότι πίσω από τον πύργο δημιουργούνται αναταράξεις από τον άνεμο (turbulence), η τουρμπίνα τοποθετείται προσήνεμα της υποστήριξης του πύργου. Τα πτερύγια της τουρμπίνας γίνονται δύσκαμπτα ώστε να εμποδίζουν τις λεπίδες να ωθούνται προς τον πύργο στις περιπτώσεις ισχυρών ανέμων. Επιπροσθέτως οι λεπίδες τοποθετούνται σε μία σημαντική απόσταση μπροστά από τον πύργο και έχουν, έως ένα μικρό ποσοστό, κλίση προς τα εμπρός (προς τον άνεμο).

Οι προσήνεμες (downwind) μηχανές κατασκευάζονται παρά το πρόβλημα των αναταράξεων, επειδή δεν χρειάζεται πρόσθετο μηχανισμό για τη διατήρησή τους σύμφωνα με τον άνεμο και επειδή σε ισχυρούς ανέμους μπορεί να επιτραπεί η μικρή κάμψη των λεπίδων, κάτι που μειώνει την περιοχή που σαρώνουν και την αντίσταση τους απέναντι στον αέρα. Δεδομένου ότι η κυκλική αναταραχή (η οποία είναι επαναλαμβανόμενη) μπορεί να οδηγήσει σε ‘αποτυχία κόπωσης’ (fatigue failure) οι περισσότερες ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWT’s) είναι προσήνεμα σχεδιασμένες.



Εικόνα 49: Εγκατάσταση Α/Γ οριζόντιου άξονα της εταιρείας Vestas στην Κρήτη.

Οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται σε αιολικά πάρκα για την εμπορική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνήθως τριών πτερυγίων και προσανατολίζονται προς τη διεύθυνση του αέρα με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστικών συστημάτων και σερβομηχανισμών. Αυτές οι ανεμογεννήτριες παρουσιάζουν υψηλές ταχύτητες ακροπτερυγίου, άνω των 320 km/h, υψηλή απόδοση και χαμηλή κυμάτωση της ροπής, χαρακτηριστικά που συμβάλλουν στην υψηλή αξιοπιστία. [80]

Οι λεπίδες είναι συνήθως βαμμένες σε λευκό χρώμα, ώστε να γίνονται εύκολα ορατές από αεροσκάφη και το μήκος τους κυμαίνεται από 20 – 40 μέτρα. Το ύψος των σωληνοειδών χαλύβδινων πύργων κυμαίνεται από 60 – 90 μέτρα. Συνήθως τα πτερύγια έχουν τη δυνατότητα να περιστρέφονται από 10 – 22 φορές το λεπτό, οπότε στη θεωρητικά μέγιστη λειτουργία των 22 περιστροφών η ταχύτητα υπερβαίνει τα 90 m/s. Ένα κιβώτιο ταχυτήτων χρησιμοποιείται συνήθως για την επιτάχυνση της ταχύτητας της γεννήτριας, μολονότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια δακτυλιοειδής γεννήτρια άμεσης κίνησης. Κάποια μοντέλα λειτουργούν σε σταθερή ταχύτητα, αλλά περισσότερη ενέργεια μπορεί να συλλέγεται από μεταβλητής ταχύτητας ανεμογεννήτριες, που χρησιμοποιούν ένα μετατροπέα ρεύματος στερεάς κατάστασης (solid – state power converter) για τη διασύνδεση με το δίκτυο

μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Όλες οι ανεμογεννήτριες φέρουν συστήματα προστασίας για την αποφυγή ζημιών στις υψηλές ταχύτητες, όπως αλλαγή της γωνίας των πτερυγίων έναντι του ανέμου που τείνει να τις περιστρέψει και επιπρόσθετα την εφαρμογή φρένου. [81]

7.3.1.2 Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα (VAWT) έχουν τον κύριο άξονα του ρότορα κάθετα τοποθετημένο. Βασικό πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι πως ο στρόβιλος δεν χρειάζεται να τοποθετηθεί κατά τη φορά του ανέμου για να είναι αποτελεσματικός, κάτι που θεωρείται πολύ χρήσιμο σε χώρους και περιοχές όπου η κατεύθυνση του ανέμου είναι μεταβλητή. Επίσης, σημαντικό πλεονέκτημα είναι πως η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων μπορεί να τοποθετηθεί κοντά στο έδαφος, κάνοντας έτσι την προσβασιμότητα και την συντήρηση πολύ ευκολότερη.

Το βασικό μειονέκτημα αυτής της κατηγορίας ανεμογεννητριών είναι η χαμηλή ταχύτητα περιστροφής που οδηγεί σε υψηλότερη ροπή και επομένως υψηλότερο κόστος του συστήματος κίνησης, τον χαμηλότερο συντελεστή ισχύος, την 360° μοιρών περιστροφή της αεροτομής εντός της ροής του ανέμου κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου και επομένως την εξαιρετικά μεγάλη δυναμικά φόρτωση για την λεπίδα. Σημαντικά μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών κάθετου άξονα είναι επίσης η παλλόμενη ροπή που παράγεται από ορισμένα στοιχεία του ρότορα και προσπίπτει πάνω στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης, η δυσκολία στη μοντελοποίηση με ακρίβεια της ροής του αέρα και ως εκ τούτου, τις προκλήσεις για την ανάλυση και το σχεδιασμό του δρομέα πριν από την κατασκευή ενός πρωτοτύπου.

Ένας άλλος τύπος κάθετου άξονα είναι ο 'Παράλληλος στρόβυλος' που είναι παρόμοιος με αυτόν του φυγοκεντρικού ανεμιστήρα που χρησιμοποιεί την επίδραση του εδάφους για να περιστραφεί. Οι τουρμπίνες κάθετου άξονα αυτού του τύπου έχουν δοκιμαστεί για πολλά χρόνια και μία μεγάλη μονάδα παραγωγής 10 kW κατασκευάστηκε στο Ισραήλ, από τον πρωτοπόρο στον τομέα της αιολικής ενέργειας Bruce Brill το 1980. Μετά από σχετική έκθεση του Δρ. Moshe Dan Hirsch, το Ισραηλινό τμήμα ενέργειας αποφάσισε να χρηματοδοτήσει και να υποστηρίξει την προσπάθεια για κατασκευή ανεμογεννητριών κάθετου άξονα για τα επόμενα 20 χρόνια. [82]

Ανεμογεννήτριες τύπου κάθετου άξονα συναντώνται στις εξής τρεις βασικές κατηγορίες:

1. Ανεμογεννήτριες Darrieus

Οι ανεμογεννήτριες τύπου *Darrieus* ή *Eggbeater*, πήραν το όνομα τους από τον Γάλλο εφευρέτη George Darrieus. Έχουν καλή απόδοση αλλά παράγουν μεγάλη κυμάτωση της ροπής και κυκλική πίεση στον πύργο, η οποία συμβάλλει στη μειωμένη αξιοπιστία της. Απαιτούν επίσης κάποια εξωτερική πηγή ισχύος ή ένα πρόσθετο δρομέα Savonius ώστε να αρχίσει η περιστροφή, επειδή η ροπή εκκίνησης είναι πολύ χαμηλή. Η κυμάτωση της ροπής μπορεί να αντιμετωπιστεί με την αύξηση του αριθμού των λεπίδων σε τρεις ή τέσσερις, κάτι

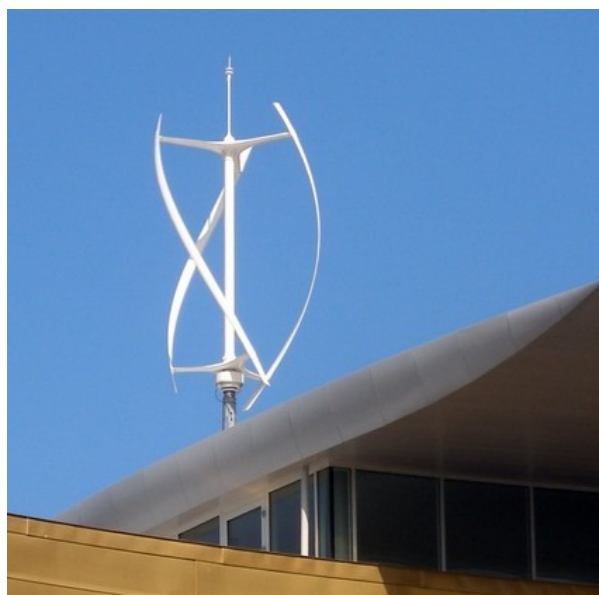
που οδηγεί και σε μεγαλύτερη στερεότητα του ρότορα. Η στερεότητα του ρότορα μπορεί να μετρηθεί διαιρώντας την επιφάνεια του έλικα προς την επιφάνεια του δρομέα. Οι νεότερες ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus που κατασκευάζονται δεν συγκρατούνται από διάφορους τύπους καλωδίων αλλά από μια εξωτερική ειδική κατασκευή που καταλήγει στην κορυφή της ανωδομής.



Εικόνα 50: Σύγχρονη ανεμογεννήτρια τύπου Darrieus.

2. Ανεμογεννήτριες Giromill

Ένας τύπος ανεμογεννητριών παρόμοιος με τις τύπου Darrieus είναι οι Giromill, οι οποίες φέρουν ίσιες λεπίδες αντί για καμπυλωτές. Στα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους είναι το μεταβλητό βήμα, που βοηθάει στη μείωση της παλλόμενης ροπής και της αυτόματης εκκίνησης. Τα πλεονεκτήματα του μεταβλητού βήματος είναι η υψηλή ροπή εκκίνησης, ο υψηλότερος συντελεστής απόδοσης, η αποτελεσματικότερη λειτουργία σε θυελλώδεις ανέμους και μία μικρότερη αναλογία ταχύτητας λεπίδας, που μειώνει τις δυνάμεις κάμψης και καταπόνησης της. Οι λεπίδες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν έχουν σχήμα ευθείας, καμπύλης ή σχεδιασμού τύπου V.



Εικόνα 51: Ανεμογεννήτρια τύπου Giromill.

3. Ανεμογεννήτρια Savonius

Οι ανεμογεννήτριες τύπου Savonius φέρουν δύο ή περισσότερες ‘μπάλες’ σαν αυτές που χρησιμοποιούνται στα ανεμόμετρα, σε αεραγωγούς τύπου Flettner και σε ορισμένες υψηλής απόδοσης χαμηλής ισχύος ανεμογεννήτριες. Είναι πάντα αυτο-εκκινούμενες αν έχουν τουλάχιστον τρεις ‘μπάλες’. Τα τελευταία χρόνια κατασκευάζονται και ανεμογεννήτριες τύπου ‘Twisted Savonius’ με μεγάλες ελικοειδής ‘μπάλες’ για την παροχή ομαλής ροπής και έχουν βρει εφαρμογή σε εγκαταστάσεις πλοίων.



Εικόνα 52: Ανεμογεννήτρια τύπου Savonius.

Σήμερα στην παγκόσμια αγορά ηλεκτρικής ενέργειας έχουν επικρατήσει οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, καθώς συνδιάζουν ένα σύνολο πλεονεκτημάτων που τις κάνουν ανταγωνιστικότερες έναντι αυτών με κατακόρυφο άξονα λειτουργίας. [83]

7.3.2 Σχεδιαστικά κριτήρια της τεχνολογίας ανεμογεννητριών

Από το 1990 μέχρι σήμερα τα σχεδιαστικά κριτήρια της τεχνολογίας ανεμογεννητριών έχουν αλλάξει, καθώς περάσαμε από την περιοχή της συμβατικής στην περιοχή της βέλτιστης λειτουργίας. Εκτός από την αύξηση στο μέγεθος των ανεμογεννητριών οι τεχνολογικές διαμορφώσεις έχουν εξελιχθεί από το στάδιο των σταθερών στροφών ελέγχου *stall* με κιβώτιο ταχυτήτων, σε μεταβλητών στροφών με έλεγχο γωνίας βήματος πτερυγίων με ή χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων. Παρά τις διαφοροποιήσεις που υπεισέρχονται στους διάφορους τύπους ανεμογεννητριών αλλά και κατά την εξέλιξη κάθε τύπου, μπορούν να επισημανθούν τα παρακάτω συστατικά μέρη μιάς τυπικής σύγχρονης ανεμογεννήτριας: [59]

Μηχανικά & αεροδυναμικά μέρη	Ηλεκτρικά μέρη	Σύστημα ελέγχου	
Δρομέας ανεμογεννήτριας	Τύποι γεννήτριας: <ul style="list-style-type: none"> • Ασύγχρονη τύπου κλωβού • Ασύγχρονη τυλιγμένου δρομέα • Ασύγχρονη τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης • Σύγχρονη μόνιμων πόλων • Σύγχρονη ηλεκτρικής διέγερσης 	Σύστημα ελέγχου μετατροπέα	
Πύργος στήριξης			
Κιβώτιο ταχυτήτων			
Μηχανισμός αλλαγής γωνίας βήματος πτερυγίων			Σύστημα ελέγχου γωνίας βήματος πτερυγίων
Άξονας μετάδοσης κίνησης			Ηλεκτρονικά Ισχύος: <ul style="list-style-type: none"> • Συστήμα εκκίνησης • Συστοιχία πυκνωτών • Στατός αντισταθμιστής άεργου ισχύος • Μετατροπέας συχνότητας
Πέδηση έκτακτης ανάγκης			
	Σύστημα προστασίας		
	Μετασχηματιστής		
	Αγωγοί		

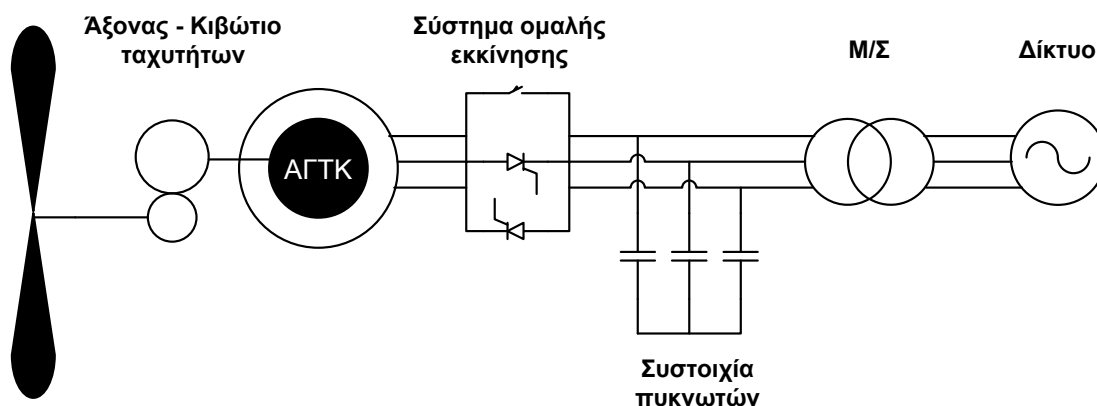
Πίνακας 8: Σχεδιαστικά κριτήρια και επιμέρους μέρη των ανεμογεννητριών.

7.3.3 Τυπικές διαμορφώσεις ηλεκτρικού μέρους ανεμογεννήτριας

Η πλειοψηφία των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών εμφανίζεται με τέσσερις διαφορετικές τεχνολογικές διαμορφώσεις συστημάτων μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική και είναι οι εξής:

1. Ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού – Τύπου Α

Η ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού αποτελεί τον πλέον συμβατικό τύπο ανεμογεννήτριας. Ένας δρομέας με stall ή active stall έλεγχο αεροδυναμικής ισχύος συνδέεται μέσω κιβωτίου ταχυτήτων σε ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού (Α.Γ.Τ.Κ.), η οποία συνδέεται μέσω μετασχηματιστή (Μ/Σ) στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Μια συστοιχία πυκνωτών παρέχει την αναγκαία αντιστάθμιση αέργου ισχύος, ενώ η βελτιωμένη συμβατότητα με το δίκτυο επιτυγχάνεται μέσω ενός εκκινήτη ομαλής εκκίνησης (soft starter).



Εικόνα 53: Σχεδιαστική απεικόνιση Α/Γ σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού (Τύπου Α).

Η συγκεκριμένη γεννήτρια, όντας απ' ευθείας και χωρίς τη μεσολάβηση μετατροπέα συδεδεμένη στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργεί σε σταθερές στροφές. Η ολίσθηση βέβαια επιτρέπει μικρές διακυμάνσεις στην ταχύτητα που ομαλοποιούν τη χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας. Συντά, με στόχο την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, η γεννήτρια είναι εφοδιασμένη με δύο ομάδες τυλιγμάτων. Το ένα χρησιμοποιείται κατά τις χαμηλές ταχύτητες ανέμου (συνήθως 8 ζεύγη πόλων) και το άλλο για μέτριες και υψηλές ταχύτητες ανέμου (4 ή 6 ζεύγη πόλων).

Η συγκεκριμένη διαμόρφωση ανεμογεννήτριας διακρίνεται για την απλή σχεδίαση, το χαμηλό κόστος, την αξιοπιστία λειτουργίας και την ανθεκτικότητα. Ωστόσο, έχει περιορισμένη ελεγχιμότητα, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου μεταφράζονται σε διακυμάνσεις της μηχανικής ροπής και περαιτέρω της ηλεκτρικής ισχύος που αποδίδεται στο δίκτυο. Αυτές ενδέχεται να προκαλέσουν αντίστοιχες μεταβολές στην τάση στο σημείο σύνδεσης στο δίκτυο σε περίπτωση ασθενούς δικτύου.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η απορρόφηση άεργου ισχύος από την ασύγχρονη γεννήτρια να είναι κυμαινόμενη, αυξάνοντας έτσι τις απώλειες γραμμών και τις μεταβολές στην τάση.

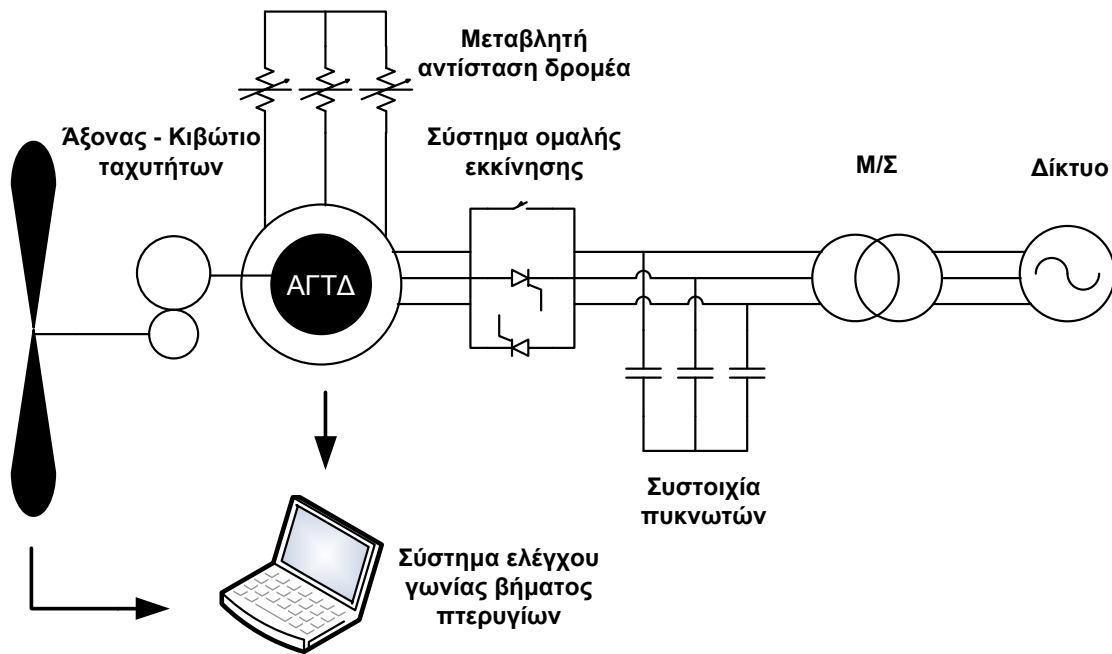
Βασικά μειονεκτήματα είναι τα εξής:

- Δεν υποστηρίζει έλεγχο ταχύτητας, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει μειωμένη ενεργειακή απόδοση.
- Δεν συμβάλλει στις ρυθμίσεις δικτύου που απαιτούν οι νέες κώδικες δικτύου, έχει μη ελεγχόμενη κατανάλωση άεργου ισχύος και μειωμένο έλεγχο ποιότητας ισχύος.
- Απαιτείται ενισχυμένη στήριξη των μηχανικών μερών της ανεμογεννήτριας για την αποφυγή καταπονήσεων σε περιπτώσεις ρυπών ανέμων.

Ο αεροδυναμικός έλεγχος γίνεται με τη χρήση του stall ή active stall. Για ανεμογεννήτριες ισχύος μικρότερης ή ίσης με 1 MW ακολουθείται η στρατηγική stall, ενώ σε μεγαλύτερες η λογική του active stall είναι προτιμητέα, ώστε να γίνεται ρύθμιση της γωνίας βήματος πτερυγίων για την αποφυγή εκτεταμένης καταπόνησης των μηχανικών υποσυστημάτων της ανεμογεννήτριας.

2. Ανεμογεννήτρια περιορισμένης λειτουργίας μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα μεταβλητής αντίστασης δρομέα – Τύπου Β

Ο συγκεκριμένος τύπος ανεμογεννήτριας είναι ίδιος με αυτόν που μελετήσαμε παραπάνω. Έκανε την εμφάνιση της το 1990 από την εταιρεία *Vestas Wind Systems* με την ονομασία *Optislip* με τη μόνη διαφορά σε σχέση με το προηγούμε μοντέλο ανεμογεννήτριας, ότι χρησιμοποιεί μια ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα (Α.Γ.Τ.Δ.) με εξωτερική ρυθμιζόμενη αντίσταση δρομέα, που επιτρέπει τη περιορισμένη λειτουργία μεταβλητών στροφών σε εύρος 0 έως 10% πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα.



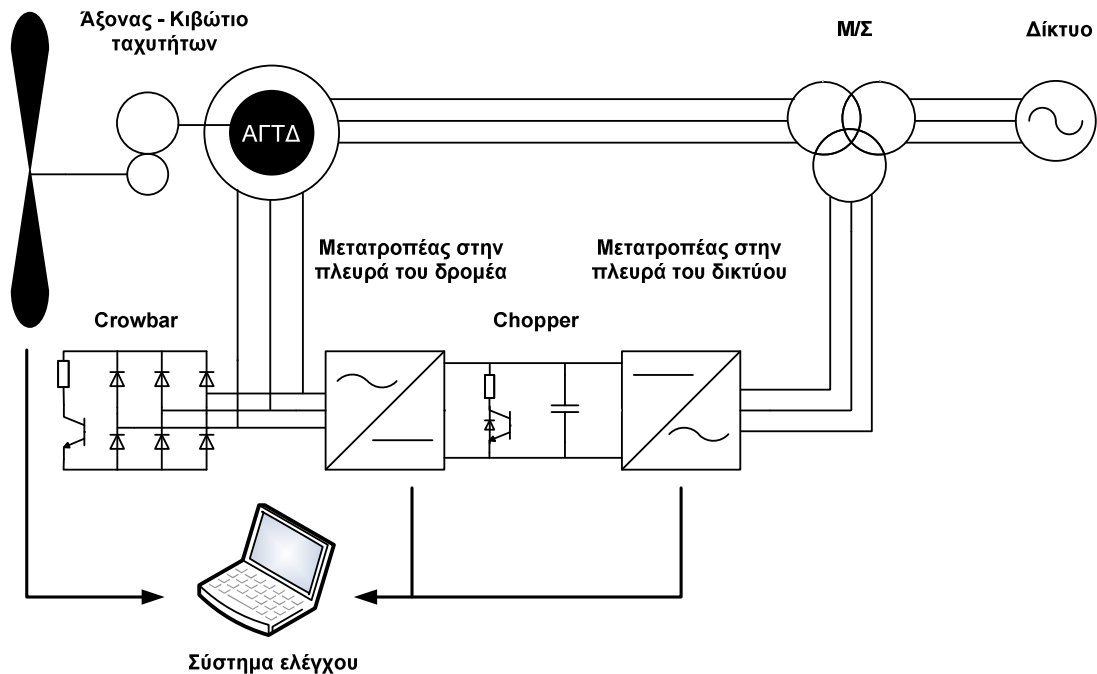
Εικόνα 54: Σχεδιαστική απεικόνιση Α/Γ περιορισμένης λειτουργίας μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα μεταβλητής αντίστασης δρομέα (Τύπου Β).

Η ρύθμιση των εξωτερικών αντιστάσεων γίνεται είτε μέσω ενός οπτικά ελεγχόμενου μετατροπέα που είναι τοποθετημένος στο δρομέα της γεννήτριας, είτε μέσω παθητικών στοιχείων. Αυτή η οπτική σύνδεση αναιρεί την ανάγκη για ακριβή δαχτυλίδια ολίσθησης (slip rings) που απαιτούν συντήρηση. Επίσης, οι απαιτήσεις σε άεργο ισχύ ικανοποιούνται από τη συστοιχία πυκνωτών αντιστάθμισης στον τερματικό ζυγό. Τέλος, σε αυτόν τον τύπο ανεμογεννήτριας εφαρμόζεται συνήθως, ο έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων για τον περιορισμό της αεροδυναμικής ισχύος σε ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής.

3. Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης και σύστημα μετατροπών ισχύος συνδεδεμένων στο δρομέα – Τύπου Γ

Δρομέας με έλεγχο γωνίας βήματος πτερυγίων, συνδεδεμένος μέσω κιβωτίου ταχυτήτων σε ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα (Α.Γ.Τ.Δ) με μετατροπέα συχνότητας μερικής ισχύος αποτελεί τη βασική διαμόρφωση αυτής της κατηγορίας ανεμογεννητριών.

Ο μετατροπέας σχεδιάζεται έτσι ώστε να μεταφέρει μόνο την ισχύ του δρομέα προς το δίκτυο, δηλαδή με ονομαστική ισχύ περίπου 30% της ονομαστικής ισχύος της γεννήτριας, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει τον έλεγχο και την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος καθώς και την ομαλή διασύνδεση στο δίκτυο.



Εικόνα 55: Σχεδιαστική απεικόνιση Α/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης & σύστημα μετατροπών ισχύος συνδεδεμένων στο δρομέα (Τύπου Γ).

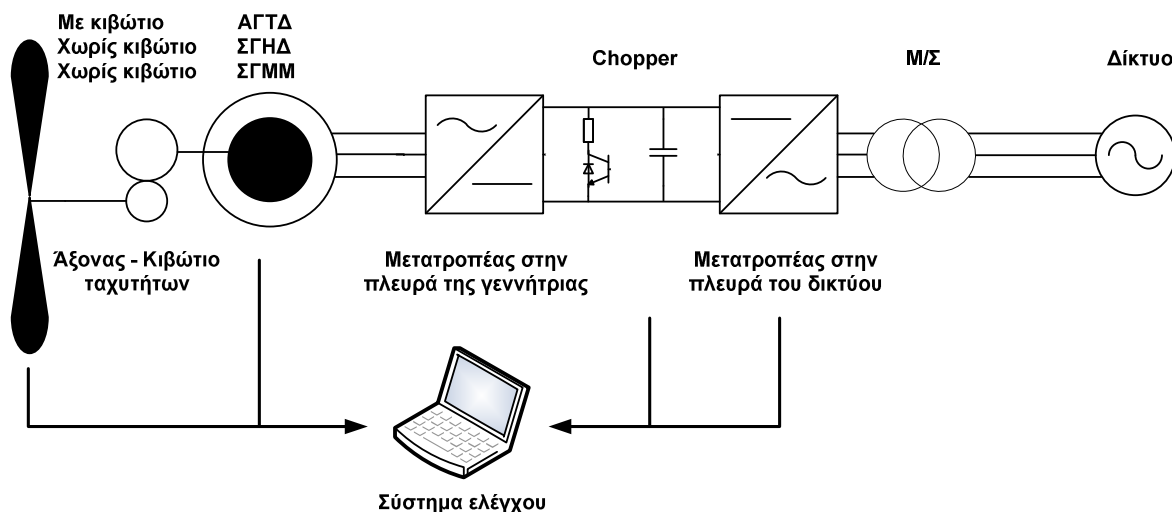
Το ευρύ φάσμα ταχυτήτων ανέμου στο οποίο η ενεργειακή απόδοση της ανεμογεννήτριας μεγιστοποιείται, αυξάνει σημαντικά την ενεργειακή απόδοση της διάταξης, γεγονός που αποτελεί και το βασικό πλεονέκτημα σε σχέση με τους δύο προηγούμενους τύπους που παρουσιάσαμε.

Σημαντικά πλεονεκτήματα αυτού του τύπου ανεμογεννήτριας είναι, πρώτον πως η ροπή διατηρείται σχεδόν σταθερή παρά τις μεταβολές της έντασης του ανέμου και έτσι μειώνονται οι μηχανικές καταπονήσεις. Δεύτερον, σε χαμηλές ταχύτητες στρέψης έχει μειωθεί αισθητά ο ακουστικός θόρυβος από τα στρεφόμενα πτερύγια. Τρίτον, έχουμε βελτιωμένη ποιότητα ισχύος, δηλαδή μικρότερες διακυμάνσεις τάσης, εξάλειψη αρμονικών χαμηλής τάξης και μικρότερα ρεύματα (εκκίνησης και βραχυκύκλωσης). Τέλος είναι εξοπλισμένες, με πλήθος λειτουργιών και παραμέτρων ώστε να εμφανίζουν ταχεία απόκριση τόσο σε μεταβατικά όσο και σε δυναμικά φαινόμενα που μπορούν να παρουσιαστούν στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και την εξασφάλιση ευστάθειας στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.

4. Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα ισχύος – Τύπου Δ

Στη διαμόρφωση αυτού του τύπου ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, ο δρομέας με έλεγχο γωνίας βήματος πτερυγίων συνδέεται με ασύγχρονη ή σύγχρονη γεννήτρια γεννήτρια μέσω κιβωτίου ταχυτήτων ή όχι αντίστοιχα και πλήρη μετατροπέα ισχύος που συνδέεται στο δίκτυο. Ο πλήρης μετατροπέας που ελέγχει την άεργο ισχύ και την ομαλή διασύνδεση στο

δίκτυο, επιτρέπει λειτουργία μεταβλητών στροφών σε όλο το εύρος ταχύτητας της γεννήτριας.



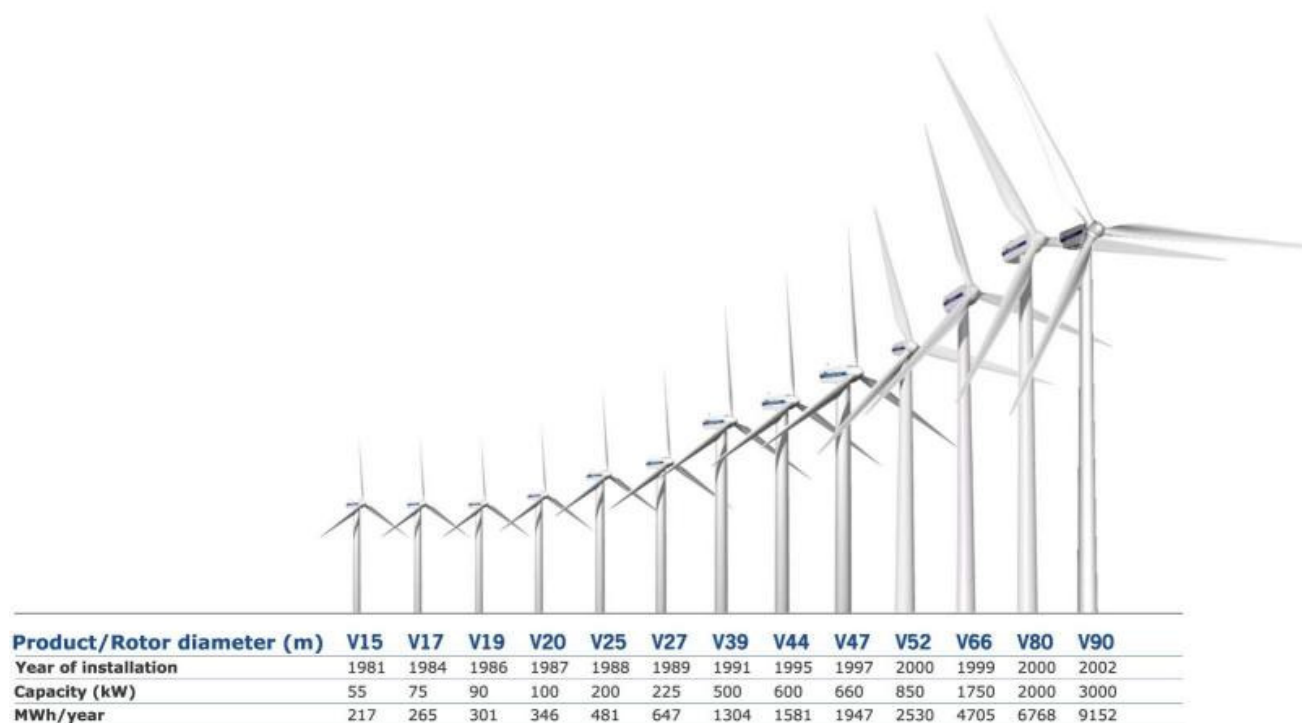
Εικόνα 56: Σχεδιαστική απεικόνιση Α/Γ μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπή ισχύος (Τύπου Δ).

Οι διαφοροποιήσεις της διαμόρφωσης αυτής καθορίζονται από το είδος της γεννήτριας που χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση ασύγχρονης γεννήτριας τυλιγμένου δρομέα (Α.Γ.Τ.Δ.) παρεμβάλλεται κιβώτιο ταχυτήτων στον άξονα μετάδοσης της κίνησης από το δρομέα στη γεννήτρια. Στη διαμόρφωση που χρησιμοποιεί πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών (Σ.Γ.Μ.Μ.), είτε ηλεκτρικής διέγερσης (Σ.Γ.Η.Δ.), το κιβώτιο μπορεί να παραληφθεί καθώς η γεννήτρια στρέφεται σε χαμηλές στροφές, όπως και ο δρομέας της ανεμογεννήτριας. Ο μετατροπέας συνεχούς τάσης που εμφανίζεται στο παραπάνω σχήμα, αναφέρεται στην περίπτωση της (Σ.Γ.Η.Δ.), όπου η γεννήτρια συνδέεται με ανορθωτή διόδων. Στις δύο άλλες περιπτώσεις, αυτή της (Α.Γ.Τ.Δ) και της (Σ.Γ.Μ.Μ), η γεννήτρια συνδέεται με πλήρη μετατροπέα διακοπτικών στοιχείων IGBT's.

Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου ανεμογεννητριών είναι σε μεγάλο βαθμό όμοια με αυτά που αναφέραμε στον προηγούμενο τύπο διαμόρφωσης. Η προστασία της γεννήτριας από μεταβατικά φαινόμενα στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι αυξημένη λόγω παρεμβολής του μετατροπέα, σε αντίθεση με τη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης της προηγούμενης ενότητας, που είναι εκτεθειμένη στα μεταβατικά φαινόμενα λόγω της απ' ευθείας σύνδεσής της στο δίκτυο. Επίσης, ο συγκεκριμένος τύπος γεννήτριας παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς την ενεργειακή απόδοση, την αξιοπιστία και σε θέματα συντήρησης. Ωστόσο, ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου αποτελούν μόνο το 20% της σημερινής αγοράς, αλλά στο άμεσο μέλλον θα εντατικοποιηθεί η χρήση τους στην αγορά αιολικής ενέργειας. [59] [73]

7.4 Η ανάπτυξη της τεχνολογίας

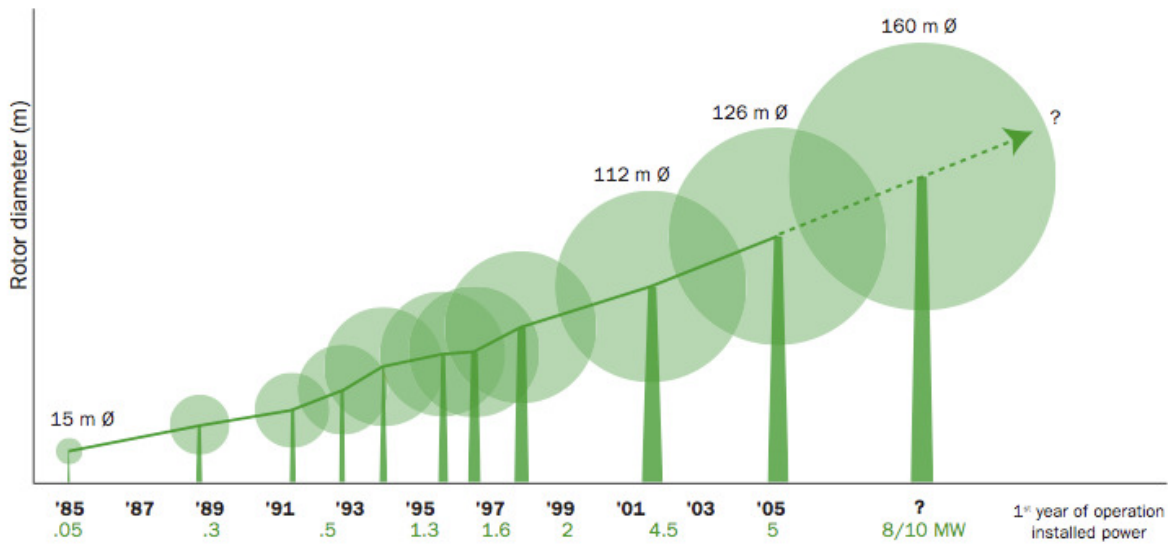
Στα μέσα του 2005 η μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια είχε διάμετρο 126 μέτρα και εγκατεστημένη ισχύ 5 MW. Η τεχνολογία των ανεμογεννητριών στο διάστημα της τελευταίας εικοσαετίας σημείωσε πραγματικό άλμα, αφού η απόδοση των μηχανών από τις αρχές του 1980 μέχρι σήμερα έχει σχεδόν διπλασιαστεί, ενώ η ισχύς τους έχει εκατονταπλασιαστεί. Από μονάδες των 20 – 60 kW και διάμετρο ρότορα γύρω στα 20 μέτρα, έχουν αυξηθεί το 2005 σε 5.000 kW και διάμετρο άνω των 100 μέτρων.



Εικόνα 57: Αύξηση μεγέθους και ηλεκτρικής ισχύος ανεμογεννητριών από την Vestas wind turbines corporation.

Ένας άλλος δείκτης που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψη είναι η διαθεσιμότητα των ανεμογεννητριών, δηλαδή το ποσοστό του χρόνου που αυτές είναι διαθέσιμες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, για παράδειγμα, η διαθεσιμότητα των αιολικών πάρκων αυξήθηκε από 60% το 1981 σε 95% το 1986. Σήμερα, οι περισσότερες εγκαταστάσεις λειτουργούν με διαθεσιμότητες πάνω από 98%, ενώ οι συντελεστές απόδοσης τους φθάνουν και ξεπερνούν σε μερικές περιπτώσεις το 40%, εξαρτώμενοι κυρίως από τη θέση εγκατάστασης τους.

Figure 2: The size of wind turbines at market introduction.



Source: Jos Beuskens, ECN

Εικόνα 58: Προβλεπόμενη αύξηση μεγέθους ανεμογεννητριών στην αγορά αιολικής ενέργειας.

Το κόστος κατασκευής των ανεμογεννητριών έχει μειωθεί σημαντικά και μπορεί να θεωρηθεί ότι η αιολική ενέργεια διανύει την 'πρώτη περίοδο ωριμότητας', καθώς είναι πλέον ανταγωνιστική των συμβατικών μορφών ενέργειας. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι, το κόστος ηλεκτροπαραγωγής από ανεμογεννήτριες έχει μειωθεί από τα 0,80 €/kWh στα 0,04 – 0,05 €/kWh σε μέρη με δυνατούς ανέμους, μέχρι 0,06 – 0,08 €/kWh σε μέρη με μικρή ταχύτητα ανέμων. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και τις συνεχείς βελτιώσεις που επιτυγχάνονται στην απόδοση και την αξιοπιστία των ανεμογεννητριών, εκτιμάται ότι το κόστος της εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας μπορεί να μειωθεί στα 0,03 €/kWh μέχρι το 2013.

Οι τυπικές διαστάσεις μιας ανεμογεννήτριας 500 kW είναι 40 μέτρα για τη διάμετρο του δρομέα και 40 – 50 μέτρα για το ύψος του πύργου, ενώ οι διαστάσεις μιας ανεμογεννήτριας 1 MW είναι 50 μέτρα για τη διάμετρο του δρομέα και 50 – 60 μέτρα για το ύψος του πύργου.

Σημειώνεται τέλος, ότι ιδιαίτερο βάρος δίνεται σήμερα στην έρευνα και την ανάπτυξη ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών. Οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου, λειτουργώντας σε μεταβλητές στροφές, επιτυγχάνουν αύξηση της ενεργειακής απόδοσής τους και μείωση της μηχανικής καταπόνησής των διαφόρων υποσυστημάτων τους. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται ο σχεδιασμός των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος των ανεμογεννητριών αυτών, οι οποίες τοποθετούνται στην έξοδο της ηλεκτρογεννήτριας και πριν το σημείο σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο. [58]

7.5 Ανάπτυξη εγχώριας τεχνολογίας ανεμογεννητριών

Στην Ελλάδα δεν υπάρχει αξιόλογη βιομηχανία κατασκευής ανεμογεννητριών εκτός ελαχίστων κατασκευαστών ανεμογεννητριών της τάξης του 1 kW έως 5 kW. Ωστόσο, υπάρχει σημαντική δραστηριότητα στην κατασκευή πύργων από την εγχώρια βιομηχανία χάλυβα. Μία ελληνική εταιρεία έχει ασχοληθεί με την μελέτη, τον σχεδιασμό και την κατασκευή πτερυγίων, αλλά δεν έχει κατορθώσει ακόμα να θέσει σε εμπορική εφαρμογή το σχέδιο της.

Σημείο κλειδί για την ανάπτυξη αξιόπιστων ελληνικών συστημάτων ανεμογεννητριών αποτελεί η δυνατότητα πιστοποίησης τους. Η πιστοποίηση αυτή γίνεται από το *Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας* (Κ.Α.Π.Ε.), το οποίο βασισμένο στην πολυετή εμπειρία του στο συγκεκριμένο χώρο και σε συνεργασία με αρμόδιους φορείς εντός και εκτός της χώρας, αναπτύσει το Ελληνικό Σύστημα Πιστοποίησης Ανεμογεννητριών.

Το σύστημα πιστοποίησης βασίζεται στα εθνικά πρότυπα για ανεμογεννήτριες τα οποία έχουν αναπτυχθεί, αλλά επίσης υποστηρίζεται από τις σημαντικές εγκαταστάσεις υποδομής που έχουν αναπτυχθεί στη χώρα από το *Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας*, όπως είναι το δοκιμαστήριο πτερυγίων ανεμογεννητριών το οποίο παρέχει τη δυνατότητα δοκιμής πτερυγίων με μήκος έως και 30 μέτρα, εργαστήρια ανάπτυξης υβριδικών συστημάτων, μετρήσεις θορύβου από ανεμογεννήτρια στη θέση του αποδέκτη αλλά και στην θέση της ίδιας της ανεμογεννήτριας, μέτρηση και ανάλυση αιολικού δυναμικού περιοχής, βαθμονόμηση ανεμομέτρων, μετρήσεις φορτίων σε ανεμογεννήτριες, μετρήσεις καμπύλης ισχύος και μετρήσεις ποιότητας ισχύος ανεμογεννητριών. [58] [67]

7.6 Εφαρμογές των ανεμογεννητριών

Η σημαντικότερη οικονομικά εφαρμογή των ανεμογεννητριών είναι η σύνδεση τους στο ηλεκτρικό δίκτυο μιας χώρας, για την απόδοση σε αυτό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή ένα αιολικό πάρκο, δηλαδή μια συστοιχία πολλών ανεμογεννητριών, εγκαθίσταται και λειτουργεί σε μία συγκεκριμένη θέση με υψηλό αιολικό δυναμικό και διοχετεύει το σύνολο της παραγωγής του στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Η εφαρμογή αυτή επιτρέπει τη μαζική εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας και είναι ιδιαίτερα απλή, δεδομένου ότι η σύνδεση του αιολικού πάρκου με το υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο γίνεται μέσω υποσταθμού, στον οποίο τοποθετούνται οι μετασχηματιστές ανύψωσης της τάσης και τα υπόλοιπα αναγκαία συστήματα προστασίας. Κατ' αυτόν τον τρόπο δεν απαιτείται η ανάπτυξη ιδιαίτερου συστήματος διαχείρισης της παραγόμενης ενέργειας και ελέγχου του συστήματος, αφού όλη η ενέργεια προσφέρεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Υπάρχει βέβαια και η δυνατότητα οι ανεμογεννήτριες να λειτουργούν αυτόνομα, για ηλεκτροπαραγωγή σε περιοχές που δεν ηλεκτροδοτούνται, για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας χρήσιμης σε αντλιοστάσια, καθώς και για την παραγωγή θερμότητας.

Όταν οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι μικρές, όπως σε απομονωμένες αγροτικές ή εξοχικές κατοικίες, σταθμούς τηλεπικοινωνιών σε βουνά, φυλάκια ενόπλων δυνάμεων, ορειβατικά καταφύγια, κ.α., χρησιμοποιούνται μικρές ανεμογεννήτριες συνεχούς ρεύματος, σε συνδυασμό συνήθως με συστοιχία συσσωρευτών για την αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας και χρήσης της όταν επικρατούν συνθήκες άπνοιας. Στην περίπτωση αυξημένων φορτίων χρησιμοποιείται μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια, η οποία με τη βοήθεια ενός συστήματος ανορθωτή – ρυθμιστή – μετατροπέα παρέχει εναλλασσόμενο ρεύμα. Στις περισσότερες εφαρμογές, η εγκατάσταση συνοδεύεται παράλληλα από ντιζελογεννήτρια η οποία εξασφαλίζει την αδιάλειπτη παροχή ρεύματος. Σε κάθε περίπτωση όμως, οι εφαρμογές εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας και ειδικότερα η επιλογή του χώρου εγκατάστασης των ανεμογεννητριών πρέπει να γίνεται με προσοχή ώστε να μην διαταράσσεται, καθ' οποιονδήποτε τρόπο, η ποιότητα του περιβάλλοντος της ευρύτερης περιοχής.

Προβλήματα όπως αυτά του θορύβου σήμερα έχουν ουσιαστικά αντιμετωπισθεί, δεδομένου ότι με τη ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια έχει καταστεί πρακτικά αθόρυβη η λειτουργία των ανεμογεννητριών. Παράλληλα, αξίζει να σημειωθεί ότι ο σχεδιασμός των αιολικών πάρκων γίνεται πλέον με τρόπο τέτοιο που να επιτυγχάνεται η κατά το δυνατόν αρμονικότερη συνύπαρξη εγκατάστασης και τοπίου. [58]

7.7 Σύνδεση ανεμογεννητριών στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (on - grid)

Βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών είναι η δυνατότητα τους να συνδεθούν στο εκάστοτε ηλεκτρικό δίκτυο ώστε να διαθέτουν την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ στους καταναλωτές και να καλύπτουν τις ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια. Η επιλογή του τρόπου σύνδεσης ενός σταθμού ηλεκτρικής ενέργειας με ένα αιολικό πάρκο, αποτελεί αντικείμενο τεχνοοικονομικής μελέτης, λαμβάνοντας υπ' όψη το κόστος κεφαλαίου των έργων ενίσχυσης και επέκτασης του δικτύου και αφετέρου τις απώλειες ενέργειας κάθε τρόπου διασύνδεσης καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης, αλλά και άλλων παραγόντων όπως ο χρόνος, η δυνατότητα κατασκευής των έργων και η χρηματοδότησή τους.

Η σύνδεση στο δίκτυο μονάδων παραγωγής πρέπει να συμβαδίζει με κάποιες γενικές αρχές, ωστέ αφενός μεν να μην προκαλούνται ενοχλήσεις στους λοιπούς καταναλωτές και αφετέρου να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ του δικτύου διανομής και των εγκαταστάσεων των παραγωγών.

Στον ακόλουθο πίνακα δίνεται, ενδεικτικά και μόνο, ο πιθανός ή προτιμητέος τρόπος διασύνδεσης, ανάλογα με την ισχύ του σταθμού.

Ενδεικτική συμφωνημένη ισχύς (MW)	Πιθανός τρόπος σύνδεσης στο δίκτυο
έως 0,1	Δίκτυο Χ.Τ.
έως 4	Δίκτυο Μ.Τ., σε υφιστάμενη γραμμή (με πιθανή ενίσχυσή της)
έως 6	Δίκτυο Μ.Τ., μέσω αποκλειστικής γραμμής απλού κυκλώματος
έως 20	Δίκτυο Μ.Τ., μέσω αποκλειστικής γραμμής διπλού κυκλώματος
άνω των 20	Δίκτυο Υ.Τ., με κατασκευή ιδιαίτερου Υ/Σ ανύψωσης Υ.Τ./Μ.Τ.

Πίνακας 9: Τρόποι σύνδεσης ανεμογεννητριών στο ηλεκτρικό δίκτυο – δίκτυο διανομής.

Οι τεχνικές προδιαγραφές αφορούν στη σύνδεση παραγωγών στο δίκτυο μέσης τάσης (Μ.Τ.) ή χαμηλής τάσης (Χ.Τ.). Στις δύο αυτές περιπτώσεις ο στόχος είναι κοινός και έχει να κάνει με την διασφάλιση της ομαλής συνεργασίας των εγκαταστάσεων με το δίκτυο, την ασφάλεια των ανθρώπων και των εγκαταστάσεων και την εξασφάλιση αποδεκτής ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος. Βασικά κριτήρια και προϋποθέσεις που εξετάζονται προκειμένου να επιτραπεί η σύνδεση νέων εγκαταστάσεων παραγωγής είναι τα εξής:

- Αργές μεταβολές της τάσης (μόνιμη κατάσταση λειτουργίας)
- Γρήγορες μεταβολές της τάσης
- Συμβολή στη στάθμη βραχυκύκλωσης
- Επάρκεια του δικτύου (μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, κ.α.)
- Εκπομπές αρμονικών
- Εκπομπές flicker
- Διαμόρφωση των συστημάτων προστασίας της διασύνδεσης εγκαταστάσεων – δικτύου
- Επίπτωση στη λειτουργία συστημάτων Τηλεχειρισμού Ακουστικής Συχνότητας (Τ.Α.Σ.) [68]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΑΠΟ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΟ ‘ΚΕΝΤΡΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΚΑΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ’ ΣΤΟ ΛΑΥΡΙΟ ΑΤΤΙΚΗΣ

8.1 Εισαγωγή

Η πιλοτική μονάδα παραγωγής, αποθήκευσης και εμφιάλωσης υδρογόνου από αιολική ενέργεια του ‘Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργεια’ είναι σε λειτουργία από τον Οκτώβριο του 2008. Βρίσκεται στην Κερατέα της Αττικής, στο πάρκο δοκιμών ανεμογεννητριών και έχει υλοποιηθεί σε συνεργασία με Ευρωπαϊκούς φορείς στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος ‘RES2H2’ που ξεκίνησε το 2001. Μια δεύτερη εγκατάσταση στα Κανάρια Νησιά που προβλέπεται στα πλαίσια του ίδιου έργου, με χρήση του υδρογόνου σε κυψέλες καυσίμου, δεν έχει υλοποιηθεί ακόμα. Στην Ελλάδα, η μονάδα παραγωγής του υδρογόνου εγκαταστάθηκε στο Επιδεικτικό Αιολικό Πάρκο του ‘ΚΑΠΕ’ στην Κερατέα, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 3MW.

Η εγκατάσταση στο σύνολό της αποτελείται από μία αλκαλική ηλεκτρόλυση ισχύος 25 kW, με ονομαστική παραγωγή 5 Nm³/h H₂ στα 20 bar, μία μονάδα αποθήκευσης 40 Nm³ υδρογόνου σε δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων (LaNi₅), ένα συμπιεστή υδρογόνου ενός σταδίου από τα 18 bar στα 220 bar με σταθμό εμφιάλωσης του παραγόμενου υδρογόνου στα 220 bar, τον απαραίτητο βοηθητικό εξοπλισμό και από το κεντρικό σύστημα αυτόματου ελέγχου και καταγραφής δεδομένων, τα οποία καταλήγουν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η εταιρεία ‘ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ’ ανέλαβε την προμήθεια και εγκατάσταση του συμπιεστή υδρογόνου, του σταθμού πλήρωσης φιαλών και του δικτύου υδρογόνου. Το ‘Frederik Institute of Technology (FIT)’ σχεδίασε και εγκατέστησε την μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου σε μεταλλοϋδρίδια.

Το ΚΑΠΕ ανέλαβε την μελέτη και εγκατάσταση της μονάδας παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση, την ηλεκτρολογική εγκατάσταση και σύνδεση με την ανεμογεννήτρια, το κεντρικό σύστημα ελέγχου και τα περιφερειακά συστήματα. Η εγκατάσταση ολοκληρώθηκε και τα τμήματα του εξοπλισμού δοκιμάστηκαν ένα προς ένα στο διάστημα Μάιος – Ιούλιος 2005. Η λειτουργία του ολοκληρωμένου συστήματος ξεκίνησε στα τέλη Σεπτεμβρίου 2005. [69] [70]

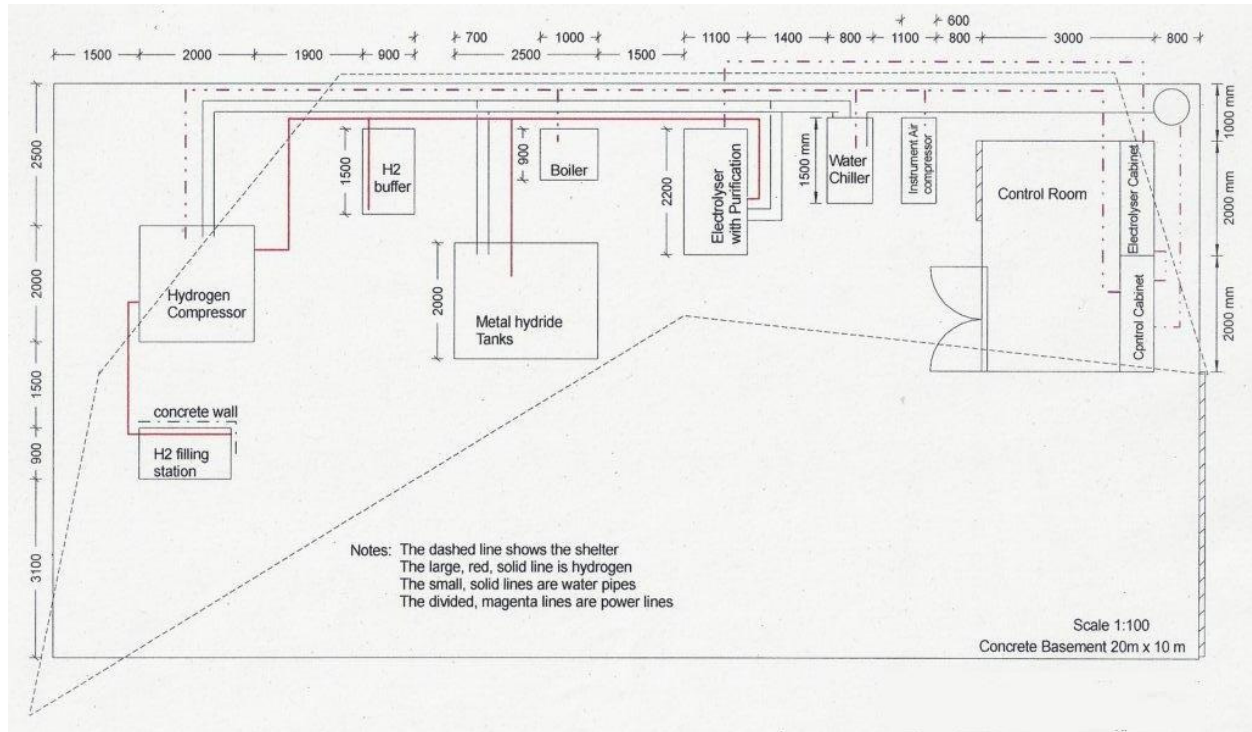


Εικόνα 59. Περιμετρική άποψη των εγκαταστάσεων υδρογόνου του ΚΑΠΕ στο Λαύριο. Σε πρώτο πλάνο φαίνονται τα υποσύστημα της εγκατάστασης, ενώ στο βάθος διακρίνουμε τον πύργο της ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιείται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.

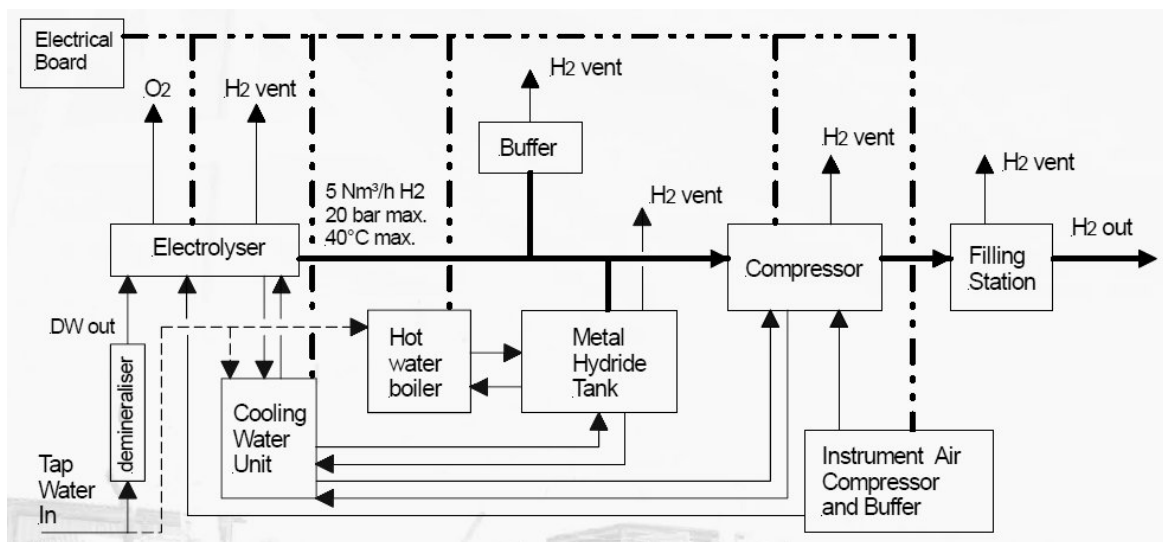
Στις επόμενες σελίδες του κεφαλαίου αυτού, θα παρουσιαστούν τα πρώτα αποτελέσματα από τη λειτουργία της πιλοτικής μονάδας. Συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν μετρήσεις και υπολογισμοί του παραγόμενου υδρογόνου από την αλκαλική ηλεκτρόλυση σε συνάρτηση με την τάση και το ρεύμα της τροφοδοσίας, καθώς επίσης και μετρήσεις των μεταλλοϋδρίδιων ως προς την θερμοκρασία και την πίεσή τους. Για τα μεταλλοϋδρίδια έχει μελετηθεί η συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια της φορτίσης καθώς και της εκφόρτισής τους με αέριο υδρογόνο, παραγόμενο από τη συγκεκριμένη μονάδα ηλεκτρόλυσης. Ακόμα, παρουσιάζονται μετρήσεις από το σταθμό εμφιάλωσης του υδρογόνου. Ο ρυθμός συμπίεσης του αερίου μέσω του συμπιεστή ενός σταδίου και γενικά η συμπεριφορά του τμήματος υψηλής πίεσης της πιλοτικής μονάδας είναι τα θέματα τα οποία παρουσιάζονται. Τέλος, με τη βοήθεια των αποτελεσμάτων καταλήγουμε σε συμπεράσματα που προκύπτουν για την λειτουργία και τη γενική συμπεριφορά ολόκληρης της μονάδας παραγωγής υδρογόνου από αιολική ενέργεια. [69]

8.2 Σχηματικό διάγραμμα της εγκατάστασης

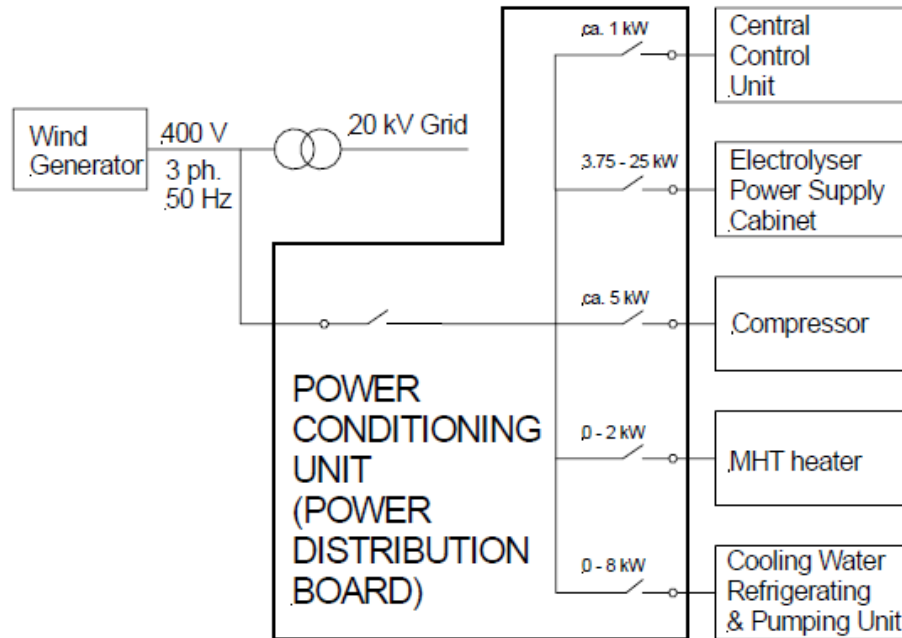
Το διάγραμμα της εγκατάστασης του συστήματος παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου με τη χρήση αιολικής ενέργειας, που βρίσκεται εγκατεστημένο στο 'Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας' παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 60. Κάτοψη της εγκατάστασης υδρογόνου στο αιολικό πάρκο του ΚΑΠΕ.



Εικόνα 61. Τα υποσυστήματα της εγκατάστασης υδρογόνου του ΚΑΠΕ και παρουσίαση των παροχών ηλεκτρικής ισχύος από τον κεντρικό ηλεκτρολογικό πίνακα προς αυτά.



Εικόνα 62. Ένα απλοποιημένο σχέδιο του ηλεκτρολογικού πίνακα διανομής ρεύματος.

Το σύστημα αποτελείται βασικά από τρεις ενότητες:

- Την χημική εγκατάσταση παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου με τα απαραίτητα περιφερειακά.
- Τον κεντρικό ηλεκτρολογικό πίνακα, που περιλαμβάνει τη σύνδεση με την ανεμογεννήτρια και την παροχή ρεύματος σε όλους τους χρήστες.
- Το κεντρικό σύστημα ελέγχου και καταγραφής δεδομένων.

Η εγκατάσταση στο σύνολό της αποτελείται από τα κύρια μέρη που είναι η μονάδα της ηλεκτρόλυσης, μία συμβατική δεξαμενή υδρογόνου (buffer), ο συμπιεστής υδρογόνου του ενός σταδίου, ο σταθμός πλήρωσης – εμφιάλωσης του παραγόμενου υδρογόνου και η δεξαμενή αποθήκευσης των μεταλλοϋδρίων. Το βοηθητικό εξοπλισμό αποτελούν το κλειστό σύστημα ψύξης, το κλειστό σύστημα παραγωγής ζεστού νερού, ο αεροσυμπιεστής και το κεντρικό σύστημα ελέγχου και καταγραφής δεδομένων. Η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας ολόκληρης της πιλοτικής μονάδας γίνεται από την ανεμογεννήτρια του αιολικού πάρκου, που είναι η Enercon E – 40 ισχύος 500 kW. [71]

8.3 Επιμέρους τμήματα της εγκατάστασης

Μία εγκατάσταση ενός συστήματος παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου με τη χρήση αιολικής ενέργειας, αποτελείται από τα εξής επιμέρους τμήματα:

1. Την ηλεκτρόλυση του νερού
2. Τις δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων
3. Μία συμβατική δεξαμενή υδρογόνου
4. Τον συμπιεστή υδρογόνου
5. Τον σταθμό πλήρωσης φιαλών
6. Το κλειστό σύστημα ψύξης νερού
7. Το σύστημα πεπιεσμένου αέρα
8. Τον πίνακα ηλεκτρικής ισχύος
9. Την μονάδα ελέγχου βασισμένη σε ένα Προγραμματιζόμενο Λογικό Ελεγκτή
10. Την κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων [71]

8.3.1 Μονάδα ηλεκτρόλυσης

Η μονάδα αλκαλικής ηλεκτρόλυσης κατασκευάστηκε από την Casale Chemicals στην Ελβετία και έχει ονομαστική παραγωγή 0.45 kg/h (ή 5 Nm³/h) υδρογόνου υπό πίεση 19 bar. Το ηλεκτρολυτικό υδρογόνο καθαρότητας 99.98 κατά όγκο, περνάει από καταλυτικό αντιδραστήρα για την καύση του οξυγόνου σε επίπεδα κάτω των 10 ppm και από ξηραντήρα, για να κατέβει το ατμοσφαιρικό σημείο δρόσου του υδρογόνου στους -40°C. Η μονάδα μπορεί να απορροφήσει τις αλλαγές ηλεκτρικής ισχύος μιας ανεμογεννήτριας μέσα σε ένα εύρος από 15 έως 100% της ονομαστικής της ισχύος σε ένα δευτερόλεπτο. Η λειτουργία της ηλεκτρόλυσης για μεγάλα χρονικά διαστήματα με ισχύ χαμηλότερη του 15%, δημιουργεί προβλήματα στην καθαρότητα του παραγόμενου υδρογόνου.

Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι 80°C και ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται υδατικό διάλυμα KOH 30% κατά βάρος. Το νερό του δικτύου, που διοχετεύεται στην ηλεκτρόλυση, περνάει από μια στήλη εναλλαγής ιόντων έτσι ώστε η αγωγιμότητά του να πέσει στα 5 μS/cm.

Οι τεχνικές προδιαγραφές ήταν πολύ αυστηρές όσον αφορά την ασφάλεια του συστήματος, και η μονάδα έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί σύμφωνα με όλους τους κανόνες ασφαλείας. Σε περίπτωση οποιασδήποτε ανωμαλίας, η μονάδα σταματάει την λειτουργία της αυτομάτως, κάνει αποσυμπίεση και γεμίζει το σύστημα με άζωτο. Τα μετρητικά ασφαλείας είναι διπλά, με το βασικό σύστημα να λειτουργεί χωρίς την παρέμβαση ανθρώπου ή λογισμικού. Όλες οι βάνες είναι πνευματικού τύπου, έτσι ώστε να ελαττωθεί στο ελάχιστο ο ηλεκτρικός εξοπλισμός στο πεδίο. Όλος ο ηλεκτρικός εξοπλισμός στο πεδίο είναι σχεδιασμένος και κατασκευασμένος σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ισχύουν για ζώνες με πιθανή παρουσία εύφλεκτων αερίων.

Η μονάδα ηλεκτρόλυσης είναι κατασκευασμένη για λειτουργία σε εξωτερικό χώρο, αλλά χρειάζεται προστασία από τον ήλιο, οπότε προστατεύεται από ένα κουβούκλιο.



Εικόνα 63. Η μονάδα ηλεκτρόλυσης στην εγκατάσταση του ΚΑΠΕ.

Στην κάτω πλευρά της εικόνας, φαίνεται η δεξαμενή απιονισμένου νερού και λίγο ψηλότερα φαίνονται τα δοχεία διαχωρισμού αερίου – ηλεκτρολύτη για το υδρογόνο και το οξυγόνο. [69] [71] [72]

8.3.2 Δεξαμενές μεταλλικών υδριδίων (μεταλλοϋδριδίων)

Οι δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων σχεδιάστηκαν από το Frederik Institute of Technology (FIT) στην Κύπρο και κατασκευάστηκαν από την Labtech SA στη Βουλγαρία. Το σύστημα αποθήκευσης αποτελείται από έξι κυλινδρικές δεξαμενές από ατσάλι, που περιέχουν ένα κράμα μετάλλου AB_5 , με προσμίξεις $La_{1-x}Ce_xNi$. Κατά τη διάρκεια της εξώθερμης προσρόφησης υδρογόνου, οι δεξαμενές ψύχονται από κρύο νερό. Για να μπορέσουν να εκροφήσουν το υδρογόνο, χρειάζεται ζεστό νερό στους $75^{\circ}C$, από έναν απλό θερμοσίφωνα ισχύος 4 kW. Η πίεση εκρόφησης σχεδιασμού είναι 14 bar και αντιστοιχεί σε μια θερμοκρασία 50 – $60^{\circ}C$, και οι δεξαμενές χρειάζονται 5 – 15 λεπτά προθέρμανσης πριν αρχίσουν να αποδίδουν το υδρογόνο με την ονομαστική ροή των 0.45 kg/h υδρογόνου.

Η κάθε δεξαμενή έχει ονομαστική ικανότητα προσρόφησης 0.62 κιλών υδρογόνου (7 Nm^3), οπότε η εγκατάσταση έχει συνολική ικανότητα αποθήκευσης 3.7 κιλών υδρογόνου (44 Nm^3). Η ειδική ικανότητα προσρόφησης του μεταλλικού κράματος είναι 1.28% κατά βάρος και της πλήρους δεξαμενής 0.66% κατά βάρος, λαμβάνοντας υπόψη το βάρος των κυλίνδρων. Η ενθαλπία σχηματισμού του μεταλλοϋδριδίου είναι $\Delta H_f = 28 \text{ kJ/mol H}_2$, και η απαιτούμενη θερμική ισχύς για την εκρόφηση του υδρογόνου στην ονομαστική ροή είναι περίπου 2 kW.

Τα μεταλλοϋδρίδια δεν πρέπει να έρθουν σε επαφή με τον αέρα ούτε με νερό, γιατί μπορεί να αντιδράσουν εκρηκτικά. Η παρουσία μικρών ποσοτήτων οξυγόνου και νερού μέσα στο υδρογόνο μπορεί να οδηγήσει στη σταδιακή μείωση της ικανότητας αποθήκευσης των μεταλλοϋδριδίων.

Οι έξι δεξαμενές διαθέτουν χειροκίνητη βάνα αποκλεισμού, αλλά λειτουργούν όλες μαζί σαν μία μοναδική δεξαμενή, με τη βοήθεια αυτόματης βάνας εισόδου και αυτόνομης βάνας εξόδου. Οι δεξαμενές πρέπει να ψύχονται συνεχώς κατά τη διάρκεια της προσρόφησης υδρογόνου, καθώς και για λίγο διάστημα μετά το πέρας της προσρόφησης, μέχρι να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία του μεταλλοϋδριδίου. Κατά τη διάρκεια της πλήρωσης, η πίεση στο κενό διάστημα των μεταλλοϋδριδίων είναι ίση με την πίεση του κυκλώματος. Όσο τα μεταλλοϋδρίδια δεν είναι γεμάτα, η πίεση ισορροπίας των μεταλλοϋδριδίων είναι χαμηλότερη από την πίεση του κενού διαστήματος. Όταν αυτές οι δύο πιέσεις γίνονται ίδιες, το μεταλλικό κράμα δεν θα μπορέσει να απορροφήσει περισσότερο υδρογόνο, αλλά η στιγμή αυτής της εξισορρόπησης δεν μπορεί να προβλεφθεί εύκολα. Έτσι, το επίπεδο πλήρωσης των μεταλλοϋδριδίων υπολογίζεται με ολοκλήρωμα ως προς το χρόνο της ροής. [69] [71] [72]



Εικόνα 64. Εγκατεστημένες δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων στις εγκαταστάσεις υδρογόνου του ΚΑΠΕ.

8.3.3 Συμβατική δεξαμενή υδρογόνου

Μία μικρή συμβατική δεξαμενή υδρογόνου σχεδιάστηκε για να διευκολύνει τη λειτουργία του συμπιεστή. Η συσκευή ηλεκτρόλυσης είναι ο μόνος χρήστης ηλεκτρικής ισχύος της διάταξης που μπορεί να απορροφήσει μεγάλες μεταβολές ισχύος. Όταν η ισχύς μειώνεται, μειώνεται ανάλογα και η παραγωγή υδρογόνου. Ο συμπιεστής υδρογόνου μπορεί να δεχθεί ένα εύρος πιέσεων στην είσοδο, από 10 barG έως 18 barG αλλά αν η πίεση του υδρογόνου πέσει κάτω από το χαμηλό όριο, ο συμπιεστής σταματάει αυτομάτως τη λειτουργία του.

Η συμπιεζόμενη ροή του υδρογόνου εξαρτάται από την πίεση εισόδου αλλά και από την πίεση εξόδου. Η ροή είναι μεγαλύτερη όταν η διαφορά πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου είναι μικρή, όπως για παράδειγμα στην αρχή της διαδικασίας πλήρωσης μίας φιάλης, και μικρότερη όταν η διαφορά πίεσης είναι μεγάλη, όπως όταν η φιάλη είναι σχετικά γεμάτη. Επειδή δεν ενδείκνυται από τον κατασκευαστή η έναρξη – στάση του συμπιεστή πάνω από τρεις φορές την ώρα, σχεδιάστηκε μια μικρή συμβατική δεξαμενή για να επιτρέψει στο συμπιεστή να λειτουργεί για αρκετό χρονικό διάστημα, ακόμα και αν η παραγωγή υδρογόνου διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα για πολλή ώρα.

Η συμβατική δεξαμενή αποτελείται από 8 κυλίνδρους των 50 λίτρων, που μπορούν να αποθηκεύσουν περίπου 0.3 κιλά υδρογόνου ανάμεσα στα 10 και τα 19 barG. Η ποσότητα αυτή είναι αρκετή για περίπου 40 λεπτά λειτουργίας του συμπιεστή. [69] [71] [72]

8.3.4 Συμπιεστής υδρογόνου

Ο συμπιεστής υδρογόνου τριπλού μεταλλικού διαφράγματος έχει μόνο ένα στάδιο συμπίεσης, χάρη στη μέση πίεση παροχής της ηλεκτρόλυσης. Κατασκευάστηκε από την PDC Machines Inc. στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και ολόκληρη η ηλεκτρολογική του εγκατάσταση είναι αντιακρηκτικού τύπου. Ο μεταλλικός σκελετός και οι σωληνώσεις είναι από ατσάλι SS316 και είναι τοποθετημένος πάνω σε αντικραδασμικές βάσεις από καουτσούκ.

Έχει ονομαστική ικανότητα 0.45 kg/h H₂ (5 Nm³/h) για πίεση εισόδου 14 barG στους 40°C και για πίεση εξόδου 220 barG στους 65°C. Μπορεί να ανεχτεί ένα εύρος πίεσης στην είσοδο από 10 έως 18 barG, με αντίστοιχα μειωμένη ή αυξημένη ροή, οπότε η λειτουργία τείνει να σταθεροποιηθεί στη μέση τιμή των 14 barG. Ο ηλεκτρικός κινητήρας έχει ισχύ 5.6 kW (7.5 Hp).

Η μονάδα έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί σύμφωνα με πολύ αυστηρές τεχνικές προδιαγραφές ασφαλείας για ζώνες με πιθανή παρουσία εύφλεκτων αερίων. Οι βάνες ελέγχου είναι πνευματικές και σε περίπτωση μη κανονικής λειτουργίας τίθεται αυτομάτως εκτός λειτουργίας μέσω των κατάλληλων οργάνων μέτρησης.



Εικόνα 65. Ο συμπιεστής υδρογόνου της PDC Machines Inc. (X. Ρόκας ABEE).

Για τον συμπιεστή υδρογόνου της παραπάνω εικόνας, πριν συνδεθεί με το υπόλοιπο σύστημα κατασκευάζεται ένα ειδικό κουβούκλιο, στο οποίο θα τοποθετηθεί, ώστε να προστατεύεται από τον ήλιο. [69] [71] [72]

8.3.5 Σταθμός πλήρωσης φιαλών

Ο σταθμός αποτελείται από ένα σωλήνα με τρεις αναμονές σύνδεσης για μεμονωμένες φιάλες ή διατάξεις φιαλών. Πρόκειται για μία διάταξη υψηλής πίεσης, που περιλαμβάνει απαγωγή, καθώς και τα απαραίτητα ασφαλιστικά και όργανα μέτρησης. Στην παρούσα φάση, έχουν συνδεθεί δύο μεμονωμένες φιάλες και μία συστοιχία 12 φιαλών. Ο σταθμός αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την πλήρωση της δεξαμενής υδρογόνου οχημάτων.

Κάθε φιάλη έχει όγκο 50 λίτρων και χωρητικότητα 0.8 kg H₂ (9 Nm³), οπότε η μέγιστη αποθηκευόμενη ποσότητα υδρογόνου υπό υψηλή πίεση είναι 11 kg (126 Nm³). Το παραγόμενο υδρογόνο είναι υψηλής καθαρότητας (99.999% κατά όγκο), και έχει προβλεφθεί η ακριβής ανάλυσή του, προκειμένου να διερευνηθεί η επίπτωση διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας της εγκατάστασης στην καθαρότητα του υδρογόνου. [69] [71] [72]

8.3.6 Περιφερειακά

Η μονάδα ηλεκτρόλυσης, οι δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων και ο συμπιεστής υδρογόνου απαιτούν ψύξη με κρύο νερό. Η σωστή ψύξη είναι ουσιαστικό στοιχείο για την ασφαλή λειτουργία της εγκατάστασης. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί απευθείας το νερό του δικτύου, όμως το σύστημα αυτό σχεδιάστηκε για να μπορεί να εγκατασταθεί και σε περιοχές δύσβατες, οπότε η παρουσία δικτύου δεν είναι εγγυημένη. Επίσης, η ελάχιστη πίεση νερού που απαιτείται για τη σωστή τροφοδοσία των μηχανημάτων είναι περίπου 3 bar, και στην περιοχή του αιολικού πάρκου η πίεση πέφτει απροειδοποίητα κάτω από αυτό το όριο. Άλλωστε, οι διακοπές παροχής νερού δεν είναι σπάνιο φαινόμενο. Έτσι, σχεδιάστηκε ένα κλειστό σύστημα ψύξης νερού, που αυξάνει την ασφάλεια της εγκατάστασης. Ο βιομηχανικός ψύκτης νερού, τύπου ACN, είναι ρυθμισμένος για να αποθηκεύει νερό στους 9 – 13 °C. Η πίεση στο κύκλωμα ρυθμίζεται με τη βοήθεια μίας βάνας bypass του κυκλοφορητή. Η ηλεκτρική ισχύς που καταναλώνει ο ψύκτης καταγράφεται με τη βοήθεια ενός βαττομέτρου. Η ονομαστική ισχύς είναι 5.5 kW, αλλά όταν δεν δουλεύει ο ψυκτικός συμπιεστής πέφτει στο 1 kW περίπου.

Η μονάδα ηλεκτρόλυσης και ο συμπιεστής υδρογόνου διαθέτουν βάνες ελέγχου πνευματικού τύπου, που δέχονται σήμα μέσω πεπιεσμένου αέρα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και άζωτο από τις φιάλες που είναι συνδεδεμένες στο σύστημα για αυτόματη αδρανοποίηση, αλλά η κατανάλωση αζώτου για τις ανάγκες ελέγχου κρίθηκε υπερβολική, οπότε εγκαταστάθηκε ξεχωριστό κύκλωμα πεπιεσμένου αέρα.

Το κύκλωμα πεπιεσμένου αέρα αποτελείται από τον αεροσυμπιεστή με ενσωματωμένο αεροφυλάκιο 150 λίτρων, τον ξηραντήρα καταψυκτικού τύπου, φίλτρα και τις σωληνώσεις από χαλκό με αναμονές σύνδεσης για την ηλεκτρόλυση και τον συμπιεστή υδρογόνου. Ο εμβολοφόρος, λιπαινόμενος αεροσυμπιεστής είναι μονοφασικός με ισχύ κινητήρα 2.2 kW. Έχει ονομαστική πίεση λειτουργίας 10 bar και παροχή 225 l/min στα 10 bar. Η ισχύς του ψυκτικού συμπιεστή είναι 0.139 kW. Η καθαρότητα του πεπιεσμένου αέρα για πνευματικά συστήματα είναι σύμφωνη με τις προδιαγραφές κατά ISO 8573.1 class 1.4.1, δηλαδή σωματίδια έως 0.01 μm, λάδια έως 0.01 mg/m³ και σημείο δρόσου 3°C. Ο πεπιεσμένος αέρας στο αεροφυλάκιο διατηρείται υπό πίεση 6 – 8 bar με κατάλληλους διακόπτες πίεσης. [71]
[72]

8.3.7 Κεντρικός ηλεκτρολογικός πίνακας ισχύος και ελέγχου

Ο κεντρικός ηλεκτρολογικός πίνακας τροφοδοτείται από την ανεμογεννήτρια Enercon στα 400V και έχει διαστασιολογηθεί για 100 kW. Από τον πίνακα αυτόν τροφοδοτούνται όλοι οι χρήστες ηλεκτρικής ενέργειας της εγκατάστασης υδρογόνου, ακόμα και το κλιματιστικό της αίθουσας ελέγχου. Μέσα στο ίδιο πεδίο βρίσκεται και το σύστημα ελέγχου, που βασίζεται σε ένα Programmable Logic Controller (PLC) της εταιρείας Siemens και συγκεκριμένα το μοντέλο S7.



Το PLC λαμβάνει σήματα από διάφορα όργανα μέτρησης (πίεσης, θερμοκρασίας, ροής, ανάλυσης αερίων, τάσης, ρεύματος και ηλεκτρικής ενέργειας) και στέλνει τα απαραίτητα σήματα για τον έλεγχο της εγκατάστασης. Επικοινωνεί με έναν υπολογιστή, στον οποίο καταγράφονται τα δεδομένα και από τον οποίο στέλλονται οι κατάλληλες διαταγές για τη λειτουργία του συστήματος. [71] [72]

Εικόνα 66. Κεντρικός ηλεκτρολογικός πίνακας.

8.3.8 Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων

Η κυψέλη καυσίμου PENTA H2 της εταιρείας Exergy Fuel Cells Technology σε συνεργασία με την Arcotronics Fuel Cells S.r.l., αποτελεί μία μονάδα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας βασισμένη στην τεχνολογία των κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM). Το σύστημα πρέπει να τροφοδοτείται με καθαρό υδρογόνο ώστε να μπορεί να αποδώσει 7.5 kW ηλεκτρικής ενέργειας και 6.5 kW ζεστού νερού στους 60 °C. Ένας εσωτερικός εναλλάκτης θερμότητας επιτρέπει στην κυψέλη καυσίμου να λειτουργεί και σε κατάσταση μη – συμπαραγωγής (χωρίς εξωτερικό θερμικό φορτίο). Το σύστημα είναι εξοπλισμένο με έναν ηλεκτρονικό μετατροπέα με τριφασική παροχή εξόδου 380 V, 50 Hz.

Η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου βασίζεται στο συνδιασμό του οξυγόνου από τον αέρα του περιβάλλοντος και του υδρογόνου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το υδρογόνο μπορεί να παρέχεται από μία προαιρετική πηγή, όπως ένα κύλινδρο υψηλής πίεσης. Στην συγκεκριμένη κυψέλη καυσίμου η παροχή υδρογόνου γίνεται με πίεση εισόδου της τάξης των 2 – 5 bar και η κατανάλωση καυσίμου φτάνει τα 6 Nm³/hr στην μέγιστη ισχύ. Το σύστημα πρέπει να είναι συνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο για να βρίσκεται σε κανονική λειτουργία, κατά την οποία απελευθερώνονται ατμοί νερού και θερμότητα ως παραπροϊόντα.



Εικόνα 67. Η κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων της εταιρείας Exergy στις εγκαταστάσεις του ΚΑΠΕ στο Λαύριο.

Το σύστημα είναι εξοπλισμένο με τις ακόλουθες βοηθητικές μονάδες:

- Σύστημα χειρισμού πίεσης υδρογόνου
- Βαλβίδες ασφαλείας στην πλευρά του υδρογόνου
- Στάδιο εφύγρανσης
- Πλάκα τύπου εναλλάκτη θερμότητας
- Αντιστροφέα 3 φάσεων 380 VAC
- Ηλεκτρονικά ελέγχου και διαχείρισης του συστήματος
- Ειδικό ερμάριο στο οποίο τοποθετούνται όλες οι βοηθητικές μονάδες

Το σύστημα είναι εξοπλισμένο με μία στοιβάδα από κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), κατασκευασμένη εξ ολοκλήρου από μη μεταλλικά υλικά, ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος της διάβρωσης ή της απελευθέρωσης ιόντων που επιρεάζουν αρνητικά τη διάρκεια ζωής της στοιβάδας, μειώνοντας δραματικά την ηλεκτρική της αγωγιμότητα. Το σύστημα ψύξης αποτελείται από έναν εναλλάκτη πλάκας με δύο κυκλώματα:

1. Ένα πρωταρχικό (στην πλευρά της στοιβάδας) που λειτουργεί με αφρατωμένο νερό, εκμεταλλευόμενο το νερό που παράγεται κατά την διαδικασία.
2. Ένα δευτερεύον (στην πλευρά του χρήστη) που λειτουργεί με το γενικό υδραυλικό σύστημα νερού. [84]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ‘HOMER ENERGY’, ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ, Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

9.1 HOMER ENERGY – Λογισμικό ενεργειακής μοντελοποίησης υβριδικών συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας



Το λογισμικό ενεργειακής μοντελοποίησης Homer Energy είναι ένα ισχυρό εργαλείο για το σχεδιασμό και την ανάλυση των υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας, τα οποία περιλαμβάνουν ένα μείγμα συμβατικών γεννητριών, τη συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, ανεμογεννήτριες, ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα, μπαταρίες, κυψέλες καυσίμου, υδροηλεκτρική ενέργεια, βιομάζα, καθώς και άλλες εισροές.

Για κάθε είδος ενεργειακού περιβάλλοντος, συνδεδεμένο ή μη με το δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, το λογισμικό Homer Energy βοηθάει στο να προσδιοριστούν οι μεταβλητές όλων των πόρων του συστήματος, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια που μπορούν να ενσωματωθούν με τον πλέον βέλτιστο τρόπο σε υβριδικά συστήματα.

Τόσο μηχανικοί όσο και μη επαγγελματίες χρησιμοποιούν το λογισμικό Homer Energy το οποίο πραγματοποιεί προσομοιώσεις διαφόρων ενεργειακών συστημάτων, συγκρίνει τα αποτελέσματα και παρουσιάζει μία ρεαλιστική εικόνα του αρχικού κεφαλαίου και των λειτουργικών εξόδων. Το πρόγραμμα καθορίζει την οικονομική βιωσιμότητα ενός υβριδικού ενεργειακού συστήματος, βελτιώνει το σχεδιασμό της εγκατάστασης και επιτρέπει στους χρήστες να κατανοήσουν το πως λειτουργούν στην πραγματικότητα τα υβριδικά συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Καθώς η διεσπαρμένη παραγωγή και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εξακολουθούν να είναι το ταχύτερα αναπτυσσόμενο τμήμα της ενεργειακής βιομηχανίας, το λογισμικό Homer Energy μπορεί να εξυπηρετήσει επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, τις τηλεπικοινωνίες, τους φορείς ολοκλήρωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και πολλών άλλων ειδών αναπτυξιακά έργα – για τον περιορισμό του οικονομικού κινδύνου των υβριδικών ενεργειακών έργων.

9.1.1 Το λογισμικό

Το λογισμικό Homer Energy είναι ένα υπολογιστικό μοντέλο που απλοποιεί το έργο του σχεδιασμού συστημάτων διεσπαρμένης παραγωγής, τόσο εντός όσο και εκτός του ηλεκτρικού δικτύου. Η βελτιστοποίηση και οι αλγόριθμοι ανάλυσης ευαισθησίας που προσφέρει το λογισμικό μας επιτρέπουν να αξιολογήσουμε την οικονομική και την τεχνική σκοπιμότητα ενός μεγάλου αριθμού τεχνολογικών επιλογών που προσφέρονται, αλλά και να υπολογίσει τις διακυμάνσεις του κόστους της τεχνολογίας και των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων.

Η εταιρεία Homer Energy LLC παρέχει το λογισμικό, τις υπηρεσίες και τα κατάλληλα εργαλεία για επαγγελματίες, ερευνητές και τους λάτρεις του κλάδου της ενέργειας, που επιθυμούν να αναλύσουν και να βελτιστοποιήσουν τα διεσπαρμένα συστήματα ισχύος και συστήματα που ενσωματώνουν υψηλή διεύθυνση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το 1997 η ομάδα ανάπτυξης του λογισμικού Homer Energy συνειδητοποίησε ότι μία διαθέσιμη στο κοινό έκδοση του λογισμικού θα ήταν χρήσιμη σε μία αναπτυσσόμενη κοινότητα σχεδιαστών συστημάτων που τους ενδιέφεραν ολόένα και περισσότερο οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Έτσι, λοιπόν, το λογισμικό μετατράπηκε σε μία εφαρμογή συμβατή με το λειτουργικό σύστημα Microsoft Windows, γραμμένη σε γλώσσα προγραμματισμού C++ και άρχισε να διανέμεται μέσω της ιστοσελίδας του Εθνικού Εργαστηρίου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Αν και η αρχική έκδοση του λογισμικού αναφερόταν σε συστήματα εκτός δικτύου (off – grid), η ομάδα σχεδιασμού και υλοποίησης του λογισμικού γρήγορα κατάλαβε πως η ικανότητα του προγράμματος για βελτιστοποίηση και ανάλυση ευαισθησίας μπορούσε να εφαρμοστεί και σε μεγαλύτερα συστήματα που συνδέονται με το δίκτυο (on – grid). Έτσι, το 2001 κυκλοφόρησε η έκδοση 2.0 του λογισμικού Homer Energy που έφερε σημαντικές αναβαθμίσεις, δίνοντας την δυνατότητα για μοντελοποίηση διασυνδεδεμένων συστημάτων με πολλαπλές γεννήτριες, συμπεριλαμβανομένης της συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, των τεχνολογιών υδρογόνου, αλλά και την δυνατότητα μοντελοποίησης των εκπεμπόμενων ρύπων και την αναλυτική τιμολόγηση των συστημάτων. Με έδρα το Κολοράντο, η εταιρεία Homer Energy LLC ιδρύθηκε το 2009 για την εμπορευματοποίηση ενός υβριδικού μοντέλου βελτιστοποίησης των *Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας*, και αναπτύχθηκε από το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, που αποτελεί τμήμα του Υπουργείου Ενέργειας των Η.Π.Α.

Η εταιρεία Homer Energy LLC αποτελείται από μία ομάδα ανθρώπων που περιλαμβάνει οικονομολόγους και μηχανικούς που δημιούργησαν αρχικά το λογισμικό Homer Energy, μαζί με επαγγελματίες διαχειριστές, αναλυτές και άλλους επαγγελματίες με εμπειρία σε επιχειρηματικά σχέδια, συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Συλλογικό όραμα της ομάδας αυτής είναι με τη χρήση του λογισμικού να ενισχύσουν τους ανθρώπους σε όλο τον κόσμο, με εργαλεία, υπηρεσίες και πληροφορίες, προκειμένου να επιταχυνθεί η υιοθέτηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας.

Από την κυκλοφορία του, το λογισμικό έχει αγοραστεί (ή έχει αποκτηθεί δωρεάν για ερευνητικούς σκοπούς από την επίσημη ιστοσελίδα της εταιρείας) από περισσότερους από 80.000 ανθρώπους σε 193 χώρες συνολικά. Πρόκειται για μία παγκόσμια κοινότητα που αποτελείται από πρωτοποριακούς επαγγελματίες στον τομέα της διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για να αξιοποιηθεί σε ακόμα μεγαλύτερο βαθμό η συλλογική σοφία αυτής της ομάδας, η εταιρεία Homer Energy LLC έχει

δημιουργήσει και μία διαδικτυακή κοινότητα με φόρουμ συζητήσεων, όπου οι χρήστες μπορούν να συνεργαστούν ο ένας με τον άλλο.

9.1.2 Υπηρεσίες σχεδιασμού ‘Μικροδικτύων’ ως Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Επιλογή του έργου και ταχεία αξιολόγηση

Το λογισμικό Homer Energy αποτελεί την ιδανική λύση για την πιθανοτική ανάλυση μικροδικτύων. Οι σχεδιαστές θα πρέπει να καθορίζουν γρήγορα και εύστοχα αν ένα έργο είναι πολλά υποσχόμενο ώστε να προχωρήσουν στην υλοποίησή του. Οι κατασκευαστικές εταιρίες χρειάζονται μία ανεξάρτητη, μεροληπτική πηγή αναθεώρησης των προτεινόμενων προτάσεων, ενώ από την άλλη οι διαχειριστές του προγράμματος πρέπει να δίνουν προτεραιότητα σε δυνητικά έργα. Όλες αυτές τις παραμέτρους τις υπολογίζει το λογισμικό Homer Energy, που χρησιμοποιεί είτε κατά προσέγγιση δεδομένα, είτε λεπτομερή δεδομένα όταν αυτά είναι διαθέσιμα. Η ανάλυση ευαισθησίας που προσφέρει το λογισμικό, προσδιορίζει το που χρειάζεται να γίνουν επιπλέον προσπάθειες για την συλλογή δεδομένων που θα φανούν πολύτιμα στην προσπάθεια εξεύρεσης της βέλτιστης λύσης.

Προκαταρκτική ανάλυση σκοπιμότητας και αρχική σύλληψη σχεδιασμού

Οι νέες τεχνολογίες παρέχουν μία απίστευτη σειρά από πιθανές επιλογές σχεδιασμού μικροδικτύων. Το λογισμικό βοηθάει τους σχεδιαστές να καθορίσουν ποιες ανανεώσιμες πηγές (ηλιακή, αιολική βιομάζα ή μικρά υδροηλεκτρικά), τεχνολογίες αποθήκευσης (π.χ. μολύβδου – οξέος, ψευδαργύρου, βαναδίου, νικελίου, λιθίου, σφόνδυλων ή υδρογόνου) είναι οικονομικά αποδοτικές, πως πρέπει να γίνει η κατανομή και η διαχείριση του φορτίου, και ποιοι συνδιασμοί συμπαραγωγής θερμότητας – ηλεκτρικής ενέργειας και γεννήτριες ντίζελ έχει νόημα να βελτιστοποιηθούν, και εν συνεχεία να προσδιοριστεί η βέλτιστη χωρητικότητα – ισχύς για κάθε μία από αυτές. Το λογισμικό απαλλάσσει τους σχεδιαστές από το να καταβάλλουν μεγάλη προσπάθεια και τις αυξημένες δαπάνες, περιορίζοντας τις επιλογές του αρχικού σχεδιασμού στο στάδιο της προκαταρκτικής ανάλυσης σκοπιμότητας (πιθανοτική ανάλυση), αντί της διαδικασίας κατασκευής λεπτομερών μηχανικών σχεδίων που θα αντικαθιστούν τα ήδη υπάρχοντα μη βέλιστα σχέδια του συστήματος.

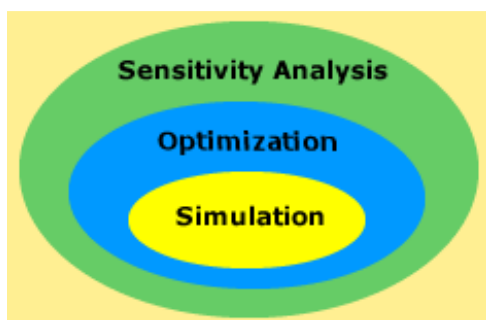
Προσαρμοσμένα εργαλεία σχεδιασμού για χρήση από τους μηχανικούς

Συχνά, οι σχεδιαστές μηχανικοί ενός έργου θέλουν περισσότερες τεχνικές λεπτομέρειες από αυτές που παρουσιάζονται στις εκδόσεις του Homer Energy που απευθύνονται στο ευρύ κοινό. Για παράδειγμα, μπορεί να θέλουν αλγόριθμους ή οικονομικές δομές που να είναι ειδικά σχεδιασμένες για τα έργα τους ή ακόμη και ιδιοταγείς τεχνολογίες. Η εταιρεία Homer Energy LLC θα δημιουργήσει προσαρμοσμένες και επώνυμες εκδόσεις του λογισμικού Homer Energy για τους πελάτες – επιχειρήσεις που το επιθυμούν, ώστε να είναι εφικτή η χρήση του προγράμματος από τους μηχανικούς του προσωπικού τους.

9.1.3 Προσομοίωση, βελτιστοποίηση, ανάλυση ευαισθησίας

Το λογισμικό Homer Energy παρέχει με αναλυτική χρονολογική ακρίβεια την προσομοίωση και τη βελτιστοποίηση σε ένα μοντέλο που είναι σχετικά απλό και εύκολο στη χρήση, ενώ παράλληλα είναι προσαρμόσιμο σε μία ευρεία ποικιλία σχεδίων. Για ένα σύστημα ενέργειας της τάξης ενός χωριού ή μίας κοινότητας, το πρόγραμμά μας μπορεί να μοντελοποιήσει τόσο τους τεχνικούς όσο και τους οικονομικούς παράγοντες που συμμετέχουν στο έργο. Για μεγαλύτερα συστήματα, το λογισμικό μας μπορεί να προσφέρει μία σημαντική επισκόπηση που συγκρίνει το κόστος και τη σκοπιμότητα των διαφόρων συνθέσεων του. Στη συνέχεια, οι σχεδιαστές μπορούν να χρησιμοποιήσουν πιο εξειδικευμένο λογισμικό για να μοντελοποιήσουν τις τεχνικές επιδόσεις.

Το λογισμικό Homer Energy είναι προσιτό σε ένα ευρύ σύνολο χρηστών, συμπεριλαμβανομένων των τεχνικών που δεν έχουν άμεση σχέση με τη λήψη αποφάσεων. Η χρονολογική προσομοίωση είναι απαραίτητη για την μοντελοποίηση διαφόρων πηγών, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια και για τη συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, όπου το θερμικό φορτίο είναι μεταβλητό. Η ανάλυση ευαισθησίας του λογισμικού βοηθά στο να καθοριστεί ο πιθανός αντίκτυπος των αστάθμητων παραγόντων, όπως οι τιμές των καυσίμων ή της ταχύτητας του ανέμου σε ένα δεδομένο σύστημα, με την πάροδο του χρόνου.



Το λογισμικό Homer Energy μοντελοποιεί τόσο συμβατικές όσο και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας:

Πηγές ισχύος:	Αποθηκευτικά μέσα:
<ul style="list-style-type: none"> • Ηλιακά φωτοβολταϊκά 	<ul style="list-style-type: none"> • Σφόνδυλοι
<ul style="list-style-type: none"> • Ανεμογεννήτριες 	<ul style="list-style-type: none"> • Συστοιχία μπαταριών
<ul style="list-style-type: none"> • Υδροηλεκτρική ενέργεια 	<ul style="list-style-type: none"> • Μπαταρίες ροής
<ul style="list-style-type: none"> • Ενέργεια από βιομάζα 	<ul style="list-style-type: none"> • Υδρογόνο
<ul style="list-style-type: none"> • Γεννήτριες: ντίζελ, βενζίνη, βιοαέριο, εναλλακτικά καύσιμα 	
<ul style="list-style-type: none"> • Ηλεκτρικό δίκτυο κοινής ωφέλειας 	<p style="text-align: center;">Φορτία:</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Μικροστρόβιλος 	<ul style="list-style-type: none"> • Καθημερινού προφίλ με εποχιακή διακύμανση
<ul style="list-style-type: none"> • Κυψέλες καυσίμου 	<ul style="list-style-type: none"> • Δευτερεύοντα – διακοπτόμενης λειτουργίας φορτία (άντληση νερού – ψύξη)
	<ul style="list-style-type: none"> • Θερμικά (θέρμανση χώρων, ξήρανση καλλιεργειών)
	<ul style="list-style-type: none"> • Μέτρα ενεργειακής απόδοσης

Πίνακας 10: Ενεργειακό πεδίο δραστηριοποίησης του λογισμικού Homer Energy.

9.2 Περιβάλλον εργασίας χρήστη

Το περιβάλλον εργασίας χρήστη του λογισμικού Homer Energy έχει σχεδιαστεί για να απλοποιήσει το έργο της εισόδου δεδομένων και προσφέρει πολλές μορφές για την προβολή των αποτελεσμάτων. Το πρόγραμμα προσφέρει ένα σύστημα βοήθειας που παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τη χρήση του λογισμικού και το πως λειτουργεί, καθώς και συνδέσμους προς ιστοσελίδες με πληροφορίες για τους απαραίτητους πόρους. Ο οδηγός που συμπεριλαμβάνεται στο λογισμικό (Getting Started Guide), καθοδηγεί τον χρήστη μέσα από τα βήματα μίας πλήρους ανάλυσης ώστε να μάθει να χρησιμοποιεί το λογισμικό μόνος του.

Οι σχηματικές απεικονίσεις εμφανίζουν τα στοιχεία που θα προσομοιώσει το λογισμικό μας και μας επιτρέπει να έχουμε γρήγορη πρόσβαση στα τεχνικά και τα οικονομικά στοιχεία κάθε συνιστώσας. Το λογισμικό μας δίνει τη δυνατότητα με τη χρήση καθορισμένων

εκτελέσιμων παραθύρων να μπορούμε να εισάγουμε τις μεταβλητές μας για το/τα φορτία, τις συνιστώσες και τους απαραίτητους πόρους, ή να συνθέτει μόνο του τις απαραίτητες πληροφορίες που έχουν να κάνουν με την ηλεκτρική ζήτηση, την χωρητικότητα και το κόστος των συστατικών στοιχείων και τη διαθεσιμότητα των πόρων.

Επίσης, τα εκτελέσιμα παράθυρα *Βελτιστοποίησης* και *Ανάλυσης Ευαισθησίας* μας επιτρέπουν να εισάγουμε τιμές, για τις περιπτώσεις που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε το λογισμικό Homer Energy για να βελτιστοποιήσουμε το σχεδιασμό ενός συστήματος, ώστε να πετύχουμε το χαμηλότερο κόστος ανά κύκλο – διάρκεια ζωής, ή όταν θέλουμε να εκτελέσουμε μία ανάλυση ευαισθησίας σε μία μεταβλητή εισόδου.

Το λογισμικό Homer Energy εμφανίζει τα αποτελέσματα της *Προσομοίωσης*, της *Βελτιστοποίησης* και της *Ευαισθησίας*, σε πίνακες και σε γραφικές παραστάσεις. Με αυτόν τον τρόπο μας δίνεται η δυνατότητα να εξάγουμε του πίνακες για χρήση σε ένα υπολογιστικό φύλλο ή κάποιο άλλο λογισμικό και τα γραφήματα για χρήση σε εκθέσεις και παρουσιάσεις.

9.3 Σημαντικότεροι πελάτες – χρήστες

Σήμερα, πάρα πολλές επιχειρήσεις που δραστηριοποιούνται στον χώρο της ενέργειας, πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα, αλλά και κυβερνητικοί οργανισμοί χρησιμοποιούν το λογισμικό Homer Energy με στόχο τη σύνθεση ενεργειακών μοντέλων μικροδικτύων βασισμένα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την εξαγωγή ρεαλιστικών τεχνοοικονομικών αποτελεσμάτων. Από τα πιο συνηθισμένα ενεργειακά έργα τα οποία συντελούνται (στο επίπεδο της μοντελοποίησης, της βελτιστοποίησης και της ανάλυσης ευαισθησίας) τα τελευταία χρόνια με τη χρήση του λογισμικού Homer Energy, είναι η εισαγωγή των υβριδικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για στρατιωτικούς σκοπούς, για την παροχή αδιάλειπτης ηλεκτρικής ενέργειας σε απομακρυσμένες από το δίκτυο τηλεπικοινωνιακές μονάδες και για ερευνητικούς σκοπούς σε πολλά ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια ανά την υφήλιο.

Τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερη σημασία έχει δοθεί στην μοντελοποίηση υβριδικών συστημάτων που θα υποστηρίζουν ενεργειακά ολόκληρα χωριά και αυτόνομα συμπλέγματα νήσων (island governments) που βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις από το χερσαίο ηπειρωτικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Πλέον, τα υβριδικά συστήματα συναντώνται κατά κύριο λόγο σε δημοτικές εγκαταστάσεις, νοσοκομεία και σε επιχειρήσεις όπως τα διυλιστήρια πετρελαίου και φυσικού αερίου, οπουδήποτε δηλαδή η αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας είναι υποχρεωτική.

Παρακάτω αναφέρονται ορισμένοι από τους σημαντικότερους πελάτες – χρήστες του λογισμικού Homer Energy, όπως αυτοί αναφέρονται και στην επίσημη ιστοσελίδα του προγράμματος:

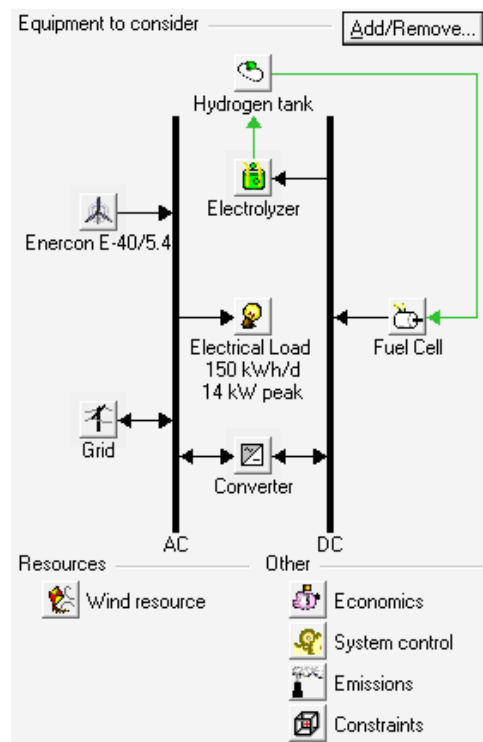
- Advanced Engineering Associates International
- The Center for Sustainable Development
- Electricite de France
- The European Institute for Energy Research
- Florida International University
- General electric

- Lockheed Martin
- National Rural Electric Cooperative Association
- The Government of Anguilla
- Sun Energy
- ZBB Energy Corporation
- US Agency for International Development
- US Environmental Protection Agency
- US Army
- United Nations Environment Programme [85]

9.4 Μελέτη και βελτιστοποίηση συστήματος παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου με χρήση αιολικής ενέργειας

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό Homer Energy μοντελοποιήσαμε ένα σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου με χρήση αιολικής ενέργειας, παρόμοιο με αυτό που έχει εγκατασταθεί στο Λαύριο Αττικής εκ μέρους του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας. Το πρόγραμμα μας δίνει την δυνατότητα να εισάγουμε αναλυτικά όλες τις απαραίτητες παραμέτρους, που αφορούν το εκάστοτε ενεργειακό σύστημα που προσομοιώνουμε, έτσι ώστε τα αποτελέσματά μας να αναταποκρίνονται όσο το δυνατόν γίνεται με τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Αρχικά, ο στόχος μας ήταν ο σχεδιασμός του συστήματος με τρόπο ώστε να αποδίδεται σωστά ο ρόλος κάθε υποσυστήματος του τεχνικού εξοπλισμού μας.



Από ειδικές βιβλιοθήκες του προγράμματος επιλέγουμε τον εξοπλισμό που κρίνουμε κατάλληλο για το δικό μας σύστημα. Όπως μπορούμε να διακρίνουμε στην παραπάνω εικόνα, έχουμε επιλέξει όλα τα υποσυστήματα που υπάρχουν και στην πραγματική εγκατάσταση στο χώρο του Λαυρίου και τα έχουμε συνδέσει ανάλογα με το που ανήκουν (βάση της ηλεκτρικής τους συμπεριφοράς) στους δύο ζυγούς, AC και DC. Η επιλογή αυτή έχει γίνει με βάση τα πραγματικά δεδομένα – τεχνικά χαρακτηριστικά που έχουμε για κάθε ένα από αυτά.

Στην συνέχεια από την κατηγορία ‘Πόροι’ εισάγουμε στο σύστημα όλες εκείνες τις μεταβλητές που το κάνουν μοναδικό και θα παίξουν σημαντικό ρόλο στην έξοδο των αποτελεσμάτων. Στη δεξιά πλευρά όπως μπορούμε να διακρίνουμε μπορούμε να εισάγουμε οικονομικά στοιχεία, όπως η ετήσια μείωση της τιμής των επιμέρους τμημάτων που συντελούν το σύστημα, το πόσα χρόνια θα διαρκέσει η λειτουργία της εγκατάστασης που σχεδιάζουμε, καθώς και ο καθορισμός του κόστους λειτουργίας ανά έτος αλλά και το ποσοστό της απόκλισης που μπορεί να προκύψει στο κόστος του κεφαλαίου. Εν συνεχεία, μπορούμε να ρυθμίσουμε το πως θα ελέγχει το σύστημα τις διάφορες γεννήτριες και τα αποθηκευτικά μέσα του συστήματος ανάλογα με τις προσωπικές μας επιλογές, θέτοντας όρια και προϋποθέσεις στην συνεργασία του φορτίου με τα διάφορα είδη γεννητριών. Από την επιλογή ‘Εκπομπές’ μπορούμε να ρυθμίσουμε το χρηματικό πόσό που θα αφαιρείται από το συνολικό κέρδος του έργου σαν ποινή για την απελευθέρωση αερίων του θερμοκηπίου. Ορίζουμε τιμές ανάλογες με την νομοθεσία κάθε χώρας και υπολογίζονται με βάση τους τόνους που απελευθερώνει στην ατμόσφαιρα το σύστημά μας ανά έτος λειτουργίας. Στην τελευταία επιλογή που μας δίνεται ‘Constraints’, ουσιαστικά εισάγουμε περιορισμούς – προϋποθέσεις που ορίζουν ως ένα βαθμό εάν το σύστημά μας μπορεί να πραγματοποιηθεί, τηρώντας τις αναλογίες που πρέπει να έχει ένα σύστημα που αποτελείται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.

Έχοντας επιλέξει μία ανεμογεννήτρια στον εξοπλισμό μας σαν μέσο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι φανερό πως θα πρέπει να ορίσουμε και τα ανεμολογικά στοιχεία της περιοχής που θα τοποθετηθεί για να λάβουμε μία καθαρή εικόνα της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος ανά χρόνο. Πάλι στην κατηγορία ‘Πόροι’ βλέπουμε την επιλογή ‘Wind resource’, μέσω της οποίας ορίζουμε τις λεπτομέρειες της περιοχής που θα τοποθετηθεί η ανεμογεννήτρια μας. Στην παρακάτω εικόνα παραθέτουμε τον πίνακα που συμπληρώνουμε με τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου σε m/s ανά μήνα για την συγκεκριμένη περιοχή, αλλά και την μέση ταχύτητα για όλο το ημερολογιακό έτος που υπολογίζει και μας παρουσιάζει το πρόγραμμα.

Month	Wind Speed
	(m/s)
January	8.099
February	7.985
March	6.673
April	5.814
May	5.191
June	4.738
July	8.923
August	7.255
September	7.487
October	6.132
November	6.843
December	8.426
Annual average:	6.964

Στην συνέχεια, και αφού έχουμε θέσει τις παραμέτρους για κάθε στοιχείο του συστήματος ξεχωριστά (Ανεμογεννήτρια, ηλεκτρικό δίκτυο, ηλεκτρικό φορτίο, μετατροπέας, μονάδα ηλεκτρόλυσης, κυψέλη καυσίμου, δεξαμενή υδρογόνου), πρέπει να ορίσουμε και τις πιθανές τιμές που μπορεί να πάρει κάθε ένα από αυτά ώστε να δημιουργηθεί το τελικό μας βελτιστοποιημένο σύστημα. Για να συμβεί αυτό ορίζουμε τα μεγέθη σε ειδικό παράθυρο του προγράμματος Homer Energy και ανά κατηγορία του εξοπλισμού. Γνωρίζοντας τις τιμές που έχει το υπάρχον σύστημα στο Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας επιλέγουμε να τις χρησιμοποιήσουμε για να δούμε αν όντως είναι οι βέλτιστες. Όμως δεν μένουμε σε αυτές αλλά προσθέτουμε και άλλες τιμές μεγαλύτερες και μικρότερες από τις ‘τιμές αναφοράς’ του συστήματος με σκοπό την βελτιστοποίησή του.

Search Space

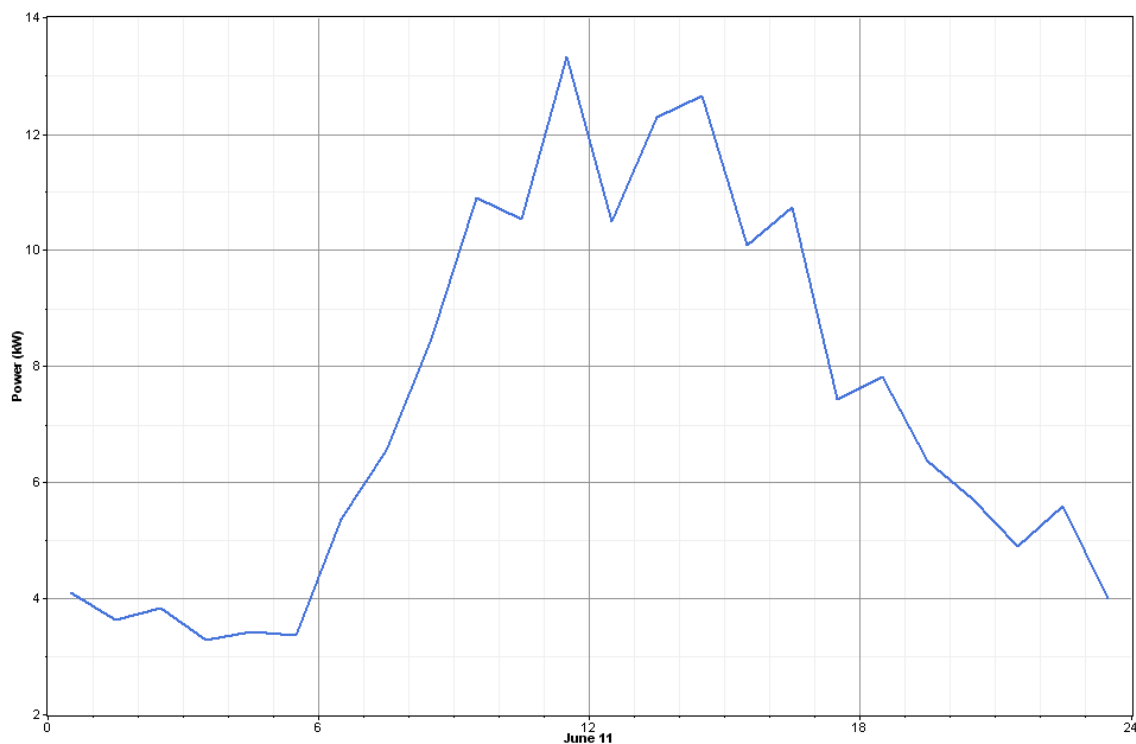
This table displays the values of each optimization variable. HOMER builds the search space, or set of all possible system configurations, from this table and then simulates the configurations and sorts them by net present cost. You can add and remove values in this table or in the Sizes to Consider table in the appropriate input window.

Hold the pointer over an element name or click Help for more information.

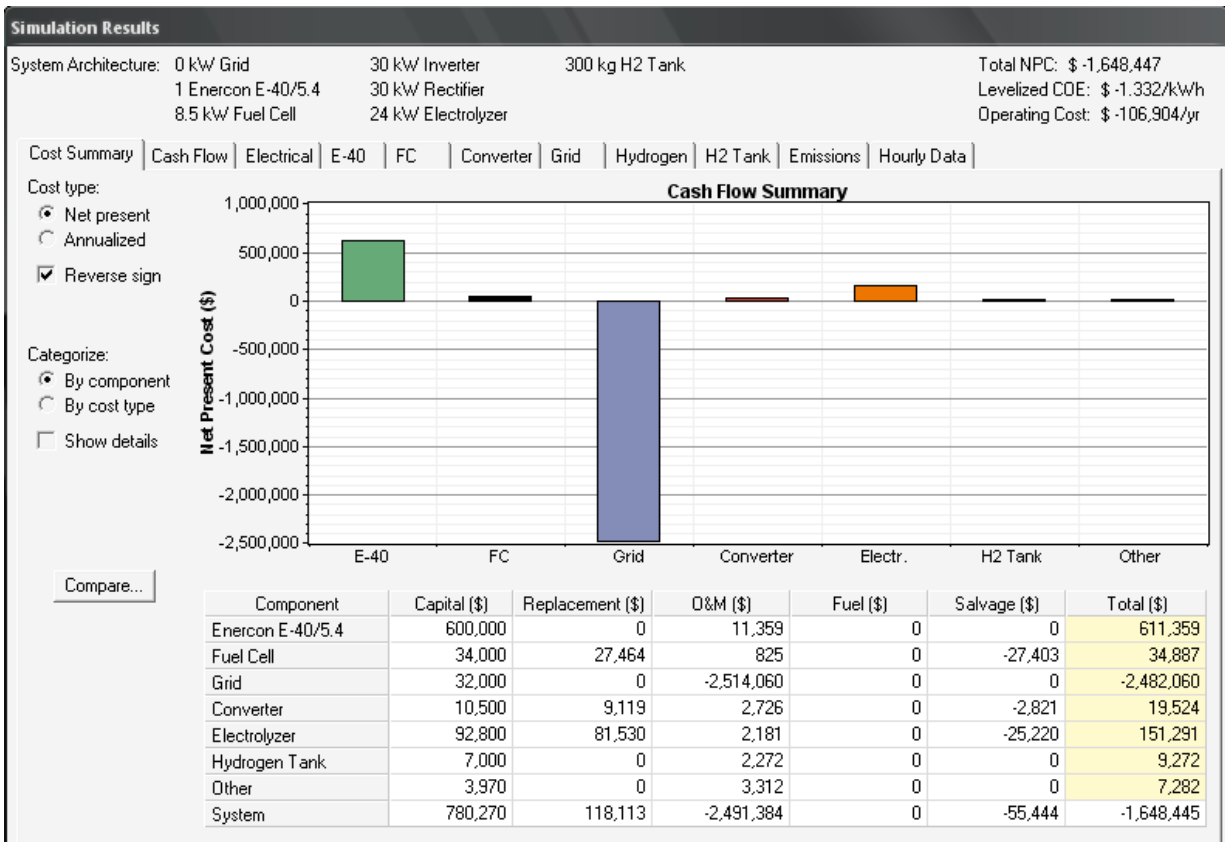
	E-40 (Quantity)	FC (kW)	Grid (kW)	Converter (kW)	Electrolyzer (kW)	H2 Tank (kg)
1	0	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00
2	1	4.00		10.00	10.00	50.00
3		4.50		20.00	11.00	100.00
4		5.00		30.00	12.00	150.00
5		5.50		40.00	13.00	200.00
6		6.00		50.00	14.00	250.00
7		6.50		55.00	15.00	300.00
8		7.00		60.00	16.00	350.00
9		7.50		65.00	17.00	400.00
10		8.00		70.00	18.00	450.00

Έτσι, λοιπόν, όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζουμε ένα μέρος των τιμών που έχουμε εισαγάγει στο πρόγραμμα ώστε να τις λάβει υπόψην κατά την προσομείωση και να υπολογίσει όλους τους πιθανούς συνδιασμούς.

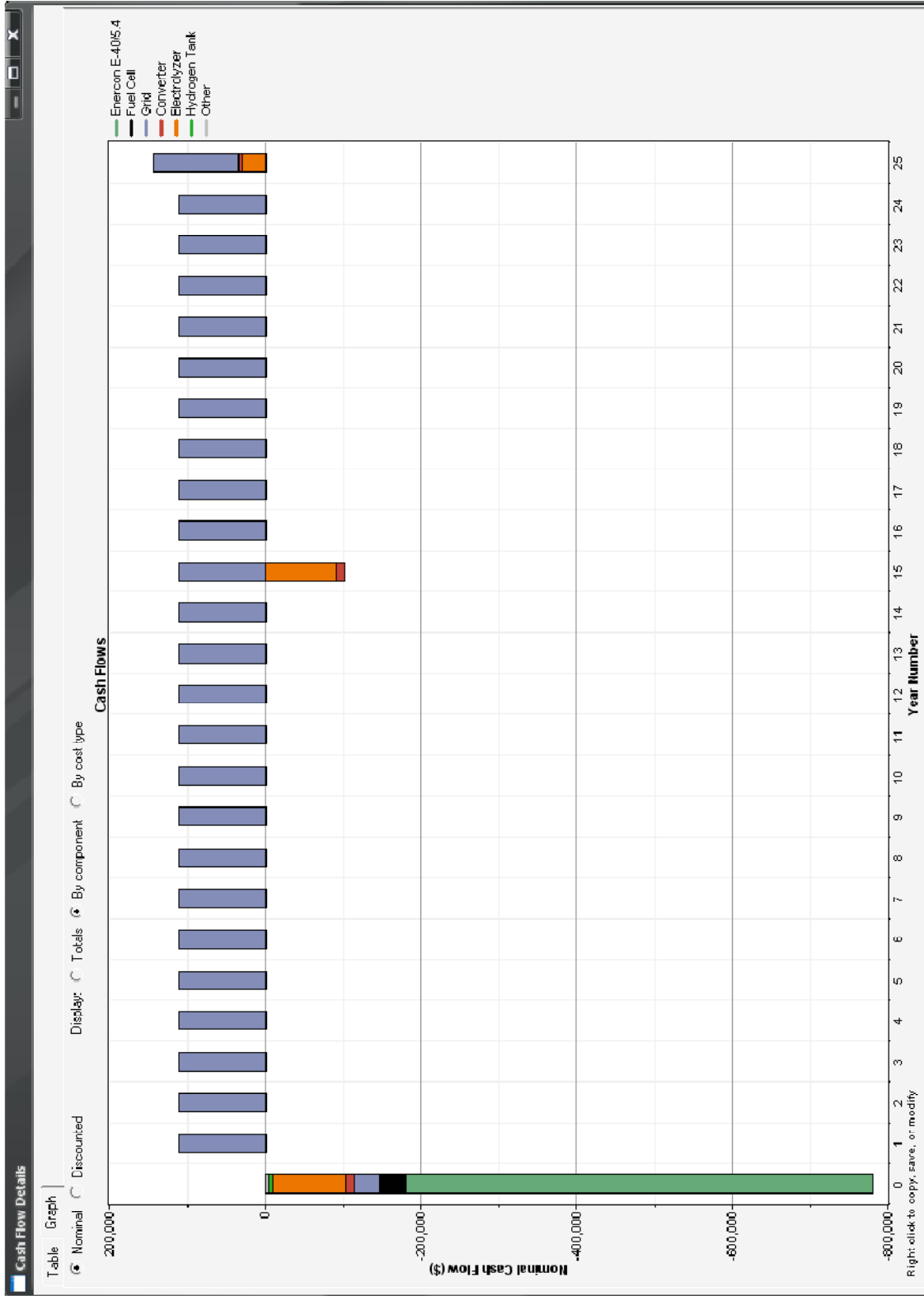
Θέλοντας να δούμε πως θα λειτουργήσει το σύστημά μας και τα επιμέρους υποσυστήματα επιλέξαμε να τοποθετήσουμε και ένα ηλεκτρικό φορτίο AC βιομηχανικού προφίλ όπως φαίνεται και στο παρακάτω γράφημα. Το συγκεκριμένο φορτίο επιλέχτηκε με στόχο να μην υπάρχουν σημαντικές αλλαγές στην ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος ανά ημέρα, για αυτό και θεσπίσαμε μία μεταβολή της τάξης του $\pm 10\%$. Ο συνολικός ετήσιος μέσος όρος ορίστηκε στις 150 kWh/d.



Έχοντας τελειώσει με τον σχεδιασμό του συστήματός μας και αφού ορίσαμε όλες τις απαραίτητες μεταβλητές, είμαστε έτοιμοι να 'τρέξουμε' την προσομοίωση του λογισμικού μας. Η διαδικασία αυτή ανάλογα με τους πόρους που χρησιμοποιούμε και τον αριθμό των τιμών που θέλουμε να προσομοιώσουμε μεταβάλλεται, κυρίως όταν έχουμε να κάνουμε και ανάλυση ευαισθησίας. Τελειώνοντας το πρόγραμμα την προσομοίωση μας εμφανίζει όλους τους συνδιασμούς που πραγματοποίησε με σειρά προτεραιότητας, από την βέλτιστη (πάνω μέρος της οθόνης) έως την χειρίστη (κάτω μέρος της οθόνης). Επιλέγοντας εμείς την βέλτιστη λύση μπορούμε να δούμε αναλυτικά μέσω παραθύρων που προσφέρει το λογισμικό Homer Energy όλες τις πληροφορίες, τεχνικές και οικονομικές, που έχει υπολογίσει. Στις δύο επόμενες εικόνες μπορούμε να διακρίνουμε μία σύντομη περίληψη του κόστους του έργου που πραγματοποιούμε αλλά και μία αναλυτική παρουσίαση των ταμειακών ροών με την βοήθεια του γραφήματος. Και στις δύο περιπτώσεις αναφερόμαστε σε τιμές που αφορούν το συνολικό κόστος μέσα στα 25 έτη που έχουμε ορίσει ως διάρκεια ζωής του έργου μας.



Αρχικά, παρατηρούμε ότι στο άνω μέρος του παραθύρου αναφέρονται τα μεγέθη των υποσυστημάτων που επιλέχθηκαν ως τα βέλτιστα ώστε να συγκροτηθεί το σύστημά μας. Στο πίνακάκι στο κάτω μέρος της εικόνας βλέπουμε τα οικονομικά στοιχεία του συστήματος. Στην κατηγορία Κεφάλαιο 'Capital' βλέπουμε πόσο κόστισε κάθε ένα από τα υποσυστήματα μας κατά την αρχική τους αγορά, ενώ στην ακριβώς διπλανή στήλη έχουμε την κατηγορία Αντικατάστασης 'Replacement', στην οποία γίνεται αναφορά στα υποσυστήματα που χρειάζεται να αντικατασταθούν μέσα στην 25ετία και την νέα τιμή που έχουν ανάλογα με την πτώση στις τιμές κάθε τμήματος του εξοπλισμού λόγω της ανάπτυξης της τεχνολογίας. Επίσης γίνεται αναφορά στο κόστος λειτουργίας και συντήρησης του συστήματος, στα χρήματα που εξοικονομήθηκαν στο τέλος του έργου, διότι κάποια υποσυστήματά μας δεν έφθασαν στο τέλος της διάρκειας ζωής τους, άρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξανά. Το κυριότερο ωστόσο στατιστικό στοιχείο που διακρίνουμε είναι το συνολικό οικονομικό κόστος του συστήματος μας. Βλέπουμε ότι η τιμή που μας δίνει είναι -1,648,445\$ και σε ευρώ -1,268,229€. Το - μπροστά από την τιμή σημαίνει πως τα χρήματα αυτά μας τα προσφέρει το σύστημα, δηλαδή αποτελούν το κέρδος μας. Το κέρδος αυτό δικαιολογείται αφού η παραγωγή σε ηλεκτρική ενέργεια της ανεμογεννήτριας μας είναι αρκετή για να καλύψει το φορτίο μας, τις λειτουργίες των υποσυστημάτων και φθάνει για να πωληθεί και στο δίκτυο στο οποίο είμαστε συνδεδεμένοι.



Οι μηνιαίες πωλήσεις στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν πολύ σημαντικό τμήμα της μελέτης μας καθώς έτσι μπορούμε να προσδιορίσουμε όχι μόνο το ετήσιο κέρδος από τις πωλήσεις ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και ένας δεύτερος τρόπος να καταλάβουμε ποιους μήνες έχουμε περισσότερη παραγωγή ενέργειας δηλαδή μεγαλύτερη μέση ταχύτητα ανέμου στην περιοχή που έχουμε εγκαταστήσει το σύστημά μας.

Month	Energy	Energy	Net	Peak	Energy	Demand
	Purchased	Sold	Purchases	Demand	Charge	Charge
	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kW)	(\$)	(\$)
Jan	0	142,878	-142,878	0	-12,573	0
Feb	0	125,986	-125,986	0	-11,087	0
Mar	0	97,943	-97,943	0	-8,619	0
Apr	0	67,800	-67,800	0	-5,966	0
May	0	51,058	-51,058	0	-4,493	0
Jun	0	37,245	-37,245	0	-3,278	0
Jul	0	165,055	-165,055	0	-14,525	0
Aug	0	116,479	-116,479	0	-10,250	0
Sep	0	120,096	-120,096	0	-10,568	0
Oct	0	80,326	-80,326	0	-7,069	0
Nov	0	100,217	-100,217	0	-8,819	0
Dec	0	152,418	-152,418	0	-13,413	0
Annual	0	1,257,502	-1,257,502	0	-110,660	0

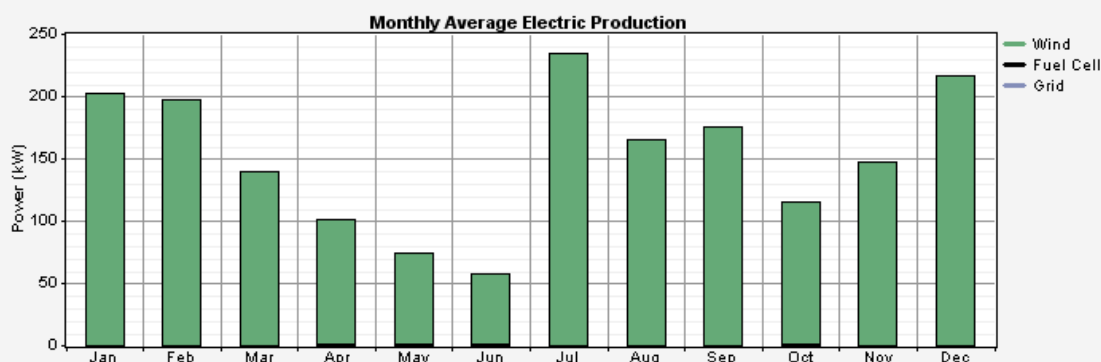
Παρατηρούμε από τον πίνακα πως έχουμε μόνο πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο και για αυτό παρουσιάζονται και τα ανάλογα οικονομικά οφέλη. Αυτό οφείλεται στο ότι έχουμε μοντελοποιήσει με τέτοιο τρόπο το δίκτυό μας ώστε να μην αγοράζουμε ηλεκτρική ενέργεια, αλλά μόνο να πουλάμε.

Production	kWh/yr	%
Wind turbine	1,329,007	100
Fuel Cell	5,094	0
Grid purchases	0	0
Total	1,334,101	100

Consumption	kWh/yr	%
AC primary load	54,461	4
Electrolyzer load	16,653	1
Grid sales	1,257,502	95
Total	1,328,616	100

Quantity	kWh/yr	%
Excess electricity	2,034	0.15
Unmet electric load	289	0.53
Capacity shortage	598	1.09

Quantity	Value
Renewable fraction	1.00



Φθάνοντας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του συστήματος βλέπουμε μερικά από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά που μας δίνει η προσομοίωση με το Homer Energy. Αυτά είναι οι παραγόμενες kWh/yr τόσο της ανεμογεννήτριας όσο και της κυψέλης καυσίμου, το συνολικό ποσοστό πώλησης και αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, αλλά και οι kWh που αφορούν το ηλεκτρικό μας φορτίο και το φορτίο της ηλεκτρόλυσής μας ανά έτος λειτουργίας. Επίσης, μπορούμε να δούμε πόσο είναι το πλεόνασμα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί, το ποσοστό του φορτίου που μένει ανικανοποίητο κατά τη διάρκεια του έτους, καθώς και η υστέρηση μεταξύ της απαιτούμενης και της πραγματικής λειτουργικής ικανότητας. Τέλος, μας δίνεται το ποσοστό χρησιμοποίησης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, δηλαδή το τμήμα της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος που προέρχεται από Α.Π.Ε. Η εξίσωση που μας δίνει το ποσοστό χρησιμοποίησης Α.Π.Ε είναι η εξής:

$$f_{ren} = \frac{E_{ren} + H_{ren}}{E_{tot} + H_{tot}}$$

όπου:

E_{ren} = ανανεώσιμη ηλεκτρική παραγωγή [kWh]

H_{ren} = ανανεώσιμη θερμική παραγωγή [kWh]

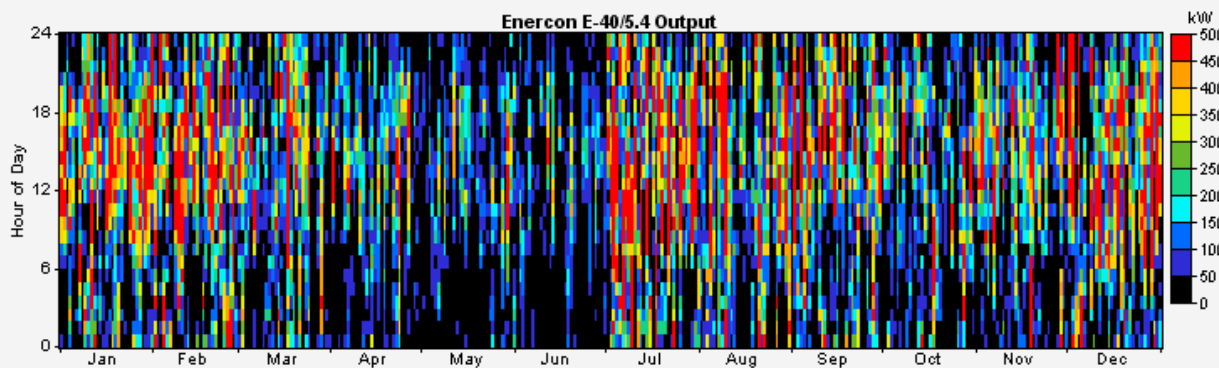
E_{tot} = συνολική παραγωγή ηλεκτρικής [kWh]

H_{tot} = συνολική θερμική παραγωγή [kWh]

Στην περίπτωσή μας ο συντελεστής αυτός ισούται με την μονάδα (1) κάτι που το επιθυμούσαμε από την αρχή αφού έχουμε σχεδιάσει ένα σύστημα που να βασίζεται αποκλειστικά σε Ανανεώσιμες Πηγές ενέργειας.

Quantity	Value	Units
Total rated capacity	500	kW
Mean output	152	kW
Capacity factor	30.3	%
Total production	1,329,007	kWh/yr

Quantity	Value	Units
Minimum output	0	kW
Maximum output	496	kW
Wind penetration	2,427	%
Hours of operation	8,264	hr/yr
Levelized cost	0.0202	\$/kWh



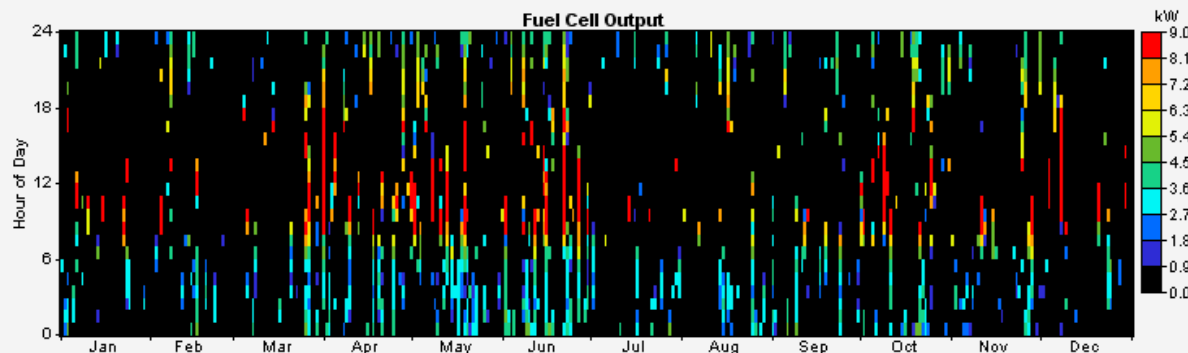
Στη συνέχεια, δίνονται πληροφορίες για τα ηλεκτρικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας μας Epercon E40 των 500 kW. Όπως είναι φυσικό αναφέρεται η ολική ονομαστική ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας, η μέση ισχύς εξόδου και η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε kWh/yr. Επίσης, προσδιορίζεται η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή εξόδου σε kW, οι ώρες λειτουργίας κατά την διάρκεια ενός ημερολογιακού έτους και ο συντελεστής διείσδυσης αιολικής ενέργειας, που ορίζεται ως η μέση ισχύς εξόδου από αιολική ενέργεια διαιρούμενη με την μέση ισχύ του πρωτεύοντος φορτίου. Από την παραπάνω παρουσίαση σε DMap γράφημα μπορούμε εύκολα να διακρίνουμε εν συντομία τις ώρες και την παραγόμενη ισχύ της ανεμογεννήτριας ανά μήνα, έχοντας έτσι μία πρώτη εικόνα των αποτελεσμάτων.

Εκτός από την ανεμογεννήτρια μας ενδιαφέρουν τα ηλεκτρικά στοιχεία της κυψέλης καυσίμου μας. Στην παρακάτω εικόνα μπορούμε να δούμε τις ώρες λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου και το πόσες φορές ξεκίνησε να λειτουργεί μέσα στη χρονιά. Οι ώρες λειτουργίας μας ενδιαφέρουν πολύ διότι η κυψέλη μας έχει διάρκεια ζωής 40.000 ώρες και έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε και μόνοι μας πότε θα χρειαστεί να αντικατασταθεί. Επίσης μπορούμε να πληροφορηθούμε για την μέγιστη, την ελάχιστη, την μέση και την ολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Και εδώ έχουμε Dmap γράφημα από το οποίο μπορούμε να διακρίνουμε τις ώρες λειτουργίας και την μεταβολή στην ισχύ εξόδου ανά μήνα.

Quantity	Value	Units
Hours of operation	1,603	hr/yr
Number of starts	498	starts/yr
Operational life	25.0	yr
Capacity factor	6.84	%
Fixed generation cost	0.850	\$/hr
Marginal generation cost	1.000204	\$/kWh

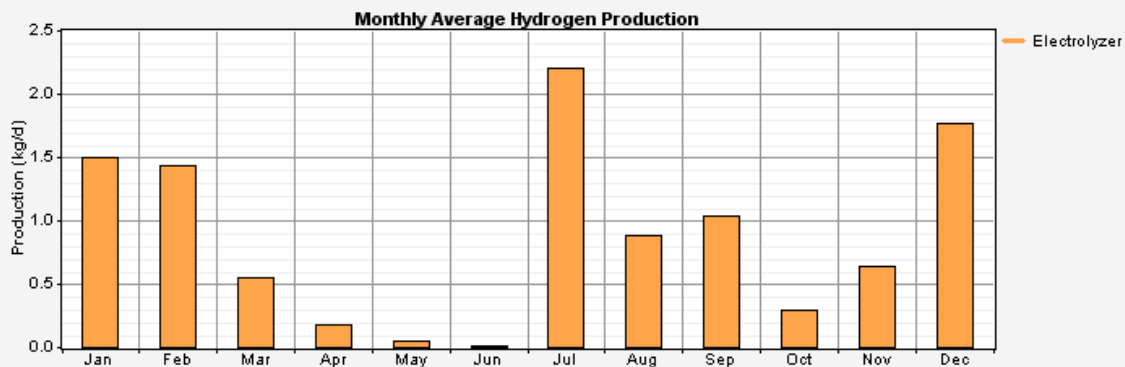
Quantity	Value	Units
Electrical production	5,094	kWh/yr
Mean electrical output	3.18	kW
Min. electrical output	0.0850	kW
Max. electrical output	8.50	kW

Quantity	Value	Units
Hydrogen consumption	319	kg/yr
Specific fuel consumption	0.063	kg/kWh
Fuel energy input	10,642	kWh/yr
Mean electrical efficiency	47.9	%



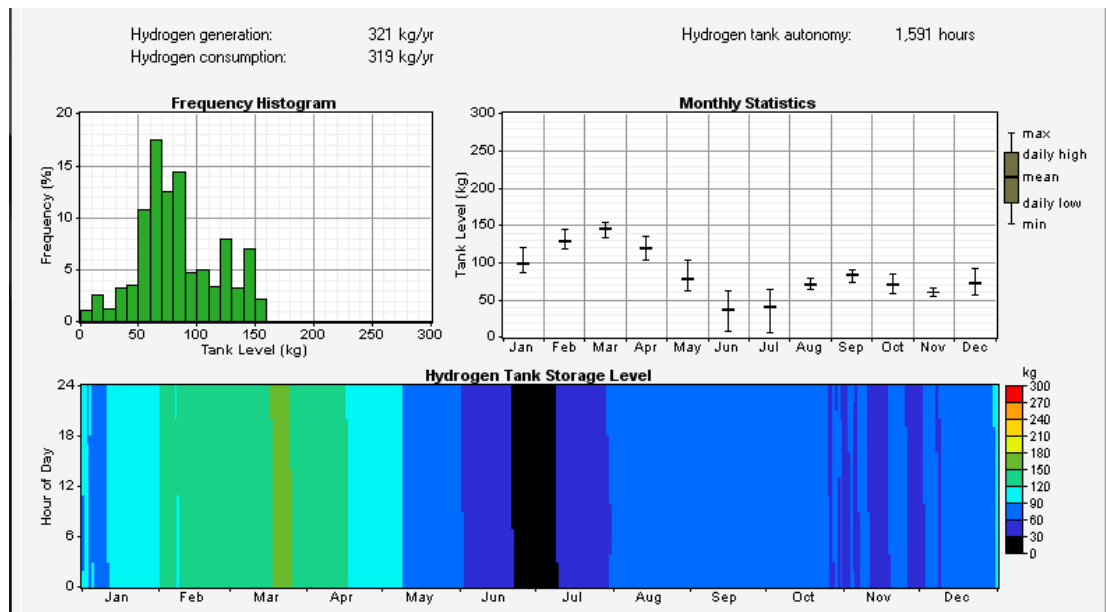
Φυσικά η μελέτη και η προσομοίωση που πραγματοποιήσαμε αφορά την παραγωγή και αποθήκευση υδρογόνου και εδώ πρέπει να τονίσουμε ότι από τα στοιχεία της κυψέλης καυσίμου αντλούμε σημαντικές πληροφορίες για το κομμάτι αυτό. Στην διάρκεια ενός έτους η κυψέλη καταναλώνει 319 kg υδρογόνου, με την ειδική κατανάλωση καυσίμου να είναι 0,063 kg/kWh και την ολική περιεκτικότητα ενέργειας του καυσίμου που καταναλώνεται ετησίως κατά την παραγωγή να είναι 10,642 kWh/yr. Πληροφορίες για την παραγωγή και αποθήκευση του υδρογόνου λαμβάνουμε και από τις επόμενες δύο εικόνες που μας παρέχει το λογισμικό. Στην πρώτη γίνεται αναφορά στα συνολικά κιλά υδρογόνου που παράγει η ηλεκτρόλυσή μας κατά την διάρκεια του έτους, 321 kg, και με τη βοήθεια του γραφήματος βλέπουμε και την κατανομή της παραγωγής ανά μήνα. Το κόστος του παραγόμενου υδρογόνου είναι -174 €/kg, κάτι το οποίο σημαίνει ότι όχι μόνο δεν χρειάζεται να αγοράσουμε υδρογόνο για το σύστημά μας από κάποιον εξωτερικό συνεργάτη αφού το παράγουμε μόνοι μας, αλλά πως έχουμε και οικονομικό κέρδος από την παραγωγή και αποθήκευσή του.

Total electrolyzer production:	321 kg/yr	Capacity factor:	0.0792
Total reformer production:	0.00 kg/yr	Capacity factor:	0.00
Total hydrogen production:	321 kg/yr		
Unmet hydrogen load:	0.00 kg/yr	(0.00 %)	
Levelized cost of hydrogen:	-226 \$/kg		

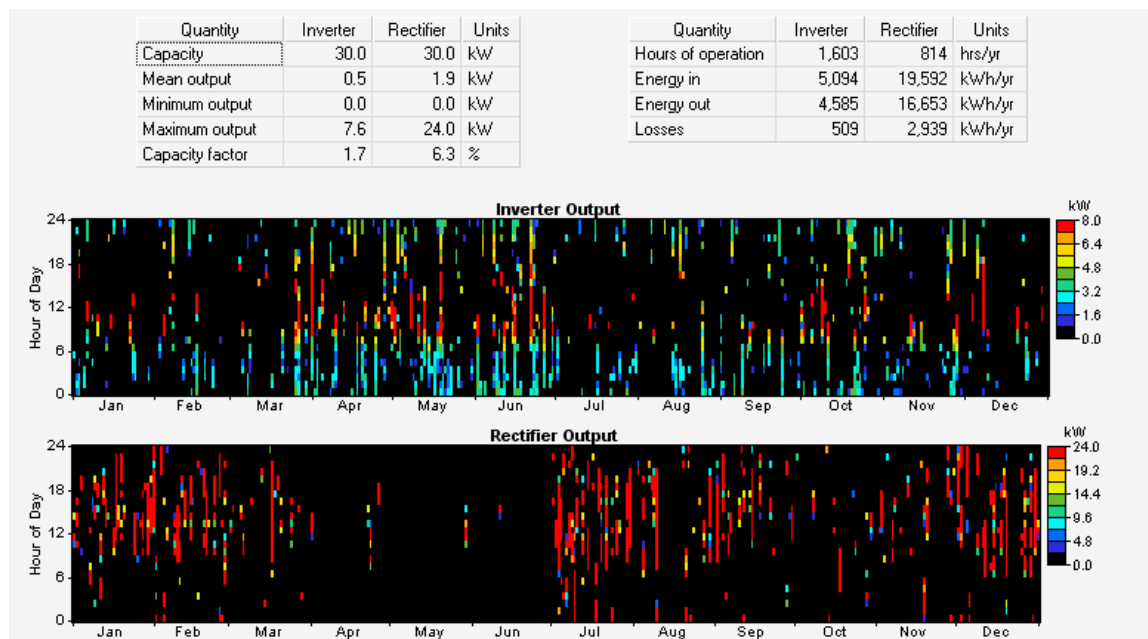


Όσον αφορά την αποθήκευση του παραγόμενου υδρογόνου έχει επιλεγεί δεξαμενή που έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύσει έως 300 kg H₂. Η αυτονομία της δεξαμενής υδρογόνου φτάνει τις 1,591 ώρες και με τη βοήθεια των παρακάτω ιστογραμμάτων μπορούμε να δούμε τόσο τα κιλά που αποθηκεύονται ανά μήνα στη δεξαμενή μας, όσο και τη συχνότητα αποθήκευσης ανά κιλό υδρογόνου. Το υδρογόνο στην δεξαμενή μας βλέπουμε ότι ελαττώνεται τους μήνες που η παραγωγή ενέργειας από την ανεμογεννήτρια είναι μειωμένη, ενώ παράλληλα οι ώρες λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου – που καταναλώνει υδρογόνο –

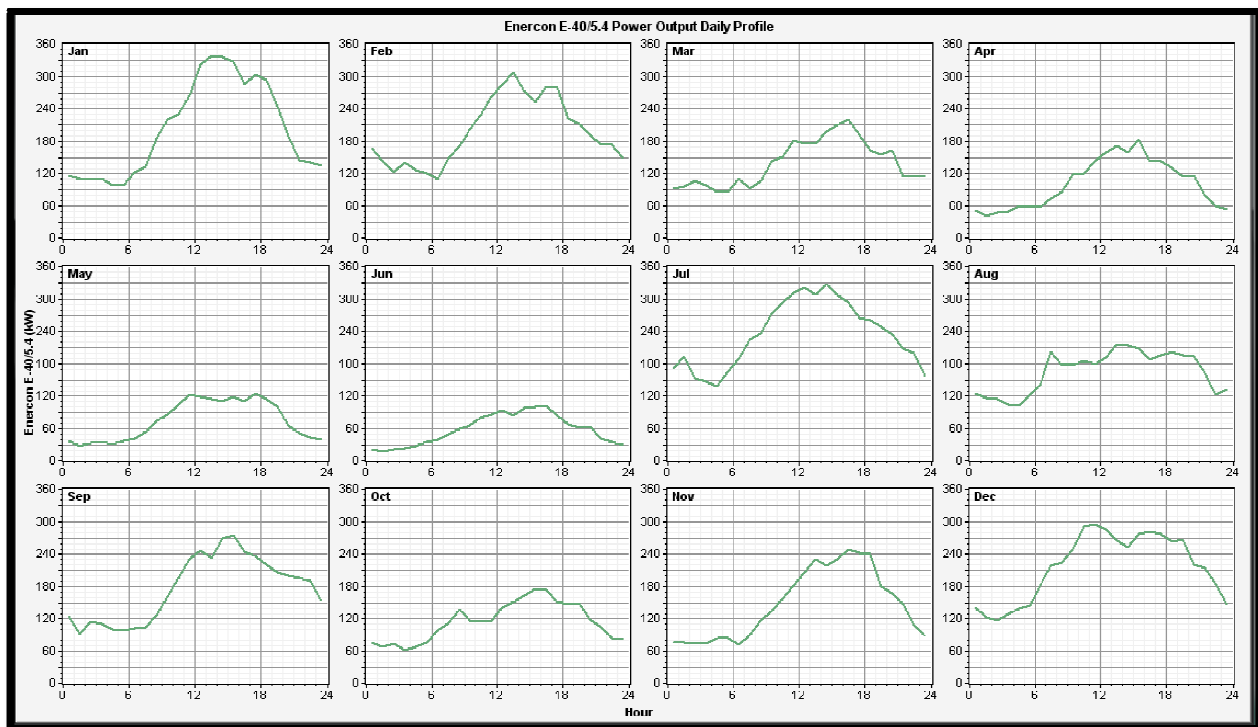
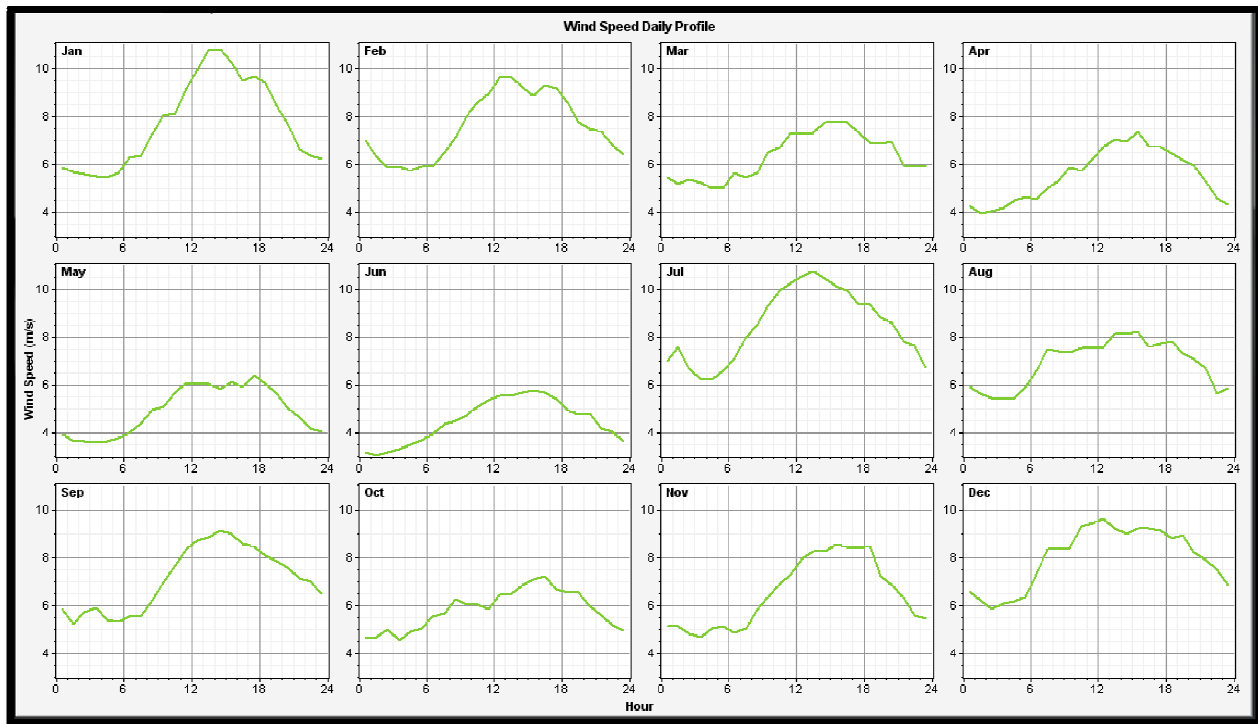
αυξάνονται. Την μεγαλύτερη πτώση στη στάθμη της δεξαμενής υδρογόνου την παρατηρούμε μεταξύ Ιουνίου και Ιουλίου που είναι και η περίοδος με την μικρότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το σύστημά μας.



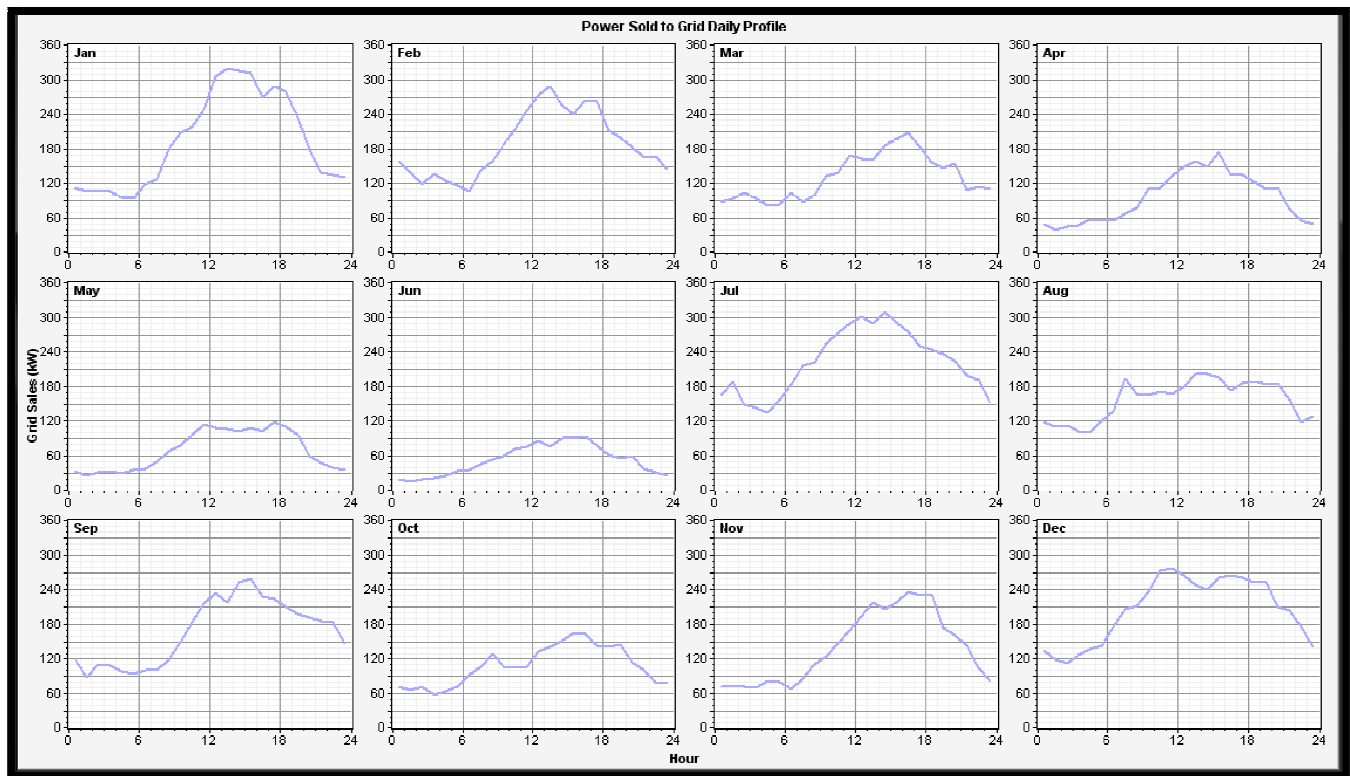
Από το σύστημά μας δεν θα μπορούσε να λείπει ο μετατροπέας μας, που περιλαμβάνει έναν ανορθωτή και έναν αντιστροφέα, ώστε να επιτυγχάνεται η σύνδεση και η αμφίδρομη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ του AC και του DC ζυγού. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ονομαστικής, της μέσης, της ελάχιστης και της μέγιστης ισχύος του ανορθωτή και του αντιστροφέα. Επίσης, αναφέρονται οι ώρες λειτουργίας κάθε μονάδας χωριστά καθώς και οι απώλειες σε ενέργεια ανά έτος λειτουργίας.



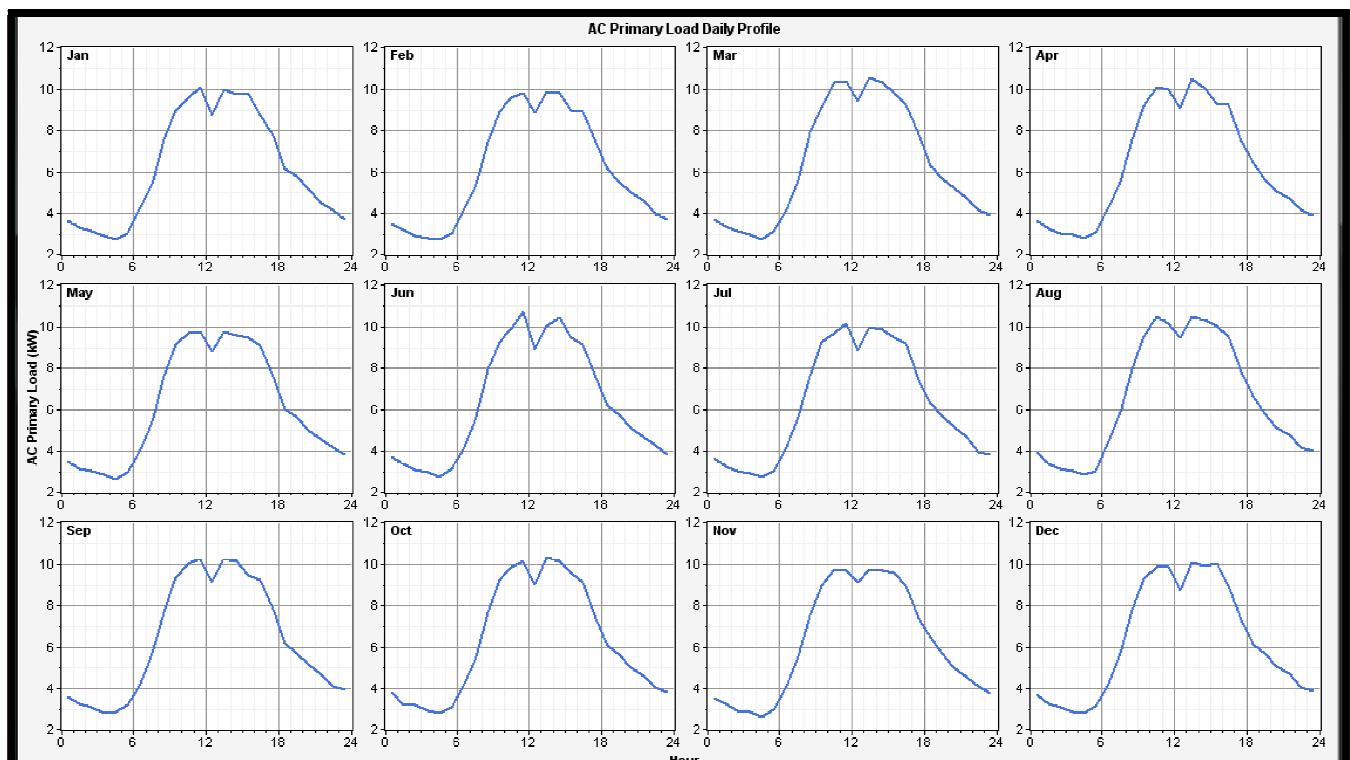
Στις δύο παρακάτω γραφικές παραστάσεις διακρίνουμε αναλυτικά για κάθε μήνα του έτους την ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή που είναι εγκατεστημένο το σύστημα μας και την ισχύ εξόδου της ανεμογεννήτριας. Όπως είναι φυσικό παρατηρούμε πως η ηλεκτρική ισχύς που παράγει η ανεμογεννήτρια είναι ανάλογη με την ταχύτητα του ανέμου.



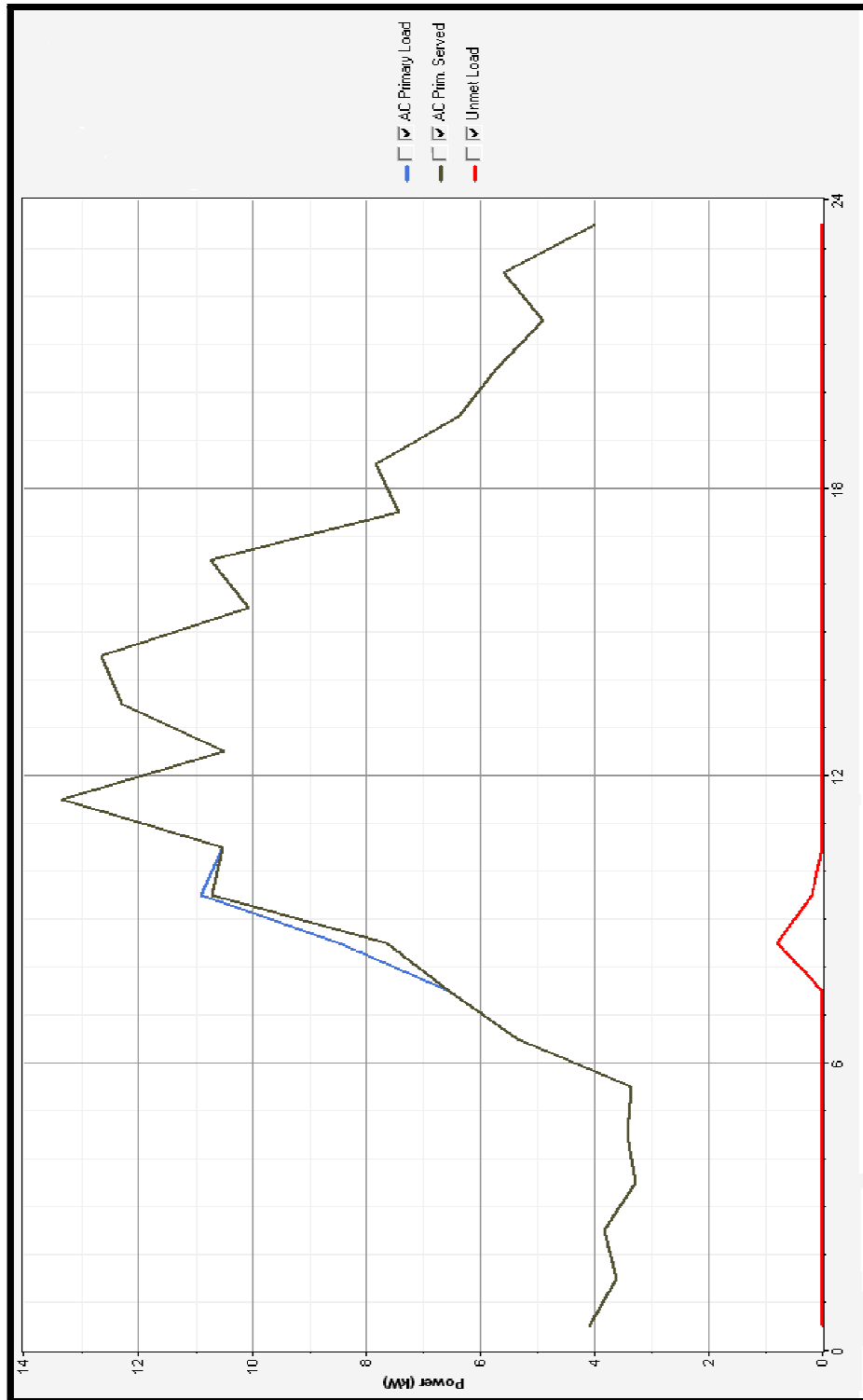
Με το παρακάτω γράφημα είναι δυνατό να προσδιορίσουμε το μέγεθος της ηλεκτρικής ισχύος που πωλείται ανά μήνα στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.



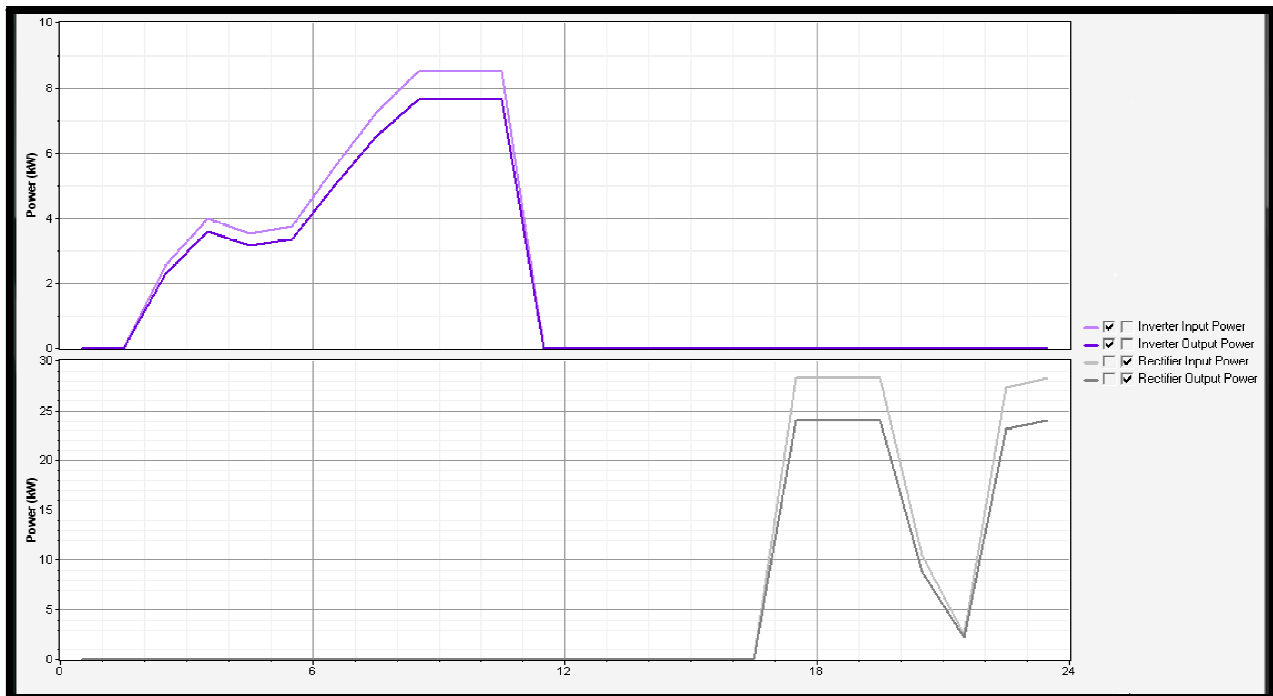
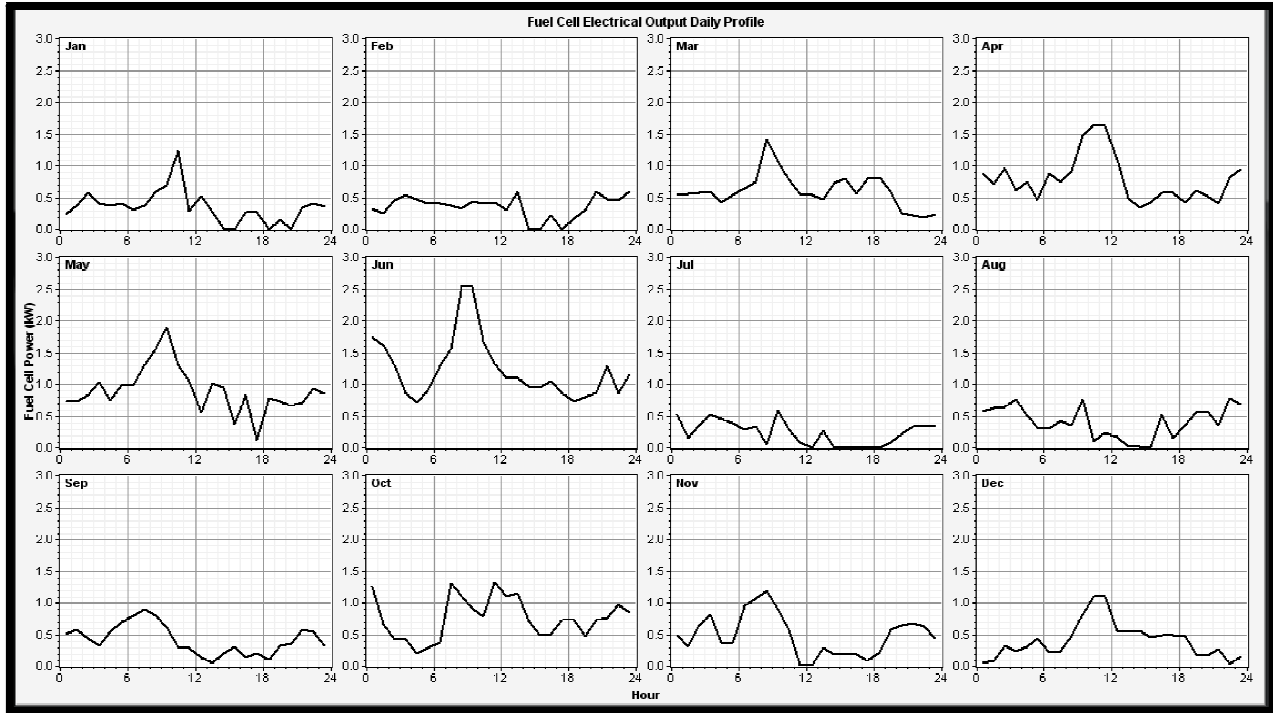
Στο παρακάτω γράφημα δίνεται αναλυτικά η καμπύλη ισχύος του ηλεκτρικού φορτίου για κάθε μήνα του έτους και κάθε ώρα της ημέρας.



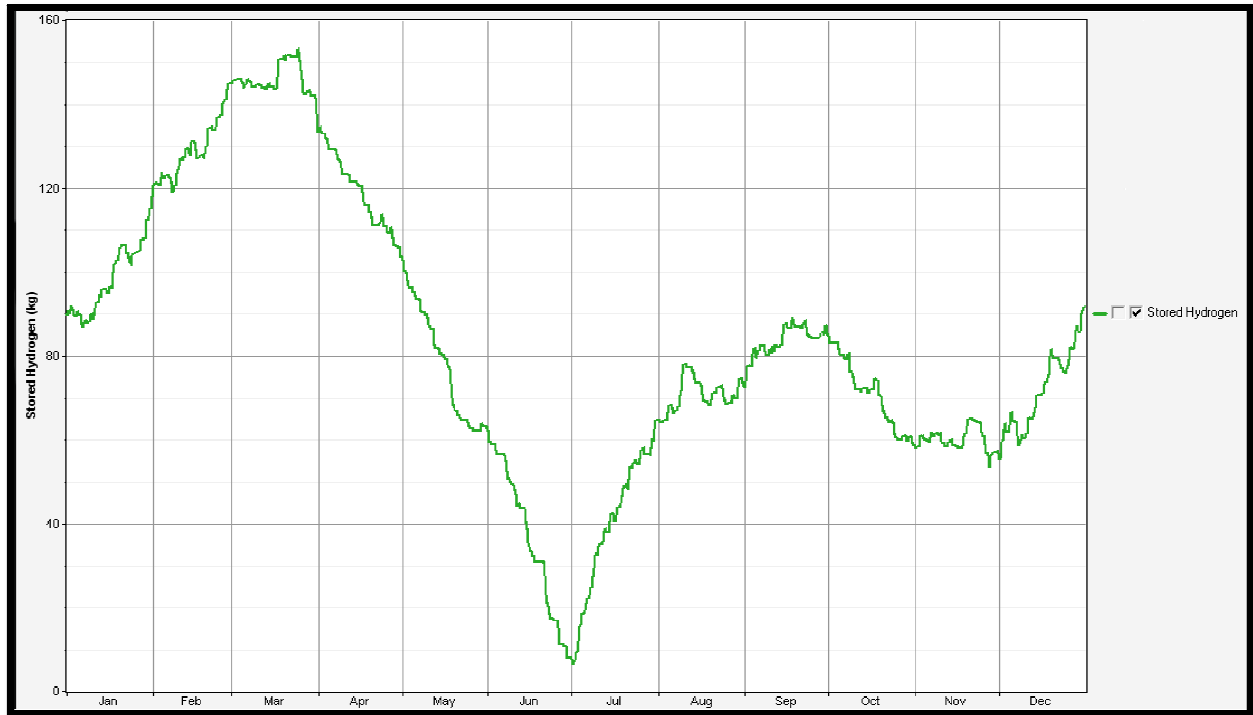
Σε αυτό το γράφημα δίνουμε για μία τυχαία ημέρα του έτους την καμπύλη του AC φορτίου που έχουμε στο σύστημά μας και ταυτόχρονα την συγκρίνουμε με μία δεύτερη καμπύλη που προσδιορίζει το κατά πόσο εξυπηρετείται το πρωτεύον φορτίο μας. Για τη διαφορά που βρίσκουμε μεταξύ αυτών των δύο, εισάγουμε μία νέα καμπύλη που μας δείχνει με ακρίβεια το σημείο και το πόσο (σε ηλεκτρική ισχύ) το φορτίο μένει ανικανοποίητο.



Στις δύο επόμενες γραφικές παραστάσεις παρουσιάζεται η ηλεκτρική ισχύς εξόδου της κυψέλης καυσίμου καθώς και η ισχύς εισόδου – εξόδου του αντιστροφέα και του ανορθωτή. Σε ότι αφορά την κυψέλη καυσίμου, λαμβάνουμε πληροφορίες για την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ ανά μήνα του έτους, ενώ στη περίπτωση της γραφικής παράστασης του αντιστροφέα και του ανορθωτή παρουσιάζουμε την σύγκριση σε ότι αφορά την ισχύ εισόδου με την ισχύ εξόδου για μία τυχαία μέρα του έτους.



Το λογισμικό Homer Energy μας δίνει πολύ κατατοπιστικά και χρήσιμα γραφήματα και για την παραγωγή, αποθήκευση και κατανάλωση υδρογόνου στο σύστημά μας. Στις εικόνες που θα παραθέσουμε παρακάτω φαίνονται τρεις διαφορετικές γραφικές παραστάσεις, μία για κάθε στάδιο στο οποίο μπορεί να βρεθεί το υδρογόνο. Η πρώτη γραφική παράσταση μας δίνει την συνολική εικόνα μεταβολής του υδρογόνου κατά τη διάρκεια ενός έτους.

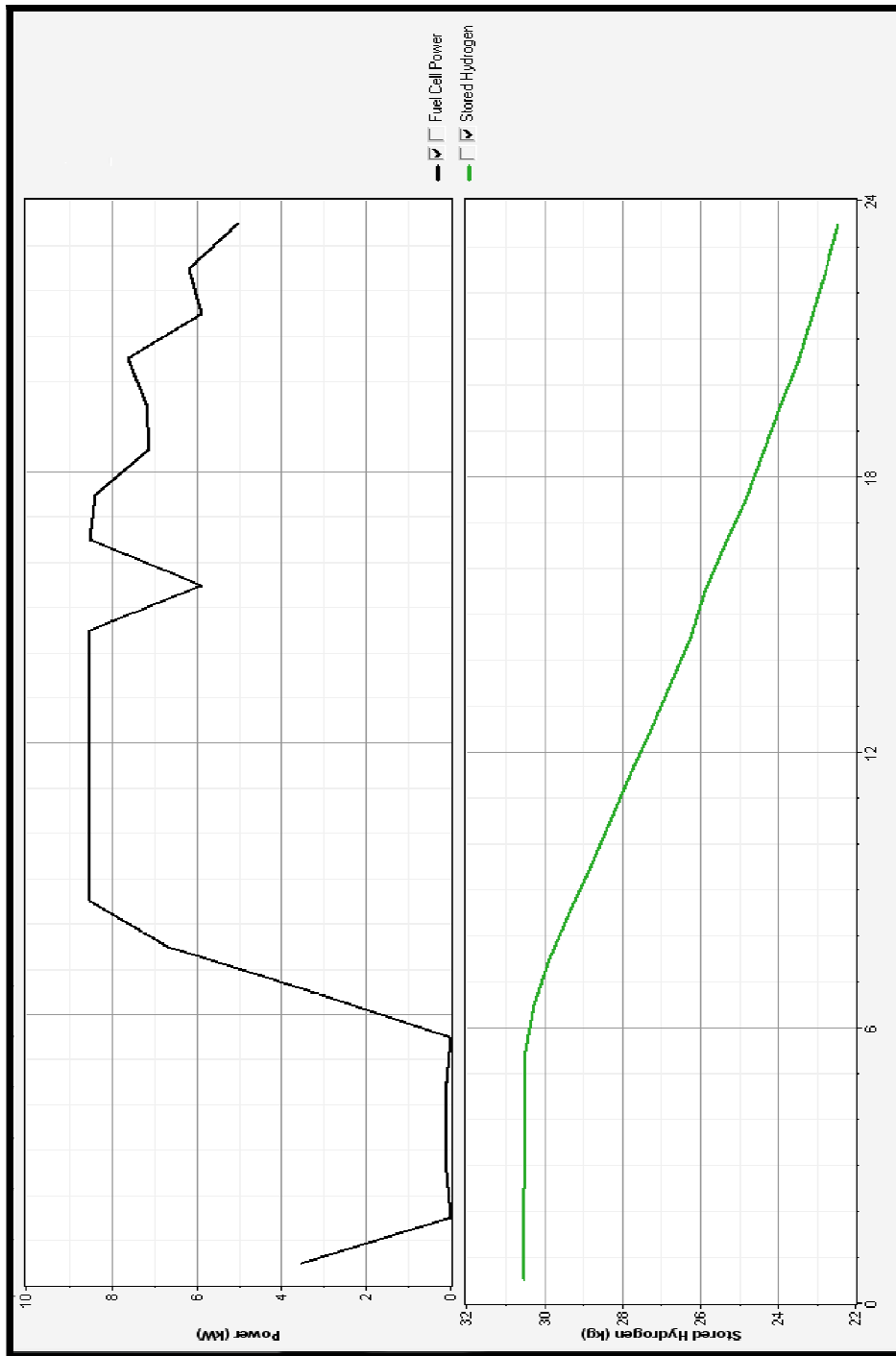


Παρατηρούμε πως το υδρογόνο που αποθηκεύεται στην δεξαμενή μας αυξάνεται τους τρεις πρώτους μήνες του έτους όπου και η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος είναι μεγαλύτερη, ενώ τους επόμενους τρεις μήνες που η παραγωγή ισχύος είναι χαμηλή, το υδρογόνο μειώνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό μιας και καταναλώνεται από την κυψέλη καυσίμου. Από τον μήνα Ιούλιο και μετά που η παραγωγή ισχύος αρχίζει να αυξάνεται σταδιακά, και μπορούμε να δούμε πως και η δεξαμενή μας αρχίζει να αποθηκεύει ξανά υδρογόνο το οποίο παράγει η ηλεκτρόλυσή μας.

Από το γράφημα αυτό μπορούμε να εξάγουμε δύο συμπεράσματα. Πρώτον, διακρίνουμε τη διαφορά μεταξύ της ισχύος εισόδου και εξόδου της ηλεκτρόλυσης που οφείλεται στον βαθμό απόδοσής της και δεύτερον, μπορούμε να δούμε πόσα kg/hr υδρογόνου έχει τη δυνατότητα να παράγει και γραφικά να διακρίνουμε τις μεταβολές στη στάθμη του αποθηκευμένου υδρογόνου όταν η ηλεκτρόλυση λειτουργεί και όταν παραμένει ανενεργή.



Στο τελευταίο αυτό γράφημα βλέπουμε την αντίθετη διαδικασία που περιγράψαμε παραπάνω. Εδώ έχουμε την αντίθετη λειτουργία της ηλεκτρόλυσης, καθώς το σύστημά μας έχει ανάγκη από παροχή ηλεκτρικής ισχύος την οποία βρίσκει θέτοντας σε λειτουργία την κυψέλη καυσίμου. Η κυψέλη καυσίμου για να λειτουργήσει χρειάζεται καύσιμο υδρογόνο, το οποίο βρίσκει από την δεξαμενή υδρογόνου. Έτσι, παρατηρούμε στο παρακάτω γράφημα πως για όσες ώρες λειτουργεί η κυψέλη καυσίμου η στάθμη του υδρογόνου στην δεξαμενή μας μειώνεται.



Κατά την προσομοίωση του συστήματος με το λογισμικό Homer Energy πραγματοποιήσαμε και ανάλυση ευαισθησίας σε ότι αφορά την ταχύτητα του ανέμου. Εκτός από τα 6.6 m/s που έχουμε ως ετήσια μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου στην τοποθεσία του Λαυρίου που βρίσκεται το σύστημά μας, θέτουμε σαν παραμέτρους ταχύτητες ανέμου για 6 m/s και 7 m/s για να δούμε τι θα συμβεί κατά την προσομοίωση και ποια τα αποτελέσματά μας.

Με τον τρόπο που έχουμε συνθέσει το σύστημα, για μέση ταχύτητα ανέμου 6 m/s το χρόνο, το λογισμικό Homer Energy δεν μας εμφανίζει πιθανές λύσεις και αποτελέσματα. Αυτό είναι λογικό διότι οι πόροι του συστήματος δεν αρκούν για να καλυφθεί το ηλεκτρικό φορτίο και εμείς έχουμε επιλέξει η εγκατάσταση να μην αγοράζει ηλεκτρική ενέργεια από δίκτυο διανομής. Για να λειτουργήσει λοιπόν το σύστημα θα πρέπει να επιτρέψουμε την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, με αποτέλεσμα όμως τα μειωμένα ετήσια κέρδη άρα και το συνολικό κέρδος στο τέλος της 25ετίας. Επίσης, θα μειωθεί κατά πολύ η λειτουργία της ηλεκτρόλυσης και το αποτέλεσμα θα είναι να έχουμε μικρότερη παραγωγή και αποθήκευση υδρογόνου.

Για μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 7 m/s προφανώς η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ανεμογεννήτρια του συστήματος είναι μεγαλύτερη και παράλληλα μειώνεται η ισχύς της εγκατεστημένης ηλεκτρόλυσης, του ανορθωτή και του αντιστροφέα καθώς και της δεξαμενής υδρογόνου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται το αρχικό κόστος κεφαλαίου, ενώ τα κέρδη ανά έτος αλλά και συνολικά για όλο το χρονοδιάγραμμα των 25 ετών αυξάνεται. Το κέρδος αυτό οφείλεται στην αύξηση της παραγωγής kWh/yr και την πώλησή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο. Λόγω της μικρότερης δεξαμενής, η παραγωγή – αποθήκευση υδρογόνου είναι λίγο μικρότερη, ωστόσο η τιμή του υδρογόνου είναι κατά 56€ πιο οικονομική. Τέλος, σημαντικό είναι να αναφέρουμε πως οι ώρες λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου μειώνονται με αποτέλεσμα να μην ξεπερνάει την διάρκεια ζωής της μέσα στα 25 έτη και να μην χρειάζεται αντικατάσταση, μία παράμετρος πολύ σημαντική που μειώνει το συνολικό κόστος της εγκατάστασης.

9.5 Μελλοντικές εφαρμογές για παρόμοια υβριδικά συστήματα αιολικής ενέργειας – υδρογόνου

Η ιδέα της χρήσης υδρογόνου ως μέσο για την αποθήκευση της πλεονάζουσας αιολικής ενέργειας μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού και η εκ νέου ηλεκτροδότηση με τη βοήθεια κυψελών καυσίμου, θεωρείται ως ο πιο ιδανικός τρόπος για την ηλεκτροδότηση Ελληνικών νησιών τα οποία δεν είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η επαρκής ικανότητα αποθήκευσης υδρογόνου θα επιτρέψει την εποχιακή αποθήκευση αυτής της ενέργειας, που είναι πιο κατάλληλη για αυτόνομα δίκτυα, όπως στην περίπτωση των νησιών.

Το υδρογόνο που παράγεται με αυτό τον τρόπο μπορεί να αντικαταστήσει τα υγρά καύσιμα τόσο για την παροχή θέρμανσης όσο και για μεταφορικούς σκοπούς. Μια προκαταρκτική μελέτη σκοπιμότητας που σχετίζεται με την εγκατάσταση ενός τέτοιου υβριδικού συστήματος αιολικής ενέργειας – υδρογόνου στο νησί της Κύθνου παρουσιάζεται συνοπτικά.

Το νησί της Κύθνου, έχει μέγιστη ζήτηση ισχύος περίπου 2.5 MW και ηλεκτροδοτείται κυρίως από συστήματα γεννητριών diesel. Μια ανεμογεννήτρια με ονομαστική ισχύ 500 KW και ένα φωτοβολταϊκό πάρκο ισχύος 100 KW έχουν εγκατασταθεί επίσης στο νησί. Το κύριο πρόβλημα που σχετίζεται με τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας είναι ότι είναι συνδεδεμένη και δίνει ισχύ έως 500 KW σε ηλεκτρικές αντιστάσεις, προκειμένου να διασφαλιστεί η σταθερότητα του αυτόνομου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας της Κύθνου. Η εισαγωγή ενός συστήματος ενέργειας υδρογόνου στο υπάρχον σύστημα του νησιού, θα μείωνε σημαντικά την πώση ισχύος των ηλεκτρικών αντιστάσεων και θα αύξανε σημαντικά την διείσδυση των *Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας*.

Η υπάρχουσα ανεμογεννήτρια των 500 KW προτείνεται να συνδεθεί με μία εγκατάσταση παραγωγής, αποθήκευσης και εκ νέου ηλεκτροδότησης βασιζόμενη στην τεχνολογία του υδρογόνου. Μία ηλεκτρόλυση των 100 KW που θα λειτουργεί σε πίεση 1.5 MPa, συνδεδεμένη με την ανεμογεννήτρια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υδρογόνου. Η αποθήκευση του υδρογόνου ενδείκνυται να γίνει σε συμβατικές δεξαμενές πίεσης, ικανές να αποθηκεύσουν έως 4.800 Nm³ υδρογόνου.

Κυψέλες καυσίμου τύπου PEM (μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων) με ονομαστική ισχύ περίπου 25 KW θα πρέπει επίσης να εγκατασταθούν, ώστε να γίνει δυνατή η εκ νέου ηλεκτροδότηση μέσω του υδρογόνου. Ως εκ τούτου, η μονάδα ηλεκτρόλυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί των ηλεκτρικών αντιστάσεων ως διάταξη αντισταθμίσεως φορτίου, αποστέλλοντας στον ηλεκτρολύτη μεγάλης ισχύος διακυμάνσεις (μέχρι και 120% της ονομαστικής χωρητικότητας της ηλεκτρόλυσης, όπου κάθε περίσσεια ενέργειας από αυτό το στάδιο θα εξακολουθούσε να πηγαίνει στις αντιστάσεις).

Η αποθηκευμένη ενέργεια σε μορφή υδρογόνου θα μπορεί να διοχετεύεται πίσω στο δίκτυο μέσω των κυψελών καυσίμου, αποδεικνύοντας ότι η εγκατάσταση ενός υβριδικού συστήματος *Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας* που περιλαμβάνει τεχνολογία υδρογόνου, μπορεί να προσφέρει εγγυημένα ένα ελάχιστο επίπεδο ηλεκτρικής ισχύος, ίσης με την ονομαστική χωρητικότητα των κυψελών καυσίμου. Εκτιμάται ότι 120.000 KWh που διαφορετικά θα είχαν χαθεί, μπορούν να τροφοδοτήσουν τους καταναλωτές μέσω του δικτύου διανομής ετησίως. Συστήματα βασισμένα στην αιολική ενέργεια που ενσωματώνουν κατάλληλα αποθηκευτικά μέσα υδρογόνου και τεχνολογίες κυψελών καυσίμου, θα μπορούσαν να προωθηθούν από στοχαστικές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας σε παραδοτέους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. [71]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Τεχνικά χαρακτηριστικά επιμέρους υποσυστημάτων



ENERCON E-40 Operation instructions

SHORT DESCRIPTION OF THE E-40

The E-40 is a wind energy converter with three-bladed rotor, active pitch control and variable speed operation with a rated power of 500 kW. With its rotor diameter of 40 m and tower heights between 44 and 65 m it efficiently makes use of the prevailing wind conditions at its respective sites of operation for the generation of electrical energy.

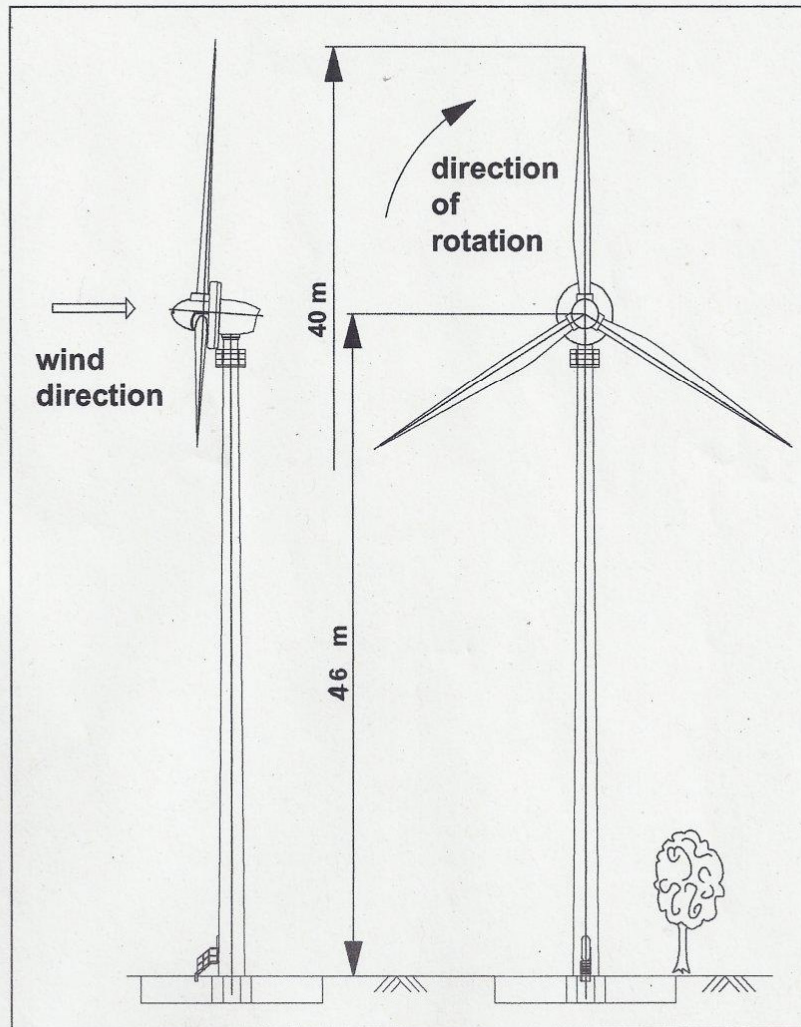


Figure 1: General view of the E-40, 63 m tower, 65 m hub height (sketch)



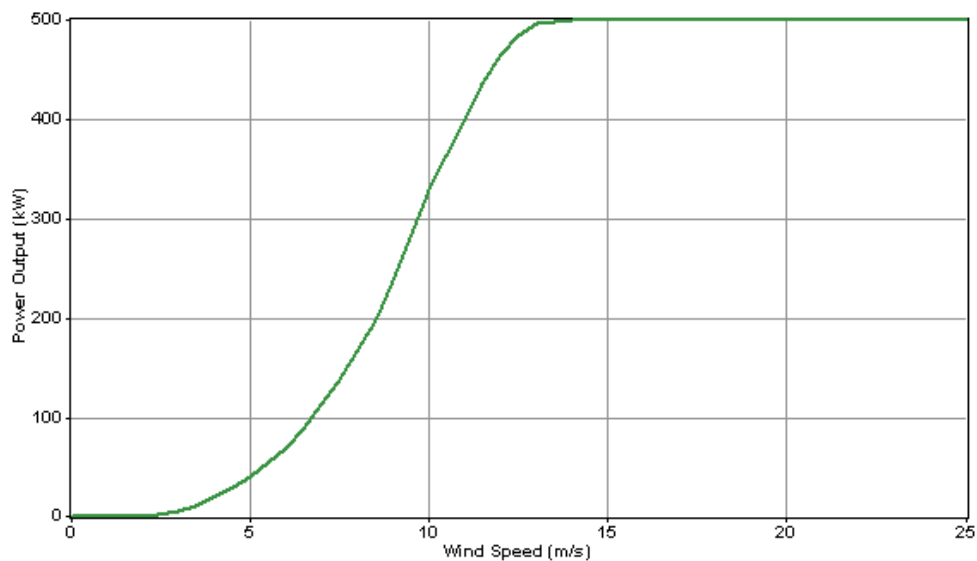
ANNEX

Technical data of the E-40

General

Rated power:	500 kW
Power (10 m/s):	323 kW
Start-up wind speed:	2.0 m/s
Tower height	42 - 63 m
Overall height:	64 - 85 m
Overall weight:	approx. 116.5 t (for concrete tower, 42 m)
Generator:	ENERCON ring generator, synchronous with variable frequency, type of protection IP 23
Rotor speed:	variable, 18 - 36 rpm
Power control:	pitch
Yaw control:	active through adjustment gears, damped through friction bearings
Type of rotor:	upwind rotor
Braking systems:	three independent pitch-control systems
Direction of rotation:	clockwise
Blade weight	approx. 1 t
Blade length	18.9 m
Number of blades	3
Blade material	fiberglass-reinforced epoxy
Blade profile:	ENERCON
Rotor weight (with hub):	13.6 t
Rotor diameter:	40.3 m
Swept area:	1.275 m ²
Nacelle weight (without rotor)	12.9 t

Enercon E-40 power curve

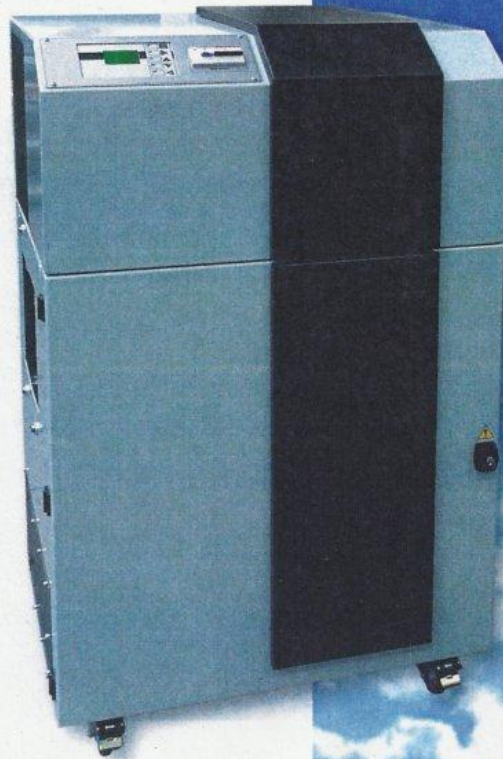




Penta H2

Fuel Cell System

7,5 KW Fuel Cell CHP Electrical Power Supplier



EQUIPMENT PERFORMANCE AND SPECIFICATIONS

Technical features		
PERFORMANCE		
Net electric power	kW	2 to 7,5 and Idle
Voltage	V	380 Vac + neutral
System Electric efficiency at nominal power	%	40
Operating modes		
Startup Time		12 second to 2 kW, 1 minutes to full power
Routine Maintenance Interval		500 hr
mass	kg	290
MTBO	hr	500
locations		Indoor and Outdoor (protected from rain)
Operating Temperature	°C	0 to 50
Storage Temperature	°C	Above 0
Noise		55 dBA @ 1 m, Outdoor
Hydrogen Supply		
Hydrogen Grade		Grade 5.5 (EU)
Inlet pressure		2-5 bara
Mass flow		Recirculation exhaust
Anode stoichiometry		1,6
Fuel Consumption		6 Nm3/hr at max power
Cooling		
Primary circuit		
Water cooled	T °C	70-75
Circuit type		Closed circuit with circulating pump
Required Water Quality		DI (< 5 µS/cm) – External water only required for initial fill
Water quantity	lt	15
Secondary circuit		
Water cooled	T °C	Inlet min, 20 – max, 55 ; outlet min, 25 – max, 60
Circuit type		External pump is required
Required Water Quality		No particular requirements
Interfaces		
Front panel		Liquid crystal display, with: start ,stop, up, down, insert button under skin

Communication		Rs 232 serial port for remote operation
Hydrogen inlet and outlet on the front endplate		¼ npt
Lifetime	hour	3000 (before losing 5% of voltage performance at nominal condition)
Operating condition		
Environment temperature range for operating	°C	0 °C / +50°C
Start up time up to 50% nominal power @ 0°C	min	< 5
Environment temperature range for depositing on the shelf	°C	-30 °C / + 60°C
Percent of nominal power delivered at extreme temperature	%	100



CASALE
CHEMICALS

Pressurized hydrogen generator
by water electrolysis
5 Nm³/h

1.2 ELECTROLYSIS UNIT DESCRIPTION

Each VOLTIANA[®] electrolyser constitutes an advanced, automatic unit for the production of hydrogen under pressure. The electrolyser is provided with all necessary, reliable and adequate safety devices for fully safe operation, and complies with the applicable and internationally recognized safety criteria, directives, codes and standards.

Technical features of the electrolyser:

net production capacity (ref. dry hydrogen)	5	Nm ³ /h
operating temperature	80	°C
design temperature	90	°C
operating pressure, min	10	bar
design pressure	22	bar
hydrogen purity before purification (dry gas, full load)	99.8	%vol
oxygen content in hydrogen before purification (full load)	0.2	% vol
total power consumption at full load	25	kW
electrolyte type	KOH solution	
electrolyte concentration	25-30	% strength
electrolyte quantity	120	litres
drier operating mode	continuous, pressure swing type	
materials of construction:		
structure, vessels, valves, piping	stainless steel	
cell frames	reinforced polysulphone	
conductive cell internals	nickel	
required demineralised water conductivity (25°C), max	5	microS/cm
demineralised water flow (average, full load)	4.1	l/h
cooling water flow (20°C, full load)	0.37	m ³ /h
control valves actuation	pneumatic	
dimensions of the process part:		
length/width/height	2200/1100/2300	mm
dimensions of the control cabinet:		
length/width/ height	1000/600/2000	mm
dimensions of the power supply cabinet:		
length/width/ height	1000/600/2000	mm



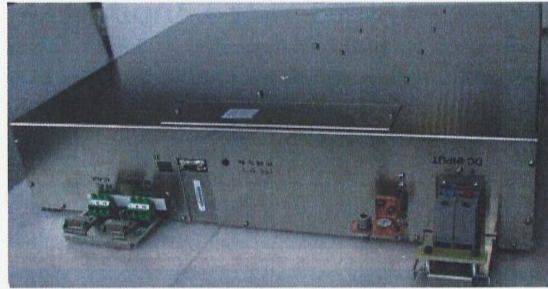
CASALE
CHEMICALS

Pressurized hydrogen generator
by water electrolysis
5 Nm³/h
Power Supply Unit

1. TECHNICAL FEATURES

- AC power input
3 x 380V +/-10%
50 Hz +/- 1%
70 A

- DC power output
0 – 120V, ripple < 2%
0-300 A, electronically controlled by a
remote 4-20 mA input signal



Inverter-Family

DHF-1AC-2600W
DHF-1AC-5000W

Operation Manual

Table 1: Electrical data of the DC input

Type	DHF-1AC-2600W	DHF-1AC-5000W
Part number	D0111234	D0103755
DC voltage (nominal)	36 V	51 V
DC voltage range	30 V ... 75 V ¹	42 V ... 92 V ²
DC current (nominal)	70 A	122 A
DC current (max.)	80 A ³	122 A
DC current limitation	90 A	150 A
DC current ripple	< 1.0 A _{PK-PK}	< 0.5 A _{PK-PK}
DC current rate of change ⁴	33 A/s	33 A/s
DC power (max.)	3000 W ⁵	6250 W ⁵

¹ DC input starting range 30 V_{DC} ... 75 V_{DC}; operating range 28 V_{DC} ... 77 V_{DC} (after unit has started).

² DC input starting range 42 V_{DC} ... 92 V_{DC}; operating range 40 V_{DC} ... 94 V_{DC} (after unit has started).

³ Maximum time of operation with 80 A_{DC}: 10 minutes (due to thermal requirements).

⁴ The rate of change limitation of the DC current setpoint is realized by software control and not given by the analog current control bandwidth of the DC/DC stage.

⁵ Limited by digital control of the DC power stage.

Table 2: Electrical data of the AC output

Type	DHF-1AC-2600W	DHF-1AC-5000W
Part number	D0111234	D0103755
AC output voltage (rms, nominal)	230 V	230 V
AC output voltage range (rms)	195 V ... 253 V (230 V +10 %, -15 %)	195 V ... 265 V (230 V ±15 %)
AC 'gross' output current (rms, total)	14.5 A max. ⁶	28 A max. ⁶
AC-OUTPUT connector output current (rms, grid connected output)	13.5 A max. ⁷	23 A max. ⁷
AC output power (total permanent power)	2750 W max. ⁶	5800 W max. ⁶
AC-OUTPUT connector output power (grid connected output)	2600 W max. ⁷	4800 W max. ⁷
Power factor	0.99	0.99
Frequency (automatically synchronized)	50 Hz ± 0.1 Hz or 60 Hz ± 0.1 Hz	50 Hz ± 0.1 Hz or 60 Hz ± 0.1 Hz
Efficiency @ $V_{In,DC,nom.}$, $I_{In,DC,nom.}$, $V_{Out,AC,nom.}$	> 87.5 %	> 88.5 %
AC output protection Fuses F1100, F1101; Not replaceable by the user!	250 V 30 A / fast acting	250 V 30 A / fast acting

Remarks: The AC-AUX connector section is unfused and is internally connected to the AC-OUTPUT connector section!
Do not exceed total AC current of 25 A_{RMS} for AC-OUTPUT or AC-AUX connectors in any load situation!

⁶ Limited by digital power control of AC inverter power stage; can only be reached when both output connector sections (AC-OUTPUT and AC-AUX) deliver power to the utility grid and auxiliary loads.

⁷ Limited by digital power control of AC inverter stage

Environmental data

Table 3: Environmental data

Type	DHF-1AC-2600W	DHF-1AC-5000W
Part number	D0111234	D0103755
Operational ambient temperature	5°... +45°C	5°... +45°C
Storage ambient temperature	-20°... +70°C	-20°... +70°C
Humidity	0..95%, non condensing	0..95%, non condensing
Flammability	UL 94V-0	UL 94V-0
Cooling	Internal fan	Internal fan
IP rating	IP20	IP20
Pollution degree	class 2 (IEC 60335-1)	class 2 (IEC 60335-1)
Altitude range	< 3 km	< 3 km

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Οι ιδιότητες του υδρογόνου σε συνθήκες 0°C και 1 atm.

Πίνακας 2: Ιδιότητες καύσης υδρογόνου σε συνθήκες 0°C και 1 atm.
Παλαιολούγκα Ε. Ελένη, Φράγκου Β. Παναγιώτη, Διπλωματική εργασία ‘Η οικονομία του υδρογόνου’, 2009

Πίνακας 3: Χημικές αντιδράσεις για κάθε τύπο κυψελών καυσίμου.

Πίνακας 4: Τύποι κυψελών καυσίμου και τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους.
Ζουντουρίδου Ι. Εριέττα, Διπλωματική εργασία ‘Ανάλυση – λειτουργία κυψελών καυσίμου και προσομοίωση λειτουργίας κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας’, 2006

Γκούγκας Π. Ηλίας, Διπλωματική εργασία ‘Ανάλυση λειτουργίας και ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων για τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων’, 2009

Πίνακας 5: Εγκατεστημένα αιολικά πάρκα στην Ελλάδα.

Πίνακας 6: Ελληνικά αιολικά πάρκα υπό ανάπτυξη.
Ιστοσελίδα Δ.Ε.Η. Ανανεώσιμες
<http://www.ppcr.gr/Home.aspx?C=2>

Πίνακας 7: Τα 10 μεγαλύτερα Αιολικά Πάρκα στην Ελληνική επικρατεία.
Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, ΡΑΕ
<http://www.rae.gr/site/portal.csp>

Πίνακας 8: Σχεδιαστικά κριτήρια και επιμέρους μέρη των ανεμογεννητριών.
Μάργαρης Π. Γιάννης, Διδακτορική διατριβή ‘Μοντελοποίηση ανεμογεννητριών για τη μελέτη δυναμικών φαινομένων σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διείδυσης’, 2011

Πίνακας 9: Τρόποι σύνδεσης ανεμογεννητριών στο ηλεκτρικό δίκτυο – δίκτυο διανομής.
Τάγκας Α. Νικόλαος, Διπλωματική εργασία ‘Μοντελοποίηση διεσπαρμένης παραγωγής’, 2008

Πίνακας 10: Ενεργειακό πεδίο δραστηριοποίησης του λογισμικού Homer Energy.
Ιστοσελίδα λογισμικού Homer Energy
<http://homerenergy.com/index.html>

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Sir William Grove.

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d5/William_Robert_Grove_2.jpg

Εικόνα 2: Το διάγραμμα της βολταϊκής μπαταρίας αερίου του Grove, 1839.

<http://www.mycoolelectriccar.com/images/FuelCellWikism.png>

Εικόνα 3: Αριστερά η σχηματική απεικόνιση της ηλεκτρόλυσης. Δεξιά η σχηματική απεικόνιση της αντίστροφης διαδικασίας που συντελείται από τις κυψέλες καυσίμου.

http://panasonic.co.jp/ap/FC/en_img/doc01_01-img02.gif

Εικόνα 4: Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτρόλυσης νερού.

http://www.cyberphysics.co.uk/graphics/diagrams/electricity/electrolysis_of_water.gif

Εικόνα 5: Το ηλεκτρικό κύκλωμα και οι διαδικασίες που συντελούνται στην είσοδο και την έξοδο του εσωτερικού μίας κυψέλης καυσίμου.

<http://www.carbontrust.com/> (Polymer Fuel Cells – Cost reduction and market potential)

Εικόνα 6: Υδρογόνο – πρωτογενείς πηγές ενέργειας, μετατροπείς ενέργειας και εφαρμογές.

<http://tw.innopolis-wm.eu/images/stories/hydrog.1.jpg>

Εικόνα 7: Δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου τύπου συμπιεσμένου αερίου της Quantum Co.

http://images.thecarconnection.com/med/hydrogen-compression-tank_100227417_m.jpg

Εικόνα 8: Δεξαμενή αποθήκευσης κρυογονικού υδρογόνου της εταιρίας Linde. Τα μεγέθη κυμαίνονται από 3.000 – 100.000 λίτρα.

http://www.linde-plantcomponents.ru/cryogenic_tanks/images/01-PS_Titel.jpg

Εικόνα 9: Συστοιχία δεξαμενών μεταλλικών υδριδίων της εταιρείας PalPac.

<http://www.palcan.com/uploads/Hydrogen%20storage%20bottle%20group.jpg>

Εικόνα 10: Σχηματική αναπαράσταση προσρόφησης υδρογόνου σε νανοσωλήνα άνθρακα.

<http://www.clemson.edu/cleanenergy/images/Nanotubes%20for%20hydrogen%20storage.jpg>

Εικόνα 11: Φωτογραφία από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο στην οποία φαίνονται οι δεσμοί που αναπτύσει το υδρογόνο στα εσωτερικά τοιχώματα νανοσωλήνων άνθρακα.

<http://www.mf.mpg.de/de/abteilungen/schuetz/images/researchtopics/h2storage2.jpg>

Εικόνα 12: Αναπαράσταση πολυφλοϊϊκού νανοσωλήνα άνθρακα.

<http://www.eb5water.com/assets/userfiles/images/nanotubes.jpg>

Εικόνα 13: Νανοσωλήνας – νανοπάπυρος άνθρακα. Η δομή του αποτελείται από συσσωρευση πολλών εξαμελών δακτυλίων άνθρακα.

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/76/Kohlenstoffnanoroehre_Animation.gif

Εικόνα 14: Διάγραμμα σύγκρισης απόδοσης κυψελών καυσίμου και μηχανών εσωτερικής καύσης.

http://www2.fz-juelich.de/ief/ief-3//datapool/page/179/bild2_b-e.gif

Εικόνα 15: Παρουσίαση θεωρητικού μεγίστου απόδοσης κυψελών καυσίμου και σύγκρισή τους με τις μηχανές εσωτερικής καύσης.

http://library.tee.gr/digital/m2483/m2483_tsotoulidis.pdf

Εικόνα 16: Κατασκευαστική δομή κυψέλης καυσίμου.

<http://climatelab.org/@api/deki/files/233/=fuelcell.jpg>

Εικόνα 17: Συστοιχία κυψελών καυσίμου.

Φωτογραφία από την Διπλωματική εργασία του Ηλία Π. Γκούγκα, ‘Ανάλυση λειτουργίας και ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων για τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)’

Εικόνα 18: Στρώμα διάχυσης αερίων.

Φωτογραφία από την Διπλωματική εργασία του Ιωσήφ Α. Φασκιώτη, ‘Ανάλυση χαρακτηριστικών και προσομοίωση λειτουργίας κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων’

Εικόνα 19: Διπολική πλάκα από πολυμερές υγρών κρυστάλλου (Vectra LCP) της εταιρείας Ticona.

<https://www.ticona-photos.com/PL/Forms/DispForm.aspx?ID=251>

Εικόνα 20: Απλή κυψέλη με διπολικές πλάκες.

Φωτογραφία από το βιβλίο των J. Larminie, A. Dicks με τίτλο ‘Fuel cell systems explained’

Εικόνα 21: Συστοιχία κυψελών καυσίμου.

http://www.cellera.biz/wp-content/gallery/technology/0_pem_full.jpg

Εικόνα 22: Διάγραμμα λειτουργίας κυψελών καυσίμου και υποσυστημάτων.

<http://www.grc.nasa.gov/WWW/RT/2005/images/RIC-kopasakis-fl.jpg>

Εικόνα 23: Θερμοκρασίες λειτουργίας και παράγωγα χημικών αντιδράσεων των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου.

<http://www.fuelcells.org/wp-content/uploads/2012/02/FuelCellTypes.jpg>

Εικόνα 24: Αλκαλική κυψέλη καυσίμου.

<http://www.ogniwa-paliwowe.info/images/afc.jpg>

Εικόνα 25: Αλκαλική κυψέλη καυσίμου από αποστολές της NASA.

<http://www.fuelcell.no/Space-Shuttle-fc.jpg>

Εικόνα 26: Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων.

<http://www.ogniwa-paliwowe.info/images/pemfc.jpg>

Εικόνα 27: Daimler – Benz Neocar II, το πρώτο αυτοκίνητο με κυψέλες καυσίμου PEM.

<http://www.greenadd.in/grn/images/fuel-cell-car-pic.jpg>

Εικόνα 28: Λεωφορείο που η λειτουργία του βασίζεται στο υδρογόνο και στις κυψέλες καυσίμου.

<http://www.metro-magazine.com/images/news/M-Flint-Mich-MTA-hydrogen-bus.jpg>

Εικόνα 29: Κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης.
[http://www.koimano.com/public/base/allegati/dmfc1\[1\].jpg](http://www.koimano.com/public/base/allegati/dmfc1[1].jpg)

Εικόνα 30 - 31: Portable media player και κινητό τηλέφωνο, με κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης.
http://www.ecofriend.com/wp-content/uploads/2012/08/toshiba-corp-prototyped-a-portable-media-player-incorporating-a-direct-methanol-fuel-cell-and-exhibited-it-at-ceatec-japan-2007-as-a-reference-presentation_5810.jpg
http://www.slashphone.com/media/data/800/fuel_cell_phone_2.jpg

Εικόνα 32: Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος.
http://mypages.iit.edu/~smart/garrear/Fuel_C4.jpg

Εικόνα 33: Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος, 400kW, της UTC Power.
<http://www.utcpower.com/products/purecell400>

Εικόνα 34: Πέντε υποσυστήματα της PAFC PureCell System Model 400.
<http://www.utcpower.com/files/PRMAN69600F.pdf>

Εικόνα 35: Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων.
<http://www.ogniwa-paliwowe.info/images/mcfc.jpg>

Εικόνα 36: Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων στη Νότια Κορέα, ισχύος 4.8MW.
<http://www.g3powersystems.com/>

Εικόνα 37: Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων.
<http://www.ogniwa-paliwowe.info/images/sofc.jpg>

Εικόνα 38: Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων 5kW της εταιρείας Apros.
http://www.apros.fi/filebank/41-Industries_-_Fuel_Cell_-_picture2.jpg

Εικόνα 39: Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων της Sulzer.
http://www.sulzer.com/en/-/media/Media/Images/ProductsAndServices/Coating_Equipment/PVD_PACVD/pvd_equipment.jpg?w=570&h=240&crop=1&offset=27&bc=E0E0E0

Εικόνα 40: Παγκόσμια αθροιστική εγκατεστημένη αιολική ισχύς 1996 – 2011.
<http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>

Εικόνα 41: Ετήσια παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας 1996 – 2011.
<http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>

Εικόνα 42, 43: Οι δέκα κορυφαίες νέες εγκαταστάσεις ισχύος για το έτος 2011 και οι δέκα κορυφαίες αθροιστικά εγκαταστάσεις ισχύος μέχρι τον Δεκέμβριο του 2011.
<http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>

Εικόνα 44: Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας.
<http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>

Εικόνα 45: Σχηματική απεικόνιση της ροής του ανέμου.
Σχέδιο του Εμμανουήλ Π. Αγγελαδά με χρήση του προγράμματος H/Y Microsoft Office Visio.

Εικόνα 46: Ηλεκτρική πηγή και το φορτίο της.
Σχέδιο του Εμμανουήλ Π. Αγγελαδά με χρήση του προγράμματος H/Y Microsoft Office Visio.

Εικόνα 47: Υπεράκτιο αιολικό πάρκο στο Middelgrunden της Δανίας.
http://digitaljournal.com/img/9/2/1/3/9/6/i/5/3/1/o/WindTurbine_Siemens.jpg

Εικόνα 48: Επιμέρους τμήματα ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.
http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/images/wind.jpg

Εικόνα 49: Εγκατάσταση Α/Γ οριζόντιου άξονα της εταιρείας Vestas στην Κρήτη.
<http://www.vestas.com/en/media/images.aspx#wallpapers>

Εικόνα 50: Σύγχρονη ανεμογεννήτρια τύπου Darrieus.
http://www.orcoastalwindenergy.com/wp-content/uploads/2011/04/Darrieus_rotor.jpg

Εικόνα 51: Ανεμογεννήτρια τύπου Giromill.
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b6/Quietrevolution_Bristol_3513051949.jpg

Εικόνα 52: Ανεμογεννήτρια τύπου Savonius.
http://www.ecosources.info/images/energie_maison/eolienne_Savonius.jpg

Εικόνα 53: Σχεδιαστική απεικόνιση Α/Γ σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού (Τύπου Α).

Εικόνα 54: Σχεδιαστική απεικόνιση Α/Γ περιορισμένης λειτουργίας μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα μεταβλητής αντίστασης δρομέα (Τύπου Β).

Εικόνα 55: Σχεδιαστική απεικόνιση Α/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης & σύστημα μετατροπών ισχύος συνδεδεμένων στο δρομέα (Τύπου Γ).

Εικόνα 56: Σχεδιαστική απεικόνιση Α/Γ μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα ισχύος (Τύπου Δ).
Σχέδια του Εμμανουήλ Π. Αγγελαδά με χρήση του προγράμματος H/Y Microsoft Office Visio.

Εικόνα 57: Αύξηση μεγέθους και ηλεκτρικής ισχύος ανεμογεννητριών από την Vestas wind turbines corporation.
http://geosci.uchicago.edu/~moyer/GEOS24705/Images/vestas-turbine_size.jpg

Εικόνα 58: Προβλεπόμενη αύξηση μεγέθους ανεμογεννητριών στην αγορά αιολικής ενέργειας.
<http://www.projectgoodman.com/wp-content/uploads/2010/02/size-progression-chart.png>

Εικόνα 59. Περιμετρική άποψη των εγκαταστάσεων υδρογόνου του ΚΑΠΕ στο Λαύριο. Σε πρώτο πλάνο φαίνονται τα υποσύστημα της εγκατάστασης, ενώ στο βάθος διακρίνουμε τον πύργο της ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιείται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Από φωτογραφικό υλικό που παραχωρήθηκε από τους υπεύθυνους του τμήματος υδρογόνου του ΚΑΠΕ, ώστε να χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία.

Εικόνα 60. Κάτοψη της εγκατάστασης υδρογόνου στο αιολικό πάρκο του ΚΑΠΕ. Από υλικό που παραχωρήθηκε από τους υπεύθυνους του τμήματος υδρογόνου του ΚΑΠΕ, ώστε να χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία.

Εικόνα 61. Τα υποσυστήματα της εγκατάστασης υδρογόνου του ΚΑΠΕ και παρουσίαση των παροχών ηλεκτρικής ισχύος από τον κεντρικό ηλεκτρολογικό πίνακα προς αυτά.
<http://www.cres.gr/kape/hmerida/files/ydrogen/WHEC%202006%20Lyon%20EV%20RES2H2.pdf>

Εικόνα 62. Ένα απλοποιημένο σχέδιο του ηλεκτρολογικού πίνακα διανομής ρεύματος.
<http://www.cres.gr/kape/publications/ydrogen/First%20steps%20in%20Hydrogen%20production%20from%20wind%20energy%20in%20Greece.pdf>

Εικόνα 63. Η μονάδα ηλεκτρόλυσης στην εγκατάσταση του ΚΑΠΕ. Από φωτογραφικό υλικό που παραχωρήθηκε από τους υπεύθυνους του τμήματος υδρογόνου του ΚΑΠΕ, ώστε να χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία.

Εικόνα 64. Εγκατεστημένες δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων στις εγκαταστάσεις υδρογόνου του ΚΑΠΕ.
http://labtech.solo.bg/common_files/brochure.pdf

Εικόνα 65. Ο συμπιεστής υδρογόνου της PDC Machines Inc. (X. Ρόκας ABEE).
<http://www.pdcmachines.com/>

Εικόνα 66. Κεντρικός ηλεκτρολογικός πίνακας. Από φωτογραφικό υλικό που παραχωρήθηκε από τους υπεύθυνους του τμήματος υδρογόνου του ΚΑΠΕ, ώστε να χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία.

Εικόνα 67. Η κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων της εταιρείας Exergy στις εγκαταστάσεις του ΚΑΠΕ στο Λαύριο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Βαλαλάκη Αικατερίνη, Διπλωματική εργασία ‘Επίδραση της τιμολόγησης των Α.Π.Ε. στα μικροδίκτυα’, 2010.
- [2] Κέντρο Περιβαλλοντικής Εκπαίδευσης Καστοριάς.
<http://kpe-kastor.kas.sch.gr/>
- [3] Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης – Ινστιτούτο Τεχνολογίας & Εφαρμογών Στερεών Καυσίμων.
<http://www.allaboutenergy.gr/>
- [4] Powering Europe: ‘Wind energy and the electricity grid – EWEA’, 2010.
http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/reports/Grids_Report_2010.pdf
- [5] Thomas S., Zalowitz M.: ‘Fuel cells – green power’, Los Alamos national laboratory, 2000.
- [6] Oxford dictionary of national biography: ‘Grove, Sir William Robert (1811 – 1896)’, Oxford University Press, 2005.
- [7] William L. Langer: ‘An encyclopedia of world history’, 1948.
- [8] Encyclopedia Britannica Deluxe Edition: ‘Grove, Sir William Robert’.
- [9] Moore C.E.: ‘The proton’, Journal of chemical education 62, 1985.
- [10] Collecting the history of Fuel Cells, Smithsonian National Museum of American History.
<http://americanhistory.si.edu/fuelcells/origins/origins.htm>
- [11] Fuel cell today: The leading authority on fuel cells.
<http://www.fuelcelltoday.com/about-fuel-cells/history>
- [12] Ζουντουρίδου Εριέττα, Διπλωματική εργασία ‘Ανάλυση – λειτουργία κυψελών καυσίμου και προσομοίωση λειτουργίας κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας’, 2006.
- [13] Fuel cells 2000: The leading independent fuel cell resource.
<http://www.fuelcells.org/>
- [14] Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης – Ινστιτούτο Τεχνολογίας & Εφαρμογών Στερεών Καυσίμων.
<http://www.allaboutenergy.gr/Paragogi3327.html>
- [15] Aldo Vieira da Rosa: ‘Fundamentals of renewable energy processes’, Stanford University.
- [16] U.S. Department of energy, Hydrogen program: ‘Hydrogen and our energy future’.
<http://www.hydrogen.energy.gov/>

- [17] Int. J. Nuclear hydrogen production and application: ‘Global environmental impacts of the hydrogen economy’, Vol. 1, No. 1, 2006
- [18] Τεχνολογικό Παρατηρητήριο Ενέργειας Δυτικής Μακεδονίας.
<http://www.tw.innopolos-wm.eu/>
- [19] Shinnar R.: ‘The hydrogen economy, fuel cells and electric cars’, Technol Soc 25 (2003), p.p. 455 – 476.
- [20] Ζαχαρίου Α., Λυμπερόπουλος Ν.: ‘Το υδρογόνο σαν ενεργειακός φορέας’.
- [21] Penner S.S.: ‘Steps toward the hydrogen economy’, 2005.
- [22] Kathari R., Buddhi D., Sawhney R.L.: ‘Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods’, Renewable and Sustainable Energy reviews 12 (2008), p.p. 553 – 563.
- [23] Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης – Ινστιτούτο Τεχνολογίας & Εφαρμογών Στερεών Καυσίμων. <http://www.allaboutenergy.gr/Paragogi34.html>
- [24] Conway B.E., Bai L.: ‘Journal Chemistry Society Faraday Transactions’, 181 (1985).
- [25] Ekunge E.P., Juttner K., Kreysa G.: ‘Journal Electrochemistry Society’, 138 (1991).
- [26] Matsuda A., Notaya R.: ‘Journal of Physical Chemistry’, 93 (1989).
- [27] Lim Ch., Su – Il Pyun: ‘Electrochim Acta’, 38 (1993).
- [28] Castro E.B., M.J. de Giz, Gonzalez E.R., Vilche J.R.: ‘Electrochim Acta’, 42 (1997).
- [29] Tropical green technologies.
http://old.tropical.gr/site/index.php?option=com_content&task=view&id=97&Itemid=122
- [30] Gillapalli S., Wong M.S.: ‘Nanotechnology: A guide to nano – objects’, Chemical engineering progress.
- [31] Wang X., Qunqing Li, Xie Jing, Jin Zhong, Wang Jingong, Li Yan, Jiang Kaili, Fan Shoushan: ‘Fabrication of ultralong and electrically uniform single – walled carbon nanotubes on clean substrates’, Nano letters, 9.
- [32] Charlier J.C., Blasé X., Roche S.: ‘Electronic and transport properties of nanotubes’, Reviews of modern physics, 79, (2007).
- [33] Lortz R., Zhang Q., Shi W., Ye J.T, Qin C.Y., Wang Z., He H.T., Sheng P.: ‘Superconducting characteristics of 4 – A carbon nanotube – zeolite composite’, Proceedings of the National Academy of Sciences, 106, (2009).
- [34] Dillon A.C., Jones K.M., Bekkedahl T.A., Klang C.H., Bethune D.S., Heben M.J.: ‘Storage of hydrogen in single – walled carbon nanotubes’, Nature 386, (1997).

- [35] Schindele Lothar, Διπλωματική Διατριβή: 'Einsatz eines leistungselectronischen stellglieds zur parameteridentification und optimalen betriebsfuehrung von PEM – Brennstoffzellensystemen', Πανεπιστήμιο Καρλσρούης, Γερμανία, 2006.
<http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000006053>
- [36] Smith J.A., Nehrir M.H., Gerez V., Shaw S.R.: 'A broad look at the workings, types and applications of fuel cells proceedings', IEEE 2002, Power Engineering Society Summer Meeting, Chicago, IL, July 2002.
- [37] James Larminie, Andrew Dicks: 'Fuel cell systems explained', Second edition, Willey 2003.
- [38] Betty Y. S. Lin, Donald W. Kirk, Steven J. Thorpe: 'Performance of alkaline fuel cells: A possible future energy system?', Vol. 161, Issue 1, October 2006, p. 474 - 483
- [39] U.S. Department of energy, Fuel cell systems.
http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html
- [40] Nice, Karim and Strickland, Jonathan: 'How fuel cells work: Polymer exchange membrane fuel cells', How stuff works, accessed August 4, 2011
- [41] Anne – Claire Dupuis: 'Progress in materials science', Vol. 56, Issue 3, March 2011, p.289 – 327
- [42] Ιωσήφ Α. Φασκιώτης, Διπλωματική εργασία 'Ανάλυση χαρακτηριστικών και προσομοίωση λειτουργίας κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων', 2010.
- [43] 'Platinum – Ruthenium anode catalyst for Direct Methanol Fuel Cells', Platinum metals review, Vol. 46, No. 3, July 2002.
- [44] Nigel Sammes, Roberto Bove, Knut Stahl: 'Phosphoric acid fuel cells: Fundamentals and applications', Vol. 8, Issue 5, October 2004, p. 372 – 378.
- [45] Ιστότοπος της εταιρείας UTC Power, η οποία ασχολείται με την ανάπτυξη και την κατασκευή κυψελών καυσίμου.
<http://www.utcpower.com/>
- [46] Product data and applications guide. The Purecell model 400 energy solution.
<http://www.utcpower.com/files/PRMAN69600F.pdf>
- [47] U.S. Department of Energy: 'Molten Carbonate fuel cell technology', accessed August 2011.
http://www.fossil.energy.gov/programs/powersystems/fuelcells/fuelcells_moltencarb.html
- [48] Ιστότοπος της εταιρείας G3 Power Systems η οποία δραστηριοποιείται στις εγκαταστάσεις κυψελών καυσίμου σε εργοστασιακές μονάδες παραγωγής ενέργειας.
<http://www.g3powersystems.com/>
- [49] S. Giddey, S.P.S. Badcoal, A. Kulkarni, C. Munnings: 'A comprehensive review of Direct Carbon fuel cell technology', Vol. 38, Issue 3, p. 360 – 392.

- [50] U.S. Department of energy, Energy efficiency & renewable energy.
http://www.eere.energy.gov/basics/renewable_energy/fuel_cells.html
- [51] National fuel cell research center (NFCRC), University of California, Irvine.
http://www.nfrcr.uci.edu/2/FUEL_CELL_INFORMATION/FCexplained/FC_Types.aspx#
- [52] Fuel cells 2000: The leading independent fuel cell resource.
<http://www.fuelcells.org/fuel-cells-and-hydrogen/>
- [53] Τζαμαλής Κωνσταντίνος, Διπλωματική εργασία ‘Θερμοδυναμική σύγκριση κυψελών καυσίμου με κύκλο Carnot’.
- [54] Kamil Perzyna, Regina Borkoswka, Jaroslaw Syzdek, Aldona Zalewska, Wladyslaw Wiczovek: ‘The effect of additive of Lewis acid type on lithium – gel electrolyte characteristics’, Electrochimica Acta, Vol. 57, December 2011, p. 58 – 65.
- [55] Andrew Snyder: ‘Hydrogen automotive power’, Columbia University, 2003.
- [56] Ryan O’ Hayre, Suk – Won Cha, Whitney Cotella, Fritz B. Prinz: ‘Fuel cell fundamentals’.
- [57] Ιστότοπος Fuel Cell Markets. FCM works with organizations in the fuel cell and hydrogen sector building partnerships to take technologies and services to market.
http://www.fuelcellmarkets.com/fuel_cell_markets/1,1,1.html
- [58] Εγχειρίδιο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για δυνητικούς χρήστες, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών & Εξοικονόμησης Ενέργειας, 2006.
- [59] Γιάννης Δ. Μάργαρης, Διδακτορική διατριβή, ‘Μοντελοποίηση ανεμογεννητριών για τη μελέτη δυναμικών φαινομένων σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διείδυσης’, 2011.
- [60] U.S. Energy Information Administration: ‘Levelized cost of new generation resources in the annual energy outlook 2011, December 2010.
- [61] Global wind energy council.
<http://www.gwec.net/global-figures/global-offshore/>
- [62] Energy Efficiency & Renewable Energy.
<http://www.aenaon.net/gr/content/view/54/29/>
- [63] Τα οικονομικά στοιχεία γύρω από την αιολική ενέργεια.
<http://www.wind-energy-the-facts.org/en/part-3-economics-of-wind-power/economics-of-wind-power.html>
- [64] Mark Duchamp, ‘Τα αιολικά πάρκα είναι περιττά’.
<http://www.team.chaniacrete.eu/%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1>

- [65] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας, Ενέργεια και Πολίτης, Αιολική Ενέργεια.
http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_wind.htm
- [66] U.S. Department of energy, Energy efficiency & renewable energy.
http://www1.eere.energy.gov/wind/wind_how.html
- [67] Ιστοσελίδα Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας.
http://www.cres.gr/kape/index_gr.htm
- [68] Νικόλαος Α. Τάγκας, Διπλωματική εργασία ‘Μοντελοποίηση διεσπαρμένης παραγωγής, 2008.
- [69] Τζαμαλής Γ., Λόης Ε., Βαρκαράκη Ε., Ζούλιας Ε., Λυμπερόπουλος Ν.: ‘Παραγωγή και αποθήκευση υδρογόνου από αιολική ενέργεια. Πρώτα αποτελέσματα.’.
- [70] Επιδεικτικό αιολικό πάρκο ΚΑΠΕ.
http://www.creswindfarm.gr/site1/H2_prod_gr.htm
- [71] Λυμπερόπουλος Ν., Βαρκαράκη Ε., Ζούλιας Ε.: ‘Μονάδα παραγωγής υδρογόνου από αιολική ενέργεια’, 2^ο Εθνικό συνέδριο τεχνολογιών υδρογόνου, 20 – 22 Οκτωβρίου 2005, ΕΚΕΤΑ, Θέρμη Θεσσαλονίκη.
- [72] Lymberopoulos N., Varkaraki E., Zoulias M., Vionis P., Chaviaropoulos P., Agoris D.: ‘First steps in Hydrogen production from wind energy in Greece’, Centre for Renewable Energy Sources & High voltage laboratory (University of Patras).
- [73] Francesco Sulla, Doctoral dissertation: ‘Fault behavior of wind turbines’, Lund University, 2012.
- [74] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, ΠΑΕ.
<http://www.rae.gr/site/portal.csp>
- [75] Jaroslaw Syzdek, Michel Armand, Magdalena Gizowska, Marek Marcinek, Elzbieta Sasim, Mikolaj Szafran, Wladyslaw Wieczorek: ‘Ceramim – in – polymer versus polymer – in – ceramic polymeric electrolytes – A novel approach’, Journal of power sources, Vol. 194, October 2009, p. 66 – 72.
- [76] Donald Routledge Hill: ‘Mechanical engineering in the medieval Near East’, Scientific American, May 1991, p. 64 – 69.
- [77] Morthorst, Poul Erik; Redlinger, Rober Y.; Andersen Per: ‘Wind energy in the 21st century: economics, policy, technology and the changing electricity industry’, Houndmills, Basingstoke, Hampshire, Palgrave/UNEP, 2002.
- [78] Alan Wyatt: ‘Electric power: challenges and choises’, Book Press LTD., Toronto 1986.

[79] Orkney sustainable energy website: ‘Costa head experimental wind turbine’, December 2010.

<http://www.orkneywind.co.uk/costa.html>

[80] General Electric power & water renewable energy: ‘Offshore wind turbine 4.0 – 110’.

[81] AWEO – Industrial wind energy opposition: ‘Size specifications of common industrial wind turbines’.

<http://www.aweo.org/windmodels.html>

[82] Urban wind turbines technology review: ‘A companion text to the Catalogue of European Urban Wind Turbine Manufacturers’.

[83] Centurion energy: ‘Types of wind turbines’.

<http://centurionenergy.net/types-of-wind-turbines>

[84] Exergy Fuel Cells Technology: ‘Operation manual of Penta H₂ fuel cells system’.

[85] Ιστοσελίδα Homer Energy: ‘Energy modeling software for hybrid renewable energy systems’.

<http://homerenergy.com/>