



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ  
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕΣΩ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΑΠΟ  
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ. ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΛΥΨΗΣ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ  
ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΤΟΥ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ ΧΑΝΙΩΝ ΤΟΥ ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ ΜΕ  
ΣΥΣΤΗΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ – ΥΔΡΟΓΟΝΟ - ΚΥΨΕΛΕΣ  
ΚΑΥΣΙΜΟΥ.**



**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΙΔΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ**

**ΧΑΝΙΑ 2005**

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕΣΩ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ. ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΛΥΨΗΣ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΤΟΥ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ ΧΑΝΙΩΝ ΤΟΥ ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ – ΥΔΡΟΓΟΝΟ - ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΙΔΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ**

**ΧΑΝΙΑ 2005**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η πραγματοποίηση αυτής της εργασίας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την αμέριστη βοήθεια του επιβλέποντος καθηγητή μου κ. Σωτηρόπουλου Βαγγέλη που με στήριξε σε κάθε δυσκολία που συνάντησα. Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου κ. Καραπιδάκη, κα. Κολοκοτσά, κ. Βουρδουμπά, κ. Λέκκα, κ. Πλοκαμάκη καθώς και τον κ. Χατζάκη.

Επίσης ιδιαίτερα σημαντική ήταν και η συνεισφορά των συμφοιτητών μου : Διολανίτη Σπύρου, Μαργώνης Ξανθής και Αντωνάκη Κυριάκου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και ιδιαίτερα τους γονείς μου Νίκο και Νίκη Κωνσταντινίδη που όλα αυτά τα χρόνια με στήριξαν με κάθε τρόπο και πίστεψαν στις δυνατότητες μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρονται οι διάφορες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου εστιάζοντας στην παραγωγή μέσω ηλεκτρόλυσης νερού. Παράλληλα αναφέρονται οι τρόποι αποθήκευσης και οι χρήσεις του υδρογόνου. Το υδρογόνο αξιοποιείται και ως μέσο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των κυψέλων καυσίμου. Οι κυψέλες καυσίμου βρίσκουν αρκετές εφαρμογές σε οικιακές συσκευές καθώς επίσης και στην βιομηχανία.

Στο κεφάλαιο 6 της πτυχιακής εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ενός πειράματος που έγινε στο Εργαστήριο Ανανεώσιμων Ενεργειακών Τεχνολογιών του ΤΕΙ Κρήτης Παράρτημα Χανίων. Στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο και μια ηλεκτρολυτική συσκευή. Σκοπός του πειράματος ήταν να διαπιστωθεί η απόδοση της ηλεκτρολυτικής συσκευής για διάφορες τιμές της ηλιακής έντασης.

Τέλος στο 7 κεφάλαιο γίνεται μια μελέτη που έχει σαν σκοπό την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του ΤΕΙ Χανίων μέσω φωτοβολταϊκών στοιχείων. Ως σύστημα εφεδρείας για τις ημέρες συννεφιάς χρησιμοποιείται μια κυψέλη καυσίμου που τροφοδοτείται με υδρογόνο.



**Technological institution of Crete**



## **TITLE**

Hydrogen production via electrolysis using solar energy. Study of coverage the energy demands of the Technological Institution of Crete with photovoltaic and fuel cell.

## **Abstract**

This study refers to the ways of producing hydrogen and especially via electrolysis. It also refers to how we can storage hydrogen and to the applications of it. It is well known that in our days hydrogen can be used in order to produce electricity through fuel cells.

In chapter 6 we can read the results of an experiment that took place in the Technological Institution of Crete, branch of Chania. In this experiment we used a photovoltaic module and an electrolyser. The aim of the experiment was to find out the efficiency of the electrolyser for many rates of the solar irradiation.

Closing in chapter 7 a study is made for the Technological Institution of Crete, branch of Chania. In this study we size up the number of the photovoltaic modules we need in order to cover the energy demands of the building. A system of electrolyser and fuel cell is also used as a back up system for the days that the sky is covered with clouds.

**STUDENT: KONSTANTINIDIS DIMITRIS**

**SUPERVISOR: SOTIROPOULOS EUAGGELOS**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
Abstract.....	5
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	6
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
1.1 Γενικά .....	8
1.2 Γιατί Το Υδρογόνο; .....	9
1.3 Ιστορική Αναδρομή .....	9
2. ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ .....	11
2.1 Εισαγωγή .....	11
2.2 Γενικά Για Το Υδρογόνο .....	12
2.3 Φυσικές Ιδιότητες Υδρογόνου.....	12
2.4 Χημικές Ιδιότητες Υδρογόνου .....	14
2.5 Παρασκευή Και Χρήσεις Υδρογόνου .....	14
2.6 Το Υδρογόνο Ως Φορέας Ενέργειας .....	15
2.7 Πλεονεκτήματα Έναντι Συμβατικών Πηγών Ενέργειας .....	15
2.8 Μειονεκτήματα Έναντι Συμβατικών Πηγών Ενέργειας .....	16
3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ .....	18
3.1 Αναμόρφωση Μεθανίου Με Ατμό (SMR).....	18
3.2 Μερική Οξειδωση Των Βαρέων Υδρογονανθράκων .....	19
3.3 Παραγωγή Υδρογόνου Από Βιομάζα.....	20
3.3.1 Αεριοποίηση Της Βιομάζας.....	20
3.3.2 Πυρόλυση Της Βιομάζας.....	20
3.4 Φωτοβιολογική Παραγωγή.....	21
3.5 Φωτοηλεκτρόλυση .....	21
3.6 Ηλεκτρόλυση Νερού .....	22
3.7 Συσκευές Ηλεκτρόλυσης.....	24
3.7.1 Αλκαλικές Ηλεκτρολυτικές Μονάδες .....	25
3.7.2 Ηλεκτρολυτικές Μονάδες Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEM) .....	25
3.7.3 Στερεού Οξειδίου Ηλεκτρολυτικές Μονάδες.....	26
4. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ .....	27
4.1 Εισαγωγή .....	27
4.2 Αποθήκευση Του Υδρογόνου Σε Αέρια Μορφή.....	27
4.3 Αποθήκευση Του Υδρογόνου Σε Υγρή Μορφή.....	28
4.4 Αποθήκευση Του Υδρογόνου Σε Στερεά Μορφή Με Την Μορφή Των Υδριδίων.....	30
4.5 Σύγκριση Των Μεθόδων Αποθήκευσης Του Υδρογόνου .....	32
4.6 Ασφάλεια Υδρογόνου.....	33
4.6.1 Παλαιότερα Ατυχήματα Με Υδρογόνο .....	33
4.6.2 Ιδιότητες Του Υδρογόνου.....	36
4.6.2.1 Σύγκριση Ιδιοτήτων Υδρογόνου Και Φυσικού Αερίου.....	36
4.6.3 Αναγνώριση Κινδύνων .....	39
4.6.3.1 Κρυογενικές Συνθήκες Αποθήκευσης .....	39
5. ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ .....	41
5.1 Ιστορική Αναδρομή .....	41
5.2 Αρχή Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου.....	43
5.3 Τύποι Κυψέλων Καυσίμου .....	44
5.3.1 Κυψέλη Καυσίμου Πολυμερισμένης Μεμβράνης (PEM).....	44
5.3.2 Κυψέλη Καυσίμου Μεθανόλης (DMFC) .....	44
5.3.3 Αλκαλική Κυψελίδα Καυσίμου, Alkaline Fuel Cell (AFC).....	45
5.3.4 Κυψελίδα Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος, Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC).....	45
5.3.5 Κυψελίδα Καυσίμου Στερεού Οξειδίου, Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) .....	45

5.3.6 Κυψελίδα Καυσίμου Τηγμένου Ανθρακικού Άλατος, Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) .....	46
5.4 Αναλυτική Περιγραφή Της PEM Κυψέλης.....	47
5.4.1 Μεμβράνη Κυψέλης .....	47
5.4.2 Ηλεκτρόδια Κυψέλης .....	48
5.4.3 Καταλύτης Κυψέλης.....	48
5.4.4 Διαχείριση Νερού .....	50
5.5 Απόδοση Κυψέλων Καυσίμου .....	50
5.5.1 Θεωρητική Προσέγγιση .....	50
5.5.2 Πρακτική Προσέγγιση.....	50
5.6 Αναμορφωτές .....	51
5.6.1 Ρόλος Αναμορφωτών .....	51
5.6.2 Ενδόθερμη Αναμόρφωση Ατμού .....	52
5.6.3 Εξώθερμη Μερική Οξειδωση.....	52
5.6.4 Αυτοθερμική Αναμόρφωση.....	53
5.6.5 Απομάκρυνση Μονοξειδίου Του Ανθρακα.....	53
5.7 Θεωρητικός Υπολογισμός Μέγιστης Τάσης Και Ρυθμού Παραγωγής Θερμότητας .....	53
5.7.1 Υπολογισμός Τάσης Ιδανικής Κυψέλης Καυσίμου .....	53
5.7.2 Υπολογισμός Ρυθμού Παραγωγής Θερμότητας.....	54
5.7.3 Στήλη Κυψέλων Καυσίμου Μεμβράνης Πολυμερούς Ηλεκτρολύτη .....	54
5.7.4 Απεικόνιση Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου Με Σκέδαση Νετρονίων.....	55
5.8 Εφαρμογές Κυψέλων Καυσίμου .....	55
5.8.1 Μεταφορά.....	56
5.8.2 Οικιστική Και Προσωπική Χρήση .....	57
5.8.3 Βιομηχανία .....	57
6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ ΝΕΡΟΥ .....	60
6.1 Περιγραφή Συστήματος- Σκοπός .....	60
6.2 Περιγραφή Των Στοιχείων Του Πειράματος.....	61
6.2.1 Περιγραφή Και Σκοπός Του Επιδεικτικού Υδρογόνου Pempower1-XL.....	61
6.2.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκού Πλαισίου .....	62
6.2.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Πλακέτας.....	63
6.3 Αποτελέσματα Μετρήσεων – Πειραματικά Δεδομένα .....	65
6.4 Συμπεράσματα Μετρήσεων - Σχολιασμός.....	73
7. ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΛΥΨΗΣ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΤΟΥ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ ΧΑΝΙΩΝ ΤΟΥ ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ – ΥΔΡΟΓΟΝΟ – ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ .....	75
7.1 Διαστασιολόγηση Της Φωτοβολταϊκής Γεννήτριας .....	77
7.1.1 Επιλογή Κλίσης Των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων.....	78
7.2 Διαστασιολόγηση Δεξαμενών Αποθήκευσης Υδρογόνου .....	79
7.3 Διαστασιολόγηση Της Συσκευής Ηλεκτρόλυσης .....	83
7.4 Διαστασιολόγηση Της Κυψέλης Καυσίμου .....	84
7.5 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Των Στοιχείων Της Μελέτης .....	86
7.5.1 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία .....	86
7.5.2. Μετατροπέας Συνεχούς – Εναλλασσόμενου Ρεύματος.....	88
7.5.3 Κυψέλη Καυσίμου.....	90
7.6 Οικονομική Ανάλυση.....	90
7.7 Υπολογισμός Της Καθαρής Παρούσας Αξίας – Απόσβεσης.....	92
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	96
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	97

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Γενικά

Η αναπόφευκτη μελλοντική εξάντληση των ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, κάρβουνο, φυσικό αέριο κτλ) σε συνδυασμό με την έκλυση ρύπων κατά τη χρήση τους για παραγωγή ενέργειας καθιστούν επιτακτική την ανάγκη για ένα φορέα ενέργειας που θα είναι ευρέως διαθέσιμος, ενώ παράλληλα δεν θα ρυπαίνει. Τέτοιοι φορείς ενέργειας θα μπορούσαν να αποτελέσουν ο ηλεκτρισμός, τα βιοκαύσιμα όπως η αιθανόλη, ή το υδρογόνο. Το υδρογόνο είναι το πλέον διαδεδομένο στοιχείο στην φύση, είναι υψηλής δραστηριότητας και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος μορφών καύσης. Εάν δε έχει παραχθεί από το νερό, τότε μπορεί να καεί χωρίς εκπομπές ρύπων. Σήμερα όμως, το υδρογόνο δεν αποτελεί επίλεκτο ενεργειακό φορέα γιατί παρουσιάζει και μειονεκτήματα. Πρέπει να παραχθεί κάνοντας χρήση κάποιας άλλης μορφής ενέργειας, είναι δύσκολο να αποθηκευθεί σε μορφή με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και γενικά θεωρείται επικίνδυνο.

Οι κυριότερες εμπορικές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου είναι:

- η αναμόρφωση υδρογονανθράκων με ατμό, κυρίως Φ.Α. (κόστος 5\$/GJ).
- η μερική οξειδωση – αεριοποίηση βαρέων υδρογονανθράκων ή κάρβουνου (13 \$/GJ)
- η ηλεκτρόλυση του νερού (12 \$/GJ)

Για την παραγωγή υδρογόνου από αναμόρφωση υδρογονανθράκων, καταναλώνεται περίπου το 20-30% του υδρογονάνθρακα για την παραγωγή της ενέργειας που απαιτείται για τη διαδικασία και εκλύονται συνεπώς αέρια του «θερμοκηπίου». Το πρόβλημα της ρύπανσης υφίσταται και στην περίπτωση της ηλεκτρόλυσης, εφόσον η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από ορυκτά καύσιμα. Όταν όμως η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, τότε κατά τη παραγωγή του υδρογόνου δεν εκλύονται ρύποι.

Μέχρι σήμερα το υδρογόνο έχει κυρίως βιομηχανική χρήση ενώ οι ενεργειακές χρήσεις του υδρογόνου αποτελούν ελάχιστο ποσοστό. Η βιομηχανία αμμωνίας καταναλώνει το 50% του παραγόμενου υδρογόνου και τα διυλιστήρια το 37%. Σημαντικές καταναλώσεις έχει και η βιομηχανία τροφίμων (υδρογόνωση ελαίων).

Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν εναλλακτικό καύσιμο σε πλήθος (κατάλληλα τροποποιημένων) τεχνολογιών καύσης όπως καταλυτικούς καυστήρες, λέβητες αερίου, αεροστρόβιλους και κινητήρες εσωτερικής καύσης. Η καύση του υδρογόνου παράγει νερό αλλά, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών καύσης, παράγονται και οξειδία του αζώτου. Οι κυψελίδες καυσίμου αποτελούν μία σχετικά πρόσφατη τεχνολογία κατά την οποία μέσω ηλεκτροχημικής αντίδρασης επιτυγχάνεται παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, με μόνο υποπροϊόν το νερό. Η λειτουργία της είναι αντίστροφη από αυτή μιας ηλεκτρολυτικής μονάδας και προσομοιάζει την λειτουργία μιας μπαταρίας, με την διαφορά ότι δεν έχει τον περιορισμό της εξάντλησης του καυσίμου μια και το καύσιμο (υδρογόνο) και το οξειδωτικό (αέρας ή οξυγόνο) εισάγονται συνεχώς στην άνοδο και την κάθοδο και τα προϊόντα (ηλεκτρική ενέργεια και νερό) απομακρύνονται.

Υπό αυτό το σκεπτικό, η Ευρωπαϊκή βιομηχανία έχει αποδοθεί σε έναν αγώνα δρόμου για να πλησιάσει τις ΗΠΑ και την Ιαπωνία στις τεχνολογίες για παραγωγή – χρήση υδρογόνου. Αντίστοιχα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει σαν θέμα πρώτης προτεραιότητας την Ε&Α στον χώρο αυτό. Ορισμένες χώρες πλούσιες σε δυναμικό ΑΠΕ όπως η Νορβηγία και η Ισλανδία, έχουν ξεκινήσει σημαντικά εθνικά προγράμματα για την παραγωγή, χρήση και εξαγωγή υδρογόνου σε άλλες χώρες.

Σε αυτό το ανταγωνιστικό περιβάλλον, είναι πολύ εύκολο η Ελλάδα να μείνει και πάλι ουραγός και εν τέλει αποδέκτης τεχνολογιών που θα παράγονται στο εξωτερικό. Και όμως,



τμήματα του εξοπλισμού για την παραγωγή (ηλεκτρολυτική μονάδα) και χρήση του υδρογόνου (κυψελίδες καυσίμου) θα μπορούσαν να κατασκευαστούν στην Ελλάδα. Επιπλέον, εκτιμάται ότι στην «εποχή του υδρογόνου», η Ελλάδα θα μπορεί να παίξει έναν σημαντικό ρόλο σαν προμηθευτής του καυσίμου αυτού, μια και είναι προικισμένη με πλούσιο δυναμικό ΑΠΕ.

## 1.2 Γιατί Το Υδρογόνο;

Το υδρογόνο που παράγεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι σύμφωνα με τους περιβαλλοντολόγους το ιδανικό καύσιμο αφού δεν υπάρχει περιβαλλοντικό κόστος στην παραγωγή και χρήση του υδρογόνου, όταν χρησιμοποιείται αιολική ή ηλιακή ενέργεια. Η μόνη έκλυση ρύπων υπάρχει κατά την κατασκευή, μεταφορά και εγκατάσταση των τεχνολογιών μετατροπής της αιολικής (ανεμογεννήτριες) ή ηλιακής (Φ/Β) ενέργειας και ίσως της ενέργειας για την μεταφορά του υδρογόνου. Επίσης το υδρογόνο δεν βλάπτει το περιβάλλον ούτε επηρεάζει το στρώμα του όζοντος, ενώ τα προϊόντα της καύσης του, δεν περιέχουν σωματίδια (αιθάλη) ή CO<sub>2</sub>.

Η παραγωγή, μεταφορά και χρήση ενέργειας ευθύνονται για το μεγαλύτερο μέρος της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Έχουν γίνει προσπάθειες στο παρελθόν να αποτιμηθεί η αξία αυτής της ρύπανσης, κυρίως με κόστη που πληρώνονται έμμεσα, όπως έξοδα νοσηλείας, ασφάλισης. Το κόστος του CO<sub>2</sub> στην κλιματική μεταβολή εκτιμάται σε 25 δις \$ το έτος και το περιβαλλοντικό κόστος από την άντληση, μεταφορά και διαρροή πετρελαίου σε 9 δις \$ ανά έτος. Άμεσα κόστη νοσοκομειακής περίθαλψης στις ΗΠΑ, άμεσα σχετιζόμενης με τη ρύπανση του περιβάλλοντος, ανέρχεται σε 20 έως 50 δις \$ ανά έτος. Συμπερασματικά, το εξωτερικό κόστος της ενέργειας πρέπει παγκόσμια να ανέρχεται σε εκατοντάδες δις \$ ανά έτος, πράγμα το οποίο αποκτά και πολιτική σημασία.

Η παραγωγή και χρήση υδρογόνου από ΑΠΕ, σε μία ανανεώσιμη οικονομία υδρογόνου, θα οδηγούσε σε σημαντική μείωση αυτού του κόστους. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για αναπτυσσόμενες οικονομίες, όπως αυτή της Κίνας ή της Ινδίας, όπου εάν κάποια στιγμή φτάσουν το βιοτικό επίπεδο και την κατά κεφαλήν παραγωγή CO<sub>2</sub> των προηγμένων κρατών, τότε όποια οφέλη από τα μέτρα μείωσης του CO<sub>2</sub> (Κιότο) θα ανατραπούν πλήρως.

Πρακτικά, οι μοναδικοί ενεργειακοί φορείς που μπορούν συνεργαζόμενοι να ικανοποιήσουν όλες τις ανάγκες των καταναλωτών ενέργειας, χωρίς η χρήση τους να εμπλέκει καύση άνθρακα, είναι ο ηλεκτρισμός και το υδρογόνο. Όσον αφορά τους τομείς στους οποίους θα κυριαρχήσει καθένας από αυτούς τους ενεργειακούς φορείς, αναμένεται ότι ο ηλεκτρισμός θα διατηρήσει τα πεδία στα οποία ήδη εφαρμόζεται, δηλαδή φωτισμό, πληροφορική και τηλεπικοινωνίες, ενώ το υδρογόνο θα χρησιμοποιηθεί σε τομείς εφαρμογών των υγρών καυσίμων (μεταφορές, θέρμανση κτλ). Σε πολλές περιπτώσεις όμως, η επιλογή του καταλληλότερου ενεργειακού φορέα θα γίνεται με βάση ειδικές συνθήκες που επικρατούν στην κάθε περιοχή (π.χ ύπαρξη ή όχι δικτύου ηλεκτροδότησης, κόστος συντήρησης του κ.α.).

## 1.3 Ιστορική Αναδρομή

Το υδρογόνο ανακαλύφθηκε το 1766 από τον H.Cavendish και χαρακτηρίστηκε σαν "εύφλεκτος αέρας". Το 1800, δύο Βρετανοί επιστήμονες ήταν οι πρώτοι που επέδειξαν την ηλεκτρόλυση. Το 1920 και το 1930 υπήρχε σημαντικό ενδιαφέρον στην Αγγλία και την Γερμανία για την χρήση του υδρογόνου σαν καύσιμο. Το 1923 ο Σκοτσέζος J.B.S.Haldane αναφέρει σε δημοσίευση του ότι το υδρογόνο είναι το καύσιμο του μέλλοντος, το οποίο θα παράγεται από ανεμόμυλους που θα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και θα διασπούν το νερό ηλεκτρολυτικά σε υδρογόνο και οξυγόνο. Το υδρογόνο θα αποθηκεύεται σε δεξαμενές με

περίβλημα κενού και θα χρησιμοποιείται σε "οξειδωτικές κυψελίδες", την πρόσφατη (τότε) εφεύρεση του Sir William Grove.

Η πρώτη πρακτική χρήση του υδρογόνου ήταν για ανύψωση αερόστατων, Μέχρι τις 6 Μαΐου 1937 είχαν μεταφερθεί με αερόστατα και αερόπλοια 50.000 άτομα χωρίς καμία θνησιμότητα, την ημέρα αυτή όμως συνέβη το ατύχημα του αερόπλοιου Hindenbourg. Από τότε το υδρογόνο έχει χαρακτηριστεί επικίνδυνο στο μυαλό του κόσμου. Ας σημειωθεί ότι το υδρογόνο δεν εξερράγη παρά κάηκε γρήγορα και το Zeppelin έπεσε αργά στο έδαφος, όσοι επιβάτες μείνανε μέσα στο όχημα έζησαν, νεκροί ήταν όσοι εγκατέλειψαν το αερόστατο από μεγάλο ύψος. Ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο είναι ότι στα Zeppelin το υδρογόνο χρησιμοποιείτο τόσο για ανύψωση όσο και για προώθηση, μια και το χρησιμοποιούσαν στους κινητήρες σαν καύσιμο. Με αυτό τον τρόπο η άνοση του αερόπλοιου παρέμενε σταθερή παρά την μείωση της ποσότητας των καυσίμων.

Σημαντική έρευνα (1920-1930) για την χρήση του υδρογόνου στις μεταφορές έκανε ο Γερμανός μηχανικός Rudolf Erren ο οποίος μετέτρεψε πλήθος κινητήρων για να καίνε υδρογόνο με εφαρμογές σε αυτοκίνητα ή φορτηγά ή τραίνα. Μελέτησε ακόμα και τορπίλες που καίνε υδρογόνο για να μην αφήνουν πίσω τους ίχνος από τα καυσαέρια των συμβατικών κινητήρων τους.

Χάρη στην αφθονία και χαμηλή τιμή του πετρελαίου μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, το υδρογόνο περιορίστηκε σε ενεργειακές εφαρμογές εργαστηριακής κλίμακας. Η πρώτη χρήση κυψελίδων καυσίμου με καθαρό υδρογόνο έγινε το 1965 από την NASA. Οι αποστολές Gemini και Apollo χρησιμοποιούσαν υδροποιημένο υδρογόνο και οξυγόνο για πρόωση στους πυραύλους τους αλλά και για παραγωγή ισχύος σε κυψελίδες καυσίμου, με ταυτόχρονη παραγωγή του πόσιμου νερού των αστροναυτών. Από την δεκαετία του 70 και μετά, το υδρογόνο χρησιμοποιείται πειραματικά στις μεταφορές από διάφορους κατασκευαστές, είτε σε ΚΕΚ ή σε κυψελίδες καυσίμων, όπως παρουσιάζεται σε περισσότερη λεπτομέρεια στην συνέχεια.

## 2. ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

### 2.1 Εισαγωγή

Η οικονομία υδρογόνου αποτελεί την πιο ελκυστική λύση όσων αφορά την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών στο άμεσο μέλλον. Μπορούμε να φανταστούμε την οικονομία υδρογόνου σαν ένα συνδεδεμένο δίκτυο:

- από χημικές διεργασίες οι οποίες παράγουν υδρογόνο από φυσικά καύσιμα, τη βιομάζα ή την ηλεκτρόλυση του νερού
- αποθήκευσης του παραγόμενου υδρογόνου με φυσικές ή χημικές μεθόδους
- μετατροπή της ενέργειας της οποίας φέρεται από το υδρογόνο σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα στο σημείο ζήτησης.

Οι ενεργειακές απαιτήσεις του επόμενου αιώνα μπορούν να καλυφθούν από αυτό ακριβώς το μοντέλο. Χρησιμοποιώντας την ηλιακή ενέργεια για την ηλεκτρόλυση του νερού και παράγοντας ενέργεια με τη χρήση του υδρογόνου που παράγεται με μόνο παραπροϊόν νερό έχουμε πετύχει έναν κύκλο παραγωγής ενέργειας μεγάλης απόδοσης και ελάχιστων ρύπων.

Παρόλο που η παραπάνω εικόνα φαίνεται ιδιαίτερη ελκυστική, προς το παρόν, αρκετά επιστημονικά και τεχνικά θέματα πρέπει να επιλυθούν πρώτα. Κάθε τομέας της οικονομίας υδρογόνου, η παραγωγή υδρογόνου δηλαδή, η αποθήκευση του και η εκμετάλλευση του έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις. Μόνο όταν ικανοποιητικές λύσεις δοθούν, μπορεί το συνολικό κόστος να γίνει συγκρίσιμο με αυτό των σύγχρονων πηγών ενέργειας με τελικό στόχο την πλήρη αντικατάσταση της υπάρχουσας υποδομής με μία νέα, στηριζόμενη στο υδρογόνο.

Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο χρειάζεται κάτι περισσότερο από απλή βελτίωση των σημερινών σχετικών τεχνολογιών. Θα πρέπει αντιθέτως να γίνουν θεμελιώδους σημασίας πρόοδοι σε μία πληθώρα επιστημονικών πεδίων όπως η φυσική, η χημεία ή η επιστήμη των υλικών. Ιδιάζουσας σημασίας είναι η κατανόηση των διεργασιών οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε ατομικό και μοριακό επίπεδο στη διεπιφάνεια υδρογόνου και διαφόρων υλικών για τη χρήση των δευτέρων στη ενέργεια υδρογόνου. Νέα υλικά χρειάζονται για τη χρήση τους σαν μεμβράνες, καταλύτες ή αποθηκευτικά μέσα. Προκειμένου όμως να γίνει εφικτό αυτό χρειάζεται μία προσέγγιση η οποία δεν περιορίζεται στη γνώση ενός μόνο γνωστικού πεδίου αλλά αντιθέτως προκύπτει ως αποτέλεσμα συνδυασμού περισσότερων του ενός.

Σαν μέρος της επιστήμης και της τεχνολογίας το οποίο βρίσκεται σε πρώιμα, σχετικά, στάδια ανάπτυξης, το βάρος δίνεται στην πειραματική διαδικασία. Ωστόσο εξίσου ιδιαίτερης σημασίας αποτελεί η ανάπτυξη και η εκμετάλλευση θεωρητικών μοντέλων με μεθόδους προσομοίωσης προκειμένου να βοηθηθεί το πείραμα και να ξεχωρίσουν κάποιες κατευθύνσεις για πιο προσοδοφόρα έρευνα. Οι δραματικές πρόοδοι στην υπολογιστική ισχύ τα τελευταία χρόνια και σε συνδυασμό με τη χρήση υπολογιστικών συστημάτων παράλληλης επεξεργασίας έχουν διευκολύνει πολύ τη θεωρητική μελέτη δίνοντας μοντέλα για την κατάλυση, την αποθήκευση, τη λειτουργία των κυψελών καυσίμου κ.ο.κ.

Επίσης ένα τομέας του οποίου η εξέλιξη αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην εξέλιξη της οικονομίας υδρογόνου είναι η επιστήμη και η τεχνολογία στη κλίμακα του νανομέτρου. Υλικά προοριζόμενα για την αποθήκευση υδρογόνου ή για ηλεκτρόδια κυψελών καυσίμου βελτιώνουν την επίδοσή τους ραγδαία όταν αυτά αποκτήσουν νανοκρυσταλλική δομή. Ο λόγος είναι ότι τα υλικά αυτά παρουσιάζουν ιδιαίτερες ιδιότητες οι οποίες οφείλονται στο μεγάλο λόγο επιφάνειας όγκου των θεμελιωδών λίθων τους.

Η κατάλυση είναι εκ φύσεως παρατηρούμενη στην κλίμακα του νανομέτρου. Κατανοώντας τις χημικές και φυσικές διεργασίες που χαρακτηρίζουν τις καταλυτικές διεργασίες, μπορούμε να αυξήσουμε την απόδοση και την κινητική αυτών. Κατασκευάζοντας βελτιωμένους καταλύτες μπορεί να δοθεί μεγάλη ώθηση σε πολλούς τομείς της οικονομίας υδρογόνου. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό κατανοώντας πως η κατάλυση παίζει κεντρικό ρόλο τόσο στην παραγωγή όσο και στην αποθήκευση του υδρογόνου όπως επίσης και στη λειτουργία των κυψέλων καυσίμου.

Το θέμα της οικονομίας υδρογόνου, θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι δεν περιορίζεται σε γνωστικά πεδία όπως η φυσική ή χημεία και άλλες θετικές επιστήμες ή σύγχρονες τεχνολογίες. Ωστόσο, αυτή τη στιγμή, η βαρύτητα δίνεται σε αυτά τα πεδία μέχρι. Η οικονομία υδρογόνου είναι ένα ευρύ θέμα και με την εδραίωση της οι επιπτώσεις στο πολιτισμό μας θα είναι τέτοιες ώστε να αποτελέσει αντικείμενο μελέτης των οικονομικών επιστημών ή ακόμα και τις για ανθρωπιστικές επιστήμες όπως η κοινωνιολογία.

## 2.2 Γενικά Για Το Υδρογόνο

Προκειμένου να μελετήσουμε το υδρογόνο στο ρόλο του καυσίμου πρέπει να έχουμε καλή γνώση της ίδια της φύσης του. Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά κάποιες βασικές ιδιότητες του.

Το υδρογόνο σε θερμοκρασία δωματίου, βρίσκεται σε αέρια φάση. Είναι άοσμο, άχρωμο και εύφλεκτο. Όταν αέριο υδρογόνο καίγεται, σχηματίζεται νερό. Το όνομα του στοιχείου αυτού δόθηκε από το Γάλλο χημικό Antoine Lavoisier και έχει ρίζες τις λέξεις της αρχαίας ελληνικής γλώσσας "ύδωρ" και "γένομαι". Πρώτη φορά αναγνωρίστηκε ως ξεχωριστό στοιχείο από τον Άγγλο χημικό Henry Cavendish το 1766.

Ένα άτομο υδρογόνου αποτελείται από ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο ενώ δύο άτομα ενώνονται μεταξύ τους ώστε να δώσουν ένα μόριο υδρογόνου. Το υδρογόνο είναι το πρώτο στοιχείο στον περιοδικό πίνακα και συμβολίζεται με το σύμβολο H. Μπορεί να συνδυαστεί χημικά με σχεδόν κάθε άλλο στοιχείο και έτσι μπορεί να δώσει περισσότερες ενώσεις από ότι μπορεί οποιοδήποτε άλλο στοιχείο. Στις ενώσεις αυτές συγκαταλέγονται το νερό και διάφοροι υδρογονάνθρακες όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο.

Λόγω της ελαφρότητας του το υδρογόνο, δεν αποτελεί περισσότερο από το 1% της συνολικής μάζας της γης. Σε καθαρή αέρια μορφή συναντάται σπάνια παρόλο που πολλά ορυκτά και όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί περιέχουν ενώσεις του σε πολύ μεγάλο βαθμό. Έτσι το υδρογόνο βρίσκεται στην κερατίνη, στα ένζυμα που συντελούν στη πέψη, στα μόρια του DNA ενώ βρίσκεται άφθονο στις τροφές υπό τη μορφή λιπών, πρωτεϊνών και υδρογονανθράκων.

Βαρύτερα στοιχεία προκύπτουν από τη σύντηξη του υδρογόνου, όπως το ήλιο ( He ). Βάση αυτής της διαδικασίας πιστεύεται ότι σχηματίστηκε το ίδιο το σύμπαν ενώ η ίδια διαδικασία είναι επίσης υπεύθυνη για την έκλυση ενέργειας από τα άστρα όπως γίνεται στον ήλιο.

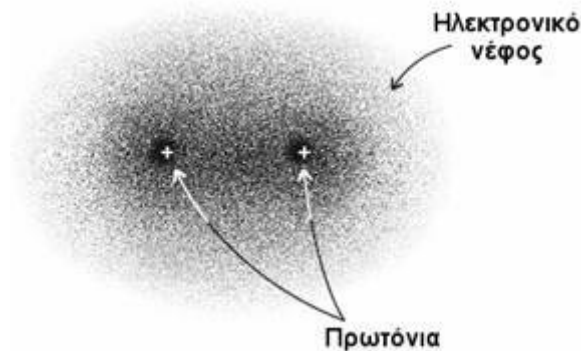
## 2.3 Φυσικές Ιδιότητες Υδρογόνου

Όπως και τα περισσότερα αέρια, το μόριο του υδρογόνου είναι διατομικό. Το αέριο υδρογόνο είναι πολύ πιο ελαφρύ από τον αέρα. Συγκεκριμένα, στους 0 °C το υδρογόνο έχει πυκνότητα 0.0899 kg m<sup>-3</sup> περίπου δέκα φορές μικρότερη από αυτή του αέρα και για αυτό το λόγο δε βρίσκεται σε μεγάλες ποσότητες στην ατμόσφαιρα αφού σε συνδυασμό με τη μικρή του μάζα μπορεί να διαφύγει από τις βαρυτικές δυνάμεις της γης. Με εξαίρεση το ήλιο, το υδρογόνο έχει το χαμηλότερο σημείο βρασμού (20 °K) και πήξεως (14 °K). Υδρογόνο σε υγρή φάση επιτεύχθηκε πρώτη φορά από τον Άγγλο χημικό Sir James Dewar το 1898, είναι

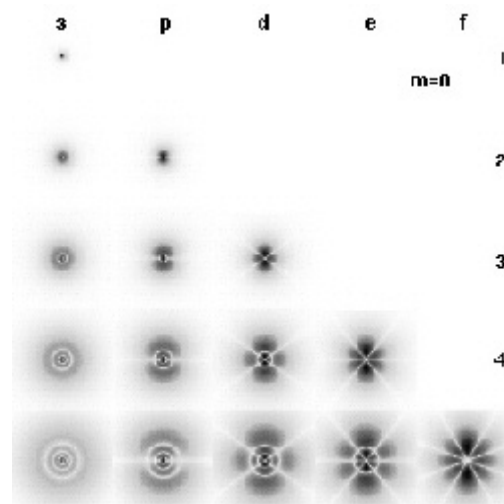
άχρωμο σε μικρές ποσότητες αλλά ανοιχτό μπλε σε λεπτά δείγματα. Το στερεό υδρογόνο είναι επίσης άχρωμο.

Στη φύση συναντώνται τρία διαφορετικά ισότοπα. Το ισότοπο που αποτελεί το 99,98% των ατόμων υδρογόνου ονομάζεται πρώτιο ( $^1\text{H}$ ) και αποτελείται από ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο. Σε ποσοστό 0,02% συναντούμε ένα δεύτερο ισότοπο, το δευτέριο ( $^2\text{H}$  ή D) το οποίο αποτελείται από ένα πρωτόνιο, ένα νετρόνιο και ένα ηλεκτρόνιο. Το δευτέριο χρησιμοποιείται σε πλήθος επιστημονικών εφαρμογών. Τέλος, το τρίτο ισότοπο ονομάζεται τρίτιο ( $^3\text{H}$  ή T) αποτελούμενο από ένα πρωτόνιο, δύο νετρόνια και ένα ηλεκτρόνιο και αντιστοιχεί ένα σε 10000 άτομα υδρογόνου. Το τρίτιο είναι ραδιενεργό με χρόνο ημίσειας ζωής τα 12,4 χρόνια.

Κατά τη κβαντομηχανική προσέγγιση, συνοπτικά, τα πρωτόνια των μορίων υδρογόνου περιβάλλονται από το ηλεκτρονικό νέφος 2 ηλεκτρονίων (σχήμα 2.1). Η πυκνότητα πιθανότητας αυτού του νέφους είναι αυξημένη στον χώρο μεταξύ των πρωτονίων έτσι ώστε το καθένα να θωρακίζεται από το ομόσημο φορτίου του άλλου. Η κατάσταση αυτή προκύπτει από άρτια (συμμετρική) κυματοσυνάρτηση να περιγράφει την ηλεκτρονική κατανομή στο μόριο. Όμως η ολική κυματοσυνάρτηση του συστήματος του μορίου του υδρογόνου (ως γινόμενο της χωρικής και αυτής των σπινς) πρέπει να είναι αντισυμμετρική σαν συνέπεια της αρχής του Pauli. Η κυματοσυνάρτηση των σπινς επομένως πρέπει να είναι αντισυμμετρική δηλαδή τα σπινς των ηλεκτρονίων του μορίου να είναι αντιπαράλληλα (σχήμα 2.2).



**Σχήμα 2.1:** Ηλεκτρονικό νέφος μορίου υδρογόνου. Πιο σκούρες περιοχές αναπαριστούν μεγαλύτερη ηλεκτρονική πιθανότητα



**Σχήμα 2.2:** Ηλεκτρονική πυκνότητα ατόμου υδρογόνου για διάφορες τιμές κβαντικών αριθμών  $n$  και  $l$  ( $m=0$ )

## 2.4 Χημικές Ιδιότητες Υδρογόνου

Το αέριο υδρογόνο συνήθως δεν αντιδρά με άλλα χημικά σε θερμοκρασία δωματίου. Αυτό διότι ο δεσμός μεταξύ των ατόμων του είναι εξαιρετικά δυνατός και απαιτεί μεγάλες ποσότητες ενέργειας για να διασπαστεί ώστε τα ξεχωριστά πια άτομα να αντιδράσουν με άλλα στοιχεία ή ενώσεις. Ωστόσο θερμαινόμενο με φλόγα αντιδρά βίαια με το οξυγόνο του αέρα ώστε να δώσει νερό σύμφωνα με την αντίδραση:



εκλύοντας ταυτόχρονα ενέργεια.

Τα άτομα υδρογόνου σχηματίζουν ομοιοπολικούς δεσμούς εκτός μεταξύ τους και με τα άλλα στοιχεία, όπως στις ενώσεις του μεθανίου ( $CH_4$ ) και του νερού. Οι δεσμοί αυτοί δεν είναι πάντα ισχυροί αλλά σπάνε εύκολα όπως στην περίπτωση των οξέων. Παράδειγμα αυτού είναι το οξικό οξύ ( $CH_3COOH$ ), ένα ασθενές οξύ. Διαλυόμενα σε νερό, ο ασθενής δεσμός του υδρογόνου σπάει, με το υδρογόνο να αφήνει πίσω το ηλεκτρόνιο του και να μετατρέπεται σε ιόν υδρογόνου ( $H^+$ ). Το υδρογόνο επίσης σχηματίζει ιοντικούς δεσμούς όπως για παράδειγμα το HCL.

Τέλος, το υδρογόνο μπορεί να σχηματίσει το λεγόμενο δεσμό υδρογόνου (hydrogen bond). Ο δεσμός αυτός γίνεται μόνο μεταξύ υδρογόνου και ενός από τα στοιχεία O, S, N, F ή Cl. Η ενέργεια του δεσμού αυτού είναι μικρή. Χαρακτηριστικότερο παράδειγμα αυτού αποτελεί το νερό όπου κάθε μόριο του σε μη υψηλές θερμοκρασίες- συνδέεται με 4 γειτονικά δημιουργώντας συμπλέγματα πολλών μορίων  $H_2O$ . Ο δεσμός υδρογόνου κατά ένα μέρος οφείλεται σε δυνάμεις Van Der Waals ενώ έχουμε επιπρόσθεση δυνάμεων καθαρά χημικού δεσμού.

Το υδρογόνο κάτω από πολύ μεγάλη πίεση (1,5 εκατομμύρια ατμόσφαιρες) και θερμοκρασία (3000 °C με 5000 °C) μπορεί να συμπεριφερθεί και ως μέταλλο, αντανακλώντας το φως και άγοντας το ηλεκτρικό ρεύμα.

## 2.5 Παρασκευή Και Χρήσεις Υδρογόνου

Η μη ύπαρξη καθαρού αέριου υδρογόνου, θέτει το πρόβλημα της παρασκευής του. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή υδρογόνου είναι πολυάριθμοι. Οι περισσότεροι περιέχουν τη διαδικασία της υδρόλυσης κατά την οποία μόρια νερού διασπώνται σε υδρογόνο και οξυγόνο σύμφωνα με την αντίδραση  $2 H_2O + \text{ενέργεια} \longrightarrow 2 H_2 + O_2$ . Οι μέθοδοι παρασκευής, ενδεικτικά, χωρίζονται σε 3 κατηγορίες, τις θερμοχημικές, τις ηλεκτρολυτικές και τις φωτολυτικές ενώ θα δούμε περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά παρακάτω.

Εν συντομία, αναφέρουμε μερικές από τις χρήσεις του:

- Το υδρογόνο χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία σε μεγάλο ποσοστό για την παρασκευή αμμωνίας, μεθανίου ή μεθανόλης. Αυτά χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την παρασκευή άλλων προϊόντων, όπως εκρηκτικά, λιπάσματα, αντιψυκτικά κτλ.

- Η τεχνολογία τροφίμων χρησιμοποιεί το υδρογόνο για την παρασκευή υδρογονανθράκων.
- Το υδρογόνο επίσης χρησιμοποιείται από την επιστήμη της φυσικής με εφαρμογή στη μελέτη των στοιχειωδών σωματιδίων.
- Με τη μορφή υγρού βρίσκει χρήση στη μελέτη της υπεραγωγιμότητας.

## 2.6 Το Υδρογόνο Ως Φορέας Ενέργειας

Το υδρογόνο έχει επιπλέον μία χρήση. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως φορέας ενέργειας. Μάλιστα αυτή τη στιγμή γίνονται σημαντικές προσπάθειες, κυρίως στα ιδιαίτερα ανεπτυγμένα κράτη, για τη μετατροπή της προσαρμοσμένης στα συμβατικά καύσιμα υποδομής σε υποδομή με βάση το υδρογόνο. Ενδεικτικά, η Ισλανδία, προβλέπει σε μία υποδομή πλήρως βασισμένη στο υδρογόνο μέχρι το 2030-2040, ενώ μέχρι το 2030 στόχος του υπουργείου οικονομίας των Η.Π.Α. είναι η αντικατάσταση του 10% της ενεργειακής κατανάλωσης από ενέργεια υδρογόνου.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα για το πως το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παραχθεί ενέργεια είναι οι λεγόμενες κυψέλες καυσίμου (fuel cells) στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση αυτό. Περισσότερα για τις κυψέλες καυσίμου θα δούμε παρακάτω.

Η τάση κατανάλωσης καυσίμων όλο και λιγότερης περιεκτικότητας σε άνθρακα είναι ιστορικά εμφανής (σχήμα 2.3). Το υδρογόνο απαλλαγμένο από κάθε ποσό άνθρακα μπορεί να προσφέρει αρκετή ενέργεια για καθημερινές χρήσεις όπως η ηλεκτροδότηση κτιρίων ή η κίνηση των μεταφορικών μας μέσων.



Σχήμα 2.3: Περιεκτικότητες καυσίμων σε άνθρακα και υδρογόνο

## 2.7 Πλεονεκτήματα Έναντι Συμβατικών Πηγών Ενέργειας

Το ότι υπάρχει ένας σαφής προσανατολισμός προς την κατεύθυνση του υδρογόνου δεν είναι τυχαίο.

- Το υδρογόνο έχει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα βάρους από οποιοδήποτε άλλο γνωστό καύσιμο, 120,7Kj/gr και περίπου τρεις φορές μεγαλύτερο από αυτό της συμβατικής βενζίνης.
- Κάνει καθαρή καύση. Όταν καίγεται με οξυγόνο παράγει μόνο νερό και θερμότητα. Όταν καίγεται με τον ατμοσφαιρικό αέρα, ο οποίος αποτελείται περίπου από 68% άζωτο, παράγονται επίσης μερικά οξειδία του αζώτου σε αμελητέο ωστόσο βαθμό.
- Για το λόγο ότι κάνει καθαρή καύση δε συμβάλει στη μόλυνση του περιβάλλοντος. Το ποσό του νερού που παράγεται κατά τη καύση είναι τέτοιο ώστε να θεωρείται επίσης αμελητέο και μη ικανό επομένως να επιφέρει κάποια κλιματολογική αλλαγή δεδομένης ακόμα και μαζικής χρήσης.
- Είναι το ίδιο ακίνδυνο όσο η βενζίνη, το πετρέλαιο diesel ή το φυσικό αέριο. Το υδρογόνο μάλιστα είναι το λιγότερο εύφλεκτο σε απουσία αέρα με θερμοκρασία αυθόρμητης ανάφλεξης τους  $585^{\circ}\text{C}$  ( $230^{\circ}\text{C}$  με  $480^{\circ}\text{C}$  η αντίστοιχη της βενζίνης).
- Μπορεί να συμβάλει στη μείωση του ρυθμού κατανάλωσης των περιορισμένων φυσικών καυσίμων. 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.
- Μπορεί να παρασκευαστεί με πάρα πολλές μεθόδους σε οποιαδήποτε χώρα και σε οποιοδήποτε μέρος κι επομένως μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη αποκεντροποιημένων συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Αυτό θα ωφελήσει φτωχότερα και λιγότερο αναπτυγμένα κράτη τα οποία σήμερα εξαρτώνται ενεργειακά από άλλα ισχυρότερα. Επιπλέον, η περίπτωση δυσλειτουργίας ενός συστήματος παραγωγής ενέργειας δε θα επηρεάσει τη λειτουργία των άλλων.

## 2.8 Μειονεκτήματα Έναντι Συμβατικών Πηγών Ενέργειας

Όσον αφορά τώρα τα μειονεκτήματα στη χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο, τα περισσότερα έχουν να κάνουν με την ελλιπή σημερινή υποδομή και αποτελούν κυρίως τεχνικά προβλήματα τα οποία αναζητούν λύση.

- Ένα πρόβλημα είναι αυτό της αποθήκευσης του. Δεδομένου του ότι το υδρογόνο είναι πολύ ελαφρύ, η συμπίεση μεγάλης ποσότητας σε μικρού μεγέθους δεξαμενή είναι δύσκολη λόγω των υψηλών πιέσεων που χρειάζονται για να επιτευχθεί η υγροποίηση.
- Δεύτερο πρόβλημα αποτελεί η έλλειψη οργανωμένου δικτύου διανομής του.
- Λόγω του παραπάνω και η τιμή του επίσης είναι σχετικά υψηλή σε σύγκριση με αυτή της βενζίνης ή του πετρελαίου. Η περισσότερη διαδεδομένη λόγω χαμηλού κόστους μέθοδος παραγωγής υδρογόνου αυτή τη στιγμή είναι η μετατροπή του φυσικού αερίου. Ωστόσο όσο εξελίσσονται και άλλες μέθοδοι, όπως η μετατροπή της αιολικής ενέργειας, το κόστος θα συνεχίσει να μειώνεται.
- Επίσης αν και στο μεγαλύτερο μέρος των περιπτώσεων το υδρογόνο θεωρείται περισσότερο ασφαλές από οποιοδήποτε άλλο καύσιμο, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες μπορεί να γίνει εξαιρετικά επικίνδυνο. Για παράδειγμα, μπορεί να εκτοπίσει το οξυγόνο ενός χώρου και να δράσει ως ασφυξιογόνο.
- Αυξημένη είναι και η τιμή των κυψέλων καυσίμου με τις οποίες αυτή τη στιγμή γίνεται η μεγαλύτερη εκμετάλλευση του υδρογόνου ως καύσιμο. Επιπλέον η τεχνολογία τους δε μπορεί να θεωρηθεί ολοκληρωτικά αξιόπιστη αφού προς το

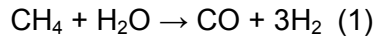


παρόν υπάρχουν αρκετά τεχνικά προβλήματα τα οποία αναζητούν αξιόπιστες λύσεις. Κυψέλες προσανατολισμένες για οικιακή και μεταφορική χρήση χαρακτηρίζονται από μικρή ανοχή σε καύσιμα μη υψηλής καθαρότητας. Αυτό με τη σειρά του αυξάνει το κόστος παραγωγής του καυσίμου. Κυψέλες καυσίμου προσανατολισμένες για βιομηχανική χρήση πάλι χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας.

### 3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

#### 3.1 Αναμόρφωση Μεθανίου Με Ατμό (SMR)

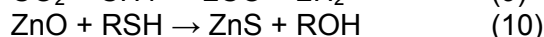
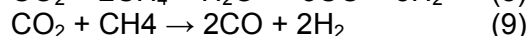
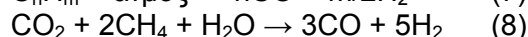
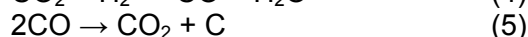
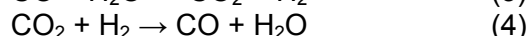
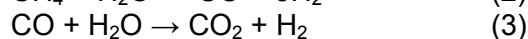
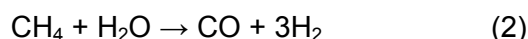
Η SMR τυπικά περιγράφεται από την παρακάτω αντίδραση που είναι μία ευρέως πρακτική τεχνολογία για την παραγωγή υδρογόνου.



Η αντίδραση είναι ενδόθερμη και διευκολύνεται σε χαμηλές πιέσεις. Αν και η στοιχειομετρία της αντίδρασης μας δείχνει ότι χρειάζεται ένα mole νερού για κάθε mole μεθανίου, παρόλα αυτά χρειάζεται περισσότερος ατμός να χρησιμοποιηθεί για να μειωθεί η παραγωγή παραπροϊόντων άνθρακα. Η προσθήκη περίσσιας ατμού μετατοπίζει την αντίδραση μακριά από την δημιουργία άνθρακα. Για το φυσικό αέριο, η αναλογία ατμού με άνθρακα είναι συνήθως από 2,5 μέχρι 3. Επιπλέον οι σύγχρονες μονάδες παραγωγής  $\text{H}_2$  χρησιμοποιούν μονάδες PSA για τον καθαρισμό του υδρογόνου και αυτές οι μονάδες λειτουργούν αποδοτικότερα σε μεγάλες πιέσεις. Η αντίδραση (1) είναι μια ενδόθερμη αντίδραση και η θερμοκρασία λειτουργίας των περισσότερων SMR είναι  $>800^\circ \text{C}$ . Αυτές οι εξαιρετικά μεγάλες θερμοκρασίες απαιτούν ακριβά κράματα μετάλλων για να μειώσουν την πιθανότητα επικάλυψης στο μέταλλο CO λόγω της συμπαραγωγής του. Μεγάλου πάχους σωλήνες απαιτούνται για τους αντιδραστήρες SMR που απαιτούν εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες και μεγάλες πιέσεις λειτουργίας, όπως και υψηλή κατανάλωση καυσίμου για την θέρμανση των καταλυτικών σωλήνων.

Η τεχνολογία SMR είναι μία ώριμη τεχνολογία που χρησιμοποιείται αρκετά χρόνια στην βιομηχανία για την παραγωγή υδρογόνου. Οι τυπικές οικονομικές πιέσεις λειτουργίας είναι 3 – 25 ατμόσφαιρες και οι θερμοκρασίες λειτουργίας 700 με  $800^\circ \text{C}$ . Για την αναγκαία ποσότητα θερμότητας που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί η αντίδραση καίγεται ένα μέρος της τροφοδοσίας (μέχρι και το 25%), ή χρησιμοποιούνται τα άχρηστα αέρια της διεργασίας όπως τα αέρια από τον καθαρισμό του υδρογόνου. Στην εφαρμογή της σε βιομηχανική κλίμακα η αντίδραση πραγματοποιείται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος πραγματοποιείται σε θερμοκρασία  $350 - 470^\circ \text{C}$  και ολοκληρώνεται ένα μεγάλο μέρος της αντίδρασης και στο δεύτερο μέρος πραγματοποιείται η αντίδραση σε χαμηλότερη θερμοκρασία  $200 - 250^\circ \text{C}$ . Η πραγματοποίηση της αντίδρασης σε δύο στάδια μειώνει σημαντικά την παραγωγή του CO.

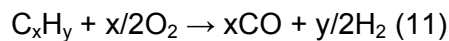
Επειδή στην πραγματικότητα το φυσικό αέριο που χρησιμοποιείται στην τροφοδοσία αποτελείται και από άλλα συστατικά πέραν του  $\text{CH}_4$  όπως βαρύτερους υδρογονάνθρακες, ενώσεις του θείου και άλλα, χρησιμοποιούνται συστήματα πριν τον κύριο αναμορφωτή για τον καθαρισμό αυτών των ενώσεων. Συγκεκριμένα για τις ενώσεις του θείου χρησιμοποιούνται μονάδες αποθείωσης ενώ για τους βαρύτερους υδρογονάνθρακες χρησιμοποιείται ένας προαναμορφωτής. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται σταθερή τροφοδοσία στην κύρια μονάδα αναμόρφωση χωρίς προβλήματα. Αναφορικά αναφέρονται παρακάτω οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται σε μία μονάδα SMR.



Πρέπει να σημειώσουμε ότι δεν πραγματοποιούνται όλες οι αντιδράσεις ταυτόχρονα αλλά ούτε και όλες μαζί σε έναν αντιδραστήρα. Από σύστημα σε σύστημα μπορεί να διαφέρει το πλήθος των αντιδράσεων λόγω διαφορετικής σύστασης στην τροφοδοσία. Επίσης οι αντιδράσεις πραγματοποιούνται σε διαφορετικές θερμοκρασίες η μία από την άλλη. Επιπλέον στο σύστημα της διαδικασίας αναμόρφωσης, απαιτείται μία μονάδα καθαρισμού του υδρογόνου μίας και το αέριο που παίρνουμε περιέχει υδρογόνο σε ποσοστό 70-80% και άλλα αέρια όπως CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O. Η μονάδα καθαρισμού είναι μία μονάδα PSA όπου καθαρίζεται το υδρογόνο σε ποσοστό μέχρι και 99,999%. Σε περίπτωση που το υδρογόνο προορίζεται για κυψέλες καυσίμου τότε είναι απαραίτητη και μια μονάδα εκλεκτικής οξειδωσης για το CO για να μην καταστραφούν οι ευαίσθητες μεμβράνες των PEMFC.

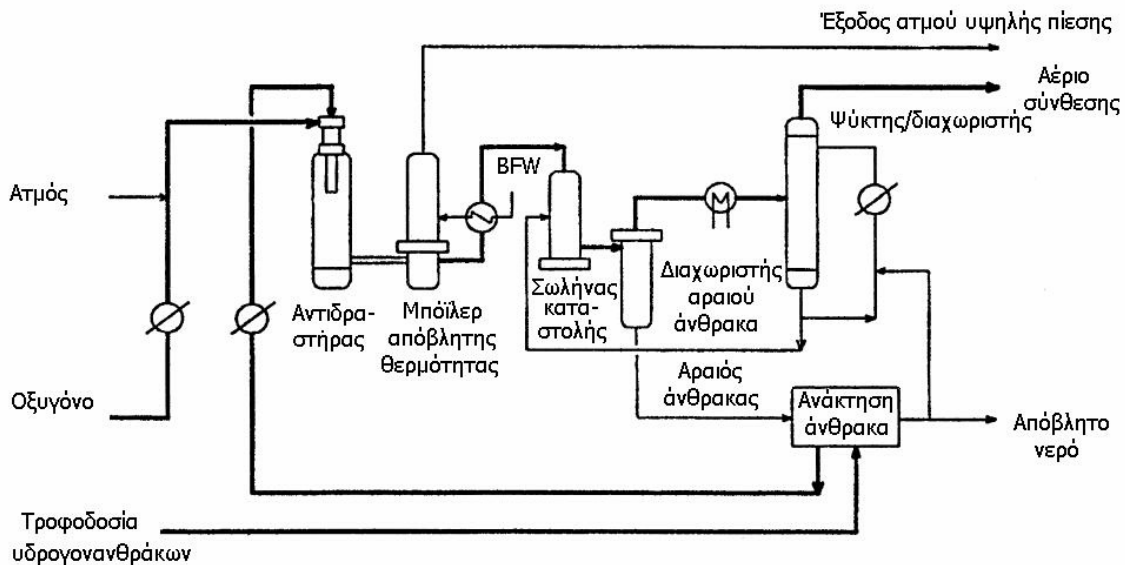
### 3.2 Μερική Οξείδωση Των Βαρέων Υδρογονανθράκων

Άλλη μία σημαντική τεχνική στην παραγωγή H<sub>2</sub> είναι η μη καταλυτική μερική οξείδωση των συμβατικών καυσίμων, συχνά αναφερόμενη ως POX (partial oxidation) ή ως αεριοποίηση. Ένα βασικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί με όλα τα είδη των υδρογονανθράκων. Η θερμική οξείδωση πραγματοποιείται σε 30 – 100 atm πίεση με καθαρό οξυγόνο, χρησιμοποιώντας έναν ειδικό καυστήρα μέσα σε ένα πυρίμαχο δοχείο σε θερμοκρασία 1300° C. Η γενική αντίδραση περιγράφεται ως εξής:



Σε αυτή την περίπτωση ο ατμός δεν χρησιμοποιείται στην τροφοδοσία, αλλά με την χρήση μεγαλύτερης τροφοδοσίας υδρογονανθράκων μπορεί να έχουμε πολύ άνθρακα ως παραπροϊόν. Δεδομένου ότι οι συνθήκες είναι ελεγχόμενες δεν παράγονται NO<sub>x</sub> ή SO<sub>2</sub>, παρόλα αυτά εάν η τροφοδοσία περιέχει οποιεσδήποτε ενώσεις θείου, θα έχουμε σαν παραπροϊόντα το H<sub>2</sub>S και το COS τα οποία πρέπει να απομακρυνθούν. Ένα σαφές μειονέκτημα είναι η ανάγκη για την ύπαρξη μεγάλων διαθέσιμων ποσοτήτων O<sub>2</sub>, που έχει ως συνέπεια την επένδυση σε εγκαταστάσεις για την συνεχόμενη τροφοδοσία σε O<sub>2</sub>. Αφού το CO είναι ένα παραπροϊόν, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ατμός υψηλής θερμοκρασίας για να μετατραπεί το CO με τον ατμό σε H<sub>2</sub>. Χρειάζονται επιπλέον μονάδες για τον καθαρισμό του αερίου (κατά ένα μεγάλο μέρος για την αφαίρεση του H<sub>2</sub>S) και την αφαίρεση της τέφρας από το χρησιμοποιημένο νερό. Παράλληλα το CO<sub>2</sub> αφαιρείται με απορρόφηση και τα υπολείμματα του CO καταστρέφονται από την διαδικασία μεθανιοποίησης.

Η διαδικασία μερικής οξείδωσης μπορεί να είναι πολύ σύνθετη (σχήμα 3.1) και σε σύγκρισή με τη αναμόρφωση ατμού είναι λιγότερο αποδοτική, εκπέμποντας περισσότερο CO<sub>2</sub>. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται ένα μέρος της διαδικασίας της μερικής οξείδωσης, επίσης πρέπει να παραχθεί ο ατμός και το CO/H<sub>2</sub> πρέπει να καθαριστεί. Ένα χαρακτηριστικό της POX σε σύγκριση με την SMR είναι ότι η αναμόρφωση είναι μια πολύ καλή διαδικασία όταν υπάρχουν μεγάλα αποθέματα από υπολείμματα (βαρέα κλάσματα πετρελαίου) των βαρελιών του πετρελαίου. Υπολογίζεται ότι η θερμική απόδοση ενός POX τροφοδοτούμενο με βαρέα κλάσματα υδρογονανθράκων, είναι 70% σύγκριση με την SMR όπου είναι 81%. Στη δευτεροβάθμια αναμόρφωση προστίθεται οξυγόνο, αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται σε αναμορφωτές ατμού, ειδικά όταν απαιτείται μεγάλη ποσότητα H<sub>2</sub> για την σύνθεση αμμωνίας. Στην εξώθερμη δευτεροβάθμια αναμόρφωση, ο αέρας προστίθεται από την πρώτη αναμόρφωση. Το υπόλοιπο μεθάνιο αντιδρά με τον αέρα παρέχοντας θερμότητα για το CO που παράγει η αντίδραση και το N<sub>2</sub> που δεν αντέδρασε χρησιμοποιείται για την σύνθεση της αμμωνίας.



**Σχήμα 3.1:** Διάγραμμα ροής της διαδικασίας μερικής οξειδωσης υδρογονανθράκων

### 3.3 Παραγωγή Υδρογόνου Από Βιομάζα

Η βιομάζα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του υδρογόνου μπορεί να προέρχεται είτε από διάφορα απόβλητα είτε από διάφορα φυτά. Το θετικό στην άμεση παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα είναι ότι μπορεί να γίνει χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, χωρίς τη χρήση της ηλεκτρόλυσης με μεγαλύτερες αποδόσεις και γενικά καλύτερα αποτελέσματα. Τα μειονεκτήματα είναι οι προσμίξεις που υπάρχουν στη τροφοδοσία και η αδυναμία μεγάλης παραγωγής βιομάζας.

#### 3.3.1 Αεριοποίηση Της Βιομάζας

Η παραγωγή υγρού  $H_2$  από την βιομάζα ή το φυσικό αέριο περιλαμβάνει διάφορα παρόμοια βασικά στάδια στην επεξεργασία. Με τη βιομάζα ή τον άνθρακα, η τροφοδοσία αρχικά αεριοποιείται (με την θέρμανση του σε θερμοκρασία πάνω από  $700^\circ C$  παρουσία ελάχιστου ή καθόλου οξυγόνου) στο αέριο σύνθεσης (syngas) που αποτελείται από  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2O_{(g)}$  και σε μερικές περιπτώσεις και από μεθάνιο ( $CH_4$ ) και μικρές ποσότητες από άλλους υδρογονάνθρακες.

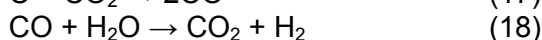
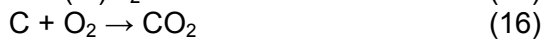
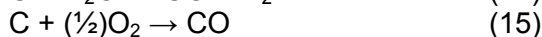
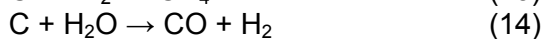
Οι αναλογίες αυτών εξαρτώνται από την τύπο της βιομάζας, τον τύπο του αεροποιητή, την θερμοκρασία και την πίεση, και την χρήση του αέρα, οξυγόνου στο σύστημα. Το αέριο σύνθεσης βγαίνοντας από τον αεροποιητή ψύχεται και απομακρύνονται τα σωματίδια και άλλες προσμίξεις. Επιπρόσθετα υπάρχει καθαρισμός για τις ενώσεις του θείου (S) (ιδιαίτερα σημαντικό για τον άνθρακα) που μπορούν να δηλητηριάσουν τους καταλύτες. Έπειτα το αέριο σύνθεσης υποβάλλεται σε μία σειρά οι χημικές αντιδράσεις για να οδηγηθεί στο επιθυμητό τελικό προϊόν. Ο εξοπλισμός μετά τον αεροποιητή για την μετατροπή του  $H_2$  είναι ίδιος με αυτόν που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του  $H_2$  από το φυσικό αέριο.

#### 3.3.2 Πυρόλυση Της Βιομάζας

Κατά την διαδικασία πυρόλυσης οι βαρείς υδρογονάνθρακες που περιέχονται μέσα στην βιομάζα διασπώνται σε υψηλές θερμοκρασίες απουσία οξυγόνου (τυπικές θερμοκρασίες λειτουργίας  $500 - 800^\circ C$ ). Η βασική αντίδραση κατά την πυρόλυση της βιομάζας είναι η ακόλουθη:



Οι επιμέρους αντιδράσεις είναι οι εξής :



Σε οποιαδήποτε από τις δύο διαδικασίες ακολουθηθεί για την παραγωγή της πρώτης ύλης στην παραγωγή υδρογόνου η βιομάζα χρειάζεται ξήρανση και σε περίπτωση που υπάρχουν μεγάλες ποσότητες θείου και μονάδα αποθείωσης.

### 3.4 Φωτοβιολογική Παραγωγή

Συνεχίζουμε με τις φωτολυτικές μεθόδους. Ορισμένοι φωτοσυνθετικοί μικροοργανισμοί παράγουν υδρογόνο ως μέρος του μεταβολικού τους κύκλου με τη βοήθεια ενέργειας από φως. Με σωστή εκμετάλλευση τους μπορούν να επιτευχθούν ποσοστά απόδοσης κοντά στο 25%. Μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι την παραγωγή υδρογόνου συνοδεύει και παραγωγή οξυγόνου όπου σε μεγάλες ποσότητες δρα καταστρεπτικά πάνω στο συνήθως αναερόβιο βιολογικό σύστημα. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο γίνονται προσπάθειες για τη δημιουργία νέων γενετικών μορφών περισσότερο ανθεκτικών στο οξυγόνο.

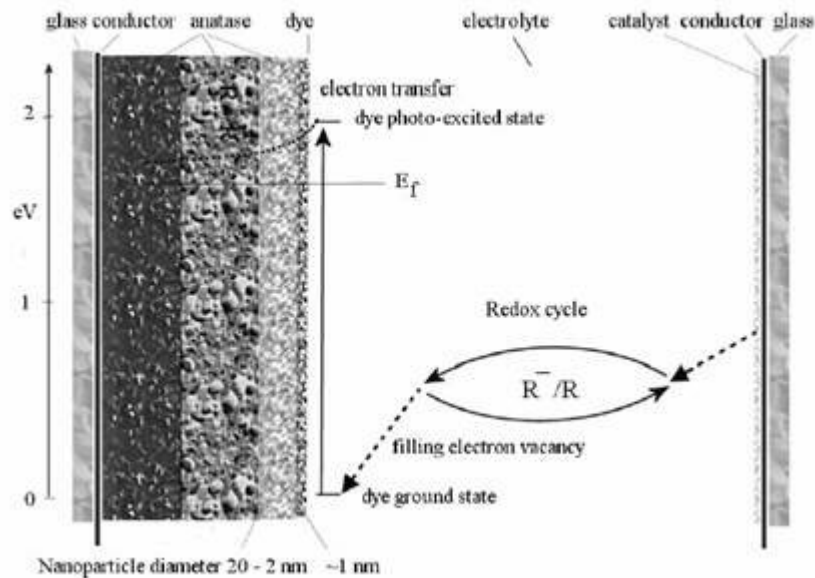
Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε ότι η βιόσφαιρα χρησιμοποιεί ένα πολύ μικρό ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή υδρογόνου (μικρότερο του 0,5% της συνολικής φωτοσυνθετικής διαδικασίας) σε ποσά τα οποία είναι συγκρίσιμα με αυτά που χρειάζονται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μας.

### 3.5 Φωτοηλεκτρόλυση

Παρόμοια απόδοση παρουσιάζουν συστήματα ηλιακών συλλεκτών συνδεδεμένων σε σειρά έτσι ώστε να παράγεται αρκετή τάση για να διαχωριστεί νερό στα συστατικά του. Η θεωρητική τιμή για ένα τέτοιο σύστημα όσον αφορά την απόδοση του είναι 40%. Ωστόσο πρακτικά η τιμή αυτή πέφτει στο 20% με 25%. Με χρήση υλικών χαμηλού κόστους όπως της άμορφης σιλικόνης η αποδοτικότητα μειώνεται ακόμα περισσότερο, στο 5% με 10%, όμως αποτελεί τη χρυσή τομή κόστους - απόδοσης και κάνει τη μέθοδο οικονομικά συμφέρουσα σχετικά.

Μία σχετικά νέα τεχνολογία στην μετατροπή ηλιακής ενέργειας είναι η χρήση φωτοηλεκτροχημικών στοιχείων ή αλλιώς στοιχείων Gratzel ( photoelectrochemical cells , PEC cells ). Τα στοιχεία αυτά αποτελούνται από ένα υψηλά πορώδες λεπτό υμένιο  $TiO_2$  μεγέθους σωματιδίων περίπου 2 με 20 nm σε διάμετρο. Το υμένιο αυτό επικαλύπτεται με βαφή (dye ) και έρχεται σε επαφή με υγρό ηλεκτρολύτη. Το σύστημα αυτό βρίσκεται ανάμεσα σε δύο διαφανή ηλεκτρόδια, συνήθως γυαλί επικαλυμμένο με αγωγίμο στρώμα. Όταν φως προσπίπτει στην βαφή, δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων - οπών. Τα ηλεκτρόνια μεταπηδούν στη ζώνη αγωγιμότητας του λεπτού φιλμ του  $TiO_2$  και από αυτό στο ηλεκτρόδιο (άνοδος) το οποίο είναι συνδεδεμένο με εξωτερικό κύκλωμα. Στην ουσία η παραγόμενη τάση είναι αυτή που θα ηλεκτρολύει το νερό. Τα ηλεκτρόνια ολοκληρώνουν το κύκλο τους με το να μεταφερθούν στην κάθοδο και μέσω του ηλεκτρολύτη πίσω στη βαφή. Παρόλο που το  $TiO_2$

από μόνο του μπορεί να αποβάλλει ηλεκτρόνια κατά την απορρόφηση φωτονίων η βαφή εξυπηρετεί στη διεύρυνση του φάσματος απορρόφησης και στην περιοχή του ορατού φάσματος αυξάνοντας έτσι την απόδοση. Προσμίξεις άνθρακα στο  $\text{TiO}_2$  έχουν παρόμοιο αποτέλεσμα. Τις οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις στις οποίες συμμετέχει ο ηλεκτρολύτης επιταχύνει καταλύτης που βρίσκεται στην κάθοδο.

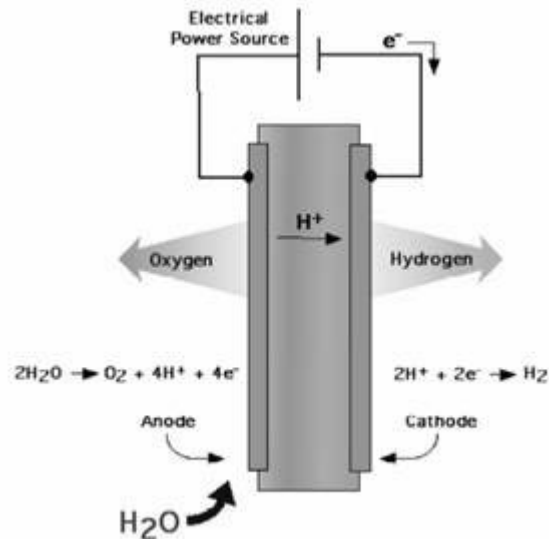


**Σχήμα 3.2:** Σχηματική αναπαράσταση φωτοηλεκτροχημικού στοιχείου

Ένα στοιχείο PEC κατασκευάζεται από φτηνά υλικά. Η απόδοση του είναι περίπου 10% αλλά μπορεί να αυξηθεί μειώνοντας το κόστος κατασκευής ακόμα περισσότερο ή διευρύνοντας το φάσμα απορρόφησης του. Επιπλέον, υπερτερεί των φωτοβολταϊκών στοιχείων λόγω της μικρότερης υπέρτασης η οποία εμφανίζεται στην άνοδο κατά την ηλεκτρόλυση του νερού.

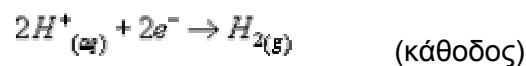
### 3.6 Ηλεκτρόλυση Νερού

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

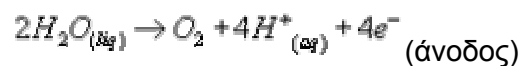


**Σχήμα 3.3:** Αναπαράσταση ηλεκτρολυτικού στοιχείου

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



και



οι οποίες μας δίνουν το συνολικό μηχανισμό της ηλεκτρόλυσης:



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

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

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

Η θεωρητική τιμή υπολογίζεται ως εξής. Η εξίσωση του Nerst για την κάθοδο είναι

$$E_C = E_{H^+}^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{a_{H^+}^2}{a_{O_2} a_{H_2}}$$

Όπου  $E_c$  το δυναμικό σε ισορροπία για την κάθοδο,  $E_{H_2}^0$  το πρότυπο δυναμικού ηλεκτροδίου υδρογόνου,  $2 F$  το φορτίο Coulomb που διέρχεται από το ηλεκτρόδιο και  $a_{\pm}$  οι ενεργότητες προϊόντων και αντιδρώντων. Ανάλογα για την άνοδο έχουμε:

$$E_a = E_{O_2}^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{a_{O_2}^{1/2} a_{H_2O}}{a_{OH}^2}$$

με  $E_{O_2}^0$  το πρότυπο δυναμικό του ανοδικού ηλεκτροδίου. Κατά σύμβαση θεωρούμε  $E_{H_2}^0 = 0$ . Θεωρώντας  $a_{H_2} = a_{O_2} = a_{H_2O} = 1$  (ότι δηλαδή  $H_2$ ,  $O_2$  και  $H_2O$  βρίσκονται στην πρότυπη κατάσταση) τότε από τις παραπάνω σχέσεις έχουμε:

$$E_a - E_c = 1,229V$$

Η αντίδραση της καθόδου, εμπλέκει όπως είδαμε 4 ηλεκτρόνια και η οξειδωση πραγματοποιείται μέσω μιας σειράς ενδιάμεσων προϊόντων. Σε αυτό οφείλεται η ανάγκη επιπλέον τάσης καθώς η όλη διαδικασία χαρακτηρίζεται από αργό κινητικό μηχανισμό. Η χρήση καταλύτη βοηθάει στη μείωση αυτής της τάσης και επιταχύνει τη διαδικασία. Ένας ιδανικός καταλύτης για την οξειδωση του νερού θα πρέπει να εξισορροπεί την απαιτούμενη ενέργεια του κάθε ενδιάμεσου βήματος και επίσης να εξισορροπεί τους ρυθμούς μεταφοράς κάθε ηλεκτρονίου.

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

### 3.7 Συσσκευές Ηλεκτρόλυσης

Η ηλεκτρόλυση νερού προς παραγωγή αερίου υδρογόνου και οξυγόνου είναι μια διαδικασία που έχει καθιερωθεί εδώ και πολλά χρόνια.

Η συσκευή ηλεκτρόλυσης νερού παίρνει στην είσοδο καθαρό νερό και συνεχές ρεύμα και παράγει υδρογόνο και νερό. Είναι ουσιαστικά η ανάποδη διαδικασία από αυτή που κάνει μια κυψελίδα καυσίμου. Η τεχνολογία της συσκευής ηλεκτρόλυσης μπορεί να εφαρμοστεί σε ποικίλες κλίμακες οπουδήποτε υπάρχει ανεφοδιασμός ηλεκτρικής ενέργειας.

Μπορεί να βρεθεί βολικά κοντά στα σημεία της απαίτησης (για να ελαχιστοποιήσει τις δαπάνες υποδομής αερίου) ή επί των μεγάλων τόπων που τροφοδοτούν τις υποδομές διανομής αερίου που περιλαμβάνουν τα σκάφη, τα βυτιοφόρα ή και τις σωληνώσεις.

Τα Electrolysers είναι συνήθως υψηλής αποδοτικότητας με τα καλύτερα διαθέσιμα εμπορικά παραδείγματα που πλησιάζουν την αποδοτικότητα της τάξης του 90%. Κατά συνέπεια υπάρχουν και ίχνη άνθρακα από το παραγόμενο υδρογόνο και οξυγόνο. Συνεπώς προβλέπεται ότι οι μελλοντικές χαμηλού –άνθρακα οικονομίες θα εκμεταλλευτούν την τεχνολογία των electrolyser για να παράγουν υδρογόνο χαμηλού άνθρακα για κυψέλες καυσίμου. Η τεχνολογία των electrolysers μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλά επίπεδα, παραπάνω από αυτά που ισχύουν σήμερα. Δυστυχώς ο κύριος παράγοντας που εμποδίζει



την πρόοδο των electrolysers πέρα από τις ειδικές εφαρμογές που εξυπηρετούν είναι το μεγάλο κόστος. Θα πρέπει βέβαια να γίνουν δραστικές μειώσεις στο κόστος των ηλεκτρολυτικών μονάδων στην περίπτωση που εισβάλουν στην μελλοντική οικονομία παραγωγής χαμηλού άνθρακα.

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι ηλεκτρολυτικών μονάδων :

1. Αλκαλικές ηλεκτρολυτικές μονάδες ( αναφέρεται στη φύση του υγρού ηλεκτρολύτη του)
2. PEM (proton-exchange membrane – μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων) ηλεκτρολυτικές μονάδες (αναφέρεται στο στερεό πολυμερή ηλεκτρολύτη) και
3. Στερεού-Οξειδίου ηλεκτρολυτικές μονάδες (αναφέρεται στο στερεό κεραμικό ηλεκτρολύτη του)

Οι αλκαλικές και οι PEM ηλεκτρολυτικές μονάδες έχουν αποδειχθεί πολύ καλές μονάδες και μάλιστα πολλές χιλιάδες μονάδες βρίσκονται ήδη σε λειτουργία σε αντίθεση με τα electrolysers στερεού-οξειδίου που ακόμα δεν έχει αποδειχθεί η απόδοσή τους. Τα PEM electrolysers ταιριάζουν ιδιαίτερα στις διανεμημένες εφαρμογές. Οι αλκαλικές ηλεκτρολυτικές μονάδες κυριαρχούν αυτή την περίοδο στην παγκόσμια παραγωγή υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης.

### 3.7.1 Αλκαλικές Ηλεκτρολυτικές Μονάδες

Η λειτουργία ενός αλκαλικού electrolyser εξαρτάται από την χρήση και την κυκλοφορία ενός ηλεκτρολυτικού διαλύματος (συνήθως υδροξείδιο του καλίου) για την μεταφορά των ιόντων υδροξυλίου. Οι αλκαλικές ηλεκτρολυτικές μονάδες λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές πυκνότητες ρεύματος  $< 0,4 \text{ A/cm}^2$  και η αποδοτικότητα μετατροπής κυμαίνεται από 60-90 %. Χωρίς βοηθητικό εξοπλισμό καθαρισμού η καθαρότητα των αερίων είναι συνήθως 99.8% και 99.2% για το υδρογόνο και το οξυγόνο αντίστοιχα. Αρκετές αλκαλικές ηλεκτρολυτικές μονάδες της τάξης  $> 100 \text{ MW}$  έχουν εγκατασταθεί (π.χ. στην Αίγυπτο και το Κονγκό για να χρησιμοποιήσουν την υδρενέργεια και να παράξουν «ανανεώσιμο υδρογόνο»).

Ένα σύγχρονο αλκαλικό electrolyser έχει μια αποδοτικότητα της τάξης  $\sim 90\%$  (που καταναλώνει 4 KWh ηλεκτρικής ενέργειας ανά  $\text{m}^3$  παραγόμενου υδρογόνου σε NTP) και θα δώσει το αέριο μέχρι 30 bar χωρίς βοηθητική συμπίεση. Εντούτοις, μια σημαντική κατανάλωση ενέργειας υφίσταται μετά την ηλεκτρόλυση για την συμπίεση αερίου για να δοθεί το υδρογόνο και το οξυγόνο στις πιέσεις που απαιτούνται από την βιομηχανία και για την αποθήκευση του υδρογόνου στα ανάλογα αυτοκίνητα ( 350-700 bar).

Οι βασικοί παράγοντες που ευνοούν τα αλκαλικά electrolyser είναι ότι αποφεύγουν την χρήση ακριβών λευκόχρυσων καταλυτών. Αυτό τα καθιστά συνήθως χαμηλότερου κόστους μονάδες σε σχέση με τα PEM electrolyser.

### 3.7.2 Ηλεκτρολυτικές Μονάδες Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEM)

Η λειτουργία ενός PEM electrolyser εξαρτάται από τη χρήση πολύτιμων καταλυτών ( λευκόχρυσος, λευκόχρυσος/ ρουθένιο) και ενός στερεού πολυμερούς ηλεκτρολύτη για την μεταφορά των πρωτονίων. Τα PEM electrolyser έχουν επιτύχει συνεχή λειτουργία πάνω από 100.000 ώρες χωρίς αποτυχία ακόμα και σε δύσκολες συνθήκες (π.χ. παροχή οξυγόνου στα πυρηνικά υποβρύχια). Μπορούν να λειτουργήσουν σε πολύ υψηλότερες πυκνότητες ρεύματος σε σχέση με τα αλκαλικά electrolyser ( $1-2 \text{ A/cm}^2$ ) με αποδοτικότητα μετατροπής που κυμαίνεται από 50-90% αλλά δεν μπορούν ακόμα να επιτύχουν υψηλές αποδοτικότητες σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος. Χωρίς βοηθητικό εξοπλισμό καθαρισμού, η καθαρότητα αερίου είναι 99.999% και για το υδρογόνο και για το οξυγόνο.

Η λειτουργία σε υψηλή πίεση (συμπεριλαμβανομένης και της υψηλής διαφορικής πίεσης μεταξύ υδρογόνου και οξυγόνου που φτάνει τα 200 bar ) είναι αναγκαία οπότε χρειάζεται και βοηθητική συμπίεση αερίου που όμως είναι αρκετά λιγότερη απ' ό τι σε ένα αλκαλικό electrolyser.

Οι βασικοί παράγοντες που ευνοούν τις PEM ηλεκτρολυτικές μονάδες είναι ότι δεν χρειάζονται υγρούς ηλεκτρολύτες σε κυκλοφορία κατά την διάρκεια λειτουργίας τους και μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος (με μικρό ίχνος) και έχουν την εγγενή δυνατότητα να αντιμετωπίσουν τις παροδικές μεταβολές της εισαγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Ως εκ τούτου βρίσκουν πολλές εφαρμογές ακόμα και σε αυτές που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (π.χ. φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες ) που η παροχή ρεύματος είναι διακοπτόμενη.

### 3.7.3 Στερεού Οξειδίου Ηλεκτρολυτικές Μονάδες

Η λειτουργία μιας συσκευής ηλεκτρόλυσης στερεού οξειδίου εξαρτάται από ένα στερεό κεραμικό ηλεκτρολύτη (οξειδίο ζirkονίου/ κέριο) που στις θερμοκρασίες 800-1000 °C μεταφέρει τα ιόντα οξυγόνου. Αυτού του είδους οι ηλεκτρολυτικές μονάδες απαιτούν πηγές υψηλής θερμοκρασίας-θερμότητας.

Με την λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες, η εισαγωγή θερμότητας καλύπτει ένα μέρος από την ενεργειακή απαίτηση της ηλεκτρόλυσης και έτσι απαιτείται λιγότερη ενέργεια για την παραγωγή ενός m<sup>3</sup> υδρογόνου σε σχέση με τις άλλες συσκευές ηλεκτρόλυσης. Παρόλα αυτά μέχρι σήμερα οι ηλεκτρολυτικές μονάδες στερεού οξειδίου δεν έχουν επιτύχει αρκετές ώρες λειτουργίας και δεν έχουν λυθεί βασικά προβλήματα εφαρμοσμένης μηχανικής όσον αφορά την ανακύκλωση του θερμού αέρα και η σφράγιση του. Συνεπώς δεν μπορεί να γίνει κάποια σύγκριση με τα αλκαλικά και PEM electrolyser.

Electrolyser						
Different types						
type	Electrolyte / Membrane		Electrodes / Catalysers		global reaction	
Alcaline	KOH/NiO, IMET™ (Inorganic Membrane Electrolysis Tech.)		Anode : Ni, Fe / Ni alloys, metal oxides Cathode : steel + Ni / Ni-Co		Anode : $4\text{HO}^-_{(l)} \Rightarrow \text{O}_{2(g)} + 2\text{H}_2\text{O}_{(l)} + 4e^-$ Cathode: $4\text{H}_2\text{O}_{(l)} + 4e^- \Rightarrow 2\text{H}_{2(g)} + 4\text{HO}^-_{(l)}$	
Acid PEM	Solid, proton exchange polymer membrane (Nafion®)		Anode : Graphite-PTFE + Ti / RuO <sub>2</sub> , IrO <sub>2</sub> Cathode : Graphite + Pt / Pt		Anode : $6\text{H}_2\text{O}_{(l)} \Rightarrow \text{O}_{2(g)} + 4\text{H}_3\text{O}^+_{(l)} + 4e^-$ Cathode: $4\text{H}_3\text{O}^+_{(l)} + 4e^- \Rightarrow 4\text{H}_{2(g)} + 4\text{H}_2\text{O}_{(l)}$	
High temp. steam	a) Zirconia ceramics (0,91ZrO <sub>2</sub> -0,09Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) b) Zirconia oxide ceramics		Anode : ceramics (Mn, La, Cr) / Ni Cathode : Zr & Ni cermets / CeOx		a) Cathode: $2\text{H}_2\text{O}_{(g)} + 4e^- \Rightarrow 2\text{O}_2^- + 2\text{H}_{2(g)}$ Anode : $2\text{O}_2 \Rightarrow \text{O}_{2(g)} + 4e^-$ b) Anode : $2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow 4\text{H}^+ + \text{O}_{2(g)} + 4e^-$ Cathode: $4\text{H}^+ + 4e^- \Rightarrow 2\text{H}_{2(g)}$	
Principle of operation						
<p>Alcaline electrolyser:</p>			<p>PEM electrolyser :</p>		<p>High temperature electrolyser :</p>	
Technical data						
type	Temperature of operation	Pressure of operation	Electric consumption	Energy Efficiency	Life duration	State of development
Alcaline	50 - 100 °C	3 - 30 bars	4-5 kWh / Nm <sup>3</sup> of H <sub>2</sub>	75 - 90 %	15 - 20 years	marketed
PEM	80 - 100 °C	1- 70 bars	6 kWh / Nm <sup>3</sup> of H <sub>2</sub>	80 - 90 %	150 000 hours (≈17 years)	development
High temp. steam	800 - 1000 °C	??	3-3.5 kWh / Nm <sup>3</sup> of H <sub>2</sub>	80 - 90 %	??	research

Πίνακας 3.1 : Κύρια χαρακτηριστικά κάθε τύπου ηλεκτρολυτικής μονάδας

## 4. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

### 4.1 Εισαγωγή

Η αποθήκευση υδρογόνου υπονοεί ουσιαστικά τη μείωση ενός πολύ μεγάλου όγκου αερίου υδρογόνου. 1 kg υδρογόνου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και ατμοσφαιρική πίεση καταλαμβάνει 11 m<sup>3</sup>. Για την πρακτική επομένως χρήση του πρέπει να αυξηθεί η πυκνότητα του. Αυτό γίνεται είτε αυξάνοντας την πίεση του είτε μειώνοντας τη θερμοκρασία του είτε, τέλος, μειώνοντας την άπωση μεταξύ των μορίων καθώς αυτό αντιδρά με κάποιο υλικό. Επίσης πολύ σημαντικό κριτήριο είναι κατά πόσο η διαδικασία της αποθήκευσης είναι αντιστρέψιμη.

Οι τρόποι αποθήκευσης του υδρογόνου είναι οι ακόλουθοι:

1. Αποθήκευση του υδρογόνου με την μορφή συμπιεσμένου αερίου.
2. Αποθήκευση του υδρογόνου ως υγρό σε κρυογενικές δεξαμενές (cryogenics).
3. Αποθήκευση του υδρογόνου σε στερεά μορφή με την μορφή των υδριδίων (hydrides).

### 4.2 Αποθήκευση Του Υδρογόνου Σε Αέρια Μορφή

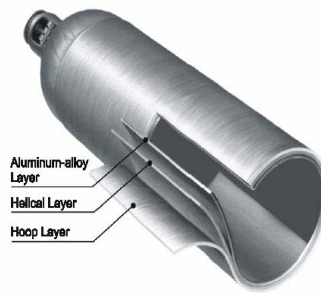
Η απλούστερη μέθοδος αποθήκευσης του υδρογόνου είναι αυτή όπου το υδρογόνο αποθηκεύεται ως συμπιεσμένο αέριο. Ο βασικός εξοπλισμός που απαιτείται για να γίνει αυτό είναι ένας συμπιεστής–κομπρεσέρ υδρογόνου και το αντίστοιχο πιεστικό δοχείο ή δεξαμενή αποθήκευσης. Το αέριο υδρογόνο μπορεί να αποθηκεύεται είτε σε δεξαμενές χαμηλής πίεσης είτε σε κυλίνδρους υψηλής πίεσης.

Συνήθως οι δεξαμενές αποθήκευσης αερίου υδρογόνου χαμηλής πίεσης, έχουν σφαιρική αλλά και κυλινδρική μορφή και μπορούν να αποθηκεύουν περίπου 1.300kg υδρογόνου σε πίεση 1.2- 1.6 MPa (12-16 bar) . Οι κύλινδροι υψηλής πίεσης (tube storage), που είναι και ο πιο διαδομένος τρόπος αποθήκευσης του υδρογόνου υπό αέρια μορφή, συνήθως αποτελούνται από ένα εσωτερικό χαλύβδινο ή από αλουμίνιο λεπτό φύλλο πολύ υψηλής αντοχής, το οποίο περιβάλλεται από αλλεπάλληλες στρώσεις από συνθετικά υλικά.

Για την αποθήκευση και μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων αερίου υδρογόνου χρησιμοποιούνται διάφορες συστοιχίες μεγάλων διαστάσεων κυλίνδρων υψηλής πίεσης οι οποίες μπορούν να είναι κατάλληλα προσαρμοσμένες πάνω σε ειδική κινούμενη πλατφόρμα (tube storage trailers). Αυτού του είδους οι κύλινδροι έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν με ασφάλεια το αέριο υδρογόνο ακόμα και σε πιέσεις που φτάνουν μέχρι και τα 350 bar με αποτέλεσμα να αποθηκεύονται σημαντικές ποσότητες υδρογόνου σε πολύ μικρό όγκο. Οι παραπάνω διατάξεις αποθήκευσης του αερίου υδρογόνου φαίνονται στα σχήματα που ακολουθούν.



**Σχήμα 4.1**  
Δεξαμενή αποθήκευσης  
αέριου υδρογόνου  
Σε χαμηλή πίεση



**Σχήμα 4.2**  
Κύλινδρος αποθήκευσης  
αέριου υδρογόνου



**Σχήμα 4.3**  
Αποθήκευση αέριου  
υδρογόνου σε συστοιχίες  
κυλίνδρων

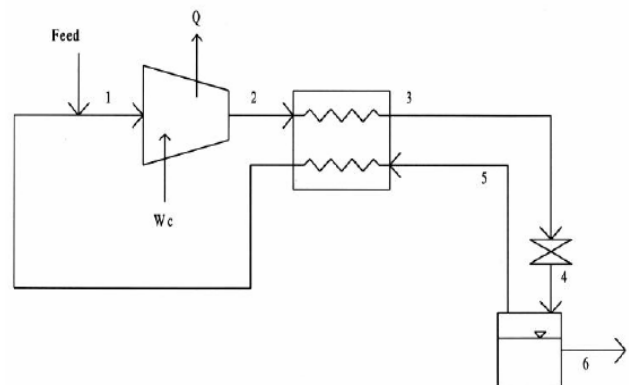
Για την συμπίεση του αέριου υδρογόνου χρησιμοποιούνται εμβολοφόροι συμπιεστές (reciprocating compressors) πολλαπλών βαθμίδων συμπίεσης.

Σήμερα οι συμπιεστές του υδρογόνου μπορούν να έχουν ισχύ μέχρι και 11.200 kW και έχουν την ικανότητα να συμπιέζουν το αέριο υδρογόνο σε πιέσεις μέχρι και 25-30 MPa, με μία ταχύτητα ροής η οποία μπορεί να φτάνει μέχρι και τα 1.950 kg/h.

### 4.3 Αποθήκευση Του Υδρογόνου Σε Υγρή Μορφή

Το αέριο υδρογόνο κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης όπως όλα τα αέρια μπορεί να μετατραπεί σε υγρό. Είναι χαρακτηριστικό ότι το υδρογόνο σε μορφή υγρού μπορεί να αποθηκευτεί ακόμα και σε ατμοσφαιρική πίεση. Η υγροποίηση του αέριου υδρογόνου προϋποθέτει την ψύξη του αέριου υδρογόνου αέριας μορφής σε θερμοκρασία περίπου γύρω στους  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Η όλη διαδικασία απαιτεί μία συνδυασμένη διάταξη από συμπιεστές, εναλλάκτες θερμότητας, μηχανές εκτόνωσης και στραγγαλιστικές βαλβίδες, η οποία επιτυγχάνει την ψύξη του αέριου υδρογόνου σε τόσο χαμηλή θερμοκρασία. Βέβαια για όλες τις παραπάνω διαδικασίες θα πρέπει παράλληλα να καταναλωθούν σημαντικά ποσά ενέργειας. Η διαδικασία υγροποίησης του υδρογόνου είναι γνωστή ως ο κύκλος του Linde, ή Joule-Thompson και η πορεία αυτής φαίνεται στο σχήμα 4.4.



- 1-2. Συμπίεση του αέριου υδρογόνου
- 2-3. Ψύξη μέσω εναλλάκτη
4. Εκτόνωση και διαχωρισμός της υγρής από την αέρια φάση
5. Ανακύκλωση της αέριας φάσης μέσω του εναλλάκτη
6. Παραλαβή του υγρού υδρογόνου

**ΣΧΗΜΑ 4.4**  
Διαδικασία παραγωγής υγρού υδρογόνου

Από μετρήσεις οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί για όλη την παραπάνω διαδικασία μετατροπής του αέριου υδρογόνου σε υγρή μορφή κάτω από ιδανικές συνθήκες απαιτούνται 3,92 kWh/kg, την στιγμή όπου για την υγροποίηση του αζώτου απαιτούνται μόλις 0,207 kWh/kg. Το ποσό αυτό με βάσει μετρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί κάτω από πραγματικές συνθήκες φτάνει τις 10kWh/kg.

Με βάση την ενεργειακή ικανότητα του υδρογόνου ως καύσιμο, όπου ισχύει ότι το 1 kg υγρού υδρογόνου, μπορεί να δώσει 119,93 MJ ενέργεια δηλαδή 33,31 kWh, κάνοντας την αντίστοιχη διαίρεση βλέπουμε ότι η ενέργεια που απαιτείται για την υγροποίηση του υδρογόνου αντιπροσωπεύει το 30% περίπου της συνολικής του ενέργειας, το κόστος της οποίας σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να είναι απαγορευτικό ακόμα και για την κατασκευή της ίδιας της μονάδας. Η αποθήκευση του υγρού υδρογόνου θα πρέπει να γίνεται μέσα σε δεξαμενές στις οποίες η θερμοκρασία θα διατηρείται κάτω από τους  $-253^{\circ}\text{C}$ . Στις δεξαμενές αποθήκευσης υγρού υδρογόνου είναι σημαντικό, να μην μεταφέρεται κανένα άλλου είδους θερμότητας μέσα στον εσωτερικό χώρο αποθήκευσης από το περιβάλλον, για μην έχουμε ανεπιθύμητη μετατροπή του υγρού υδρογόνου σε αέριο. Για το λόγο αυτό, η αποθήκευση του υγρού υδρογόνου, γίνεται σε ειδικά διαμορφωμένες και μονωμένες δεξαμενές, οι οποίες ονομάζονται κρυογενικές δεξαμενές-δοχεία (cryogenic-vessels-containers).

Όλες αυτού του τύπου οι δεξαμενές έχουν διπλά τοιχώματα και ο χώρος όπου υπάρχει μεταξύ των δύο τοιχωμάτων συνήθως εκκενώνεται πλήρως (δημιουργείται κενό αέρος) για να ελαχιστοποιείται το ποσό της θερμότητας που θα μεταφέρεται από την διαφορά θερμοκρασίας με το εξωτερικό περιβάλλον με ακτινοβολία και με αγωγιμότητα. Για να εμποδιστεί το φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία τόσο το εξωτερικό περίβλημα όσο και το εσωτερικό, από την ελεύθερη-εξωτερική τους πλευρά, τα τοιχώματα καλύπτονται με φύλλα κολλοειδούς σιλικόνης (περλίτη) ή από το ειδικό συνθετικό υλικό με την ονομασία MYLAR, το οποίο αποτελείται από ένα κράμα πλαστικού το οποίο περιέχει ίνες αλουμινίου.

Στις μεγάλης χωρητικότητας δεξαμενές αποθήκευσης υγρού υδρογόνου, για να μειωθεί ακόμα περισσότερο η μεταφορά θερμότητας από τον περιβάλλοντα χώρο, περιμετρικά τοποθετείται άλλο ένα στρώμα-διαμέρισμα το οποίο είναι γεμάτο με υγρό άζωτο. Σήμερα οι περισσότερες δεξαμενές δοχεία-υγρού υδρογόνου έχουν κυλινδρική μορφή όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5 και είναι τοποθετούνται τόσο σε οριζόντια αλλά και κατακόρυφη θέση με χωρητικότητες που κυμαίνονται συνήθως από 5-100 m<sup>3</sup>.

Πάντως θα πρέπει να τονιστεί ότι στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης υγρού υδρογόνου μέσα στις δεξαμενές ή στα βυτία έχουμε πάντα συνύπαρξη της υγρής με την αέρια φάση. Στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης υγρού υδρογόνου για να έχουμε ελεγχόμενη μετατροπή της υγρής φάσης σε αέρια είναι απαραίτητη η παρουσία του ενός επιπλέον συστήματος το οποίο ονομάζεται εξαεριωτής. Η συνηθέστερη περίπτωση εξαεριωτών είναι αυτοί οι οποίοι λειτουργούν χωρίς την προσθήκη επιπλέον ενέργειας (ambient air evaporators) για την εξαέρωση του υδρογόνου αλλά μόνο με την μεταφορά θερμότητας από τις σωληνώσεις τους με το περιβάλλον.

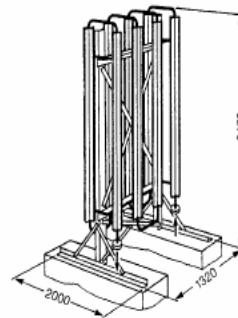
Οι εξαεριωτές αυτού του τύπου όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.6, αποτελούνται από ένα πλέγμα σωληνώσεων αλουμινίου οι οποίες κατά το μήκος τους είναι καλυμμένες από ειδικά προσαρμοσμένο μονωτικό υλικό, έτσι ώστε να μην έχουμε την απότομη μεταφορά θερμότητας από το περιβάλλον στο υγρό υδρογόνο. Έτσι η μετατροπή του υδρογόνου από υγρό σε αέριο γίνεται σταδιακά και με ελεγχόμενο τρόπο.

**ΣΧΗΜΑ 4.5**

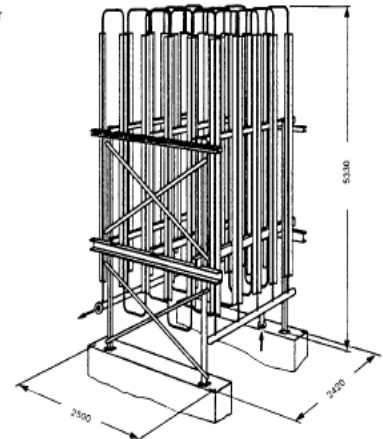
Δεξαμενή αποθήκευσης υγρού υδρογόνου

Example of type designation: **L40-8F2,7**

L = Ambient air evaporator  
40 = Permissible operating pressure 40 bar  
8 F 2,7 = 8 finned tubes, each 2.7 m long



Evaporator type L40-8F2,7  
Capacity 100 m<sup>3</sup>/h



Evaporator type L40-30F4,3  
Capacity 600 m<sup>3</sup>/h

**ΣΧΗΜΑ 4.6**

Εξαεριωτές υδρογόνου

#### 4.4 Αποθήκευση Του Υδρογόνου Σε Στερεά Μορφή Με Την Μορφή Των Υδριδίων

Η αποθήκευση του υδρογόνου με την μορφή υδριδίων, βασίζεται στην ιδιότητα μερικών μετάλλων, να απορροφούν και να εγκλωβίζουν το αέριο υδρογόνο, κάτω από συνθήκες υψηλής πίεσης σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Τα ίδια όμως μέταλλα, όταν θερμανθούν, κάτω από χαμηλή πίεση έχουν την ικανότητα να ελευθερώνουν το αέριο το οποίο έχουν απορροφήσει.

Το πλεονέκτημα του συγκεκριμένου τρόπου αποθήκευσης είναι ότι με τον τρόπο αυτό το αέριο υδρογόνο γίνεται κομμάτι του ίδιου του μετάλλου και δεν απαιτεί μεγάλες πιέσεις ή πολύ χαμηλές θερμοκρασίες αποθήκευσης. Επίσης επειδή το αέριο ελευθερώνεται από το υδρίδιο σε χαμηλή πίεση θεωρητικά ισχύει ότι τα υδρίδια είναι ο πιο ασφαλής τρόπος αποθήκευσης του υδρογόνου.

Υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί τύποι υδριδίων τα περισσότερα είναι κυρίως κράματα-ενώσεις του μαγνησίου, του σιδήρου του νικελίου και του τιτανίου. Σε γενικές γραμμές χωρίζονται σε εκείνα τα οποία έχουν δυνατότητα απορρόφησης μικρών ή μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου και σε εκείνα όπου η εκτόνωση-παροχή του υδρογόνου γίνεται παρουσία υψηλών ή χαμηλών σχετικά θερμοκρασιών.

Όσον αφορά τον παράγοντα της θερμοκρασίας τα υδρίδια, τα οποία ελευθερώνουν το υδρογόνο σε υψηλές θερμοκρασίες είναι συνήθως φθηνότερα στην κατασκευή και κατακρατούν μεγαλύτερες ποσότητες από εκείνα τα οποία λειτουργούν ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι απαιτούν σημαντικές ποσότητες θερμότητας μέχρι να φτάσουν στην κανονική θερμοκρασία εκτόνωσης.

Για τα υδρίδια τα οποία λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες (θερμοκρασίες περιβάλλοντος) πράγμα το οποίο πολλές φορές μας βολεύει ιδιαίτερα, το κυριότερο πρόβλημα που παρουσιάζουν, είναι ότι λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών λειτουργίας πολλές φορές μπορεί να έχουμε ανεπιθύμητη έκλυση του αέριου υδρογόνου. Για τον λόγο αυτό, τα υδρίδια τα οποία λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι θεμιτό να απελευθερώνουν το υδρογόνο μόνο όταν υπάρχουν ταυτόχρονα συνθήκες υψηλής πίεσεως κάτι το οποίο κάνει την διαδικασία λειτουργίας τους ακόμα πιο περίπλοκη. Τα κυριότερα είδη μεταλλικών υδριδίων φαίνονται στο πίνακα 4.1.

Χαρακτηριστικά	Χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας				Υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας		
	Ti2Ni-H2,5	FeTi-H2	VH-VH2	LaNi5-H6,7	Mg2Cu3-H3	Mg2Ni-H4	Mg-H
Ποσοστό του υδρογόνου σε σχέση με την συνολική μάζα μετάλλου που το απορροφά	1,61%	1,87%	1,92%	1,55%	2,67%	3,71%	8,25%
Συνολική μάζα υδριδίου που περιέχει ενέργεια ισοδύναμης με 1 lit βενζίνης	155 Kg	134 Kg	130 Kg	161 Kg	Δεν υπάρχουν στοιχεία	67,5 Kg	35 Kg
Μάζα του υδριδίου που απαιτείται για την αποθήκευση 2,5 kg υδρογόνου	217 Kg	188 Kg	182 Kg	225 Kg	Δεν υπάρχουν στοιχεία	95 Kg	50 Kg
Θερμοκρασία απελευθέρωσης σε πίεση 10 atm	34 °C 307 °K	52 °C 325 °K	53 °C 326 °K	73 °C 346 °K	318 °C 591 °K	350 °C 623 °K	362 °C 635 °K
Θερμοκρασία απελευθέρωσης σε πίεση 1,5 atm	-3 °C 270 °K	7 °C 280 °K	15 °C 288 °K	21 °C 294 °K	245 °C 522 °K	267 °C 540 °K	296 °C 569 °K
Φόρτωση του υδριδίου με υδρογόνο	Πολύ εύκολα	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Πολύ δύσκολα	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δύσκολα	Πολύ δύσκολα
Ασφάλεια μεθόδου	Πολύ μεγάλη	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Είναι εύκολα αναφλέξιμο	Πολύ μεγάλη	Είναι εύκολα αναφλέξιμο

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1**  
Κυριότερα είδη μεταλλικών υδριδίων

## 4.5 Σύγκριση Των Μεθόδων Αποθήκευσης Του Υδρογόνου

Κάθε ένας από τους παραπάνω τρόπους αποθήκευσης του υδρογόνου έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Το υδρογόνο σαν αέριο έχει την μικρότερη πυκνότητα απ' όλα τα υπάρχοντα αέρια, οπότε η αποθήκευσή του σε αέρια μορφή, απαιτεί την παρουσία πολύ μεγάλων δοχείων-δεξαμενών αποθήκευσης. Αυτό ξεπερνιέται κατά κάποιο τρόπο με την αποθήκευση του υδρογόνου σε πολύ μεγάλες πιέσεις όπως συμβαίνει στους κυλίνδρους υψηλής πίεσης, πράγμα όμως που μεγαλώνει τον βαθμό επικινδυνότητας αυτού του είδους των εγκαταστάσεων. Ενδεικτικά για την αποθήκευση σε αέρια μορφή, αναφέρουμε ότι μια μικρή αύξηση της θερμοκρασίας, όταν έχουμε πιέσεις πάνω από τα 300 bar, μπορεί να προκαλέσει μία επιπλέον αύξηση της πίεσης του αερίου μέσα στον κύλινδρο, ακόμα και περισσότερο από 10 %. Αυτό είναι πάρα πολύ επικίνδυνο γιατί αυτή η επιπλέον αύξηση της πίεσης μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε καταστροφική αστοχία (σκάσιμο) του κυλίνδρου με όλες τις επακόλουθες συνέπειες.

Αντίθετα, παρόλο που στην υγρή μορφή το υδρογόνο απαιτεί μικρότερους όγκους αποθήκευσης, αφού ο όγκος που καταλαμβάνει είναι περίπου 850 φορές μικρότερος από αυτόν που καταλαμβάνει ως αέριο στις κανονικές συνθήκες, για να μην δημιουργούνται προβλήματα υπερπίεσης λόγω της εξαέρωσης του, απαιτείται η αποθήκευσή του σε έναν εντελώς μονωμένο χώρο-δεξαμενή της οποίας η θερμοκρασία θα διατηρείται περίπου στους  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Ένα όμως άλλο πολύ σημαντικό πρόβλημα κατά την αποθήκευση του υδρογόνου σε υγρή μορφή σε θερμοκρασίες κάτω από την θερμοκρασία βρασμού ( $-253^{\circ}\text{C}$ ), είναι η ίδια η τάση του υδρογόνου ακόμα και σε τόσο χαμηλές θερμοκρασίες να εξαερώνεται, εξ' αιτίας της εσωτερικής μετατροπής του ορθού-υδρογόνου σε παρά-υδρογόνο. Το υδρογόνο στην αέρια μορφή και σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης (NTP) είναι κατά 25% σε μορφή παρά-υδρογόνου και το υπόλοιπο 75% σε μορφή ορθού-υδρογόνου. Αντίθετα στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες κοντά σημείο βρασμού (NBP  $-253^{\circ}\text{C}$ ), το υδρογόνο για να βρίσκεται σε σταθερή μοριακή κατάσταση θα πρέπει να είναι όλο σχεδόν σε μορφή παρά-υδρογόνου.

Κατά την διαδικασία της υγροποίησης του υδρογόνου οι ποσότητες που είναι σε μορφή ορθού-υδρογόνου, μετατρέπονται σε παρά-υδρογόνο με πάρα πολύ αργούς ρυθμούς, με αποτέλεσμα ακόμα και όταν το υδρογόνο έχει υγροποιηθεί πλήρως, από μοριακής δομής να υπάρχουν σημαντικές ποσότητες ορθού-υδρογόνου μέσα σε αυτό. Αυτές οι ποσότητες του ορθού-υδρογόνου, μέσα στον ίδιο τον χώρο-δεξαμενή αποθήκευσης, συνεχίζουν και μετατρέπονται σε παρά-υδρογόνο μέσω μίας εξώθερμης αντίδρασης η οποία αποδίδει ενέργεια  $527\text{ kJ/kg}$ , Έτσι προκαλείται η εξαέρωση του περιεχομένου των κρυογενικών δεξαμενών, όπως ακριβώς θα συνέβαινε και με την εισαγωγή θερμότητας σε αυτή από τον εξωτερικό χώρο.

Η μετατροπή της υγρής φάσης σε αέρια με αυτό τον τρόπο ονομάζεται απώλειες τύπου βρασμού (boil-off) και οι ποσότητες οι οποίες εξαερώνονται μπορούν να φτάσουν ακόμα και στο 50% της συνολικής υγροποιημένης ποσότητας, μέσα σε διάστημα 10 ημερών. Είναι χαρακτηριστικό ότι αυτό το φαινόμενο, λόγω της ταυτόχρονης παρουσίας της υγρής και της αέριας φάσης, έχει ως φυσικό επακόλουθο την απότομη αύξηση της πίεσεως μέσα στα κρυογενικά βυτία, παρόλο που όταν αρχικά υπάρχει μόνο υγρό υδρογόνο μέσα σε αυτά η πίεση μπορεί να είναι κοντά στην ατμοσφαιρική.



Τέλος όσον αφορά την αποθήκευση του υδρογόνου κατά κάποιο τρόπο σε στερεά μορφή με την μορφή των υδριδίων, φαίνεται αυτή να είναι η πιο ασφαλής μέθοδος, αφού το μέσο αποθήκευσης οποίο έχει την ιδιότητα να απορροφά και να απελευθερώνει το υδρογόνο κάτω από κατάλληλες και πλήρως ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Από την άλλη μεριά όμως, το μέσο αποθήκευσης έχει πάρα πολύ μεγάλο βάρος, με αποτέλεσμα η χρήση του σε πάρα πολλές εφαρμογές και κυρίως σε αυτές των αυτοκινούμενων μέσων, να είναι απαγορευτική.

Ακόμα και στην περίπτωση των πιο αποτελεσματικών υδριδίων αυτά περιέχουν μόλις 8% κατά βάρος σε υδρογόνο, με αποτέλεσμα για τις ίδιες ποσότητες υδρογόνου το συνολικό βάρος των υδριδίων να είναι έως και 30 μεγαλύτερο αντίστοιχα σε σχέση με το βάρος της υγρής βενζίνης με το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο.

Ένα ακόμα σημαντικό μειονέκτημα των υδριδίων και για να μην καταστρέφεται η ικανότητα απορρόφησής τους, είναι το ότι αυτά θα πρέπει να φορτώνονται–γεμίζουν, με εντελώς καθαρό υδρογόνο.

Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι τιμές των δύο κυριότερων παραμέτρων (όγκος και βάρος) που καταλαμβάνουν τα συστήματα αποθήκευσης υδρογόνου, είτε αυτό αποθηκεύεται σε αέρια είτε σε υγρή είτε σε στερεή μορφή και συγκρίνονται με τους αντίστοιχους όγκους και βάρη των συστημάτων αποθήκευσης των συμβατικών καυσίμων όπως είναι η μεθανόλη και η βενζίνη, καθώς και των μπαταριών, θεωρώντας ότι κάθε σύστημα έχει την ικανότητα αποθήκευσης σε ενέργεια ίση με 990.000 BTU δηλαδή 1.044.500 kJ.

ΚΑΥΣΙΜΟ	ΤΡΟΠΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ	ΟΓΚΟΣ (σε L)	ΚΑΘΑΡΟ ΒΑΡΟΣ καυσίμου(σε kg)	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΡΟΣ Με το μέσο αποθήκευσης(σε kg)
Βενζίνη	Σε υγρή μορφή	30	22	27
Μεθανόλη	Σε υγρή μορφή	62	49	57
Υδρογόνο (υδρίδιο)	Σε στερεά μορφή ως υδρίδιο	340	8,2	772
Υδρογόνο (αέριο)	Σε αέρια μορφή Υπό πίεση 250 bar	479	8,2	285
Υδρογόνο (αέριο)	Σε αέρια μορφή Υπό πίεση 350 bar	368	8,2	205
Υδρογόνο (υγρό)	Σε υγρή μορφή (-253 °C)	115	8,2	73

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2:**

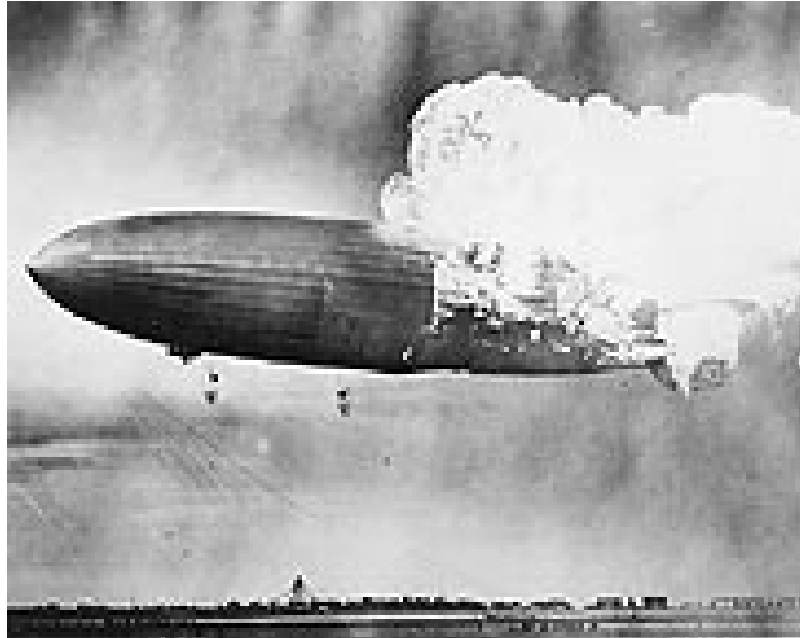
Σύγκριση των μεθόδων αποθήκευσης των συμβατικών καυσίμων και του υδρογόνου

## 4.6 Ασφάλεια Υδρογόνου

### 4.6.1 Παλαιότερα Ατυχήματα Με Υδρογόνο

Στο παρελθόν, έχουν σημειωθεί σοβαρά ατυχήματα κατά τη χρήση του υδρογόνου όχι μόνο σε βιομηχανικές, αλλά και σε διάφορες άλλες εφαρμογές. Η κατανόησή τους μπορεί να συμβάλλει ουσιαστικά στη βελτίωση της ασφάλειας των εκάστοτε μεθόδων διαχείρισης (παραγωγής, αποθήκευσης, διανομής και χρήσης) του υδρογόνου.

Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα προέρχεται από την εποχή που το υδρογόνο είχε αρχίσει να βρίσκει εφαρμογή στις αεροπορικές μεταφορές. Έτσι, στις 6 Μαΐου 1937 στη περιοχή Lakehurst του New Jersey των ΗΠΑ, ξέσπασε πυρκαγιά στο εν πτήση γιγαντιαίο αερόπλοιο Hindenburg (σχήμα 4.7). Πιθανολογείται ότι, η πυρκαγιά προήλθε από σπινθήρα που ανέφλεξε το εξωτερικό

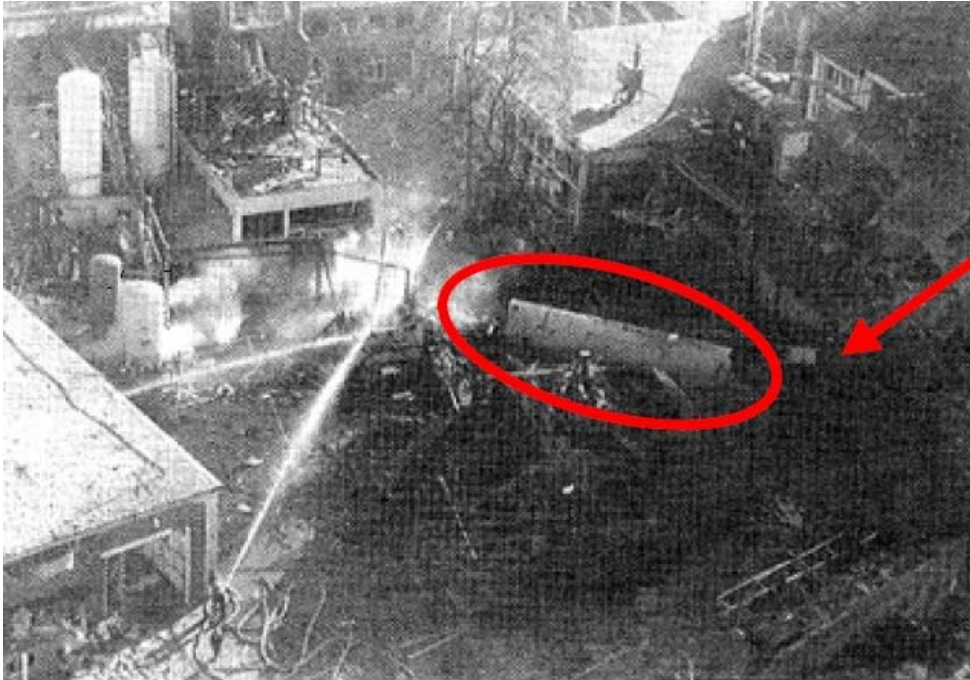


**Σχήμα 4.7:** Στιγμιότυπο από την πυρκαγιά στο αερόπλοιο Hindenburg. Οι ορατές φλόγες προέρχονταν από τη καύση του υφασμάτινου κελύφους και της χρωματικής επικάλυψης. Μετά την έναρξη της πυρκαγιάς, η πρύμνη παρέμεινε υψηλά για αρκετά δευτερόλεπτα, κυρίως λόγω αδράνειας του αερόπλοιου και το ανοδικό ρεύμα αέρα που δημιουργήθηκε λόγω της πυρκαγιάς.

χρωματισμένο υφασμάτινο κέλυφος, αφού οι καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν στη περιοχή ευνοούσαν την ηλεκτροστατική αποφόρτιση στο αερόπλοιο, ενώ οδήγησε τελικά στην πλήρη καταστροφή του. Αργότερα βέβαια, η αντικατάσταση του υδρογόνου από το ήλιο στα αεροσκάφη αυτού του τύπου, οδήγησε σε ένα εγγενώς ασφαλέστερο σύστημα.

Το 1991 στην ευρύτερη περιοχή της Φρανκφούρτης στη Γερμανία, μια κυλινδρική δεξαμενή πεπιεσμένου υδρογόνου χωρητικότητας  $100 \text{ m}^3$  και εσωτερικής πίεσης 45 bar εξερράγη σε ανύποπτο χρόνο χωρίς προφανή αιτία. Το κρουστικό κύμα σε συνδυασμό με την πυρκαγιά που ακολούθησε προκάλεσαν στην εγκατάσταση σοβαρές υλικές ζημιές (Εικ. 2). Έρευνες που ακολούθησαν μετά το ατύχημα απέδωσαν την αιτία στα γωνιώδη τμήματα του κυλινδρικού κελύφους, τα οποία είχαν ενοποιηθεί με οξυγονοκόλληση. Οι αυξημένες τάσεις που ασκούσαν σε αυτά προκάλεσαν αρχικά ρωγμές στο τοίχωμα. Η εισχώρηση, όμως, του υδρογόνου στις ρωγμές προκάλεσε την ταχεία εγκάρσια διάδοσή τους μειώνοντας την μηχανική αντοχή του τοιχώματος. Ως αποτέλεσμα, το τοίχωμα δεν μπορούσε πλέον να αντέξει τη λειτουργική πίεση και υποχώρησε. Το ατύχημα αυτό έγινε η αιτία να πραγματοποιηθούν έλεγχοι σε όλες τις δεξαμενές υδρογόνου που υπήρχαν στη χώρα, να υιοθετηθούν συγκεκριμένοι κανονισμοί για τα ανώτατα επιτρεπτά όρια των γωνιών, να εκσυγχρονιστεί ο τρόπος με τον οποίο θα υπολογιζόταν στο εξής η διάρκεια ζωής με την εφαρμογή κυκλικών τάσεων, καθώς και να αναζητηθούν νέες μέθοδοι ανίχνευσης ρωγμών σε πρώιμο στάδιο. Αναμφισβήτητα, ο ρόλος αυτού του περιστατικού στην πρόοδο της ασφάλειας δεξαμενών αποθήκευσης υδρογόνου ήταν σημαντικός.

Εξάλλου, το 1992 στην πόλη Chiba της Ιαπωνίας, συνέβη έκρηξη νέφους ατμών υδρογόνου στη μονάδα καταλυτικής αναμόρφωσης νάφθας ενός διυλιστηρίου. Κατά την εκκίνηση του αντιδραστήρα που είχε τεθεί εκτός λειτουργίας για την αντικατάσταση του καταλύτη, σημειώθηκε διαρροή υδρογόνου στη γραμμή τροφοδοσίας. Σε μικρό χρονικό διάστημα το υδρογόνο σχημάτισε εκρηκτικό μίγμα με τον αέρα, το οποίο ανεφλέγη και εξερράγη. Εκτός από τις υλικές ζημιές που προκλήθηκαν, 9 άτομα έχασαν τη ζωή τους και άλλα 8 τραυματίστηκαν .



**Σχήμα 4.8:** Καταστροφή εγκατάστασης από έκρηξη δεξαμενής υδρογόνου (Φρανκφούρτη, 1991). Διακρίνεται το κύριο τμήμα της δεξαμενής και ένα τμήμα του τοιχώματος που εκτοξεύτηκε κατά την διάρρηξη.

Στις 23 Οκτωβρίου του 1989, στην πόλη Houston των ΗΠΑ, συνέβη μια καταστρεπτική έκρηξη σε μια μονάδα παραγωγής πολυαιθυλενίου. Κατά τις εργασίες συντήρησης που είχαν προγραμματιστεί στη γραμμή ανακύκλωσης του αντιδραστήρα, απελευθερώθηκαν σημαντικές ποσότητες υδρογόνου και αιθυλενίου, η ανάφλεξη των οποίων οδήγησε σε έκρηξη ισοδύναμη με 2.4 τόνους του ισχυρού εκρηκτικού TNT. Η έκρηξη κατέστρεψε ολοσχερώς την εγκατάσταση, ενώ προκάλεσε το θάνατο 22 ανθρώπων και τον τραυματισμό 100 άλλων.

Στις 10 Απριλίου του 1989, στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ, ένας σωληναγωγός εσωτερικής διαμέτρου 2 in μετέφερε αέριο υδρογόνο συμπιεσμένο στα 2.800 psi (190 bar) για την τροφοδοσία μιας μονάδας υδρογονοδιάσπασης. Σε ένα σημείο του αγωγού, όπου είχε προηγηθεί ηλεκτροσυγκόλληση, παρουσιάστηκε διαρροή. Το υδρογόνο που εκλυόταν με υψηλό ρυθμό ανεφλέγη με αποτέλεσμα τη δημιουργία φλογοπίδακα. Οι φλόγες προκάλεσαν την υπερθέρμανση και αργότερα την υποχώρηση του χαλύβδινου τοιχώματος πάχους 18 cm του αντιδραστήρα, ο οποίος βρισκόταν σε μικρή απόσταση από το σημείο διαρροής. Εκτός από τις υλικές ζημιές που σημειώθηκαν, 7 άτομα έχασαν τη ζωή τους και άλλα 8 τραυματίστηκαν .

Στις 15 Φεβρουαρίου του 1995, στην πόλη Essen της Γερμανίας συνέβη πυρκαγιά και έκρηξη υδρογόνου σε μια εγκατάσταση παραγωγής επικαλυπτικών πυριτίου. Το ατύχημα

ξεκίνησε όταν δύο ανεξάρτητα ρεύματα εποξειδικών ρητινών οδηγήθηκαν στον ίδιο αντιδραστήρα μαζί με υδρογόνο, οπότε και άρχισαν να αντιδρούν. Η εξώθερμη αντίδρασή τους υπερθέρμανε το σύστημα (αντιδραστήρας και γραμμές τροφοδοσίας), με αποτέλεσμα την δραματική αύξηση της πίεσης στο σωλήνα μεταφοράς υδρογόνου που οδήγησε στη διάρρηξή του. Η εκτόνωση του υδρογόνου στον κλειστό χώρο της μονάδας αναμίχθηκε με τον αέρα, ανεφλέγη και τελικά εξερράγη. Πέντε άτομα που βρίσκονταν στον χώρο ενεπλάκησαν στην πυρκαγιά, με αποτέλεσμα 4 από αυτούς να τραυματιστούν σοβαρά και ο ένας να βρει φρικτό θάνατο. Το κρουστικό κύμα που δημιουργήθηκε από την έκρηξη του νέφους αερίου υδρογόνου, προκάλεσε υλικές ζημιές ύψους 6.7 εκατ. \$ (τιμές 1995).

Άλλα περιστατικά, για τα οποία όμως είναι διαθέσιμα λιγότερα στοιχεία, περιλαμβάνουν μια πυρκαγιά σε μονάδα υδρογοναποθείωσης κατά την εκκίνηση της λειτουργίας εφεδρικού συμπιεστή υδρογόνου με 2 τραυματίες (Sakaide, Ιαπωνία, 1994), την έκρηξη αερίου υδρογόνου και ανάπτυξη φλογοπίδακα μετά το σπάσιμο του αγωγού μεταφοράς του (Καλιφόρνια, ΗΠΑ, 1996), την πυρκαγιά σε μονάδα σύνθεσης αμμωνίας από διαφυγή υδρογόνου (Ijmuiden, Ολλανδία, 1993), την έκρηξη μιας δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου (Yorkshire, UK, 1996), την έκρηξη από διαρροή υδρογόνου σε ερευνητικό εργαστήριο (Μασαχουσέτη, ΗΠΑ, 1986) με 3 τραυματίες, και την έκρηξη νέφους που δημιουργήθηκε από διαρροή υδρογόνου με τη καταστροφή μιας ολόκληρης εγκατάστασης (Ουκρανία, Ρωσία, 1990).

## 4.6.2 Ιδιότητες Του Υδρογόνου

Σε συνθήκες περιβάλλοντος, το υδρογόνο είναι ένα αέριο άχρωμο, άγευστο και ελαφρύτερο από τον αέρα. Η χαμηλή του πυκνότητα (Πιν. 4.3), σε συνδυασμό με το μικρό μέγεθος των μορίων του, επιτρέπει την διείσδυσή του σε ορισμένα στερεά υλικά όπως ο χάλυβας, με αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση της ευθραυστότητάς τους.

Αντιδρά βίαια με οξειδωτικά αέρια, όπως τα αλογόνα (ιδιαίτερα με το φθόριο και το χλώριο), και ακόρεστους υδρογονάνθρακες (π.χ. το ακετυλένιο). Οι ατμοί του σχηματίζουν με τον αέρα εύφλεκτα (ή και εκρηκτικά) μίγματα για ένα μεγάλο εύρος συγκεντρώσεων που κυμαίνεται από 4.0 έως και 75% κ.ο. (18 – 59% κ.ο., αντίστοιχα). Στην περίπτωση διαρροής υδρογόνου, εκτός από τον κίνδυνο πυρκαγιάς, φλογοπίδακα, ή έκρηξης, υπάρχει επιπλέον ο κίνδυνος ασφυξίας, όταν η διαρροή συμβαίνει σε κλειστό χώρο, λόγω αραίωσης του οξυγόνου στον εισπνεόμενο αέρα.

### 4.6.2.1 Σύγκριση Ιδιοτήτων Υδρογόνου Και Φυσικού Αερίου

Η εισαγωγή του φυσικού αερίου στην αγορά ενέργειας αποτελεί πλέον πραγματικότητα και για την Ελλάδα, μετά την ολοκλήρωση των δικτύων μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου στους περισσότερους νομούς της χώρας. Το φυσικό αέριο δεν προορίζεται μόνο για βιομηχανική και οικιακή χρήση, αλλά και για καύσιμο σε κινητές εφαρμογές, κάτι που συμβαίνει ήδη σε ένα τμήμα των οδικών μέσων μαζικής μεταφοράς. Αντίστοιχες είναι και οι προοπτικές που προδιαγράφονται για το υδρογόνο. Πέρα από τα οικονομοτεχνικά και περιβαλλοντικά οφέλη που προσδοκούνται από τη χρήση του, γεννάται το ερώτημα εάν το υδρογόνο αποδεικνύεται ασφαλέστερο του φυσικού αερίου από πλευράς χρήσης και διαχείρισης.

Επιχειρώντας μια τέτοια σύγκριση μεταξύ υδρογόνου και φυσικού αερίου, προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Τα μόρια του υδρογόνου είναι μικρότερα σε διαστάσεις από αυτό του μεθανίου και άρα είναι δυνατόν να διαφύγει διαμέσου διαπερατών υλικών, από τα οποία το μεθάνιο δεν θα μπορούσε να διαρρεύσει. Αντίθετα, η διαφορά στους ρυθμούς

διαρροής είναι ασήμαντη. Το υδρογόνο αποδίδει περίπου το 1/3 της ενέργειας του μεθανίου στον ίδιο όγκο και στις ίδιες συνθήκες. Συνεπώς, σε μια δεδομένη πίεση και θερμοκρασία 3 μονάδες όγκου υδρογόνου αποτελούν σύστημα με ενεργειακό περιεχόμενο ίσο προς αυτό μιας μονάδας όγκου μεθανίου στις ίδιες συνθήκες. Για μικρές διαρροές από συστήματα υψηλής πίεσης, επίσης, ο ρυθμός έκλυσης μάζας του υδρογόνου θα είναι τριπλάσιος από αυτόν του μεθανίου. Έτσι, το ενεργειακό περιεχόμενο στις δύο περιπτώσεις θα είναι το ίδιο, επειδή το υδρογόνο διαθέτει περίπου τριπλάσια ενέργεια από ότι το μεθάνιο ανά μονάδα βάρους.

**Πίνακας 4.3:**  
Φυσικές ιδιότητες αερίων καυσίμων

Φυσική Ιδιότητα	Αέριο Καύσιμο			
	Υδρογόνο	Μεθάνιο	Προπάνιο	Ατμοί βενζίνης
Ειδικό βάρος	0.07	0.55	1.55	3.4 - 4.0
Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	0.083	0.65	1.84	4.0 – 4.7
Συντελεστής μοριακής διάχυσης (10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s <sup>-1</sup> )	61	16	12	5
Όρια αναφλεξιμότητας (% κ.ο. συγκέντρωση στον αέρα)	4 - 75	5 - 15	2.4 – 9.6	1.4 - 8
Όρια εκρηκτικότητας (% κ.ο. συγκέντρωση στον αέρα)	18 - 59	5.7 - 14	2.7 - 7	1.4 - 3
Ευκολότερα αναφλέξιμο μίγμα (% κ.ο. στον αέρα)	29	9	4	2
Ενέργεια έκρηξης ανά μονάδα όγκου (σχετική ως προς το υδρογόνο)	1	3.5	10	22
Θερμοκρασία φλόγας στην καύση με αέρα (°K)	2318	2148 – 2227	2385	2470

- Τα κατώτερα όρια αναφλεξιμότητας του υδρογόνου και του μεθανίου παρουσιάζουν μικρή διαφορά (4% και 5% κ.ο., αντίστοιχα). Το υδρογόνο, όμως, έχει σημαντικά μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ του κατώτερου ορίου αναφλεξιμότητας και του κατώτερου ορίου εκρηκτικότητας (4% και 18%), από αυτήν του μεθανίου (5% και 5.7%). Αυτό σημαίνει ότι η συγκέντρωση υδρογόνου που απαιτείται για τον σχηματισμό εκρηκτικού μίγματος με τον αέρα είναι τριπλάσια από αυτήν που απαιτείται για το μεθάνιο.
- Αν και τα κατώτερα όρια αναφλεξιμότητας των δύο καυσίμων είναι παραπλήσια, το υδρογόνο έχει πολύ μεγαλύτερο εύρος αναφλεξιμότητας από το μεθάνιο (άνωτερο όριο αναφλεξιμότητας: 75% και 15%, αντίστοιχα). Αυτό, ουσιαστικά

υποδηλώνει ότι κοντά στη διαρροή, παρουσία πηγής έναυσης, το μεθάνιο έχει μικρότερη πιθανότητα ανάφλεξης από το υδρογόνο (λόγω υπερβολικά πλούσιου μίγματος). Εξάλλου, η ανάφλεξη ενός μίγματος υδρογόνου θα οδηγήσει σε καύση μεγαλύτερου τμήματος του νέφους, από ότι στη περίπτωση που το καύσιμο θα ήταν μεθάνιο με παρόμοια κατανομή συγκεντρώσεων στο νέφος. Γι' αυτό, η συσσωρευτική επίδραση της θερμικής ακτινοβολίας ενδέχεται να οδηγήσει σε αυξημένες επιπτώσεις.

- Το γεγονός ότι, το υδρογόνο έχει ειδικό όγκο 14.5 (έναντι 1.8 του μεθανίου), συνεπάγεται ότι ανυψώνεται στην ατμόσφαιρα ταχύτερα από το μεθάνιο, με ταυτόχρονη μείωση της συγκέντρωσής του σε μικρότερο χρόνο. Εξάλλου, το υδρογόνο διαχέεται στον αέρα περίπου 4 φορές ταχύτερα από το μεθάνιο, και αυτός είναι άλλος ένας λόγος για τον οποίο η αραίωση του υδρογόνου σε ασφαλή επίπεδα γίνεται συντομότερα.
- Σε συγκεντρώσεις μέχρι και 10% κ.ο. περίπου, υδρογόνο και μεθάνιο έχουν παραπλήσιες ενέργειες ανάφλεξης. Όσο η αναλογία υδρογόνου αέρα πλησιάζει την στοιχειομετρική (μηδενικό ισοζύγιο οξυγόνου) όπου υπάρχει 29% κ.ο. υδρογόνο, η θερμοκρασία ανάφλεξης μειώνεται στο 1/15 αυτής του μεθανίου. Στα κατώτερα όρια αναφλεξιμότητας των δύο αερίων, η ενέργεια που απαιτείται για την ανάφλεξή τους είναι τόσο χαμηλή, ώστε απλές πηγές έναυσης όπως ο στατικός ηλεκτρισμός είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε πυρκαγιά ή έκρηξη. Και τα δύο αέρια έχουν σχετικά υψηλές θερμοκρασίες αυτανάφλεξης που δεν απαντώνται σε απλές εφαρμογές (520-585 °C και 537-630 °C, αντίστοιχα).
- Σε αντίθεση με το μεθάνιο, η φλόγα που δημιουργείται κατά τη καύση του υδρογόνου είναι σχεδόν αόρατη στο φως, αν και αέριοι ρύποι είναι δυνατόν να της προσδώσουν κάποια ορατότητα. Επειδή δεν υφίσταται άνθρακας στο αντιδρών σύστημα που καιγόμενος σε αναγωγικές συνθήκες θα απέδιδε επιπλέον θερμότητα με ακτινοβολία εκπομπής στο υπέρυθρο, η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από μια πυρκαγιά υδρογόνου είναι μικρότερη από αυτήν μιας ισοδύναμης πυρκαγιάς μεθανίου και γενικά αερίου υδρογονάνθρακα. Αυτό συνεπάγεται μια μικρή μείωση της πιθανότητας πρόκλησης αλυσωτών φαινομένων, όπου ένα αρχικό ατύχημα αποτελεί το έναυσμα για ένα επόμενο με αναπόφευκτη κλιμάκωση των συνεπειών.
- Η ταχύτητα καύσης του υδρογόνου (ο χρόνος που διαρκεί η μετάβαση στη μέγιστη υπερπίεση) στη περίπτωση έκρηξης είναι 10 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του μεθανίου. Συνεπώς, η έκρηξη υδρογόνου θα είναι κατά πολύ ισχυρότερη από μια αντίστοιχη μεθανίου, αλλά με μικρότερη διάρκεια θετικής φάσης και παραπλήσια υπερπίεση. Άρα, οι υλικές κατασκευές καλούνται να αφομοιώσουν τις αναπτυσσόμενες υπερπίεσεις σε μικρότερο χρόνο.
- Σε αντίθεση με το άοσμο μεθάνιο στο οποίο όμως προστίθεται σκόπιμα κάποια οσμηρή ουσία, το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως έχει (άοσμο). Η χαρακτηριστική οσμή είναι πολύ χρήσιμη για τα δίκτυα διανομής υδρογόνου στο ευρύ κοινό, αφού μπορεί να οδηγήσει στην έγκαιρη αντίληψη μιας διαρροής σε χώρους όπου συνήθως δεν υπάρχουν συστήματα ανίχνευσης (κτιριακά συγκροτήματα, κατοικίες). Ωστόσο, αυτός ο τρόπος δεν είναι κατ' ανάγκη αποτελεσματικός, αφού κάποιος πρέπει να είναι παρών για να οσφριστεί το διαρρέον αέριο. Το υδρογόνο που προορίζεται για βιομηχανική χρήση ή για κελία καυσίμων οχημάτων, δεν αρωματίζεται ποτέ, αφού οι θειούχες μερκαπτάνες που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό δηλητηριάζουν τον καταλύτη του κελίου.

Τελικά, όσον αφορά την ασφάλεια των δύο καυσίμων, το υδρογόνο υπερέχει του φυσικού αερίου σε συγκεκριμένα σημεία, ενώ σε άλλα συμβαίνει το αντίθετο. Το ουσιαστικό συμπέρασμα της σύγκρισης, είναι μάλλον ο εντοπισμός των σημείων εκείνων όπου το υδρογόνο μειονεκτεί. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να γίνει δυνατή η διόρθωσή τους και η βελτίωση της ασφάλειας κατά τη χρήση του υδρογόνου.

### 4.6.3 Αναγνώριση Κινδύνων

Είτε το υδρογόνο είναι αποθηκευμένο ως αέριο υπό πίεση, είτε υγροποιημένο υπό ψύξη και πίεση, προκύπτει σοβαρός κίνδυνος μηχανικής έκρηξης, όταν η δεξαμενή ή η φιάλη εκτεθεί σε υψηλή θερμοκρασία (π.χ. με τη θερμική ακτινοβολία μιας πυρκαγιάς). Στην πρώτη περίπτωση, η αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας αυξάνεται με αποτέλεσμα είτε την υπέρβαση της αντοχής των τοιχωμάτων του περιέκτη, οπότε τελικά θα προκληθεί η διάρρηξή τους, είτε την ενεργοποίηση της ανακουφιστικής βαλβίδας πριν το όριο αντοχής του υλικού του τοιχώματος και την απελευθέρωση του υδρογόνου. Τότε, είναι πολύ πιθανό να σχηματιστεί εύφλεκτο μίγμα, που συνήθως αναφλέγεται λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας που επικρατεί στον περιβάλλοντα χώρο, λόγω ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ή λόγω παρουσίας πηγής έναυσης (που σε περίπτωση μιας κοντινής πυρκαγιάς θα είναι οι ίδιες οι φλόγες).

Στην δεύτερη περίπτωση (υγροποιημένο υδρογόνο), η πίεση που εφαρμόζεται κυμαίνεται τυπικά μεταξύ 1 έως και 20 bar, οπότε είναι λογικό να σχεδιάζονται τα τοιχώματα με μικρότερη συγκριτικά μηχανική αντοχή. Αυτό, όμως, συνεπάγεται μεγαλύτερο κίνδυνο ταχείας υποχώρησης των τοιχωμάτων σε ενδεχόμενη υπερθέρμανση του περιεχομένου, αφού αυξάνεται η εσωτερική πίεση και μειώνεται η μηχανική αντοχή του τοιχώματος. Μάλιστα, σε τέτοια περιστατικά η θερμοκρασία μπορεί να αυξηθεί πάνω από το σημείο βρασμού χωρίς όμως να συμβεί ατμοποίηση, οπότε το υγρό θα καταστεί υπέρθερμο.

Η αιτία που μπορεί να οδηγήσει στην υπερθέρμανση αυτή, είναι η έλλειψη πυρήνων βρασμού στην υγρή φάση. Ωστόσο, υπάρχει ένα θερμοκρασιακό όριο για συγκεκριμένη πίεση, πάνω από το οποίο ένα υγρό δεν μπορεί να είναι πλέον υπέρθερμο (όριο ομοιογενούς πυρήνωσης). Τότε, δημιουργούνται αυθόρμητα μικροσκοπικές φυσαλίδες ατμού στο καθαρό υγρό. Η δημιουργία αυτή αποδίδεται σε τυχαίες διακυμάνσεις της μοριακής πυκνότητας στην υγρή φάση, οι οποίες αποτελούν τη γενεσιουργό αιτία της εμφάνισης κενών περιοχών με διαστάσεις τέτοιες, ώστε να δρουν ως φυσαλίδες.

Το αποτέλεσμα είναι ο εκρηκτικός βρασμός του υγρού που διαρρηγνύει τα τοιχώματα της δεξαμενής και συνοδεύεται από ισχυρό κρουστικό κύμα. Το φαινόμενο είναι γνωστό ως μπλέβη (BLEVE: Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion). Εκτός από το κρουστικό κύμα που παράγεται κατά την έκρηξη, τμήματα των τοιχωμάτων της δεξαμενής εκτοξεύονται με μεγάλη ορμή σε μακρινές αποστάσεις αυξάνοντας τον κίνδυνο θανάσιμων τραυματισμών ή επιπρόσθετων υλικών ζημιών. Το εύφλεκτο περιεχόμενο εκλύεται μαζικά και αναφλέγεται δημιουργώντας πυρόσφαιρα (fireball), η οποία αν και διαρκεί λίγα δευτερόλεπτα, εκπέμπει πολύ έντονη θερμική ακτινοβολία που είναι ικανή να προκαλέσει εγκαύματα σε αποστάσεις ακόμα και εκατοντάδων μέτρων.

#### 4.6.3.1 Κρυογενικές Συνθήκες Αποθήκευσης

Σε πρατήρια ανεφοδιασμού υδρογόνου, αλλά και στα ίδια τα οχήματα που το χρησιμοποιούν, το υδρογόνο χρειάζεται να αποθηκευτεί σε πολύ υψηλή πίεση, εξαιτίας του χαμηλού ενεργειακού κατ' όγκο περιεχομένου του. Έτσι, η τυπική πίεση για τη συμπίεση του υδρογόνου ανέρχεται στα 6000 psi (414 bar), όταν η αντίστοιχη πίεση για το μεθάνιο είναι κατά 1/3 μικρότερη (4000 psi ή 276 bar).

Σε μερικές εφαρμογές, όμως, το υδρογόνο καθώς και άλλα αέρια (π.χ. διοξείδιο του άνθρακα, άζωτο, ήλιο, μεθάνιο), απαιτείται να αποθηκεύονται σε πολύ χαμηλές

θερμοκρασίες για την ελάττωση του όγκου τους. Οι θερμοκρασίες αυτές είναι συχνά αρκετά χαμηλότερες από τους  $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$ , οπότε και χαρακτηρίζονται κρυογενικές, ενώ τα ίδια τα αέρια κρυογενικά. Τέτοιες συνθήκες προτιμούνται όταν πρόκειται για προωθητικά αέρια πυραύλων, σε εργασίες επεξεργασίας μετάλλων, σε ιατρικές εφαρμογές και στην επεξεργασία τροφίμων. Κρίσιμος παράγοντας για την εφαρμογή κρυογενικών συνθηκών, είναι η κρίσιμη θερμοκρασία ενός αερίου, πάνω από την οποία ως γνωστόν το αέριο δεν μπορεί να υγροποιηθεί. Ως αποτέλεσμα, για να επιτευχθεί η υγροποίηση και άρα ο ελάχιστος δυνατός όγκος, αέρια όπως το υδρογόνο με χαμηλή κρίσιμη θερμοκρασία ( $T_c^{\text{H}_2} = -240.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) χρειάζεται να διατηρούνται σε κρυογενικές συνθήκες είτε για την μεταφορά, είτε για την αποθήκευσή τους.

Τα κρυογενικά αέρια, παρόλο που είναι πιο οικονομικά στην μεταφορά και την αποθήκευση, επιφυλάσσουν κινδύνους. Καταρχήν, μαλακοί χάλυβες, όπως και τα περισσότερα κράματα του σιδήρου (χυτοσίδηροι), γίνονται ιδιαίτερα εύθραυστοι σε τόσο χαμηλές θερμοκρασίες, ώστε να υπάρχει ο κίνδυνος αστοχίας τους από κραδασμούς ή χτυπήματα. Το ίδιο μπορεί να συμβεί και με τα υπόλοιπα στοιχεία του εξοπλισμού (π.χ. βαλβίδες) που συνήθως βρίσκονται ενσωματωμένα σε δεξαμενές και αγωγούς μεταφοράς, με κίνδυνο ενδεχόμενης θραύσης και διαρροής του περιεχομένου τους. Άρα, χρειάζεται προσοχή στο υλικό κατασκευής του εξοπλισμού που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση/ μεταφορά υδρογόνου υπό κρυογενικές συνθήκες.

Επίσης, η χαμηλή θερμοκρασία του δοχείου αποθήκευσης ή του σωλήνα μεταφοράς, είναι δυνατόν να προκαλέσει έγκαυμα στους ανθρώπινους ιστούς εάν υπάρξει επαφή. Έτσι, η σάρκα μπορεί να κολλήσει γρήγορα επάνω σε επιφάνειες τέτοιου εξοπλισμού που δεν έχει μονωθεί σωστά, και να αποκολληθεί από το υπόλοιπο σώμα όταν το θύμα προσπαθήσει να απομακρύνει το τραυματισμένο μέλος.

Στους παραπάνω κινδύνους, πρέπει να συνυπολογιστεί και ο αυξημένος κίνδυνος που υφίσταται από τη διαρροή του κρυογενικού αερίου, αφού η συμπεριφορά του κατά τη διάρκεια της έκλυσης και διασποράς είναι εντελώς διαφορετική από αυτήν σε συνθήκες περιβάλλοντος.



## 5. ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

### 5.1 Ιστορική Αναδρομή

Η ιστορία της κυψελίδας καυσίμου ανάγεται πίσω στο δέκατο ένατο αιώνα και χάριν στην εργασία του βρετανού δικαστή και επιστήμονα, Sir William Robert Grove, ο οποίος θεωρείται πατέρας των κυψελίδων καυσίμου. Τα πειράματά του το 1839 στην ηλεκτρόλυση - η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας για να χωρίσει το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο - οδήγησαν στην πρώτη αναφορά μιας συσκευής που θα ονομαζόταν αργότερα ως κυψελίδα καυσίμου. Ο Grove διαλογίστηκε ότι είναι δυνατό να αντιστραφεί η διαδικασία ηλεκτρόλυσης και να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια από την αντίδραση του οξυγόνου με το υδρογόνο.

Για να εξετάσει αυτήν τη θεωρία εσώκλεισε δύο λουρίδες λευκόχρυσου σε χωριστά σφραγισμένα μπουκάλια: ένα που περιείχε υδρογόνο και ένα οξυγόνο. Όταν αυτά βυθίστηκαν σε αραιό θειικό οξύ, ένα ρεύμα άρχισε να ρέει μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων και νερό σχηματίστηκε στα μπουκάλια. Προκειμένου να αυξηθεί η παραχθείσα τάση, ο Grove συνέδεσε αρκετές από αυτές τις συσκευές στη σειρά και δημιούργησε αυτό που ονόμασε “μππαταρία αερίου” (“gas battery”).



**Σχήμα 5.1:** Sir William Robert Grove, ο πατέρας των κυψέλων καυσίμου

Η πρόσφατη ιστορία της κυψελίδας καυσίμου ξεκινά στις αρχές της δεκαετίας του '60. Μια αντιπροσωπεία της αμερικανικής κυβέρνησης, η εθνική αεροναυτική και η διαστημική διοίκηση (NASA), έψαχναν έναν τρόπο να τροφοδοτήσουν μια σειρά επερχόμενων επανδρωμένων διαστημικών πτήσεων.

Η NASA είχε αποκλείσει ήδη –χρησιμοποιώντας- τις μπαταρίες δεδομένου ότι ήταν πάρα πολύ βαριές, την ηλιακή ενέργεια δεδομένου ότι ήταν πάρα πολύ ακριβή καθώς και την πυρηνική ενέργεια λόγω της επικινδυνότητας της, με αποτέλεσμα να αναζητά μια εναλλακτική λύση. Η κυψελίδα καυσίμου θεωρήθηκε ως πιθανή λύση και η NASA ανάθεσε διάφορες ερευνητικές συμβάσεις για να αναπτύξει ένα πρακτικό σχέδιο εργασίας. Αυτή η αναζήτηση οδήγησε στην ανάπτυξη της πρώτης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM). Το 1955, ο Willard Thomas Grubb, ένας χημικός, τροποποίησε περαιτέρω το αρχικό σχέδιο κυψελίδων καυσίμου με τη χρησιμοποίηση μιας sulphonated polystyrene ion-exchange membrane ως ηλεκτρολύτη. Τρία έτη αργότερα ένας άλλος Γερμανός χημικός, ο Leonard Niedrach, επινόησε έναν τρόπο απόθεσης λευκόχρυσου πάνω σε αυτήν τη μεμβράνη και αυτή έγινε γνωστή ως "κυψελίδα καυσίμου Grubb- Niedrach" και χρησιμοποιήθηκε στο διαστημικό πρόγραμμα Gemini. Αυτή ήταν η πρώτη εμπορική χρήση των κυψελίδων καυσίμου.



**Σχήμα 5.2**

Η πρώτη εμπορική εφαρμογή της κυψελίδας καυσίμου στο διαστημικό πρόγραμμα «Gemini»

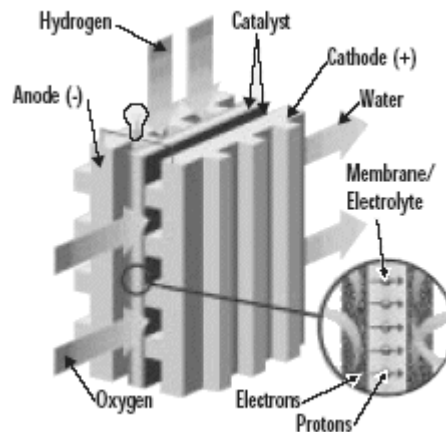
Τέλος, στη δεκαετία του '90, πάνω από 150 έτη μετά από τα πειράματα του Grove, η υπόσχεση της ανέξοδης, καθαρής, ανανεώσιμης ενέργειας άρχισε να γίνεται πραγματικότητα καθώς οι πρώτες βιώσιμες κυψελίδες καυσίμου παρουσιάστηκαν. Οι τεχνικές σημαντικές ανακαλύψεις κατά τη διάρκεια της δεκαετίας περιέλαβαν την κατασκευή του πρώτου οχήματος κυψελίδας καυσίμου (fuel cell-powered) το 1993 από την канаδική επιχείρηση Ballard. Δύο έτη αργότερα μια στοίβα κυψελίδων καυσίμου με μια πυκνότητα ισχύος 1 kW ανά λίτρο δημιουργήθηκε από τις Ballard και Daimler-Benz.

Αυτές οι εξελίξεις προετοίμασαν το έδαφος για την εμπορευματοποίηση των κυψελίδων καυσίμου όπως τις ξέρουμε σήμερα. Στα τελευταία έτη έχουμε δει κυψελίδες καυσίμου να εγκαθίστανται σε νοσοκομεία, σχολεία και πολλές από τις σημαντικότερες αυτοκινητοβιομηχανίες να έχουν παρουσιάσει πρωτότυπα αυτοκίνητα τροφοδοτούμενα από κυψελίδες καυσίμου. Οι δοκιμές λεωφορείων κυψελίδας καυσίμου έχουν πραγματοποιηθεί στο Σικάγο και το Βανκούβερ καθώς και σε άλλες πόλεις στη Βόρεια Αμερική και την Ευρώπη.

## 5.2 Αρχή Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να ταξινομηθούν βάση του τύπου του ηλεκτρολύτη τον οποίο χρησιμοποιούν. Το πιο γνωστό είδος είναι η κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίου ( PEM ).

Μία κυψέλη καυσίμου PEM αποτελείται εν συντομία από τα εξής μέρη:



**Σχήμα 5.3:** Κύρια μέρη κυψέλης καυσίμου PEM

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

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

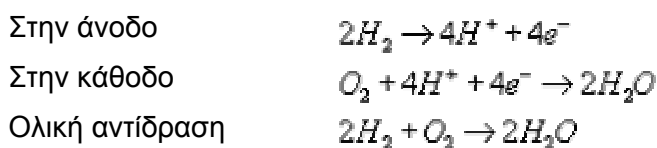
Τα θετικά φορτισμένα ιόντα του υδρογόνου (στην ουσία αναφερόμαστε σε μεμονωμένα πρωτόνια) διαπερνούν τη μεμβράνη και ενώνονται με το οξυγόνο το οποίο τροφοδοτεί την κάθοδο, το θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο, και παράγεται νερό. Όπως και πριν, την ομογενή διάχυση του οξυγόνου στον καταλύτη εξασφαλίζει η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

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

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

μεμβράνη. Ο καταλύτης είναι τραχύς και πορώδης ώστε να μεγιστοποιεί η εκτεθειμένη επιφάνεια του.

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



Οι παραπάνω αντιδράσεις σε μία απλή κυψέλη καυσίμου παράγει περίπου στα 0,7 Volts . Προκειμένου να παραχθούν μεγαλύτερες (και πρακτικά αξιοποιήσιμες) τάσεις, χρησιμοποιούνται περισσότερες κυψέλες σε σειρά ( fuel cell stack ).

### 5.3 Τύποι Κυψέλων Καυσίμου

Έξι κατηγορίες κυψελίδων καυσίμου έχουν προκύψει ως βιώσιμα συστήματα για το παρόν και εγγύς μέλλον :

1. Κυψελίδα Καυσίμου με Μεμβράνη Ανταλλαγής Πρωτονίων, Proton Exchange Membrane or Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEMFC)
2. Καυσίμου με Άμεση Παροχή Μεθανόλης, Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)
3. Αλκαλική Κυψελίδα Καυσίμου, Alkaline Fuel Cell (AFC)
4. Κυψελίδα Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος, Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)
5. Κυψελίδα Καυσίμου Στερεού Οξειδίου, Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)
6. Κυψελίδα Καυσίμου Τηγμένου Ανθρακικού Άλατος, Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)

#### 5.3.1 Κυψέλη Καυσίμου Πολυμερισμένης Μεμβράνης (PEM)

Αυτές οι κυψέλες (κυψέλες καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων, proton exchange membrane fuel cells , PEM ) λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και παράγουν ισχύ αρκετή για την εφαρμογή τους για την ικανοποίηση καθημερινών ενεργειακών αναγκών, όπως αυτή για την κίνηση ενός οχήματος. Σε αυτό βοηθά η ικανότητα τους να προσαρμόζονται σε γρήγορες αυξομειώσεις στην απαίτηση ισχύος.

Η ισχύς που παράγει μια τέτοια κυψέλη κυμαίνεται μεταξύ των 50 και 250 kW . Ο συγκεκριμένος τύπος κυψέλης είναι αρκετά ευαίσθητος σε μη καθαρά καύσιμα. Η έρευνα πάνω στις κυψέλες καυσίμου όσων αφορά εφαρμογές τους στην τροφοδότηση οχημάτων αυτή τη στιγμή είναι επικεντρωμένη κυρίως σε αυτόν τον τύπο.

#### 5.3.2 Κυψέλη Καυσίμου Μεθανόλης (DMFC)

Σε όλες τις παραπάνω κυψέλες ως καύσιμο χρησιμοποιείται το υδρογόνο. Ωστόσο, ο συγκεκριμένος τύπος κυψελών ( direct methanol fuel cells , DMFC ) χρησιμοποιεί ως καύσιμο μεθανόλη χωρίς να απαιτεί τη μετατροπή της σε υδρογόνο. Σε αυτή την περίπτωση η μεθανόλη είναι αυτή που οξειδώνεται στην άνοδο.

Η κατηγορία αυτή είναι πιο πρόσφατη των κυψελίδων PEM με αρκετά ακόμα προβλήματα προς επίλυση όπως η μεγάλη ποσότητα καταλύτη όπου απαιτείται. Ωστόσο, εάν η συγκεκριμένη τεχνολογία επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί στη θέση των PEM κυψέλων δε θα υπήρχε η ανάγκη αναζήτησης εναλλακτικών τρόπων αποθήκευσης του καυσίμου όπως γίνεται στη δεύτερη περίπτωση με το υδρογόνο ενώ δε θα ήταν αναγκαία και η ανάπτυξη αναμορφωτών.

### 5.3.3 Αλκαλική Κυψελίδα Καυσίμου, Alkaline Fuel Cell (AFC)

Αν και οι κυψελίδες καυσίμου PEM χρησιμοποιήθηκαν στο πρώτο επανδρωμένο διαστημικό σκάφος, οι αλκαλικές κυψελίδες καυσίμου (Alkaline fuel cell) χρησιμοποιήθηκαν στο σχέδιο Apollo της NASA. Το πρόβλημα του αργού ρυθμού αντίδρασης υπερνικείται με τη χρησιμοποίηση ιδιαίτερα πορωδών ηλεκτροδίων και με έναν καταλύτη λευκόχρυσου, λειτουργώντας πολλές φορές σε αρκετά υψηλές πιέσεις.

Αν και κάποια ιστορικά σημαντικές αλκαλικές κυψελίδες καυσίμου λειτουργούσαν σε θερμοκρασία 200°C, η συνηθέστερη θερμοκρασία λειτουργίας είναι κάτω από τους 100 °C. Το κύριο πρόβλημά τους, είναι ότι η παροχή αέρα και καυσίμου επιβάλλεται να μην περιέχει διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), ή να παρέχεται καθαρό οξυγόνο και υδρογόνο.

### 5.3.4 Κυψελίδα Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος, Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)

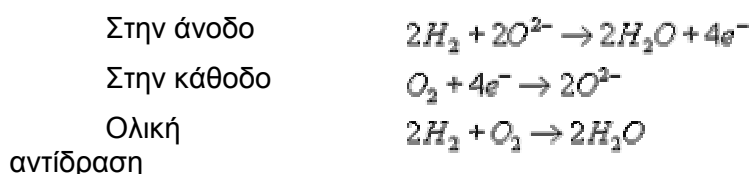
Οι κυψέλες φωσφορικού οξέος ( phosphoric - acid fuel cells , PAFC ) είναι αυτές όπου είναι διαθέσιμες σήμερα στο εμπόριο. Η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος κυμαίνεται σε αρκετά υψηλά επίπεδα. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας του βρίσκονται στην περιοχή των 150 με 200 °C. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες το φωσφορικό οξύ γίνεται κακός ιοντικός αγωγός και το μονοξείδιο του άνθρακα CO το οποίο σχηματίζεται πάνω στον καταλύτη δηλητηριάζει την άνοδο ρίχνοντας πάρα πολύ την απόδοση. Ωστόσο τα επίπεδα ανοχής της συγκέντρωσης του CO είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει περισσότερα είδη καυσίμων για τη τροφοδότηση του. Στην περίπτωση της συμβατικής βενζίνης ωστόσο πρέπει να απομακρυνθούν τα σουλφίδια.

Τα μειονεκτήματα των PA κυψέλων καυσίμου, είναι το μεγάλο μέγεθος και βάρος, ο ακριβός καταλύτης όπου χρησιμοποιείται (λευκόχρυσος) ενώ το ρεύμα το οποίο παράγεται είναι χαμηλό και η ισχύς συγκρίσιμη με αυτή άλλων τύπων κυψέλων καυσίμου. Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που χαρακτηρίζουν αυτόν τον τύπο είναι ίδιες με αυτής της PEM κυψέλης.

### 5.3.5 Κυψελίδα Καυσίμου Στερεού Οξειδίου, Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)

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

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που χαρακτηρίζουν αυτόν τον τύπο κυψέλης είναι

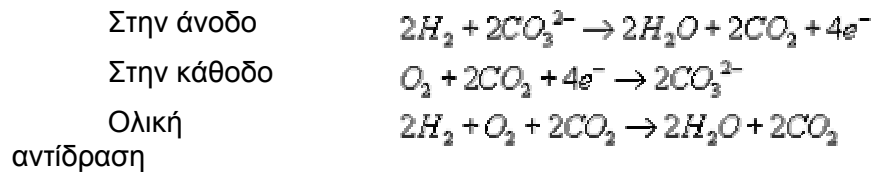


### 5.3.6 Κυψελίδα Καυσίμου Τηγμένου Ανθρακικού Άλατος, Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)

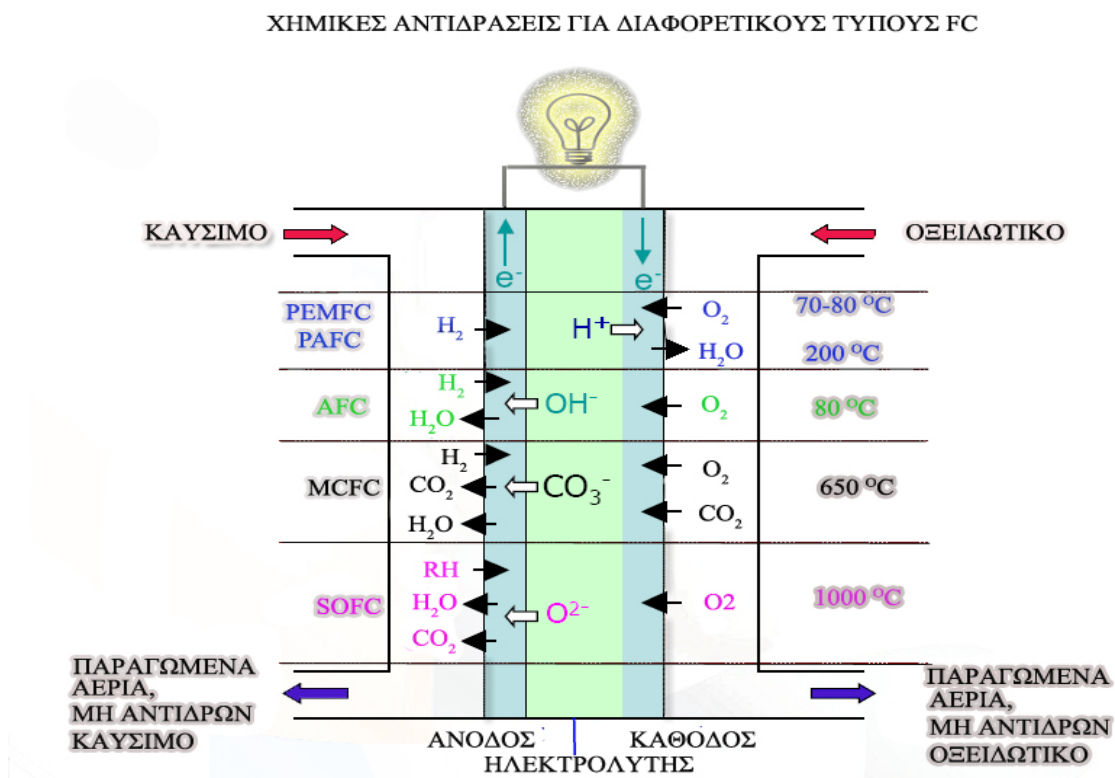
Αυτές οι κυψέλες ( molten carbonate fuel cells , MCFC ) χρησιμοποιούν για ηλεκτρολύτη ενώσεις του άνθρακα με λίθιο, νάτριο και κάλιο σε υγρή μορφή εμποτισμένες σε κατάλληλο υλικό. Ενώ χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλά επίπεδα απόδοσης οι θερμοκρασίες όπου λειτουργούν (περίπου 650 °C) δεν προσφέρονται για καθημερινή χρήση. Ωστόσο, αυτή η υψηλή θερμοκρασία, η οποία απαιτείται προκειμένου ο ηλεκτρολύτης να γίνει ιοντικά αγωγίμος, επιτρέπει τη χρήση φτηνών καταλυτών αφού οι χημικοί δεσμοί καταστρέφονται και δημιουργούνται πολύ πιο εύκολα σε τέτοιες θερμοκρασίες.

Η ίδια όμως υψηλή θερμοκρασία ευθύνεται για την αυξημένη διάβρωση και καταστροφή των μελών της κυψέλης. Ως καύσιμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα, φυσικό αέριο, προπάνιο και άλλα. Η ισχύς η οποία χαρακτηρίζει αυτόν τον τύπο κυψέλης κυμαίνεται ανάλογα τη χρήση από 10 kW μέχρι και 2 MW .

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που χαρακτηρίζουν αυτόν τον τύπο κυψέλης είναι



(το CO<sub>2</sub> παράγεται στην άνοδο και καταναλώνεται στην κάθοδο)

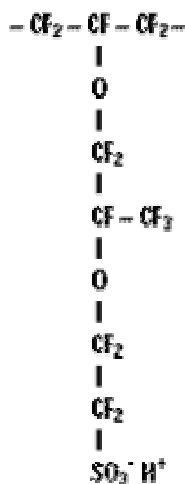


**Σχήμα 5.4:** Οι κυριότεροι τύποι κυψελίδων καυσίμου και οι αντιδράσεις που λαμβάνουν μέρος κατά την λειτουργία τους

## 5.4 Αναλυτική Περιγραφή Της PEM Κυψέλης

### 5.4.1 Μεμβράνη Κυψέλης

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



Μίας ομάδας, παρόμοιας δομής με αυτή του Teflon (πολυτετραφθοροαιθυλένιο), με εκατοντάδες επαναλαμβανόμενες μονάδες τύπου  $-CF_2-CF-CF_2-$ . Μίας δεύτερης, τύπου  $-O-CF_2-CF-O-CF_2-CF_2-$  στο ρόλο πλαϊνής αλυσίδας η οποία ενώνει τις προηγούμενες μονάδες με μια τρίτη, με τύπο  $SO_3^- H^+$ .

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

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

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

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

### 5.4.2 Ηλεκτρόδια Κυψέλης

Τα ηλεκτρόδια της κυψέλης αποτελούν πολύπλοκες νανοδομές και περιέχουν καταλύτη, πόρους και ηλεκτρικά αγωγίμα υλικά. Όλες οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε μία κυψέλη καυσίμου αποτελούνται από δύο επιμέρους ημι-αντιδράσεις. Την οξειδωση (oxidation) του υδρογόνου η οποία πραγματοποιείται στην άνοδο και την αναγωγή (reduction) του οξυγόνου στην κάθοδο. Με την οξειδωση του υδρογόνου παράγονται ιόντα υδρογόνου (πρωτόνια), τα οποία μεταφέρονται μέσω της ιοντικά αγωγίμης μεμβράνης στην κάθοδο και ηλεκτρόνια τα οποία διοχετεύονται στο εξωτερικό κύκλωμα καθώς η διέλευση τους μέσα από τη μεμβράνη δεν είναι δυνατή.

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

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

- Στη μεγάλη ισχύ του δεσμού του μοριακού οξυγόνου και στην αυξημένη σταθερότητα του δεσμού Pt - O ή Pt - OH.
- Στο ότι είναι αντίδραση μεταφοράς 4 ηλεκτρονίων
- Στην δημιουργία παραπροϊόντων όπως το  $H_2O_2$  (OH - OH)

### 5.4.3 Καταλύτης Κυψέλης

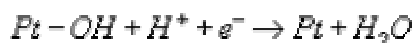
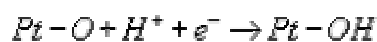
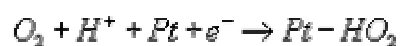
Οι δύο ημιαντιδράσεις, η οξειδωση δηλαδή του υδρογόνου και η αναγωγή του οξυγόνου, χαρακτηρίζονται από χαμηλές ταχύτητες στις χαμηλές θερμοκρασίες όπου λειτουργεί μια PEM κυψέλη καυσίμου και αυτό είναι που κάνει απαραίτητη την παρουσία καταλύτη. Ο καταλύτης όπου έχει μελετηθεί περισσότερο μέχρι στιγμής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

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



Το ρυθμορυθμιστικό στάδιο της ολικής αντίδρασης αποτελεί η χημειορρόφηση.

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





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

Η οξειδωση του υδρογόνου λαμβάνει χώρα σε όλη την έκταση του καταλύτη, σε παραπάνω από ένα ενεργό κέντρο του δηλαδή ταυτόχρονα. Στη μεγάλη αυτή διασπορά στην ουσία οφείλεται η ύπαρξη αξιόλογης ροής ρεύματος. Μειονέκτημα στη χρήση του Pt ως καταλύτη αποτελεί, εκτός το μεγάλο κόστος του, η μείωση της καταλυτικής του δράσης του ως συνέπεια της παρουσίας διαφόρων προσμίξεων όπως το CO στο καύσιμο του υδρογόνου αν αυτό προέρχεται από αναμόρφωση άλλων καυσίμων ακόμα και στις χαμηλές συγκεντρώσεις όπου αυτό συναντάται της τάξεως του 1%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ισχύς του δεσμού Pt - CO είναι μεγαλύτερη του δεσμού Pt - H μειώνοντας τα καταλυτικά ενεργά κέντρα αφού για το σπάσιμο του πρώτου χρειάζονται θερμοκρασίες κοντά στους 150 °C. Αυτός είναι και ο λόγος όπου δικαιολογεί την έρευνα για μεμβράνες ικανές να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες μεταξύ των 120 °C και 200 °C αφού σε αυτήν την περιοχή η δηλητηρίαση είναι ελάχιστη και μειώνει παρά ελάχιστα την ολική απόδοση της κυψέλης. Κράμα λευκόχρυσου-ρουθηνίου ( Pt - Ru ), επιπλέον, παρουσιάζει, καλύτερες καταλυτικές ιδιότητες από τον καθαρό Pt στην άνοδο γεγονός το οποίο έγκειται κυρίως στη μεγαλύτερη του ανθεκτικότητα στη δηλητηρίαση από το CO , με αποτέλεσμα μεγαλύτερες τάσεις εξόδου. Μπορούμε να καταλάβουμε καλύτερα το γιατί μέσω των επόμενων αντιδράσεων στις οποίες λαμβάνουν μέρος δύο κοντινά ενεργά κέντρα, Pt και Ru



Εξάλλου η ηλεκτρονική πυκνότητα του Pt μειώνεται, καθώς αυτό βρίσκεται στον καταλύτη ως μέρος κράματος και επομένως η ισχύς του δεσμού Pt - CO μειώνεται αφήνοντας μεγαλύτερη ποσότητα PtRu ελεύθερη. Άλλα κράματα του Pt εκτός του Pt - Ru τα οποία έχουν μελετηθεί στο ρόλο του καταλύτη είναι τα Pt - Rh και Pt - Ir τα οποία όμως δεν είναι τόσο αποτελεσματικά όσο το πρώτο.

Τέλος εκτός από το CO και το CO<sub>2</sub> δρα σαν δηλητήριο καθώς αυτό παράγει CO όπως βλέπουμε από τις αντιδράσεις που ακολουθούν



και



#### 5.4.4 Διαχείριση Νερού

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

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

### 5.5 Απόδοση Κυψέλων Καυσίμου

#### 5.5.1 Θεωρητική Προσέγγιση

Μπορούμε να συγκρίνουμε την απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου και μιας μηχανής εσωτερικής καύσεως σε θεωρητικό επίπεδο. Όπως το θεώρημα του Carnot της θερμοδυναμικής μας υποδεικνύει, υπάρχει κάποιο μέγιστο όριο στην απόδοση μιας θερμικής μηχανής, δηλαδή δεν είναι δυνατή η ολική μετατροπή της θερμότητας σε μηχανικό έργο αλλά μέρος αυτής εκλύεται στο περιβάλλον. Σε μία μηχανή εσωτερικής καύσης, η μηχανή δέχεται θερμότητα από κάποια δεξαμενή θερμότητας σε υψηλή θερμοκρασία  $T_1$  και μετά τη μετατροπή ενός μέρους της ενέργειας σε μηχανικό έργο, διοχετεύει το υπόλοιπο της ενέργειας στο περιβάλλον θερμοκρασίας  $T_2$  (χαμηλότερης της  $T_1$ ). Η μέγιστη θεωρητική απόδοση δίνεται από τον τύπο

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

και είναι τόσο μεγαλύτερη, όπως φαίνεται, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά αυτών των θερμοκρασιών.

Ωστόσο σε μία κυψέλη καυσίμου δεν εμπλέκεται καμία μετατροπή θερμότητας σε μηχανική έργο οπότε και το όριο της μέγιστης απόδοσης δεν περιορίζεται όπως στην προηγούμενη περίπτωση μιας κι έτσι είναι δυνατή η λειτουργία τους ακόμα και στις χαμηλές θερμοκρασίες των 80° C.

#### 5.5.2 Πρακτική Προσέγγιση

Σε μία πιο πρακτική προσέγγιση, ξεκινάμε εξετάζοντας ένα ηλεκτρικά κινούμενο όχημα βασισμένο στη τεχνολογία των κυψέλων καυσίμου. Με τροφοδότηση της κυψέλης με καθαρό υδρογόνο η απόδοση του μπορεί να φτάσει το 80%. Όμως κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας η οποία παράγεται από αυτό σε μηχανική (κινητική ενέργεια κινητήρα) η ολική απόδοση μειώνεται. Αν επίσης δεχτούμε το γεγονός ότι δεν υπάρχει ακόμα κάποιος πρακτικά εκμεταλλεύσιμος τρόπος αποθήκευσης καθαρού υδρογόνου επί του οχήματος για

την άμεση χρήση του στην κυψέλη αλλά απαιτείται η χρήση ενός αναμορφωτή ( reformer ) για τη μετατροπή συμβατικών καυσίμων σε υδρογόνο, η απόδοση ελαττώνεται ακόμα περισσότερο. Καταλήγουμε μετά τα παραπάνω σε μια απόδοση του 25% με 35%.

Συγκρίνοντας το παραπάνω όχημα με ένα το οποίο στηρίζεται στη συμβατική βενζίνη. Λόγω έκλυσης μεγάλου ποσού θερμότητας κατά την καύση του καυσίμου και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι αρκετό μέρος της παραγόμενης ενέργειας καταναλώνεται από τις διάφορες αντλίες ή ανεμιστήρες της μηχανής η απόδοση ενός τέτοιου οχήματος είναι αρκετά χαμηλή, περίπου 20%.

Θεωρούμε τώρα όχημα κινούμενο με ηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση μπαταρίας. Η απόδοση μιας μπαταρίας είναι αρκετά υψηλή, περίπου 90%, μιας και οι περισσότερες εκπέμπουν ένα μικρό ποσοστό θερμότητας. Κατά τη μετατροπή της ενέργειας αυτής σε κινητική του κινητήρα καταλήγουμε σε μια απόδοση 70%. Ωστόσο, πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τη διαδικασία πίσω από την οποία κρύβεται η φόρτιση της μπαταρίας όπου χρησιμοποιούμε. Αν η μέθοδος φόρτισης της δε βασίζεται σε κάποια από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή ή η αιολική η παραπάνω απόδοση μειώνεται στο 40%. Εξάλλου για τη φόρτιση της μπαταρίας απαιτείται μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος που παράγεται από την περιστροφή του κινητήρα σε συνεχές, διαδικασία απόδοσης 90%. Τελικά, φτάνουμε σε ολική απόδοση περίπου 25%

Αν και τα ποσοστά βρίσκονται κοντά το ένα στο άλλο, και άλλοι παράγοντες πρέπει να ληφθούν υπόψη όπως, η ταχύτητα ανεφοδιασμού του οχήματος, η περίοδος η οποία μεσολαβεί μεταξύ δύο ανεφοδιασμών, η μόλυνση όπου προκαλείται κ.α.

## 5.6 Αναμορφωτές

### 5.6.1 Ρόλος Αναμορφωτών

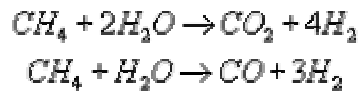
Οι κυψέλες καυσίμου βασίζονται στο υδρογόνο. Ωστόσο οποιοδήποτε υλικό το οποίο περιέχει υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο, όπως η μεθανόλη, η αιθανόλη, το φυσικό αέριο, παράγωγα του πετρελαίου, υγρό προπάνιο κτλ. Μέσω της διαδικασίας της αναμόρφωσης ( reforming ) επιτυγχάνεται η παραγωγή υδρογόνου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

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

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

### 5.6.2 Ενδόθερμη Αναμόρφωση Ατμού

Μία μέθοδος αναμόρφωσης είναι η λεγόμενη ενδόθερμη αναμόρφωση ατμού ( *endothermic steam reforming* ) η οποία συνδυάζει τα καύσιμα αυτά με ατμό εξατμίζοντας τα σε υψηλές θερμοκρασίες (της τάξεως των 760 °C). Το υδρογόνο τότε απομακρύνεται με τη βοήθεια ειδικών μεμβρανών. Αναφερθήκαμε ήδη σε αυτή εμμέσως μιλώντας για επεξεργασία φυσικού αερίου κατά την παρουσίαση μεθόδων παραγωγής υδρογόνου. Κατά αυτήν οι παρακάτω αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα:

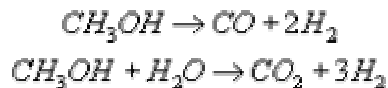


Στην περίπτωση κυψέλων οι οποίες λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες όπως οι MCFC και SOFC , τις οποίες είδαμε παραπάνω, το CO το οποίο ήδη περιέχεται στο καύσιμο ή παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα ως καύσιμο αν και είναι επίσης δυνατό να μετατραπεί σε υδρογόνο μέσω μιας δεύτερης αντίδρασης απομακρύνσεως νερού ( *water shift gas reaction* , WSG ):



Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι είναι, καθώς καταδεικνύει και το όνομα της, ενδόθερμη πράγμα το οποίο σημαίνει ότι πρέπει να καταναλωθεί ενέργεια. Επιπλέον μειονέκτημα είναι ότι το CO δρα σαν δηλητήριο στους καταλύτες των κυψέλων χαμηλής θερμοκρασίας ακόμα και αν αυτό μετατραπεί επίσης σε υδρογόνο αφού η τελευταία αντίδραση είναι αμφίδρομη, αφήνοντας 0,5 με 1% υπόλειμμα CO .

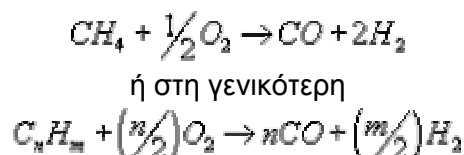
Η ίδια μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετατροπή αλκοολών όπως η μεθανόλη. Αυτή η μετατροπή μπορεί να γίνει με δύο δρόμους όπως περιγράφουν οι παρακάτω αντιδράσεις:



Η αναμόρφωση της μεθανόλης έχει το πλεονέκτημα ότι απαιτεί χαμηλότερες θερμοκρασίες, της τάξεως των 300 °C .

### 5.6.3 Εξώθερμη Μερική Οξειδωση

Η μερική οξείδωση ( *partial oxidation* ) χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του μεθανίου και των υψηλών υδρογονανθράκων αλλά σπάνια για αλκοόλες. Η αντίδραση τέτοιων ενώσεων με οξυγόνο μας δίνει προϊόν υδρογόνο όπως φαίνεται και στην αντίδραση:

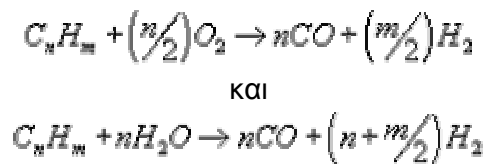


Η απόδοση της είναι μικρότερη από την ενδόθερμη αναμόρφωση ατμού για το ίδιο ποσό καυσίμου αλλά το σημαντικό πλεονέκτημα είναι το ότι πρόκειται για εξώθερμη αντίδραση κι επομένως απαιτεί μικρή ποσότητα θερμότητας για να αρχίσει η αντίδραση. Ως προϊόν μπορεί εκτός από CO να παραχθεί και CO<sub>2</sub> τα οποία συμβάλλουν στη μόλυνση του περιβάλλοντος. Από την άλλη μεριά, οι ρύποι από οξειδία του αζώτου και θείου που

παράγονται σήμερα είναι αρκετά πιο επιβλαβής ενώ οι κυψέλες καυσίμου τους μηδενίζουν. Η μερική οξειδωση είναι η μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται όταν υπάρχει αφθονία πετρελαίου.

#### 5.6.4 Αυτοθερμική Αναμόρφωση

Συνδυάζοντας την ενδόθερμη αναμόρφωση ατμού με την εξώθερμη αντίδραση μερικής οξειδωσης καταφέρνουμε να εκμεταλλευτούμε το ποσό θερμότητας που παράγεται από τη δεύτερη με τέτοιο τρόπο ώστε να τροφοδοτηθεί η πρώτη. Η συγκεκριμένη μέθοδος ( autothermal reforming ) έχει υψηλή απόδοση και χαρακτηρίζεται από γρήγορη εκκίνηση. Περιγράφεται από τις γενικές αντιδράσεις :



#### 5.6.5 Απομάκρυνση Μονοξειδίου Του Άνθρακα

Σε χαμηλές θερμοκρασίες, όπως στις PEM κυψέλες καυσίμων, το μονοξείδιο του άνθρακα το οποίο παράγεται όπως είδαμε παραπάνω πρέπει να απομακρυνθεί προτού διοχετευτεί το υδρογόνο στην κυψέλη καυσίμου.

Ένας τρόπος για να γίνει αυτό είναι να αφαιρεθεί το μονοξείδιο του άνθρακα με τη βοήθεια μίας μεμβράνης παλλαδίου ή κράματος παλλαδίου ( Carbon Monoxide Removal ). Αυτές η μεμβράνες επιτρέπουν τη διέλευση μόνο μορίων υδρογόνου και όχι άλλης ένωσης. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η μεμβράνη οφείλει να είναι αρκετά ανθεκτική στις υψηλές πιέσεις κάτω από τις οποίες διοχετεύεται ο ατμός προς αυτήν.

Δεύτερο τρόπο αποτελεί η αφαίρεση του μονοξειδίου του άνθρακα με τη χρήση ανάλογων καταλυτών το οποίο οξειδώνει το μονοξείδιο ενώ αφήνει το υδρογόνο ανεπηρέαστο, διαδικασία η οποία μπορεί να φτάσει απόδοση ακόμα και 100% σε χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως επιπλέον στάδιο μετά τη πρώτη, τον καθαρισμό δηλαδή του ατμού με τη βοήθεια μεμβράνης παλλαδίου.

### 5.7 Θεωρητικός Υπολογισμός Μέγιστης Τάσης Και Ρυθμού Παραγωγής Θερμότητας

#### 5.7.1 Υπολογισμός Τάσης Ιδανικής Κυψέλης Καυσίμου

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

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

όπου  $n$  είναι ο αριθμός των mol των ηλεκτρονίων όπου παίρνουν μέρος στην αντίδραση ανά mol  $H_2$  και  $F$  η σταθερά του Faraday ίση με  $96487 \text{ joules / volt}$ .

Η ελεύθερη ενέργεια υπολογίζεται από το τύπο

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

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

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

και επομένως για την τάση  $\Delta E$  έχουμε

$$\Delta E = -\left(\frac{-273200 \text{ J}}{2 \cdot 96487 \text{ J}}\right) = 1,23 \text{ V}$$

Σε θερμοκρασία  $80^\circ\text{C}$  η οποία και χαρακτηρίζει τη λειτουργία της κυψέλης τα  $\Delta H$  και  $\Delta S$  μεταβάλλονται πολύ λίγο κι έτσι έχουμε τελικά  $\Delta E = 1,18 \text{ V}$ . Αν επιπλέον επαναλάβουμε τους υπολογισμούς όχι για καθαρό οξυγόνο αλλά για αέρα βρίσκουμε μια νέα τιμή για την τάση ίση με  $1,16 \text{ V}$ .

### 5.7.2 Υπολογισμός Ρυθμού Παραγωγής Θερμότητας

Υποθέτουμε λειτουργία κυψέλης σε πίεση  $1 \text{ atm}$ , θερμοκρασία  $80^\circ\text{C}$ , με τάση εξόδου κυψέλης  $V^* = 0,7 \text{ V}$  και παραγόμενο ρεύμα  $I = 60 \text{ A}$ .

Τότε έχουμε Ισχύς θερμότητας = Ολική ισχύς - ισχύς ρεύματος  $\Rightarrow$

$$P_{\theta} = P_{\text{ολ}} - P_{\rho} = (V_{\text{ολοκλήρ}} I) - (V_{\text{εξόδου}} I)$$

ενώ αντικαθιστώντας βρίσκουμε τελικά ότι για κάθε λεπτό λειτουργίας της κυψέλης παράγεται θερμότητα ίση με  $1,7 \text{ KJ}$  περίπου.

### 5.7.3 Στήλη Κυψέλων Καυσίμου Μεμβράνης Πολυμερούς Ηλεκτρολύτη

Όπως είδαμε η απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου δεν είναι  $100\%$  κι επομένως η θεωρητική τάση των  $1,16 \text{ V}$  δε συναντάται. Αντίθετα μια συνηθισμένη τιμή τάσης εξόδου ισούται περίπου με  $0,7 \text{ V}$ . Ωστόσο επειδή αυτή η τάση είναι μικρή και επομένως ακατάλληλη για τις περισσότερες πιθανές εφαρμογές της, γίνεται χρήση παραπάνω από μιας κυψέλης συνδεδεμένες μεταξύ τους σε σειρά, δημιουργώντας αυτό το οποίο ονομάζουμε στήλη κυψέλης καυσίμου (fuel cell stack). Ανάλογα με τη χρήση όπου προορίζεται η κυψέλη η στήλη μπορεί να αποτελείται από μερικές έως και εκατοντάδες κυψέλες. Ειδικά σε περιπτώσεις όπου απαιτείται εκτός από μεγάλη τάση και μεγάλη ισχύ χρησιμοποιούνται περισσότερες από μία στήλες σε σειρά.

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

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

#### 5.7.4 Απεικόνιση Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου Με Σκέδαση Νετρονίων

Αναφερθήκαμε ήδη στο σημαντικό ρόλο της σωστής παροχής του νερού για τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου. Η κυψέλη θα πρέπει να μένει ένυδρη σε όλη τη διάρκεια της λειτουργίας της προκειμένου να είναι εφικτή η ιοντική αγωγιμότητα της μεμβράνης, σε βαθμό όμως που να αποφεύγεται το πλημμύρισμα των ηλεκτροδίων. Καθώς οι κυψέλες καυσίμου δεν είναι διαφανείς και η άμεση παρατήρηση της λειτουργίας της δεν είναι δυνατή, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποια τεχνική για να επιτευχθεί αυτό.

Χρησιμοποιώντας νετρόνια μπορούμε να έχουμε εικόνα των εσωτερικών διεργασιών, εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι τα νετρόνια μπορούν εύκολα να διαπεράσουν τα μέταλλα και παράλληλα να είναι ευαίσθητα στην παρουσία υδρογόνου. Κατά αυτό τον τρόπο ανιχνεύεται η πυκνότητα υδρογόνου -και επομένως η πυκνότητα του νερού- σε κάθε σημείο της κυψέλης με χωρική ανάλυση περίπου 100μm . Βάση αυτής μπορούμε να γνωρίζουμε αν σε κάποιο σημείο της κυψέλης η παροχή νερού δεν είναι η ιδανική κι επομένως μειώνεται η απόδοση της.

### 5.8 Εφαρμογές Κυψέλων Καυσίμου

Δεδομένου ότι η τεχνολογία και το ενδιαφέρον για τις κυψέλες καυσίμου αυξάνονται καθώς και η ανησυχία σχετικά με τα αποθέματα του παγκόσμιου πετρελαίου και η περιβαλλοντική επίδραση της καύσης του, οι κυψέλες καυσίμου θα μπορούσαν να γίνουν η λύση για να παρέχουν την παραγωγή καθαρής ενέργειας σε όλο τον κόσμο για τις μελλοντικές γενεές. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να συσσωρευτούν και να αυξήσουν την ενεργειακή παραγωγή ανάλογα με την απαίτηση και έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογών. Σήμερα οι κυψέλες καυσίμου έχουν πάρα πολλές εφαρμογές που κυμαίνονται από τους φορητούς υπολογιστές μέχρι και στα διαστημικά οχήματα. Υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες εφαρμογών των κυψέλων καυσίμου, όπου έχουν παίξει πολύ σημαντικό ρόλο : μεταφορές, κατοικίες και εμπορικές.



**Σχήμα 5.5 :** Εφαρμογή κυψέλων καυσίμου σε διαστημικά προγράμματα

### 5.8.1 Μεταφορά

Τα αυτοκίνητα και τα μικρά φορτηγά αντιπροσωπεύουν μια τεράστια πιθανή αγορά για τις κυψέλες καυσίμου. Εάν τα περισσότερα από τα αυτοκίνητα στηριχτούν στην τεχνολογία των κυψέλων καυσίμου τότε θα μπορέσουμε να αποδεσμευούμε από τα ορυκτά καύσιμα. Βεβαίως υπάρχουν και περιβαλλοντικά οφέλη δεδομένου ότι δεν υπάρχουν επιβλαβείς ατμοσφαιρικές εκπομπές.

Εταιρίες στην Γερμανία και στην Ιαπωνία εξετάζουν ήδη πλήρως εξοπλισμένα αυτοκίνητα. Τα περισσότερα πρωτότυπα αυτοκίνητα εξοπλίζονται με κυψέλες καυσίμου τύπου PEM. Το κύριο εμπόδιο στα περισσότερα PEM τροφοδοτούμενα αυτοκίνητα είναι οικονομικοί παράγοντες καθώς επίσης και η ανάγκη της εν πλω αποθήκευσης υδρογόνου. Το Ηνωμένο Συμβούλιο Αμερικής για την Αυτοκίνητη Έρευνα (USCAR) συνεργάζεται με αυτοκινητοβιομηχανίες όπως την FORD και την GENERAL MOTORS για να παράγει έναν εν πλω αναμορφωτή που να μπορεί να επεξεργαστεί τα οργανικά καύσιμα όπως την βενζίνη και την μεθανόλη και να παρέχει το υδρογόνο από μια πιο εύχρηστη υγρή πηγή. Αυτήν την περίοδο οι κυψέλες καυσίμου εξακολουθούν να είναι βαριές για να χρησιμοποιηθούν στην αυτοκινητοβιομηχανία. Έχουν βρει όμως εφαρμογές στα μέσα μαζικής μεταφοράς και κυρίως στα λεωφορεία πόλεων τα οποία είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Ωστόσο οι ερευνητές είναι αισιόδοξοι και πιστεύουν ότι οι κυψέλες καυσίμου θα εξελιχθούν τόσο ώστε να είναι εξίσου αποδοτικές με τις μηχανές εσωτερικής κάυσης.



**Σχήμα 5.6:** Τροφοδοτούμενο λεωφορείο με PEM κυψέλη καυσίμου



**Σχήμα 5.7:** Τροφοδοτούμενο αυτοκίνητο (Mercedes A-class) με PEM κυψέλη καυσίμου



### 5.8.2 Οικιστική Και Προσωπική Χρήση

Οι κυψέλες καυσίμου ατομικής και οικιακής χρήσης θα ξεσηκώσουν την ανεξάρτητη ηλεκτρική παραγωγή. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους φορητούς υπολογιστές, στα κινητά τηλέφωνα και στα φορητά CD Player αντικαθιστώντας πλήρως τις μπαταρίες ξηρού τύπου. Επιπλέον μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μια καθαρή και ήσυχη πηγή είτε αρχικής είτε εφεδρικής ηλεκτρικής δύναμης στα αστικά, προαστιακά καθώς και εξοχικά σπίτια. Μπορεί οι γεννήτριες κυψέλων καυσίμου κατοικιών να αντιμετωπίζουν δυσκολία σε επίπεδο αγοράς λόγω της υψηλότερης τιμής τους από τις συμβατικές γεννήτριες βενζίνης και diesel, εντούτοις λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης τους οι τιμές μειώνονται συνεχώς και τέτοιου είδους γεννήτριες αποτελούν ελκυστική λύση για τους καταναλωτές με περιβαλλοντική συνείδηση.



**Σχήμα 5.8 :** Εφαρμογή κυψέλης καυσίμου σε μπαταρίες κινητού τηλεφώνου



**Σχήμα 5.9 :** Εφαρμογή κυψέλης καυσίμου σε μπαταρίες φορητού υπολογιστή

### 5.8.3 Βιομηχανία

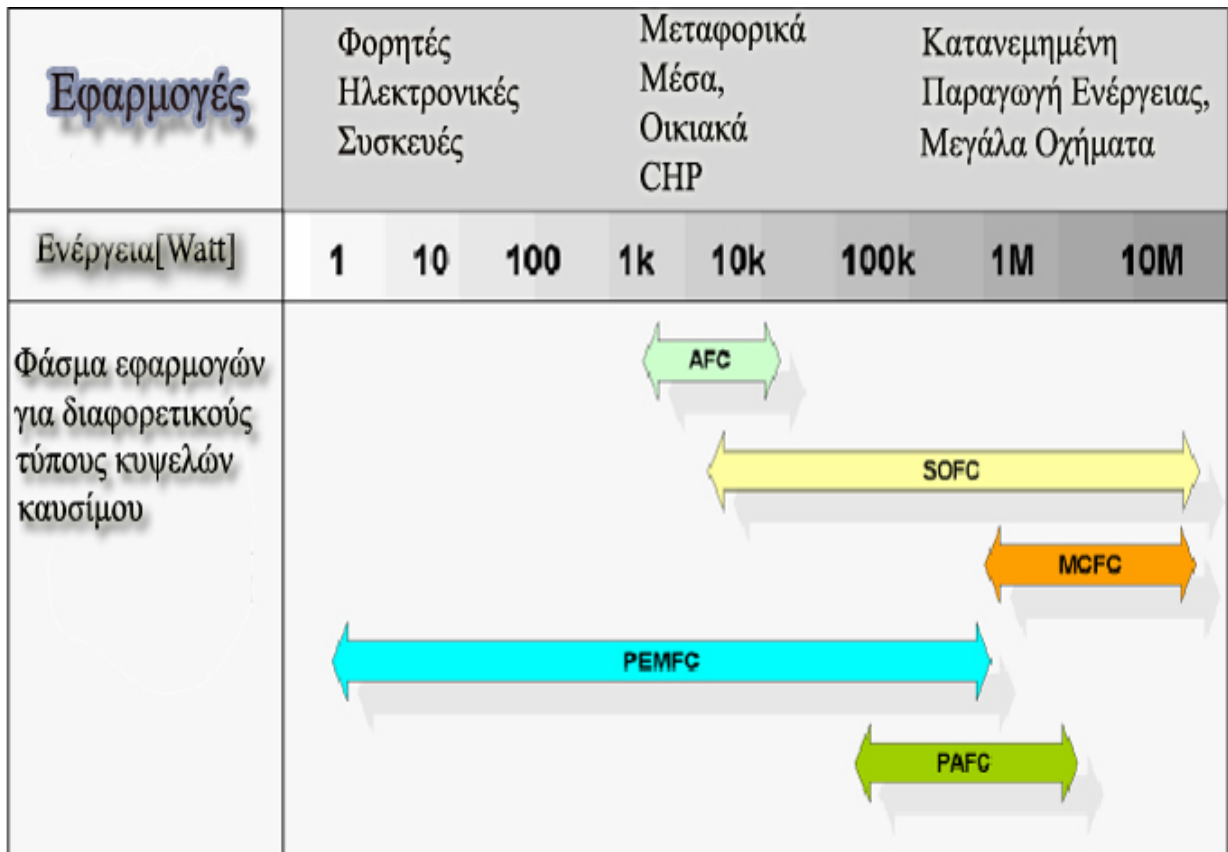
Οι κυψέλες καυσίμου δεν είναι η βέλτιστη λύση για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενώ φαίνονται να είναι ένας από τους πιο βιώσιμους τρόπους αποθήκευσης ενέργειας. Το κύριο εμπόδιο για την ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων αυτήν την περίοδο είναι το υψηλό κόστος. Εντούτοις οι κυψέλες καυσίμου είναι ελκυστικές στις αυτόνομες εφαρμογές για διάφορους τρόπους. Έχουν ασύγκριτες αποδοτικότητες καυσίμου ειδικά στις συνδυασμένες εφαρμογές θερμότητας και δύναμης όπου η θερμική ενέργεια αποβλήτων συγκομίζεται για βιομηχανικούς λόγους.



**Σχήμα 5.10** : Αλκαλική κυψέλη καυσίμου βιομηχανικής κλίμακας



**Σχήμα 5.11** : PEM κυψέλη καυσίμου βιομηχανικής κλίμακας



**Σχήμα 5.12 :** Διαμόρφωση των διαφορετικών τύπων κυψελίδων καυσίμου ανάλογα με τις εφαρμογές στις οποίες δραστηριοποιούνται

## 6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ ΝΕΡΟΥ

### 6.1 Περιγραφή Συστήματος- Σκοπός

Στο συγκεκριμένο πείραμα γίνεται ηλεκτρόλυση νερού με τη βοήθεια ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, μιας συσκευής ηλεκτρόλυσης νερού, μιας ηλεκτρονικής πλακέτας και ενός πυρανόμετρου καθώς και δύο πολύμετρα. Συγκεκριμένα το φωτοβολταϊκό με κλίση  $30^\circ$  και προσανατολισμό νότιο – νοτιοδυτικό συνδεόταν με την πλακέτα που ρόλος της ήταν να κατεβάζει την τάση από τα 17-20 Volt περίπου στα 2 Volt, διότι η ηλεκτρολυτική συσκευή όπως φαίνεται παρακάτω στα τεχνικά χαρακτηριστικά της, δουλεύει με τάση 0-2 Volt. Από την έξοδο της πλακέτας τροφοδοτούνταν με ρεύμα η ηλεκτρολυτική συσκευή και στην συνέχεια παραγόταν το υδρογόνο.

Το πυρανόμετρο μετρούσε την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε  $\text{Watt/m}^2$  ενώ τα πολύμετρα έδειχναν την τάση και την ένταση του ρεύματος στο φωτοβολταϊκό καθώς και στην ηλεκτρολυτική συσκευή. Σκοπός αυτής της πειραματικής διαδικασίας είναι να εξακριβωθεί η απόδοση της ηλεκτρολυτικής συσκευής με διάφορες τιμές ηλιακής έντασης παράγοντας κάθε φορά  $20 \text{ Ncm}^3$  υδρογόνου.



Σχήμα 6.1: Διαδικασία Ηλεκτρόλυσης Σε Πλήρη Λειτουργία

## 6.2 Περιγραφή Των Στοιχείων Του Πειράματος

### 6.2.1 Περιγραφή Και Σκοπός Του Επιδεικτικού Υδρογόνου Pempower1-XL

Το σύστημα PEMPower1-XL αναπτύχθηκε αποκλειστικά για επιδεικτικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς. Οι συναρτήσεις του PEM ηλεκτρολύτη και της PEM κυψέλης καυσίμου μπορούν να επιδειχτούν και να μελετηθούν τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά με αυτό το σύστημα ( PEM = Proton Exchange Membrane ).

Όταν παρέχεται μια DC τάση ο ηλεκτρολύτης διαχωρίζει το απιονισμένο νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο. Στα διαχωριστικά δοχεία υδρογόνου/ νερού και οξυγόνου / νερού (που βρίσκονται ακριβώς από πάνω από τον ηλεκτρολύτη) τα αέρια διαχωρίζονται από το νερό. Δύο γυάλινα μπουκαλάκια βρίσκονται ακριβώς από κάτω από τον ηλεκτρολύτη (για τον καθαρισμό του νερού) που περιέχουν ρητίνη ιοντική ανταλλαγής, η οποία προσφέρεται για να διατηρεί σε υψηλό βαθμό την καθαρότητα του νερού.

Τα αέρια κατευθύνονται στο κέντρο του συστήματος όπου βρίσκονται τα δοχεία αποθήκευσης. Οι φυσαλίδες εισέρχονται στο κάθε αποθηκευτικό δοχείο ανυψώνουν και αντικαθιστούν το νερό, το οποίο πιέζεται στο δοχείο αντιστάθμισης (που βρίσκεται πάνω από τα δοχεία αποθήκευσης). Για να αντισταθμιστεί από την πίεση στο σύστημα, το δοχείο αντιστάθμισης πρέπει να είναι ανοιχτό καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Αυτό το δοχείο επιτρέπει επίσης και την απελευθέρωση τις περισσειας του αερίου από το σύστημα σε περίπτωση παραγωγής περισσειας υδρογόνου ή οξυγόνου.



Σχήμα 6.2 : Σύστημα Υδρογόνου Pempower1-XL

### Τεχνικά Χαρακτηριστικά PEMPower 1-XL

Η συσκευή αυτή αποτελείται από ένα ηλεκτρολύτη, δύο ειδικά διαχωριστικά μπουκαλάκια αέριου/ υγρού, δύο μπουκαλάκια αποθήκευσης των αέριων υδρογόνου και οξυγόνου, συνδεδεμένα σε οριζόντια διάταξη.

Διαστάσεις (ύψος χ μήκος χ πλάτος): 542 mm χ 655 mm χ 250 mm  
Βάρος :4,6 kg

#### Ηλεκτρολύτης PEMEL

- Επιφάνεια ηλεκτροδίου: 40cm<sup>2</sup>
- Ισχύς: 10 W
- Διαστάσεις (ύψος χ μήκος χ πλάτος): 100 mm χ 100 mm χ 22 mm
- Βάρος: 300gr
- Επιτρεπτή τάση: 0-2 V
- Επιτρεπτό ρεύμα: 0-5 A

#### Αποθηκευτικά Δοχεία

Τα αποθηκευτικά δοχεία μπορούν να αποθηκεύσουν μέχρι 80 Ncm<sup>3</sup> υδρογόνου και 80 Ncm<sup>3</sup> οξυγόνου.

### 6.2.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκού Πλαισίου

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα είναι τις εταιρείας SIEMENS SOLAR INDUSTRIES MODEL M55. Οι διαστάσεις του είναι ( μήκος χ πλάτος): 1,26 m X 0.32 m.

Στα 1000 w/m<sup>2</sup> και στους 25 °C ισχύουν τα εξής:

- $P_{max} = 53 \text{ W}$
- $I_{sc} = 3.35 \text{ A}$
- $I_{rated} = 3.05 \text{ A}$
- $V_{oc} = 21.7 \text{ V}$
- $V_{rated} = 17.34 \text{ V}$
- FUSE 5 A

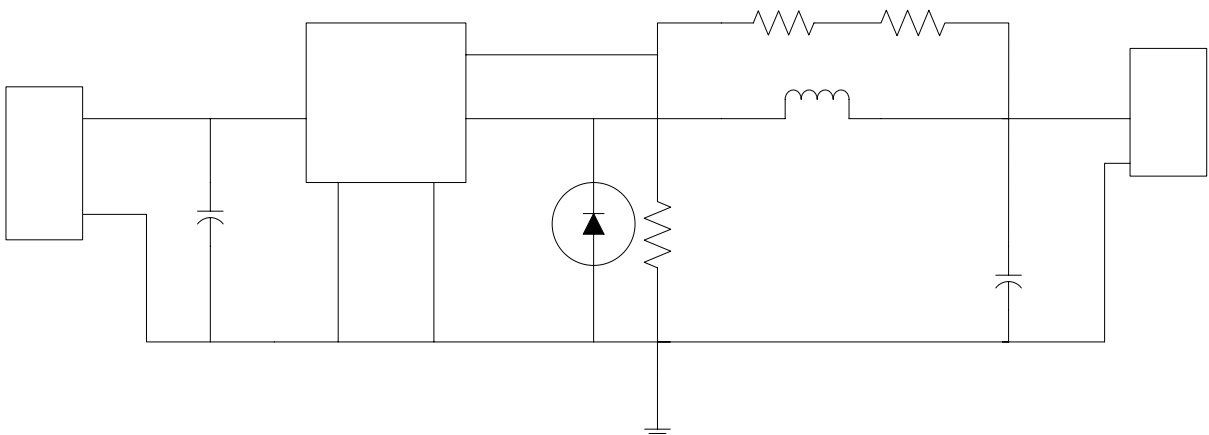


**Σχήμα 6.3 :** Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο SIEMENS

### 6.2.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Πλακέτας

Η ηλεκτρονική πλακέτα που χρησιμοποιήθηκε κατασκευάστηκε από τον κύριο Χατζάκη για να εξυπηρετήσει παλαιότερους εργαστηριακούς σκοπούς. Σκοπός της συγκεκριμένης πλακέτας είναι να μειώνει την τάση που παράγεται από το φωτοβολταϊκό (περίπου 17-20V), διότι η μέγιστη τάση που μπορεί να δεχτεί το electrolyser είναι 2 V.

Γι' αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται μετατροπέας αντίδρασης. Στο παρακάτω σχέδιο φαίνεται το κύκλωμα της πλακέτας καθώς και τα επιμέρους στοιχεία της.

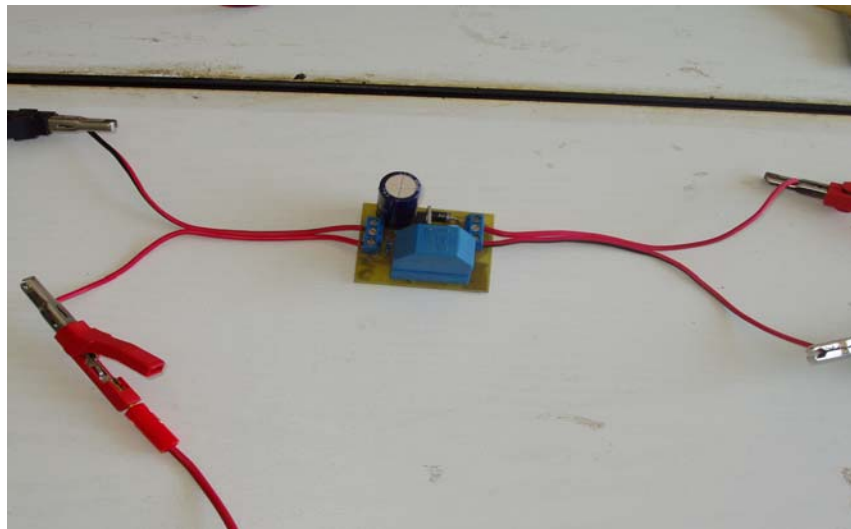


**Σχήμα 6.4 :** Κύκλωμα Πλακέτας

Η παραπάνω πλακέτα αποτελείται από τα εξής :

1. Πυκνωτή  $C_1=100 \mu\text{F}$
2. Μετατροπέα αντίδρασης LM2576
3. Δίοδο  $D_1 = 1\text{N}5820\text{D}$
4. Αντίσταση  $R_1 = 1 \text{K}\Omega$
5. Αντίσταση  $R_2 = 250 \Omega$
6. Αντίσταση  $R_3 = 1 \text{K}\Omega$
7. Πηνίο  $L_1 = 150 \mu\text{H}$
8. Πυκνωτή  $C_2=1000 \mu\text{F}$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται από κοντά η πλακέτα. Δεξιά είναι η είσοδος της δηλαδή το φωτοβολταϊκό και αριστερά η έξοδος που καταλήγει στην είσοδο της ηλεκτρολυτικής συσκευής.



**Σχήμα 6.5:** Ηλεκτρονική Πλακέτα Σε Λειτουργία



### 6.3 Αποτελέσματα Μετρήσεων – Πειραματικά Δεδομένα

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων καθώς και τα γραφήματα που προκύπτουν από αυτές.

ΠΡΟΣΠΙΠΤΟΥΣΑ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (W /m <sup>2</sup> )	ΤΑΣΗ ΑΝΟΙΧΤΟΚΥΚΛΩΣΗΣ Φ/Β (V)	ΕΝΤΑΣΗ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ Φ/Β ( A)	ΤΑΣΗ ΜΕ ΦΟΡΤΙΟ ΣΤΟ Φ/Β (V)	ΕΝΤΑΣΗ ΜΕ ΦΟΡΤΙΟ ΣΤΟ Φ/Β (A)	ΤΑΣΗ ΑΝΟΙΧΤΟΚΥΚΛΩΣΗΣ ΠΛΑΚΕΤΑΣ (V)	ΤΑΣΗ ΜΕ ΦΟΡΤΙΟ ΣΤΟ ELECTROLYSER (V)	ΕΝΤΑΣΗ ΜΕ ΦΟΡΤΙΟ ΣΤΟ ELECTROLYSER (A)	ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ 20Ncm <sup>3</sup> ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ (SEC)
859,00	19,83	2,86	19,33	0,22	2,30	1,83	1,45	120,00
850,00	19,54	2,83	19,10	0,24	2,30	1,84	1,57	124,00
821,00	19,92	2,72	19,26	0,20	2,30	1,82	1,40	105,00
809,00	19,30	2,66	18,95	0,24	2,20	1,84	1,55	113,00
733,00	19,37	2,30	19,09	0,20	2,20	1,82	1,48	125,00
682,00	18,93	2,42	18,87	0,24	2,20	1,83	1,53	105,00
657,00	18,95	2,37	18,48	0,24	2,15	1,83	1,53	115,00
647,00	19,36	2,28	18,93	0,21	2,20	1,82	1,41	128,00
618,00	19,09	2,25	18,73	0,20	2,20	1,82	1,49	125,00
589,00	19,10	2,17	18,90	0,24	2,20	1,82	1,54	120,00
584,00	19,10	1,73	18,62	0,25	2,20	1,83	1,57	110,00
500,00	18,94	1,95	18,47	0,27	2,20	1,81	1,68	125,00
472,00	19,05	1,30	18,55	0,21	2,20	1,84	1,47	110,00
453,00	19,02	1,05	18,40	0,22	2,20	1,82	1,45	130,00
441,00	19,11	1,78	18,52	0,27	2,20	1,81	1,70	103,00
370,00	19,16	1,58	18,66	0,28	2,20	1,81	1,76	113,00
345,00	18,75	1,47	17,92	0,21	2,15	1,82	1,38	127,00
314,00	18,95	1,36	18,52	0,25	2,20	1,75	1,16	140,00
283,00	18,54	0,57	17,12	0,22	2,20	1,81	1,35	135,00
264,00	18,92	1,22	18,40	0,23	2,15	1,76	1,27	150,00
230,00	18,24	0,98	16,65	0,21	2,15	1,78	1,23	165,00
175,00	19,53	0,94	18,42	0,24	2,20	1,82	1,45	170,00
120,00	18,70	0,74	17,58	0,26	2,10	1,82	1,58	188,00
80,00	18,78	0,64	17,49	0,20	2,10	1,86	1,21	200,00
38,00	-	-	-	-	-	-	-	-

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα Μετρήσεων

Από τις παραπάνω μετρήσεις υπολογίζονται για κάθε τιμή ηλιοφάνειας η ισχύς της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, η ισχύς του φωτοβολταϊκού, η ισχύς της πλακέτας, καθώς και η απόδοση του φωτοβολταϊκού, της πλακέτας, της ηλεκτρόλυσης και τέλος η απόδοση όλου του συστήματος. Οι τύποι με τις οποίους υπολογίστηκαν φαίνονται παρακάτω.

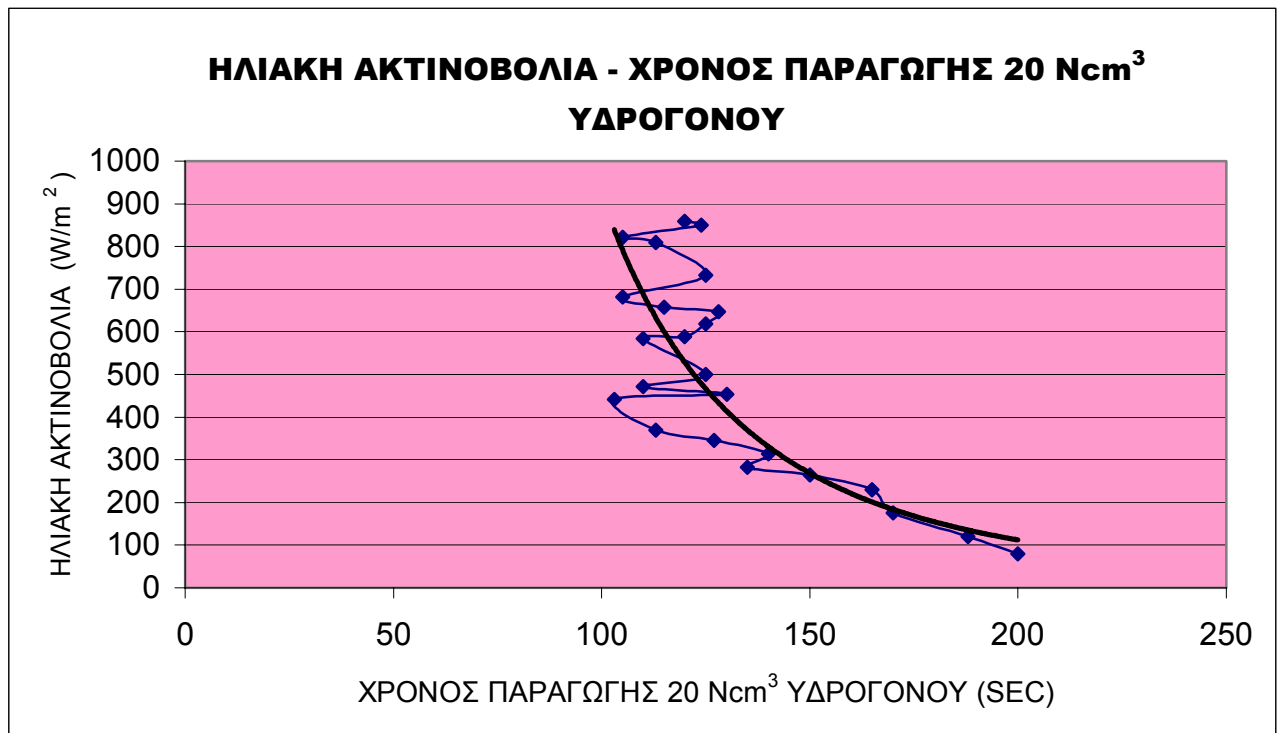
- Ισχύς Προσπίπτουσας Ακτινοβολίας (W) = Η Προσπίπτουσα Ηλιακή Ακτινοβολία (W / m<sup>2</sup>) x Επιφάνεια Του Φωτοβολταϊκού ( 0,4032 m<sup>2</sup>)
- Ισχύς Φ/Β (W) = Τάση (V) x Ένταση (A)
- Ισχύς Πλακέτας (W) = Τάση (V) x Ένταση (A)
- Απόδοση Φ/Β= Ισχύς Φ/Β (W) / Ισχύς Προσπίπτουσας Ακτινοβολίας (W)
- Απόδοση Πλακέτας= Ισχύς Πλακέτας (W) / Ισχύς Φ/Β (W)
- Απόδοση Ηλεκτρόλυσης= Ενέργεια Υδρογόνου (J) / Ισχύς (W) Πλακέτας x χρόνο παραγωγής 20 Ncm<sup>3</sup> (sec)
- Απόδοση Συστήματος= Ενέργεια Υδρογόνου (J) / Ισχύς Προσπίπτουσας Ακτινοβολίας(W) x χρόνο παραγωγής 20 Ncm<sup>3</sup> (sec)

Η ενέργεια υδρογόνου είναι:  $E_{H_2} = 2,95 \text{ Kwh} / \text{Nm}^3$ , η οποία μετατρέπεται στην περίπτωση μας σε  $E_{H_2} = 10,62 \text{ joule} \times 20 \text{ Ncm}^3 / \text{N cm}^3 = 212.4 \text{ J} = 212.4 \text{ W} \times \text{Sec}$  αφού κάθε φορά παράγονται 20 Ncm<sup>3</sup> υδρογόνου για κάθε τιμή έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τις αντίστοιχες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας φαίνονται στον παρακάτω **πίνακα 6.2**

ΙΣΧΥΣ ΠΡΟΣΠΙΠΤΟΥΣΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ (W )	ΙΣΧΥΣ Φ/Β (W)	ΙΣΧΥΣ ΠΛΑΚΕΤΑΣ (W)	ΑΠΟΔΟΣΗ Φ/Β (%)	ΑΠΟΔΟΣΗ ΠΛΑΚΕΤΑΣ (%)	ΑΠΟΔΟΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ (%)	ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ (%)
346,35	4,25	2,65	1,23	62,26	66,85	0,51
342,72	4,58	2,88	1,34	62,88	59,42	0,50
331,03	3,85	2,55	1,16	66,15	79,39	0,61
326,19	4,55	2,85	1,39	62,64	65,98	0,58
295,55	3,82	2,70	1,29	70,59	63,05	0,57
274,98	4,53	2,79	1,65	61,66	72,45	0,74
264,90	4,44	2,80	1,67	63,06	66,04	0,70
260,87	3,98	2,56	1,52	64,41	64,81	0,64
249,18	3,75	2,71	1,50	72,39	62,66	0,68
237,48	4,54	2,80	1,91	61,69	63,26	0,75
235,47	4,66	2,88	1,98	61,82	67,10	0,82
201,60	4,99	3,04	2,47	60,98	55,88	0,84
190,31	3,90	2,70	2,05	69,43	71,39	1,01
182,65	4,05	2,64	2,22	65,19	61,91	0,89
177,81	5,00	3,07	2,81	61,47	67,09	1,16
149,18	5,22	3,19	3,50	60,97	59,00	1,26
139,10	3,76	2,51	2,71	66,74	66,59	1,20
126,60	4,63	2,02	3,66	43,72	74,95	1,20
114,11	3,77	2,44	3,30	64,77	64,50	1,38
106,44	4,23	2,24	3,98	52,82	63,35	1,33
92,74	3,50	2,19	3,77	62,62	58,80	1,39
70,56	4,42	2,64	6,27	59,70	47,34	1,77
48,38	4,57	2,87	9,45	62,88	39,31	2,34
32,26	3,50	2,25	10,84	64,34	47,19	3,29
15,32	-	-	-	-	-	-

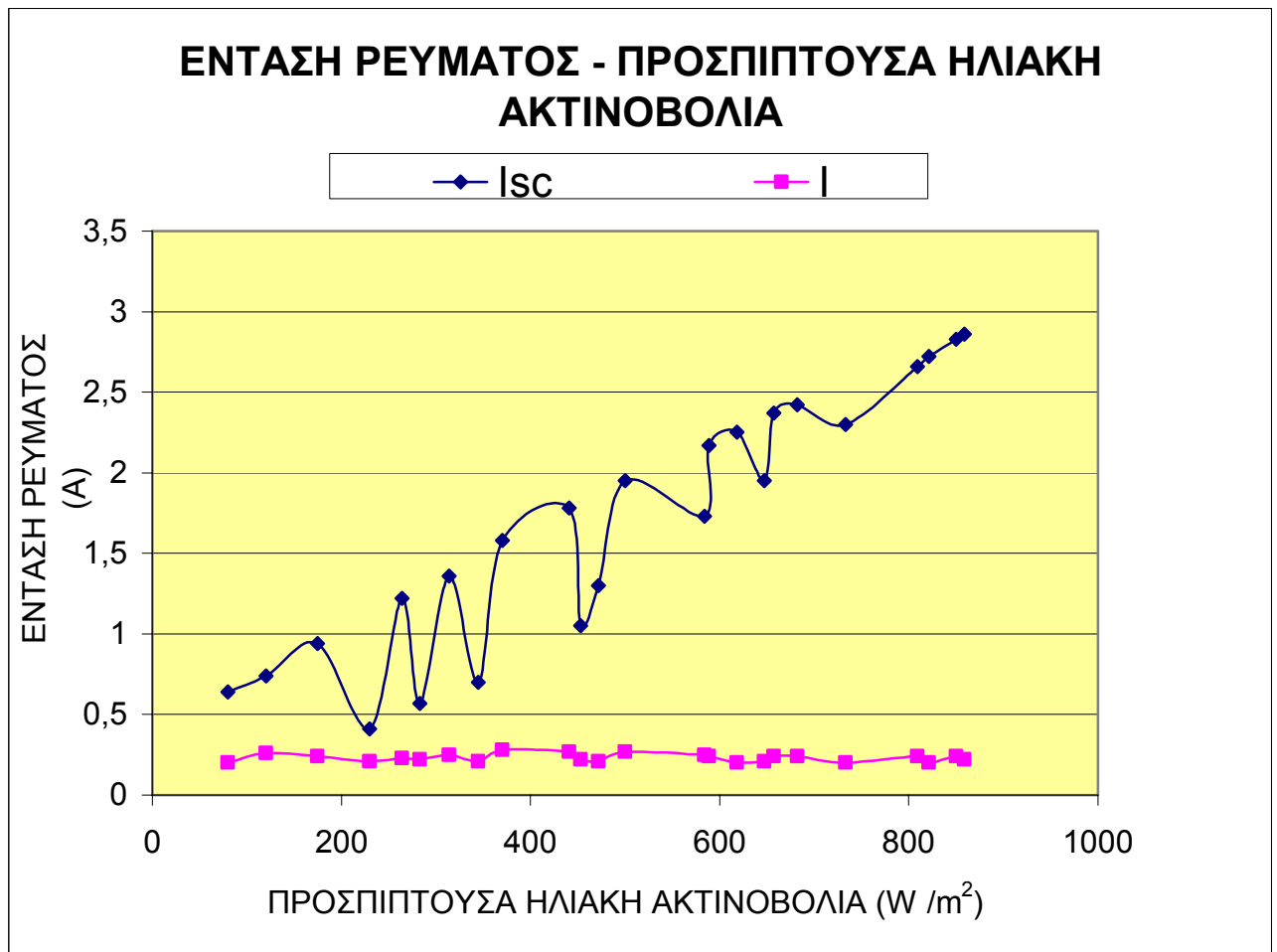
Τα γραφήματα που προκύπτουν από τις παραπάνω μετρήσεις είναι τα εξής :



**Σχήμα 6.6:** Ηλιακή Ακτινοβολία – Χρόνος

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ο χρόνος παραγωγής 20 Ncm<sup>3</sup> υδρογόνου για κάθε τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο μέσος όρος παραγωγής υδρογόνου μέχρι τα 400 W/m<sup>2</sup> είναι 116 δευτερόλεπτα, ενώ από τα 400 W/m<sup>2</sup> και κάτω αυξάνεται στα 117 δευτερόλεπτα. Βέβαια όσο υψηλότερη είναι η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας τόσο γρηγορότερα παράγεται υδρογόνο γι' αυτό η γραφική παράσταση είναι υπερβολικής μορφής.

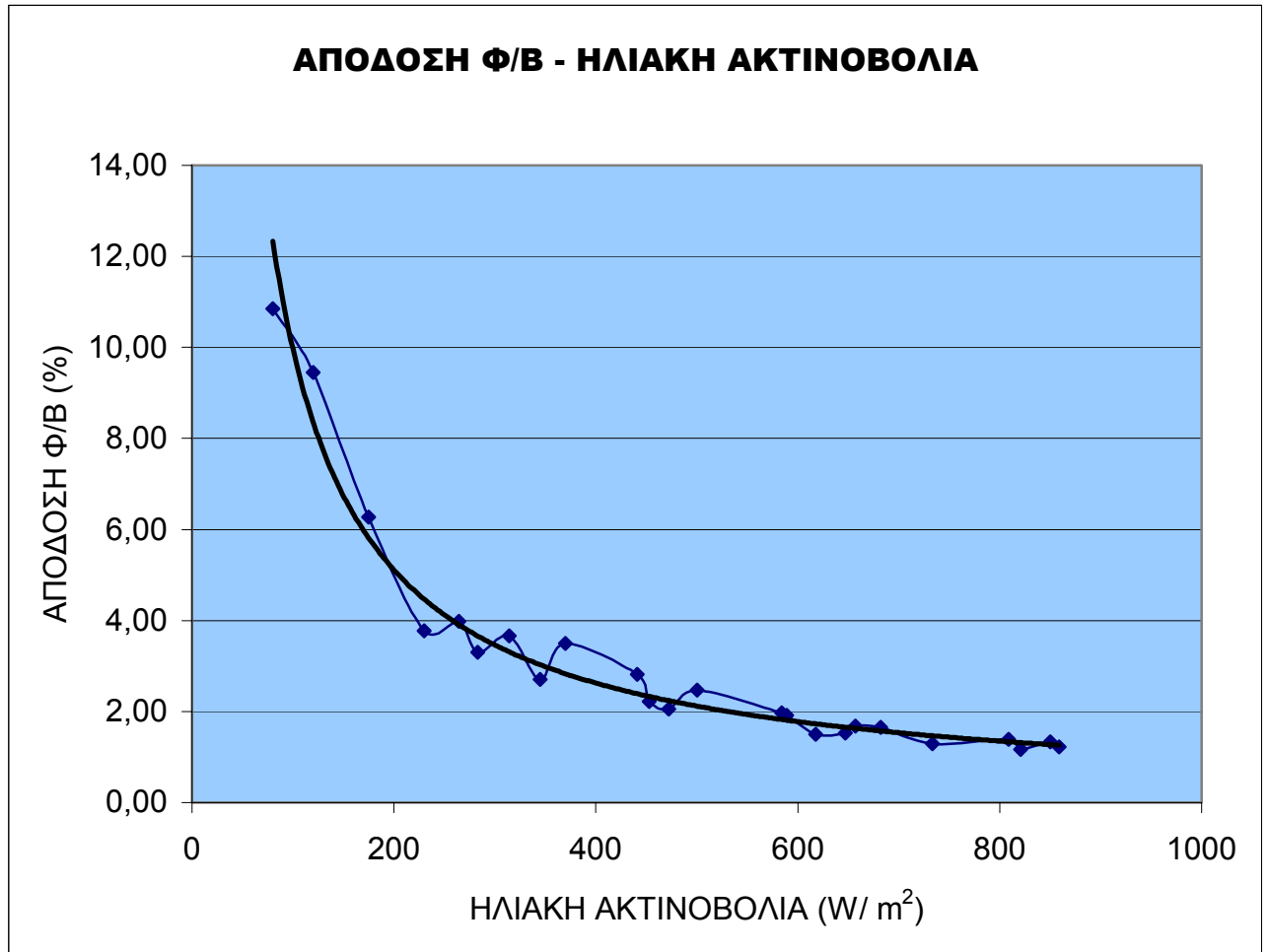
Παρακάτω ακολουθεί το διάγραμμα της έντασης του ρεύματος του  $\phi/\beta$  και του ρεύματος βραχυκύκλωσης συναρτήσει της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα η μπλε γραμμή μας δείχνει το ρεύμα βραχυκύκλωσης, ενώ η ροζ την ένταση του ρεύματος όταν το φωτοβολταϊκό στοιχείο λειτουργεί με φορτίο. Είναι φανερό ότι η ένταση με φορτίο «πέφτει» σε μεγάλο ποσοστό σε σχέση με την ένταση βραχυκύκλωσης, όταν το φωτοβολταϊκό λειτουργεί με φορτίο την πλακέτα και το electrolyser που χρησιμοποιήσαμε στο συγκεκριμένο πείραμα, παρόλο που είναι σχεδόν σταθερή για τις διάφορες τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.



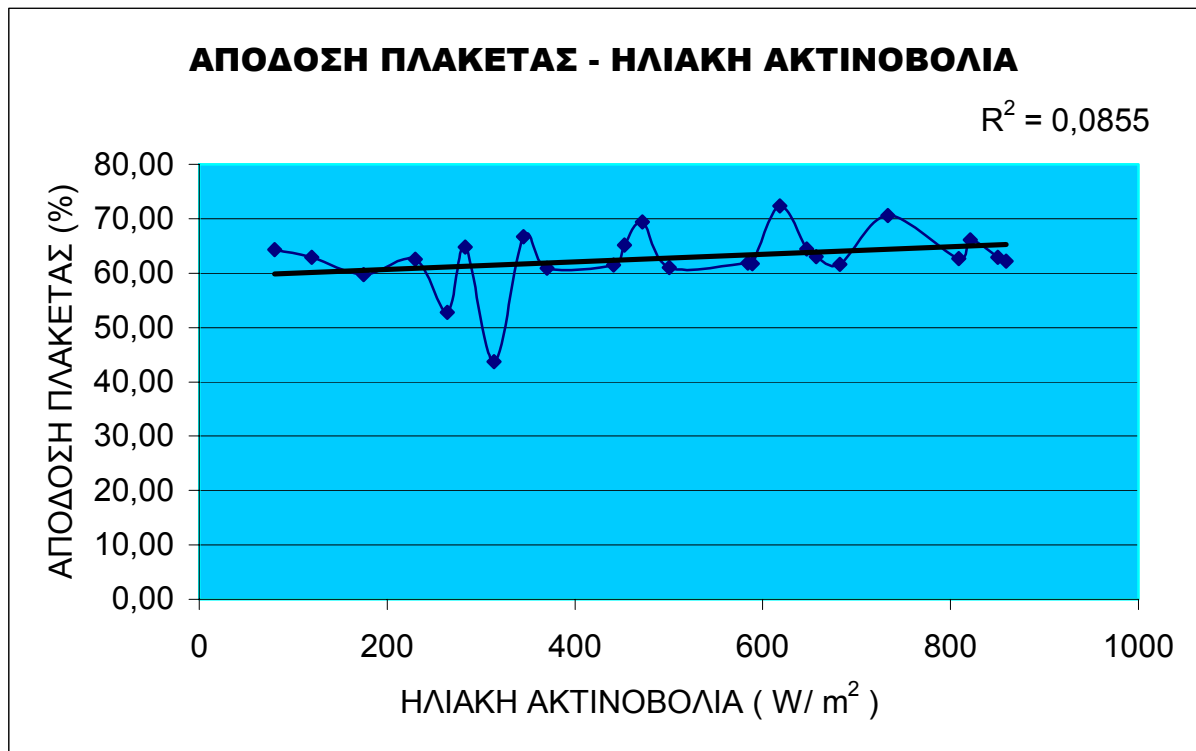
**Σχήμα 6.7:** Ένταση Βραχυκύκλωσης Και Ένταση Με Φορτίο Του  $\Phi/\beta$  – Προσπίπτουσα Ηλιακή Ακτινοβολία

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η γραφική παράσταση ακολουθεί μια υπερβολική μορφή, ενώ φαίνεται ότι η απόδοση του φ/β είναι πολύ χαμηλή ειδικά όσο μεγαλώνει η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

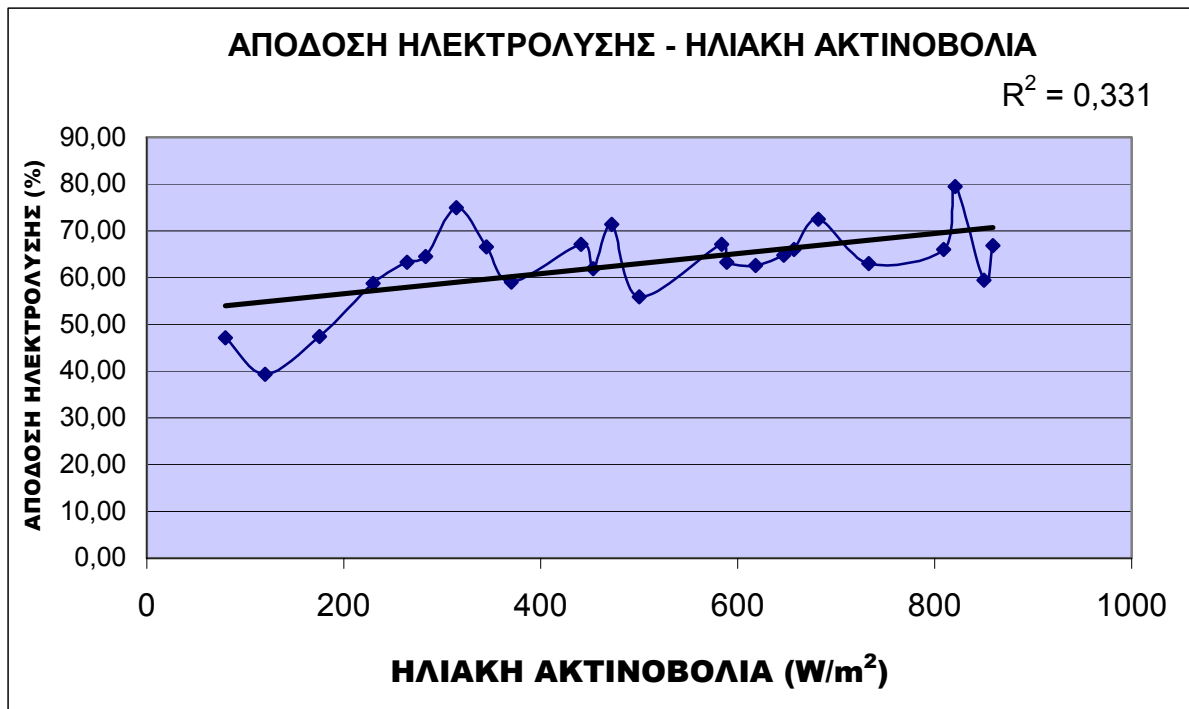


**Σχήμα 6.8:** Απόδοση φ/β - Ηλιακή Ακτινοβολία



**Σχήμα 6.9:** Απόδοση Πλακέτας –Ηλιακή Ακτινοβολία

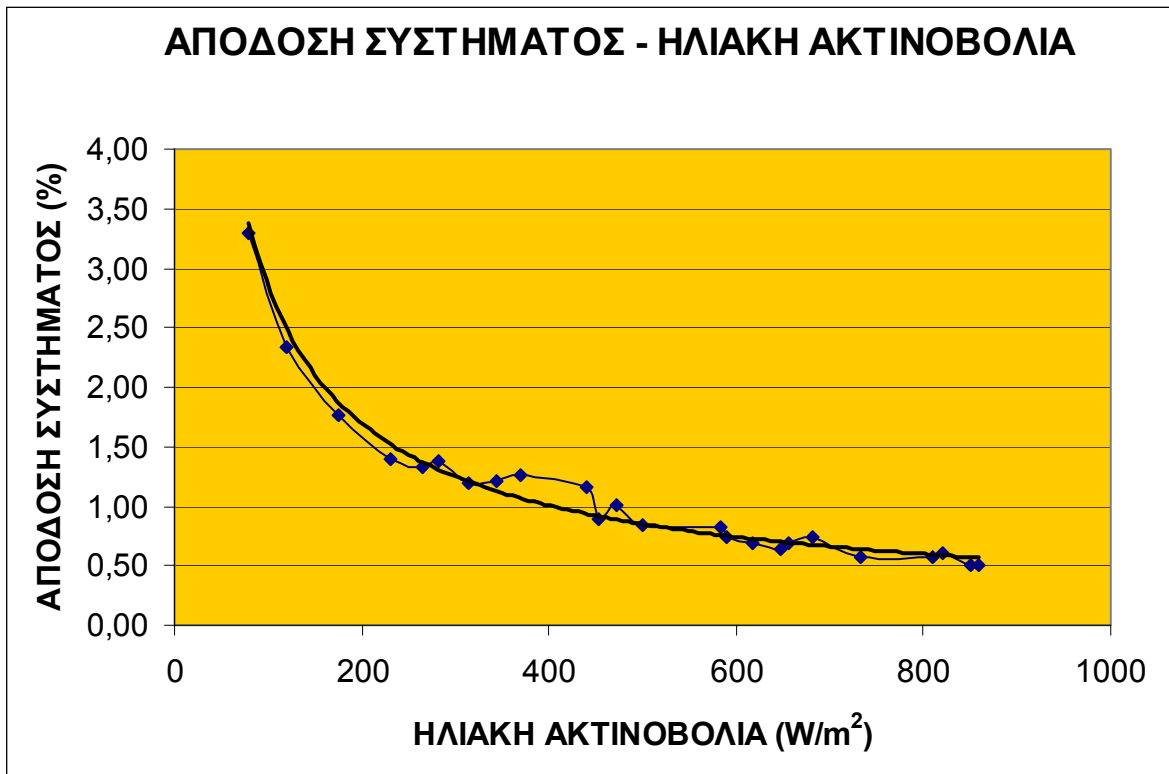
Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η απόδοση της πλακέτας είναι γραμμική σύμφωνα με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και διακρίνεται μια ανοδική τάση από 60% έως 67% , με μέσο όρο 63%.



**Σχήμα 6.10:** Απόδοση Ηλεκτρόλυσης - Ηλιακή Ακτινοβολία

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η απόδοση της ηλεκτρόλυσης είναι γραμμική σύμφωνα με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και διακρίνεται μια ανοδική τάση από 60% έως 67% , με μέσο όρο 63%.





**Σχήμα 6.11:** Απόδοση Συστήματος - Ηλιακή Ακτινοβολία

Τέλος στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η απόδοση όλου του συστήματος συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας. Φαίνεται και εδώ καθαρά ότι είναι εξαιρετικά χαμηλή, ιδίως όσο αυξάνεται η ηλιακή ακτινοβολία.

## 6.4 Συμπεράσματα Μετρήσεων - Σχολιασμός

Ο χρόνος παραγωγής 20 Ncm<sup>3</sup> υδρογόνου εξαρτάται άμεσα από την τιμή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ( σχήμα 6.6) και μάλιστα για τιμές άνω των 460 watt / m<sup>2</sup> ο μέσος χρόνος παραγωγής είναι 117 δευτερόλεπτα. Αντίθετα από τα 450 watt / m<sup>2</sup> και κάτω παρατηρείται ότι ο μέσος χρόνος αυξάνεται στα 150 περίπου δευτερόλεπτα.

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι η απόδοση του συστήματος επηρεάζεται άμεσα από την απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου αφού παρατηρώντας και τους αντίστοιχους τύπους εξαρτώνται αντιστρόφως ανάλογα από την ισχύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Σημαντικό βέβαια ρόλο παίζει και η απόδοση της πλακέτας η οποία ενώ βρίσκεται σε ποσοστό ( 63%) επηρεάζει άμεσα και την απόδοση της ηλεκτρόλυσης. Με μεγαλύτερο ποσοστό απόδοσης της πλακέτας σαφώς θα ήταν υψηλότερη και η απόδοση της ηλεκτρόλυσης.

Παρατηρώντας όμως και τον πίνακα 6.2 προκύπτει ότι η ισχύς του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι εξαιρετικά χαμηλή και αυτό οφείλεται άμεσα στην χαμηλή ένταση με φορτίο όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.7 και στον πίνακα 6.1. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να επηρεάζεται και ισχύς της πλακέτας αφού τροφοδοτείται άμεσα από το φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Συμπερασματικά το φωτοβολταϊκό στοιχείο παίζει το πρωταρχικό ρόλο στο συγκεκριμένο πείραμα όσο αφορά το συνολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος. Ίσως αν χρησιμοποιούταν ένα φωτοβολταϊκό χαμηλότερης ισχύος, η απόδοση του συστήματος να ήταν μεγαλύτερη ακόμα και για τις χαμηλές τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας.

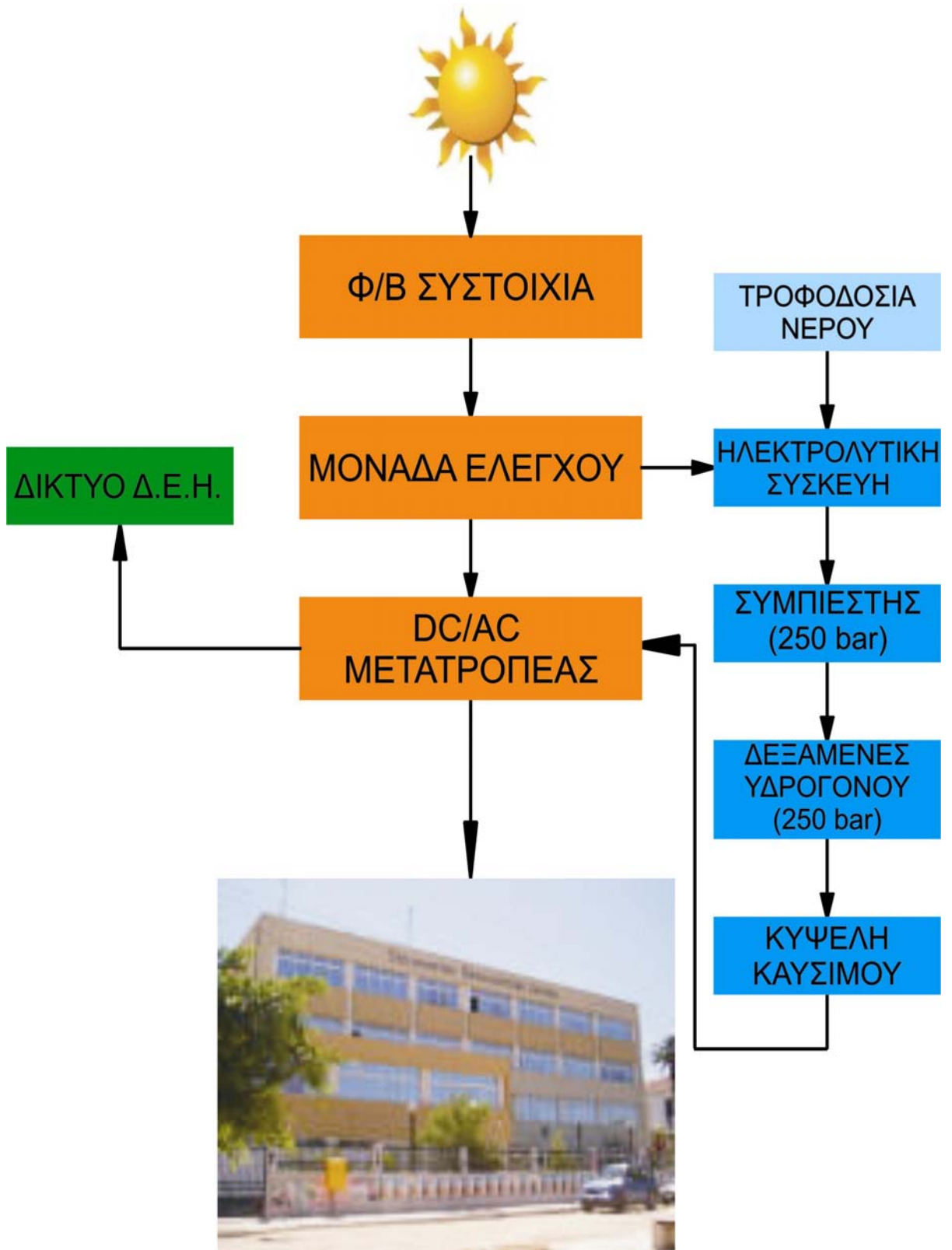
## **7. ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΛΥΨΗΣ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΤΟΥ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ ΧΑΝΙΩΝ ΤΟΥ ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ – ΥΔΡΟΓΟΝΟ – ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

Σ' αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια μελέτη πάνω στον καθορισμό ενός αυτόνομου συστήματος φωτοβολταϊκών στοιχείων και συστήματος υδρογόνου, το οποίο έχει ως απώτερο σκοπό την πλήρη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του ΤΕΙ Χανίων.

Το σύστημα της συγκεκριμένης μελέτης αποτελείται από τρία βασικά μέρη: μια φωτοβολταϊκή συστοιχία, μια ηλεκτρολυτική μονάδα παραγωγής υδρογόνου και τέλος μια κυψέλη καυσίμου. Το σύστημα υδρογόνου – κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιείται ως σύστημα εφεδρείας σε μέρες συννεφιάς ή ακόμα και το βράδυ που τα φωτοβολταϊκά εκ των πραγμάτων δεν μπορούν να παράξουν ηλεκτρική ενέργεια. Με λίγα λόγια το σύστημα της παρούσας μελέτης έχει ως στόχο να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και η ενέργεια που θα περισσεύει θα δίδεται σε μια μονάδα παραγωγής υδρογόνου καθώς και στο δίκτυο της Δ.Ε.Η.

Το παραγόμενο υδρογόνο θα αποθηκεύεται σε δεξαμενές και όταν θα χρειάζεται θα παρέχεται στην κυψέλη καυσίμου η οποία με την σειρά της θα παράγει ηλεκτρικό ρεύμα που θα τροφοδοτεί το κτίριο. Σε περίπτωση που οι δεξαμενές υδρογόνου είναι γεμάτες η παραγόμενη ενέργεια των φωτοβολταϊκών θα πωλείται στην Δ.Ε.Η.

Παρακάτω ακολουθεί ένα σχέδιο που δείχνει επιγραμματικά τη διάταξη του συστήματος για το οποίο εκπονείται η μελέτη.



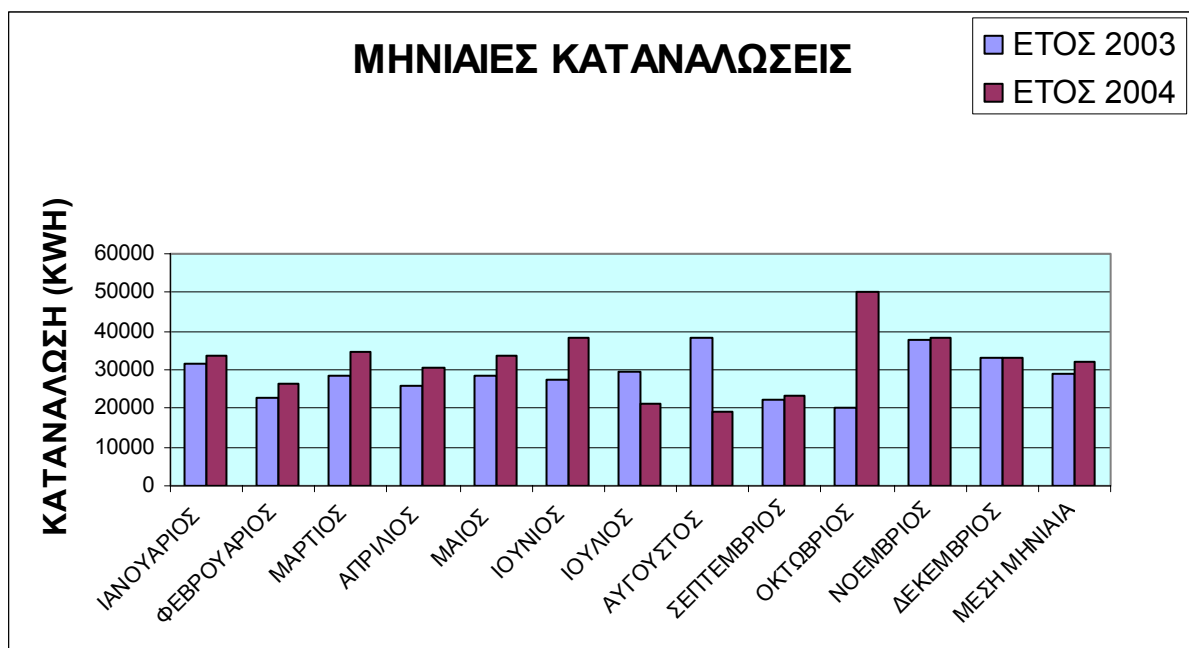
**Σχήμα 7.1** : Σχηματική Διάταξη Του Συστήματος  
 Παρακάτω αναλύονται οι μέθοδοι διαστασιολόγησης των επιμέρους στοιχείων της μελέτης.

## 7.1 Διαστασιολόγηση Της Φωτοβολταϊκής Γεννήτριας

Πρωταρχικό ρόλο για να προσεγγίσουμε την εγκατεστημένη ισχύ των φωτοβολταϊκών στοιχείων που χρειάζονται είναι οι υπάρχουσες ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου καθώς και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Γι' αυτό το λόγο ανατρέξαμε στα αρχεία της Δ.Ε.Η. για να δούμε με ακρίβεια την κατανάλωση του κτιρίου. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μηνιαίες καταναλώσεις του κτιρίου κατά την διάρκεια του έτους 2003 και του 2004.

ΜΗΝΕΣ	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΤΟΥ ΕΤΟΥΣ 2003 (kWh)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΤΟΥ ΕΤΟΥΣ 2004 (kWh)	ΜΕΤΑΒΟΛΗ
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	31800	33600	+5,7%
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	22800	26400	+15,7%
ΜΑΡΤΙΟΣ	28200	34800	+23,4%
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	25800	30600	+18,6%
ΜΑΙΟΣ	28200	33600	+19,2%
ΙΟΥΝΙΟΣ	27600	38400	+39,1%
ΙΟΥΛΙΟΣ	29400	21000	-40%
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	38400	19200	-50%
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	22200	23400	+5,4%
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	20400	50400	+247%
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	37800	38400	+1,6%
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	33000	33000	-
ΣΥΝΟΛΟ	<b>345600</b>	<b>382800</b>	<b>+10,7%</b>
ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ	<b>28800</b>	<b>31900</b>	<b>+10,7%</b>

Πίνακας 7.1 : Ενεργειακές Καταναλώσεις Του ΤΕΙ Χανίων



Σχήμα 7.2 : Συγκριτικό Διάγραμμα Μηνιαίων Καταναλώσεων Των Ετών 2003-2004

Για να υπολογιστεί η ισχύς της φωτοβολταϊκής γεννήτριας λαμβάνουμε υπ' όψιν τις καταναλώσεις του έτους 2004.

Για να υπολογίσουμε την ισχύ της φωτοβολταϊκής γεννήτριας χρησιμοποιούμε τον εξής τύπο:

$$E_{\varphi/\beta} \left( \frac{\text{kWh}}{\text{month}} \right) = \Pi \left( \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 * \text{month}} \right) \times \frac{P_a(\text{kWp})}{1(\text{kW/m}^2)} \times \sigma_{\theta} \times \sigma_{\rho}$$

- όπου  $E_{\varphi/\beta}$  είναι η ενέργεια που θέλουμε να παράγουν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία,
- το  $\Pi$  είναι η μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία ( $\text{kWh} / \text{m}^2$ ) και το επιλέγουμε από τον πίνακα 7.2,
- ισχύ αιχμής  $P_a$  ενός  $\varphi/\beta$  είναι η ισχύς που αντιστοιχεί στην παραγόμενη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ του  $\varphi/\beta$  στοιχείου όταν αυτό δεχτεί ηλιακή ακτινοβολία ισχύος  $1\text{kW/m}^2$ ,
- $\sigma_{\rho}$  είναι ο συντελεστής καθαρότητας και
- $\sigma_{\theta}$  είναι ο συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης.

### 7.1.1 Επιλογή Κλίσης Των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων

Αρχικά έπρεπε να επιλεγεί σύμφωνα με ποιον μήνα θα καθοριστεί η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Παράλληλα επιθυμούμε η εγκατεστημένη ισχύς να καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες του ΤΕΙ αλλά και να είναι η μικρότερη δυνατή για οικονομικούς λόγους. Παρατηρούμε από τον πίνακα 7.1 ότι τη μεγαλύτερη μηνιαία κατανάλωση την έχει ο μήνας Οκτώβριος. Οπότε η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών στοιχείων θα πρέπει να είναι τέτοια που να παράγεται ενέργεια ίση με 50400 kWh.

Στις  $60^\circ$  η εγκατεστημένη ισχύς που προκύπτει σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο είναι :  $P_a = 490 \text{ kW}$ . Αντίθετα στις  $30^\circ$  με παραγωγή 50400 kWh η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών στοιχείων θα έπρεπε να είναι  $P_a = 493 \text{ kW}$ .

Τέλος στις  $45^\circ$  με παραγωγή 50400 kWh η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών στοιχείων προκύπτει  $P_a = 478 \text{ kW}$ .

Το σενάριο που δεν λήφθηκε υπ' όψιν είναι να έχουμε την μεγαλύτερη κατανάλωση τον μήνα Ιανουάριο (η χαμηλότερη ηλιοφάνεια) όπου προκύπτει εγκατεστημένη ισχύς άνω των 600 kW, διότι θεωρείται εξαιρετικά ακραίο.

Άρα επιλέγεται η κλίση των  $45^\circ$  διότι η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι και η μικρότερη.

ΧΑΝΙΑ	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ
$30^\circ$	83	97	128	152	183	191	208	207	172	127	107	83	145	1738
$45^\circ$	90	100	127	143	164	167	183	190	168	131	115	90	139	1667
$60^\circ$	91	99	119	127	138	137	151	164	155	128	117	93	126	1517

**Πίνακας 7.2:** Συνολική Μηνιαία Και Ετήσια Ηλιακή Ακτινοβολία ( $\text{kWh} / \text{m}^2$ ) Των Χανίων σε Διάφορες Κλίσεις

Έτσι σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο θα υπολογίσουμε αναλυτικά το  $P_a$  αφού τα υπόλοιπα είναι γνωστά. Το  $\Pi$  θα το πάρουμε από τον πίνακα 7.2 για κλίση  $45^\circ$  του μήνα Οκτώβρη. Η ενέργεια που επιθυμούμε να παράγουν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι 50400 kWh δηλαδή τη μέγιστη μηνιαία κατανάλωση του έτους 2004 ούτως ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες του κτιρίου όλο το χρόνο. Έτσι έχουμε :

- $E_{φ/β} = 50400 \text{ kWh}$
- $\Pi = 131 \text{ kWh / m}^2 \cdot \text{month}$
- $\sigma_\theta = 1 - (45^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) \cdot 0.005 = 0.875$
- $\sigma_p = 0.92$

οπότε εφαρμόζοντας τα παραπάνω δεδομένα στον τύπο προκύπτει ότι:

$$P_a = 478 \text{ kW}$$

## 7.2 Διαστασιολόγηση Δεξαμενών Αποθήκευσης Υδρογόνου

Για να καθοριστεί το μέγεθος των δεξαμενών αποθήκευσης υδρογόνου θα πρέπει πρώτα να δούμε για πόσες ημέρες θέλουμε να είναι αυτόνομο το σύστημα μας.

Ο πίνακας 7.2 έχει προκύψει από προσεγγιστικούς τύπους και δείχνει την συνολική μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία.

Γι' αυτό το λόγο μελετήθηκαν πίνακες με πραγματικά μετεωρολογικά δεδομένα που έχουν προκύψει με την μέθοδο της παρατήρησης πολλών ετών και αναφέρουν ακριβώς τις ημέρες συννεφιάς. Μοναδικό μειονέκτημα αυτών είναι ότι δεν αναφέρεται ακριβώς η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, κάτι που χρειάζεται ειδικά τις ημέρες όπου σύννεφα καλύπτουν περίπου τον μισό ουρανό.

Παρακάτω ακολουθούν πίνακες με τα πραγματικά μετεωρολογικά δεδομένα από τον σταθμό της Σούδας και της Παλαιόχωρας. Χρησιμοποιούμε τα στοιχεία του σταθμού Σούδας για την μελέτη αυτή και συγκεκριμένα την στήλη στην οποία αναφέρονται οι ημέρες συννεφιάς.

Μάλιστα παρατηρούμε ότι στην Σούδα τον χειμώνα έχουμε περισσότερη συννεφιά σε σχέση με την Παλαιόχωρα παρόλο που οι περιοχές έχουν πολύ μικρή διαφορά στο γεωγραφικό μήκος και πλάτος. Για παράδειγμα τον μήνα Ιανουάριο στη Σούδα έχουμε εννιά ημέρες πλήρους συννεφιάς, ενώ αντίθετα στην Παλαιόχωρα έχουμε περίπου τέσσερις.

HELLENIC NATIONAL METEOROLOGICAL SERVICE  
DIRECTION OF CLIMATOLOGY  
SECTION OF STATISTICAL CLIMATOLOGY

CLIMATOLOGICAL DATA BASE

DATCLIM

STATION ΣΟΥΔΑ 746

LATITUDE 35° 33' N LONGITUDE 24° 07' E ALTITUDE OF BAROMETER 151.6 METERS

PERIOD 1958-1997

MONTH	PRESS(M.S.L.)	TEMPERATURE					REL HUM.	AV.CLOUD.	PRECIPITATION(IN MM)		PREV.WIND
		MEAN	AV.MAX	AV.MIN	ABS MAX	ABS MIN			TOTAL	MAX 24H	
JANUARY	1017.7	10.9	14.4	7.7	26.0	.0	73.1	5.3	137.2	185.4	W
FEBRUARY	1016.7	11.0	14.7	7.6	30.0	.0	71.0	5.2	107.7	146.0	W
MARCH	1015.5	12.5	16.4	8.6	32.4	.4	70.0	4.6	83.1	90.2	W
APRIL	1013.7	15.7	19.9	11.1	35.6	3.0	64.4	3.8	32.5	71.7	W
MAY	1014.0	20.0	24.5	14.7	39.0	6.8	58.5	2.9	13.4	53.3	NW
JUNE	1013.2	24.5	28.8	18.6	40.5	11.1	50.8	1.4	4.3	19.5	NW
JULY	1012.0	26.4	30.4	20.7	44.5	13.0	50.2	.6	1.1	25.0	NW
AUGUST	1012.4	25.9	30.1	20.7	41.4	14.5	54.0	.7	1.1	19.1	NW
SEPTEMBER	1015.4	23.0	27.3	18.4	38.4	11.2	61.1	1.7	16.1	94.2	NW
OCTOBER	1017.4	19.2	23.3	15.3	37.8	8.2	68.6	3.6	72.6	120.3	N
NOVEMBER	1018.1	15.6	19.5	12.1	32.8	2.2	72.1	4.5	73.1	82.2	W
DECEMBER	1017.2	12.6	16.2	9.4	28.6	.4	73.0	5.0	100.3	86.5	W

MONTH	NUMBER OF DAYS WITH											TEMPERATURE			WIND			
	CLOUDINES				PREC.	RAIN	SNOW	THUND	HAIL	ST	'GND	FOG	DEW	H.FROST	LE		GE 6B	GE 8B
	0-1.5	1.6-6.4	6.5-8.0	8.0											0.0	0.0		
JANUARY	1.7	20.0	9.3	16.8	16.5	.4	3.6	.5	.0	.2	1.2	.1	.1	.0	3.7	.3		
FEBRUARY	2.1	17.8	8.4	14.7	14.5	.5	2.8	.5	.0	.2	.6	.0	.1	.0	3.4	.5		
MARCH	4.2	20.0	6.8	12.2	12.0	.3	2.7	.1	.0	1.1	.9	.0	.0	.0	3.5	.3		
APRIL	6.8	19.8	3.4	7.9	7.7	.0	1.3	.1	.1	1.5	.7	.0	.0	.0	2.2	.1		
MAY	11.4	18.1	1.6	4.2	4.0	.0	1.0	.0	.0	1.3	.1	.0	.0	.0	2.4	.1		
JUNE	21.7	8.0	.3	1.4	1.3	.0	.4	.0	.0	.6	.2	.0	.0	.0	1.6	.1		
JULY	27.5	3.5	.0	.4	.3	.0	.1	.0	.0	.2	.5	.0	.0	.0	1.2	.0		
AUGUST	27.5	3.5	.0	.6	.5	.0	.2	.0	.0	.0	.4	.0	.0	.0	1.2	.0		
SEPTEMBER	19.0	10.6	.5	2.7	2.7	.0	.9	.0	.0	.3	.7	.0	.0	.0	1.3	.1		
OCTOBER	8.1	19.3	3.7	9.6	9.6	.0	3.5	.0	.0	.4	1.5	.0	.0	.0	1.8	.1		
NOVEMBER	3.7	21.0	5.3	10.9	10.8	.0	3.1	.1	.0	.5	2.0	.0	.0	.0	3.1	.4		
DECEMBER	2.1	21.6	7.3	16.1	15.7	.1	3.5	.2	.0	.2	1.3	.0	.0	.0	3.1	.4		

Πίνακας 7.3 : Μετεωρολογικά Δεδομένα Του Σταθμού Σούδας Για Την Περίοδο 1958 – 1997 (40 έτη παρατηρήσεων)



HELLENIC NATIONAL METEOROLOGICAL SERVICE  
DIRECTION OF CLIMATOLOGY  
SECTION OF STATISTICAL CLIMATOLOGY

CLIMATOLOGICAL DATA BASE

D A T C L I M

STATION ΠΑΛΑΙΟΧΩΡΑ 751

LATITUDE 35° 14' N LONGITUDE 23° 41' E ALTITUDE OF BAROMETER 10.0 METERS

PERIOD 1974-1997

MONTH	PRESS(M.S.L.)	T E M P E R A T U R E					REL HUM.	AV.CLOUD.	PRECIPITATION(IN MM)		PREV.WIND
		MEAN	AV.MAX	AV.MIN	ABS MAX	ABS MIN			TOTAL	MAX 24H	
JANUARY		12.7	15.2	10.0	19.6	2.0	71.8	3.7	82.0	96.0	N
FEBRUARY		12.5	15.1	9.5	21.0	.5	71.2	3.7	44.3	47.0	N
MARCH		14.0	16.8	10.5	25.0	.0	70.3	3.2	35.8	58.0	N
APRIL		16.6	19.8	12.6	29.2	5.0	67.9	2.6	14.2	61.0	N
MAY		20.7	24.0	16.2	36.0	9.0	63.9	1.7	1.8	8.5	N
JUNE		25.2	28.9	20.2	41.6	12.0	59.1	.5	2.5	50.0	N
JULY		28.0	31.6	23.5	44.4	14.0	53.5	.2	.0	.0	N
AUGUST		27.8	31.4	23.5	40.6	9.0	55.4	.2	.0	.0	N
SEPTEMBER		25.1	28.6	20.9	37.8	9.0	59.4	.7	4.0	45.0	N
OCTOBER		21.4	24.6	17.7	38.0	10.4	65.8	2.0	14.0	46.0	N
NOVEMBER		17.3	20.1	14.2	30.0	4.0	70.1	3.2	50.4	70.0	N
DECEMBER		14.2	16.7	11.5	21.6	3.0	72.5	3.7	49.0	88.0	N

MONTH	N U M B E R O F D A Y S W I T H													T E M P E R A T U R E		W I N D	
	C L O U D I N E S				PREC.	RAIN	SNOW	THUND	HAIL	ST GND	FOG	DEW	H.FROST	M I N		M A X	
	0-1.5	1.6-6.4	6.5-8.0	(0 - 8/8)										LE 0.0	LE 0.0	GE 6B	GE 8B
JANUARY	6.3	21.1	3.5	7.5	7.5	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	1.9	.4
FEBRUARY	4.7	20.2	3.4	6.7	6.6	.1	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	1.8	.3
MARCH	8.4	20.2	2.5	5.3	5.1	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.5	.1
APRIL	11.4	16.9	1.8	2.7	2.7	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.4	.1
MAY	18.1	12.4	.5	.6	.6	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.2	.0
JUNE	26.0	4.0	.0	.3	.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	1.2	.1
JULY	29.8	1.2	.0	.1	.1	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.8	.0
AUGUST	29.5	1.5	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.7	.0
SEPTEMBER	24.9	4.9	.2	.5	.5	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.8	.2
OCTOBER	16.7	13.2	1.2	2.3	2.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	1.0	.2
NOVEMBER	9.2	17.2	3.6	5.5	5.5	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	1.3	.2
DECEMBER	6.0	21.5	3.5	7.7	7.7	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	1.3	.2

Πίνακας 7.4 : Μετεωρολογικά Δεδομένα Του Σταθμού Παλαιόχωρας Για Την Περίοδο 1974 – 1997 (23 έτη παρατηρήσεων)

Οι ημέρες συννεφιάς είναι αρκετές όπως φαίνεται στον πίνακα 7.3 κατά τους μήνες Οκτώβριο, Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο. Με βάση αυτά τα στοιχεία υπολογίζεται η ζήτηση για υδρογόνο κατά την διάρκεια αυτών των μηνών και το άθροισμα αυτών θα αποτελέσει την συνολική χωρητικότητα των δεξαμενών.

Παρακάτω φαίνεται ο τρόπος που υπολογίζουμε την ζήτηση για υδρογόνο τον μήνα Οκτώβριο. Από τον πίνακα 7.3 παρατηρούμε ότι έχουμε οκτώ ημέρες ηλιοφάνειας. Άρα η προσπίπτουσα ακτινοβολία για αυτές τις ημέρες θα είναι :

$$[(150 \text{ kWh} / \text{m}^2) / 30 \text{ ημέρες}] * 8 \text{ ημέρες} = 40 \text{ kWh} / \text{m}^2 \text{ για } 8 \text{ ημέρες}$$

Η ενέργεια που μας δίνουν για αυτές τις 8 ημέρες τα φ/β είναι :

1.  $E_{\text{φ/β}} = 40 \text{ (kWh} / \text{m}^2 \text{ για } 8 \text{ ημέρες)} * 478 \text{ kW} / 1 \text{ (kW/m}^2) * 0.875 * 0.92 = 15392 \text{ kWh}$
2. Όπου  $\Pi = 40 \text{ kWh} / \text{m}^2$
3.  $P_a = 478 \text{ kW}$  η εγκατεστημένη ισχύς
4.  $\sigma_{\theta} = 1 - (45^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}) * 0.005 = 0.875$
5.  $\sigma_p = 0.92$

Η κατανάλωση του κτιρίου για αυτές τις οκτώ ημέρες είναι :  $50400/30 * 8 = 13440 \text{ kWh}$   
 Άρα έχουμε περίσσεια  $E = 15392 - 13440 = 1952 \text{ kWh}$

Για 19 ημέρες σύμφωνα με τον πίνακα 7.3 έχουμε την μισή ηλιοφάνεια οπότε η παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι :

- $\Pi = [(150 \text{ kWh} / \text{m}^2) / 30 \text{ ημέρες}] * 19 \text{ ημέρες} * 0,5 = 47.5 \text{ kWh} / \text{m}^2 \text{ για } 19 \text{ ημέρες}$
- $E_{\text{φ/β}} = 47.5 \text{ (kWh} / \text{m}^2 \text{ για } 19 \text{ ημέρες)} * 478 \text{ kW} / 1 \text{ (kW/m}^2) * 0.875 * 0.92 = 18278 \text{ kWh}$

Η κατανάλωση του κτιρίου για αυτές τις 19 ημέρες είναι :  $(50400 \text{ kWh} / 30) * 19 = 31920 \text{ kWh}$

Άρα έχουμε περίσσεια  $E = 18278 - 31920 = - 13642 \text{ kWh}$

Συνολική περίσσεια ενέργειας  $E = 1952 - 13642 = -11690 \text{ kWh}$

Επίσης από τον πίνακα 7.3 παρατηρούμε ότι υπάρχουν τέσσερις ημέρες πλήρους συννεφιάς κατά τις οποίες τα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν θα μπορούν να αποδώσουν ηλεκτρική ενέργεια και η οποία θα πρέπει να καλυφθεί από την κυψέλη υδρογόνου. Η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την διάρκεια αυτών των ημερών είναι :

$$E = (50400 \text{ kWh} / 30 \text{ ημέρες}) * 4 \text{ ημέρες} = 6720 \text{ kWh}$$

Άρα κατά τον μήνα Οκτώβριο θα πρέπει να καλυφθούν μέσω υδρογόνου  $18410 \text{ kWh}$ .

Σύμφωνα με την κατανάλωση της κυψέλης καυσίμου, της οποίας τα χαρακτηριστικά φαίνονται παρακάτω,  $18 \text{ Nm}^3$  υδρογόνου δίδουν  $50 \text{ kWh}$ , οπότε απαιτούνται για τον μήνα Οκτώβριο  $6.628 \text{ Nm}^3$  υδρογόνου.

Ομοίως υπολογίζεται η ανάγκη για υδρογόνο και για τους υπόλοιπους μήνες και προκύπτει ο παρακάτω πίνακας.

ΜΗΝΑΣ	kWh	ΥΔΡΟΓΟΝΟ (Nm <sup>3</sup> )
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	18410	6628
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	10503	3781
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	9089	3272
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	11633	4188
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	5061	1822
ΜΑΡΤΙΟΣ	9025	3249
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>63721</b>	<b>22940</b>

**Πίνακας 7.5 : Ανάγκη Για Υδρογόνο**

Άρα πρέπει οι δεξαμενές αποθήκευσης να έχουν χωρητικότητα **22.940 Nm<sup>3</sup>** ή αλλιώς **92m<sup>3</sup>** υδρογόνου υπό πίεση 250 bar που παρέχει αυτονομία για 51 ημέρες. Για να συμπιεστούν αυτά τα κυβικά υδρογόνου ένας συμπιεστής ισχύος 2 kW θεωρείται επαρκής.

Η ηλιακή ακτινοβολία σύμφωνα με τον πίνακα 7.2 είναι αθροιστική δηλαδή περιλαμβάνει ηλιόλουστες ημέρες καθώς και ημέρες συννεφιάς. Επειδή όμως θέλουμε να βρούμε την ακτινοβολία για μια ηλιόλουστη ημέρα ανατρέχουμε σε μήνα που έχει καθαρή ηλιοφάνεια και τις 30 ημέρες όπως είναι ο μήνας Ιούλιος.

Οπότε ανατρέχουμε στον πίνακα 7.2 για τον μήνα Ιούλιο και επιλέγουμε αυτόν τον μήνα ώστε να έχει την ίδια απόκλιση από την κλίση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μας, δηλαδή  $\Delta\theta = 45^\circ$  - ύψος του ήλιου. Τον χειμώνα ο ήλιος βρίσκεται στις  $75,55^\circ$  άρα  $\Delta\theta = 45^\circ - 75,55^\circ = 30,55^\circ$ . Το καλοκαίρι η βέλτιστη κλίση των φ/β είναι  $14,45^\circ$  άρα  $\Delta\theta = 30,55^\circ$ . οπότε επιλέγουμε ηλιακή ακτινοβολία 208 kWh / m<sup>2</sup> στις  $30^\circ$  και συγκεκριμένα πήραμε 150 kWh / m<sup>2</sup> διότι το χειμώνα η διάρκεια της ημέρας είναι μικρότερη κατά 20%.

Στους παραπάνω υπολογισμούς θεωρήσαμε επίσης ότι κατά την διάρκεια των ημερών που ο μισός ουρανός καλύπτεται από σύννεφα, λαμβάνουμε την μισή ηλιακή ακτινοβολία διότι ο πίνακας 7.3 δεν μας δίνει την ακριβή θέση των νεφών. Έτσι δεν μπορούμε να γνωρίζουμε με ακρίβεια εάν τα σύννεφα βρίσκονται επάνω από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία.

### 7.3 Διαστασιολόγηση Της Συσκευής Ηλεκτρόλυσης

Θεωρώντας ότι μια συσκευή ηλεκτρόλυσης απαιτεί 4,1 kWh για να παράξει 1 Nm<sup>3</sup> υδρογόνου, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για να παραχθούν τα 22.940 Nm<sup>3</sup> υδρογόνου απαιτούνται περίπου 94.000 kWh.

Για να διαπιστωθεί πότε μπορούν να παραχθούν αυτές οι kWh και να τροφοδοτηθεί το electrolyser δημιουργήθηκε ο παρακάτω πίνακας με την βοήθεια του πίνακα 7.2, ο οποίος δείχνει την μηνιαία παραγόμενη ενέργεια από τα φ/β στοιχεία και τις αντίστοιχες καταναλώσεις του κτιρίου καθώς και την περίσσεια ενέργειας ανά μήνα. Σύμφωνα με τον πίνακα 7.6 το electrolyser θα μπορεί να απορροφά ενέργεια κατά τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο. Συγκεκριμένα κατά την διάρκεια αυτών των μηνών περισσεύουν 95155 kWh

Η συσκευή ηλεκτρόλυσης θα πρέπει να λειτουργεί τις ώρες που λειτουργούν και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αφού από αυτά θα τροφοδοτείται με ενέργεια. Οι ώρες ηλιοφάνειας αυτούς τους μήνες είναι : 60 ημέρες x 7 ώρες = 420 ώρες. Οπότε 95.155 kWh / 420 hours = 227 kW.

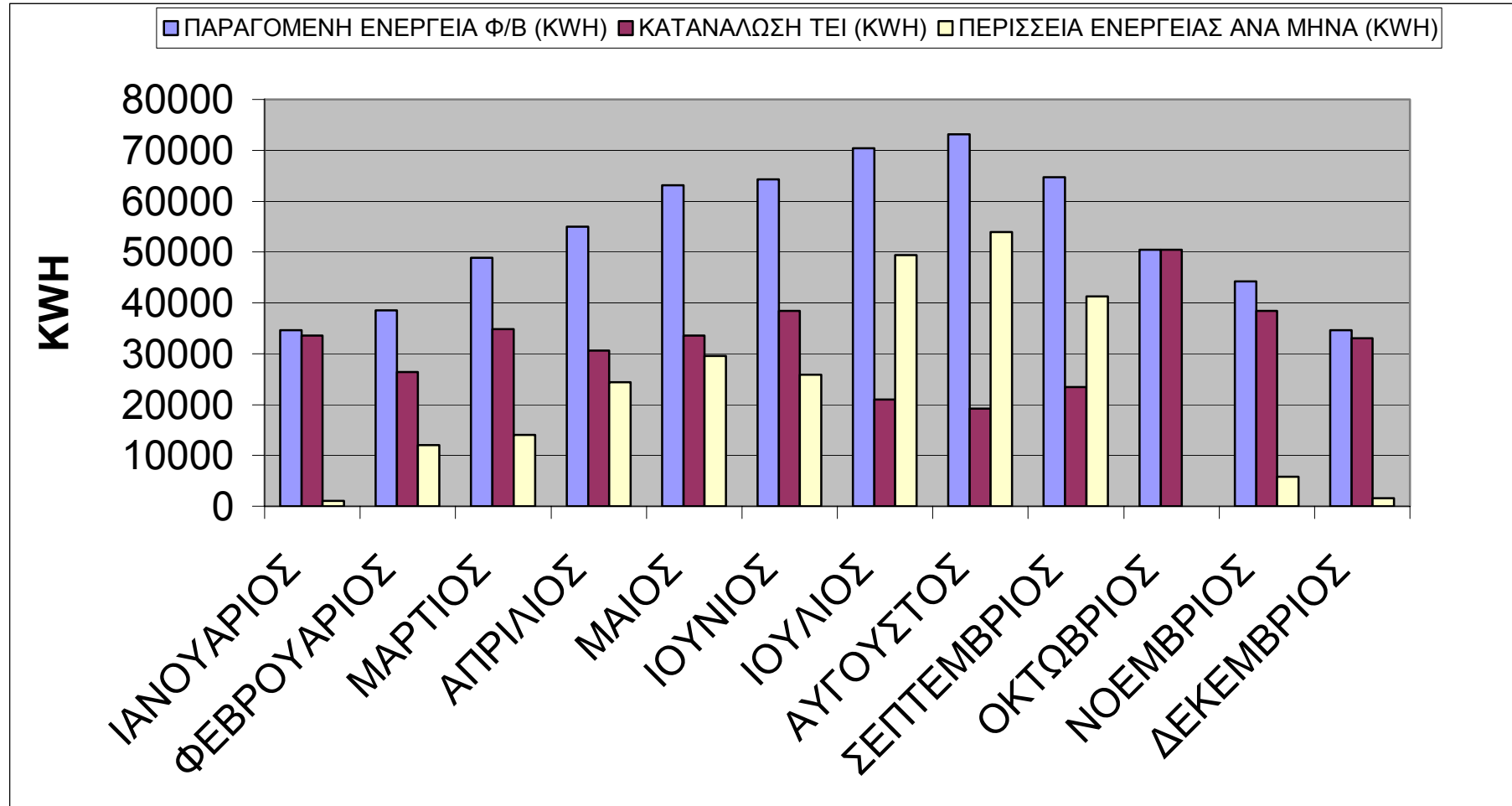
Άρα η συσκευή ηλεκτρόλυσης θα πρέπει να έχει ισχύ **227 KW** δηλαδή θα παράγει περίπου **55 Nm<sup>3</sup> την ώρα**.

ΜΗΝΕΣ	ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ Φ/Β (kWh)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΤΕΙ (kWh)	ΠΕΡΙΣΣΕΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑ ΜΗΝΑ (kWh)	ΠΕΡΙΣΣΕΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑ ΗΜΕΡΑ (kWh)
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	34631	33600	1031	34,37
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	38479	26400	12079	402,633
ΜΑΡΤΙΟΣ	48868	34800	14068	469
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	55025	30600	24425	814
ΜΑΙΟΣ	63106	33600	29506	984
ΙΟΥΝΙΟΣ	64256	38400	25856	862
ΙΟΥΛΙΟΣ	70417	21000	49417	1647,2
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	73110	19200	53910	1797
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	64645	23400	41245	1375
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	50408	50400	8	0,26
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	44251	38400	5851	195
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	34631	33000	1631	54,37

**Πίνακας 7.6 :** Μηνιαία Παραγόμενη Ενέργεια, Κατανάλωση, Περίσσεια Ενέργειας

## 7.4 Διαστασιολόγηση Της Κυψέλης Καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου θα πρέπει να είναι τέτοιας ισχύος ώστε να καλύπτει όλες τις ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου. Το κτίριο λειτουργεί συνήθως 16 ώρες ημερησίως, οπότε σύμφωνα με την μηνιαία κατανάλωση του Οκτωβρίου ( 50400 kWh) υπολογίζεται ότι η μέση ωριαία κατανάλωση είναι 105 kW. Όμως σύμφωνα με τους αναλυτικούς πίνακες της Δ.Ε.Η. η στιγμιαία ισχύ αιχμής κυμαίνεται γύρω στα 140 kW. Οπότε μια κυψέλη καυσίμου των **150 kW** θεωρείται επαρκής για τις ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου. Δεδομένου ότι βρέθηκε στην αγορά κυψέλη καυσίμου των 50 KW, χρειάζονται τρεις κυψέλες αυτού του είδους.



Σχήμα 7.3 : Συγκριτικό Διάγραμμα Παραγόμενης Και Καταναλισκόμενης Ενέργειας

## 7.5 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Των Στοιχείων Της Μελέτης

### 7.5.1 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν επιλεγθεί από την εταιρεία AET SOLION Ε.Π.Ε. και συγκεκριμένα είναι της κατασκευάστριας εταιρείας SHARP ισχύος 175 Watt το καθένα.



**Σχήμα 7.4 : Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Sharp**

Επιλέχθηκαν τα συγκεκριμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία διότι επιλέγοντας στοιχεία χαμηλότερης ισχύος θα χρειαζόμασταν περισσότερα τεμάχια οπότε θα αυξανόταν και το κόστος εγκατάστασης καθώς και ότι υπάρχει έκπτωση στα συγκεκριμένα στοιχεία (25%). Παράλληλα θα αυξανόταν και ο χώρος που θα απαιτούταν για την εγκατάστασή τους.

Τα τεμάχια που απαιτούνται είναι :  
 $478000 \text{ Watt} / 175 \text{ Watt} = \mathbf{2732 \text{ φωτοβολταϊκά στοιχεία}}$   
 όπου 478000 Watt είναι η εγκατεστημένη ισχύς.

Κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο καταλαμβάνει  $1,3 \text{ m}^2$  άρα συνολικά απαιτείται έκταση ίση με :  $2732 \times 1,3 \text{ m}^2 = 3552 \text{ m}^2$ .

Στην πραγματικότητα η έκταση του φωτοβολταϊκού πάρκου θα είναι μεγαλύτερη (+20%) δηλαδή  $4263 \text{ m}^2$  διότι τα στοιχεία πρέπει να τοποθετούνται σε κάποια απόσταση μεταξύ τους για τη μέγιστη απολαβή της ηλιακής ενέργειας.

**SPECIFICATIONS**

Cell	Single-crystalline silicon solar cells, 125mm square
No. of cells and connections	72 in series
Application	DC 24V system
Maximum system voltage	DC 1000V
Series fuse rating	10A
Maximum power	166.3 W (Min.)
Dimensions	1575 × 826 × 46mm
Weight	17.0kg

**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS**

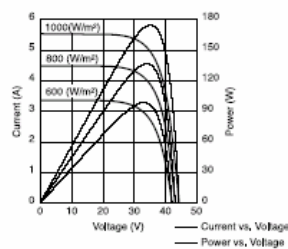
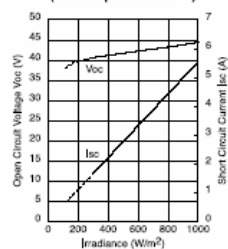
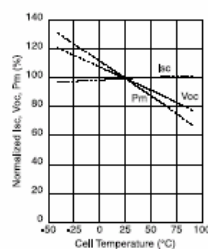
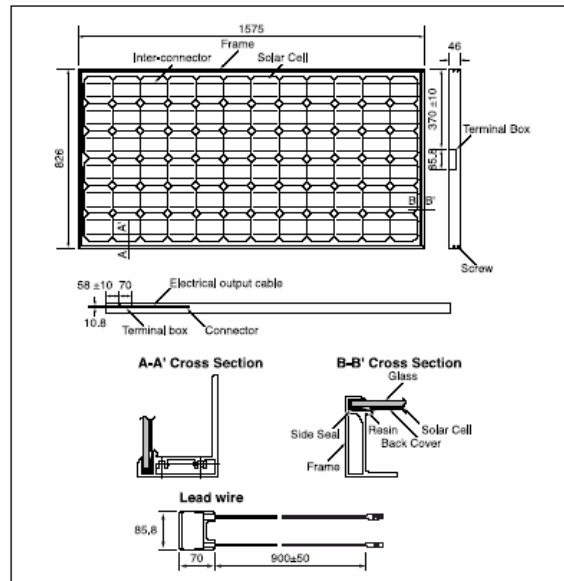
Parameters	Rating	Unit
Operating temperature	-40 to +90	°C
Storage temperature	-40 to +90	°C
Dielectric voltage withstood	2200 max.	V-DC

**OUTPUT TERMINAL**

Type of output terminal	Lead wire with connector
-------------------------	--------------------------

**ELECTRO-OPTICAL CHARACTERISTICS**

Model	NT-R5E3E				
Parameters	Symbol	Min.	Typ.	Unit	Condition
Open circuit voltage	Voc	—	44.4	V	Irradiance: 1000 W/m <sup>2</sup>
Maximum power voltage	Vpm	—	35.4	V	
Short circuit current	Isc	—	5.55	A	
Maximum power current	Ipm	—	4.95	A	Module temperature: 25°C
Maximum power	Pm	166.3	175.0	W	
Encapsulated solar cell efficiency	$\eta_c$	—	16.4	%	
Module efficiency	$\eta_m$	—	13.5	%	

**CHARACTERISTICS**Current, Power vs. Voltage Characteristics  
(Cell temperature: 25°C)Open Circuit Voltage, Short Circuit Current  
vs. Irradiance Characteristics  
(Cell temperature: 25°C)Normalized Isc, Voc, Pm vs. Cell  
Temperature Characteristics**OUTLINE DIMENSIONS**

In the absence of confirmation by specification sheets, SHARP takes no responsibility for any defects that may occur in equipment using any SHARP products shown in catalogs, data books, etc. Contact SHARP in order to obtain the latest specification sheets before using any SHARP products.

**Σχήμα 7.5 :** Τεχνικά Χαρακτηριστικά Των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων Sharp

### 7.5.2. Μετατροπείς Συνεχούς – Εναλλασσόμενου Ρεύματος

Ο μετατροπείς έχει επιλεγθεί από την εταιρεία ΑΕΤ SOLION Ε.Π.Ε. και συγκεκριμένα είναι της κατασκευάστριας εταιρείας CONERGY ισχύος 280 kW ο καθένας. Στην συγκεκριμένη μελέτη χρειάζονται δύο τέτοιοι μετατροπείς αφού έχουμε εγκατεστημένη ισχύ 478 KW.



**Σχήμα 7.6 :** Μετατροπείς Conergy DC/ AC



### Technical Data Conergy IPG 280 K:

Recommended solar generator connected load (25 °C)	280 kWp
Output power	250 kW
Maximum efficiency factor	95.6 %
European efficiency factor	94.6 %
Input voltage range	$V_{pmin} = 493 V_{DC}$ to $V_{ocmax} = 965 V_{DC}$
MPP range at DC rated output	$493 V_{DC}$ to $780 V_{DC}$
Input current	$568 A_{DC}$
Output voltage range	196 to $253 V_{AC}$ (standard setup) adjustable for other country standards
Mains frequency range	49.8 to 50.2 Hz (standard setup) adjustable for other country standards
Standby performance	55 W
Nighttime performance	55 W
Output current distortion	< 2 %
AC outputs	5 connectors (L1, L2, L3, N and PE)
DC inputs	4
Automatic turn-on	When sufficient solar generator power is available
Overload behaviour	Performance limiting
DC voltage ripple	2 %
Operational mode	Maximum Power Point Tracking (1 % accuracy)
Ground fault monitoring	Yes
Reverse polarity protection	Short circuit diodes on the PV side
Overvoltage protection	High performance varistors
Performance factor Cos Phi	1
Solar generator / mains decoupling	High insulation transformer
Max. performance of auxiliary supply	700 W
Recommended series fuse for auxiliary supply	10 A
Ambient temperature range	0 to 40 °C
Relative humidity	95 % non-condensing
Housing colour	Conergy Brand Blue
Protection type	IP 20
Fan flow	3,230 m <sup>3</sup> /h
Weight	2,140 kg
Dimensions H x W x D	2,000 x 2,010 x 880 mm
Dimensions COMPACT H x W x D	1,800 x 2,010 x 800 mm
Connector dimensions:	
L1, L2, L3, N, SG+, SG-	Connection bolts M12
PE	Connection bolts M12
Auxiliary supply	Terminals 1.5-2.5 mm <sup>2</sup>

**Σχήμα 7.7:** Τεχνικά Χαρακτηριστικά Μετατροπέα Conergy

### 7.5.3 Κυψέλη Καυσίμου

<b>ΤΥΠΟΣ</b>	<b>PEM</b>
<b>ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ</b>	<b>50 kW</b>
<b>ΤΑΣΗ</b>	<b>60 V<sub>DC</sub></b> (παράλληλα), <b>180 V<sub>DC</sub></b> (σειρά-παράλληλα), <b>360 V<sub>DC</sub></b> (σειρά)
<b>ΡΕΥΜΑ</b>	<b>104 A (peak)</b>
<b>ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ</b>	<b>300 lit υδρογόνου/ λεπτό στο 1 bar</b>

**Πίνακας 7.7:** Τεχνικά Χαρακτηριστικά Κυψέλης Καυσίμου

Η συγκεκριμένη κυψέλη καυσίμου έχει βρεθεί στην ιστοσελίδα [www.fuelcellstore.com](http://www.fuelcellstore.com) και στην μελέτη αυτή χρειάζονται τρεις κυψέλες καυσίμου των 50 kW.

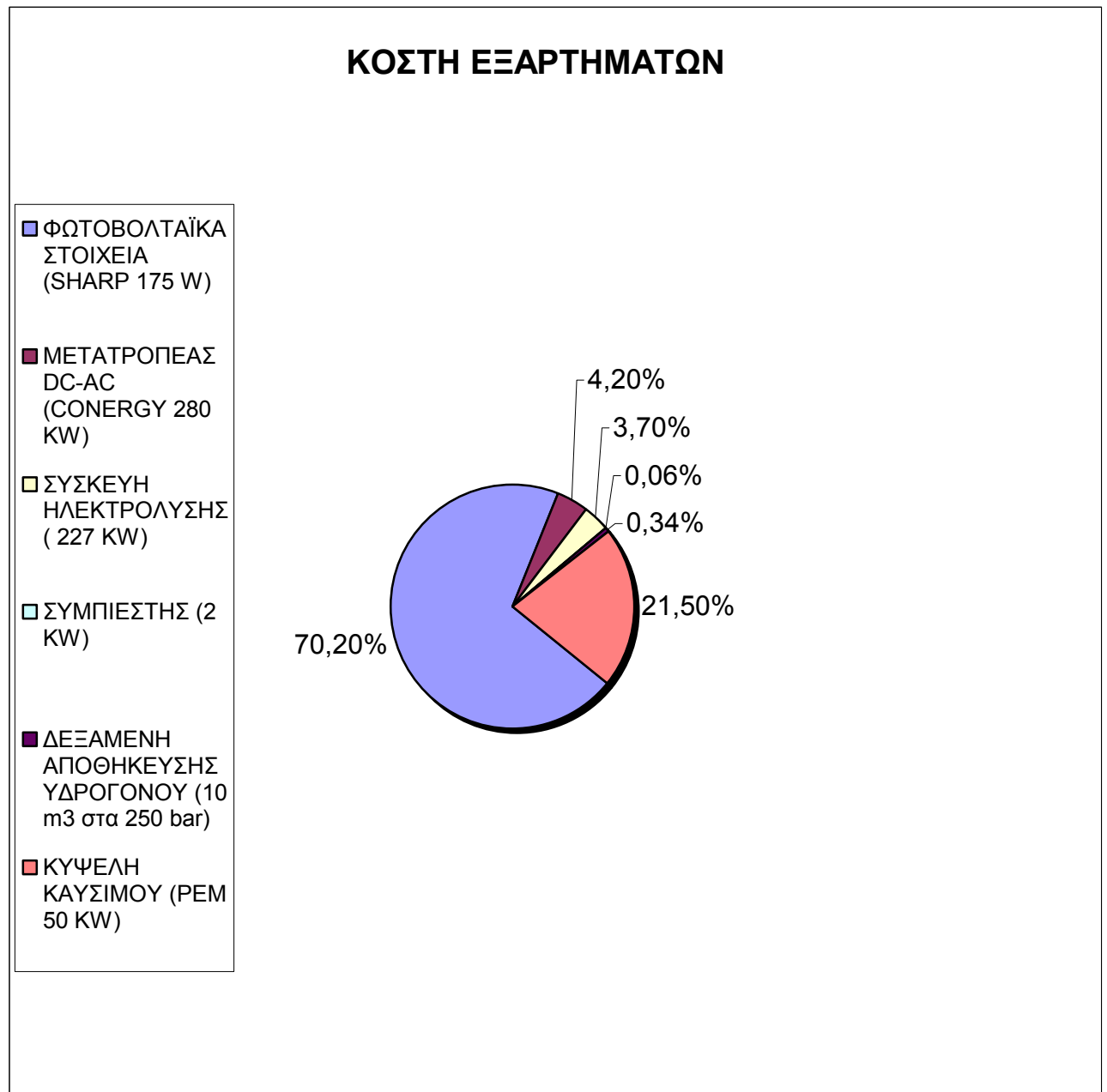
Δυστυχώς τεχνικά χαρακτηριστικά και τιμές για την συσκευή ηλεκτρόλυσης και τις δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου δεν δόθηκαν από καμία εταιρεία και γι' αυτό το λόγο οι τιμές τους βγήκαν κατά προσέγγιση.

### 7.6 Οικονομική Ανάλυση

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα κόστη όλων των μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται στην μελέτη αυτή. Στο κόστος συμπεριλαμβάνονται οι εκπτώσεις καθώς επίσης και ο Φ.Π.Α. 19%. Οι τιμές της συσκευής ηλεκτρόλυσης (601€/kW), της δεξαμενής υδρογόνου (136 €/ m<sup>3</sup> υπό πίεση 250 bar) καθώς και του συμπιεστή (1100 €/kW) είναι προσεγγιστικές καθώς καμία εταιρεία δεν έδωσε πληροφορίες. Επίσης δεν έχει ληφθεί υπ' όψιν το κόστος για αγορά έκτασης όπου θα τοποθετούνταν τα φ/β στοιχεία.

<b>ΕΙΔΟΣ</b>	<b>ΤΙΜΗ ΑΝΑ ΤΕΜΑΧΙΟ (€)</b>	<b>ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΕΜΑΧΙΩΝ</b>	<b>ΤΙΜΗ (€)</b>	
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (SHARP 175 W)	952	2732	2.600.864	70,2 %
ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ DC-AC (CONERGY 280 KW)	78064	2	156.128	4,2 %
ΣΥΣΚΕΥΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ (227 KW)	136.500	1	136.500	3,7 %
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ (2 KW)	2200	1	2.200	0,06 %
ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ (10 m <sup>3</sup> στα 250 bar)	1389	9	12.500	0,34 %
ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (PEM 50 KW)	265.000	3	795.000	21,5 %
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>			<b>3.703.192</b>	<b>100 %</b>

**Πίνακας 7.8 :** Κόστος Για Τα Στοιχεία Του Συστήματος



**Σχήμα 7.8 :** Κόστη Των Εξαρτημάτων Του Συστήματος (%)

Από το παραπάνω διάγραμμα γίνεται φανερό ότι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και η κυψέλη καυσίμου αποτελούν την κύρια δαπάνη (91,7%) του συστήματος.

## 7.7 Υπολογισμός Της Καθαρής Παρούσας Αξίας – Απόσβεσης

Η καθαρή παρούσα αξία ( Κ.Π.Α.) υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο :

$$\text{Κ.Π.Α.} = \alpha * \text{A.K} * (1+i)^n + \beta * \text{A.K} * (1+j)^n + \gamma * \text{A.K} \quad \text{όπου}$$

- A.K = αρχικό κόστος
- $\alpha$  = δικοί μας πόροι
- $\beta$  = δανεισμός
- $\gamma$  = επιχορήγηση
- $i$  = πληθωρισμός
- $j$  = τραπεζικό επιτόκιο
- $n$  = πλήθος χρόνων

Θεωρούμε ότι λαμβάνουμε επιχορήγηση από την Ευρωπαϊκή Ένωση ίση με 50% του αρχικού κεφαλαίου μας καθώς επίσης ότι δανειζόμαστε το 25% του αρχικού κεφαλαίου μας από τράπεζα. Το ίδρυμα καταβάλλει το 25% του αρχικού κεφαλαίου μας. Ο πληθωρισμός λαμβάνεται ίσος με 3,5% και το τραπεζικό επιτόκιο ίσο με 6%.

Το κόστος λειτουργίας δεν λήφθηκε υπ' όψιν δεδομένου ότι το ΤΕΙ Χανίων διαθέτει τεχνική υπηρεσία και θεωρήθηκε ότι αυτή θα συντηρεί όλα τα εξαρτήματα του συστήματος.

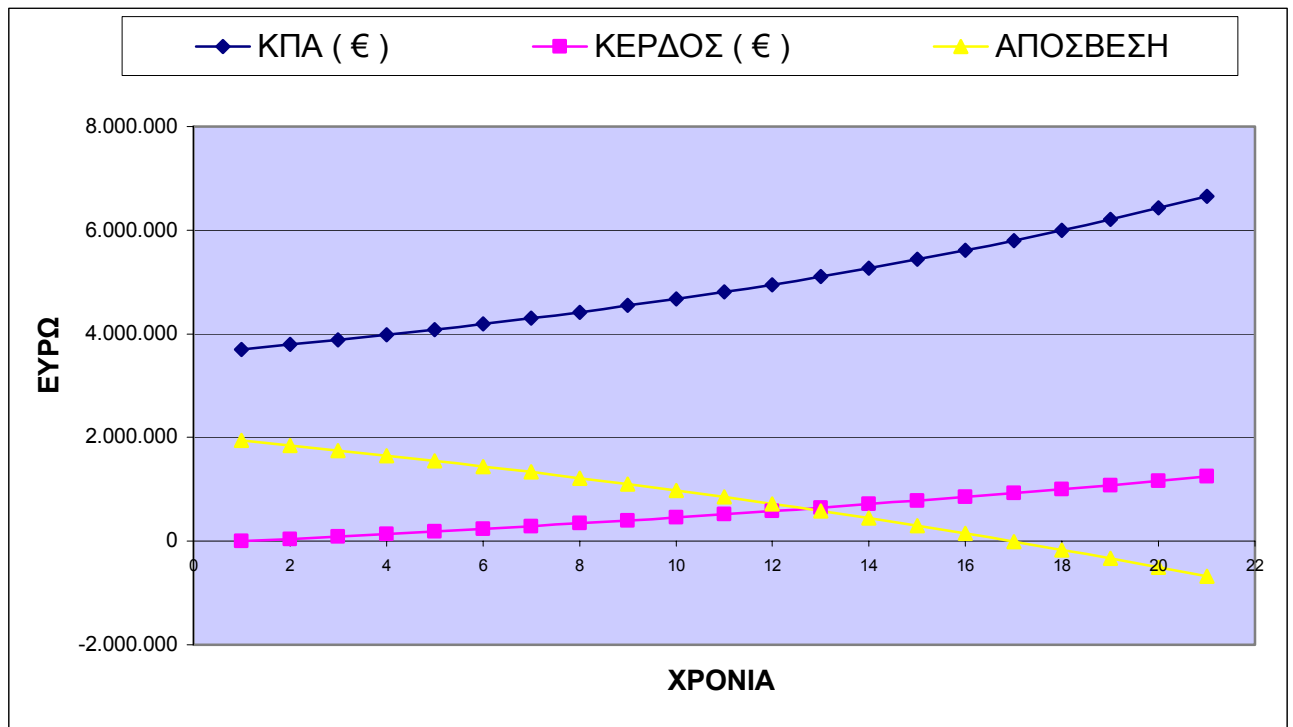
Σαφώς πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν και τα κέρδη που θα έχουμε από την εφαρμογή αυτής της μελέτης. Έμμεσο κέρδος είναι τα χρήματα που θα δίνουμε στην Δ.Ε.Η. που είναι 34.283 € για το έτος 2004. Άμεσο κέρδος είναι τα χρήματα που μας δίνει η Δ.Ε.Η. από την πώληση προς αυτήν της περίσσειας ενέργειας. Υπολογίστηκε ότι κάθε έτος περίπου 129.204 kWh πωλούνται προς 0,06579 € / kWh στη Δ.Ε.Η. Η τιμή πώλησης καθορίζεται από την Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας ( Ρ.Α.Ε.). Οπότε το άμεσο κέρδος είναι 8500 € ανά έτος.

Το κέρδος υπολογίζεται από τον τύπο:  $K = 34283 * (1+i)^n + 8500 * (1+i)^n$ .

Η απόσβεση υπολογίζεται από τον τύπο :  $\text{Απ} = (0.25 * \text{A.K.} - K_{n-1}) [(1+i) + (1+j)]$

- όπου A.K = αρχικό κόστος
- K = Κέρδος
- $i$  = πληθωρισμός
- $j$  = τραπεζικό επιτόκιο
- $n$  = πλήθος χρόνων

Ύπολογίζοντας όλα τα παραπάνω προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα



**Σχήμα 7.9 :** Διάγραμμα Καθαρής Παρούσας Αξίας – Απόσβεσης Συναρτήσεως Των Χρόνων

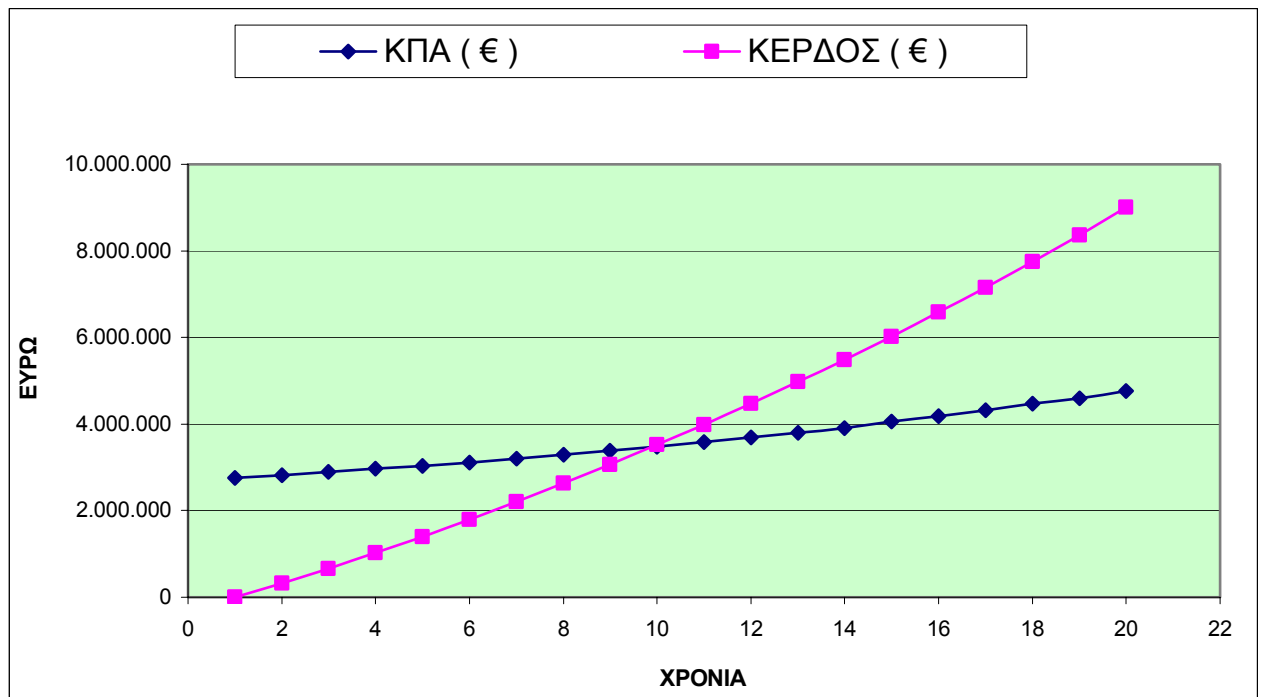
Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι έχουμε απόσβεση του εξοπλισμού μας μέσα σε δεκατρία χρόνια και τα κέρδη μας αγγίζουν τα 682.000 € μετά από 20 χρόνια.

Επίσης εξετάστηκε και το σενάριο να πωλείται όλη η παραγόμενη ενέργεια των φωτοβολταϊκών στοιχείων στη Δ.Ε.Η. Σε αυτήν την περίπτωση το αρχικό κόστος της επένδυσης είναι 2.756.992 € διότι συμπεριλαμβάνονται μόνο τα κόστη των φωτοβολταϊκών στοιχείων και του μετατροπέα D.C. / A.C.

Η τιμή πώλησης είναι υψηλότερη σε αυτού του είδους την επένδυση ( 0,5 € / kWh) διότι θεωρείται ανεξάρτητη παραγωγή και δεν δίδεται μόνο το πλεόνασμα της παραγωγής μας.

Με αυτά τα δεδομένα υπολογίζονται ξανά η καθαρή παρούσα αξία καθώς και τα κέρδη.

Θεωρούμε ότι λαμβάνουμε επιχορήγηση από την Ευρωπαϊκή Ένωση ίση με 50% του αρχικού κεφαλαίου μας καθώς επίσης ότι δανειζόμαστε το 25% του αρχικού κεφαλαίου μας από τράπεζα. Το ίδρυμα καταβάλλει το 25% του αρχικού κεφαλαίου μας. Ο πληθωρισμός λαμβάνεται ίσος με 3,5% και το τραπεζικό επιτόκιο ίσο με 6%.



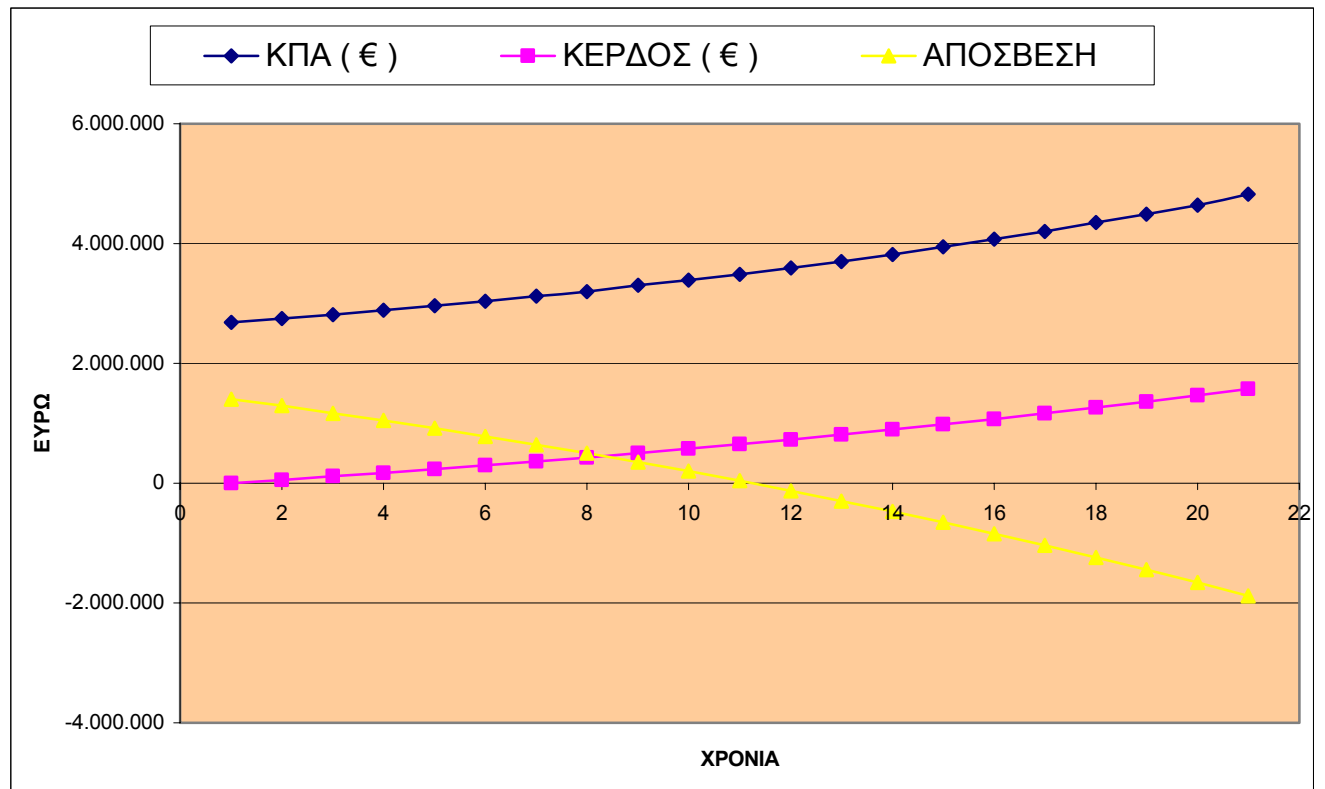
**Σχήμα 7.10 :** Διάγραμμα Καθαρής Παρούσας Αξίας – Κέρδους Συναρτήσεως Των Χρόνων

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι έχουμε απόσβεση μέσα σε 10 χρόνια και τα κέρδη μας μετά από 20 χρόνια αγγίζουν τα 9.000.000 €.

Τέλος εξετάζεται και το σενάριο ότι σε πέντε χρόνια από τώρα το κόστος των φωτοβολταϊκών στοιχείων καθώς και της κυψέλης καυσίμου έχουν μειωθεί κατά 30% σε σχέση με το αρχικό σενάριο. Επίσης θεωρούμε ότι η αγορά και η πώληση ενέργειας από και προς τη Δ.Ε.Η. έχει αυξηθεί κατά 30%.

Με αυτά τα δεδομένα το αρχικό κόστος μεταβάλλεται και γίνεται 2.684.433 € ενώ το έμμεσο κέρδος γίνεται 44.568 €. Το άμεσο κέρδος διαμορφώνεται στα 11.050 €. Θεωρούμε ότι λαμβάνουμε επιχορήγηση από την Ευρωπαϊκή Ένωση ίση με 50% του αρχικού κεφαλαίου μας καθώς επίσης ότι δανειζόμαστε το 25% του αρχικού κεφαλαίου μας από τράπεζα. Το ίδρυμα καταβάλει το 25% του αρχικού κεφαλαίου μας. Ο πληθωρισμός λαμβάνεται ίσος με 3,5% και το τραπεζικό επιτόκιο ίσο με 6%.

Με τα παραπάνω δεδομένα υπολογίζονται ξανά η καθαρή παρούσα αξία καθώς και τα κέρδη και προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα.



**Σχήμα 7.11 :** Διάγραμμα Καθαρής Παρούσας Αξίας – Κέρδους Συναρτήσεως Των Χρόνων

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι έχουμε απόσβεση μέσα σε 9 χρόνια και τα κέρδη μας μετά από 20 χρόνια αγγίζουν το 1.885.124 €.

## 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Όπως γίνεται φανερό από την παραπάνω οικονομική ανάλυση όλων των σεναρίων το κόστος των φωτοβολταϊκών στοιχείων παραμένει υψηλό σε σχέση με την απόδοση τους (περίπου 15%). Στη συγκεκριμένη μελέτη μεγάλο μειονέκτημα αποτελεί σε πρώτο βαθμό το κόστος αυτών καθώς επίσης και η μεγάλη έκταση που καταλαμβάνουν. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν έχει συμπεριληφθεί στην οικονομική ανάλυση το κόστος αγοράς έκτασης στην οποία θα τοποθετούνταν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Βέβαια στο δεύτερο σενάριο όπου εξετάζεται η επένδυση μιας ανεξάρτητης παραγωγής με Α.Π.Ε. παρατηρούμε ότι έχουμε απόσβεση σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα καθώς επίσης και υψηλά κέρδη.

Η Οικονομία του Υδρογόνου δεν είναι εφαρμόσιμη τη συγκεκριμένη στιγμή. Παρόλα αυτά υπάρχουν πολύ μεγάλες προοπτικές εξέλιξης. Οι μεγάλες εταιρίες ανακοινώνουν μεγάλη πτώση των τιμών σε περίπτωση μαζικής παραγωγής εξαρτημάτων υδρογόνου. Επομένως, στα επόμενα χρόνια αναμένεται τα συστήματα αυτά να είναι οικονομικά βιώσιμα. Αυτό φαίνεται και από την σύγκριση του πρώτου με το τρίτο σενάριο. Στο τρίτο σενάριο έχουμε γρηγορότερη απόσβεση και υψηλότερα κέρδη.

Σημαντικό βέβαια ρόλο παίζει και η Ευρωπαϊκή Ένωση επιδοτώντας τέτοιου είδους συστήματα. Μια πιθανή αύξηση αυτού του ποσοστού θα οδηγήσει περισσότερους ιδιώτες στο να επενδύσουν πάνω σε συστήματα που στηρίζονται στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Είναι γεγονός ότι χωρίς την επιδότηση αυτή οι επενδύσεις δεν είναι βιώσιμες.

Επιπροσθέτως σ' αυτού του είδους τις επενδύσεις μπορεί να βοηθήσει και η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, αυξάνοντας τις τιμές πώλησης ενέργειας προς την Δ.Ε.Η. και να προσελκύσει ακόμα περισσότερους επενδυτές. Ήδη έχει ανακοινωθεί ότι η νέα τιμή πώλησης θα είναι 0,5 € / KWh για ανεξάρτητους παραγωγούς, η οποία λήφθηκε υπ' όψιν στο δεύτερο σενάριο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών στοιχείων και ανεμογεννητριών ίδιας εγκατεστημένης ισχύος με την παραπάνω μελέτη θα ήταν φθηνότερο διότι οι ανεμογεννήτριες είναι πολύ φθηνές σε σχέση με τα φ/β στοιχεία. Δυστυχώς όμως στην περίπτωση του ΤΕΙ Χανίων οι ανεμογεννήτριες δεν μπορούν να παράξουν ενέργεια καθώς οι άνεμοι που επικρατούν κατά την διάρκεια του χρόνου είναι ασθενείς.

Τα περιβαλλοντικά οφέλη των συστημάτων είναι πολύ μεγάλα καθώς πολλοί τόνοι CO<sub>2</sub> και άλλων αερίων θερμοκηπίου μπορούν να εξοικονομηθούν. Η αυτονομία επίσης που προσφέρουν αυτού του είδους τα συστήματα δίδουν μια σιγουριά διότι αποφεύγονται τυχόν προβλήματα από το δίκτυο της Δ.Ε.Η. (π.χ. αυξομειώσεις τάσης και διακοπή ρεύματος).



## 9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αντωνάκης Κυριάκος, Τακούδης Γεώργιος : Η Οικονομία του Υδρογόνου σε Απομονωμένες Περιοχές : Η Περιπτωσιολογική Μελέτη στα Νησιά της Κρήτης και της Καρπάθου.
2. Ζούλιας Ε. : Υδρογόνο ο Ενεργειακός Φορέας του Μέλλοντος
3. Καραγεωργόπουλος Α. : Σχεδιασμός και Ασφάλεια Εγκαταστάσεων Αποθήκευσης Υδρογόνου.
4. Οικονομόπουλος Κωνσταντίνος, Μαρία α. Γούλα : Συγκριτική Αξιολόγηση Τεχνολογιών Παραγωγής Υδρογόνου.
5. Σκλαβούνος και Ρήγας : Αναγνώριση Κινδύνων σε Εγκαταστάσεις Διαχείρισης Υδρογόνου.
6. Newborough Marcus : A Report on Electrolysers Future Markets and the Prospects for ITM Power LTD'S Electrolysers Technology (2004).
7. J.M. Vindueira , A. Contreras, T.N Veziroglu : PV Autonomous installation to produce hydrogen via electrolysis, and it's use in F.C. buses (2003).
8. <http://www.fuelcellstore.com>
9. <http://www.fuelcell.gr>
10. <http://www.hy2.gr>