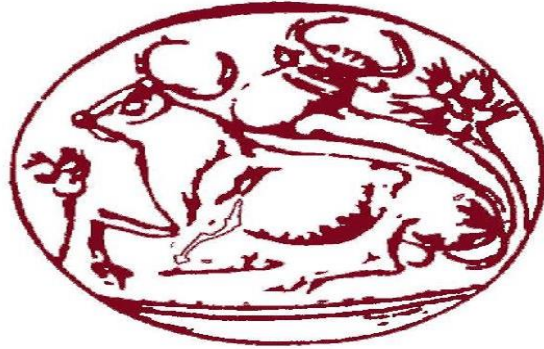


ΤΕΙ Κρήτης



Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό
Ίδρυμα Κρήτης

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

«Τίτλος Πτυχιακής Εργασίας»

**“Κυψέλες καυσίμου και η εφαρμογή τους στο
εργαστήριο Φυσικής II”**

Επιβλέπων Καθηγητής: Τζανάκης Γιώργος
Σπουδαστής: Χαϊντάρη Ντορέλ

ΑΜ: 5824

Αφιέρωση

Αφιερώνω την πτυχιακή μου εργασία στην οικογένεια μου και στην κοπέλα μου.

Πίνακας περιεχομένων

Αφιέρωση.....	1
Λίστα σχημάτων.....	4
Περίληψη.....	8
SUMMARY.....	8
Πρόλογος.....	9
Λέξεις κλειδιά.....	10
Συνομίες	10
1ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ Φωτοβολταϊκά Συστήματα	
1.1 Τεχνολογία Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Τεχνολογία ΑΠΕ).....	11
1.2 Ιστορική αναδρομή Φωτοβολταϊκών Συστημάτων.....	14
1.2.1 Εισαγωγή	14
1.2.2 Περίοδος πριν το 1840.....	14
1.2.3 Περίοδος πριν το 1880.....	15
1.2.4 Περίοδος πριν από το 1950.....	16
1.2.5 Περίοδος μετά το 1950.....	17
1.3 Ηλιακή Ενέργεια.....	19
1.3.1 Εισαγωγή.....	19
1.3.2 Ηλιακή ακτινοβολία.....	19
1.3.3 Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας.....	20
1.4 Αρχή Λειτουργίας Φωτοβολταϊκών Συστημάτων.....	22
1.4.1 Εισαγωγή.....	22
1.4.2 Περιγραφή των φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	22
1.4.3 Αγωγοί – Ημιαγωγοί – Μονωτές.....	23
1.4.3.1 Χαρακτηριστικά Ημιαγωγών.....	24
1.4.3.2 Δημιουργία ηλεκτρικά φορτισμένων ημιαγωγών.....	25
1.4.3.3 Δημιουργία της επαφής (του ηλεκτρικού πεδίου)	25
1.5 Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών.....	26
1.5.1 Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	26
1.6 Συνδεσμολογία.....	32
1.6.1 Δίοδοι.....	32
1.7 Πλαίσιο.....	34
1.8 Λειτουργία των Φ/Β συστοιχιών.....	34
1.8.1 Σύνδεση εν σειρά.....	34
1.8.2 Σύνδεση παράλληλα.....	35
1.9 Εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	37
1.9.1 Φωτοβολταϊκά συστήματα δορυφόρων.....	37
1.9.2 Φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα.....	38
1.9.3 Οι κυριότερες εφαρμογές φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα.....	39

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

2ο Κεφάλαιο Ηλεκτρόλυση

2.1 Ηλεκτρόλυση	41
2.2 Ηλεκτρολύτης.....	42
2.2.1 Στερεοί ηλεκτρολύτες.....	43
2.2.1.1 Ταξινόμηση στερεών ηλεκτρολυτών.....	44
2.3 Ηλεκτρόλυση νερού.....	45
2.3.1 Ηλεκτρόλυση του νερού μέσω ΑΠΕ.....	47

3ο Κεφάλαιο Κυψέλες Καυσίμου

3.1 Εισαγωγή.....	51
3.2 Ιστορική αναδρομή.....	51
3.3 Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου.....	59
3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κυψελών καυσίμου.....	62
3.4.1 Πλεονεκτήματα.....	62
3.4.2 Μειονεκτήματα.....	64
3.5 ΤΥΠΟΙ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	64
3.5.1 Εισαγωγή.....	64
3.5.2 Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC)	66
3.5.3 Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) ...	69
3.5.4 Κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC)	73
3.5.5 Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)	76
3.5.6 Κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (MCFC)	78
3.5.7 Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)	80
3.6 Εφαρμογές κυψελών καυσίμου.....	84
3.6.1 Εμπορικές εφαρμογές κυψελών καυσίμου.....	84
3.6.2 Εφαρμογές στα μέσα μεταφοράς.....	84
3.6.3 Εφαρμογές σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	87

Κεφάλαιο 4ο Ασκήσεις – Πειράματα

4.1 Άσκηση 1 ^η	89
4.2 Άσκηση 2 ^η	100
4.3 Άσκηση 3 ^η	122
4.4 Άσκηση 4 ^η	136

Βιβλιογραφία.....	149
-------------------	-----

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Κεφάλαιο 1^ο

Εικόνα 1 Διάταξη PEMPower1-ECO

Σχήμα 1.1 Edmond Becquerel (1820 - 1891)

Σχήμα 1.2 Jan Czochralski (1885 - 1953)

Σχήμα 1.3 Εργαστήρια της BELL

Σχήμα 1.4 Δορυφορικός σταθμός Sputnik 1957

Σχήμα 1.5 Δορυφόρος τηλεπικοινωνίας Telstar 1962

Σχήμα 1.6 Μέσος όρος ηλιακής ακτινοβολίας για χρονιές 2002 μέχρι 2012 σε οριζόντια επιφάνεια για την Ελλάδα

Σχήμα 1.7 Το % ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας

Σχήμα 1.8 Ημιαγωγός πυρίτιο (Si)

Σχήμα 1.9 Ημιαγωγός βορίου (B)

Σχήμα 1.10 Δομή φωτοβολταϊκού κελιού

Σχήμα 1.11 Φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου (sc-Si)

Σχήμα 1.12 Φωτοβολταϊκά από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

Εικόνα 1.13 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο λεπτών επιστρώσεων με δισεληνοϊνδιούχο χαλκό

Σχήμα 1.14 Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Thin film Silicon, a-Si)

Σχήμα 1.15 Δίοδος

Σχήμα 1.16 Σύνδεση πλαισίων σε σειρά

Σχήμα 1.17 Σύνδεση Πλαισίων παράλληλα

Σχήμα 1.18 Δορυφόρος Anik-F1 της Boeing που χρησιμοποιεί φωτοβολταϊκά για την κάλυψη ηλεκτρικής ενέργειας

Σχήμα 1.19 Φωτοβολταϊκά συστήματα στην Κύθνο

Κεφάλαιο 2^ο

Σχήμα 2.1 Δομή ηλεκτρολύτη τύπου PEM (μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων)

Σχήμα 2.2 Καμπύλη (I-V) ενός ηλεκτρολύτη τύπου PEM

Σχήμα 2.3 Διεργασίες διασπάσεις νερού

Σχήμα 2.4 Βασικό σχήμα για αλκαλική ηλεκτρόλυση

Σχήμα 2.5 Χημικές διεργασίες για ηλεκτρόλυση τύπου PEM

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

Σχήμα 2.6 Βασικό σχήμα ηλεκτρόλυσης τύπου PEM με χρήση Φ/Β πλαισίου

Κεφάλαιο 3^ο

Σχήμα 3.1 Sir William Grove (1811-1896)

Σχήμα 3.2 Η πρώτη κυψέλη καυσίμου του Sir William Grove

Σχήμα 3.3 Sir Friedrich Wilhelm Ostwald (1853 - 1932)

Σχήμα 3.4 Dr. Thomas Francis Bacon (1904 - 1992)

Σχήμα 3.5 Το πρώτο όχημα που χρησιμοποιεί κυψέλη καυσίμου, με ικανότητα ιπποδύναμης 20 hp (15kW) του Harry Karl Ihrig

Σχήμα 3.6 Η κυψέλη καυσίμου στο διαστημόπλοιο Gemini

Σχήμα 3.7 Η κυψέλη καυσίμου στο διαστημόπλοιο Apollo

Σχήμα 3.8 Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου

Σχήμα 3.9 Χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου

Σχήμα 3.10 Δομή αλκαλικής κυψέλης καυσίμου

Σχήμα 3.11 Μια αλκαλική κυψέλη καυσίμου

Σχήμα 3.12 Μια κυψέλη καυσίμου τύπου PEM

Σχήμα 3.13 Χαρακτηριστική καμπύλη μιας PEMFC ισχύς 300 mW

Σχήμα 3.14 Κυψέλη καυσίμου τύπου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων σε συστοιχία κυψελών καυσίμου

Σχήμα 3.15 Δομή της PEMFC

Σχήμα 3.16 Δομή της κυψέλης καυσίμου άμεσης μεθανόλης

Σχήμα 3.17 Δομή κυψέλης καυσίμου τύπου PAFC

Σχήμα 3.18 Δομή της κυψέλης καυσίμου MCFC

Σχήμα 3.19 Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)

Σχήμα 3.20 Δομή της κυψέλης καυσίμου SOFC

Σχήμα 3.21 Σωληνοειδής σχεδιασμός της SOFC

Σχήμα 3.22 Αυτοκίνητο της Mercedes που χρησιμοποιεί κυψέλες καυσίμου

Σχήμα 3.23 Αυτοκίνητο της BMW που χρησιμοποιεί την τεχνολογία κυψελών καυσίμου

Σχήμα 3.24 Υδρογονοκίνητο λεωφορείο στο Λονδίνο

Κεφάλαιο 4

Άσκηση 1^η

Σχήμα 4.1.1 Διάταξη PEMPower1-ECO

Σχήμα 4.1.2 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός Φ/Β πλαισίου

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

Σχήμα 4.1.3 Καμπύλη P-V ενός Φ/B πλαισίου

Σχήμα 4.1.4 Ημιαγωγό τύπου *n* (negative)

Σχήμα 4.1.5 Ημιαγωγό τύπου *p* (positive)

Σχήμα 4.1.6 Φ/B στοιχείο

Σχήμα 4.1.7 Κύκλωμα

Σχήμα 4.1.8 Φωτογραφία κυκλώματος

Πίνακας 4.1 Μετρήσεις

Σχήμα 4.1.9 Χαρακτηριστική καμπύλη ενός Φ/B πλαισίου

Σχήμα 4.1.10 Καμπύλη P-V ενός Φ/B πλαισίου

Άσκηση 2^η

Σχήμα 4.2.1 Διάταξη PEMPower1-ECO

Σχήμα 4.2.2 Ελλειπτική τροχιά της γης γύρο από τον Ήλιο

Σχήμα 4.2.3 Θέση του Ήλιου στους μήνες του χρόνου

Σχήμα 4.2.4 Η διαφορά θέσης Ήλιου για Δεκέμβριο και Ιούνιο

Σχήμα 4.2.5 Ηλιακή γεωμετρία

Σχήμα 4.2.6 Ηλιακή γεωμετρία

Σχήμα 4.2.7 Το % ποσοστό ηλιακής ακτινοβολίας

Σχήμα 4.2.8 Μέσος όρος ηλιακής ακτινοβολίας για χρονιές 2002 μέχρι 2012 σε οριζόντια επιφάνια για την Ελλάδα

Σχήμα 4.2.9 Σύνδεση για μέτρηση έντασης του φωτοβολταϊκού ρεύματος

Σχήμα 4.2.10 Σύνδεση για μέτρηση τάσης ανοιχτού κυκλώματος

Σχήμα 4.2.11 Φωτογραφία για την σύνδεση βολτομέτρου

Σχήμα 4.2.12 Φωτογραφία για την σύνδεση Αμπερομέτρου

Σχήμα 4.2.13 Καμπύλη Έντασης-Απόστασης (I-L)

Σχήμα 4.2.14 Καμπύλη Τάσης-Απόστασης (V-L)

Σχήμα 4.2.15 Καμπύλη Έντασης-Γωνίας

Σχήμα 4.2.16 Καμπύλη Τάσης-Γωνίας (V-Φ)

Σχήμα 4.2.17 Συγκέντρωση στην καμπύλη

Σχήμα 4.2.18 Γραφική παράσταση COS(x)

Πίνακας 4.2.1

Πίνακας 4.2.2

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

Σχήμα 4.2.19 Μια γραφική παράσταση I-L ενός Φ/Β πλαισίου

Σχήμα 4.2.20 Γραφική παράσταση V-L

Σχήμα 4.2.21 Γραφική παράσταση I-Φ

Σχήμα 4.2.22 Γραφική παράσταση V-Φ

Άσκηση 3^η

Σχήμα 4.3.1 Διάταξη PEMPower1-Eco

Σχήμα 4.3.2 Διεργασίες διάσπασης νερού

Σχήμα 4.3.3 Συσκευή ηλεκτρόλυσης Hoffman

Σχήμα 4.3.4 Βασικό σχήμα για Αλκαλική ηλεκτρόλυση

Σχήμα 4.3.5 Χημικές διεργασίες για ηλεκτρόλυση τύπου PEM

Σχήμα 4.3.6 Βασικό σχήμα ηλεκτρόλυσης τύπου PEM με χρήση Φ/Β πλαισίου

Σχήμα 4.3.7 . Καμπύλη (I-V) του ηλεκτρολύτη

Σχήμα 4.3.8 Κύκλωμα

Σχήμα 4.3.9 Φωτογραφία κυκλώματος

Σχήμα 4.3.10 Σχήμα της διάταξης

Πίνακας 4.3

Άσκηση 4^η

Σχήμα 4.4.1 Διάταξη PEMPower1-ECO

Σχήμα 4.4.2 Σύνδεση της διάταξης για το συγκεκριμένο πείραμα

Σχήμα 4.4.3 Κυψέλη καυσίμου PEM

Σχήμα 4.4.4 Δομή της κυψέλης καυσίμου PEM

Σχήμα 4.4.5 Χαρακτηριστική καμπύλη κυψέλης καυσίμου

Σχήμα 4.4.6 Καμπύλη Ισχύος-Ρεύματος

Σχήμα 4.4.7 Σχήμα σύνδεσης ηλεκτρολύτη

Σχήμα 4.4.8 Σύνδεση κιβωτίου αντιστάσεων

Πίνακας 4.4.1

Πίνακας 4.4.2

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως αντικείμενο την μελέτη κυψελών καυσίμου και την χρήση τους για εκπαιδευτικούς σκοπούς στο εργαστήριο Φυσικής ΙΙ. Η πτυχιακή αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια:

Στο πρώτο γίνεται μια εισαγωγή στα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Α.Π.Ε.) και συγκεκριμένα στα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η αρχή λειτουργίας μιας ηλεκτρολυτικής διάταξης.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κυψέλες καυσίμου (ΚΚ), οι διαφορετικοί τύποι τους, η αρχή λειτουργίας και ο βαθμός απόδοσής τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνονται τέσσερις εργαστηριακές ασκήσεις που γίνονται με την βοήθεια της διάταξης PEMPower1-ECO με σκοπό να ενταχθούν στις ασκήσεις του εκπαιδευτικού εργαστηρίου φυσικής ΙΙ.

Η διάταξη PEMPower1-ECO αποτελείται από φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ηλεκτρολυτική διάταξη και κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων.

Το 4^ο κεφάλαιο αποτελείται από τις εξής ασκήσεις:

1. Χαρακτηριστική καμπύλη φωτοβολταϊκού πλαισίου - Μέγιστη ισχύς
2. Μέτρηση τάσης και έντασης ρεύματος φωτοβολταϊκού πλαισίου σε σχέση με την απόσταση της φωτεινής πηγής και σε σχέση με την γωνία πρόσπτωσης του φωτός.
3. Παραγωγή υδρογόνου, χαρακτηριστική καμπύλη ηλεκτρολυτικής διάταξης και βαθμός απόδοσης.
4. Χαρακτηριστική καμπύλη κυψέλης καυσίμου και ενεργειακός βαθμός απόδοσης.

SUMMARY

The objectives of this thesis is to study conversions between light, electrical, chemical and mechanical energy by using environmentally friendly methods. A number of experiments has been designed for educational purposes using an apparatus which consisted of a photovoltaic solar cell, an electrolyzer, a hydrogen fuel cell and a fan. Thus, undergraduate students performing these experiments will become familiar with the basic principles of photovoltaic cells, they will study the production of hydrogen by electrolysis of water and the performance of this process and finally by using the produced hydrogen as input in a proton-exchange membrane fuel cell they will be acquainted with the fuel cell technology

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αποφάσισα στην πτυχιακή μου εργασία να ασχοληθώ με ένα θέμα που μου κέντρισε το ενδιαφέρον.

Το ζήτημα της ενέργειας είναι πάντοτε «καυτό» σε όλες τις συζητήσεις που αφορούν την τεχνολογία και την οικονομία.

Περισσότερο σημαντικό είναι το ζήτημα της προστασίας του περιβάλλοντος.

Οι τρόποι παραγωγής ενέργειας που δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον και την οικονομία είναι προφανώς ζητούμενο στις μέρες μας.

Με αυτή τη λογική οι «κυψέλες καυσίμου» αποτελούσαν για μένα μια πρόκληση αφού ανταποκρινόταν σε όσα έχω ήδη αναφέρει.

Η επεξεργασία θεωρητικά του ζητήματος, αλλά και η δυνατότητα που θα έδιναν στους σπουδαστές εργαστηριακές ασκήσεις βασισμένες στη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά τους, ήταν ένας ιδανικός συνδυασμός που καλύπτει τα ενδιαφέροντα μου και ταυτόχρονα δημιουργεί ερεθίσματα στους συναδέλφους μου, να ασχοληθούν με αυτή την ελκυστική και ενδιαφέρουσα τεχνολογικά εφαρμογή.

Στην προσπάθεια μου και μέχρι την ολοκλήρωση της εργασίας μου, πάντα δίπλα μου με χρήσιμες παρεμβάσεις και καταλυτικές οδηγίες ήταν ο υπεύθυνος καθηγητής Γιώργος Τζανάκης τον οποίο ευχαριστώ πολύ.

Πολύτιμη ήταν η βοήθεια του Κώστα του Παυλάκη που συνέβαλλε στην εύρεση της απαραίτητης βιβλιογραφίας ενώ είχε σημαντική συμβολή στη διαμόρφωση των εργαστηριακών ασκήσεων.

Οι συμπληρωματικές κατασκευές της διάταξης όπως και οι πειραματικές μετρήσεις που επαλήθευσαν τη θεωρητική προσέγγιση του θέματος έγιναν στο χώρο των Εργαστηρίων Φυσικής με τη βοήθεια του Τάσου του Τσατσάκη.

Στον ίδιο χώρο σε επόμενα εξάμηνα με μορφή εργαστηριακών ασκήσεων για τους σπουδαστές του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών θα πραγματοποιούνται ασκήσεις βασισμένες σε αυτή την εργασία.

Με την ελπίδα πως οι προκλήσεις της εποχής και οι δυνατότητες που το τμήμα μας δίνει μπορεί να συμβάλλουν σε ένα καλύτερο αύριο για όλους μας...

Χαϊντάρη Ντορέλ

Λέξεις κλειδιά:

Κυψέλη καυσίμου

Ηλεκτρολυτική διάταξη

Φωτοβολταικά Συστήματα

Ηλεκτρική Ενέργεια

Απόδοση

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)

Key Words

Fuel cell

Electrolyze

Photovoltaic Systems

Electrical Energy

Efficiency

Renewable Energy Sources (RES)

Συντομίες:

ΓΠ = Γραφική παράσταση

Φ/Β = Φωτοβολταικό

PEM = Proton Exchange Membrane = Μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων

FC = Fuel Cell = Κυψέλη Καυσίμου

Α.Π.Ε = Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

ΚΚ = Κυψέλη καυσίμου

ΣΚΚ = συστοιχία κυψελών καυσίμου

CO = μονοξείδιο του άνθρακα

CO₂ = διοξείδιο του άνθρακα

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Περιγραφή κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό αναφερόμαστε:

- στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ιδιαίτερα στα φωτοβολταϊκά συστήματα,
- στα ιστορικά στοιχεία σχετικά με τα φωτοβολταϊκά,
- στην ηλιακή ενέργεια και τα χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας,
- στην αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκών συστημάτων,
- στις τεχνολογίες φωτοβολταϊκών όπως μονοκρυσταλλικά και πολυκρυσταλλικά, καθώς και στα υλικά κατασκευής τους,
- στις κατηγορίες των Φ/Β συστημάτων όπως αυτόνομα η υβριδικά,
- και τέλος στις εφαρμογές των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

1.1 Τεχνολογία Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Τεχνολογία ΑΠΕ)

Η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελεί ένα αποτελεσματικό μέτρο για τις ανθρώπινες κοινωνίες σε παγκόσμιο επίπεδο, προκειμένου αυτές να αντικαταστήσουν τη χρησιμοποίηση των ορυκτών καυσίμων σαν κύρια μέσα μαζικής παραγωγής της ενέργειας τους και να μειώσουν τις επιπτώσεις που προκαλούνται από αυτά στη κλιματική ισορροπία του πλανήτη. Επιπλέον, στο επίπεδο των διαφόρων κρατών που δεν διαθέτουν πλούσια φυσικά αποθέματα σε ορυκτά καύσιμα (π.χ. πετρέλαιο), οι ΑΠΕ αποτελούν την καλύτερη λύση προκειμένου αυτά να στηρίξουν από μόνα τους τις ενεργειακές τους οικονομίες, χωρίς να χρειάζεται να εξαρτιούνται ενεργειακά από άλλα κράτη - παραγωγούς και προμηθευτές τους σε ορυκτές πρώτες ύλες. Τέλος, οι ΑΠΕ θεωρούνται, τουλάχιστον μέχρι σήμερα, ως η μόνη πρακτικά εφαρμόσιμη εναλλακτική λύση έναντι της μαζικής χρήσης της πυρηνικής ενέργειας, μιας και τα αδιέξοδα που προκύπτουν από την εκτεταμένη χρησιμοποίηση αυτής είναι ως γνωστόν πολλά (π.χ. χρησιμοποίησή της για μη ειρηνικούς σκοπούς, ενδεχόμενα πυρηνικά ατυχήματα, μη ύπαρξη ολοκληρωμένου σχεδίου ασφαλούς και μακροπρόθεσμης διαχείρισης των πυρηνικών αποβλήτων της κ.λπ.).

Το πλεονέκτημα που προκύπτει από την χρησιμοποίηση των ΑΠΕ έναντι της πυρηνικής ενέργειας ενισχύεται εξάλλου και από την άποψη, ότι προκειμένου να προσπαθήσει μελλοντικά η ανθρωπότητα να δημιουργήσει πολλούς «μικρούς τεχνητούς ήλιους» πάνω στη γη, με τη μορφή των πυρηνικών αντιδραστήρων, είναι πιο ασφαλές και πιο σίγουρο να εδραιώσει και να αναπτύξει την τεχνολογία των ΑΠΕ, η οποία είναι περισσότερο ήπια απ' ό,τι η πυρηνική ενέργεια και βασίζεται εξάλλου και η ίδια στη μετατροπή της ενέργειας του Ηλίου σε εκμεταλλεύσιμη ενέργεια για τον άνθρωπο.

Θα πρέπει πάντως να τονίσουμε, ότι κάθε τεχνολογία ΑΠΕ στην πράξη, προκαλεί λιγότερο ή περισσότερο, ορισμένες μικρές αρνητικές συνέπειες στο φυσικό περιβάλλον. Κι αυτό γιατί οι διάφορες διαδικασίες μετατροπής της ενέργειας που παράγει, υφίστανται σε κάποιο βαθμό και κάποιες μη αναστρέψιμες μεταβολές. Ωστόσο αυτές οι μεταβολές είναι προφανώς πολύ μικρότερες από αυτές που προκαλούν στο περιβάλλον οι συμβατικές τεχνολογίες των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με αποτέλεσμα η μαζική χρήση των ΑΠΕ συνολικά να καθίσταται πολύ λιγότερο επιζήμια σε σχέση μ' αυτές.

Συνήθως, μια σειρά από περιβαλλοντικά κριτήρια / κατευθυντήριες γραμμές χρησιμοποιούνται προκειμένου να καθορίσουν πότε μια οποιαδήποτε νέα τεχνολογία μπορεί να θεωρηθεί σημαντική ως προς τις προοπτικές της αειφορίας της. Τα κριτήρια αυτά είναι τα εξής:

- Η αποφυγή της χρήσης, κατά την εφαρμογή της, καυσίμων που εξαντλούνται εύκολα ή σχετικά εύκολα.
- Η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητάς της, στην περίπτωση που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα, δηλαδή η αύξηση της εκμετάλλευσης του ενεργειακού περιεχομένου των ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιεί σε σχέση με τις προγενέστερες τεχνολογίες της, αλλά αυτό μόνο με το σκεπτικό, ότι η χρήση της θα αποτελέσει ένα προσωρινό μέτρο το οποίο δεν θα ισχύει όταν θα αντικατασταθεί από μία νέα τεχνολογία πραγματικών ΑΠΕ.
- Η βελτίωση της αποδοτικότητας των ενεργειακών συστημάτων μετατροπής της πρωτογενούς ενέργειας που χρησιμοποιεί, η οποία θα πρέπει οπωσδήποτε να είναι υψηλή.
- Η χρησιμοποίηση των καταλληλότερων καυσίμων για την εκάστοτε ενεργειακή μετατροπή που πραγματοποιεί και η σωστή συσχέτιση αυτών με τις τελικές ανάγκες του χρήστη.
- Η θεώρηση των τοπικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνεπάγεται η χρήση της σαν σημαντικού παράγοντα κατά την εφαρμογή της και ο συμψηφισμός των επιπτώσεων αυτών με τα

ευρύτερα περιβαλλοντικά οφέλη που συνεπάγεται η χρήση σε παγκόσμια κλίμακα.

- Η αποφυγή απόσπασης, από τις φυσικές ενεργειακές της ροές, ποσοτήτων ενέργειας μεγαλύτερων από αυτές που χρειάζονται τα εκάστοτε τοπικά οικοσυστήματα από τα οποία τις αντλεί προκειμένου αυτά να λειτουργήσουν ομαλά.
- Ο συνυπολογισμός, κατά τον ενεργειακό της σχεδιασμό, των άμεσων αλλά και των έμμεσων επιπτώσεων για τις τοπικές ανθρώπινες κοινωνίες εκτός από το ευρύτερο κοινωνικό σύνολο.
- Η ήπια και οργανωμένη ανάπτυξή της, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η μη υπέρβαση της μέγιστης ικανότητας του φυσικού περιβάλλοντος σε παραγωγή πρώτων υλών της, μιας και ως γνωστόν το περιεχόμενο αυτού σε φυσικούς ενεργειακούς πόρους δεν είναι ανεξάντλητο.
- Η συνεκτίμηση του περιβαλλοντικού κόστους της με τα καθαρά οικονομικά κόστη που προκύπτουν από την εφαρμογή της και η συνεκτίμηση αυτών με το συνολικό κόστος που συνεπάγεται παγκοσμίως ο άνθρωπος.
- Η στενή παρακολούθηση των εκπεμπόμενων ρύπων της, μέσα από μία λεπτομερή ανάλυση του ενεργειακού κύκλου ζωής της ως προς το περιβάλλον της Γης.

Είναι γνωστό, ότι οι περισσότερες μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σήμερα προέρχονται, άμεσα ή έμμεσα, από την ενέργεια του Ηλίου. Τα ορυκτά καύσιμα για παράδειγμα, τα οποία ως γνωστόν αποτελούν σήμερα την «κινητήρια» δύναμη της σύγχρονης παγκόσμιας ενεργειακής οικονομίας, δεν είναι τίποτε άλλο παρά η αποθηκευμένη ποσότητα της ενέργειας του Ηλίου η οποία δεσμεύτηκε κάποια στιγμή από διάφορους φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς και οι οποίοι στη συνέχεια, κάτω από ειδικές συνθήκες και με την πάροδο πολλών εκατομμυρίων ετών, μετατράπηκαν τελικά σε διάφορες μορφές ορυκτών καυσίμων.

Επειδή όμως οι ποσότητες των διαφόρων ορυκτών καυσίμων της Γης απαιτούν τόσο μεγάλα χρονικά διαστήματα προκειμένου να σχηματιστούν, μόλις τα αποθέματά τους που βρίσκονται στο υπέδαφός της υπερκαταναλωθούν από τον άνθρωπο, δεν προλαβαίνουν να αντικατασταθούν άμεσα από άλλα νέα αποθέματα προκειμένου να εξυπηρετήσουν τις επόμενες ανθρώπινες γενεές, με αποτέλεσμα στην ουσία να χάνονται για πάντα. Αντιθέτως, οι διάφορες μορφές ΑΠΕ βασίζονται σε συνεχείς ενεργειακές εισροές από τον Ήλιο, οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα να δημιουργούνται ανεξάντλητα αποθέματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειάς τους, τα οποία με τη σειρά τους μπορούν να εκμεταλλευτούν σε πιο

μακροπρόθεσμη κλίμακα από τον άνθρωπο. Τα τεράστια αυτά αποθέματα υπάρχουν στις διάφορες μορφές ΑΠΕ, είτε στην πρωτογενή τους μορφή, δηλαδή σαν «καθαρή» ηλιακή ενέργεια, είτε σε δευτερογενείς μορφές ενέργειας μέσα στα διάφορα φυσικά υλικά του πλανήτη (π.χ. στον αέρα με τη μορφή της αιολικής ενέργειας, στο υπέδαφος της γης με τη μορφή των ζεστών υδάτων και πετρωμάτων της (γεωθερμία), στους υδάτινους όγκους των θαλασσών, των ποταμών και των λιμνών με τη μορφή της κινητικής ενέργειας των κυμάτων ή της δυναμικής ενέργειας των υδάτινων ροών, στους φυτικούς και στους ζωικούς οργανισμούς με τη μορφή της βιομάζας κ.τ.λ.).

Στις διάφορες μορφές ΑΠΕ που δημιουργούνται κατά την αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας μέσα στη μάζα των διαφόρων φυσικών υλικών του πλανήτη, ανήκει και η χημική ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη στο φυσικό στοιχείο υδρογόνο (H_2), του αφθονότερου στοιχείου του σύμπαντος.

1.2 Ιστορική αναδρομή Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

1.2.1 Εισαγωγή

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με τη μείωση των αποθεμάτων συμβατικών καυσίμων και οι δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον από την εκτεταμένη χρήση τους, έχουν στρέψει το ενδιαφέρον στην εκμετάλλευση άλλων, συμβατικών πηγών ενέργειας.

Η αυξανόμενη αυτή ενεργειακή κρίση που συντελείται παγκοσμίως αλλά και οι δυνατότητες που παρέχονται με την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστά αναγκαία την περαιτέρω ανάπτυξη και εξέλιξη του κλάδου των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε). Μία από τις συμβατικές αυτές πηγές είναι και η ηλιακή ενέργεια, η οποία μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική μέσω των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

1.2.2 Περίοδος πριν το 1840

Η πρώτη γνωριμία του ανθρώπου με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο έγινε το 1839 όταν ο Γάλλος φυσικός Edmond Becquerel (1820 - 1891) (Σχήμα 1.1) ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

Σε ηλικία 19 ετών, όταν πειραματιζόταν στο εργαστήριο του πατέρα του ο Becquerel δημιούργησε το πρώτο φωτοβολταϊκό κύτταρο κατά την διάρκεια πειραμάτων του με μία ηλεκτρολυτική επαφή φτιαγμένη από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια. Η ανακάλυψη στην οποία προέβη, είχε να κάνει με το γεγονός ότι ορισμένα υλικά παρουσίαζαν την ικανότητα παραγωγής μικρών ποσοτήτων ηλεκτρικού ρεύματος, όταν βρίσκονταν εκτεθειμένα σε ηλιακή ακτινοβολία.



Σχήμα 1.1 Edmond Becquerel (1820 - 1891)

1.2.3 Περίοδος πριν το 1880

Το επόμενο σημαντικό βήμα έγινε το 1876 όταν ο Adams (1836 - 1915) και ο φοιτητής του Day παρατήρησαν ότι μια ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος παραγόταν από το σελήνιο (Se) όταν αυτό ήταν εκτεθειμένο στο φως. Με την ανακάλυψή αυτή ο William έδειξε ότι η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παραχθεί από το φως χωρίς να χρειάζονται κινητά μέρη, πράγμα το οποίο οδήγησε στην σύγχρονη ηλιακή κυψέλη.

Ο William Grylls Adams αποφοίτησε από το κολέγιο του Κέιμπριτζ το 1855 και αργότερα έγινε καθηγητής Φυσικής Φιλοσοφίας στο κολέγιο King's του Λονδίνου. Μερικά από τα έργα του Adams ήταν τα παρακάτω:

- Ηλιακή ενέργεια 1878
- Η δράση του φωτός στο σελήνιο 1875
- Ταυτόχρονη μαγνητική διαταραχή
- Μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος

1.2.4 Περίοδος πριν από το 1950

Ο Albert Einstein δημοσιεύει την γνωστή θεωρία του γύρω από το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, το 1904. Για αυτήν τη θεωρητική του εξήγηση τιμήθηκε με βραβείο Nobel, το 1921.

Το 1918 ο Πολωνός Jan Czochralski (1885 - 1953) πρόσθεσε την μέθοδο παραγωγής ημιαγωγού μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si) με την σχετική έρευνα του και η οποία μάλιστα χρησιμοποιείται βελτιστοποιημένη ακόμα και σήμερα. Ο Czochralski (Σχήμα 1.2) ήταν πολωνός χημικός που εφευρέθηκε την διαδικασία Czochralski, η οποία χρησιμοποιείται για την καλλιέργεια μονών κρυστάλλων και στην παραγωγή πλακιδίων ημιαγωγών. Ο Jan ήταν επίσης γνωστός για την εξαιρετική γνώση της φυσικής.



Σχήμα 1.2 Jan Czochralski (1885 - 1953)

Μια σημαντική ανακάλυψη έγινε επίσης το 1949 όταν οι Mott και Schottky ανέπτυξαν την θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης. Στο μεταξύ η κβαντική θεωρία είχε ξεδιπλωθεί. Ο δρόμος πλέον για τις πρώτες πρακτικές εφαρμογές είχε ανοίξει.

1.2.5 Περίοδος μετά το 1950

Το πρώτο ηλιακό κελί ήταν γεγονός στα εργαστήρια της Bell (Σχήμα 1.3) το 1954 από τους Charin, Fuller και Pearson. Η απόδοση του ήταν 6% εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 1.3 Εργαστήρια της BELL

Μπορούμε να πούμε ότι η σύγχρονη εποχή φωτοβολταϊκών έχει αρχίσει το 1954 με το έργο των ερευνητών στα εργαστήρια Bell Telephone και RCA, οι οποίοι χρησιμοποίησαν νέους τύπους ημιαγωγών, με βάση το πυρίτιο και γερμάνιο, που ήταν μια τάξη μεγέθους πιο αποδοτικοί από τα προηγούμενα κύτταρα στη μετατροπή ακτινοβολίας απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Εκείνοι που ασχολούνταν με τα φωτοβολταϊκά έλπιζαν ότι αυτό θα οδηγούσε σε νέες εφαρμογές για τα ηλιακά κύτταρα, Ωστόσο, οι ελπίδες τους δεν πραγματοποιήθηκαν, εν μέρει επειδή η δεκαετία αυτή ήταν μια περίοδος μεγάλων προσδοκιών για την πυρηνική ενέργεια και επειδή αρκετοί σκεπτικιστές πίστευαν ότι η ηλιακή ενέργεια θα ήταν πολύ διάχυτη και διακοπτόμενη, και οι συσκευές πάρα πολύ ακριβές.

Όσον αφορά την ιστορία των φωτοβολταϊκών φαινόταν ότι εκείνη την περίοδο ήταν μια δύσκολη περίοδος όπου οι ερευνητές θα έπρεπε να βρουν μια λύση για το πρόβλημα.

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

Αυτό που άλλαξε την κατάσταση πολύ γρήγορα το λανσάρισμα του πρώτου δορυφορικού σταθμού, Sputnik (Σχήμα 1.4) το 1957. Οι πρώτοι δορυφόροι χρειάζονται ένα πολύ μικρό ποσό ηλεκτρικής ενέργειας, το βάρος και η έκταση των ηλιακών συλλεκτών που χρειαζόταν για την παραγωγή αυτής της ποσότητας ήταν αποδεκτή από τους σχεδιαστές του δορυφόρου.

Επίσης, οι τύποι των κυττάρων που φτιάχτηκαν το 1954 αποδεικνύονται αξιόπιστα και φαινόταν πιθανό να λειτουργούν στο διάστημα για πολλά χρόνια χωρίς πρόβλημα.



Σχήμα 1.4 Δορυφορικός σταθμός Sputnik 1957

Ο πρώτος Αμερικάνικος δορυφόρος που χρησιμοποίησε παροχή φωτοβολταϊκής ισχύος ήταν το 1958. Τα ηλιακά κύτταρα κάλυπταν μια περιοχή περίπου 100 τετραγωνικά εκατοστά και παράγονταν μόνο μερικές δεκάδες milliwatts. Το 1962 λανσάρεται ο πρώτος δορυφόρος τηλεπικοινωνίας, Telstar (Σχήμα 1.5), ο οποίος χρησιμοποιούσε ηλιακά κύτταρα για να παράγουν 14 W από τον Ήλιο. Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1970, διαστημικοί δορυφόροι που τροφοδοτούνται από της ηλιακές κυψέλες είχαν γίνει αρκετά σύνηθες φαινόμενο.



Σχήμα 1.5 Δορυφόρος τηλεπικοινωνίας Telstar 1962

1.3 Ηλιακή Ενέργεια

1.3.1 Εισαγωγή

Η ηλιακή ενέργεια, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ύπαρξη της ζωής στη Γη. Καθορίζει τη θερμοκρασία στην επιφάνειά της και παρέχει ουσιαστικά το σύνολο της ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία όλων των φυσικών συστημάτων. Με μία καλή προσέγγιση, ο ήλιος μπορεί να θεωρηθεί ως ένα τέλεια πηγή μέλανος σώματος σε μία θερμοκρασία κοντά στους 5.800 K.

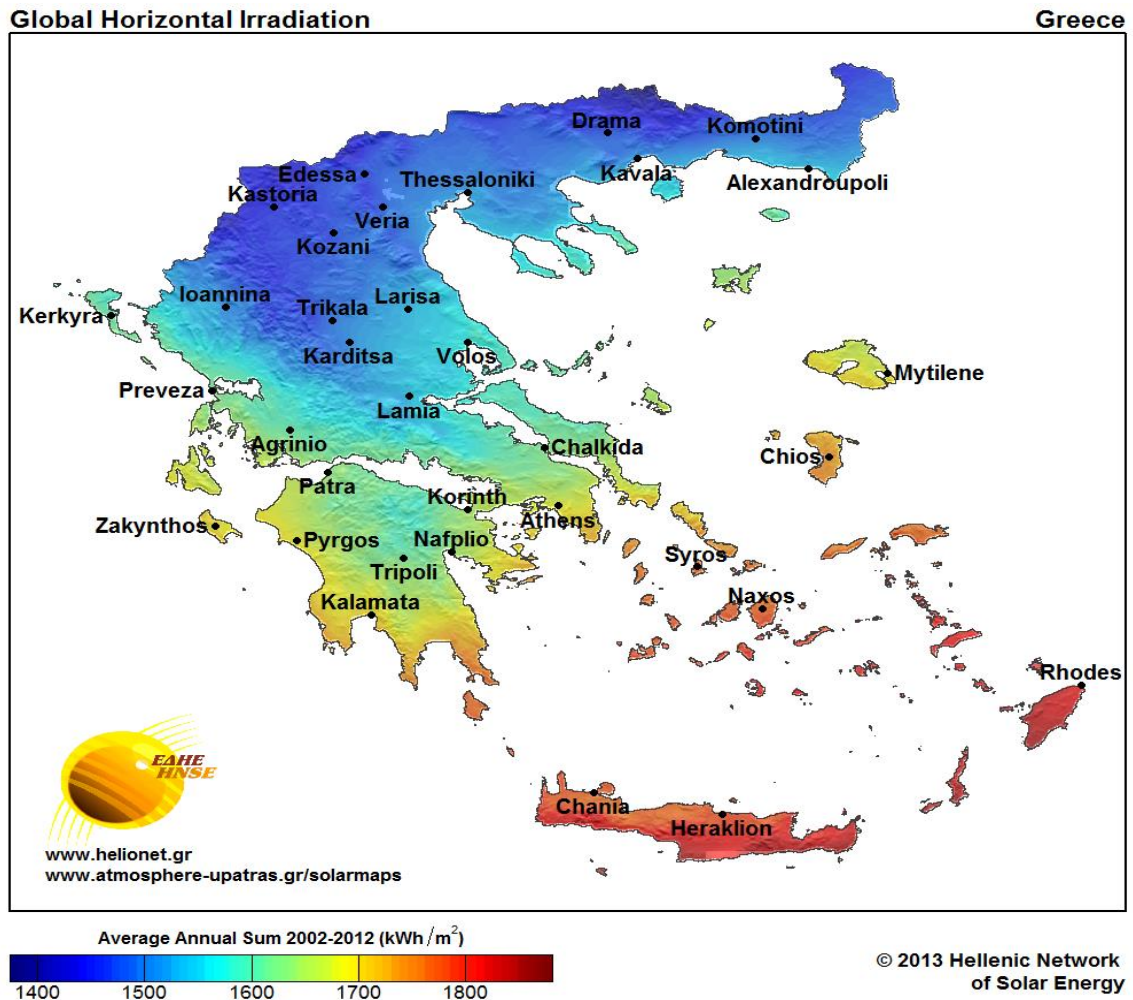
1.3.2 Ηλιακή ακτινοβολία

Η προσπίπτουσα κατά μέσο όρο ισχύς πάνω σε μία μονάδα επιφάνειας κάθετη προς τη διεύθυνση της δέσμης έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα, είναι γνωστή ως ηλιακή σταθερά και ισούται με $S=1367 \text{ W/m}^2$.

Γενικότερα, η ολική ισχύς από μία πηγή ακτινοβολίας που πέφτει κάθετα πάνω στη μονάδα επιφάνειας, ονομάζεται ένταση ακτινοβολίας. Η ατμόσφαιρα της γης, μειώνει σημαντικά την ακτινοβολία με τους μηχανισμούς της ανάκλασης, απορρόφησης (από το όζον, τους υδρατμούς, το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα) και σκέδασης (από τα μόρια αέρα,

σκόνης ή ρύπους). Όταν η ηλιακή ακτινοβολία αθροίζεται στη διάρκεια ενός έτους, προκύπτει η μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία, συνήθως σε kWh/m².

Η τιμή αυτή διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την τοποθεσία. Στο σχήμα 1.6 παρατηρούμε τον μέσο όρο ηλιακής ακτινοβολίας για χρονιές 2002 μέχρι 2012 σε οριζόντια επιφάνια για την Ελλάδα.



Σχήμα 1.6 Μέσος όρος ηλιακής ακτινοβολίας για χρονιές 2002 μέχρι 2012 σε οριζόντια επιφάνια για την Ελλάδα

1.3.3 Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας

Η ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης, συνίσταται από ένα μέρος άμεσης ακτινοβολίας και ένα μέρος διάχυτης. Η άμεση συνιστώσα της ακτινοβολίας, προέρχεται από την κατεύθυνση του ήλιου σε αντίθεση με τη διάχυτη, η οποία σκεδάζεται από τον ουράνιο θόλο και δεν έχει συγκεκριμένη κατεύθυνση.

Η ποσότητα της ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος είναι φυσικά άκρως μεταβλητή. Επιπλέον, πέρα από την κανονική ημερήσια και ετήσια μεταβολή λόγω της φαινόμενης κίνησης του ήλιου, ακατάστατες μεταβολές (κάλυψη από σύννεφα) προκαλούνται από τις κλιματολογικές συνθήκες καθώς επίσης και τη γενικότερη σύνθεση της ατμόσφαιρας. Γι' αυτό το λόγο, η σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος βασίζεται στη λήψη μετρούμενων δεδομένων που λαμβάνονται στην τοποθεσία εγκατάστασης ή κοντά σε αυτή.

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στη γη, κατανέμεται ανομοιόμορφα στις διάφορες περιοχές. Οι περιοχές κοντά στον ισημερινό λαμβάνουν περισσότερη ακτινοβολία από οποιοδήποτε άλλες. Η ηλιακή ακτινοβολία διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τις εποχές και εξαρτάται από την ώρα της ημέρας, το κλίμα (ιδιαίτερα τα σύννεφα που σκεδάζουν τις ακτίνες του ήλιου) και την ατμοσφαιρική ρύπανση. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες καθορίζουν το ποσό της ηλιακής ενέργειας που διατίθεται για τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Η ηλιακή ακτινοβολία όπως αναφέραμε και παραπάνω εξασθενεί καθώς διέρχεται την ατμόσφαιρα λόγω της διάχυσης, την ανάκλασης προς το διάστημα και της απορρόφησης που υφίσταται σε όλα τα μέρη του φάσματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η οπτική μάζα την οποία διασχίζει η ακτινοβολία τόσο μεγαλύτερη είναι η εξασθένιση της λόγω απορρόφησης, παρακάτω στο σχήμα 1.7 θα δούμε και το επί τις εκατό μοιραζόμενο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας.

- Η διάχυση είναι η αλλαγή διεύθυνσης του φωτός λόγω αλληλεπιδράσεων του με τα μόρια του αέρα και μικρά σωματίδια που αιωρούνται μέσα στην ατμόσφαιρα.
- Η ανάκλαση οφείλεται στα αιωρήματα και στα νέφη της ατμόσφαιρας.
- Η απορρόφηση γίνεται από τα συστατικά της ατμόσφαιρας με διαφορετικό τρόπο.



Σχήμα 1.7 Το % ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας

1.4 Αρχή Λειτουργίας Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

1.4.1 Εισαγωγή

Η λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή την άμεση μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα. Κατά το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται ηλιακή ακτινοβολία, τα φωτόνια της ακτινοβολίας είτε ανακλώνται, είτε διαπερνούν το στοιχείο ή απορροφώνται από αυτό. Μόνο τα φωτόνια που απορροφώνται συμβάλουν στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, καθώς αυξάνουν την ενέργεια ορισμένων ηλεκτρονίων του φωτοβολταϊκού στοιχείου αναγκάζοντας τα να μετακινηθούν σε άλλες θέσεις. Συνεπώς δημιουργείται μια συνεχής κίνηση ηλεκτρονίων που αποτελεί το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα.

1.4.2 Περιγραφή των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Η σύγχρονη τεχνολογία μάς έδωσε τη δυνατότητα εκμετάλλευσης της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας με τη χρήση των ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων (Φ/Β) που αποτελούνται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ αποτελούνται από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ή κυψέλες που η λειτουργία τους στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

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

1.4.3 Αγωγοί – Ημιαγωγοί – Μονωτές

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και η λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος στηρίζεται στις βασικές ιδιότητες των ημιαγωγών υλικών σε ατομικό επίπεδο. Ειδικότερα όταν το φως προσπίπτει σε μια επιφάνεια είτε ανακλάται, είτε την διαπερνά(διαπερατότητα) είτε απορροφάται από το υλικό της επιφάνειας.

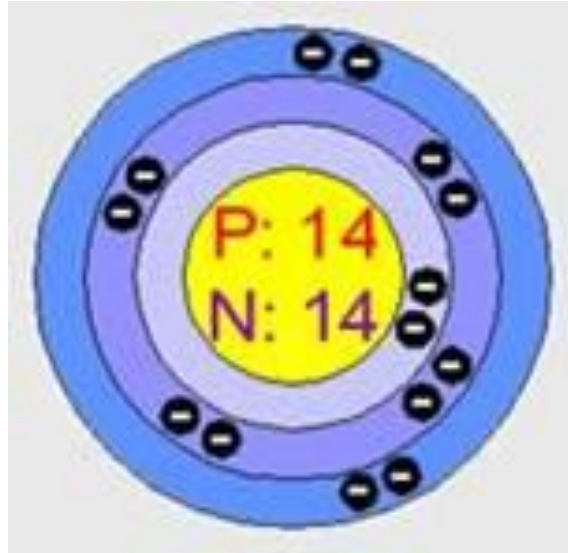
Η απορρόφηση του φωτός ουσιαστικά σημαίνει την μετατροπή του σε μια άλλη μορφή ενέργειας (σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας) η οποία συνήθως είναι η θερμότητα. Παρόλα αυτά όμως υπάρχουν κάποια υλικά τα οποία έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν την ενέργεια των προσπιπτόντων φωτονίων (πακέτα ενέργειας) σε ηλεκτρική ενέργεια.

Αυτά τα υλικά είναι οι ημιαγωγοί και σε αυτά οφείλεται επίσης η τεράστια τεχνολογική πρόοδος που έχει συντελεστεί στον τομέα της ηλεκτρονικής και συνεπακόλουθα στον ευρύτερο χώρο της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών.

Γενικότερα τα υλικά στην φύση σε σχέση με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους ανήκουν σε τρεις κατηγορίες, τους αγωγούς του ηλεκτρισμού, τους μονωτές και τους ημιαγωγούς. Ένας ημιαγωγός έχει την ιδιότητα να μπορεί να ελεγχθεί η ηλεκτρική του αγωγιμότητα είτε μόνιμα είτε δυναμικά.

1.4.3.1 Χαρακτηριστικά Ημιαγωγών

Το χαρακτηριστικό στοιχείο ενός ημιαγωγού που το διαφοροποιεί από τα υπόλοιπα υλικά είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων ενός ατόμου που βρίσκονται στην εξωτερική του στοιβάδα (σθένους). Ο περισσότερο γνωστός ημιαγωγός είναι το πυρίτιο (Si) (Σχήμα 1.8) για αυτό και θα επικεντρωθούμε σε αυτό.



Σχήμα 1.8 Ημιαγωγός πυρίτιο (Si)

Το πυρίτιο έχει ατομικό αριθμό 14 και έχει στην εξωτερική του στοιβάδα 4 ηλεκτρόνια. Όλα τα άτομα που έχουν λιγότερα η περισσότερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα (είναι "γενικά" συμπληρωμένη με 8 e) ψάχνουν άλλα άτομα με τα οποία μπορούν να ανταλλάξουν ηλεκτρόνια ή να μοιραστούν κάποια με σκοπό τελικά να αποκτήσουν συμπληρωμένη εξωτερική στοιβάδα σθένους.

Σε αυτήν την τάση οφείλεται και η κρυσταλλική δομή του πυριτίου αφού όταν συνυπάρχουν πολλά άτομα μαζί διατάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε να συνεισφέρουν ηλεκτρόνια σε όλα τα γειτονικά τους άτομα και τελικά με αυτόν τον τρόπο να αποκτούν μια συμπληρωμένη εξωτερική στοιβάδα και κρυσταλλική δομή. Αυτή είναι και η καθοριστική ιδιότητα που έχουν τα κρυσταλλικά υλικά.

Στην κρυσταλλική του μορφή όμως το πυρίτιο είναι σταθερό. Δεν έχει ανάγκη ούτε να προσθέσει ούτε να διώξει ηλεκτρόνια κάτι που ουσιαστικά του δίνει ηλεκτρικά χαρακτηριστικά πολύ κοντά σε αυτά ενός μονωτή αφού δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια για την δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος στο εσωτερικό του.

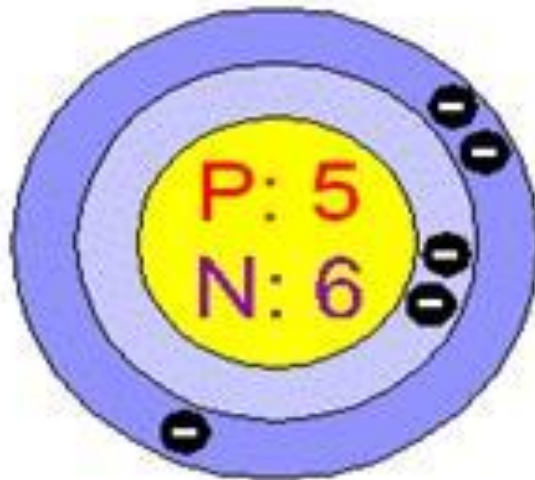
1.4.3.2 Δημιουργία ηλεκτρικά φορτισμένων ημιαγωγών

Τις ημιαγώγιμες ιδιότητές του το πυρίτιο τις αποκτά με τεχνικό τρόπο. Αυτό πρακτικά γίνεται με την πρόσμειξη άλλων στοιχείων τα οποία είτε έχουν ένα ηλεκτρόνιο περισσότερο είτε ένα λιγότερο στην στοιβάδα σθένους των.

Αυτή η πρόσμειξη τελικά κάνει τον κρύσταλλο δεκτικό είτε σε θετικά φορτία (υλικό τύπου p) είτε σε αρνητικά φορτία (υλικό τύπου n).

Για να φτιαχτεί λοιπόν ένας ημιαγωγός τύπου n ή αλλιώς ένας κρύσταλλος πυριτίου με περίσσεια ελεύθερων ηλεκτρονίων θα πρέπει να γίνει πρόσμειξη ενός υλικού με 5e στην εξωτερική του στοιβάδα όπως για παράδειγμα το Αρσενικό (As).

Αντίστοιχα για να δημιουργήσουμε έναν ημιαγωγό τύπου p η αλλιώς κρύσταλλος πυριτίου με περίσσεια οπών χρειάζεται να γίνει πρόσμειξη στον κρύσταλλο κάποιου υλικού όπως το βόριο (B) που έχει 3e στην εξωτερική του στοιβάδα.



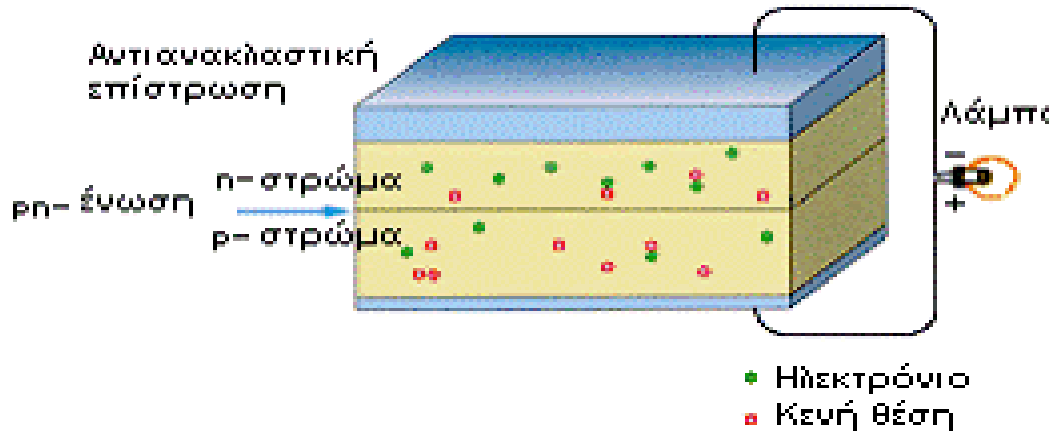
Σχήμα 1.9 Ημιαγωγός βορίου (B)

1.4.3.3 Δημιουργία της επαφής (του ηλεκτρικού πεδίου)

Εάν φέρουμε σε επαφή δύο κομμάτια πυριτίου τύπου n και τύπου p το ένα απέναντι από το άλλο δημιουργείται μια δίοδος η αλλιώς ένα ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή των δύο υλικών το οποίο επιτρέπει την κίνηση ηλεκτρονίων προς μια κατεύθυνση μόνο.

Τα επιπλέον ηλεκτρόνια της επαφής η έλκονται από τις «οπές» τις επαφής p. Αυτό το ζευγάρι των δύο υλικών είναι το δομικό στοιχείο του φωτοβολταϊκού κελιού και η βάση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

Ηλιακή ενέργεια



Σχήμα 1.10 Δομή φωτοβολταϊκού κελιού

1.5 Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών

Πλέον στα χρόνια που ζούμε υπάρχει μέρα με την μέρα αύξηση της ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια, έτσι έχουν αναπτυχθεί και οι Α.Π.Ε. Επίσης και η τεχνολογία στα φωτοβολταϊκά συστήματα έχει αναπτυχθεί αρκετά πολύ, υπάρχουν διαφορετικά υλικά υψηλής ποιότητας τα οποία βοηθάνε στην αποδοτικότητα των Φ/Β.

1.5.1 Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία διακρίνονται σε τρεις κυρίως κατηγορίες, ανάλογα με το υλικό παρασκευής, τη δομή του βασικού υλικού καθώς και τον τρόπο παρασκευής. Έτσι, έχουμε την παρακάτω κατηγοριοποίηση:

1. Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου (μεγάλου πάχους)

A) Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (sc-Si)

Κατασκευάζονται από κυψέλες που έχουν κοπεί από ένα κυλινδρικό κρύσταλλο πυριτίου. Αποτελούν τα πιο αποδοτικά φωτοβολταϊκά με αποδόσεις της τάξεως του 15%, το πάχος τους είναι γύρω στα 0,3 χιλιοστά. Η κατασκευή τους όμως είναι πιο πολύπλοκη γιατί απαιτεί την κατασκευή του

μονοκρυσταλλικού πυριτίου με αποτέλεσμα το υψηλότερο κόστος κατασκευής.



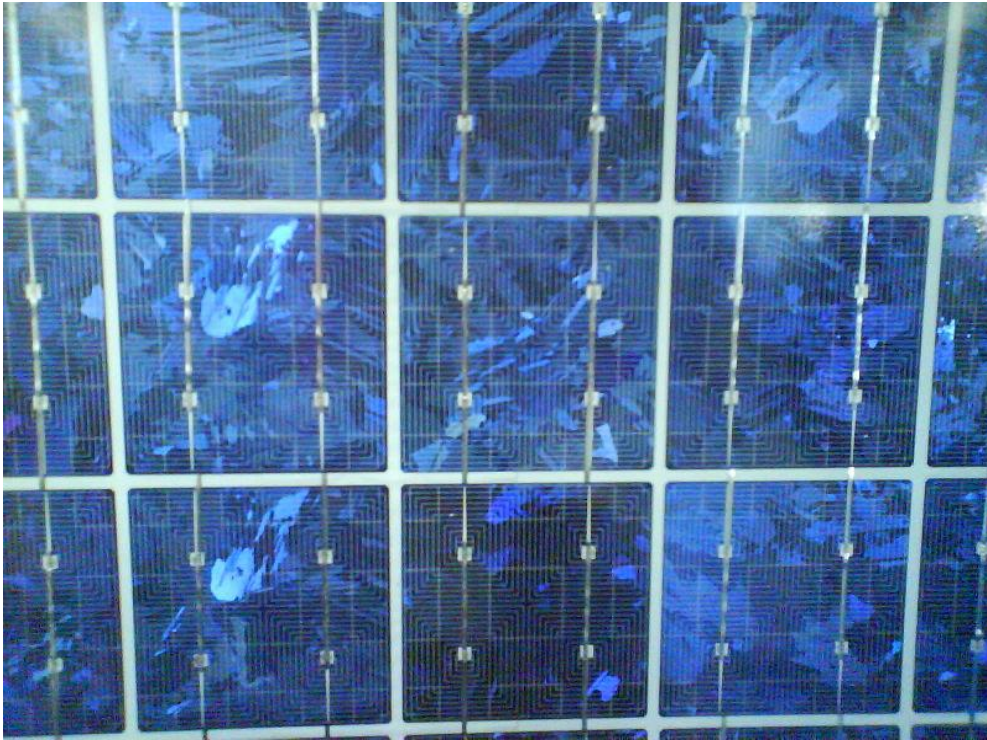
Σχήμα 1.11 Φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου (sc-Si)

Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης/επιφάνειας ή ενεργειακής πυκνότητας. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (float zone). Αμφότερες βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό με την υψηλότερη απόδοση στο εμπόριο σήμερα, έχει απόδοση πλαισίου 18,5%.

B) Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si)

Τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κατασκευάζονται από ράβδους λιωμένου και επανακρυσταλλομένου πυριτίου. Για την παραγωγή τους οι ράβδοι του πυριτίου κόβονται σε λεπτά τμήματα από τα οποία κατασκευάζεται η κυψέλη του φωτοβολταϊκού. Η διαδικασία κατασκευής τους είναι απλούστερη από εκείνη των μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών με αποτέλεσμα το φθηνότερο κόστος παραγωγής. Παρουσιάζουν όμως σε γενικές γραμμές μικρότερη απόδοση της τάξεως του 12%.

Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου ("χύτευση"), και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.



Εικόνα 1.12 Φωτοβολταϊκά από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

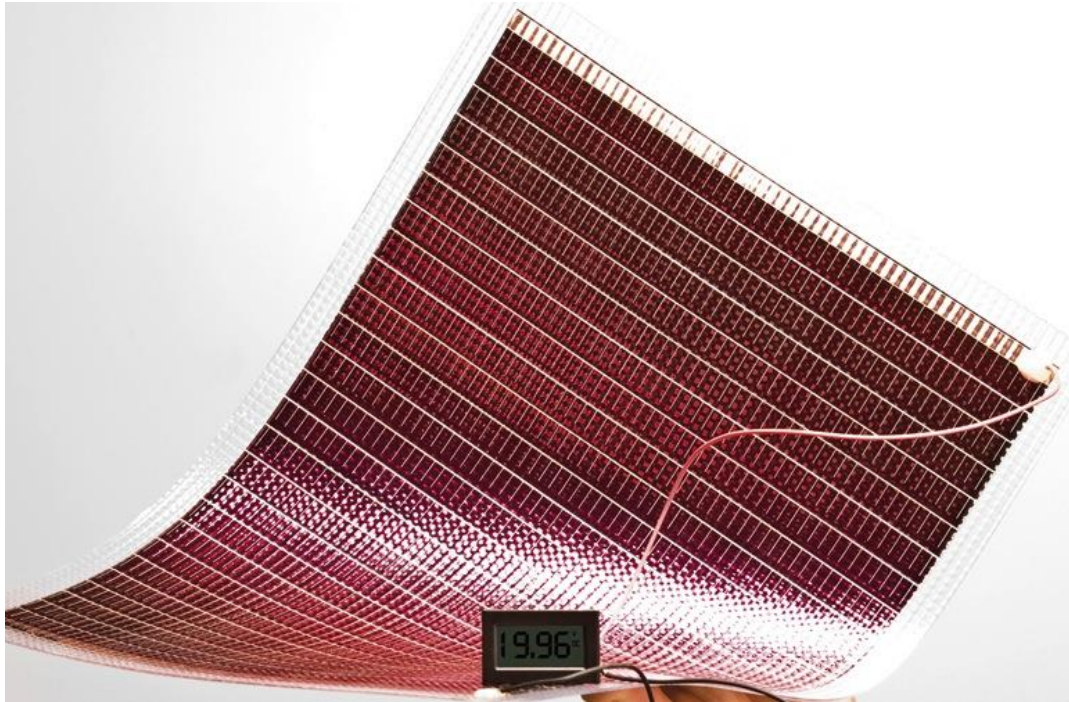
Γ. Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon-Si)

Τα φωτοβολταϊκά αυτής της κατηγορίας αποτελούνται από ένα λεπτό στρώμα πυριτίου που έχει εναποτεθεί ομοιόμορφα σε κατάλληλο υπόβαθρο. Σαν υπόβαθρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μεγάλη γκάμα υλικών από δύσκαμπτα μέχρι ελαστικά με αποτέλεσμα να βρίσκει μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών, ιδιαίτερα σε καμπύλες ή εύκαμπτες επιφάνειες. Ενώ το άμορφο πυρίτιο παρουσιάζει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στην απορρόφηση του φωτός, εντούτοις η φωτοβολταϊκή απόδοση του είναι του μικρότερη των κρυσταλλικών, περίπου 6%. Το φθινό όμως κόστος κατασκευής τους τα κάνει ιδανικά σε εφαρμογές όπου δεν απαιτείται υψηλή απόδοση.

2. Φωτοβολταϊκά υλικά λεπτών επιστρώσεων (*thin film*)

A. Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe₂ ή CIS, με προσθήκη γαλλίου CIGS)

Ο Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως αλλά παρόλα αυτά η απόδοση του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11% (πλαίσιο). Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του 18,8% η οποία είναι και η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών λεπτής επιστρώσεως. Με την πρόσμιξη γαλλίου η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο.



Σχήμα 1.13 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο λεπτών επιστρώσεων με δισεληνοϊνδιούχο χαλκό

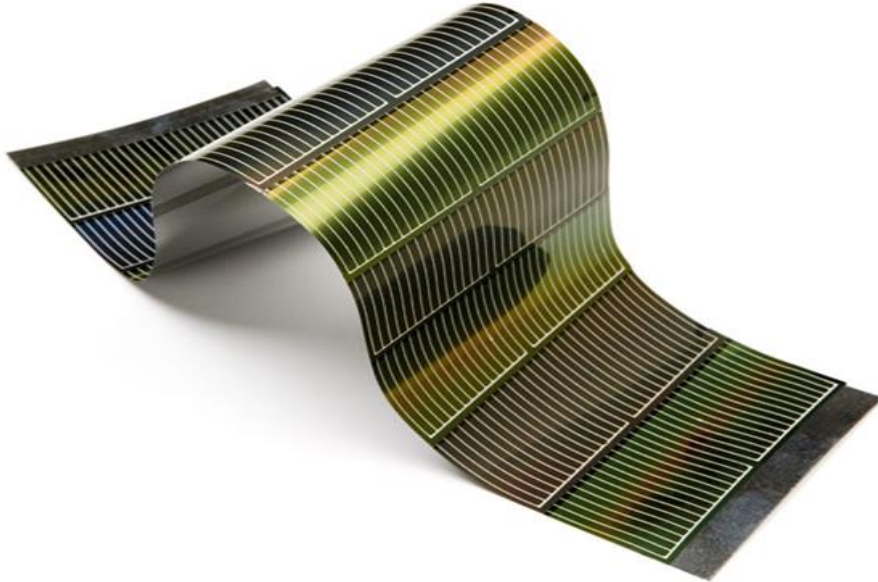
B. Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si)

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτά, έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού (πυρίτιο στην περίπτωση μας) πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Έτσι και λόγω της μικρότερης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται η τιμή τους είναι γενικότερα αρκετά χαμηλότερη. Ο χαρακτηρισμός άμορφο φωτοβολταϊκό προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου.

Οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται με χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά thin films πυριτίου κυμαίνονται για το πλαίσιο από 6 έως 8% ενώ στα εργαστήρια έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για το φωτοβολταϊκό στοιχείο a-Si είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά ΦΒ, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά).

Το μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά

φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επίσης υπάρχουν αμφιβολίες όσων αφορά την διάρκεια ζωής των άμορφων πλαισίων μιας και δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις αφού η τεχνολογία είναι σχετικά καινούρια. Παρόλα αυτά οι κατασκευαστές πλέον δίνουν εγγυήσεις απόδοσης 20 ετών. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0,0001 χιλιοστά ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι από 1 έως 3 χιλιοστά.



Σχήμα 1.14 Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Thin film Silicon, a-Si)

Γ. Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)

Το Τελουριούχο Κάδμιο έχει ενεργειακό χάσμα γύρω στο 1eV το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα κάτι που του δίνει σοβαρά πλεονεκτήματα όπως την δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές όμως μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6-8%. Στο εργαστήριο η απόδοση στα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχει φθάσει το 16%.

Μελλοντικά αναμένεται το κόστος του να πέσει αρκετά. Τροχοπέδη για την χρήση του αποτελεί το γεγονός ότι το κάδμιο σύμφωνα με κάποιες έρευνες είναι καρκινογόνο με αποτέλεσμα να προβληματίζει το ενδεχόμενο της εκτεταμένης χρήσης του. Επίσης προβληματίζει ή έλλειψη του Τελούριου. Σημαντικότερη χρήση του είναι ή ενθυλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό, κατάλληλο για ενσωμάτωση στα κτίρια (BIPV Building Integrated Photovoltaic).

Δ. Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

Το Γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Είναι πιο σπάνιο ακόμα και από τον χρυσό.

Το Αρσένιο δεν είναι σπάνιο άλλα έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες. Το Αρσενικούχο γάλλιο έχει ενεργειακό χάσμα 1,43eV που είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση του στην μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29%. Επίσης τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες γεγονός που επιβάλλει σχεδόν την χρήση τους σε εφαρμογές ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators).

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs έχουν το πλεονέκτημα ότι αντέχουν σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας, για αυτό αλλά και λόγω της πολύ υψηλής απόδοσης του ενδείκνυται για διαστημικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος.

3. Πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία

Μια άλλη κατηγορία είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που αποτελούνται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών. - HIT (Heterojunction with Intrinsic Thinlayer). Τα πιο γνωστά εμπορικά πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω) ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο 17,2% και το οποίο σημαίνει ότι χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια για να έχουμε την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση 19,7%. Άλλα πλεονεκτήματα για τα πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στην διαχεόμενη ακτινοβολία. Φυσικά, αφού τα φωτοβολταϊκά αυτά έχουν τα παραπάνω πλεονεκτήματα, είναι ακριβότερα σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια.

4. Άλλες Τεχνολογίες

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και διάφορα εργαστήρια στον κόσμο παρουσιάζουν νέες πατέντες. Κάποιες από τις τεχνολογίες στα φωτοβολταϊκά στοιχεία που φαίνεται να ξεχωρίζουν και μελλοντικά πιθανώς να γίνει ευρεία η χρήση τους είναι:

- Νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου (nc-Si)
- Οργανικά/Πολυμερή στοιχεία

1.6 Συνδεσμολογία

Οι κυψέλες συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους για να συστήσουν μια συνδεσμολογία, όπως συχνά ονομάζεται αυτή η διάταξη. Οι κυψέλες διασυνδέονται με συγκόλληση των ακροδεκτών τους από την κορυφή της μίας στη βάση της επόμενης Αυτό γίνεται εν γένει εργοστασιακά με ειδικές μηχανές.

Είναι σημαντικό να μην υφίστανται φθορές οι κυψέλες κατά τη διεργασία, να είναι ανθεκτικές οι συνδέσεις, και να διατηρείται το κατάλληλο διάστημα μεταξύ των κυψελών, Εάν οι κυψέλες ακουμπούν μεταξύ τους μπορεί να προκύψουν προβλήματα ηλεκτρικών βραχυκυκλωμάτων καθώς επίσης και προβλήματα σκίασης, ενώ αυξάνεται η πιθανότητα ραγίσματός τους. Τα υπερβολικά μεγάλα κενά μεταξύ των κυψελών σπαταλούν πολύτιμη επιφάνεια.

1.6.1 Δίοδοι

Στην ηλεκτρονική, η δίοδος είναι ένα στοιχείο που περιορίζει τη κατευθυντήρια ροή των φορέων αγωγιμότητας. Ουσιαστικά, η δίοδος επιτρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα να περάσει από τη μια διεύθυνση, αλλά μπλοκάρει την κίνηση από την αντίθετη διεύθυνση. Έτσι, η δίοδος μπορεί να θεωρηθεί ως μια ηλεκτρονική εκδοχή της βαλβίδας. Τα κυκλώματα που απαιτούν ροή προς μία μόνο κατεύθυνση περιλαμβάνουν μία ή περισσότερες διόδους στη σχεδίαση του κυκλώματος. Οι πρώτες διόδους περιλάμβαναν κρυστάλλους cat's whisker και λυχνίες κενού. Σήμερα, οι περισσότερες διόδους είναι κατασκευασμένες από υλικά ημιαγωγών όπως πυρίτιο ή γερμάνιο.

Συγκεκριμένα αναφερόμαστε σε δύο τύπους διόδων:

1. Δίοδοι παράκαμψης

Οι διόδους παράκαμψης χρησιμοποιούνται για την προστασία των συνδεσμολογιών εν σειρά των κυψελών. Εν γένει, ένα πλαίσιο προσφέρεται από τον κατασκευαστή με ενσωματωμένη μια δίοδο παράκαμψης, η οποία συνδέεται παράλληλα με ολόκληρο το πλαίσιο.

Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας, η δίοδος δεν κάνει τίποτα εκτός από το να καταναλώνει μία ελάχιστη ποσότητα ισχύος. Εάν σκιαστεί ή

υποστεί βλάβη μέρος του πλαισίου, η δίοδος παράκαμψης εκτρέπει το ρεύμα μέσω αυτής και γύρω από το πλαίσιο.

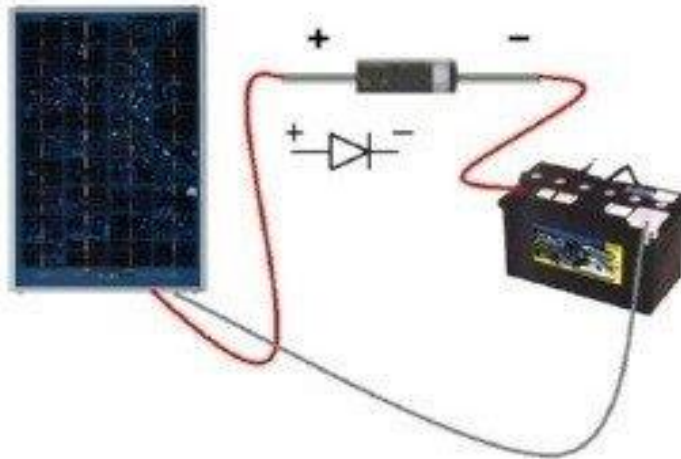
Χωρίς τη δίοδο, το πλαίσιο που σκιάζεται ή έχει υποστεί βλάβη διαχέει το ρεύμα υπό μορφή θερμότητας και τελικά καταστρέφεται.

2. Δίοδοι φραγής

Οι δίοδοι φραγής εγκαθίστανται για να αποτρέψουν την αντιστροφή της ροής του ρεύματος προς τα πλαίσια. Μια δίοδος φραγής συνδέεται συνήθως εν σειρά μεταξύ της συστοιχίας και των μπαταριών. Αντ' αυτού, εάν ένας αριθμός συνδεσμολογιών συνδέονται εν σειρά, οι δίοδοι φραγής μπορούν να συνδεθούν εν σειρά με κάθε μία συνδεσμολογία. Ενίοτε ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στα Φ/Β συστήματα για τη ρύθμιση της ισχύος εξαλείφει την ανάγκη προσθήκης μιας δίοδου φραγής.

Με τη χρήση αυτών των διόδων αποτρέπεται η πιθανή ζημιά στα στοιχεία αλλά κυρίως η απώλεια πολύτιμης ενέργειας από το σύστημα.

Με τη χρήση των παραπάνω διόδων το σύστημα των στοιχείων γίνεται αποδοτικότερο σε περίπτωση βλάβης και δεν έχει απώλειες από την πολύτιμη ενέργεια που αποθηκεύει. Στο παρακάτω Σχήμα (1.11) φαίνεται η τοποθέτηση αυτών των διόδων στα στοιχεία.



Σχήμα 1.15 Δίοδος

1.7 Πλαίσιο

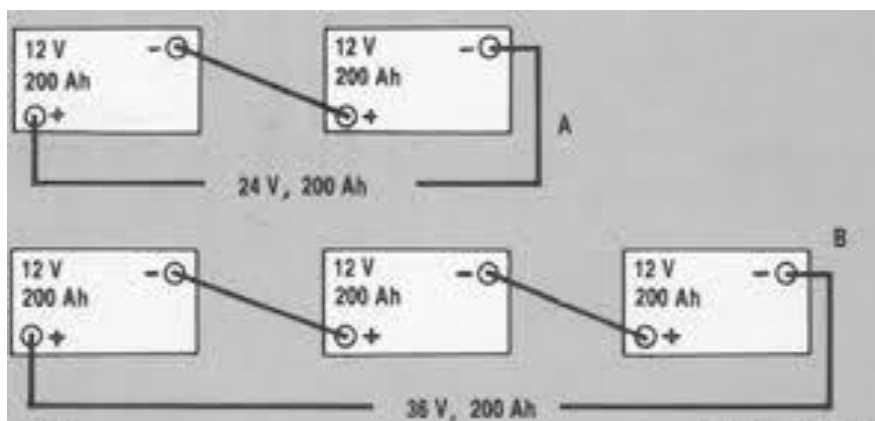
Οι ηλιακές κυψέλες συνδέονται συνήθως σε σειρά, διαμορφώνοντας ένα σύνολο που ονομάζεται πλαίσιο. Το Φ/Β πλαίσιο εν γένει αποτελεί τη μικρότερη αυτοτελή μονάδα σε μια συστοιχία, καθώς είναι μία ομάδα κυψελών που έχουν συνδεθεί μεταξύ τους και στη συνέχεια έχουν τοποθετηθεί σε ένα κέλυφος ως αυτόνομη μονάδα. Ο αριθμός των κυψελών ενός πλαισίου καθορίζεται συνήθως από τις ανάγκες τάσης του συστήματος και οι περισσότεροι κατασκευαστές παράγουν πλαίσια τα οποία διαστασιολογούνται σύμφωνα με τις τάσεις των χρησιμοποιούμενων μπαταριών. Ένα τυπικό πλαίσιο για φόρτιση μιας μπαταρίας 12 Volt έχει 33 έως 36 κυψέλες (πρέπει να παρέχει πάνω από 12 Volt για να φορτίσει τη μπαταρία), Σημειώνεται ότι η λέξη πλαίσιο μπορεί να αναφέρεται είτε σε ένα μόνο πλαίσιο είτε σε ένα σύνολο πλαισίων.

1.8 Λειτουργία των Φ/Β συστοιχιών

Γενικά, ένα Φ/Β πλαίσιο ή μια συστοιχία επηρεάζεται από το περιβάλλον με τον ίδιο τρόπο που επηρεάζεται και μία Φ/Β κυψέλη. Η τάση μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία και το ρεύμα αυξάνεται καθώς αυξάνεται η έκθεση στις ηλιακές ακτίνες.

1.8.1 Σύνδεση εν σειρά

Όταν ηλιακές κυψέλες (ή πλαίσια) συνδέονται εν σειρά, μπορεί να γίνει μια εκτίμηση της παραγόμενης ισχύος της συνδεσμολογίας με τις μεθόδους που περιγράφονται στη συνέχεια. Αυτό προϋποθέτει ότι οι συνθήκες λειτουργίας για τις κυψέλες είναι οι ίδιες και ότι οι κυψέλες έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά I-V.



Σχήμα 1.16 Σύνδεση πλαισίων σε σειρά

Ρεύμα

Το ρεύμα σε μία εν σειρά συνδεσμολογία κυψελών είναι το ίδιο σε κάθε σημείο της συνδεσμολογίας, ίδιο με αυτό που παράγεται από μία κυψέλη. Εάν μία κυψέλη με χαρακτηριστικά χαμηλού ρεύματος συνδεθεί σε μια συνδεσμολογία με άλλες κυψέλες που έχουν χαρακτηριστικά υψηλότερου ρεύματος, η συνδεσμολογία θα περιοριστεί στο ρεύμα της κυψέλης χαμηλού ρεύματος. $I_{σειράς} = (I_{max} \text{ μίας κυψέλης})$.

Τάση

Η τάση σε μία συνδεσμολογία κυψελών είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων κάθε κυψέλης. Υποθέτοντας όμοιες κυψέλες, η τάση μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο: $V_{σειράς} = (\text{Αριθμός κυψελών}) * (V_{max} \text{ μίας κυψέλης})$.

Ισχύς

Η παραγόμενη ισχύς από μία συνδεσμολογία κυψελών ισούται με το ρεύμα της συνδεσμολογίας πολλαπλασιαζόμενο με την τάση

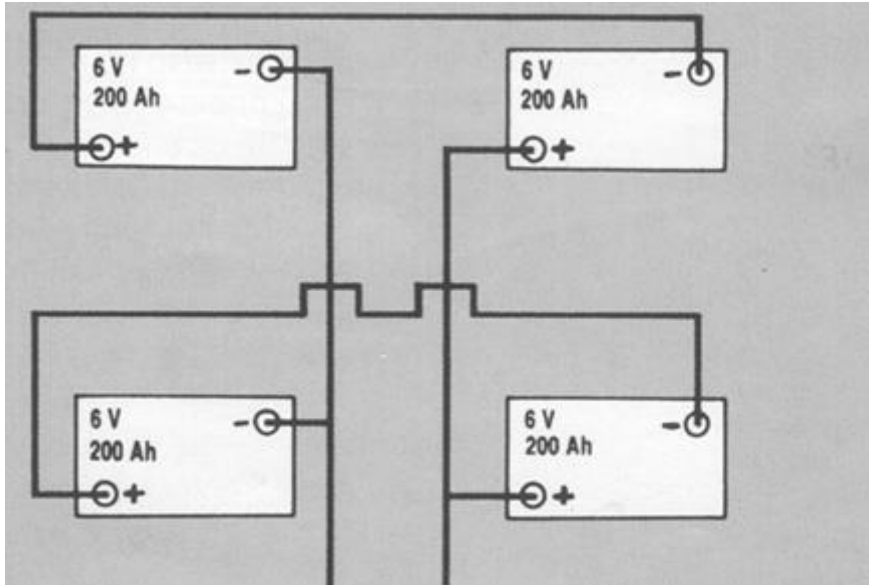
$P_{σειράς} = I_{σειράς} \times V_{σειράς} \Rightarrow$

$P_{σειράς} = (I_{max} \text{ μίας κυψέλης}) * (\text{Αριθμός κυψελών}) * (V_{max} \text{ μίας κυψέλης})$

Σημειώνεται ότι, μπορεί οι μεμονωμένες κυψέλες να λειτουργούν σε διαφορετικές τάσεις, αλλά κάθε μία κυψέλη θα λειτουργεί με το ίδιο ρεύμα όπως και οι άλλες στη συνδεσμολογία. Το σχήμα παρουσιάζει το πώς συνδυάζονται τα χαρακτηριστικά I-V των μεμονωμένων κυψελών για να διαμορφώσουν την καμπύλη i-v της εν σειρά συνδεσμολογίας.

1.8.2 Σύνδεση παράλληλα

Εάν οι κυψέλες (ή τα πλαίσια) συνδεθούν παράλληλα, μπορεί να γίνει μία εκτίμηση του ρεύματος, της τάσης και της ισχύος τους με τις μεθόδους που περιγράφονται στη συνέχεια, υποθέτοντας και πάλι ότι οι συνθήκες λειτουργίας είναι οι ίδιες και ότι οι κυψέλες έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά I-V.



Σχήμα 1.17 Σύνδεση Πλαισίων παράλληλα

Ρεύμα

Το παραγόμενο ρεύμα από μια ομάδα κυψελών συνδεδεμένων παράλληλα ισούται με το άθροισμα των μεμονωμένων ρευμάτων κάθε κυψέλης. Υποθέτοντας παρόμοιες κυψέλες, το ρεύμα μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση: $I_{\text{παράλληλα}} = (\text{Αριθμός κυψελών}) * (I_{\text{max}} \text{ μίας κυψέλης})$

Τάση

Η τάση μεταξύ δύο κόμβων μιας ομάδας κυψελών συνδεδεμένων εν παραλλήλω είναι ίση με την τάση κάθε κυψέλης: $V_{\text{παράλληλα}} = (V_{\text{max}} \text{ μίας κυψέλης})$.

Ισχύς

Η παραγόμενη ισχύς από κυψέλες εν παραλλήλω είναι ίση με το παράλληλο ρεύμα εξίσωση

$$P_{\text{παράλληλα}} = I_{\text{παράλληλα}} * V_{\text{παράλληλα}} \Rightarrow$$

$$P_{\text{παράλληλα}} = (\text{Αριθμός κυψελών}) * (I_{\text{max}} \text{ μίας κυψέλης}) * (V_{\text{max}} \text{ μίας κυψέλης})$$

Σημειώνεται ότι, όταν μια ομάδα κυψελών συνδέεται παράλληλα, οι μεμονωμένες κυψέλες μπορεί να παράγουν διαφορετικά ρεύματα, αλλά κάθε κυψέλη θα λειτουργεί στην ίδια τάση. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το πώς συνδυάζονται τα χαρακτηριστικά I-V των μεμονωμένων κυψελών για να διαμορφώσουν την καμπύλη I-V της ομάδας των κυψελών εν παραλλήλω.

1.9 Εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων

Καθώς η τιμή τους πέφτει τα ηλιακά στοιχεία γίνονται αρκετά πρακτικά και η χρήση τους γενικεύεται. Η πρώτη τους χρήση, για να παρέχουν δηλαδή ηλεκτρική ισχύ σε απομακρυσμένες περιοχές όπου δεν υπάρχουν άλλες πηγές, συνεχίζει να είναι σημαντική.

Εκτός από τα διαστημικά προγράμματα, όπου ηλιακά κύτταρα παρέχουν ηλεκτρισμό 24 ώρες το 24ωρο για τις λειτουργίες δορυφόρων, αυτή η συναρπαστική πηγή ενέργειας χρησιμοποιείται σήμερα για:

- Φορητά συστήματα καθαρισμού νερού
- Λειτουργία φορτιστών μικρών (επαναφορτιζόμενων) συσσωρευτών
- Τηλεφωνικές επικοινωνίες

Μια ενδιαφέρουσα και συναρπαστική πειραματική εφαρμογή του ηλιακού στοιχείου ήταν η επιτυχής χρήση του για να πετάξει ένα μικρό αεροπλάνο. Το Δεκέμβριο του 1980 το solar challenger, ένα ειδικά κατασκευασμένο μικρό αεροπλάνο με μάζα 84 kg μετέφερε έναν πιλότο σε μεγάλη απόσταση χρησιμοποιώντας μόνο ηλιακή ενέργεια για την κίνησή του. Το αεροπλάνο έκανε περίπου 45 πτήσεις. Η μακρύτερη ήταν περίπου 30 km.

1.9.1 Φωτοβολταϊκά συστήματα δορυφόρων

Από το 1968 επιστήμονες συζητούσαν τη δυνατότητα κατασκευής και χρήσης ηλιακών συστημάτων ισχύος υπό μορφή τεχνητών δορυφόρων, που θα αποτελούνται από τεράστιες συστοιχίες φωτοβολταϊκών κυττάρων για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Με την βοήθεια μετατροπένων μικροκυμάτων και κεραιών θα κατηύθυναν την ηλεκτρική ισχύ σε σταθμούς στην επιφάνεια της γης. Οι δορυφόροι θα είναι σε γεωστατική τροχιά σε ύψος 35800 km επάνω από τη γη.

Επειδή θα περιστρέφονται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα, όπως η γη, θα βρίσκονται πάντα επάνω από τον ίδιο σταθμό συλλογής ενέργειας στη επιφάνεια της γης.

Από τη θέση τους-πολύ ψηλά-θα "βλέπουν" τον ήλιο 24 ώρες το 24ωρό. Πότε πότε οι ακτίνες θα εμποδίζονται λόγω έκλειψης ήλιου, αλλά μόνο για μικρά χρονικά διαστήματα πριν και μετά τις ισημερίες.

Τα ηλιακά επίπεδα θα είναι διευθετημένα έτσι ώστε να προσανατολίζονται στον ήλιο συνεχώς και οι κεραιές θα έχουν κατεύθυνση προς τη γη.



Σχήμα 1.18 Δορυφόρος Anik-F1 της Boeing που χρησιμοποιεί φωτοβολταικά για την κάλυψη ηλεκτρικής ενέργειας

1.9.2 Φωτοβολταικά στην Ελλάδα

Η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία στην Ελλάδα κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα τόσο κατά τη καλοκαιρινή όσο και κατά την χειμερινή περίοδο. Όλα τα πλεονεκτήματα όμως που προσφέρουν τα φωτοβολταικά συστήματα δεν στάθηκαν ικανά μέχρι σήμερα να απογειώσουν την αγορά των φωτοβολταικών και παρά το γεγονός ότι η Ελλάδα είναι η πιο πλούσια χώρα της Ευρώπης σε ηλιοφάνεια κατατάσσεται μεταξύ των τελευταίων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση φωτοβολταικών συστημάτων.

Αιτία το σχετικά υψηλό κόστος συγκριτικά με τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Η αγορά Φ/Β θα ευδοκιμήσει όταν πέσει το κόστος τους, αλλά για να πέσει το κόστος χρειάζεται μια οικονομία κλίμακας, δηλαδή μια σχετικά δυναμική αγορά. Προσπαθώντας να ενισχύσουν την χρήση των φωτοβολταικών συστημάτων και στην χώρα μας, έχουν ήδη ξεκινήσει σημαντικά προγράμματα ενίσχυσης των Φ/Β, με γενναίες επιδοτήσεις τόσο της αγοράς και εγκατάστασης Φ/Β, όσο και της παραγόμενης ηλιακής κιλοβατώρας. Έτσι λοιπόν, στην Ελλάδα, τον Ιούνιο του 2006 ψηφίστηκε νέος νόμος που ενισχύει σημαντικά την ενέργεια που παράγεται από

φωτοβολταϊκά και τροφοδοτείται στο δίκτυο. Λόγω αυτών των ευνοϊκών κινήτρων που δίνονται τόσο σε ιδιώτες, αλλά κυρίως στις επιχειρήσεις που σκοπεύουν να επενδύσουν στην παραγωγή ηλιακής ενέργειας έχουν αυξησει το επενδυτικό ενδιαφέρον σε έναν κλάδο, ο οποίος μέχρι πρότινος βρισκόταν στο περιθώριο έναντι άλλων εναλλακτικών μορφών ενέργειας όπως η αιολική. Συγκεκριμένα επιδοτείται αρχική εγκατάσταση σε ποσοστό από 30% έως 55% της αξίας του συστήματος, ενώ επιδοτούμενο είναι και το επιτόκιο σε περίπτωση δανεισμού.

Το σημαντικότερο κίνητρο όμως για επενδύσεις είναι ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων θα μπορεί να πωλείται στη ΔΕΗ εγγυημένα για μία 20ετία σε τιμή η οποία θα αναπροσαρμόζεται με βάση τον πληθωρισμό ή τις αυξήσεις των τιμολογίων της ΔΕΗ. Το νέο νομοθετικό πλαίσιο εγγυάται γρήγορη απόσβεση των επενδύσεων και σημαντικά κέρδη.

1.9.3 Οι κυριότερες εφαρμογές φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών από τη ΔΕΗ έχει ξεπεράσει τα 230 KWp, ενώ στο σύνολο της χώρας η εγκατεστημένη ισχύς στο τέλος του 2002 ανερχόταν στα 2,37 MWp, συμπεριλαμβάνοντας εφαρμογές όπως άντληση νερού και άρδευση, τηλεπικοινωνιακοί σταθμοί κ.α.

Οι κυριότερες εφαρμογές φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα έχουν γίνει σε νησιά, όπου είτε υπάρχει έντονη ανάγκη για αυτόνομη τροφοδότηση ηλεκτρικού ρεύματος είτε συνδέθηκαν στα ήδη υπάρχοντα ηλεκτρικά δίκτυα.

Τα νησιά στα οποία έγιναν οι σπουδαιότερες εφαρμογές των φωτοβολταϊκών από την πλευρά της ΔΕΗ είναι:

- Κύθνος (ισχύος 100 kWp)
- Αρκιών (25 kWp)
- Γαύδος (20 kWp)
- Αντικύθηρα (25 kWp)



Σχήμα 1.19 Φωτοβολταϊκά συστήματα στην Κύθνο

Σε 24 νησιά (Λεβίθα, Μάραθος, Σαμιοπούλα, Πασάς, Οινούσες, Κ. Κουφονήσι, Ρω Μεγίστης κλπ.) εγκαταστάθηκαν 90 μικρά αυτόνομα Φ/Β συστήματα των 0,7 kWp το καθένα.

2^ο Κεφάλαιο

Ηλεκτρόλυση

Περιγραφή κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό αναφερόμαστε:

- στο φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης,
- στους ηλεκτρολύτες και τις κατηγορίες τους,
- στην διαδικασία ηλεκτρόλυσης του νερού,
- στα στοιχεία της ηλεκτρολυτικής διάταξης,
- και τέλος μια μικρή εισαγωγή στην ηλεκτρόλυση νερού μέσω Α.Π.Ε. .

2.1 Ηλεκτρόλυση

Ηλεκτρόλυση είναι η διάσπαση μιας ουσίας με τη βοήθεια ηλεκτρικού ρεύματος. Η αρχή έγινε το 1800, όταν πρώτοι οι Νίκολσον και Κάρλαιλ παρατήρησαν πως όταν βύθιζαν δύο μεταλλικές ράβδους (ηλεκτρόδια) σε ορισμένα διαλύματα (ηλεκτρολύτες) και συνέδεαν έπειτα τις ράβδους με μια μπαταρία, το ηλεκτρικό ρεύμα κυκλοφορούσε μέσω του ηλεκτρολύτη. Μάλιστα στο ένα ή και στα δύο ηλεκτρόδια είχαμε εναπόθεση κάποιας ουσίας.

Αυτό εξηγείται ως εξής :

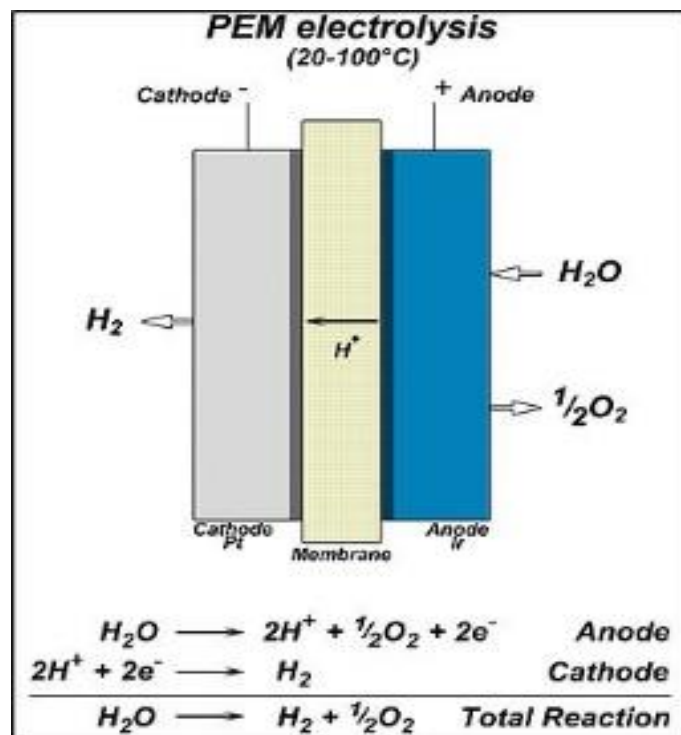
Υπάρχουν ενώσεις, οι οποίες όταν βρεθούν σε διάλυμα, διασπώνται σε θετικά και αρνητικά φορτισμένα σωματίδια. Έτσι όταν συνδέσουμε με μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος τα ηλεκτρόδια, τα θετικά φορτισμένα σωματίδια θα τα έλξει το αρνητικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος), ενώ τα αρνητικά φορτισμένα το θετικό ηλεκτρόδιο (άνοδος). Αυτά τα σωματίδια ο Φαραντέι τα ονόμασε "ιόντα" (από την μετοχή του Αρχαίου Ελληνικού "εἶμι" = "Εκείνο που πηγαίνει"). Έτσι με το φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης είναι δυνατόν να διασπαστεί μια ένωση στα στοιχεία που περιέχει, μια και τα ιόντα χάνουν το φορτίο τους στα ηλεκτρόδια και μετατρέπονται συνήθως σε ουδέτερα άτομα.

Η ηλεκτρόλυση χρησιμοποιείται για την εξαγωγή καθαρών μετάλλων από τα μεταλλεύματα τους, για τον "γαλβανισμό" υλικών (δηλαδή την επίστρωση μετάλλων με ασήμι, χρυσό ή άλλες ουσίες) κ.α.

2.2 Ηλεκτρολύτης

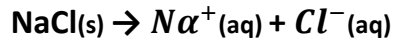
Ηλεκτρολύτης είναι οποιαδήποτε ουσία που σε υδατικό διάλυμα παρέχει ελεύθερα κινούμενα ιόντα και έτσι καθίσταται ηλεκτρικά αγώγιμο. Τα υδατικά ηλεκτρολυτικά διαλύματα είναι γνωστά ως ιοντικά διαλύματα. Υπάρχουν όμως, πέρα από υγρά διαλύματα, τηγμένοι ηλεκτρολύτες, σε μορφή τζελ (συναντώνται σε μπαταρίες) και στερεοί ηλεκτρολύτες (συναντώνται στους ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές) τους οποίους θα αναλύσουμε παρακάτω στο **2.2.1**.

Οι ηλεκτρολύτες γενικά υπάρχουν ως διαλύματα οξέων, βάσεων ή αλάτων. Επιπλέον, ορισμένα αέρια μπορούν να δράσουν ως ηλεκτρολύτες σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας ή χαμηλής πίεσης. Ηλεκτρολυτικά διαλύματα μπορούν επίσης να προκύψουν από την διάλυση μερικών βιολογικών (π.χ. DNA) και συνθετικών πολυμερών (π.χ. πολυστερίνη), πολυηλεκτρολυτών, που περιέχουν πολλαπλά φορτισμένες χαρακτηριστικές ομάδες.



Σχήμα 2.1 Δομή ηλεκτρολύτη τύπου PEM (μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων)

Ηλεκτρολυτικά διαλύματα κανονικά δημιουργούνται, όταν διαλύεται ένα άλας σε έναν διαλύτη, όπως νερό, και τα ξεχωριστά τμήματα διαχωρίζονται λόγω θερμοδυναμικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ του διαλύτη και της διαλυμένης ουσίας, σε μια διεργασία που ονομάζεται διάλυση. Για παράδειγμα όταν διαλυθεί μαγειρικό αλάτι σε νερό, το μόριο του αλατιού δίσταται στα συστατικά του μέρη σύμφωνα με την εξίσωση διάστασης:



Είναι επίσης δυνατό κάποιες ουσίες να αντιδρούν με το νερό, όταν προστίθενται σε αυτό, παράγοντας ιόντα. Για παράδειγμα το διοξείδιο του άνθρακα διαλύεται στο νερό και παράγει ένα διάλυμα που περιέχει ιόντα υδροξονίου, ανθρακικού άλατος, και ανθρακικού οξέος.

Επίσης, τα λιωμένα άλατα μπορούν να είναι ηλεκτρολύτες. Για παράδειγμα, όταν το χλωριούχο νάτριο (μαγειρικό αλάτι) είναι λιωμένο, τότε το ρευστό άγει τον ηλεκτρισμό.

2.2.1 Στερεοί ηλεκτρολύτες

Οι στερεοί ηλεκτρολύτες (ή αλλιώς υπερϊοντικοί αγωγοί) είναι στερεά υλικά με ηλεκτρική αγωγιμότητα που οφείλεται ολικά ή μερικά σε αγωγή ιόντων. Τα υλικά αυτά είναι στις περισσότερες περιπτώσεις κρυσταλλικά ή ημικρυσταλλικά υλικά. Η πρώτη αναφορά σε υλικό με ιδιότητες στερεού ηλεκτρολύτη έγινε το 1834 από τον M. Faraday ο οποίος παρατήρησε ότι ο φθοριούχος μόλυβδος (PbF_2) παρουσιάζει σημαντική ηλεκτρική αγωγιμότητα στο πεδίο των 500-700°C. Πέρασε σχεδόν ένας αιώνας για να επιβεβαιωθεί ότι η αγωγιμότητα οφείλεται σε αγωγή ιόντων F^- εξηγώντας την παρατήρηση του Faraday ενώ ανακαλύφθηκαν και άλλοι στερεοί ηλεκτρολύτες από τους Tubandt και Reinhold.

Σύντομα προέκυψε το συμπέρασμα ότι η διάχυση των ιόντων είναι δυνατόν να λάβει χώρα μέσα σε στερεά τόσο γρήγορα όσο και στα διαλύματα υγρών αλάτων. Οι εργασίες των Joffe, Frenkel και Wagner και Schottky εξηγούν μηχανιστικά την μετακίνηση ιόντων στα κρυσταλλικά πλέγματα των στερεών ηλεκτρολυτών. Με βάση αυτές τις εργασίες, μέχρι και σήμερα πιστεύεται ότι η αγωγή ιόντων οφείλεται στις ατέλειες του κρυσταλλικού πλέγματος και την μετακίνηση τους ή τη μετακίνηση ιόντων μέσω αυτών.

Οι στερεοί ηλεκτρολύτες καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα υλικών, από κεραμικά υλικά όπως η σταθεροποιημένη με ύττρια ζιρκόνια, που παρουσιάζει αγωγιμότητα ιόντων οξυγόνου σε υψηλές θερμοκρασίες, ως πολυμερείς μεμβράνες ιοντικής αγωγιμότητας όπως το Nafion το οποίο άγει πρωτόνια σε θερμοκρασία δωματίου.

Για την επιτυχή χρήση τους σε συστήματα κυψελών καυσίμου, οι στερεοί ηλεκτρολύτες είναι απαραίτητο να παρουσιάζουν και κάποιες άλλες ιδιότητες, επιπροσθέτως της ιοντικής αγωγιμότητας, Η χημική σταθερότητα είναι μία πολύ σημαντική ιδιότητα, καθώς ο ηλεκτρολύτης είναι εκτεθειμένος

σε αναγωγική και οξειδωτική ατμόσφαιρα ταυτόχρονα (κάθοδος και άνοδος αντίστοιχα).

Επίσης πρέπει να είναι δυνατόν ο ηλεκτρολύτης να κατεργαστεί με τρόπο τέτοιο ώστε να παραχθεί σε μορφή λεπτού φιλμ ή λεπτού πουλερικού υμενίου (στις περιπτώσεις των YSZ και Nafion αντίστοιχα) έτσι ώστε να μειώνονται όσο το δυνατόν περισσότερο οι ωμικές αντιστάσεις στο σύστημα της κυψέλης καυσίμου. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι επιθυμητό να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη έτσι ώστε να μην βραχυκυκλώνει το ηλεκτρικό σύστημα ενώ η ιοντική αγωγιμότητα να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη.

Τέλος είναι απαραίτητο ο στερεός ηλεκτρολύτης να μην είναι διαπερατός στα αέρια που τροφοδοτούνται στα ηλεκτρόδια καθώς έτσι θα υπάρχουν σοβαρές απώλειες στην αναπτυσσόμενη διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα ηλεκτρόδια.

2.2.1.1 Ταξινόμηση στερεών ηλεκτρολυτών

Η ταξινόμηση των στερεών ηλεκτρολυτών γίνεται κυρίως με βάση το ιόν που άγεται από αυτούς και το οποίο καθορίζει τη θερμοκρασία λειτουργίας. Με βάση αυτόν το διαχωρισμό οι κύριες κατηγορίες στερεών ηλεκτρολυτών είναι οι ακόλουθες:

- *Αγωγοί ιόντων οξυγόνου:* Πρόκειται κυρίως για στερεά διαλύματα οξειδίων δισθενών ή τρισθενών μετάλλων (π.χ. Y₂O₃, Yb₂O₃, CaO) σε οξείδια τετρασθενών μετάλλων (π.χ. ZrO₂, ThO₂, CeO₂). Ο πιο διαδεδομένος στερεός ηλεκτρολύτης αυτού του είδους είναι η σταθεροποιημένη με ύπτρια ή οξείδιο του ασβεστίου ζιρκόνια (6-10% mol Y₂O₃ ή 5-15% mol CaO σε ZrO₂) η οποία άγει ιόντα οξυγόνου στη θερμοκρασιακή περιοχή 400 — 1200 °C.
- *Αγωγοί ιόντων Na⁺:* Οι στερεοί αυτοί ηλεκτρολύτες είναι οξείδια του αλουμινίου Al₂O₃ ντοπαρισμένοι με νάτριο, Ο γενικός τύπος των ενώσεων αυτών είναι: Na_{1+x}Al₁₁O_{17+x/2} (0,15 ≤ x ≤ 0,3, όπου, το x εκφράζει την περίσσεια του νατρίου σε σχέση με τη στοιχειομετρική ένωση Na₂O₁₁Al₂O₃). Αυτοί οι στερεοί ηλεκτρολύτες παρουσιάζουν υψηλή αγωγιμότητα σε ένα θερμοκρασιακό εύρος 150-300°C και χρησιμοποιούνται στις μπαταρίες νατρίου-θείου. Ένας άλλος σημαντικός υπερϊοντικός αγωγός Na⁺ είναι το μικτό οξείδιο Na₃Zr₂Si₂PO₁₂, εμπορικά γνωστό ως NASICON.

- *Αγωγοί πρωτονίων H^+ και ιόντων λιθίου Li^+* : Η πιο σύγχρονη κατηγορία στερεών ηλεκτρολυτών, που αναμένεται να βρουν σημαντικό πεδίο εφαρμογής στις κυψέλες καυσίμου κινητών εφαρμογών, είναι οι ηλεκτρολύτες πρωτονίων, οι οποίοι συνήθως είναι ημικρυσταλλικά πολυμερή, όπως το Nafion 117, το οποίο είναι ένα συμπολυμερές πολυτετραφθωροαιθυλενίου και πολυθειοφθωριδίου και παρουσιάζει σημαντική αγωγιμότητα ακόμα και σε θερμοκρασία δωματίου.
- *Αγωγοί ιόντων K^+ , Cs^+ , Rb^+ , Tl^+* : Είναι πλήρως αντίστοιχη οικογένεια ηλεκτρολυτών με τους αγωγούς νατρίου, με τη διαφορά ότι στην $\beta - Al_2O_3$ και $\beta'' - Al_2O_3$ μεταβάλλεται το ιόν πρόσμειξης και η θερμοκρασία αγωγής είναι 200 — 400 °C.
- *Αγωγοί ιόντων Ag^+* : πρόκειται για ενώσεις όπως οι $\alpha - AgI$, $RbAg_4I_5$ και Ag_2HgI_4 . Η θερμοκρασιακή περιοχή που παρουσιάζουν αγωγιμότητα είναι στους 150 — 350 °C.
- *Αγωγοί ιόντων Cu^+* : ενώσεις όπως Cu_2Se και KCu_4I_5 που είναι αγωγίμες σε Cu^+ σε θερμοκρασίες 250 — 400 °C.
- *Αγωγοί ιόντων F^-* : αγωγιμότητα ιόντων F^- παρουσιάζουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες ενώσεις όπως PbF_2 (στους 500 °C) και το CaF_2 (στους 600 °C).

2.3 Ηλεκτρόλυση νερού

Κατά την ηλεκτρόλυση του νερού, το νερό διασπάται στα βασικά στοιχεία όπου το αποτελούν, υδρογόνο και οξυγόνο με την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της διεργασίας είναι η υψηλής καθαρότητας υδρογόνο που παράγεται. Ωστόσο, αποτελεί ακριβή μέθοδο εξαιτίας του κόστους του ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο απαιτείται.

Κατά την ηλεκτρόλυση, στην κάθοδο ιόντα υδρογόνου (πρωτόνια) ανάγονται σε υδρογόνο ενώ στην άνοδο το νερό οξειδώνεται σε οξυγόνο και

πρωτόνια. Οι διεργασίες αυτές περιγράφονται αντίστοιχα από τις παρακάτω αντιδράσεις:



και



οι οποίες μας δίνουν το συνολικό μηχανισμό της ηλεκτρόλυσης



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

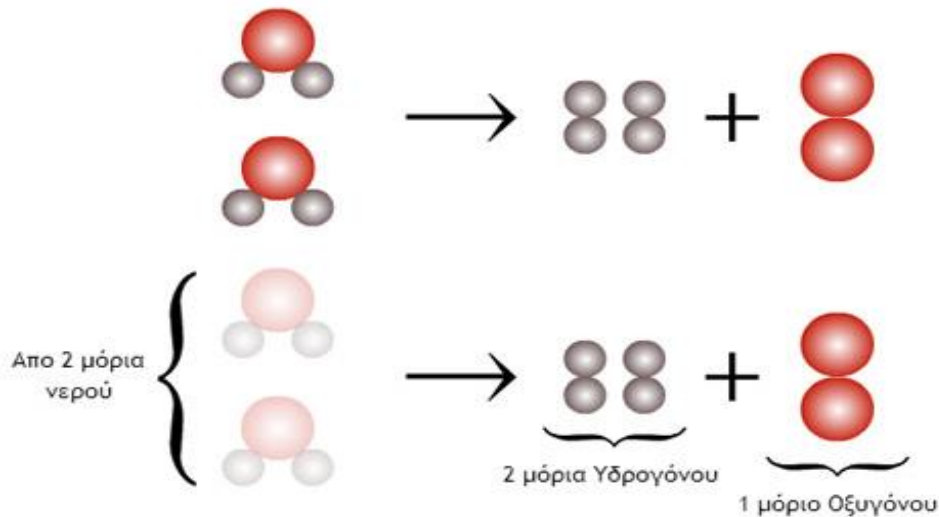
Θεωρητικά 1,23 V εφαρμοζόμενης τάσης αρκούν για τη διεξαγωγή της ηλεκτρόλυσης. Πρακτικά, χρειάζεται περισσότερη τάση (1,4 V με 1,55 V) όπως θα δούμε και στο σχήμα 2.2.

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



Σχήμα 2.2 Καμπύλη (I-V) ενός ηλεκτρολύτη τύπου PEM

Ένας ιδανικός καταλύτης για την οξείδωση του νερού θα πρέπει να εξισορροπεί την απαιτούμενη ενέργεια του κάθε ενδιάμεσου βήματος και επίσης να εξισορροπεί τους ρυθμούς μεταφοράς κάθε ηλεκτρονίου.



Σχήμα 2.3 Διεργασίες διασπάσεις νερού

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) για το οποίο θα επεκτείνουμε και παρακάτω στο **2.5.1**.

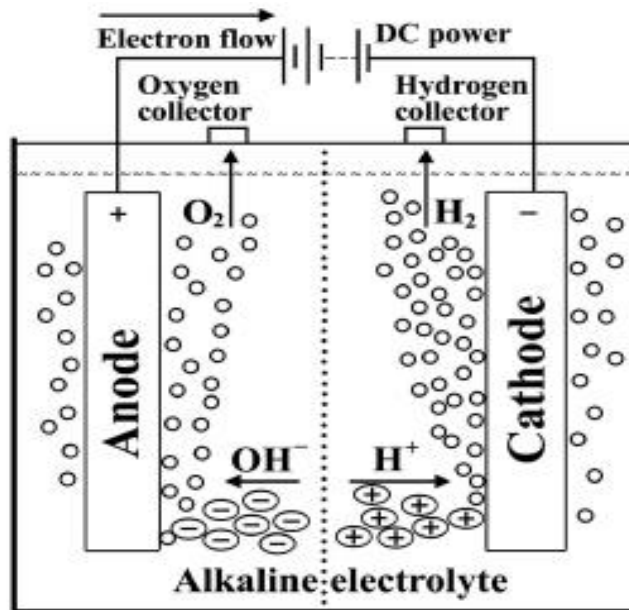
2.3.1 Ηλεκτρόλυση του νερού μέσω ΑΠΕ

Η πιο καθαρή και ασφαλής μέθοδος παραγωγής είναι η ηλεκτρόλυση νερού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) όπως η ηλιακή, αιολική και η γεωθερμία, όπως και εμείς θα χρησιμοποιούμε την ηλιακή ενέργεια μέσω Φ/Β πλαισίου για να κάνουμε ηλεκτρόλυση στην συγκεκριμένη άσκηση. Αυτή η τεχνική μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση της ενέργειας από ΑΠΕ σε μορφή υδρογόνου σε κατάλληλες δεξαμενές, το οποίο μπορεί να μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρισμό, ιδανικά μέσω κυψελών καυσίμου, σε άλλες περιόδους.

Υπάρχουν δύο ειδών μονάδες ηλεκτρόλυσης αρκετά αναπτυγμένες και οι δύο στις μέρες μας. Πέρα από τη συμβατική ηλεκτρόλυση νερού, όπου χρησιμοποιείται ένα μικρό-πορώδες διάφραγμα για το διαχωρισμό των παραγόμενων αερίων (οξυγόνο στην κάθοδο και υδρογόνο στην άνοδο) από το αλκαλικό διάλειμμα (Αλκαλικές Μονάδες Ηλεκτρόλυσης), κατασκευάζονται σήμερα μονάδες ηλεκτρόλυσης που παράγουν υδρογόνο σε

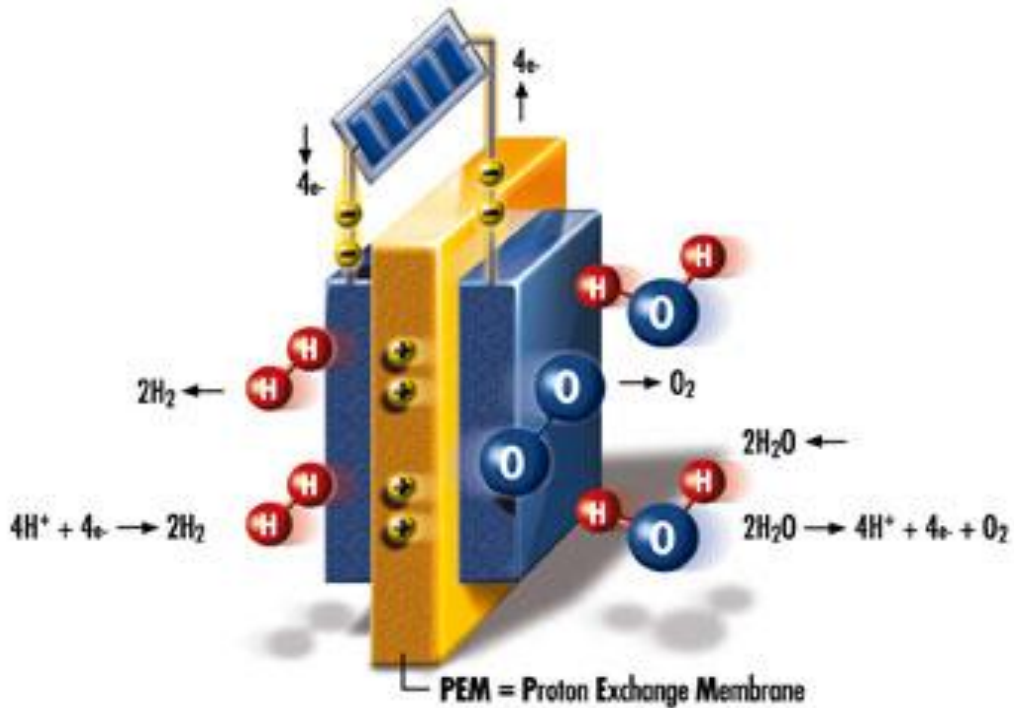
“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

υψηλή πίεση (έως 30bar), οι οποίες αποτελούνται από διπολικές πλάκες/ηλεκτρόδια, ενώ ερευνάται η λειτουργία τους σε πίεση έως 150bar.

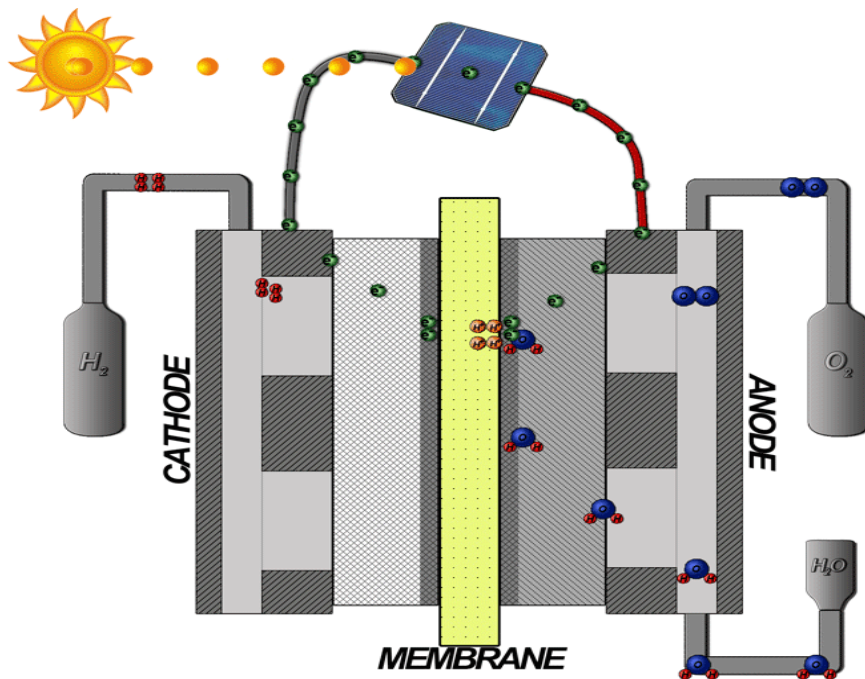


Σχήμα 2.4 Βασικό σχήμα για αλκαλική ηλεκτρόλυση

Επίσης έχουν αναπτυχθεί και μονάδες ηλεκτρόλυσης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων Μονάδες Ηλεκτρόλυσης τύπου PEM (Proton exchange membrane), οι οποίες δεν περιέχουν καυστική ποτά-σα (όπως οι αλκαλικές), παράγουν καθαρότερο υδρογόνο, ενώ υπάρχει προοπτική για παραγωγή υδρογόνου υπό πίεση.



Σχήμα 2.5 Χημικές διεργασίες για ηλεκτρόλυση τύπου PEM



Σχήμα 2.6 Βασικό σχήμα ηλεκτρόλυσης τύπου PEM με χρήση Φ/Β πλαισίου

Το κεντρικό τμήμα του ηλεκτρολύτη είναι μια πολυμερή μεμβράνη, η οποία όταν έρθει σε επαφή με το νερό έχει την ιδιότητα να αφήνει ελεύθερα την διέλευση διαμέσου της ιόντων υδρογόνου πρωτονίων, ενώ αποκλείει την διέλευση των αρνητικών φορτισμένων ιόντων.

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

Η μεμβράνη αυτή είναι καλυμμένη με δυο χημικούς καταλύτες πλατίνας (Pt) σε κάθε πλευρά της. Όταν μια συνεχής τάση μεγαλύτερη από την τάση ηλεκτρόλυσης του νερού εφαρμοστεί στα ηλεκτρόδια του ηλεκτρολύτη ο οποίος έχει έρθει σε επαφή με το νερό τότε αυτός διασπάει το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο. Πιο συγκεκριμένα στην άνοδο του ηλεκτρολύτη το νερό οξειδώνεται, ελευθερώνοντας μοριακό οξυγόνο, πρωτόνια (H^+ ιόντα) και ελεύθερα ηλεκτρόνια. Καθώς το αέριο οξυγόνο μαζεύεται στην άνοδο, τα πρωτόνια (κίτρινα +) μετακινούνται μέσω της μεμβράνης στην κάθοδο όπου εκεί λαμβάνοντας τα απαιτούμενα ηλεκτρόνια μετατρέπονται σε αέριο υδρογόνο.

3^ο Κεφάλαιο

Κυψέλες Καυσίμου

Περιγραφή κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό αναφερόμαστε:

- στις κυψέλες καυσίμου γενικά,
- στα ιστορικά στοιχεία των ΚΚ,
- στην αρχή λειτουργίας τους,
- στους τύπους κυψελών καυσίμου,
- και τέλος στις εφαρμογές των ΚΚ στις μέρες μας.

3.1 Εισαγωγή

Σήμερα το μεγαλύτερο πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα είναι η αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση. Οι συμβατικές ενεργειακές τεχνολογίες αναγνωρίζονται ευρέως ως το κύριο αίτιο καταστροφής του περιβάλλοντος από την άποψη, τόσο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, όσο και της εξάντλησης των φυσικών πόρων. Υπάρχουν ισχυρές ενδείξεις ότι η κλιματική αλλαγή οφείλεται κυρίως στις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα, οι οποίες προέρχονται σε μεγάλο βαθμό από την παραγωγή και μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας.

Είναι επομένως επιτακτική ανάγκη, η στροφή σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας και κυρίως στις ανανεώσιμες, οι οποίες όχι μόνο είναι φιλικές προς το περιβάλλον αλλά είναι και ανεξάντλητες.

Οι κυψέλες καυσίμου θεωρούνται μια ελκυστική ενεργειακή λύση αφού μπορούν να λειτουργήσουν συμπληρωματικά με τις μηχανές θέρμανσης και να μειώσουν την εξάρτηση της παραγωγής από ορυκτά καύσιμα. Για τον παραπάνω λόγο, η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου και η χρήση τους σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σε οικιακές εφαρμογές και σε εφαρμογές μέσων μεταφοράς (λεωφορεία, αυτοκίνητα, κ.α.) μελετάται έντονα τα τελευταία χρόνια.

Οι κυψέλες καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές συσκευές που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια του καυσίμου απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια με υψηλή απόδοση και χαμηλή περιβαλλοντική επιβάρυνση. Επειδή αποφεύγονται τα ενδιάμεσα στάδια της παραγωγής θερμότητας και του μηχανικού έργου των

συμβατικών μεθόδων παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, οι κυψέλες δεν επηρεάζονται από τους θερμοδυναμικούς περιορισμούς των θερμικών μηχανών, όπως η απόδοση Carnot. Επιπλέον, λόγω της απουσίας καύσης, έχουν ελάχιστους ρύπους. Αντίθετα με τις μπαταρίες, οι κυψέλες καυσίμου πρέπει να τροφοδοτούνται αδιάλειπτα με καύσιμο και οξειδωτική ουσία για να λειτουργούν συνεχώς.

Παρόλο που έχουν τη δυνατότητα να επεξεργαστούν ένα μεγάλο εύρος καυσίμων και οξειδωτικών ουσιών, το ενδιαφέρον εστιάζεται στις κυψέλες που χρησιμοποιούν για καύσιμο τα συνηθισμένα καύσιμα (ή παράγωγα τους) ή υδρογόνο και για οξειδωτική ουσία ατμοσφαιρικό αέρα. Τα συστήματα κυψελών καυσίμου εμφανίζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, διότι παρουσιάζουν υψηλή ενεργειακή απόδοση, υψηλή πυκνότητα ισχύος και είναι αθόρυβα, αφού δεν διαθέτουν κινούμενα μέρη.

Τα συστήματα για αυτή τη μετατροπή αντλούν την πρωτογενή ενέργεια κυρίως από αποθηκευμένο υδρογόνο ή υδρογονάνθρακες και μέσω κατάλληλης ηλεκτροχημικής διεργασίας παράγεται ηλεκτρική ενέργεια.

Η έξαρση του ενδιαφέροντος σε παγκόσμια κλίμακα γύρω από το υδρογόνο και τις τεχνολογίες αυτού έγκειται σε μια πληθώρα παραγόντων. Το υδρογόνο είναι σε θέση να προσφέρει:

- Μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.
- Διαφοροποίηση των ενεργειακών αποθεμάτων, μειώνοντας την εξάρτηση από τα συμβατικά καύσιμα, όπως είναι το πετρέλαιο.
- Βελτιωμένη τοπική ατμοσφαιρική ποιότητα.
- Βοήθεια στην εισαγωγή των νέων τεχνολογιών κυψελών καυσίμου.
- Διαμόρφωση ενός πλήρους αειφόρου ενεργειακού μέλλοντος. Ωστόσο, υπάρχουν και μειονεκτήματα στην χρήση του υδρογόνου ως καυσίμου, τα οποία και σχετίζονται σημαντικά με διάφορα τεχνικά προβλήματα λόγω έλλειψης της απαραίτητης υποδομής.

Το σημαντικότερο εξ' αυτών είναι η αποθήκευση του υδρογόνου. Δεδομένου ότι το υδρογόνο είναι πάρα πολύ ελαφρύ, η συμπίεση μεγάλης ποσότητας σε μικρού μεγέθους δεξαμενή είναι πάρα πολύ δύσκολη λόγω των υψηλών πιέσεων που χρειάζονται για να επιτευχθεί η υγροποίηση του.

Πρόβλημα επίσης αποτελεί η έλλειψη οργανωμένου δικτύου για τη διανομή του. Τελευταίο, αλλά εξίσου σημαντικό πρόβλημα, είναι η προέλευση της ενέργειας που δαπανάται για την παραγωγή του. Αν για παράδειγμα χρησιμοποιηθεί ενέργεια προερχόμενη από ορυκτά καύσιμα το συνολικό περιβαλλοντικό όφελος είναι μικρό. Για το λόγο αυτό είναι

επιθυμητό η ενέργεια που δαπανάται για την παραγωγή του υδρογόνου να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) όπως αιολική, ηλιακή, κτλ.

Κλείνοντας αυτή τη σύντομη εισαγωγή γύρω από τη θεωρία των κυψελών καυσίμου, είναι εμφανές για ποιους λόγους αποφασίσαμε να ασχοληθούμε με το συγκεκριμένο πείραμα το οποίο περιλαμβάνει κυψέλη καυσίμου και γενικότερα παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την βοήθεια των Α.Π.Ε, αλλά και γενικότερα για ποιους λόγους η διεθνής επιστημονική κοινότητα έχει στρέψει το βλέμμα της τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη όλο και πιο αποδοτικών συστημάτων κυψελών καυσίμου.

3.2 Ιστορική αναδρομή

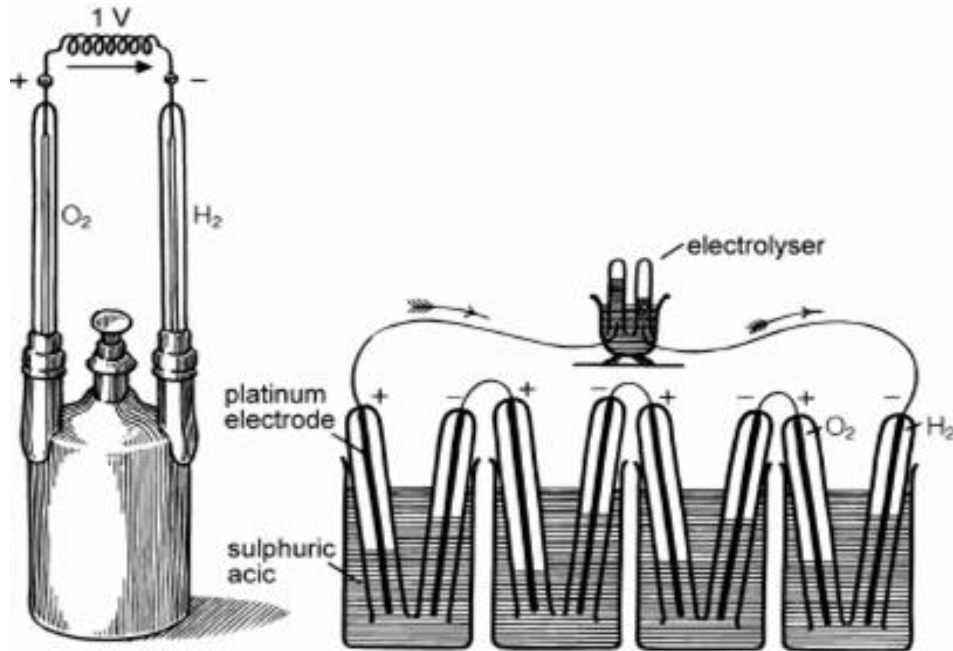
Παρόλο που για πολλούς οι κυψέλες καυσίμου θεωρούνται ένα σύγχρονο τεχνολογικό επίτευγμα, η αρχή λειτουργίας τους ανακαλύφθηκε πριν από 150 χρόνια περίπου. Πιο συγκεκριμένα, η ιστορία τους άρχισε το 1839 από το Βρετανό δικηγόρο/επιστήμονα Sir William Grove (1811 - 1896)(Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1 Sir William Grove (1811-1896)

Ο Grove μέσω απλών πειραμάτων διαπίστωσε ότι η ηλεκτρόλυση του νερού σε αραιό θειικό οξύ ήταν αντιστρέψιμη, δηλαδή, χρησιμοποιώντας δύο ηλεκτρόδια πλατίνας ημιβυθισμένα σε ένα υδατικό όξινο διάλυμα και το υπόλοιπο απομονωμένο χωριστά σε δύο δεξαμενές που περιέχουν οξυγόνο και υδρογόνο, κατάφερε να παρατηρήσει ότι το σύστημα παρήγαγε

ηλεκτρική ενέργεια. Επιπλέον, διαπίστωσε ότι με συνδυασμό εν σειρά πολλών κυψελών θα μπορούσε να παράγει αρκετό ηλεκτρικό ρεύμα για να κάνει την ηλεκτρόλυση του νερού(σχήμα 3.2). Σε τελικό στάδιο, το οξυγόνο και το υδρογόνο επανενώνονται.



Σχήμα 3.2 Η πρώτη κυψέλη καυσίμου του Sir William Grove

Η συσκευή αυτή ορίστηκε από τον Grove σαν μια μπαταρία βολταϊκού αερίου (gas voltaic battery), η οποία στην συνέχεια ορίστηκε ως η πρώτη κυψέλη καυσίμου.

Το 1889 ο χημικός Ludwig Mond (1839 - 1909) και ο βοηθός του Charles Langer επινόησαν τον όρο «κυψέλη καυσίμου» καθώς προσπαθούσαν να κατασκευάσουν την πρώτη συσκευή χρησιμοποιώντας ατμοσφαιρικό αέρα και βιομηχανικά αέρια του άνθρακα. Επιστήμονες και μηχανικοί σύντομα κατάλαβαν ότι θα έπρεπε να ξεπεραστούν πολλά εμπόδια, ώστε αυτή η νέα τεχνολογία να είναι εμπορικά διαθέσιμη.

Το 1893, ο Sir Friedrich Wilhelm Ostwald (1853 - 1932)(σχήμα 3.3), γερμανός χημικός, ο οποίος θεωρείται ένας από τους ιδρυτές της επιστήμης της φυσικοχημείας, ανέπτυξε ένα μεγάλο κομμάτι της αρχής λειτουργίας των κυψελών καυσίμου. Πιο συγκεκριμένα κατάφερε συσχετίζοντας τις φυσικές ιδιότητες με τις χημικές αντιδράσεις να λύσει το γρίφο γύρω από τη θεωρία του Grove. Τα ευρήματα του αυτά αποτέλεσαν τη βάση για μελλοντικά πειράματα.



Σχήμα 3.3 Sir Friedrich Wilhelm Ostwald (1853 - 1932)

Ωστόσο, μέχρι το τέλος του 19ου αιώνα, οι μηχανές εσωτερικής καύσης ήταν στο επίκεντρο και η εκτεταμένη εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων απομάκρυνε το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας από τις κυψέλες καυσίμου.

Το επόμενο μεγάλο κεφάλαιο στην ιστορία των κυψελών καυσίμου γράφτηκε από το μηχανικό Dr. Thomas Francis Bacon (1904 - 1992) (σχήμα 3.4), στο πανεπιστήμιο του Cambridge της Αγγλίας. Το 1932, ο Bacon επανέφερε στο προσκήνιο την κυψέλη καυσίμου που είχαν αναπτύξει οι Mond και Langer, εφαρμόζοντας διάφορες τροποποιήσεις στο αρχικό τους σχέδιο. Οι τροποποιήσεις αυτές συμπεριλάμβαναν την αντικατάσταση των ηλεκτροδίων πλατίνας με νικελίου γάζας που είναι λιγότερο δαπανηρά. Επίσης, αντικατέστησε τους ηλεκτρολύτες θειικού οξέος με αλκαλικό υδροξείδιο του καλίου, μια ουσία λιγότερο διαβρωτική για τα ηλεκτρόδια. Η συσκευή αυτή ονομάστηκε «Κυψέλη Bacon» και ήταν στην ουσία η πρώτη αλκαλική κυψέλη καυσίμου (Alkaline Fuel Cell - AFC).

Θα περάσουν άλλα 27 χρόνια έως ότου ο Bacon μπορέσει να υλοποιήσει μια πραγματικά λειτουργική κυψέλη. Το 1959, ο Bacon παρουσίασε μια κυψέλη καυσίμου ικανή να παράγει 6 kW ηλεκτρική ισχύ. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι το ίδιο έτος ο Harry Karl Ihrig κατασκεύασε το πρώτο

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

όχημα που χρησιμοποιεί κυψέλη καυσίμου, με ικανότητα ιπποδύναμης 20 hp (15kW) (σχήμα 3.5) .



Σχήμα 3.4 Dr. Thomas Francis Bacon (1904 - 1992)



Σχήμα 3.5 Το πρώτο όχημα που χρησιμοποιεί κυψέλη καυσίμου, με ικανότητα ιπποδύναμης 20 hp (15kW) του Harry Karl Ihrig

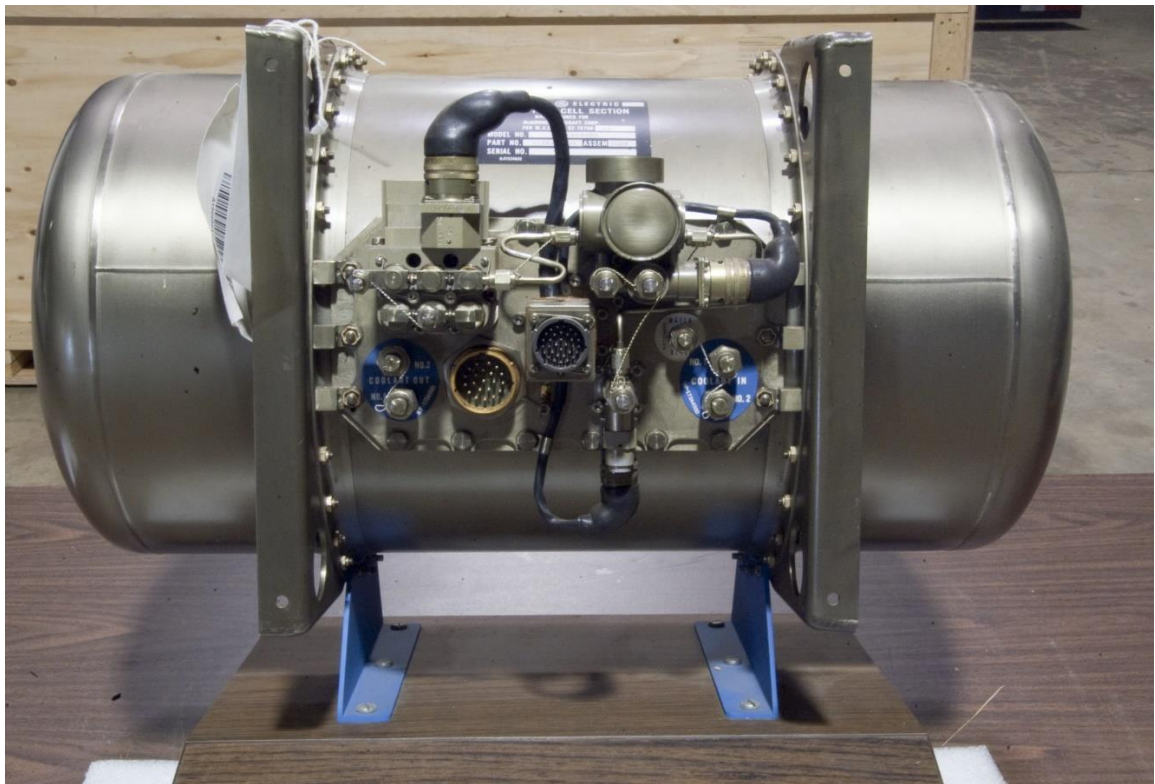
Στο πρόσφατο παρελθόν και ξεκινώντας από τα μέσα της δεκαετίας του 50 και της αρχές της δεκαετίας του 60, έχουμε την εμφάνιση ενός ζωηρού ενδιαφέροντος για την κυψέλη καυσίμου.

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

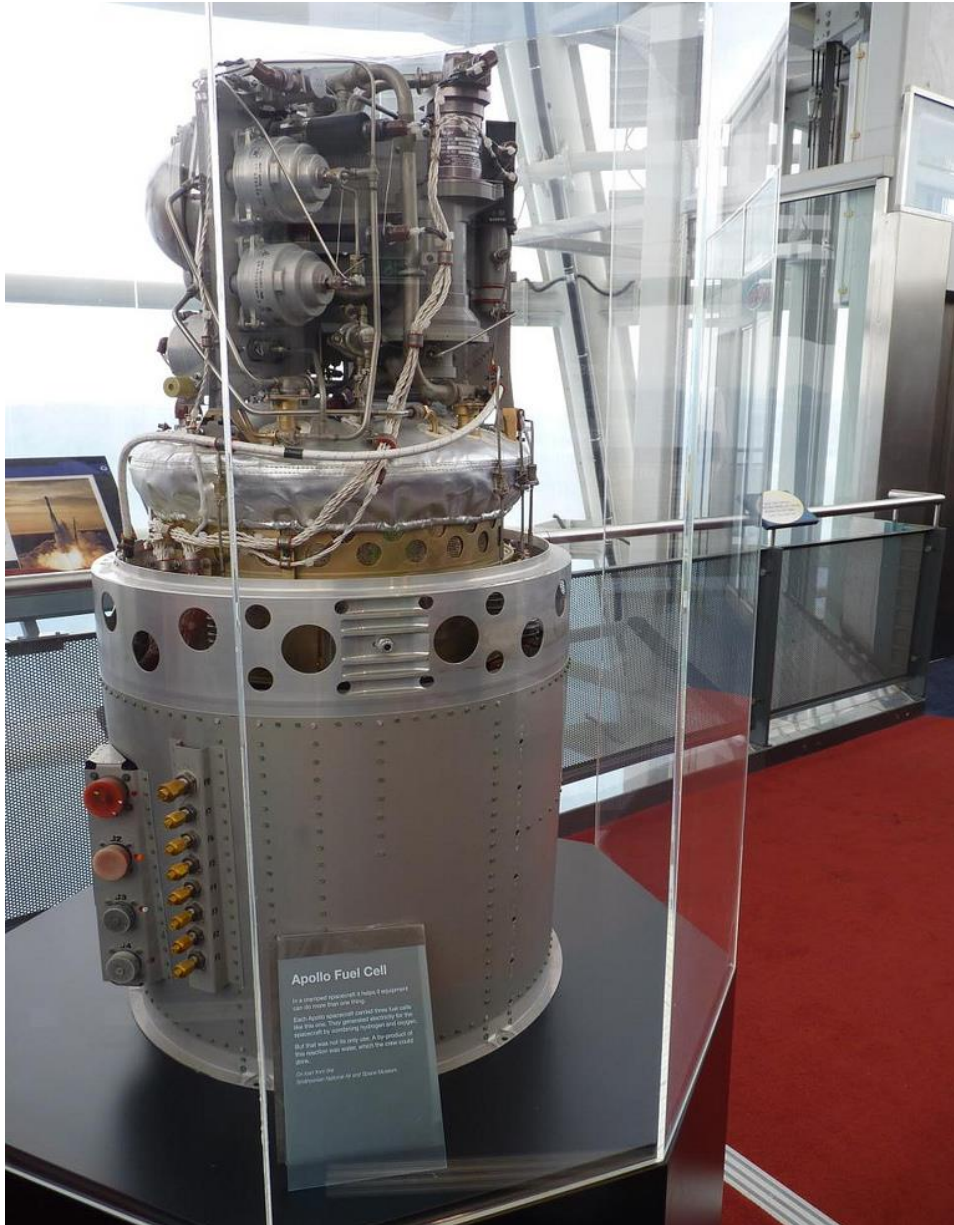
Πιο συγκεκριμένα, η NASA έψαχνε έναν τρόπο να τροφοδοτήσει μια σειρά από επικείμενες διαστημικές πτήσεις. Η χρήση μπαταριών για την τροφοδοσία είχε ήδη αποκλειστεί λόγω του πολύ μεγάλου βάρους που είχαν. Επίσης για εκείνη την εποχή η ηλιακή ενέργεια ήταν αρκετά ακριβή και η πυρηνική ενέργεια αρκετά επικίνδυνη. Για το λόγο αυτό η κυψέλη καυσίμου αποτέλεσε μια πιθανή λύση στην αναζήτηση της NASA για εναλλακτικό τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η NASA ξεκίνησε τη χρηματοδότηση ερευνών για την ανάπτυξη πρακτικά εφαρμόσιμων κυψελών καυσίμου που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια των διαστημικών πτήσεων. Οι έρευνες αυτές τελικά οδήγησαν στην κατασκευή της πρώτης κυψέλης καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMFC).

Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τα διαστημικά προγράμματα Gemini (σχήμα 3.6), Apollo (σχήμα 3.7) και Sracelab να χρησιμοποιήσουν κυψέλες καυσίμου οι οποίες βοήθησαν τον άνθρωπο να ταξιδέψει στο φεγγάρι το 1968.



Σχήμα 3.6 Η κυψέλη καυσίμου στο διαστημόπλοιο Gemini



Σχήμα 3.7 Η κυψέλη καυσίμου στο διαστημόπλοιο Apollo

Κατά τη διάρκεια τώρα της δεκαετίας του 70, η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου άρχισε να αναπτύσσεται κυρίως σε συστήματα που χρησιμοποιούνται από τους ανθρώπους σε καθημερινή βάση. Το πετρελαϊκό εμπάργκο του 1973 και του 1979 έδωσε ώθηση στην ερευνητική προσπάθεια για τις κυψέλες, καθώς οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και οι ευρωπαϊκές χώρες αναζητούσαν τρόπους για μείωση της εξάρτησης τους από τις εισαγωγές πετρελαίου.

Μια σειρά από εταιρείες και κυβερνητικές οργανώσεις ξεκίνησαν σοβαρή έρευνα για την αντιμετώπιση διαφόρων εμποδίων έτσι ώστε να υπάρξει εμπορική εκμετάλλευση των κυψελών καυσίμου.

Κατά τη χρονική περίοδο 1970 και 1980, όλη η ερευνητική προσπάθεια είχε επικεντρωθεί στην ανάπτυξη των υλικών που ήταν απαραίτητα, προσδιορίζοντας τη βέλτιστη πηγή καυσίμου και μειώνοντας δραστικά το κόστος της συγκεκριμένης τεχνολογίας.

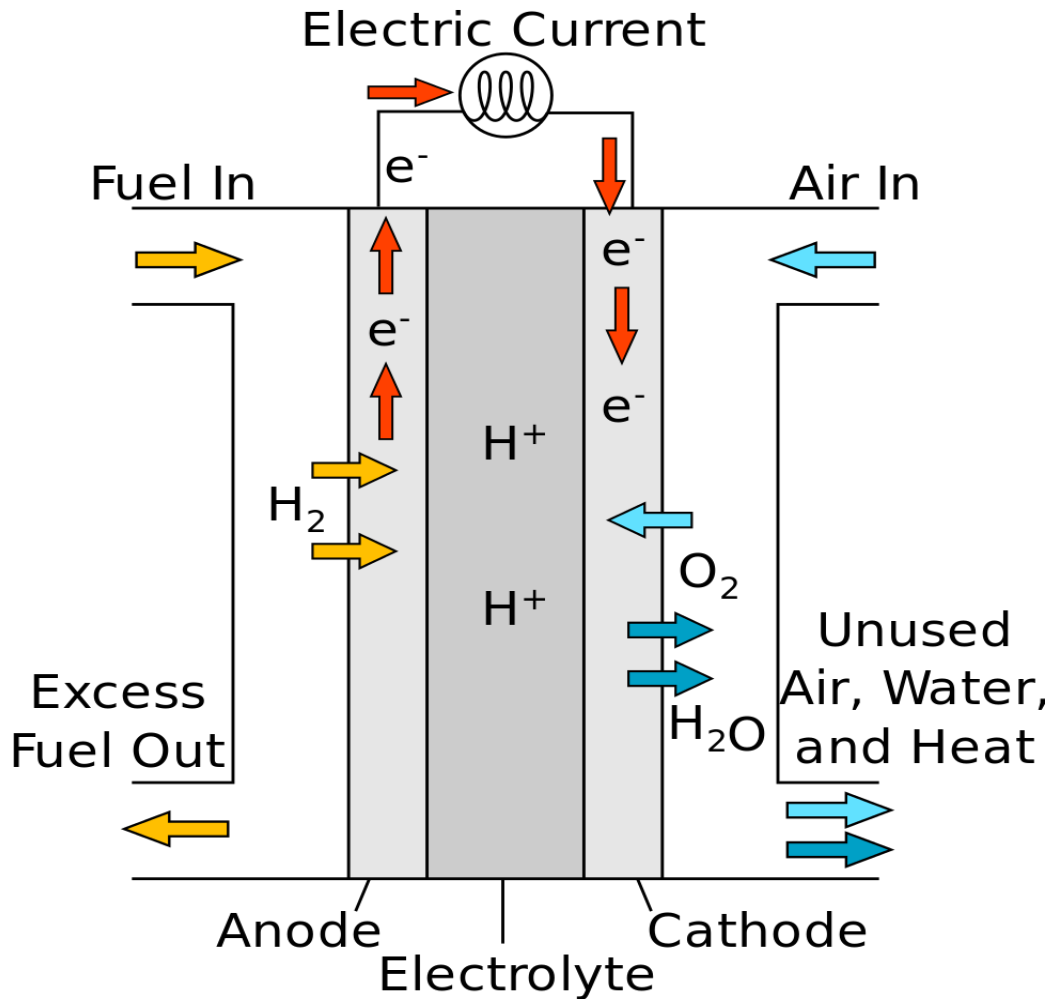
Το 1995, η Καναδική εταιρία Ballard Power Systems Inc. ανακοίνωσε την κατασκευή συστοιχίας κυψελών καυσίμου (ΣΚΚ) ισχύος 30 kW με πυκνότητα ισχύος 1 kW/lit. Με τη σύνδεση του ηλεκτρικού φορτίου, το οποίο αποτελεί το δρόμο κυκλοφορίας των ηλεκτρονίων, αρχίζει η αντίδραση και συνεπώς η λειτουργία της κυψέλης, η οποία σταματά αμέσως με την αποσύνδεση του φορτίου. Τέλος, τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει μεγάλα τεχνολογικά άλματα με αποτέλεσμα οι κυψέλες να έχουν πλέον εφαρμογή σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Πιο συγκεκριμένα οι κυψέλες καυσίμου, ανάλογα με τον τύπο και το μέγεθος τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οικιακή ή βιομηχανική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε τέτοιου είδους εφαρμογές, πέραν της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, γίνεται εκμετάλλευση και της παραγόμενης θερμότητας για τη θέρμανση χώρων ή τη θέρμανση υλικών σε μια βιομηχανική διεργασία. Επιπλέον, ευρεία είναι η χρήση των κυψελών καυσίμου τόσο σε επιβατικά οχήματα όσο και στα μέσα μαζικής μεταφοράς.

3.3 Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές διατάξεις που μετατρέπουν την χημική ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική και κάποιο ποσοστό της σε θερμότητα. Η βασική αρχή λειτουργίας της κυψέλης είναι το αντίθετο της ηλεκτρόλυσης (κεφάλαιο 2.1). Ηλεκτρόλυση είναι η διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο, όταν μέσα από αυτό ρέει ηλεκτρικό ρεύμα (σχήμα 3.8). Στις κυψέλες καυσίμου, το υδρογόνο «ξαναενώνεται» με το οξυγόνο, παράγοντας έτσι ηλεκτρικό ρεύμα.

Τα κύρια στοιχεία από τα οποία αποτελείται μια κυψέλη καυσίμου είναι τρία: ο ηλεκτρολύτης, ο οποίος επιτρέπει στα ιόντα να τον διαπερνούν, το ηλεκτρόδιο της ανόδου και το ηλεκτρόδιο της καθόδου. Τα ηλεκτρόδια αυτά κατασκευάζονται από πορώδη αγώγιμα υλικά με στόχο τη διάχυση του καυσίμου και της οξειδωτικής ουσίας καθώς και την αγωγή των ηλεκτρονίων.

Δύο ηλεκτρόδια άνθρακα, με επίστρωση καταλύτη, βρίσκονται μέσα σε έναν ηλεκτρολύτη (όξινο στην προκειμένη περίπτωση) και διαχωρίζονται από ένα φράγμα αερίων.



Σχήμα 3.8 Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου

Το καύσιμο, σε αυτή την περίπτωση το υδρογόνο, ιονίζεται στην επιφάνεια του ενός ηλεκτροδίου, ενώ ταυτόχρονα το οξειδωτικό μέσο, που είναι το οξυγόνο, ιονίζεται στο άλλο ηλεκτρόδιο.

Όταν τα ηλεκτρόδια ενώνονται αγώγιμα, μέσω εξωτερικού κυκλώματος το υδρογόνο διασπάται στην επιφάνεια του καταλύτη του ενός ηλεκτροδίου, σχηματίζοντας κατιόντα υδρογόνου (πρωτόνια) και ηλεκτρόνια. Τα πρωτόνια μετακινούνται μέσω του ηλεκτρολύτη (και του φράγματος των αερίων), στην καταλυτική επιφάνεια του ηλεκτροδίου στην πλευρά του οξυγόνου. Ταυτόχρονα, τα ηλεκτρόνια κινούνται μέσα από το εξωτερικό κύκλωμα, στην ίδια καταλυτική επιφάνεια.

Τέλος, το οξυγόνο, τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια ενώνονται στην καταλυτική επιφάνεια του ηλεκτροδίου σχηματίζοντας έτσι νερό. Η διαδικασία εξελίσσεται με φυσικό τρόπο και οφείλεται στο γεγονός ότι φορτισμένα σωματίδια κινούνται προς περιοχές χαμηλότερης ηλεκτροχημικής ενέργειας, για το σχηματισμό πιο σταθερών ενώσεων. Τα φορτισμένα σωματίδια του υδρογόνου και οξυγόνου κινούνται το ένα προς

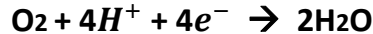
το άλλο και ενώνονται επειδή τα τελικά προϊόντα της αντίδρασης έχουν χαμηλότερη ηλεκτροχημική ενέργεια. Η κίνηση αυτών των φορτισμένων σωματιδίων, χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε αυτή την ηλεκτροχημική διαδικασία η μια πλευρά ονομάζεται άνοδος και η άλλη κάθοδος. Η λειτουργία των κυψελών καυσίμου βασίζεται στις θεμελιώδεις ηλεκτροχημικές αρχές. Πιο συγκεκριμένα, στο ηλεκτρόδιο της ανόδου, πραγματοποιείται η αντίδραση της οξείδωσης, στην οποία τα άτομα του υδρογόνου διασπώνται σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια σύμφωνα με την πιο κάτω εξίσωση:

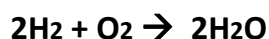


Στη συνέχεια τα ελεύθερα πρωτόνια περνούν μέσα από τον ηλεκτρολύτη και τα ηλεκτρόνια κινούνται μέσα από το εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα, προς την πλευρά της καθόδου.

Στην κάθοδο ο ατμοσφαιρικός αέρας, δίνει το απαραίτητο οξυγόνο για την πραγματοποίηση της αντίδρασης. Τα μόρια του οξυγόνου διασπώνται και ενώνονται με τα πρωτόνια που έρχονται μέσω του ηλεκτρολύτη και με τα ηλεκτρόνια που έρχονται από το εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα, σχηματίζοντας νερό σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:



Η ολική αντίδραση του αερίου υδρογόνου και οξυγόνου, για το σχηματισμό του νερού είναι:



Η τάση που αναπτύσσεται, είναι συναρτήσεως της ελεύθερης ενέργειας και των αντιδράσεων που πραγματοποιούνται. Η τάση που παράγεται από μια και μόνο κυψέλη κυμαίνεται από 0 έως και 1 V, ανάλογα με τις συνθήκες της κυψέλης και το μέγεθος του φορτίου που είναι συνδεδεμένο σε αυτήν. Μια τυπική τιμή της τάσης λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου είναι περίπου τα 0.7 V.

Για κυψέλες που χρησιμοποιούν υδρογόνο – οξυγόνο, σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας η ιδανική τιμή του δυναμικού που αναπτύσσεται είναι 1.23 V. Για την επίτευξη υψηλότερης και εκμεταλλεύσιμης τάσης πολλές κυψέλες καυσίμου στοιβάζονται σε σειρά δημιουργώντας μια συστοιχία κυψελών καυσίμου (ΣΚΚ).

3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κυψελών καυσίμου

3.4.1 Πλεονεκτήματα

Οι κυψέλες καυσίμου θεωρούνται μια ελκυστική ενεργειακή λύση λόγω του ότι παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα, τα οποία είναι:

- Ευελιξία στην επιλογή καυσίμου (φυσικό αέριο, προπάνιο, αέριο χλωματερών, αέριο από δεξαμενές αναερόβιας χώνευσης ιλύος, ντίζελ, νάφθα, μεθανόλη, υδρογόνο).
- Δυνατότητα μετατροπής περίπου του 90% της ενέργειας, που περιέχεται σε ένα καύσιμο, σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα.
- Χαμηλότερες εκπομπές CO₂ και NO_x ανά KW παραγόμενης ισχύος. Ιδιαίτερα αν το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι το υδρογόνο το οποίο προέρχεται από ηλεκτρόλυση οδηγούμενη από ΑΠΕ, τότε έχουμε μηδενικές εκπομπές ρύπων σε ολόκληρο τον κύκλο λειτουργίας.
- Απουσία κινούμενων μερών το οποίο παραπέμπει σε στιβαρή κατασκευή με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και μικρότερη ανάγκη για συντήρηση.
- Ικανότητα για χρήση σε συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (Combined Heat and Power (CHP) systems), δηλαδή χρήση σε συστήματα ταυτόχρονης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας.
- Απουσία ανάγκης για χρήση συμβατικών καυσίμων όπως είναι το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, μειώνοντας έτσι την εξάρτηση από τις χώρες που παράγουν πετρέλαιο και αποκτώντας σαν χώρα μεγαλύτερη ενεργειακή ασφάλεια.
- Άμεση παροχή ενέργειας όταν τροφοδοτούνται με καύσιμο.

Επίσης είναι ενδιαφέρον το ερώτημα αν οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να ανταγωνιστούν τις συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Συνήθως, συγκρίνονται με τις μηχανές εσωτερικής καύσης και τις μπαταρίες και μπορούμε να πούμε ότι πλεονεκτούν σημαντικά έναντι αυτών για τους ακόλουθους λόγους.

- Οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν με μηδενικές εκπομπές ρυπογόνων ενώσεων όπως υδρογονάνθρακες ή οξειδία του αζώτου, όταν χρησιμοποιείται καθαρό υδρογόνο σαν καύσιμο. Στην περίπτωση τώρα, όπου σαν καύσιμο χρησιμοποιείται μίγμα αερίων πλούσιο σε υδρογόνο οι εκπομπές ρύπων είναι ασύγκριτα χαμηλότερες με αυτές

των συμβατικών μηχανών εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούν συμβατικά ορυκτά καύσιμα.

- Τα συστήματα κυψελών καυσίμου έχουν καλύτερη θερμοδυναμική απόδοση όταν συγκρίνονται με συμβατικές μηχανές θέρμανσης όπως μηχανές εσωτερικής καύσης και στροβίλους. Οι μηχανές εσωτερικής καύσης μετατρέπουν την χημική ενέργεια σε θερμότητα μέσω της καύσης, κάνοντας χρήση της θερμότητας αυτής για χρήσιμο έργο.
- Η απόδοση των κυψελών καυσίμου δεν επηρεάζονται σχεδόν καθόλου από τυχόν μεταβολές του φορτίου, κάτι που το οποίο τις καθιστά ιδανική λύση για λειτουργία με μερικό φορτίο, σε αντίθεση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης που η απόδοση τους μειώνεται σημαντικά αν εργάζονται υπό φορτίο με τιμή πολύ μικρότερη του ονομαστικού.
- Τα επίπεδα θορύβου των κυψελών είναι πάρα πολύ χαμηλά σε αντίθεση με τις συμβατικές γεννήτριες. Αυτό τις καθιστά κατάλληλες για χρήση σε δημόσια κτήρια, όπως για παράδειγμα νοσοκομεία, σε στρατιωτικές εφαρμογές και σε εφεδρικά συστήματα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Οι παραδοσιακοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καταλαμβάνουν μεγάλο χώρο έτσι ώστε να καταφέρουν να αποκτήσουν την απαραίτητη αποτελεσματικότητα, ενώ οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να επιτύχουν μεγάλες αποδόσεις σε οποιαδήποτε κλίμακα. Συνεπώς οι κυψέλες είναι κατάλληλες για μικρές φορητές συσκευές, τη μεταφορά και τις κατοικίες.
- Η λειτουργία των κυψελών καυσίμου είναι συνεχής και αδιάλειπτη όσο τροφοδοτούνται με καύσιμα σε αντίθεση με τις μπαταρίες όπου καθίστανται άχρηστες όταν τα χημικά τους εξαντληθούν.
- Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ως προϊόν οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν ιδανική επιλογή, σε αντίθεση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης και τις μπαταρίες, λόγω του ότι απαιτούνται λιγότερες μετατροπές ενέργειας. Ακόμα ένας λόγος που οι κυψέλες επιτυγχάνουν καλύτερη απόδοση.
- Σε αντίθεση με τις μπαταρίες, οι κυψέλες καυσίμου δεν παρουσιάζουν το «φαινόμενο μνήμης» (memory effect) όταν ανεφοδιάζονται. Ο όρος memory ή battery effect παρουσιάζεται κατά τη συχνή επαναφόρτιση των μπαταριών, κυρίως σε μπαταρίες τύπου Νικελίου Καδμίου (Ni-Cd), και οδηγεί στο να διαρκεί η φόρτιση της μπαταρίας λιγότερο χρόνο. Η μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας σταδιακά μειώνεται, αφού η μπαταρία τείνει να «θυμάται» την προηγούμενη, μικρότερη χωρητικότητα.

3.4.2 Μειονεκτήματα

Ωστόσο, παρά τα προφανή πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου υπάρχουν ακόμα μια σειρά από θέματα τα οποία πρέπει να ξεπεραστούν προκειμένου οι κυψέλες να γίνουν ανταγωνιστικές ως προς τις συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

- Είναι απαραίτητη η σημαντική μείωση του κόστους προκειμένου να φτάσουν στη μαζική παραγωγή. Το κόστος αυτό προέρχεται όχι από το ίδιο το υδρογόνο το οποίο σαν καύσιμο βρίσκεται σε αφθονία, αλλά από τη δυσκολία στην παραγωγή, στην αποθήκευση και στη μεταφορά του.
- Οι υγροί υδρογονάνθρακες που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή υδρογόνου μπορεί να μην είναι διαθέσιμοι σε ποσότητες επαρκείς για συνεχή παραγωγή υδρογόνου.
- Λόγω του υψηλού χρόνου εκκίνησης που έχουν οι κυψέλες καυσίμου είναι απαραίτητη η χρήση ακριβών υλικών και ανθεκτικών στις υψηλές θερμοκρασίες.
- Η θερμοδυναμική απόδοση (70-85%) της αντίδρασης εξαρτάται αποκλειστικά από την καθαρότητα του υδρογόνου.
- Το παραγόμενο μονοξείδιο του άνθρακα μπορεί να προκαλέσει αρκετά προβλήματα στις κυψέλες με το βασικότερο να είναι η μείωση της απόδοσης της μεμβράνης της.
- Περιλαμβάνουν πολύ ακριβούς καταλύτες, των οποίων οι ιδιότητες μπορεί να αλλοιωθούν από τις θειικές ενώσεις του καυσίμου.

3.5 ΤΥΠΟΙ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

3.5.1 Εισαγωγή

Υπάρχουν δυο διαφορετικοί τρόποι για να ταξινομηθούν οι κυψέλες καυσίμου. Ο πρώτος τρόπος αφορά ίσως τον κυριότερο παράγοντα της λειτουργίας μιας κυψέλης, δηλαδή τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιεί.

Ο παράγοντας αυτός καθορίζει τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά και τις βασικές ιδιότητες της κυψέλης καυσίμου. Πιο συγκεκριμένα, καθορίζει το υλικό κατασκευής, το μέγεθος, την πυκνότητα ισχύος, τη θερμοκρασία λειτουργίας και το χρησιμοποιούμενο καύσιμο της κυψέλης, καθώς και τον τρόπο επεξεργασίας του.

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

Η ταξινόμηση των κυψελών καυσίμου με βάση των ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν είναι η εξής:

- **Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (Alkaline Fuel Cell - AFC)**
- **Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMFC)**
- **Κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης (Direct Methanol Fuel Cell – DMFC)**
- **Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cell - PAFC)**
- **Κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (Molten Carbonate Fuel Cell - MCFC)**
- **Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (Solid Oxide Fuel Cell - SOFC)**

Ο δεύτερος τρόπος ταξινόμησης τους έχει να κάνει με τη θερμοκρασία λειτουργίας τους. Ουσιαστικά ο παράγοντας αυτός είναι αποτέλεσμα του πρώτου κριτηρίου, παρ’ όλα αυτά όμως συνήθως αποτελεί πρωταρχικό στάδιο στην πρακτική επιλογή μιας ΚΚ για το αν είναι κατάλληλη για την εφαρμογή που θα χρησιμοποιηθεί.

Χαμηλής θερμοκρασίας (50 - 100 °C):

- Αλκαλικές ΚΚ (AFC)
- Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)
- Κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC)

Μεσαίας θερμοκρασίας (150 - 220 °C):

- Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)

Υψηλής θερμοκρασίας (600 - 1000 °C):

- Οι κυψέλες στερεού οξειδίου (SOFC)
- Κυψέλες καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (MCFC)

Παρακάτω στο σχήμα 3.9 υπάρχει και ο πίνακας των κυψελών καυσίμου και τα χαρακτηριστικά τους. Στους παρακάτω παράγραφους θα αναλύσουμε χωριστά τον κάθε τύπο των κυψελών καυσίμου. Τα εργαστηριακά πειράματα (κεφάλαιο 4) γίνονται με την βοήθεια της διάταξης PEMPower1-ECO η οποία χρησιμοποιεί κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) για το λόγω αυτό θα δώσουμε παραπάνω βάση σε αυτήν την κατηγορία κυψελών.

Σύγκριση διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου

Τύπος	Ιόν	T	n	Εφαρμογές-Σημειώσεις
Πολύμερ. Μembrάνης PEM	H ⁺	70-90 °C	50-80%	Οχήματα και φορητές διατάξεις 20 kW
Μεθανόλης DMFC	H ⁺	70-90 °C	35-60%	Υπό ανάπτυξη – Φορητές συσκευές Πιθανή λύση στο πρόβλημα της αποθήκευσης H ₂
Φωσφορικού οξέος PAFC	H ⁺	150-210 °C	35-45%	Εμπορικά διαθέσιμες Μεγάλες μονάδες συμπαραγωγής 500 kW
Στερεού οξειδίου SOFC	O ²⁻	1000-1100 °C	50-60%	Γεννήτριες → 500 kW - 100 MW
Τηγμένου άνθρακα MCFC	CO ₃ ²⁻	550-650 °C	45-60%	Γεννήτριες → 500 kW - 100 MW
Αλκαλικού Ηλεκ/τη AEFC	OH ⁻	70-90 °C	50-65%	Αεροδιαστημική, 200 kW

Σχήμα 3.9 Χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου

3.5.2 Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC)

Η αλκαλική κυψέλη καυσίμου ήταν από τις πρώτες τεχνολογίες των κυψελών που χρησιμοποιήθηκαν στο διαστημικό πρόγραμμα της NASA για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και νερού για το διαστημικό σκάφος.

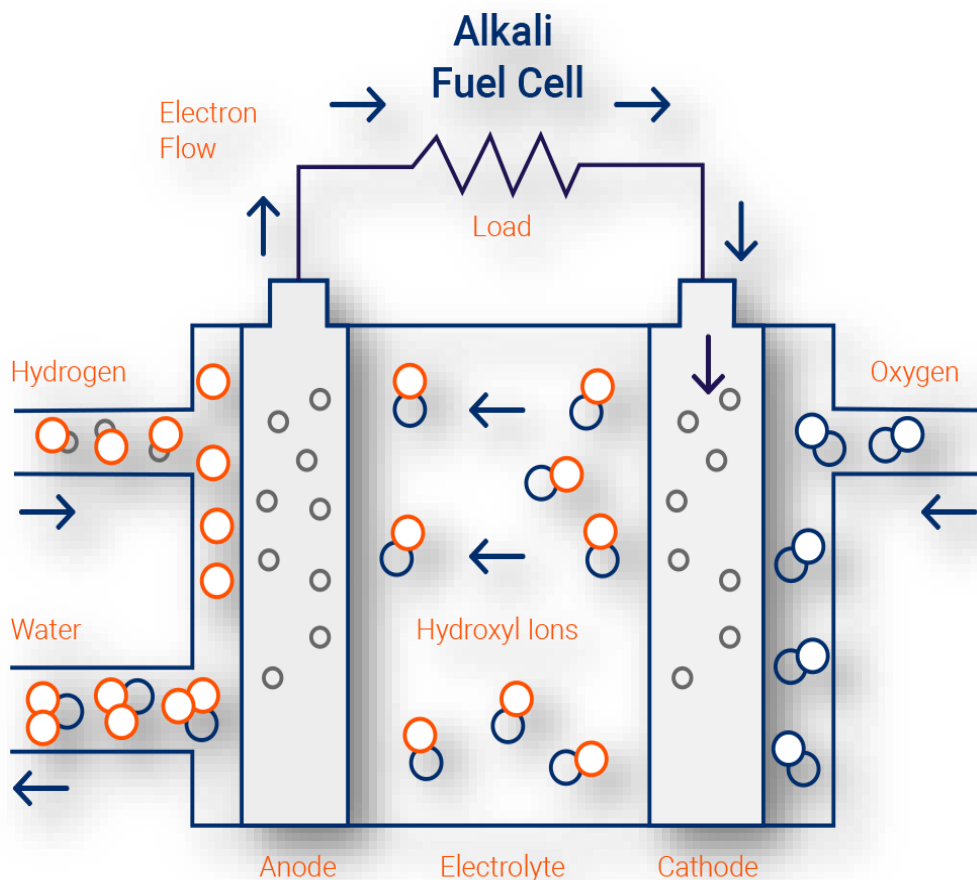
Στην κυψέλη αυτή χρησιμοποιείται συνήθως ένα διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH) ως ηλεκτρολύτης. Είναι επίσης δυνατή και η χρήση υδροξειδίου του νατρίου (NaOH), με μερικά όμως μειονεκτήματα, με το κυριότερο να είναι η χαμηλότερη διαλυτότητα του ανθρακικού νατρίου (Na₂CO₃) σε σύγκριση με το ανθρακικό κάλιο (K₂CO₃). Το διάλυμα του ηλεκτρολύτη διατηρείται σε μια μήτρα που είναι συνήθως αμίαντος. Εκτός όμως από τον αμίαντο μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα υλικά, όπως για παράδειγμα, τιτανικό κάλιο (KTiO₃), φωσφορικό δημήτριο (CePO₄) ή ζιρκόνιο (ZrO₂).

Η μήτρα του ηλεκτρολύτη ουσιαστικά λειτουργεί και σαν διαχωριστής μεταξύ του μίγματος των αερίων καυσίμου και του οξειδωτικού. Στις πλείστες των περιπτώσεων ως καταλύτες χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια με υψηλή

περιεκτικότητα σε ευγενή μέταλλα. Επίσης, στοχεύοντας στην περαιτέρω μείωση του κόστους έχουν δοκιμαστεί ως ηλεκτροκαταλύτες και μη ευγενή μέταλλα, όπως για παράδειγμα νικέλιο (Ni) και άργυρος (Ag). Οι περιεκτικότητες σε ευγενή μέταλλα είναι της τάξης των 5 g/m².

Επιπλέον ο ηλεκτρολύτης είναι διεσπαρμένος σε πορώδη ηλεκτρόδια άνθρακα. Στην άνοδο της συγκεκριμένης κυψέλης καυσίμου μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε καθαρό υδρογόνο ή αμμωνία υπό τη μορφή προϊόντων διάσπασης της, δηλαδή 25% άζωτο, 75% υδρογόνο και μικρές ποσότητες αμμωνίας. Λόγω του υψηλού ποσοστού διάχυσης του υδρογόνου, στην περίπτωση της τροφοδοσίας με αμμωνία, το δυναμικό της κυψέλης μειώνεται σε μικρό βαθμό σε μέσες πυκνότητες ρεύματος. Ο καθαρισμός του αερίου από τα ανθρακούχα υπολείμματα θεωρείται απαραίτητος στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο το υδρογόνο.

Συνήθως η αλκαλική κυψέλη καυσίμου (σχήμα 3.10) λειτουργεί σε θερμοκρασίες περίπου 60 – 70°C. Έχει την ικανότητα να λειτουργεί και σε θερμοκρασίες από 23 έως 70°C και επίσης από 100 έως 250°C, ανάλογα με το ποσοστό του υδροξειδίου του καλίου στο διάλυμα.



Σχήμα 3.10 Δομή αλκαλικής κυψέλης καυσίμου

Η απόδοση της κυψέλης είναι αρκετά υψηλή φτάνοντας μέχρι και το 60 – 70% λόγω του ότι οι χημικές αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια γίνονται αρκετά γρήγορα και ειδικά σε σχέση με άλλους τύπους κυψελών καυσίμου γίνονται πολύ γρηγορότερα. Σε αυτό το γεγονός συντελεί επίσης και το ότι λειτουργεί σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, πράγμα που βοηθά και στο να έχει μικρή χρονική υστέρηση κατά την ψυχρή εκκίνηση. Η τυπική πυκνότητα ισχύος της είναι 0.1 – 0.3 W/cm² και οι προβλεπόμενες ώρες λειτουργίας της είναι πάνω από 10000 ώρες.

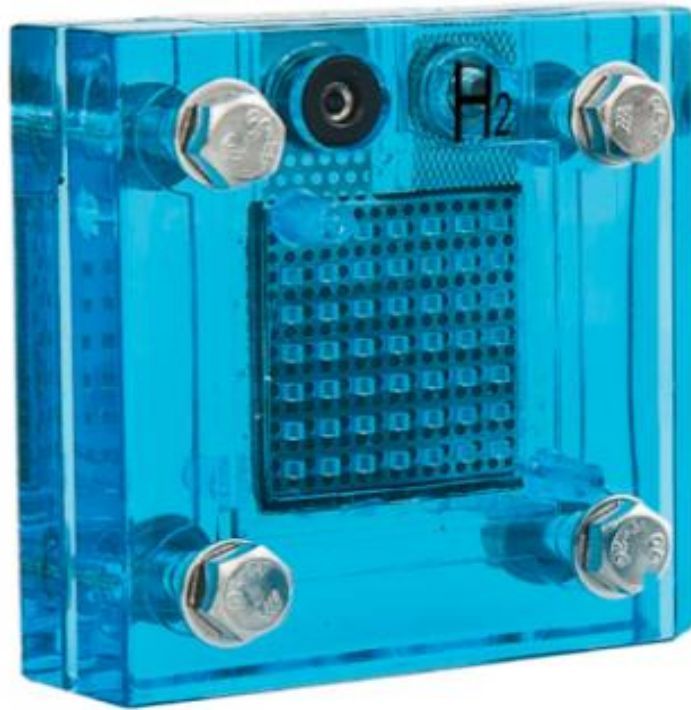


Σχήμα 3.11 Μια αλκαλική κυψέλη καυσίμου

Η AFC δεν έχει εμπορευματοποιηθεί πλήρως μέχρι σήμερα, γεγονός που αποδίδεται στα προβλήματα που έχουν να κάνουν με την διάρκεια ζωής και την υποβάθμιση της απόδοσης της λόγω της παρουσίας του CO₂. Το κόστος περιορίζεται αρκετά για εφαρμογές σε απομακρυσμένες περιοχές όπως το διάστημα ή κάτω από τη θάλασσα, περιορίζοντας έτσι την ευρύτερη χρήση τους. Ωστόσο, για να ανταγωνιστεί αποτελεσματικά την επικρατούσα τάση των εμπορικών αγορών, θα πρέπει να γίνει αποδοτικότερη. Μέχρι τώρα έχει αποδειχθεί επαρκώς η διατήρηση σταθερής λειτουργίας για περισσότερο από 10000 ώρες, όμως για να είναι οικονομικά βιώσιμη σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας κοινής ωφέλειας, αυτή η ΚΚ θα πρέπει να φτάσει σε μια κλίμακα των 40000 ωρών και άνω, κάτι το οποίο δεν έχει επιτευχθεί ακόμα λόγω προβλημάτων αντοχής των υλικών.

3.5.3 Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)

Η κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (σχήμα 3.12), γνωστή και ως κυψέλη στερεού πολυμερούς (Solid Polymer Fuel Cell (SPFC)), χρησιμοποιεί μια στερεή πολυμερή μεμβράνη αγωγό ιόντων H^+ , ως ηλεκτρολύτη.



Σχήμα 3.12 Μια κυψέλη καυσίμου τύπου PEM

Ο πολυμερής ηλεκτρολύτης από Nafion, είναι κατασκευασμένος σαν μια διάφανη μεμβράνη πάχους από 25.4 έως 254 μm και έχει την όψη ενός καθαρού χαρτιού περιτυλίγματος από σελοφάν. Όταν στην επιφάνεια της μεμβράνης υπάρχει η κατάλληλη ποσότητα υγρασίας, τότε η μεμβράνη γίνεται αγωγίμη μόνο για τα θετικά ιόντα του υδρογόνου και όχι για τα αρνητικά ιόντα του. Στις δύο πλευρές της μεμβράνης τοποθετούνται ηλεκτρόδια άνθρακος στα οποία έχει εναποτεθεί ένα στρώμα από Teflon (Polytetrafluoroethylene (PTFE)) εμπλουτισμένο με λευκόχρυσο ή ρουθίνιο, το οποίο παίζει και το ρόλο του καταλύτη.

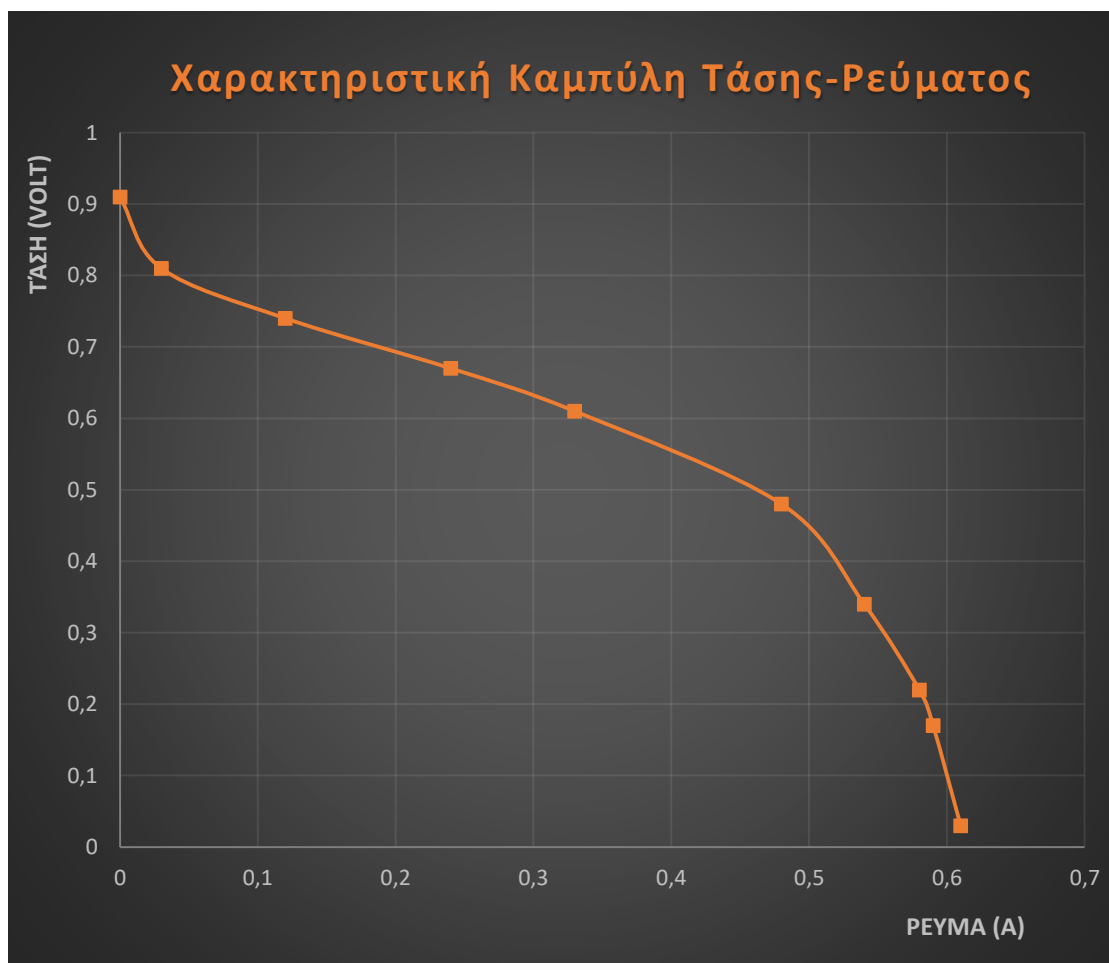
Στην συνέχεια υπάρχει το στρώμα διάχυσης αερίων, το οποίο αποτελείται συνήθως από υδροφοβικό χαρτί ή ύφασμα γραφίτη πάχους 0.2 – 0.5mm.

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

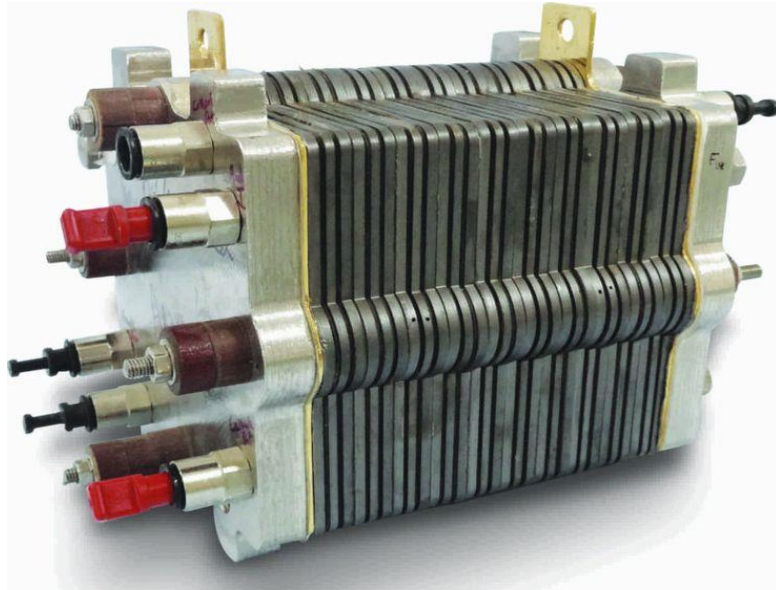
Η κύρια λειτουργία αυτού του στρώματος είναι να διαχέει ομοιόμορφα τα αέρια αντιδρώντα στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων, καθώς και να διατηρεί την κατάλληλη ποσότητα νερού επί της κυψέλης, ώστε να παρέχεται η απαραίτητη υγρασία στην μεμβράνη.

Η δομή της κυψέλης αυτής ολοκληρώνεται με τις πλάκες ροής αερίων και τις διπολικές πλάκες. Οι πλάκες ροής αερίων κατασκευάζονται από γραφίτη. Κάθε πλάκα ροής αερίων περιέχει κανάλια, από τα οποία περνούν τα αέρια αντιδρώντα, ώστε να διοχετευτούν στα ηλεκτρόδια και την μεμβράνη, και το παραγόμενο νερό το οποίο είναι αποτέλεσμα της αντίδρασης.

Η τάση που δημιουργεί μια κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων είναι μικρή, της τάξης των 0.7 V έως 1 V (στο σχήμα 3.13 παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική καμπύλη μίας PEMFC), γι' αυτό είναι αναγκαίο να ενώνονται σε σειρά πολλές κυψέλες αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την λειτουργική τάση, δημιουργώντας έτσι μια ΣΚΚ (σχήμα 3.14).

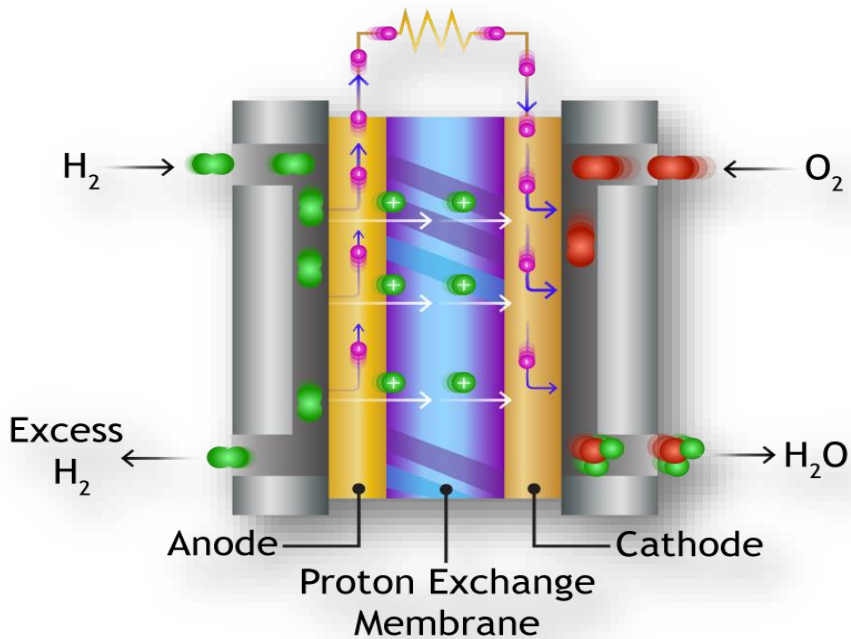


Σχήμα 3.13 Χαρακτηριστική καμπύλη μίας PEMFC ισχύς 300 mW



Σχήμα 3.14 Κυψέλη καυσίμου τύπου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων σε συστοιχία κυψελών καυσίμου

Επομένως είναι αναγκαίο οι πλάκες να έχουν και από τις δύο πλευρές τους χαραγμένα κανάλια. Επιπλέον κάθε πλάκα πρέπει να είναι ηλεκτρικά αγωγίμη, ώστε το ρεύμα που δημιουργείται κατά την ηλεκτροχημική αντίδραση να μπορεί να ρέει από την μία κυψέλη στην επόμενη και τελικά να φθάνει στις μεταλλικές πλάκες από τις οποίες λαμβάνεται η ισχύς τις συστοιχίας των κυψελών. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται μια εικόνα που δείχνει την δομή της PEMFC.

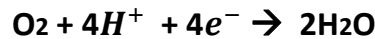


Σχήμα 3.15 Δομή της PEMFC

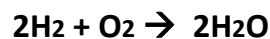
Σε κάθε κυψέλη καυσίμου λαμβάνει χώρα μια αντίδραση οξειδοαναγωγής στα ηλεκτρόδια της. Στις PEMFC το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως καύσιμο και το οξυγόνο ως οξειδωτικό. Πιο συγκεκριμένα, το υδρογόνο τροφοδοτεί την άνοδο της κυψέλης. Ερχόμενο σε επαφή με τον καταλύτη διαχωρίζεται σε θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου και σε ηλεκτρόνια παρακάτω βλέπουμε και την αντίδραση:



Τα ηλεκτρόνια τα οποία απελευθερώθηκαν μεταφέρονται μέσω εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος προς την κάθοδο δημιουργώντας έτσι ηλεκτρισμό. Στην κάθοδο τα ηλεκτρόνια που λαμβάνονται από το ηλεκτρόδιο και τα θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου τα οποία διαπερνούν τη μεμβράνη ενώνονται με το οξυγόνο και παράγεται νερό. Η αντίδραση που μόλις περιγράψαμε είναι η εξής:



Η συνολική αντίδραση:



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

Η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης προσδιορίζεται από τη θερμική ευστάθεια και τα χαρακτηριστικά αγωγιμότητας της πολυμερούς μεμβράνης που χρησιμοποιείται. Έτσι για να επιτύχει ικανοποιητική αγωγιμότητα ιόντων χρειάζεται νερό και άρα θερμοκρασία λειτουργίας μικρότερη των 100°C. Στην περίπτωση αυτή η θερμοκρασία λειτουργίας είναι σχετικά χαμηλή, μεταξύ 60 - 80°C, γεγονός που της επιτρέπει να έχει γρήγορη εκκίνηση περιορίζοντας έτσι την φθορά των υλικών της. Η ηλεκτρική απόδοση της είναι περίπου 50% αλλά επειδή η θερμοκρασία της αποβαλλόμενης θερμότητας είναι χαμηλή για να αξιοποιηθεί στον αναμορφωτή, η συνολική απόδοση του συστήματος περιορίζεται στο 42% και διατηρείται υψηλή για μεγάλο εύρος μεταβολής της ζήτησης ισχύος, πράγμα που την κάνει να έχει γρήγορη απόκριση σε μεταβολές τις ισχύος εξόδου.

Ακόμα, η πυκνότητα ισχύος της κυμαίνεται από 0.2 έως 0.7 W/cm², αρκετά υψηλή ώστε να την καθιστά συμπαγή και αρκετά ελαφριά. Επίσης έχει αποδειχθεί επαρκώς η διατήρηση σταθερής λειτουργίας της για περισσότερο από 40000 ώρες, επιτρέποντας της έτσι να είναι μια εμπορικά βιώσιμη εφαρμογή.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι μερικά από αυτά που καθιστούν, αυτό τον τύπο ΚΚ, ιδανική για διάφορες εφαρμογές κυρίως, στην αυτοκίνηση, σε μικρές οικιακές συσκευές και γενικά σε κινητές εφαρμογές, τομείς στους οποίους και υπάρχει μεγάλο ερευνητικό και επενδυτικό ενδιαφέρον.

Οι πρώτες εκδοχές της PEM, χρησιμοποιήθηκαν στο διαστημικό πρόγραμμα “Gemini” της NASA, έχοντας διάρκεια ζωής περίπου 500 ωρών, αρκετές για τις ανάγκες των πρώτων αποστολών.

Οι συνεχείς έρευνες οδήγησαν το 1967, στη δημιουργία καινούργιας πολυμερούς μεμβράνης που ονομάστηκε Nafion, η οποία καθιερώθηκε και χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα. Υπάρχουν, όμως ακόμη ορισμένα τεχνοοικονομικά προβλήματα τα οποία πρέπει να ξεπεραστούν. Λόγω της μεμβράνης Nafion οι κυψέλες PEM λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες πράγμα που καθιστά αναγκαία τη χρήση ευγενών μετάλλων, κυρίως λευκόχρυσου, ως καταλύτη. Στις θερμοκρασίες αυτές όμως το οξείδιο του άνθρακα χημειοροφάται έντονα στο λευκόχρυσο, υποβαθμίζοντας έτσι την καταλυτική του ενεργότητα και μειώνοντας την συνολική απόδοση της κυψέλης. Επομένως, το υδρογόνο, που χρησιμοποιείται ως καύσιμο, θα πρέπει να είναι υψηλής καθαρότητας αυξάνοντας έτσι σημαντικά το κόστος, που είναι ήδη επιβαρυνμένο λόγω του υψηλού κόστους της μεμβράνης και των μετάλλων του καταλύτη.

Επίσης ένα ακόμη σημαντικό πρόβλημα της κυψέλης PEM είναι η διαχείριση του νερού, καθώς η μεμβράνη δεν πρέπει ούτε να υπερχειλίζει ούτε όμως να μένει και χωρίς καθόλου υγρασία για να λειτουργεί σωστά.

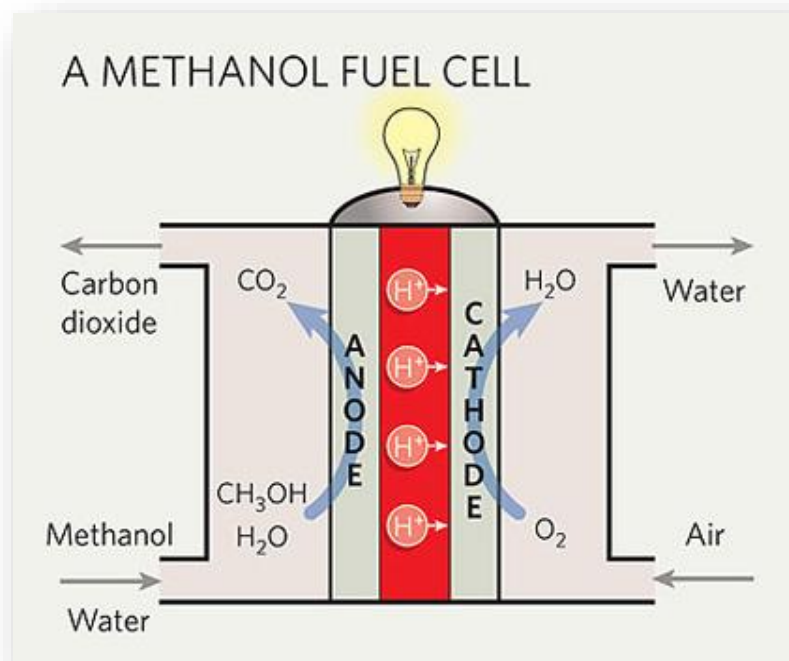
Με την συνεχή έρευνα και ανάπτυξη που υπάρχει σύντομα αυτά τα προβλήματα θα ξεπεραστούν επιτρέποντας στην PEMFC την ανάπτυξη της οικονομίας της και την ευρεία παραγωγή της.

3.5.4 Κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC)

Οι περισσότερες κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν ως καύσιμο το υδρογόνο. Η DMFC χρησιμοποιεί ως καύσιμο μεθανόλη χωρίς να απαιτείται η μετατροπή της σε υδρογόνο. Σε αυτή την περίπτωση η μεθανόλη είναι αυτή που οξειδώνεται στην άνοδο.

Η κατηγορία αυτή αποτελεί μια υποκατηγορία της PEMFC και είναι η πιο πρόσφατη τεχνολογία στην ιστορία των Fuel Cells. Ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο ίδιος με τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται στην κυψέλη PEM, δηλαδή μια πολυμερής μεμβράνη συνήθως από Nafion με την διαφορά ότι έχει μεγαλύτερο πάχος.

Ως καταλύτης χρησιμοποιείται λευκόχρυσος ή κράματα λευκόχρυσου ρουθηνίου. Η λειτουργία της DMFC (σχήμα 3.16) είναι παρόμοια με αυτή της κυψέλης τύπου PEM μιας και είναι ίδια τόσο ο ηλεκτρολύτης όσο και ο ανταλλάξιμος φορέας, δηλαδή τα θετικά ιόντα υδρογόνου. Επίσης ίδια είναι και η αντίδραση στην κάθοδο, με την διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση γίνεται στην άνοδο, η οποία ελκύει μόνη της απευθείας το υδρογόνο μέσω της υγρής μεθανόλης με την οποία και τροφοδοτείται.



Σχήμα 3.16 Δομή της κυψέλης καυσίμου άμεσης μεθανόλης

Πιο συγκεκριμένα η μεθανόλη οξειδώνεται στην άνοδο παρουσία νερού δημιουργώντας έτσι CO₂, πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια μέσω εξωτερικού κυκλώματος οδηγούνται στην κάθοδο, παράγοντας ηλεκτρισμό. Τα πρωτόνια με τη σειρά τους διαπερνούν την μεμβράνη και οδηγούνται στην κάθοδο όπου αντιδρούν με το οξυγόνο σχηματίζοντας έτσι νερό. Η συνολική αντίδραση καταναλώνει μεθανόλη και νερό σχηματίζοντας νερό και διοξείδιο του άνθρακα. Τα παραπροϊόντα αυτής της αντίδρασης είναι ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα.

Η DMFC αναπτύχθηκε στις αρχές τις δεκαετίας του 90. Όμως η χαμηλή απόδοση, καθώς και η χαμηλή πυκνότητα ισχύος της σε συνδυασμό με άλλα προβλήματα που παρουσιάστηκαν δεν βοήθησαν στην ανάδειξη της τεχνολογίας αυτής. Ωστόσο, οι βελτιώσεις που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα, κυρίως στον καταλύτη που χρησιμοποιείται, έχουν αυξήσει την

πυκνότητα ισχύος της μέχρι και είκοσι φορές κάνοντας την έτσι να φτάνει και τα 0.25 W/cm^2 , ενώ η απόδοση της μπορεί να φτάσει πλέον και το 40%.

Η θερμοκρασία λειτουργίας τους κυμαίνεται από $50 - 120^\circ\text{C}$, με τις υψηλές θερμοκρασίες να είναι συνήθως υπό πίεση. Στην περίπτωση αυτή όσο αυξημένη είναι η θερμοκρασία και η πίεση τόσο αυξάνεται η απόδοση της κυψέλης. Ωστόσο το πλεονέκτημα αυτό παύει να ισχύει λόγω των απωλειών που προκαλούνται τελικά στο πλήρες σύστημα με αποτέλεσμα να προτιμούνται διαμορφώσεις ατμοσφαιρικού αέρα.

Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου προέρχονται κυρίως από το καύσιμο που χρησιμοποιείται. Η μεθανόλη είναι το απλούστερο οργανικό καύσιμο, το οποίο μπορεί πολύ οικονομικά και αποδοτικά να παραχθεί σε μεγάλη κλίμακα, από καύσιμα όπως το κάρβουνο και το φυσικό αέριο. Επίσης η μεθανόλη είναι υγρό καύσιμο και έτσι μπορεί εύκολα να αποθηκευτεί και να διανεμηθεί ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, τομείς στους οποίους το υδρογόνο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας αυτή της κυψέλης καυσίμου σε συνδυασμό με την απουσία ανάγκης αναμορφωτή υδρογονανθράκων και τα πλεονεκτήματα της μεθανόλης που προαναφέρθηκαν, καθιστούν την DMFC ιδανική για εφαρμογές μικρού και μεσαίου μεγέθους όπως για παράδειγμα κινητά τηλέφωνα και φορητούς υπολογιστές.

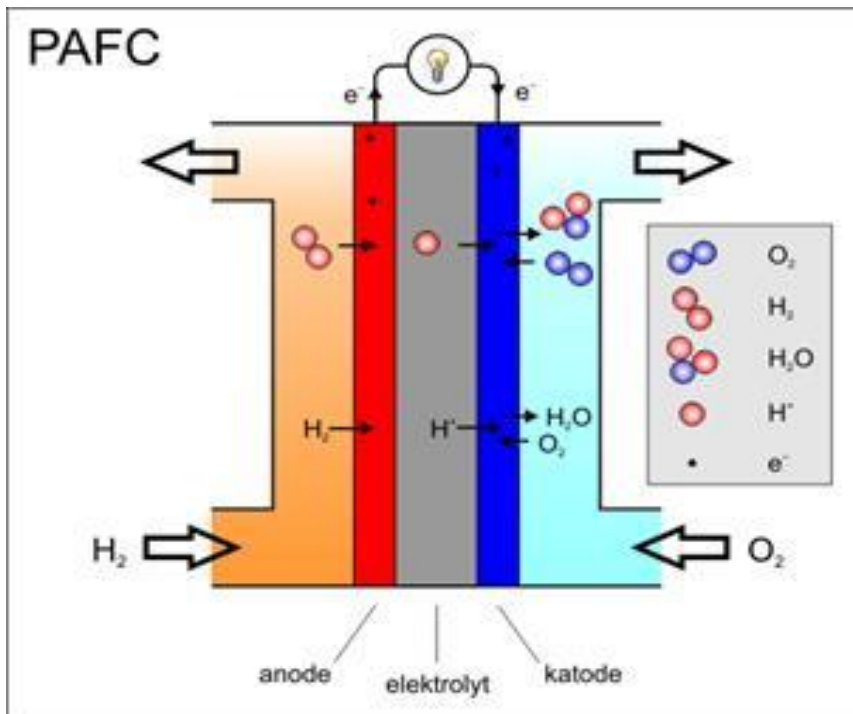
Η αντικατάσταση των μπαταριών λιθίου, είναι ο κύριος στόχος τους, αφού επαναφορτίζονται πολύ γρήγορα, αλλά βάζοντας λίγη μεθανόλη, μέσα στη συσκευή. Από την άλλη, το σημαντικότερο μειονέκτημα των κυψελών αυτού του τύπου, είναι ότι η οξείδωση της μεθανόλης σε χαμηλή θερμοκρασία απαιτεί πολύ ενεργό καταλύτη. Αυτό συνεπάγεται αυξημένη ποσότητα λευκόχρυσου πράγμα που αυξάνει σημαντικά το κόστος.

Ακόμα ένα σημαντικό μειονέκτημα της κυψέλης αυτής είναι ότι η μεθανόλη σε υψηλές συγκεντρώσεις έχει την τάση να διαχέεται μέσω της μεμβράνης προς την κάθοδο χωρίς να αντιδρά με τον καταλύτη, ένα φαινόμενο το οποίο ονομάζεται cross-over current. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού η μεθανόλη τροφοδοτείται σαν ένα ασθενές διάλυμα, κάτι το οποίο μειώνει σημαντικά την απόδοση της κυψέλης.

Ένα τελευταίο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι DMFC είναι η τοξικότητα της μεθανόλης. Για όλους τους παραπάνω λόγους, έχει αρχίσει να αναπτύσσεται ένας άλλος τύπος κυψέλης, η κυψέλη καυσίμου άμεσης αιθανόλης (Direct Ethanol Fuel Cell - DEFC), η οποία βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο με απόδοση περίπου στο μισό της DMFC, πράγμα που με την περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτής αναμένεται να βελτιωθεί.

3.5.5 Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)

Η κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος ήταν από τις πρώτες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου που εμπορευματοποιήθηκαν ευρέως. Αναπτύχθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 60 και ήδη από το 1970 προσέλκυσαν μεγάλο ερευνητικό και δοκιμαστικό πεδίο. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να βελτιωθούν σημαντικά η σταθερότητα, η απόδοση και το κόστος τους, χαρακτηριστικά τα οποία τους κατέστησαν έναν καλό υποψήφιο για σταθερές, κυρίως, εφαρμογές αλλά και για κινητές εφαρμογές όπως για παράδειγμα σε μεγάλα οχήματα όπως τα αστικά λεωφορεία. Η PAFC (σχήμα 3.17) χρησιμοποιεί έναν υγρό ηλεκτρολύτη ο οποίος αποτελείται από ένα πυκνό διάλυμα φωσφορικού οξέος (H_3PO_4) το οποίο τοποθετείται σε μια μήτρα από καρβίδιο του πυριτίου (SiC) με πολυτετραφθοροαιθυλένιο (SiC - PTFE).



Σχήμα 3.17 Δομή κυψέλης καυσίμου τύπου PAFC

Ο συγκεκριμένος ηλεκτρολύτης δρα ως το υγρό μεταφοράς των ιόντων υδρογόνου από την άνοδο στην κάθοδο και άγει τα ιόντα φορτίου μεταξύ των ηλεκτροδίων, συμπληρώνοντας έτσι το ηλεκτρικό κύκλωμα. Επειδή ο ηλεκτρολύτης είναι υγρός, πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά η εξάτμιση και η μετακίνηση ιόντων. Το ηλεκτρόδιο της ανόδου αποτελείται από λευκόχρυσο ο οποίος υποστηρίζεται σε πορώδη φύλλα άνθρακα. Η περιεκτικότητα σε λευκόχρυσο είναι περίπου ίση με 0.1 mg/cm^2 στην περίπτωση του ανοδικού ηλεκτροδίου και 0.5 mg/cm^2 στο ηλεκτρόδιο της καθόδου. Επίσης, ως καθοδικά ηλεκτρόδια έχουν εξεταστεί μέταλλα μετάπτωσης, όπως σίδηρος (Fe) και κοβάλτιο (Co), κ.α., καθώς και κράματα λευκόχρυσου με μέταλλα

μετάπτωσης, όπως τιτάνιο (Ti), βανάδιο (V), ζιρκόνιο (Zr) και χρώμιο (Cr). Τα ηλεκτρόδια, όμως εκτός του ηλεκτροκαταλύτη περιέχουν και 30 – 50% πολυτετραφθοροαιθυλένιο, το οποίο αποτελεί υλικό σύνδεσης που χρησιμοποιείται για την διαμόρφωση και την διατήρηση της δομής του ηλεκτροδίου.

Οι διπολικοί δίσκοι διαχωρίζουν τις μοναδιαίες κυψέλες καυσίμου και τις συνδέουν ηλεκτρικά, διαμορφώνοντας ταυτόχρονα τα απαραίτητα κανάλια διάχυσης των αερίων μιγμάτων.

Τα συμβατικά συστήματα PAFC λειτουργούν μεταξύ 150 και 200°C, επειδή σε χαμηλότερες θερμοκρασίες η αγωγιμότητα του φωσφορικού οξέος είναι αρκετά χαμηλή. Επιπλέον σε χαμηλότερες θερμοκρασίες το φωσφορικό οξύ γίνεται κακός ιοντικός αγωγός και το CO το οποίο σχηματίζεται πάνω στον καταλύτη δηλητηριάζει την άνοδο ρίχνοντας πάρα πολύ την απόδοση της κυψέλης.

Η ηλεκτρική απόδοση της PAFC κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα, δηλαδή 37 – 42%, συγκριτικά με τους υπόλοιπους τύπους κυψελών καυσίμου. Ωστόσο όταν λειτουργούν σε εφαρμογές CHP (Combined Heat and Power) η συνολική απόδοση φτάνει το 70 – 80%. Επίσης έχει διάρκεια ζωής μεγαλύτερη των 40000 ωρών λειτουργίας και μπορεί να ανταπεξέλθει σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος μεταξύ -32 και 49°C, επιτρέποντας της έτσι να είναι μια εμπορικά βιώσιμη εφαρμογή.

Η υψηλή απόδοση σε εφαρμογές CHP είναι ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα αυτού του τύπου ΚΚ. Επίσης, ακόμα ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι και η ανοχή η οποία παρουσιάζει στο CO και το CO₂. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να ανεχθεί το CO σε συγκέντρωση περίπου 2%, λόγω του ότι χρησιμοποιείται λευκόχρυσος στα ηλεκτρόδια, συγκέντρωση η οποία διευρύνει την επιλογή των καυσίμων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Ταυτόχρονα, υψηλή ανεκτικότητα παρουσιάζουν και στο CO₂ καθώς και στις «ακαθαρσίες» των ορυκτών καυσίμων που έχουν μετασχηματιστεί σε υδρογόνο.

Η κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος διαθέτει αρκετά υψηλή ωριμότητα σε επίπεδο ανάπτυξης και εμπορευματοποίησης βελτιώνοντας έτσι συνεχώς τα χαρακτηριστικά τους και μειώνοντας το κόστος. Στα μειονεκτήματα αυτή της ΚΚ συγκαταλέγονται το μεγάλο μέγεθος και βάρος. Λόγω του ότι παράγει σχετικά μικρή πυκνότητα ισχύος, περίπου 0.1 – 0.15 W/cm², σε σχέση με άλλα είδη ΚΚ, για διατάξεις ίδιου βάρους και όγκου, η κυψέλη αυτή είναι συχνά μεγάλη και βαριά. Η θερμοκρασία λειτουργίας της αποτελεί ακόμα ένα μειονέκτημα όσων αφορά τον χρόνο εκκίνησης, καθώς χρειάζονται αρκετό

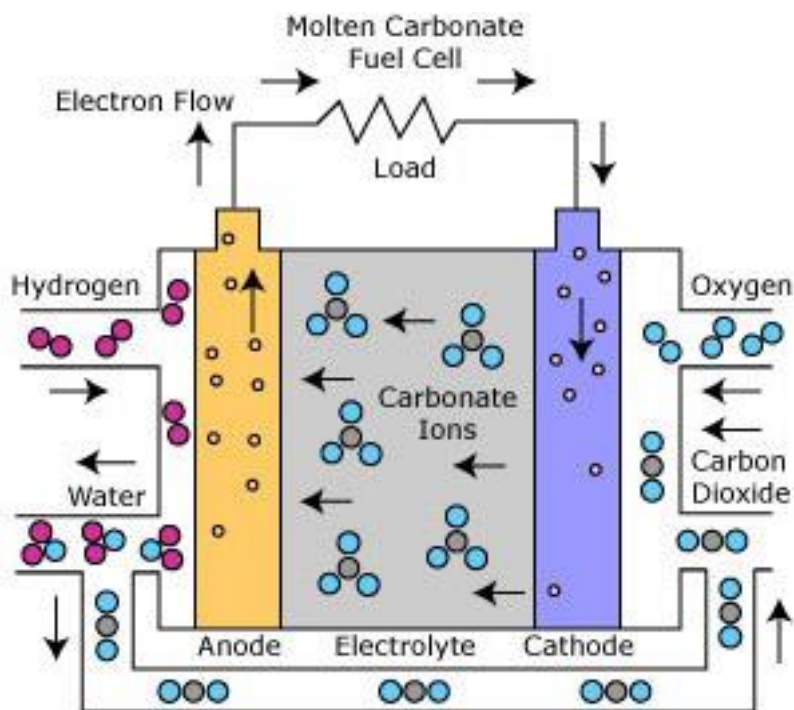
χρόνο για να φθάσουν στις συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Επιπλέον, λόγω της διάβρωσης του ανθρακικού υποβάθρου του καταλύτη και της πλάκας διαχωρισμού του φωσφορικού οξέος, καθώς και λόγω έναρξης της τήξης του λευκόχρυσου και υπερχείλισης του ηλεκτρολύτη σε υψηλές θερμοκρασίες η απόδοση της PAFC μπορεί να μειωθεί σημαντικά.

Τέλος, η χρησιμοποίηση ακριβών μετάλλων, όπως ο λευκόχρυσος ως καταλύτη και η απαίτηση εξωτερικής μονάδας αναμόρφωσης του καυσίμου, αυξάνουν σημαντικά το κόστος.

3.5.6 Κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (MCFC)

Η κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (MCFC) ανήκει στην κατηγορία των κυψελών υψηλών θερμοκρασιών. Αναπτύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1960, ωστόσο οι μέθοδοι κατασκευής, η απόδοση και η διάρκεια λειτουργίας της έχει βελτιωθεί σημαντικά με τα χρόνια.

Στις μέρες μας, το MCFC (σχήμα 3.18) αναπτύσσεται για την κατασκευή μονάδων ισχύος για βιομηχανικές και στρατιωτικές εφαρμογές. Η συγκεκριμένη κυψέλη χρησιμοποιεί ως ηλεκτρολύτη έναν συνδυασμό αλκαλικών ανθρακικών αλάτων, που διατηρούνται σε μια κεραμική μήτρα από κράμα οξειδίου του αργιλίου (Al_2O_3) και λιθίου (LiAlO_2).



Σχήμα 3.18 Δομή της κυψέλης καυσίμου MCFC

Η σύνθεση του ηλεκτρολύτη επιδρά σημαντικά στην απόδοση και την αντοχή της MCFC, καθώς ευθύνεται για το μεγαλύτερο ποσοστό (μεγαλύτερο από 70%) των ωμικών απωλειών στην κυψέλη. Λόγω του ότι η ΚΚ λειτουργεί σε θερμοκρασίες μεταξύ 600 - 700°C, τα ανθρακικά άλατα σχηματίζουν ένα τηγμένο άλας, το οποίο είναι αγωγός ανθρακικών ιόντων. Έτσι το ανθρακικό λίθιο (LiCO_3) παρουσιάζει υψηλότερη αγωγιμότητα από το ανθρακικό νάτριο (Na_2CO_3) και το ανθρακικό κάλιο (K_2CO_3), εντούτοις, η διαλυτότητα και διαχυτικότητα του αερίου μίγματος είναι σχετικά χαμηλή.

Οι ηλεκτρολύτες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι μίγματα ανθρακικών αλάτων καλίου / λιθίου για λειτουργία σε ατμοσφαιρική πίεση και ανθρακικά άλατα νατρίου / λιθίου για λειτουργία σε υψηλότερες πιέσεις. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν μη πολύτιμα μέταλλα ως καταλύτες στα ηλεκτρόδια της ανόδου και της κάθodu μειώνοντας αρκετά το κόστος. Έτσι στην άνοδο συνήθως χρησιμοποιείται κράμα νικελίου – χρωμίου (Ni-Cr) και στην κάθοδο οξείδιο του νικελίου (NiO).

Σε σύγκριση με τις υπόλοιπες κυψέλες, η MCFC δεν δηλητηριάζεται από το CO και το CO_2 , αντιθέτως χρησιμοποιεί τα οξείδια του άνθρακα ως καύσιμο, επιτρέποντας της έτσι να λειτουργεί αποτελεσματικά με μίγματα καυσίμων που περιέχουν CO_2 . Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να λειτουργεί με μίγματα που μπορούν να προέρχονται είτε από την αναμόρφωση των υδρογονανθράκων είτε από την αεριοποίηση του άνθρακα / λιγνίτη και της βιομάζας, μολονότι η ανάγκη για CO_2 στην κάθοδο απαιτεί είτε τη μεταφορά του από την έξοδο της ανόδου (συνήθης πρακτική) είτε την παραγωγή του από την καύση των απαερίων της ανόδου.

Επιπλέον, έχει ευρέως παρατηρηθεί ότι υπάρχει ευπάθεια δηλητηρίασης από το θείο (S) το οποίο και θα πρέπει να αφαιρεθεί πριν από την είσοδο του στην κυψέλη.

Η απόδοση της MCFC για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας φτάνει το 44%. Επίσης αν η αποβαλλόμενη θερμότητα χρησιμοποιηθεί για επεξεργασία καυσίμου ή σε CHP συστήματα, ο βαθμός απόδοσης της μπορεί να φτάσει και το 85%. Η κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος έχει αρκετά υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας, κάτι το οποίο παρουσιάζει, τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα σε σχέση με τις κυψέλες με χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι δεν απαιτούν εξωτερική συσκευή αναμόρφωσης του καυσίμου, για τη μετατροπή καυσίμων υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας σε υδρογόνο. Αυτό συμβαίνει γιατί σε αυτή τη θερμοκρασία λειτουργίας η αναμόρφωση του καυσίμου μπορεί να προκύψει μέσα στην κυψέλη με μια

διαδικασία που ονομάζεται εσωτερική αναμόρφωση, εξαλείφοντας την ανάγκη ενός εξωτερικού επεξεργαστή καυσίμου, μειώνοντας έτσι σημαντικά το κόστος.

Η MCFC μπορεί να λειτουργήσει με μια μεγάλη γκάμα από καύσιμα υδρογονανθράκων, όπως για παράδειγμα το φυσικό αέριο, το βιοαέριο, το μεθάνιο, το προπάνιο και καύσιμα που προέρχονται από γαιάνθρακα. Επίσης, ακόμα ένα πλεονέκτημα είναι η ικανότητα χρησιμοποίησης μη ευγενών μετάλλων ως καταλύτες, με αποτέλεσμα το σύστημα να γίνεται πιο απλό και πιο οικονομικό. Από την άλλη, η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας σε συνδυασμό με τον διαβρωτικό ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται, επιταχύνουν την αστοχία και τη διάβρωση των υλικών, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής των κυψελών.

Απαιτείτε επίσης σημαντικός χρόνος για την επίτευξη των θερμοκρασιών λειτουργίας με αποτέλεσμα την αργή εκκίνηση, ενώ οι αποκρίσεις σε μεταβολές της ζητούμενης ισχύος είναι αργές. Τα πιο πάνω χαρακτηριστικά καθιστούν την κυψέλη τηγμένου ανθρακικού άλατος, κατάλληλη για εφαρμογές σταθερής ισχύος, CHP παραγωγές, την αναμόρφωση μεθανίου και τις βιομηχανικές χρήσης, τομείς στους οποίους σήμερα έχουν αρκετές εφαρμογές.

3.5.7 Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)

Η SOFC (σχήμα 3.19) έχει την υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας από όλους τους άλλους τύπους. Ανήκει στην κατηγορία κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας, παρουσιάζοντας πολλά κοινά τόσο σε χαρακτηριστικά όσο και σε εφαρμογές με την MCFC.

Η θερμοκρασία λειτουργίας τους κυμαίνεται από 800 έως 1000°C. Σε αυτές τις υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να επιτευχθούν γρήγοροι ρυθμοί αντιδράσεων χωρίς την χρήση πολύτιμων μετάλλων ως καταλύτη, ενώ υπάρχει η δυνατότητα ο μετασχηματισμός του καυσίμου σε υδρογόνο να γίνεται εσωτερικά της κυψέλης με εσωτερική αναμόρφωση εξαλείφοντας την ανάγκη εξωτερικής μονάδας μετασχηματισμού του καυσίμου. Έτσι μειώνεται αρκετά το κόστος και δίνεται η ευχέρεια για χρήση διαφόρων ειδών καυσίμου.

Η SOFC χρησιμοποιεί ως καταλύτη ένα σκληρό, μη πορώδες κεραμικό υλικό το οποίο άγει τα ανιόντα του οξυγόνου από την κάθοδο προς την άνοδο.



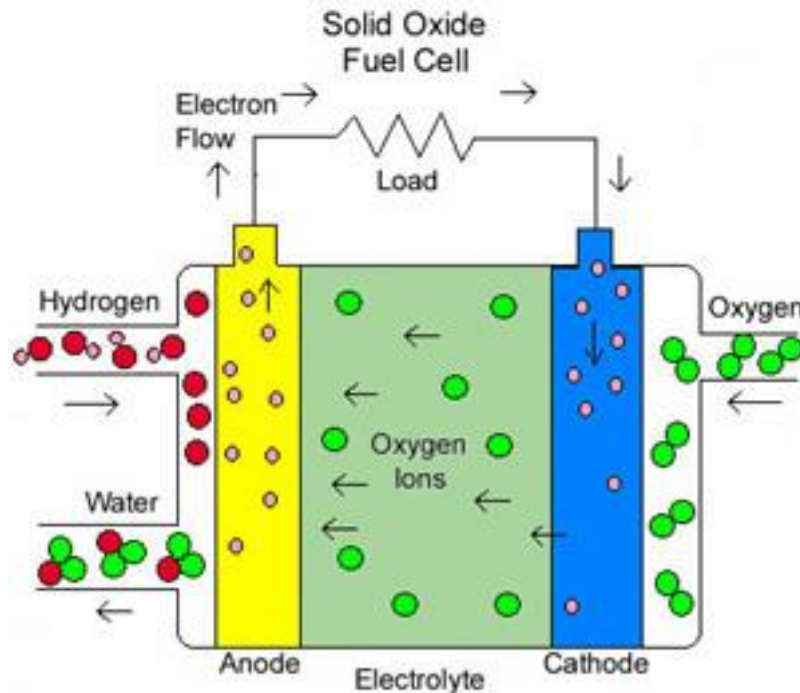
Σχήμα 3.19 Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)

Ο στερεός ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται συνήθως είναι το οξείδιο του ζirkονίου (ZrO_2) σταθεροποιημένο με 8-9% οξείδιο του υτρίου (Y_2O_3). Ο ηλεκτρολύτης αυτός εμφανίζει ικανοποιητική ιοντική αγωγιμότητα κυρίως σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως δηλαδή σε αυτή την περίπτωση. Για τον λόγο αυτό, για την κατασκευή της συνολικής διάταξης της συστοιχίας SOFC απαιτούνται ακριβώς κράματα που να αντέχουν τις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, αυξάνοντας κατά αυτό τον τρόπο αισθητά το κόστος. Για την μείωση αυτού του κόστους αναπτύχθηκαν και εξετάστηκαν εναλλακτικά υλικά ως στερεοί ηλεκτρολύτες, όπως για παράδειγμα οξείδιο του ζirkονίου (ZrO_2) ενισχυμένο με οξείδιο του σκανδίου (Sc_2O_3), οξείδιο του δημητρίου (CeO_2) ενισχυμένο με οξείδιο του γαδολινίου (Gd_2O_3) και οξείδιο του βισμούθιου (Bi_2O_3), τα οποία μπορούν επιτύχουν υψηλές τιμές ιοντικής αγωγιμότητας σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (600 - 800°C).

Η άνοδος της SOFC κατασκευάζεται από σύνθετα κονιοποιημένα μίγματα κεραμικών υλικών στερεών ηλεκτρολυτών, όπως αυτά που αναφέραμε πιο πάνω, καθώς επίσης και οξειδίου του νικελίου. Η επιλογή του νικελίου γίνεται λόγω της υψηλής ηλεκτρικής του αγωγιμότητας και της σταθερότητας του κατά την διάρκεια των αντιδράσεων.

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

Επίσης η χρήση του νικελίου και ως καταλύτη αναμόρφωσης, σε συνδυασμό με την υψηλή θερμοκρασία, δίνει τη δυνατότητα της εσωτερικής αναμόρφωσης του καυσίμου κατευθείαν στην άνοδο. Όσον αφορά τώρα την κάθοδο, ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται συνήθως μικτό οξείδιο τύπου περοβσκίτη (CaTiO_3), λανθανίου (La), στροντίου (Sr) και μαγνησίου (Mg), το οποίο έχει παρεμφερή συντελεστή θερμικής διαστολής, όπως ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται στην άνοδο, και εμφανίζει ικανοποιητική απόδοση σε θερμοκρασίες άνω των 800°C .



Σχήμα 3.20 Δομή της κυψέλης καυσίμου SOFC

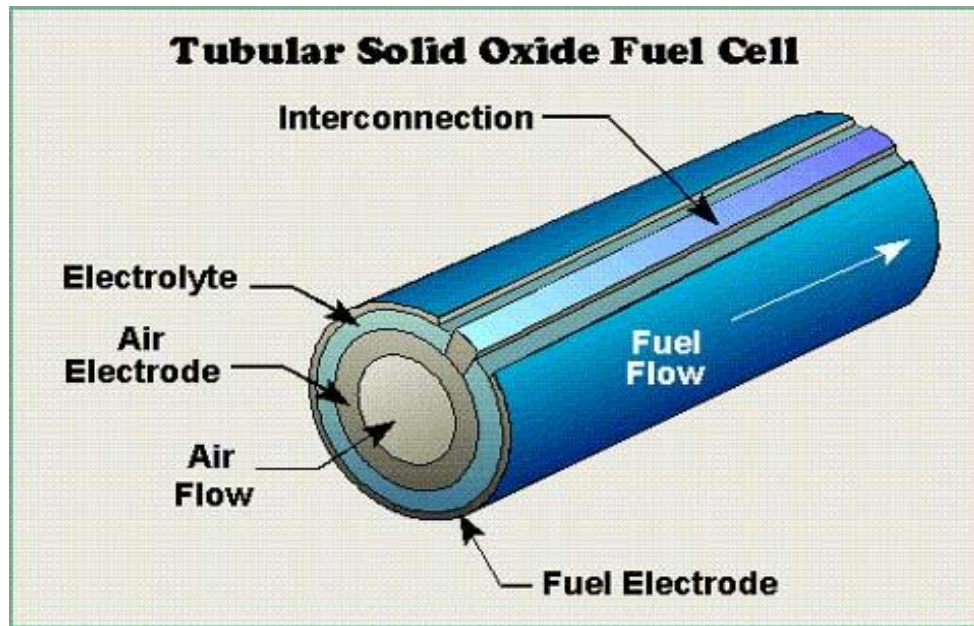
Η απόδοση της SOFC για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κυμαίνεται από 50 έως 60 %. Στην περίπτωση που η SOFC χρησιμοποιηθεί σε συστήματα CHP, η απόδοση μπορεί να φτάσει και το 80 - 85 %.

Η πυκνότητα ισχύος της κυμαίνεται από 0.15 έως 0.7 W/cm^2 . Επιπλέον, ο χρόνος ζωής της είναι 87600 -175200 ώρες λειτουργίας, που είναι δύο έως τέσσερις φορές μεγαλύτερος από το χρόνο ζωής των άλλων κυψελών.

Σε αντίθεση με τους υπόλοιπους τύπους, η SOFC έχει περισσότερους του ενός γεωμετρικούς σχεδιασμούς. Πιο συγκεκριμένα οι γεωμετρικοί σχεδιασμοί της SOFC είναι δύο. Ο πρώτος είναι ο σχεδιασμός επίπεδης γεωμετρίας (planar SOFC), η οποία είναι η τυπική γεωμετρία τύπου «σάντουιτς» που χρησιμοποιείται από τους περισσότερους τύπους ΚΚ, όπου ο ηλεκτρολύτης είναι τοποθετημένος μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Ο δεύτερος είναι ο σχεδιασμός σωληνοειδούς γεωμετρίας (tubular SOFC), όπου το καύσιμο διέρχεται μέσα στο εσωτερικό του σωλήνα και ο αέρας διέρχεται κατά μήκος του εξωτερικού σωλήνα. Το βασικό πλεονέκτημα του τελευταίου σχεδιασμού είναι ότι μπορεί πιο εύκολα να σφραγιστεί ο αέρας από το καύσιμο.

Ωστόσο, σήμερα επικρατεί ο επίπεδος σχεδιασμός λόγω του ότι η απόδοση του είναι πολύ καλύτερη από την απόδοση του σωληνοειδούς σχεδιασμού (σχήμα 3.21).



Σχήμα 3.21 Σωληνοειδής σχεδιασμός της SOFC

Η πολύ υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας της συγκεκριμένης κυψέλης καυσίμου παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Πιο συγκεκριμένα επιτρέπει τη χρήση σχετικά μη καθαρών καυσίμων, όπως αυτά που προκύπτουν από την αεριοποίηση άνθρακα καθώς η SOFC δεν μολύνεται από το CO, αναμορφώνοντας τα στο εσωτερικό της. Ακόμα ένα πλεονέκτημα είναι η μη ανάγκη χρήσης ακριβών καταλυτών.

Επίσης, είναι σχετικά ανθεκτικότερη σε μικρές ποσότητες Si στο καύσιμο, σε σύγκριση με άλλους τύπους κυψελών. Οι δυνατότητες αυτές της SOFC μειώνουν σημαντικά το κόστος κατασκευής. Από την άλλη, η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας εκτός από πλεονεκτήματα παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα. Πέραν της αργής εκκίνησης και των αργών αποκρίσεων σε μεταβολές της ζητούμενης ηλεκτρικής ενέργειας, οι υψηλές θερμοκρασίες απαιτούν σημαντική θερμική προστασία για τον περιορισμό της θερμότητας και την προστασία του προσωπικού. Το κύριο μειονέκτημα της όμως είναι τα ειδικά υλικά που απαιτούνται στην κατασκευή των βασικών της μερών, λόγω του ότι η χρήση ασυνήθιστων κεραμικών, σύνθετων ενώσεων μετάλλων –

κεραμικών και η χρήση κραμάτων υψηλής θερμοκρασίας που απαιτούν ειδικές τεχνικές για την παραγωγή τους αυξάνουν πολύ το κόστος κατασκευής της. Για το λόγο αυτό γίνονται προσπάθειες να μειωθεί η θερμοκρασία λειτουργίας της στους περίπου 700 - 900°C.

Καταλήγοντάς, η ανάπτυξη υλικών χαμηλού κόστους και μεγάλης ανθεκτικότητας σε αυτές τις συνθήκες λειτουργίας είναι η κυριότερη τεχνική πρόκληση που αντιμετωπίζει σήμερα η τεχνολογία αυτή.

3.6 Εφαρμογές κυψελών καυσίμου

3.6.1 Εμπορικές εφαρμογές κυψελών καυσίμου

Σύμφωνα με τα πιο αισιόδοξα σχέδια, στη δεκαετία του 2050, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (βιομάζα, αιολική ενέργεια, γεωθερμία, ηλιακή ενέργεια, κυψέλες καυσίμου) θα έχουν κυρίαρχο ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Εάν οι συνθήκες στο μέλλον φανούν ευνοϊκές, όλες οι ενεργειακές απαιτήσεις για μεταφορές θα καλύπτονται από υδρογόνο, με τη χρήση κυψελών καυσίμου τύπου PEM. Επίσης υπολογίζεται πως μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας για οικιακή χρήση αλλά και ταυτόχρονη συμπαραγωγή θερμότητας θα γίνονται με τη βοήθεια κυψελών τύπου SOFC.

Οι κυψέλες καυσίμου λόγω των χαρακτηριστικών λειτουργίας και της κατασκευαστικής τους δομής έχουν τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα μεγάλο εύρος, από μερικά kW έως αρκετές δεκάδες MW. Έχουν ήδη κατασκευαστεί αυτοκίνητα, λεωφορεία, και ποδήλατα που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου.

Είναι επίσης ιδανικά για μονάδες κατανεμημένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε κτίρια προσφέροντας ευελιξία στην τροφοδοσία ισχύος, ειδικά όταν συνδυάζονται και με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

3.6.2 Εφαρμογές στα μέσα μεταφοράς

Το 1993 κατασκευαστικό από την Ballard Power System το πρώτο λεωφορείο του οποίου η λειτουργία βασιζόταν σε μία κυψέλη PEM και χρησιμοποιούσε σαν καύσιμο H₂. Από τότε και μέχρι σήμερα πολλές γνωστές αυτοκινητοβιομηχανίες (όπως η BMW (σχήμα 3.23), η Honda, η Toyota, η Nissan, η Ford, η Mercedes-Benz (σχήμα 3.22) και η Chrysler) ασχολούνται με την ενσωμάτωση της τεχνολογίας των PEM στην κατασκευή οχημάτων.



Σχήμα 3.22 Αυτοκίνητο της Mercedes που χρησιμοποιεί κυψέλες καυσίμου

Οι εφαρμογές σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας αγοράς (32%), ενώ ακολουθούν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με 20%. Οι εταιρίες και οι δραστηριότητες των ερευνητικών κέντρων επικεντρώνονται στην ανάπτυξη κυρίως κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων και λιγότερο σε αυτές του στερεού οξειδίου, όπως φαίνεται στην έρευνα που έκανε το «US Fuel Cell Council» το 2007.



Σχήμα 3.23 Αυτοκίνητο της BMW που χρησιμοποιεί την τεχνολογία κυψελών καυσίμου

Οι κατασκευαστικές εταιρίες των κυψελών καυσίμου επικεντρώνουν το ενδιαφέρον τους για εφαρμογές των τεχνολογιών που αναπτύσσουν στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα λόγω του προβλεπόμενου μεγέθους της αγοράς. Τα καινοτόμα αυτοκίνητα αποτελούν ένα μεγάλο κίνητρο για την ανάπτυξη τεχνολογιών κυψελών καυσίμου, αφού τα συμβατικά συμβάλουν σημαντικά στην μόλυνση της ατμόσφαιρας.

Σχεδόν όλες οι αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν κατασκευάσει πρότυπα οχήματα κυψελών καυσίμου και έχουν ανακοινώσει τη μαζική παραγωγή τους στο άμεσο μέλλον. Αρκετά από αυτά χρησιμοποιούν μόνο κυψέλες υδρογόνου ως πηγή τροφοδοσίας, ενώ κάποια άλλα χρησιμοποιούν και μπαταρίες ως εναλλακτική πηγή τροφοδοσίας. Το καύσιμο είναι είτε καθαρό υδρογόνο σε υγρή ή αέρια μορφή, είτε από αναμόρφωση.

Η δυσκολία παραγωγής και η έλλειψη υποδομών για τη διάθεση του υδρογόνου αποτελεί, προς το παρόν, ένα εμπόδιο για την ευρεία χρήση αυτοκινήτων με κυψέλες καυσίμου.

Πολλά πρότυπα οχήματα έχουν εγκατεστημένο έναν αναμορφωτή καυσίμου και έτσι μπορούν να τροφοδοτούνται απευθείας με υδρογονάνθρακες. Βέβαια, η εγκατάσταση αναμορφωτών αυξάνει το κόστος, την πολυπλοκότητα της κατασκευής του αυτοκινήτου και επιπλέον έχουμε έκλυση επιβλαβών καυσαερίων στην ατμόσφαιρα, λιγότερα βεβαίως από αυτά των μηχανών εσωτερικής καύσης. Οι αποδόσεις των κυψελών καυσίμου και των μηχανών εσωτερικής καύσης δεν πρέπει να συγκρίνονται μόνο στα σημεία μέγιστης ισχύος τους.

Πέραν των μικρών επιβατικών αυτοκινήτων, τα συστήματα κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούνται και σε επαγγελματικά οχήματα καθώς και σε αστικά λεωφορεία. Όσον αφορά τα αστικά λεωφορεία, οι απαιτήσεις είναι αρκετά διαφορετικές σε σχέση με τα μικρά αυτοκίνητα. Απαιτούν περισσότερη ισχύ, τυπικά από 250 kW και άνω, και ο τρόπος χρήσης τους διαφέρει αφού απαιτούν συχνές εκκινήσεις και στάσεις.

Τα αστικά λεωφορεία έχουν κεντρικούς σταθμούς τροφοδότησης καυσίμου και αυτό διευκολύνει τη δημιουργία σταθμών παραγωγής υδρογόνου. Μπορούν εύκολα να αποθηκεύσουν μεγάλες ποσότητες υδρογόνου, συνήθως πάνω από 20 kg σε φιάλες των 250 ή και 300 bar στην οροφή του λεωφορείου. Επειδή το υδρογόνο είναι πιο ελαφρύ από τον αέρα, η τοποθέτηση στην οροφή αποτελεί μια αρκετά ασφαλή λύση. Υπό την αιγίδα του ευρωπαϊκού προγράμματος «Clean Urban Transport for Europe» (CUTE), αρκετές μεγάλες ευρωπαϊκές πόλεις όπως το Άμστερνταμ, η Βαρκελώνη, το

Αμβούργο, το Λονδίνο (σχήμα 3.24), η Μαδρίτη, η Στοκχόλμη, η Στουτγάρδη και άλλες, χρησιμοποιούν υδρογονοκίνητα λεωφορεία.



Σχήμα 3.24 Υδρογονοκίνητο λεωφορείο στο Λονδίνο

3.6.3 Εφαρμογές σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Αρκετά συστήματα κυψελών καυσίμου έχουν κατασκευαστεί σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για στατικές εφαρμογές. Ο βασικός σχεδιασμός τέτοιων συστημάτων δεν διαφέρει και πολύ από εκείνων που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα.

Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η γιαπωνέζικη ιατρεία ENE-FARM. Από τότε που ξεκίνησαν οι εμπορικές πωλήσεις το 2009, περισσότερα από 100.000 ιαπωνικά νοικοκυριά έχουν εγκαταστήσει γεννήτριες που χρησιμοποιούν υδρογόνο. Αυτό βεβαίως είναι πολύ μακριά από το στόχο που έχει θέσει ο πρωθυπουργός Shinzo Abe ο οποίος έχει υπολογίσει μέχρι το 2030 περίπου 5,3 εκατομμύρια σπίτια να χρησιμοποιούν υδρογόνου για την παραγωγή της ηλεκτρικής τους ενέργειας.

Σύμφωνα με την εφημερίδα Yomiuri Shimbun στις 27 Δεκεμβρίου 2015, το υπουργικό συμβούλιο της Abe ενέκρινε νομοθεσία που θα καλύπτει μέχρι και 350.000 γιεν (2.970 δολάρια) ανά εγχώρια αγορά. Για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια, το σύστημα ene-farm αντλεί φυσικό αέριο από μια τοπική υπηρεσία στην κυψέλη καυσίμου του, η οποία χρησιμοποιεί έναν επεξεργαστή για να εκχυλίσει το υδρογόνο και να το αναμίξει με οξυγόνο από τον περιβάλλοντα αέρα. Το σύστημα της ene-farm παράγει αρκετή ενέργεια για να καλύψει περίπου το ήμισυ της ζήτησης μιας μέσης οικογένειας

Κεφάλαιο 4^ο

Ασκήσεις – Πειράματα

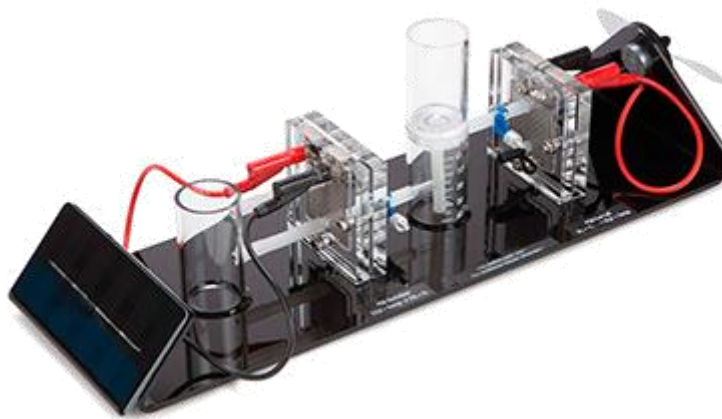
Εφαρμογή των κυψελών καυσίμου στο εργαστήριο Φυσικής

Περιγραφή κεφαλαίου

Το κεφάλαιο αυτό περιέχει 4 εργαστηριακές ασκήσεις που πραγματοποιούνται με τη βοήθεια της διάταξης PEMPower1-ECO (σχήμα 4.1.1).

Οι ασκήσεις αυτές είναι:

- 1) «Χαρακτηριστική καμπύλη φωτοβολταϊκού (Φ/Β) πλαισίου-Μέγιστη ισχύς»
- 2) «Μέτρηση τάσης και έντασης του ρεύματος σε σχέση με την απόσταση του λαμπτήρα»
- 3) «Παραγωγή υδρογόνου, χαρακτηριστική καμπύλη ηλεκτρολύτη και βαθμός απόδοσης»
- 4) «Χαρακτηριστική καμπύλη κυψέλης καυσίμου και ενεργειακός βαθμός απόδοσης»



Σχήμα 4.1.1 Διάταξη PEMPower1-ECO

4.1 Άσκηση 1^η

Χαρακτηριστική καμπύλη φωτοβολταϊκού (Φ/Β) πλαισίου- Μέγιστη ισχύς

Σύνοψη :

Στην άσκηση αυτή ο φοιτητής, με τη βοήθεια ενός κιβωτίου αντιστατών R_k , θα αλλάζει το φορτίο στα άκρα του Φ/Β πλαισίου και θα μετρά την τάση (V) στα άκρα του καθώς και την αντίστοιχη ένταση ρεύματος (I). Η γραφική παράσταση (I-V) αποτελεί τη χαρακτηριστική καμπύλη του Φ/Β πλαισίου. Το γινόμενο $I \cdot V$ δίνει την αντίστοιχη ισχύ P. Από τη γραφική παράσταση (P-V) βρίσκουμε την μέγιστη ισχύ P_{max} του Φ/Β πλαισίου.

Προαπαιτούμενη γνώση :

- Φωτοβολταϊκό στοιχείο, αρχή λειτουργίας - χαρακτηριστικά.
- Γραφικές παραστάσεις στο Excel.
- Χρήση πολυμέτρων.

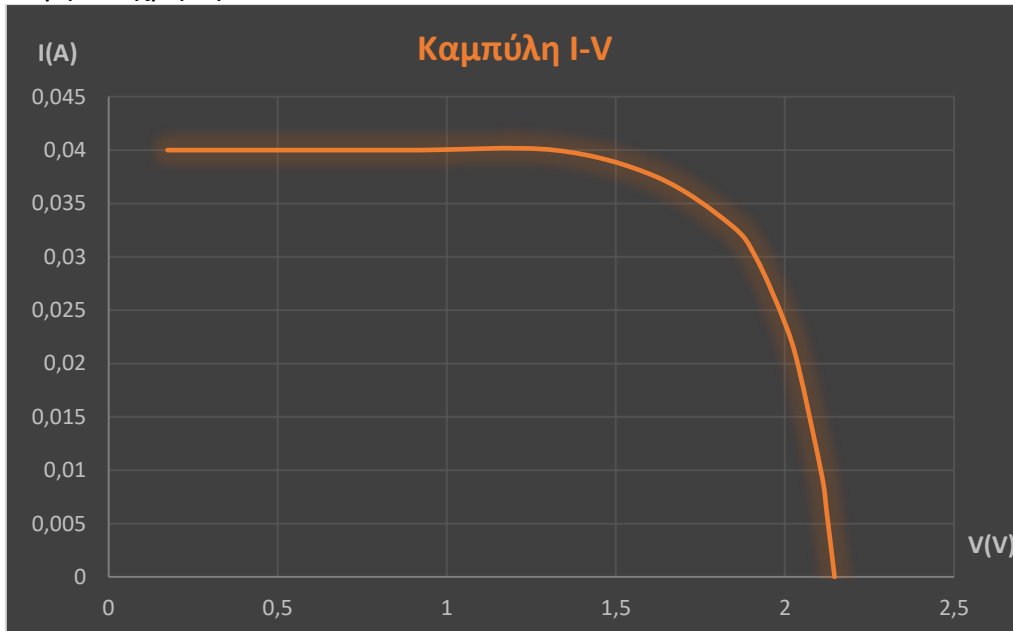
Όργανα :

- Φ/Β πλαίσιο. (Θα χρησιμοποιηθεί το Φ/Β πλαίσιο της διάταξης PEMPower1-Eco (εικόνα 1)).
- Φωτεινή πηγή (Λαμπτήρας).
- Χάρακας. (Ο χάρακας έχει στερεωθεί σε βάση ώστε να είναι κάθετος στο πλαίσιο.)
- Βολτόμετρο, αμπερόμετρο και καλώδια.
- Κιβώτιο αντιστάσεων από 1Ω έως 300Ω .
- Η/Υ - Microsoft Office Excel. (εφόσον οι γραφικές παραστάσεις γίνουν στο Excel).

Θεωρία :

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια διαφέρουν μεταξύ τους από τον τρόπο ή την τεχνική που είναι φτιαγμένα όπως επίσης και από τα υλικά που είναι κατασκευασμένα. Αυτό όμως που χαρακτηρίζει κάθε Φ/Β πλαίσιο είναι η χαρακτηριστική του καμπύλη (I-V). Η χαρακτηριστική του καμπύλη (I-V), δηλαδή η γραφική παράσταση της έντασης του ρεύματος I που μου δίνει το

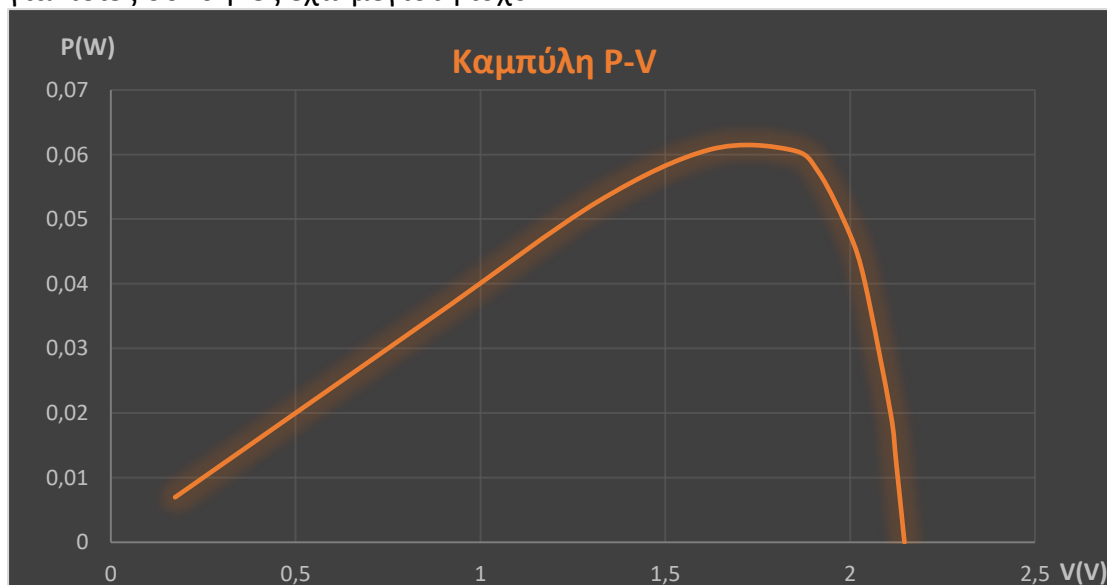
πλαίσιο σε σχέση με την τάση V στα άκρα του, μας δίνει πληροφορίες για την συμπεριφορά του πλαισίου οι οποίες θα μας βοηθήσουν για την κατάλληλη επιλογή και χρήση του.



Σχήμα 4.1.2 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός Φ/Β πλαισίου

Από την μορφή της I-V (εικόνα 2) βλέπω ότι η ένταση του ρεύματος παραμένει σταθερή σε μεγάλη περιοχή. Βγάζω το συμπέρασμα λοιπόν ότι το Φ/Β πλαίσιο λειτουργεί σαν πηγή σταθερού ρεύματος.

Η γραφική παράσταση P-V (εικόνα 3) δηλαδή η γραφική παράσταση της ισχύος P ($P=I*V$) που μας δίνει το πλαίσιο σε σχέση με την τάση V στα άκρα του, μας βοηθά να επιλέξουμε το κατάλληλο φορτίο R_{ϕ} ώστε να έχω μέγιστη ισχύ P_{max} . Το φορτίο αυτό R_{ϕ} υπολογίζεται από τη σχέση $R_{\phi}=V_m/I_m$ (V_m και I_m οι τιμές που αντιστοιχούν στην μέγιστη ισχύ P_{max}). Μπορώ λοιπόν να βρω για ποιες συνθήκες έχω μέγιστη ισχύ.



Σχήμα 4.1.3 Καμπύλη P-V ενός Φ/Β πλαισίου

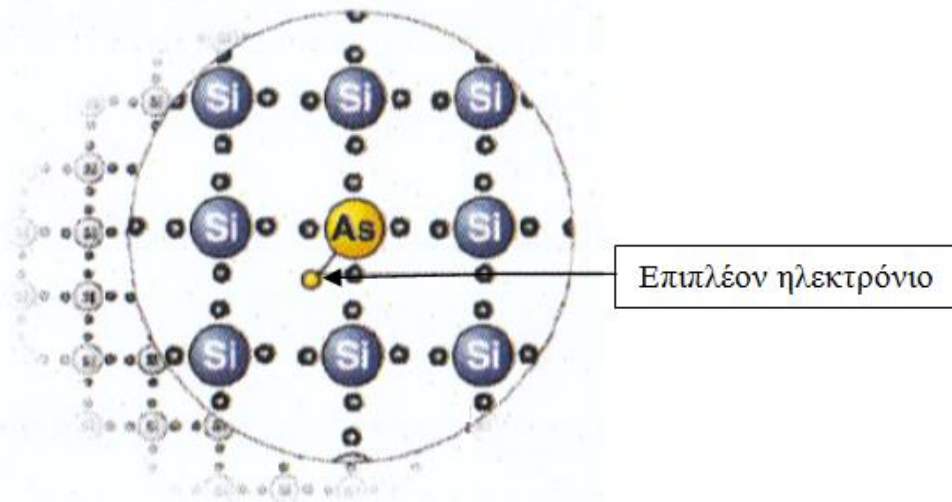
Αρχή λειτουργίας των Φ/Β

Τα υλικά χωρίζονται ως γνωστόν σε αγωγούς που επιτρέπουν την διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος, σε μονωτές που δεν επιτρέπουν την διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος κι τους ημιαγωγούς που είναι μία ενδιάμεση κατάσταση.

Δύο σημαντικοί ημιαγωγοί είναι το πυρίτιο και το γερμάνιο. Τους ημιαγωγούς τους χωρίζουμε σε καθαρούς κρυσταλλικούς που έχουν την ίδια στοιχειακή σύνθεση παντού και ονομάζονται ενδογενείς και τους ημιαγωγούς πρόσμιξης.

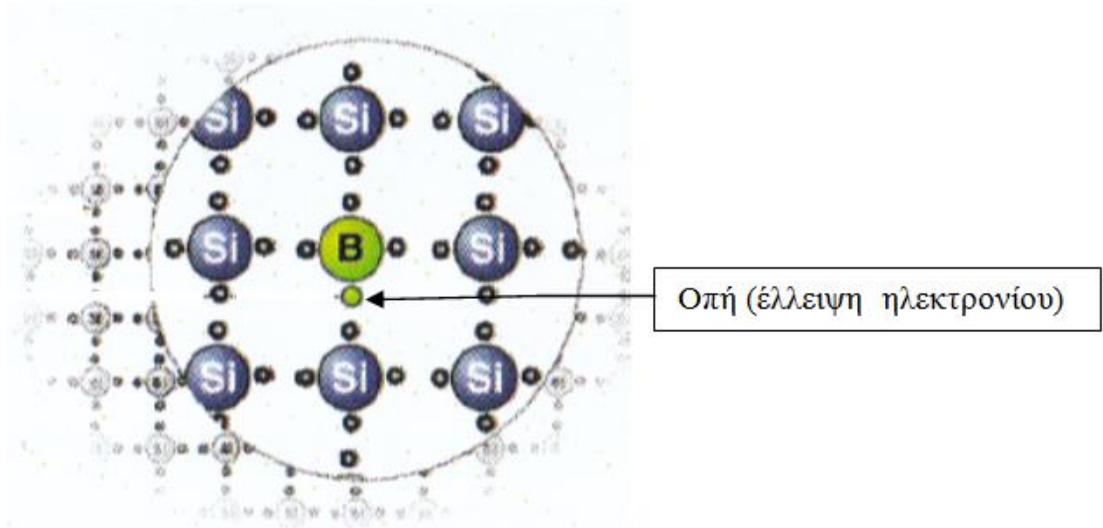
Το άτομο του πυριτίου (Si) για παράδειγμα, το οποίο είναι το κύριο συστατικό της άμμου, έχει 4 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα. Εάν στο κρύσταλλο καθαρού πυριτίου ορισμένα άτομα αντικατασταθούν από άτομα άλλου στοιχείου προκύπτει ημιαγωγός πρόσμιξης.

Εάν για παράδειγμα ορισμένα άτομα πυριτίου, που όπως είπαμε έχουν 4 ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στοιβάδα, αντικατασταθούν με αρσενικό (As) που έχει 5 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα ένα ηλεκτρόνιο του δεν θα μπορεί να συμμετέχει σε δεσμό. Μένει λοιπόν ελεύθερο. Έτσι ο ημιαγωγός πρόσμιξης έχει περισσότερα ηλεκτρόνια ελεύθερα από τον καθαρό (ενδογενή). Ο ημιαγωγός αυτός πρόσμιξης ονομάζεται τύπου **n** (negative)(σχήμα 4.1.4).



Σχήμα 4.1.4 Ημιαγωγό τύπου **n** (negative)

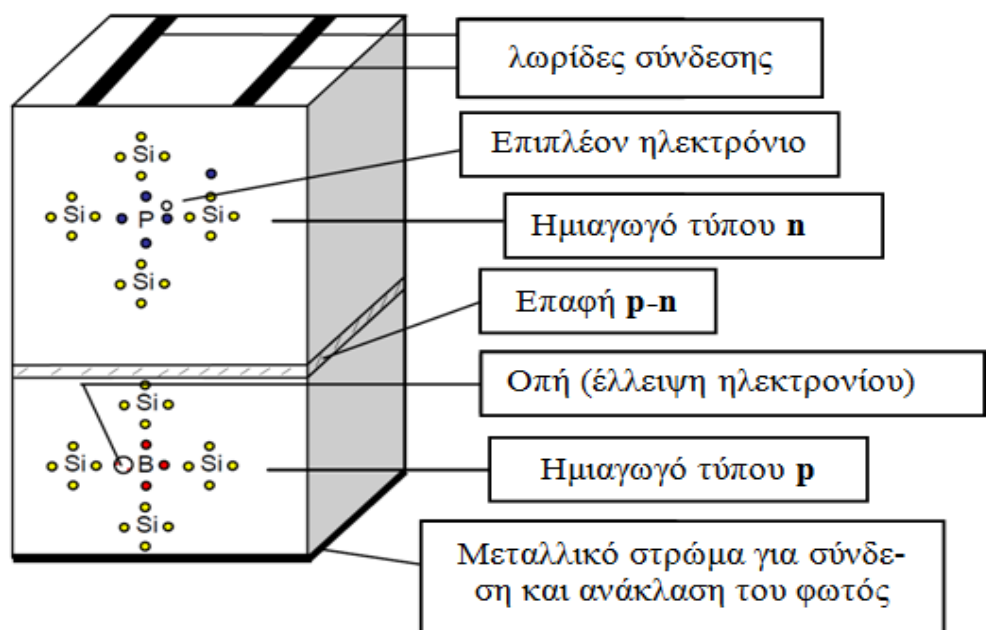
Εάν γίνει αντικατάσταση με στοιχείο που έχει ένα ηλεκτρόνιο λιγότερο π.χ. Βόριο που έχει 3 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα, τότε έχουμε έλλειψη ηλεκτρονίων. Δημιουργείται όπως λέμε μία οπή. Ο ημιαγωγός αυτός ονομάζεται τύπου **p** (positive) (σχήμα 4.1.5).



Σχήμα 4.1.5 Ημιαγωγό τύπου **p** (positive)

Όταν δημιουργηθεί επαφή των δύο ημιαγωγών τύπου **p** και **n** από το ίδιο υλικό τότε διαχέονται ηλεκτρόνια και οπές από το ένα μέρος στο άλλο με αποτέλεσμα γύρω και κοντά στην επαφή να δημιουργηθεί μια περιοχή που δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια ή οπές.

Η περιοχή αυτή ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης (depletion region). Αποτέλεσμα επίσης της μετακίνησης αυτής είναι να δημιουργηθεί μια τάση στα άκρα της επαφής η λεγόμενη τάση διάχυσης (diffusion voltage) ή τάση επαφής, η οποία δεν μπορεί να μετρηθεί με βολτόμετρο ούτε μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξωτερικά. Όμως, όταν πέσει φως πάνω στην επαφή ελευθερώνονται ηλεκτρόνια. Έτσι δημιουργούνται περισσότεροι φορείς (ηλεκτρόνια και οπές) οι οποίοι λόγω της τάσης διάχυσης κινούνται στα άκρα της επαφής. Δημιουργείται έτσι μια εξωτερική τάση.



Σχήμα 4.1.6 Φ/B στοιχείο

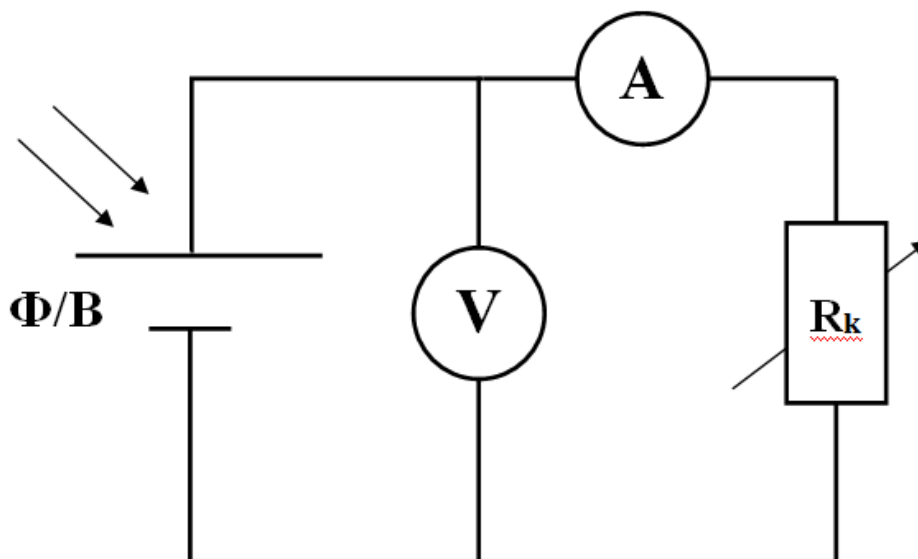
Συμπέρασμα :

Για να δημιουργηθεί φωτοβολταϊκό φαινόμενο πρέπει να υπάρχει επαφή ημιαγωγών p-n και φως. Το φως δημιουργεί επιπλέον φορείς και η επαφή p-n δημιουργεί την τάση διάχυσης που μετακινεί τους φορείς στα άκρα της επαφής. Δημιουργείται έτσι η εξωτερική τάση (τάση ανοιχτού κυκλώματος). Η τάση αυτή εξαρτάται από το υλικό της επαφής και δεν εξαρτάται από την επιφάνεια. Για επαφή πυριτίου η τάση αυτή είναι περίπου 0,5V. Έτσι δημιουργείται το Φ/Β στοιχείο (σχήμα 4.1.6). Για να πάρω μεγαλύτερες τάσης αρκεί να συνδέσω σε σειρά πολλά Φ/Β στοιχεία. Το ρεύμα που προέρχεται από Φ/Β στοιχείο είναι ανάλογο της έντασης ακτινοβολίας του προσπίπτοντος φωτός. Η ισχύ του Φ/Β στοιχείου εξαρτάται αφενός από το ίδιο το φωτοστοιχείο, αφετέρου από το φορτίο με το οποίο είναι συνδεδεμένο. Πολλά Φ/Β στοιχεία μαζί κάνουν το Φ/Β πλαίσιο.

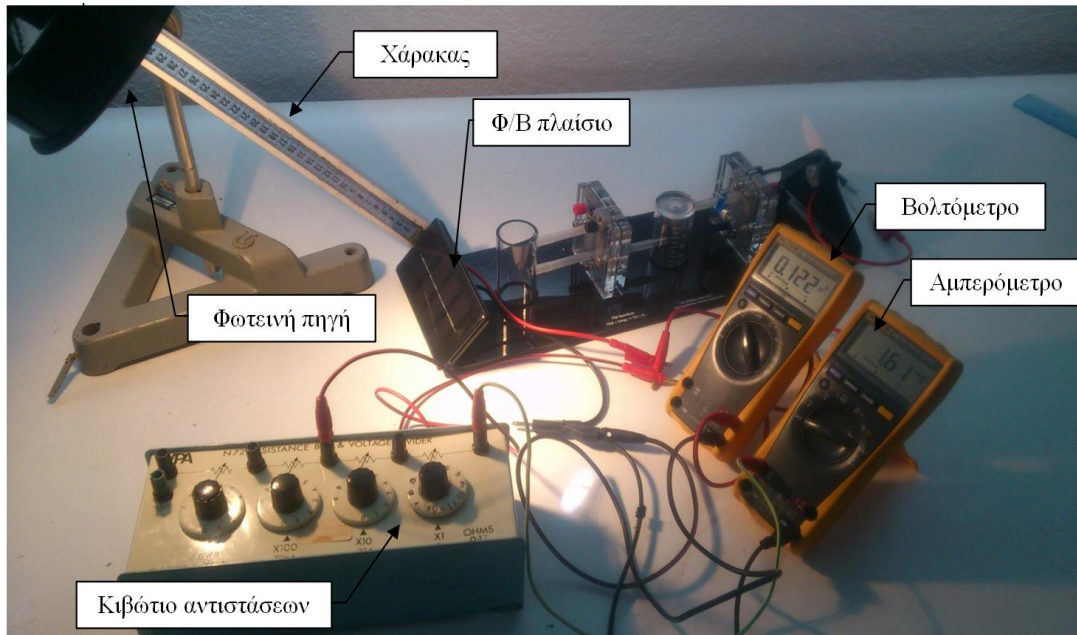
Πειραματικό μέρος :

Όπως αναφέραμε και στην θεωρία αυτό που θα κάνουμε στην άσκηση είναι να αλλάζουμε την αντίσταση φορτίου R_k και να μετράμε την τάση V στα άκρα του πλαισίου καθώς και την αντίστοιχη ένταση I . Έτσι μπορούμε να φτιάξουμε την χαρακτηριστική καμπύλη $I - V$ του δικού μας Φ/Β πλαισίου.

Στην συνέχεια θα υπολογίσουμε την ισχύ P πολλαπλασιάζοντας την τάση V με την αντίστοιχη ένταση I για κάθε μέτρηση ($P=V \cdot I$). Μπορούμε έτσι να φτιάξουμε τη γραφική παράσταση $P-V$ από την οποία βρίσκω τη μέγιστη (ισχύ P_{max}) του πλαισίου στις συνθήκες του πειράματος.



Σχήμα 4.1.7 Κύκλωμα



Σχήμα 4.1.8 Φωτογραφία κυκλώματος

Βήματα πειράματος :

Φτιάχνουμε το κύκλωμα (σχήμα 4.1.7) του παραπάνω σχήματος όπως φαίνεται και στη φωτογραφία (σχήμα 4.1.8). Με την βοήθεια του χάρακα τοποθετούμε τον λαμπτήρα έτσι ώστε το φως να πέφτει κάθετα στο πλαίσιο και να απέχει σε απόσταση 50 cm από αυτό. Ανοίγουμε το λαμπτήρα και περιμένουμε τουλάχιστο 1 λεπτό για να αποκατασταθεί θερμική ισορροπία.

Δίνουμε, με τη βοήθεια του κιβωτίου αντιστάσεων, στην αντίσταση R_k μία-μία τις τιμές του πίνακα 4.1. Μετράμε κάθε φορά την τάση και την αντίστοιχη ένταση και συμπληρώνουμε τις αντίστοιχες στήλες.

Υπολογίζουμε την ισχύ P για κάθε μέτρηση με βάση τη σχέση $P=V \cdot I$ και συμπληρώνουμε την αντίστοιχη στήλη του πίνακα. Με βάση τις αντίστοιχες μετρήσεις του πίνακα κάνω τη γραφική παράσταση της έντασης I σε σχέση με την τάση V . Με βάση τις αντίστοιχες μετρήσεις του πίνακα κάνω τη γραφική παράσταση της ισχύος P σε σχέση με την τάση V .

Φύλλο εργασίας

Τίτλος:

Ονοματεπώνυμο:

Ημερομηνία:

Σκοπός:

1. Συμπληρώστε τον παρακάτω πίνακα με βάση τις μετρήσεις που έχετε κάνει.

Πίνακας 4.1			
R_k (Ω)	I (A)	V (Volts)	P (W)
0			
0,1			
0,2			
0,3			
1			
2			
3			
4			
6			
8			
10			
15			
20			
30			
40			
50			
60			
80			
100			
200			
300			
άπειρο	0		0

Πίνακας 4.1 Μετρήσεις

2. Φτιάξτε την γραφική παράσταση I - V στο EXCEL
3. Φτιάξτε τη γραφικής παράσταση P-V στο EXCEL
4. Σχολιάστε την γραφική παράσταση I - V
5. Με τη βοήθεια της γραφικής παράσταση P-V βρείτε:
την μέγιστη ισχύ P_{max}.
6. Την τάση V_m που αντιστοιχεί στην P_{max}
7. Βρείτε την ένταση που αντιστοιχεί στη V_{max} είτε από τη γραφική παράσταση I-V είτε από τη σχέση P=V*I
I_m =...

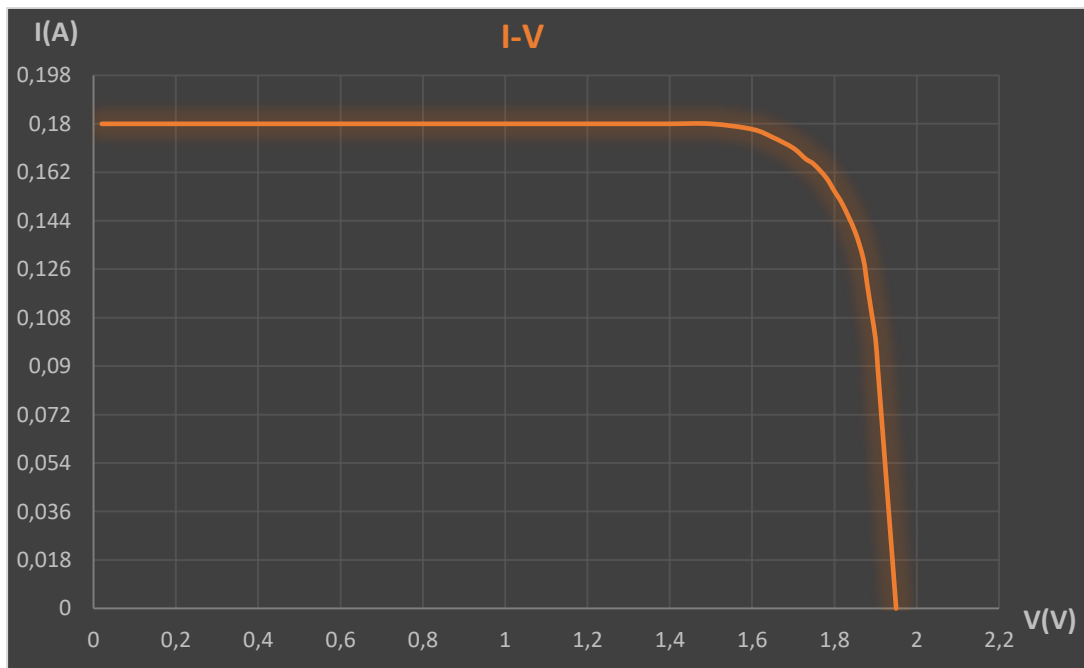
8. Από τα I_m και V_m βρείτε την αντίσταση φορτίου R_f που πρέπει να συνδέσω στην έξοδο για να έχω μέγιστη ισχύ.
9. Τι παρατηρείτε όταν η αντίσταση είναι άπειρο ?

Βιβλιογραφία:

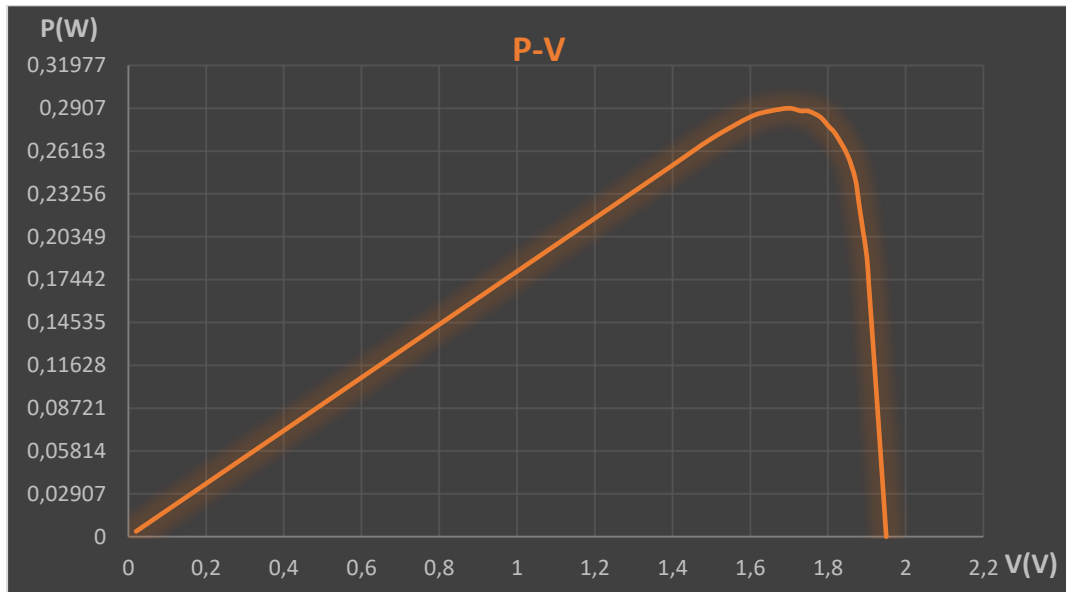
Φωτοβολταϊκά συστήματα Ι. Ε. Φραγκιάδάκης. Εκδόσεις ΖΗΤΗ
Fuel Cell Technology for Classroom Instruction Gornelia Voigt, Stefan Hoeller,
Uwe Kueter. Εκδόσεις H-TEC EDUCATATION
PEMPower 1-Eco Instruction Manual H-TEC EDUCATATION

Κριτήριο αξιολόγησης:

1. Με την βοήθεια των παρακάτω γραφικών παραστάσεων (I-V) και (P-V) να βρείτε :
 - Α) Την τάση σε V όταν η ένταση είναι 90 mA
 - Β) Τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να μου δώσει το Φ/Β πλαίσιο σε Watt
 - Γ) Την τάση σε V όταν έχω μέγιστη ισχύ.
 - Δ) Την ένταση του ρεύματος σε mA που αντιστοιχεί στην μέγιστη ισχύ.
 - Ε) Την αντίσταση φορτίου σε Ω για να έχω μέγιστη ισχύ



Σχήμα 4.1.9 Χαρακτηριστική καμπύλη ενός Φ/Β πλαισίου



Σχήμα 4.1.10 Καμπύλη P-V ενός Φ/B πλαισίου

2. Επέλεξε τη σωστή απάντηση

- I. Το Si έχει στην εξωτερική του στοιβάδα:
 - a) 3 ηλεκτρόνια
 - b) 4 ηλεκτρόνια
 - c) 5 ηλεκτρόνια

- II. Για να έχω φωτοβολταϊκό φαινόμενο πρέπει:
 - a. Να πέσει φως σε ημιαγωγό
 - b. Να πέσει φως σε ημιαγωγό τύπου p
 - c. Να πέσει φως σε επαφή p-n

- III. Οι ενδογενής ημιαγωγοί:
 - a) Δεν έχουν πρόσμιξη. Έχουν δηλαδή την ίδια στοιχειακή σύνθεση παντού
 - b) Έχουν πρόσμιξη με άλλο στοιχείο που έχει περισσότερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα
 - c) Έχουν πρόσμιξη με άλλο στοιχείο που έχει λιγότερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα

3. Ποιες από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστές και ποιες είναι λάθος:

- a) Στον ημιαγωγό τύπου p έχω περίσσια ηλεκτρονίων
- b) Σε επαφή p-n υπάρχει περιοχή που δεν υπάρχουν φορείς. Η περιοχή αυτή λέγεται απογύμνωσης
- c) Το ρεύμα που προέρχεται από Φ/Β στοιχείο είναι ανάλογο της έντασης της ακτινοβολίας του προσπίπτοντος φωτός

Απαντήσεις:

1.

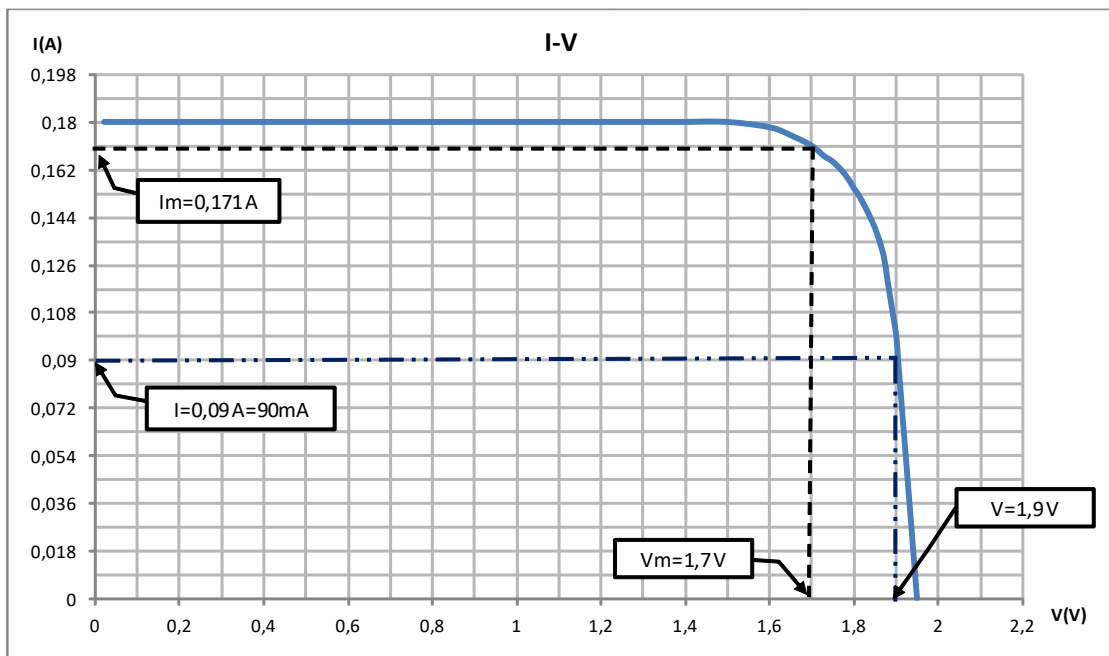
A) $90\text{mA}=0,090\text{A}$. Από τη γραφική παράσταση I-V βλέπω ότι αν $I=0,090\text{ A}$ τότε $V=1,9\text{ V}$

B) Από τη γραφική παράσταση P-V βλέπω $P_{\text{max}}= 0,2907\text{ W}$

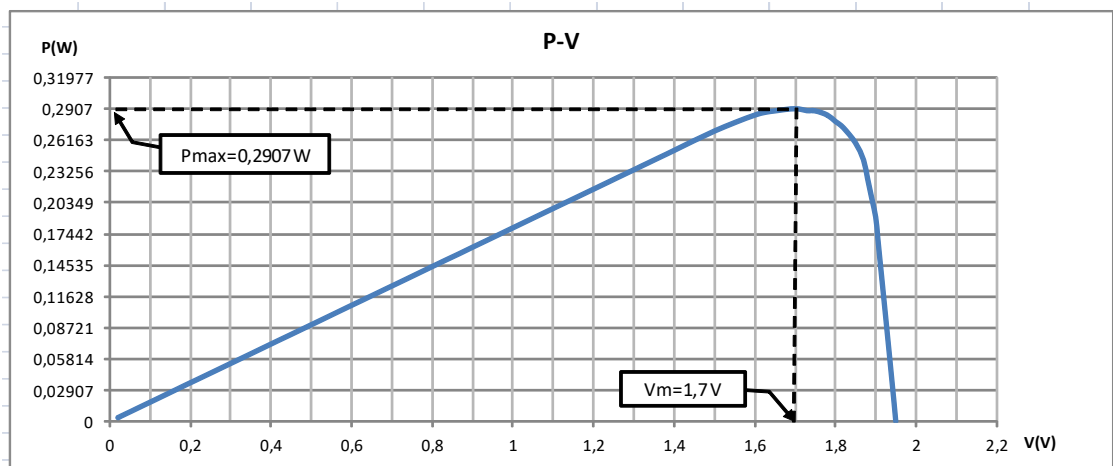
Γ) Από τη γραφική παράσταση P-V βλέπω για $P_{\text{max}}= 0,2907\text{ W}$, $V_m=1,7\text{ V}$

Δ) Από τη γραφική παράσταση I-V βλέπω για $V_m=1,7\text{ V}$, $I_m=0,171\text{ A}=171\text{ mA}$

E) $R_{\phi}= V_m/ I_m= 1,7\text{ V}/0,171\text{A}=9,9\ \Omega$



“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”



2.

I

b) 4 ηλεκτρόνια

II

c) Να πέσει φως σε επαφή p-n

III

a) Δεν έχουν πρόσμιξη. Έχουν δηλαδή την ίδια στοιχειακή σύνθεση παντού

3.

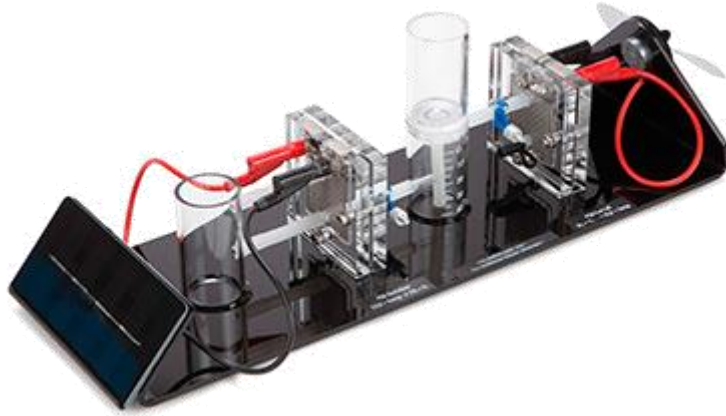
a) Λάθος. Έχω έλλειψη ηλεκτρονίων

b) Σωστό

c) Σωστό

4.2 Άσκηση 2

Μέτρηση τάσης και έντασης του ρεύματος σε σχέση με την απόσταση του λαμπτήρα



Σχήμα 4.2.1 Διάταξη PEMPower1-ECO

Σύνοψη :

Η άσκηση 2 είναι χωρισμένη σε 2 μέρη. Στο πρώτο μέρος ο φοιτητής, με τη βοήθεια ενός χάρακα ο οποίος θα είναι κάθετος στο πλαίσιο και στον λαμπτήρα, θα αλλάζουμε την απόσταση (L) της λάμπας από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο και θα μετράμε α) την ένταση του φωτοβολταϊκού ρεύματος συνδέοντας το αμπερόμετρο απευθείας στα άκρα του φωτοβολταϊκού και β) την τάση συνδέοντας το βολτόμετρο απευθείας στα άκρα του φωτοβολταϊκού (τάση ανοιχτού κυκλώματος). Στη συνέχεια θα φτιαχτούν και θα μελετηθούν τα διαγράμματα Έντασης-Απόστασης ($I-L$) και Τάσης-Απόστασης ($V-L$). Σκοπός του πρώτου μέρους της άσκησης είναι η κατανόηση συμπεριφοράς Φ/Β πλαισίου ανάλογα με την απόσταση της πηγής ενέργειας.

Στο δεύτερο μέρος της άσκησης η απόσταση λαμπτήρα - πλαισίου θα είναι σταθερή αυτό που θα αλλάζουμε θα είναι η γωνία πρόσπτωσης του φωτός προς το πλαίσιο.

Αρχικά θα είναι στις 0 μοίρες πράγμα που σημαίνει ότι η λάμπα θα είναι κάθετη στο Φ/Β πλαίσιο και θα αλλάζουμε την γωνία έως ότου φτάσουμε τις 90 μοίρες όπου στη συγκεκριμένη θέση η λάμπα θα είναι παράλληλη με το πλαίσιο. Για κάθε γωνία θα πάρουμε επίσης μετρήσεις, όπως και στο πρώτο μέρος, της τάσης ανοιχτού κυκλώματος και της έντασης του φωτοβολταϊκού

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

ρεύματος κάθε φορά, και με τις τιμές αυτές θα φτιαχτούν οι γραφικές παραστάσεις Τάσης-Γωνίας και Έντασης-Γωνίας.

Προαπαιτούμενη γνώση :

- Φωτοβολταϊκό στοιχείο, αρχή λειτουργίας και χαρακτηριστικά.
- Γραφικές παραστάσεις στο Excel.
- Χρήση πολυμέτρων.

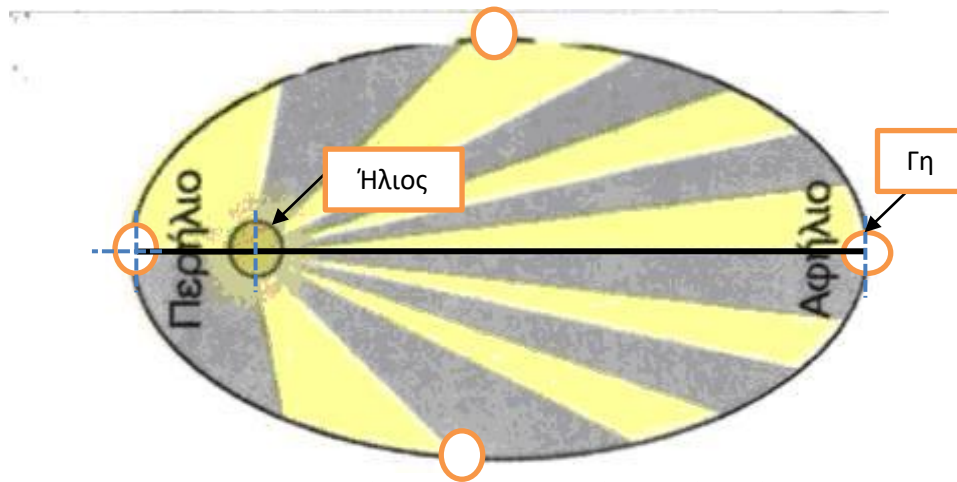
Όργανα :

- Φ/Β πλαίσιο. (Θα χρησιμοποιηθεί το Φ/Β πλαίσιο της διάταξης PEMPower1-Eco).
- Φωτεινή πηγή (Λαμπτήρας).
- Χάρακας. (τον χάρακα κάθετο στο πάνελ που έχει φτιαχτεί για την συγκεκριμένη άσκηση).
- Μοιρογνωμόνιο που έχει φτιαχτεί για την συγκριμένη άσκηση.
- Βολτόμετρο, αμπερόμετρο και καλώδια.
- Η/Υ - Microsoft Office Excel. (εφόσον οι γραφικές παραστάσεις γίνουν στο Excel).

Θεωρία

Τα δύο πειράματα αυτής της άσκησης ταυτίζονται με τις μεγάλες Φ/Β εγκαταστάσεις. Στην άσκηση αυτή λοιπόν έχουμε ως πηγή ενέργειας μία λάμπα, την οποία την μετακινούμε για να αλλάζουμε την απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Στις μεγάλες εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών πλαισίων πηγή ενέργειας είναι ο Ήλιος ο οποίος όπως και στο πείραμα δεν είναι πάντα στην ίδια απόσταση με την Γη διότι η Γη περιφέρεται γύρω του σε ελλειπτική τροχιά.

Υπάρχουν δυο θέσεις του πλανήτη μας η μια, αυτή που η απόσταση της Γης από τον Ήλιο είναι η μικρότερη και ονομάζεται *Περιήλιο* και η αντίθετη, αυτή που η απόσταση της Γης από τον Ήλιο είναι η μεγαλύτερη ονομάζεται *Αφήλιο* σε σχέση με της υπόλοιπες θέσεις του πλανήτη στην συγκεκριμένη περιφορά (σχήμα 4.2.2).



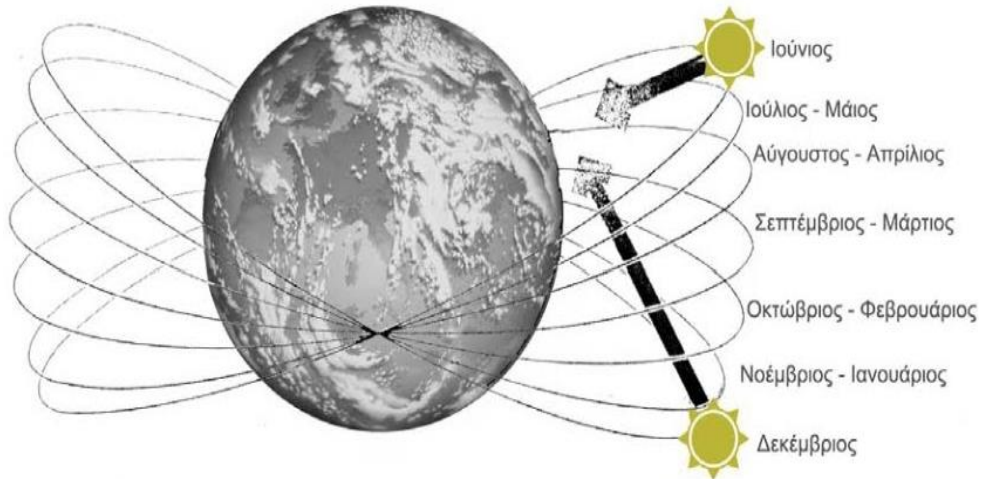
Σχήμα 4.2.2 Ελλειπτική τροχιά της γης γύρω από τον Ήλιο

Η ελλειπτική τροχιά της Γης έχει μέση εκκεντρότητα* 0,0167. Αποτέλεσμα αυτής είναι να μεταβάλλεται η απόσταση της Γης από τον Ήλιο (από κέντρο σε κέντρο) με μέσες τιμές 147.098.074 Km στο περιήλιο και 152.097.701 km στο αφήλιο.

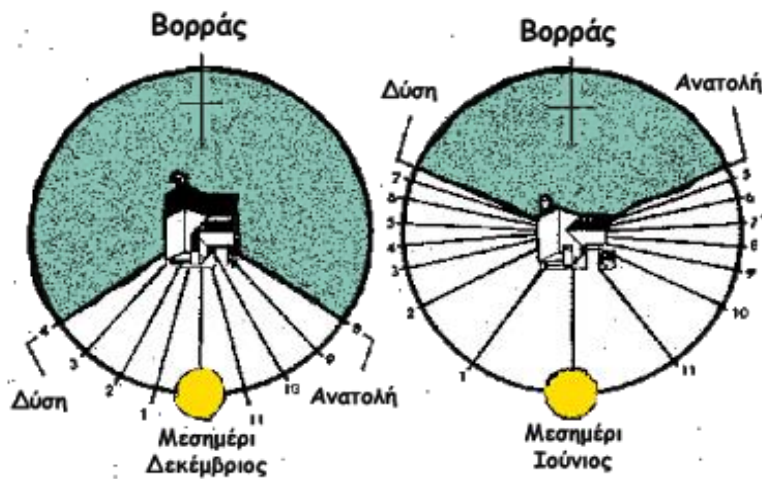
Εξαιτίας της βαρυτικής διαταραχής της Σελήνης, η πραγματική απόσταση της Γης στο περιήλιο μπορεί να ποικίλει από 147.083.346 km μέχρι 147.112.452 km.

Είναι ένα εύρος 29.112 km, το οποίο αναλογεί περίπου 2,28 φορές στα 12.756 km της διαμέτρου της Γης στον ισημερινό. Παρομοίως, η απόσταση στο αφήλιο μπορεί να ποικίλει από 152,083,061 km μέχρι 152,112,126 km. Το εύρος των 29,065 km, επίσης αναλογεί περίπου 2,28 φορές στα 12.756 km της διαμέτρου της Γης στον ισημερινό. Επίσης στην δεύτερη άσκηση αλλάζουμε την γωνία της λάμπας σε σχέση με το πλαίσιο έτσι όπως αλλάζει και η γωνία του Ηλίου σε σχέση με μία μεγάλη Φ/Β εγκατάσταση , αυτό μας δείχνουν και οι παρακάτω εικόνες.

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”



Σχήμα 4.2.3 Θέση του Ήλιου στους μήνες του χρόνου



Σχήμα 4.2.4 Η διαφορά θέσης Ήλιου για Δεκέμβριο και Ιούνιο

Ο προσδιορισμός της θέσης του ήλιου για μια επιφάνεια που συλλέγει ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να γίνει γνωρίζοντας τις ακόλουθες πέντε γωνίες:

- Γεωγραφικό πλάτος ϕ
- Ηλιακή απόκλιση δ
- Γωνία ώρας ω
- Κλίση επιφάνειας β
- Γωνία αζιμούθιου γ

Επίσης σημαντικό είναι η γωνία ζενίθ του ήλιου θ_z που είναι η γωνία μεταξύ των ηλιακών ακτινών και της κατακόρυφης και υπολογίζεται από τη σχέση:

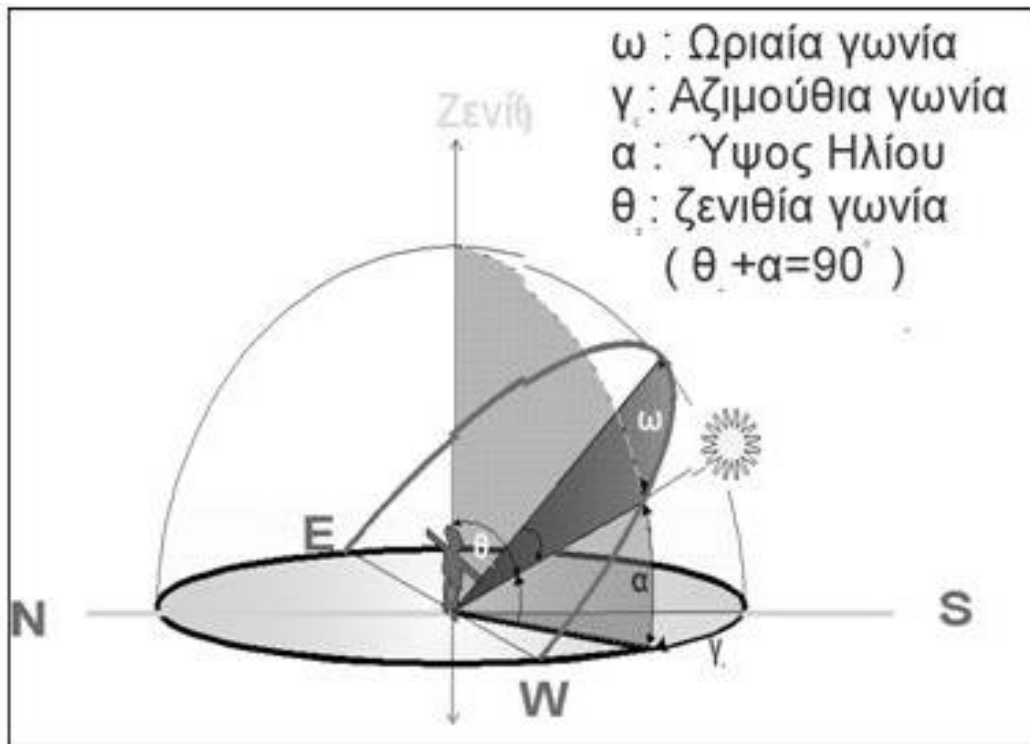
$$\cos\theta_z = (\sin\phi \cdot \sin\delta) + (\cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega)$$

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

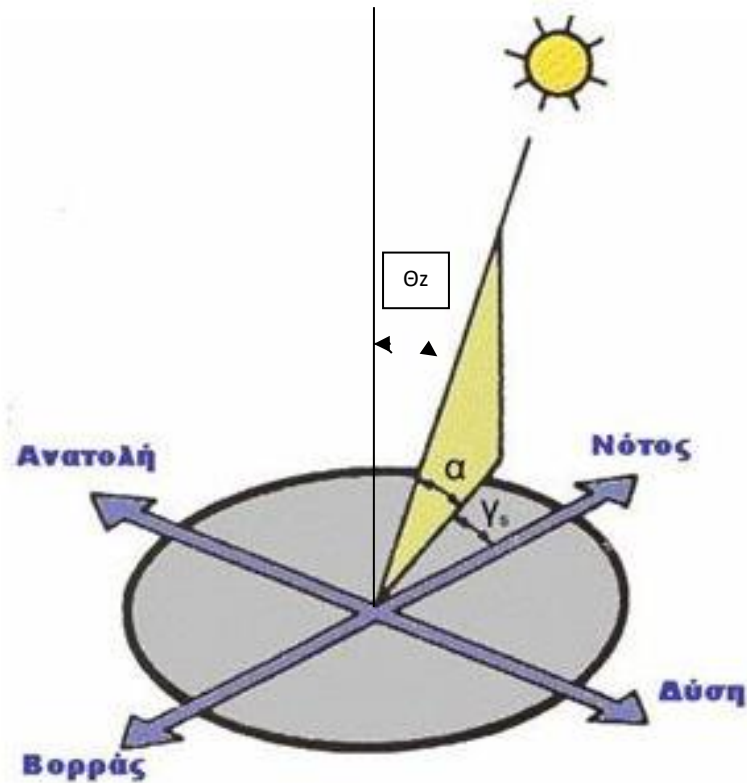
Και τέλος η γωνία ύψους του ήλιου **α**ς η αλλιώς **γωνία πρόσπτωσης** είναι η γωνία που σχηματίζει ο Ήλιος με ένα αντικείμενο στην γη σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο (γωνία α στην εικόνα 5), στην περίπτωση μας το αντικείμενο είναι το Φ/Β πάνελ. Ισχύει επομένως ότι:

$$\theta_z + \alpha_s = 90^\circ$$

Παρακάτω παρατηρούμε δυο εικόνες που μας βοηθούν για την κατανόηση των γωνιών που αναφέραμε παραπάνω.



Σχήμα 4.2.5 Ηλιακή γεωμετρία



Σχήμα 4.2.6 Ηλιακή γεωμετρία

Ηλιακή ακτινοβολία

Ο Ήλιος ενεργεί ως μία τέλεια πηγή ακτινοβολίας σε μία θερμοκρασία κοντά στους 5800°K . Η προσπίπτουσα ροή ενέργειας πάνω σε μία μονάδα επιφάνειας, που είναι κάθετη προς τη διεύθυνση της δέσμης έξω από την ατμόσφαιρα, είναι γνωστή ως ηλιακή σταθερά: $S=1367 \text{ W/m}^2$ οι τιμές στην βιβλιογραφία κυμαίνονται από 1353 έως 1395 W/m^2 λόγω της μεταβολής της απόστασης ήλιου-γης κατά την διάρκεια του έτους . Η ισχύς από μία πηγή ακτινοβολίας που πέφτει πάνω στη μονάδα επιφάνειας, ονομάζεται ένταση ακτινοβολίας. Κατά τη διέλευση των ηλιακών ακτινών από την ατμόσφαιρα της Γης, η ένταση τους ελαττώνεται, αφού τα φωτόνια σκεδάζονται στα μόρια της ατμόσφαιρας, στα πολύ μικρής διαμέτρου σωματίδια, καθώς και στα μεγαλύτερης διαμέτρου αιωρήματα, όπως υδρατμοί, σκόνη και καπνός.

Η ηλιακή ακτινοβολία λοιπόν εξασθενεί καθώς διέρχεται την ατμόσφαιρα λόγω της διάχυσης, την ανάκλασης προς το διάστημα και της απορρόφησης

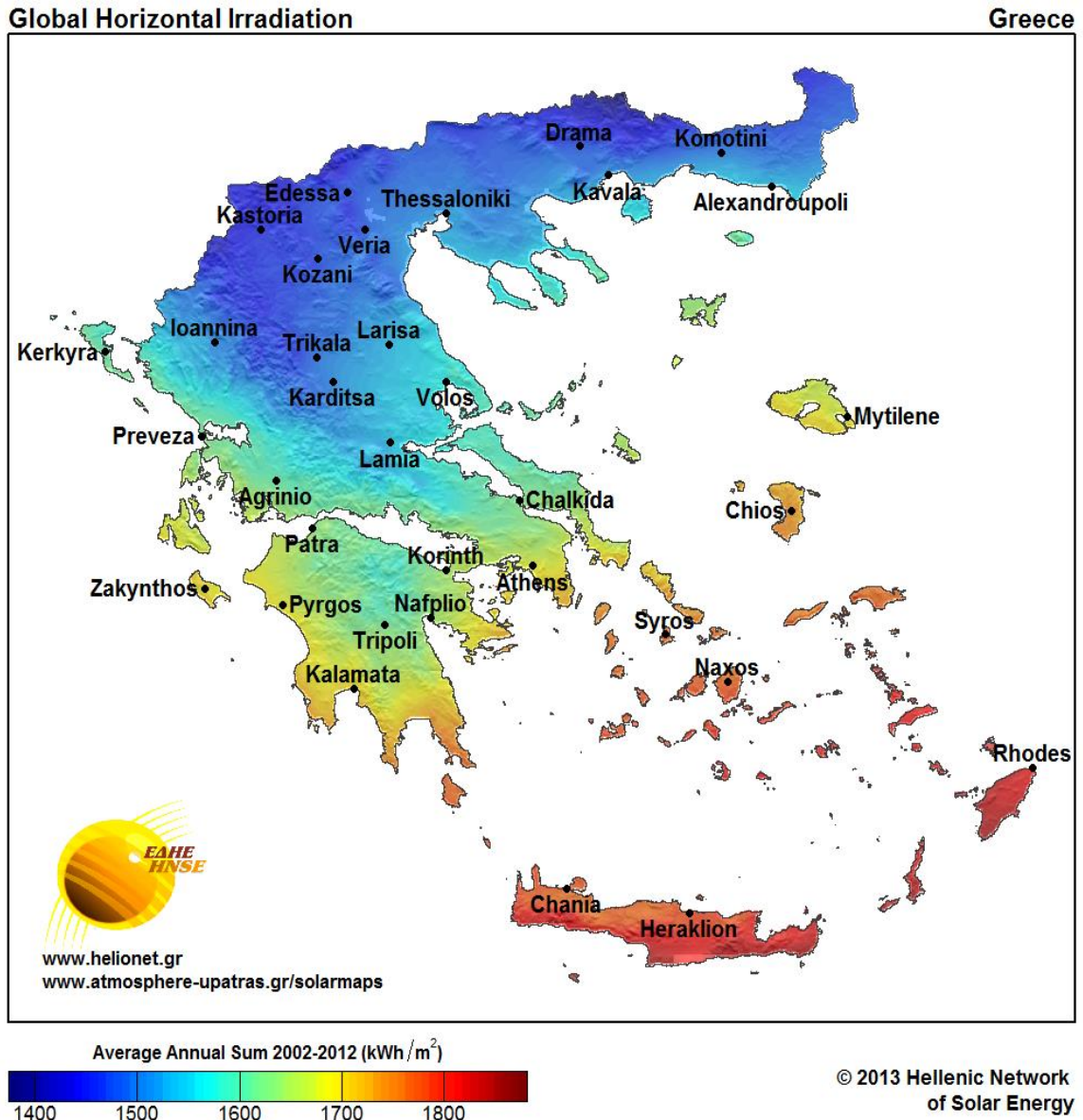
που υφίσταται σε όλα τα μέρη του φάσματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η οπτική μάζα την οποία διασχίζει η ακτινοβολία τόσο μεγαλύτερη είναι η εξασθένηση της λόγω απορρόφησης.

- Η διάχυση είναι η αλλαγή διεύθυνσης του φωτός λόγω αλληλεπιδράσεων γης με τα μόρια του αέρα και μικρά σωματίδια που αιωρούνται μέσα στην ατμόσφαιρα.
- Η ανάκλαση οφείλεται στα αιωρήματα και στα νέφη της ατμόσφαιρας.
- Η απορρόφηση γίνεται από τα συστατικά της ατμόσφαιρας με διαφορετικό τρόπο.



Σχήμα 4.2.7 Το % ποσοστό ηλιακής ακτινοβολίας

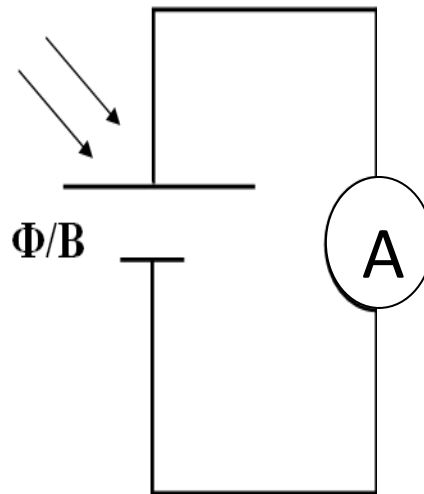
Ένα άλλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάτε από συστατικά της ατμόσφαιρας. Για παράδειγμα, υπεριώδης ακτινοβολία απορροφάτε από τα μόρια του όζοντος στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, ώστε η ένταση των ακτινών αυτών στην επιφάνεια της γης, να είναι εξαιρετικά μειωμένη και η καρκινογόνος δράση της περιορισμένη. Άρα στην επιφάνεια της γης, φτάνουν δύο συνιστώσες του ηλιακού φωτός: η απευθείας και η σκεδαζόμενη στα μόρια του αέρα, που ονομάζεται διάχυτη D (Diffuse). Η διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια, προέρχεται από όλο τον ουράνιο θόλο (πάνω από το φυσικό ορίζοντα).



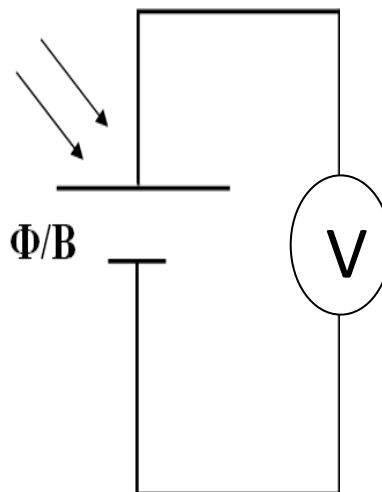
Σχήμα 4.2.8 Μέσος όρος ηλιακής ακτινοβολίας για χρονιές 2002 μέχρι 2012 σε οριζόντια επιφάνεια για την Ελλάδα

Πειραματικό μέρος : (Μέρος Α)

Αυτό που θα κάνουμε στην **άσκηση 2** θα είναι στο πρώτο μέρος να μετρήσουμε διαφορετικά ζευγάρια τιμών Τάσεις-Απόστασης και Ένταση-Απόστασης ανάλογα με την απόσταση της λάμπας που θα βάλουμε κάθε φορά. Έπειτα θα φτιάξουμε τις γραφικές παραστάσεις σε Excel και θα μελετήσουμε τις καμπύλες και στις δυο περιπτώσεις.



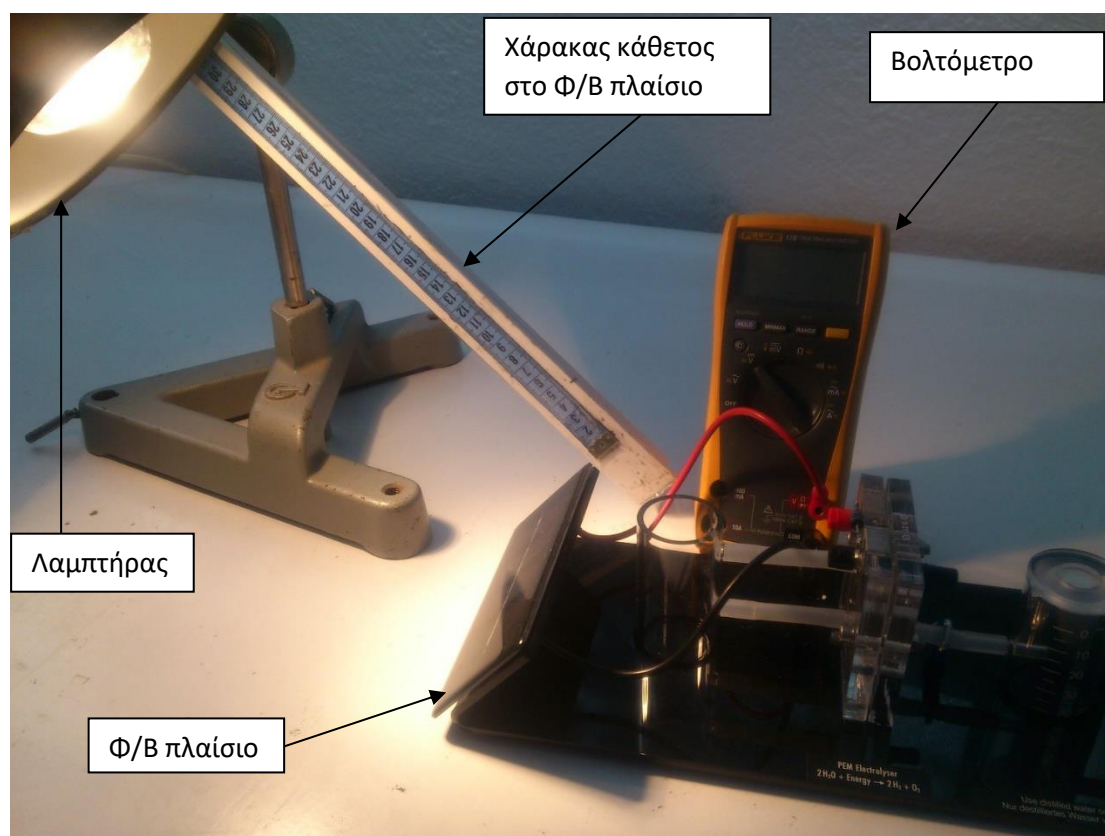
Σχήμα 4.2.9 Σύνδεση για μέτρηση έντασης του φωτοβολταϊκού ρεύματος



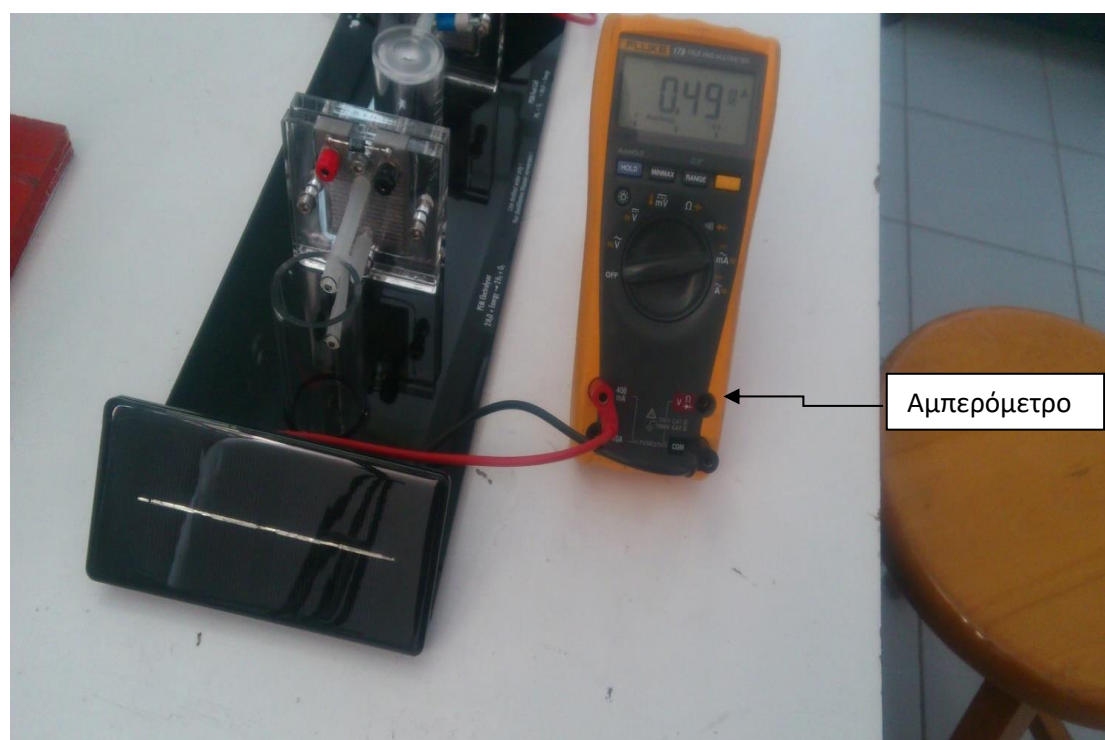
Σχήμα 4.2.10 Σύνδεση για μέτρηση τάσης ανοιχτού κυκλώματος

Στα σχήματα 4.2.9 και 4.2.10 απεικονίζεται η συνδεσμολογία που θα χρειαστεί να φτιάξουμε για τις μετρήσεις στη πρώτη και στη δεύτερη περίπτωση. Παρακάτω στις εικόνες 4.2.11 και 4.2.12 παρατηρούμε της φωτογραφίες για τα 2 κυκλώματα.

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

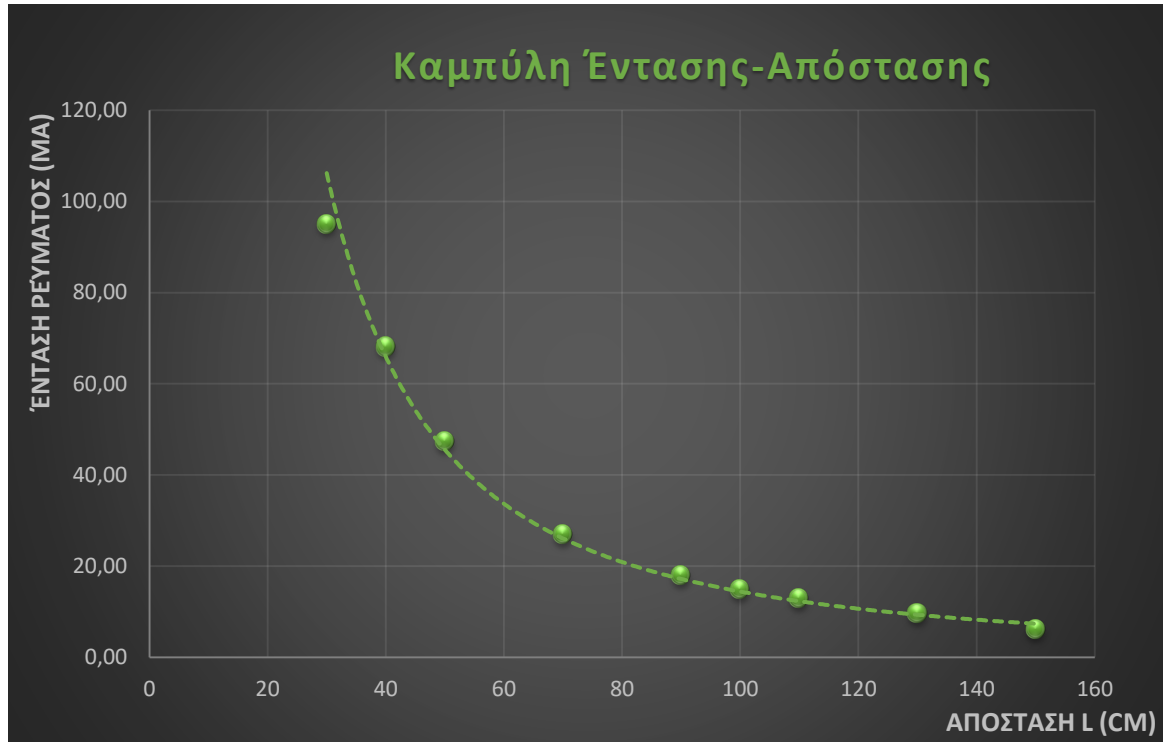


Σχήμα 4.2.11 Φωτογραφία για την σύνδεση βολτομέτρου



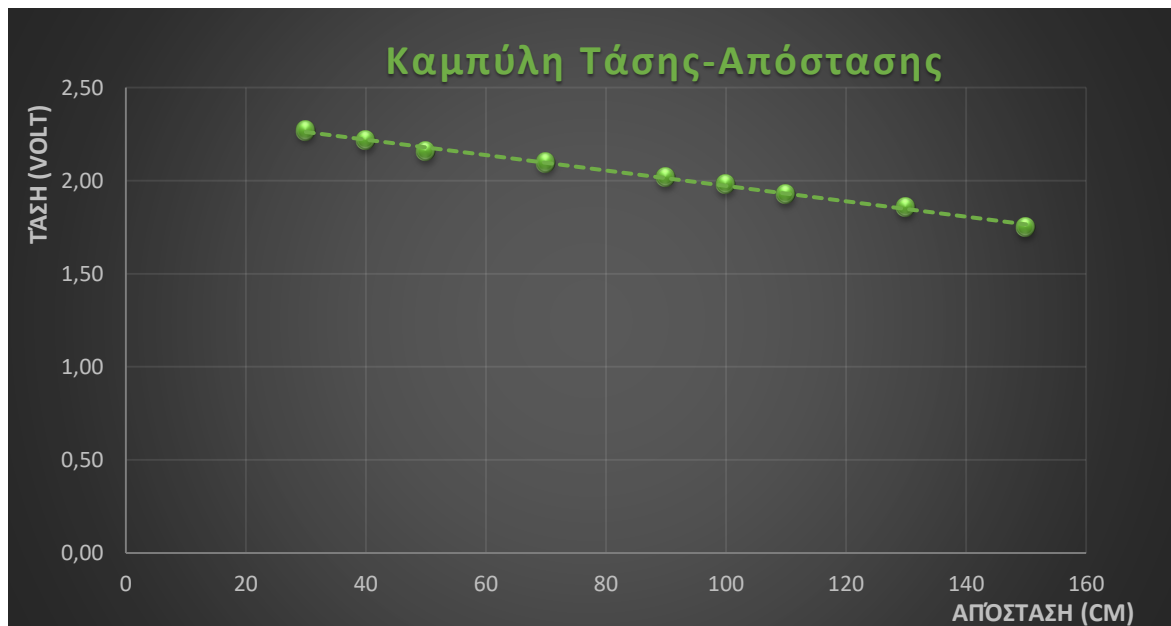
Σχήμα 4.2.12 Φωτογραφία για την σύνδεση Αμπερομέτρου

Το αποτέλεσμα που περιμένουμε να δούμε όσον αφορά τις γραφικές παραστάσεις από το πρώτο μέρος του πειράματος θα πρέπει να μοιάζουν με τις παρακάτω σχήματα 4.2.13 και 4.2.14.



Σχήμα 4.2.13 Καμπύλη Έντασης-Απόστασης (I-L)

Στην παραπάνω εικόνα αποικονίζεται η καμπύλη I-L η οποία θεωρητικά είναι ανάλογη του τετραγώνου.



Σχήμα 4.2.14 Καμπύλη Τάσης-Απόστασης (V-L)

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

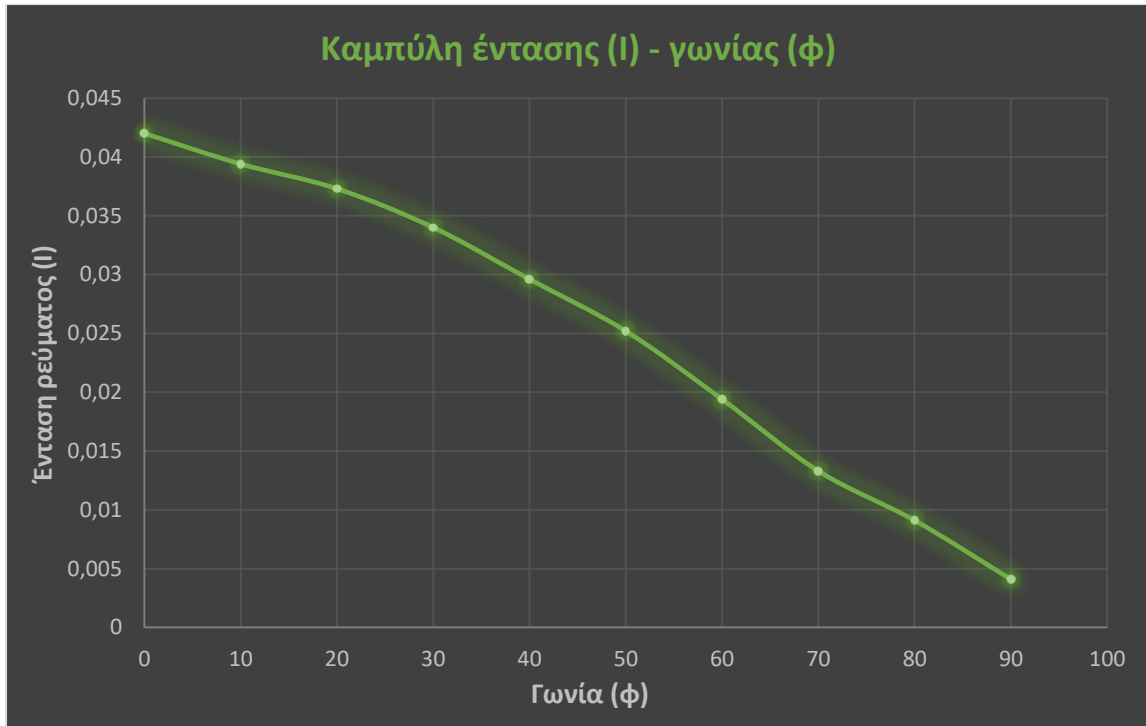
Στην παραπάνω εικόνα αυτό που παρατηρούμε είναι ότι έχουμε μια ευθεία και ότι η σχέση είναι γραμμική.

Βήματα πειράματος (Μέρος Α):

1. Ανοίγουμε τον λαμπτήρα και περιμένουμε τουλάχιστον 1 λεπτό για να αποκατασταθεί θερμική ισορροπία.
2. Τοποθετούμε τον λαμπτήρα αρχικά σε απόσταση 30 cm και στην συνέχεια τον απομακρύνουμε σύμφωνα με τις αποστάσεις που θα δείτε παρακάτω στον Πίνακα 4.2.1.
3. Παίρνουμε μετρήσεις της τάσης ανοιχτού κυκλώματος και της έντασης για κάθε απόσταση χωριστά.
4. Με βάση τις αντίστοιχες μετρήσεις του Πίνακα 4.2.1 φτιάχνω τη γραφική παράσταση Έντασης-Απόστασης (I-L) και επίσης τις Τάσης-Απόστασης (V-L).
5. Βρίσκω την εξίσωση της καμπύλης για τις δυο γραφικές παραστάσεις.

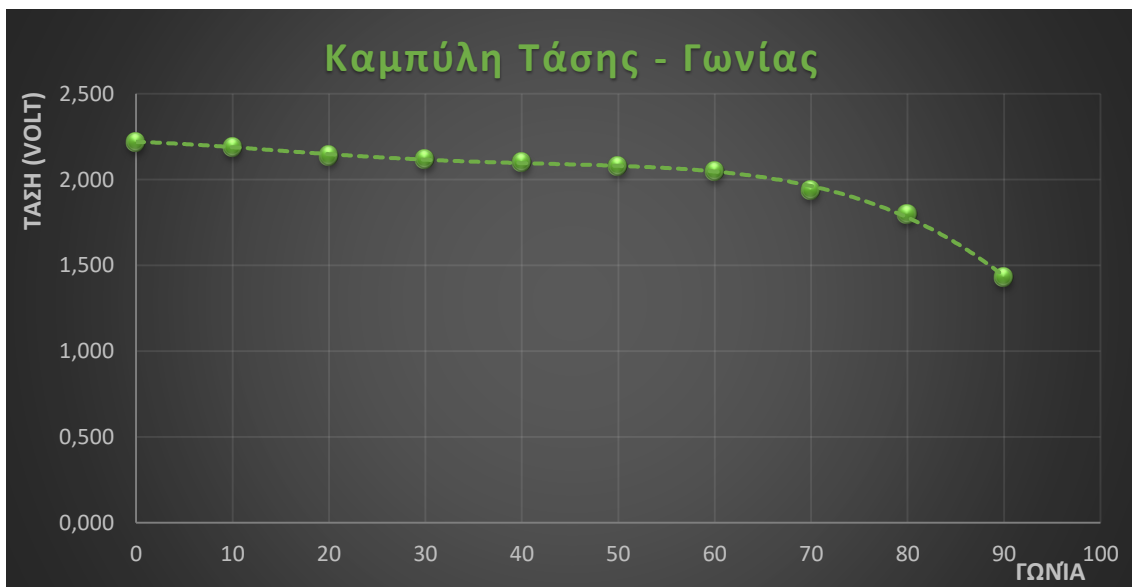
Πειραματικό μέρος (Μέρος Β) :

Στο δεύτερο μέρος η διαδικασία είναι παρόμοια. Αυτό που αλλάζουμε είναι η γωνία πρόσπτωσης του φωτός σε σχέση με το πλαίσιο. Σε αυτή την περίπτωση λοιπόν θα μετράμε την τάση ανοιχτού κυκλώματος και ένταση Φ/Β για κάθε γωνία και θα φτιάξουμε τις γραφικές παραστάσεις Έντασης-Γωνίας και Τάσης-Γωνίας όπως φαίνονται και στα παρακάτω σχήματα (4.2.15 και 4.2.16).

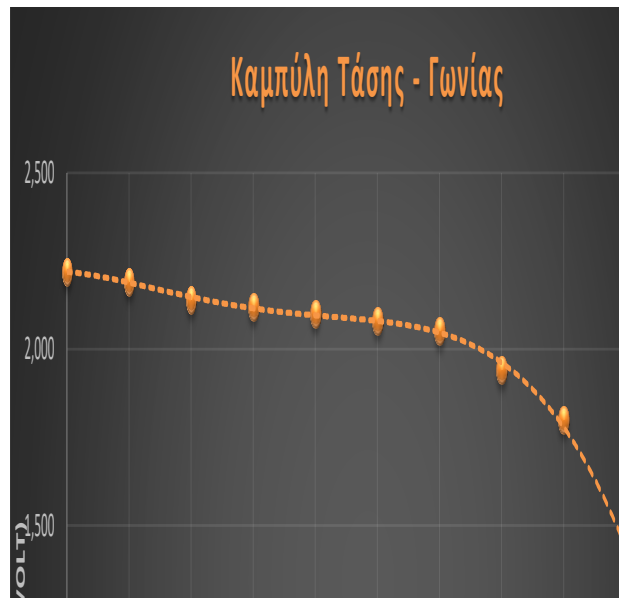


Σχήμα 4.2.15 Καμπύλη Έντασης-Γωνίας

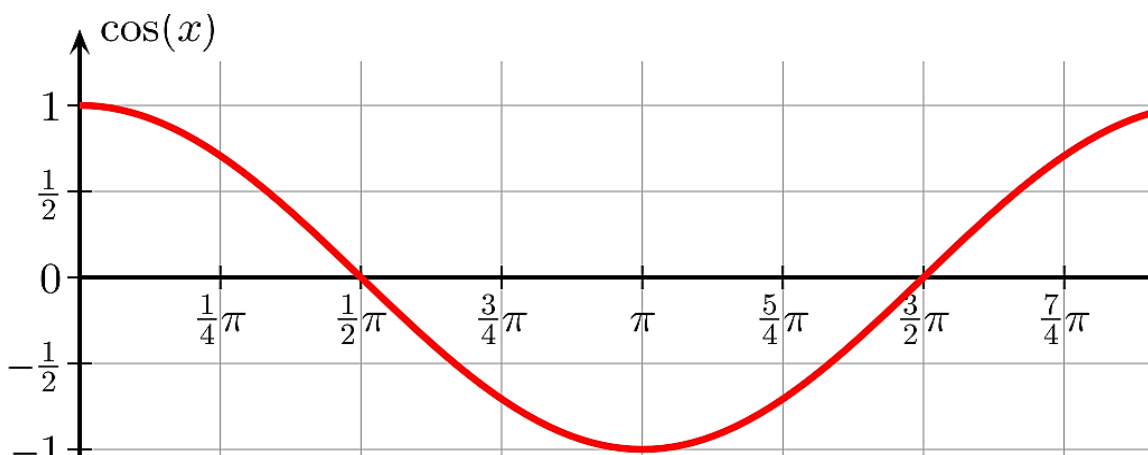
Παραπάνω στο σχήμα 4.2.15 παρατηρούμε την καμπύλη Έντασης-Γωνίας η οποία θεωρητικά είναι μία ευθεία. Στο σχήμα 4.2.16 βλέπουμε την καμπύλη Τάσης-Απόστασης η οποία είναι ανάλογη του \cos (συνημίτονου) της γωνίας, αυτό το βλέπουμε καλύτερα και στο 4.2.17 όπου συγκεντρωνόμαστε μόνο στην περιοχή της καμπύλης και μπορούμε να το συγκρίνουμε με το σχήμα 4.2.18 όπου απεικονίζεται η γραφική παράσταση ενός συνημίτονου.



Σχήμα 4.2.16 Καμπύλη Τάσης-Γωνίας (V-Φ)



Σχήμα 4.2.17 Συγκέντρωση στην καμπύλη



Σχήμα 4.2.18 Γραφική παράσταση $\cos(x)$

Βήματα πειράματος (Μέρος Β) :

1. Τα δύο πρώτα βήματα είναι ίδια με το Α Μέρος.
2. Τοποθετούμε τον λαμπτήρα κάθετο στο Φ/Β πλαίσιο σε απόσταση 50 cm και ορίζουμε την γωνία αυτή 0 μοίρες.
3. Αυξάνουμε την γωνία ανά 10 μοίρες με την βοήθεια του μοιρογνωμονίου και παίρνουμε μετρήσεις της τάσης και της έντασης για κάθε γωνία.
4. Θα παίρνουμε μετρήσεις έως ότου να φτάσουμε τις 90 μοίρες δηλαδή μέχρι το σημείο που το Φ/Β πλαίσιο θα είναι παράλληλο με τον λαμπτήρα.
5. Με βάση τις μετρήσεις φτιάχνουμε δύο γραφικές παραστάσεις, αρχικά την ΓΠ Έντασης Φ/Β ρεύματος σε σχέση με την γωνία και έπειτα την ΓΠ

Τάσης ανοιχτού κυκλώματος σε σχέση με την γωνία.(Οι δύο γραφικές παραστάσεις θα πρέπει να μοιάζουν με τις της παραπάνω ΓΠ που βλέπουμε στα σχήματα 4.2.15 και 4.2.16).

Φύλλο εργασίας

Τίτλος:

Ονοματεπώνυμο:

Ημερομηνία:

Σκοπός:

ΜΕΡΟΣ Α

1. Συμπληρώστε τον παρακάτω πίνακα με βάση τις μετρήσεις που έχετε κάνει :

Απόσταση (L) σε cm	I (mA)	V (Volt)
30		
40		
50		
70		
90		
100		
110		
130		
150		

Πίνακας 4.2.1

2. Φτιάξτε τη γραφική παράσταση Έντασης-Απόστασης (I-L) και επίσης τις Τάσης-Απόστασης (V-L).
3. Να βρείτε της εξίσωσης των καμπυλών για της δύο περιπτώσης.

ΜΕΡΟΣ Β

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

1. Συμπληρώστε τον παρακάτω πίνακα με βάση τις μετρήσεις που έχετε κάνει :

Γωνιά°	I (mA)	V (Volt)
0		
10		
20		
30		
40		
50		
60		
70		
80		
90		

Πίνακας 4.2.2

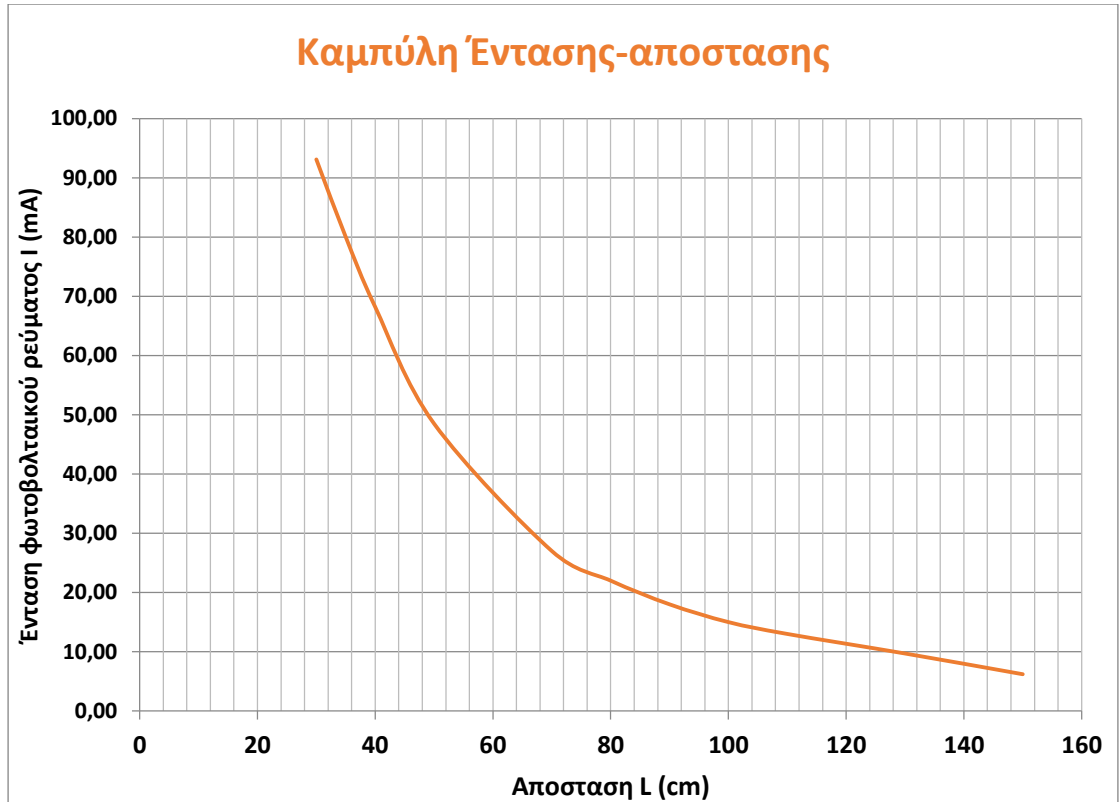
2. Να φτιαχτούν οι γραφικές παραστάσεις V-Φ και I-Φ σύμφωνα με τις παραπάνω μετρήσεις.
3. Να βρείτε τις εξισώσεις για τις δυο γραφικές παραστάσεις.

Κριτήριο αξιολόγησης

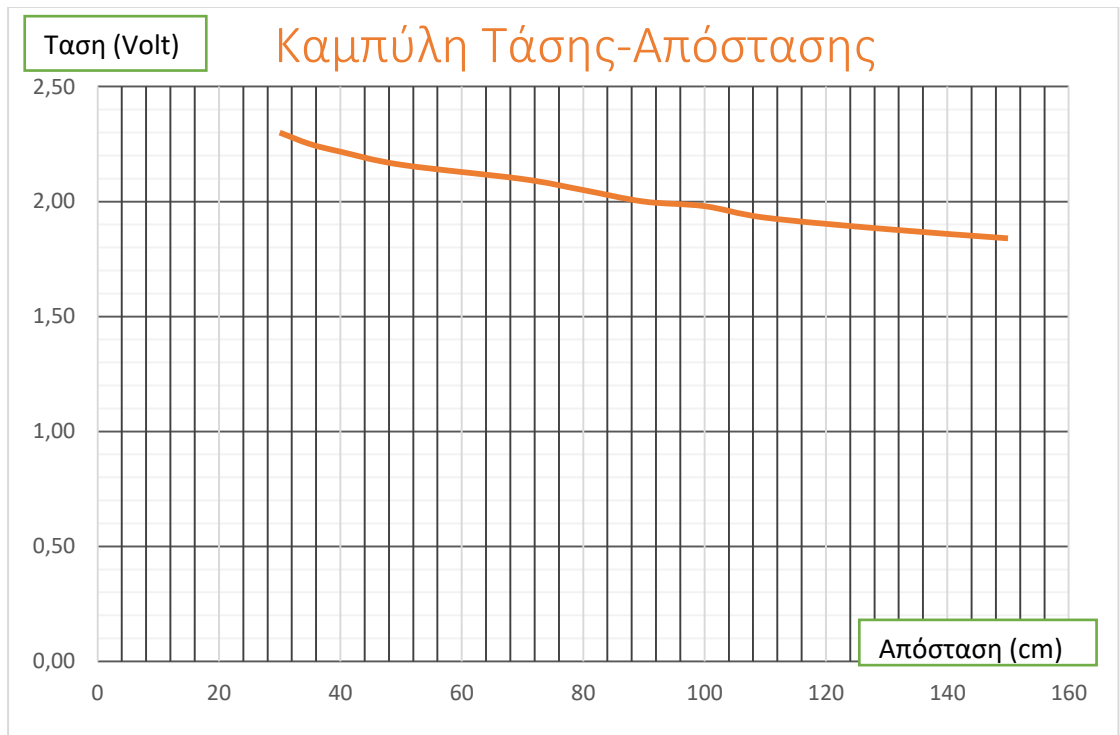
1. Με την βοήθεια των δυο παρακάτω εικόνων 16 και 17 όπου απεικονίζονται δυο γραφικές παραστάσεις να βρείτε :

A) Την ένταση του φωτοβολταϊκού ρεύματος σε mA όταν η απόσταση είναι 84 cm

B) Την τάση ανοιχτού κυκλώματος σε Volt όταν η απόσταση είναι 0,9 m



Σχήμα 4.2.19 Μια γραφική παράσταση I-L ενός Φ/Β πλαισίου



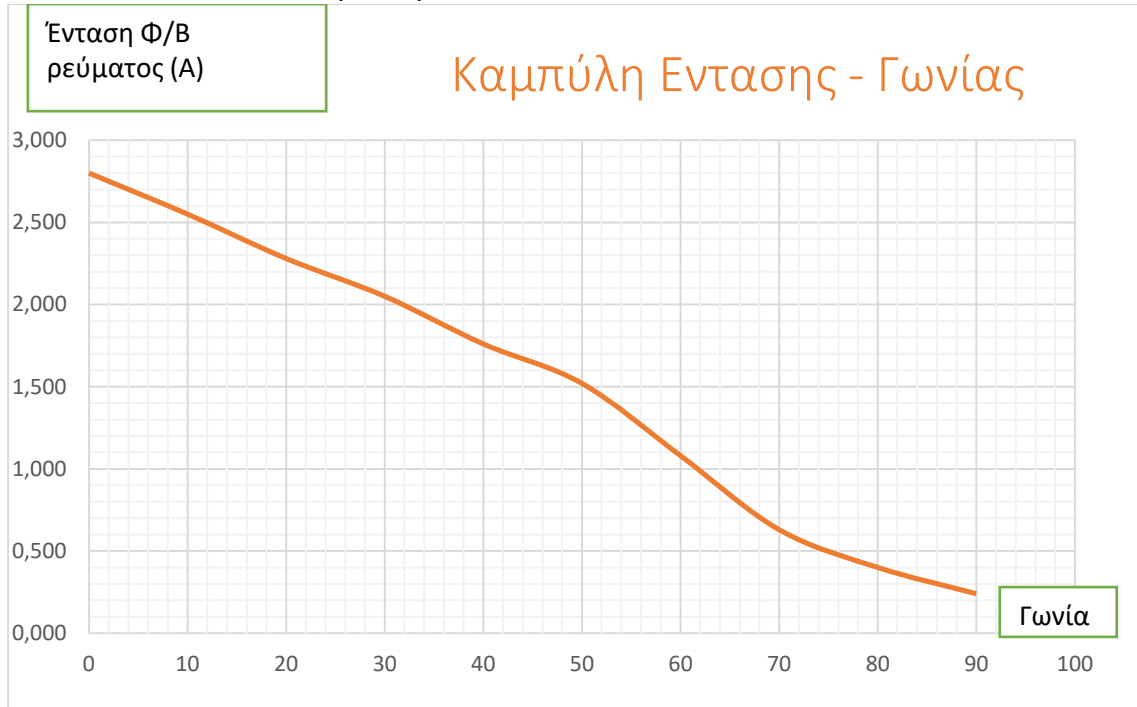
Σχήμα 4.2.20 Γραφική παράσταση V-L

2. Με την βοήθεια των παρακάτω γραφικών παραστάσεων να βρείτε τη γωνία που σχηματίζει ο χάρακας με το πλαίσιο όταν :

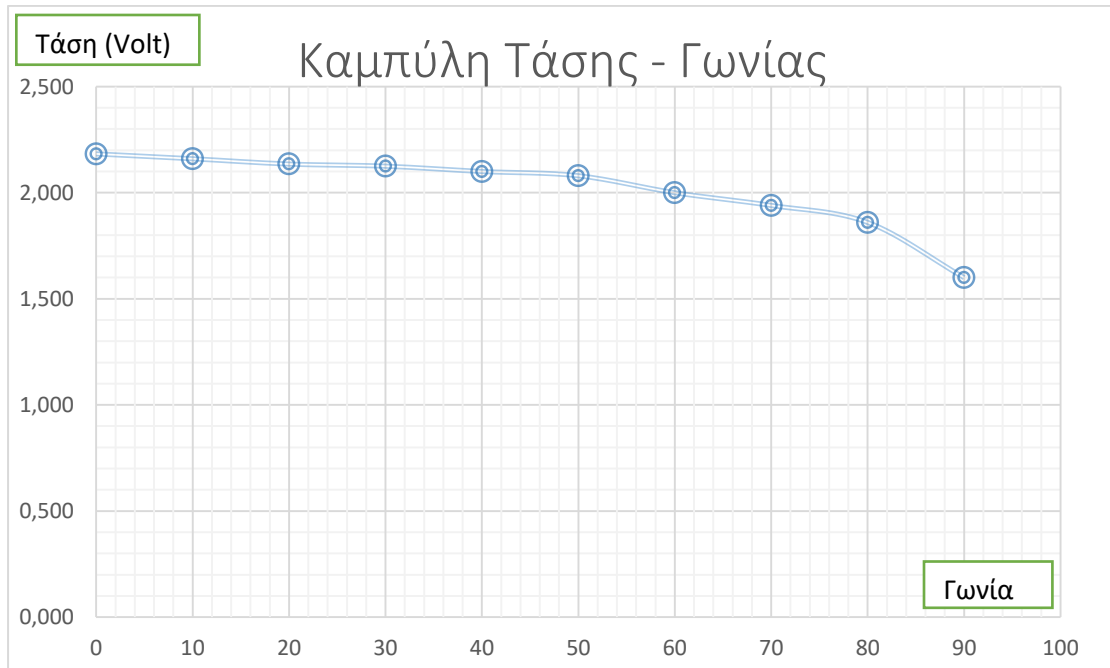
“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

a. Η ένταση του φωτοβολταϊκού κυκλώματος είναι μέγιστη:

b. Όταν η τάση είναι 2 V:



Σχήμα 4.2.21 Γραφική παράσταση I-Φ



Σχήμα 4.2.22 Γραφική παράσταση V-Φ

3. Επέλεξε τη σωστή απάντηση

IV. Θεωρητικά η γραφική παράσταση (I-L) η καμπύλη που σχηματίζεται είναι :

- a. γραμμική
- b. αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου
- c. ανάλογη του τετραγώνου

V. Θεωρητικά η σχέση (V-L) είναι :

- a. γραμμική
- b. αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου
- c. ανάλογη του τετραγώνου

VI. Θεωρητικά η σχέση (I-Φ) είναι:

- a. Ανάλογη της γωνίας
- b. Ανάλογη το \cos της γωνίας
- c. Ανάλογη το \sin της γωνίας

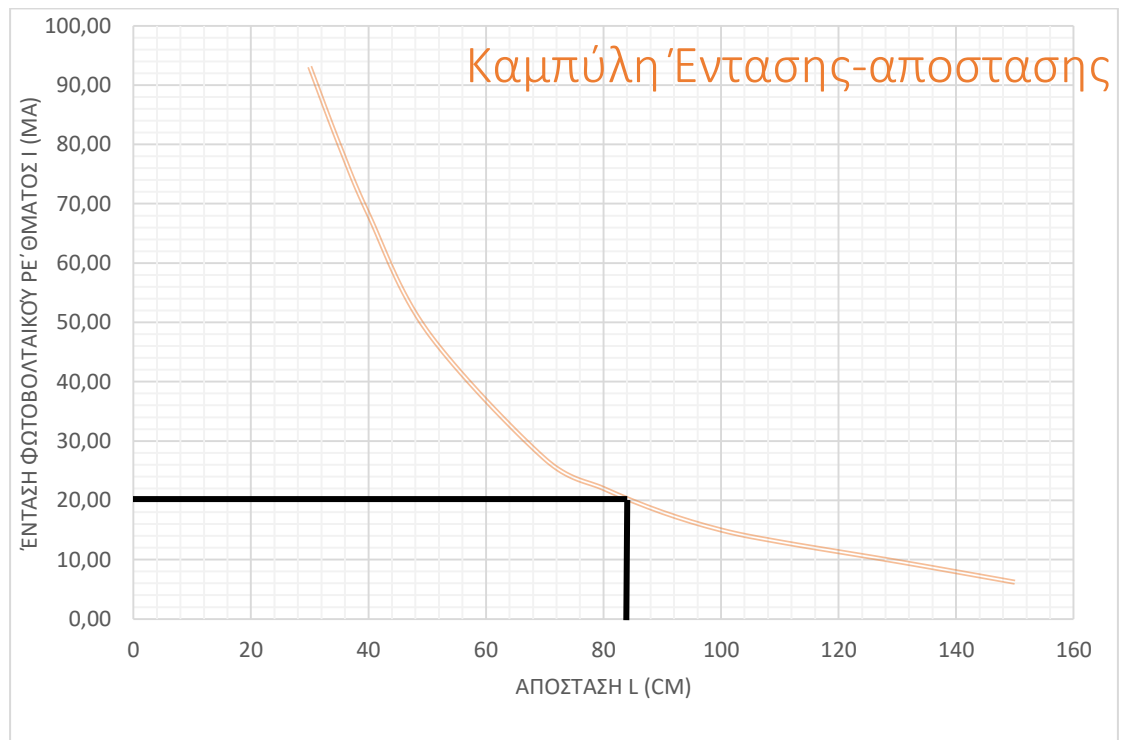
4. Ποιες από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστές και ποιες είναι λάθος :

- A. Η ισχύς από μία πηγή ακτινοβολίας που πέφτει πάνω στη μονάδα επιφάνειας ονομάζεται ένταση ακτινοβολίας.
- B. Περιήλιο ονομάζουμε την μεγαλύτερη απόσταση της Γης από τον Ήλιο.
- C. Η γωνία ζενίθ του ήλιου θ_z είναι η γωνία μεταξύ των Φ/B πλαισίων και του οριζόντιου επιπέδου.

Απαντήσεις

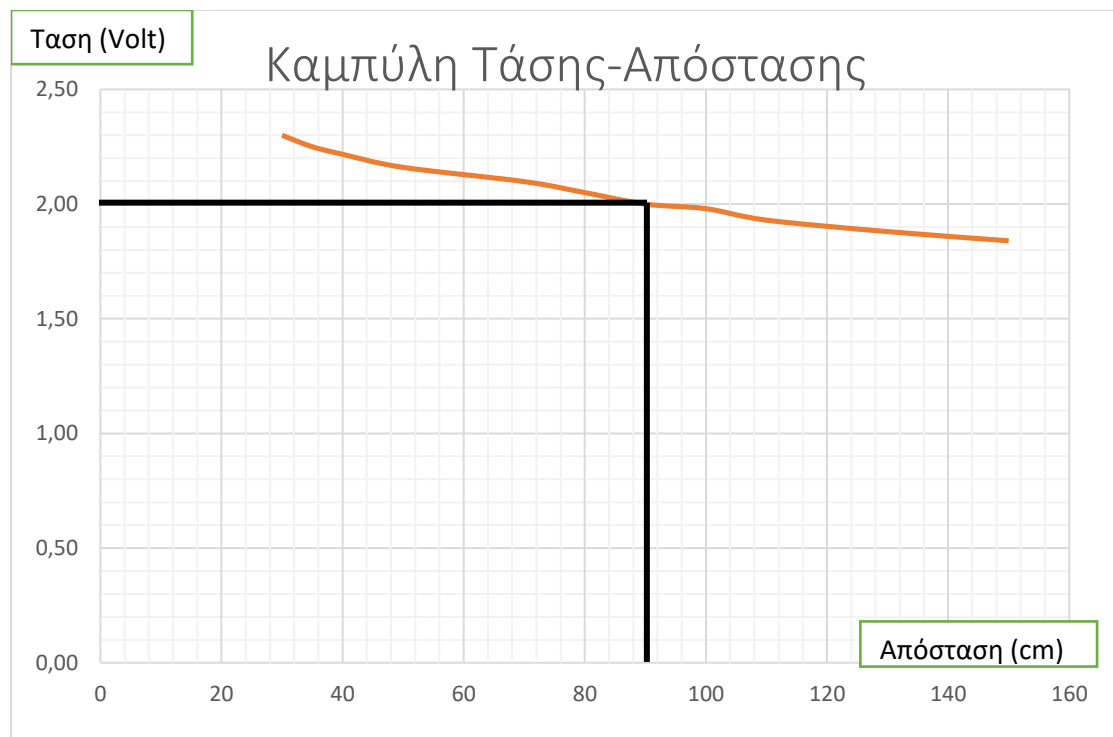
“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

1Α)



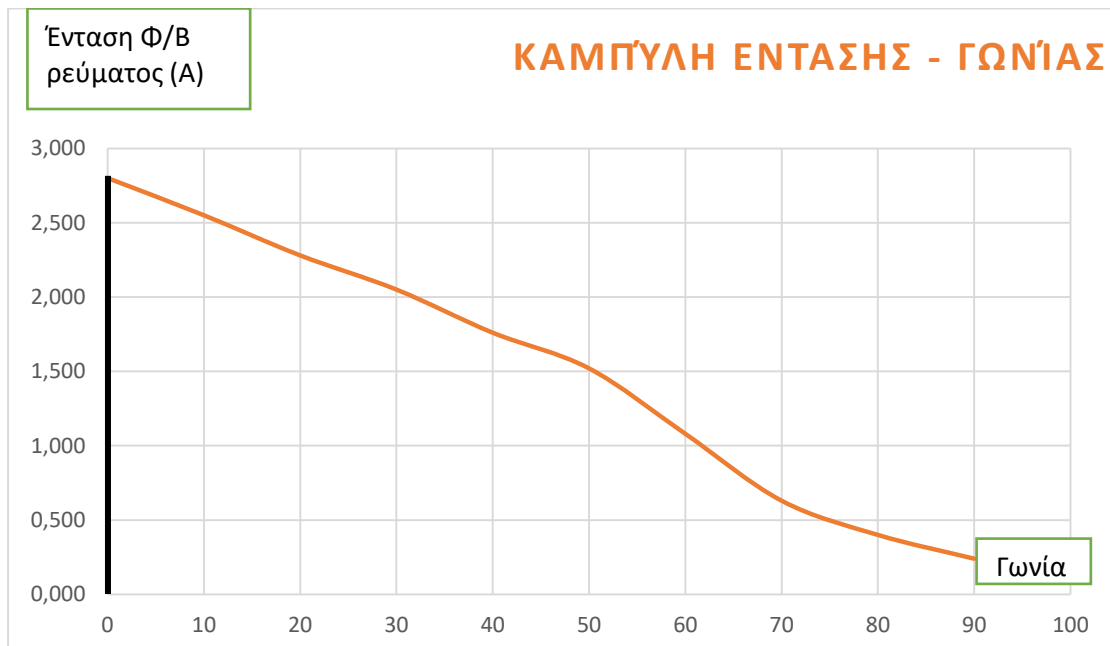
Α) Η σωστή απάντηση στο (1 Α) είναι 20 mA

1Β)



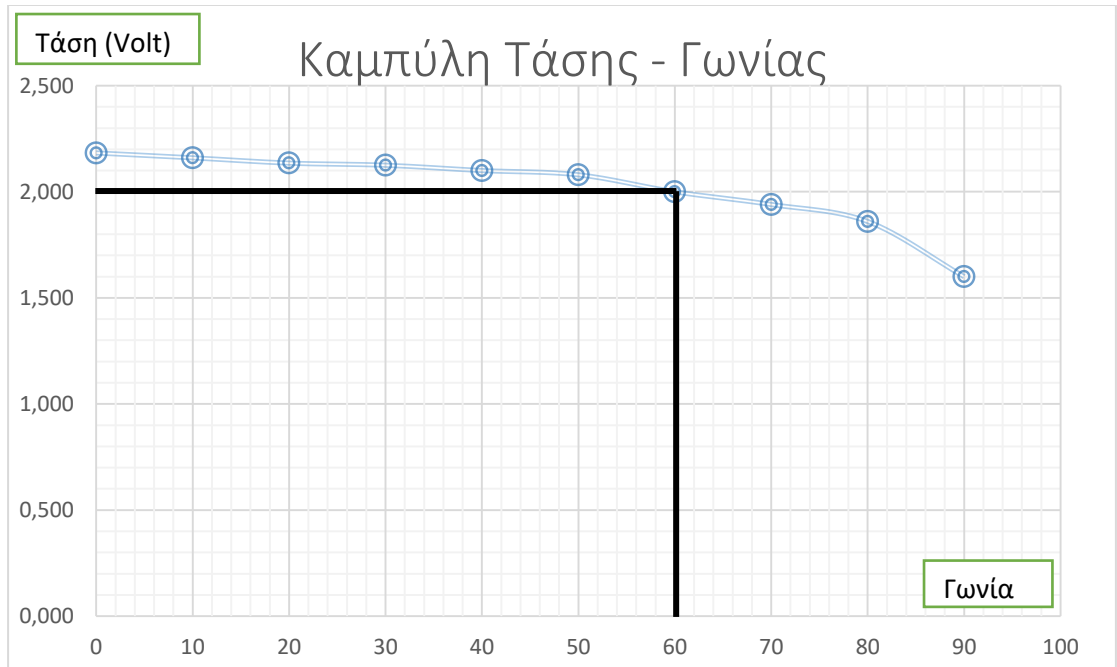
Β) Η σωστή απάντηση στο (1 Β) είναι 2 Volt

2Α)



Α) Η σωστή απάντηση στο (2 A) είναι 90° και όχι 0 όπως μπορεί να φαίνεται στην παραπάνω γραφική παράσταση

2Β)



Β) Όταν έχουμε τάση 2 V η γωνία είναι 60° όπως βλέπουμε και στο παραπάνω διάγραμμα η σωστή απάντηση όμως είναι 30° διότι θέλουμε την γωνία του χάρακα με το πλαίσιο.

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

- | | | |
|---------|----|------------------------------------|
| 3) I) | b) | Αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου |
| 3) II) | a) | Γραμμική |
| 3) III) | b) | Ανάλογη το \cos της γωνίας |

4 A) Σωστό

4 B) Λάθος

4 C) Λάθος

4.3 Άσκηση 3

Παραγωγή υδρογόνου, χαρακτηριστική καμπύλη ηλεκτρολύτη και βαθμός απόδοσης

Σύνοψη :

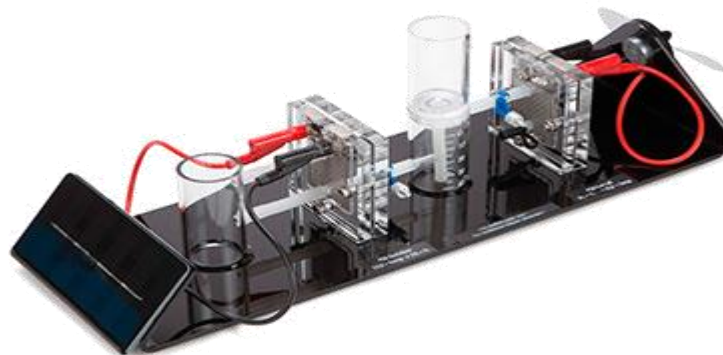
Στην άσκηση αυτή ο φοιτητής, με τη βοήθεια της διάταξης PEMPower1-Eco θα παράγει υδρογόνο μέσω του ηλεκτρολύτη και μέσα από τα αποτελέσματα θα βρει τον βαθμό απόδοσης του ηλεκτρολύτη PEM.

Προαπαιτούμενη γνώση :

- Ηλεκτρόλυση-Αρχή λειτουργίας
- Χαρακτηριστικά ηλεκτρολύτη-Βαθμός απόδοσης.
- Γραφικές παραστάσεις στο Excel.
- Χρήση πολυμέτρων.

Όργανα :

- Διάταξη PEMPower1-Eco (Εικόνα 1) .
- Φωτεινή πηγή (Λαμπτήρας).
- Απειονισμένο νερό
- Χρονόμετρο
- Βολτόμετρο, αμπερόμετρο και καλώδια.
- Η/Υ - Microsoft Office Excel. (εφόσον οι γραφικές παραστάσεις γίνουν στο Excel).



Σχήμα 4.3.1 Διάταξη PEMPower1-Eco

Θεωρία :

Ηλεκτρόλυση (λύση δι’ ηλεκτρισμού), ονομάζεται η διαδικασία της διάσπασης μιας ουσίας με τη βοήθεια του ηλεκτρικού ρεύματος.

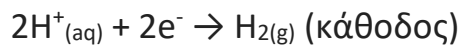
- Η ηλεκτρόλυση αξιοποιείται ειδικά τόσο στην εξαγωγή καθαρών μετάλλων από τα μεταλλεύματά τους, όσο και στις επιμεταλλώσεις.
- Η ηλεκτρόλυση θεωρείται ειδική χημική αντίδραση και αποτελεί αντικείμενο έρευνας και μελέτης της Ηλεκτροχημείας.

Ηλεκτρόλυση του νερού

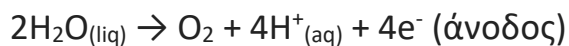
Κατά την ηλεκτρόλυση του νερού, το νερό διασπάται στα βασικά στοιχεία όπου το αποτελούν, υδρογόνο και οξυγόνο με την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της διεργασίας είναι η υψηλής καθαρότητας υδρογόνο που παράγεται. Ωστόσο, αποτελεί ακριβή μέθοδο εξαιτίας του κόστους του ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο απαιτείται.

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

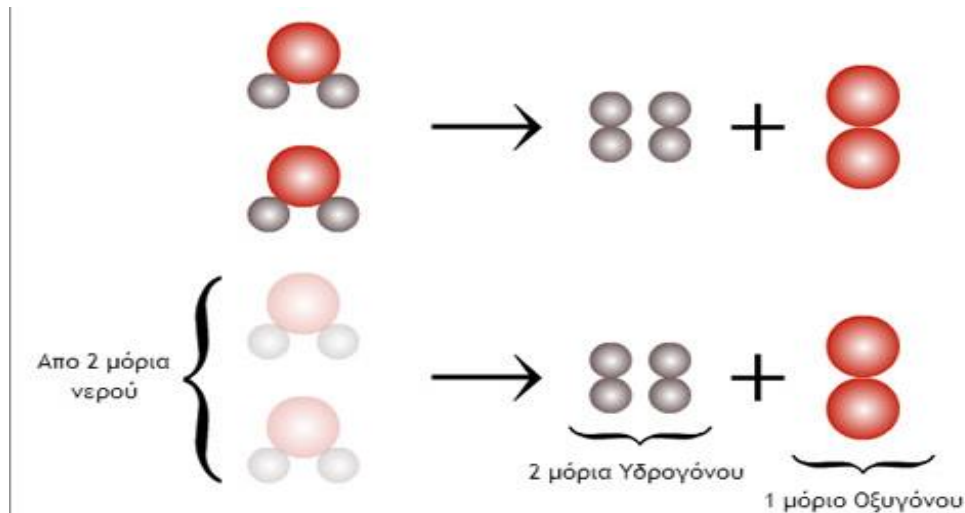


και



οι οποίες μας δίνουν το συνολικό μηχανισμό της ηλεκτρόλυσης



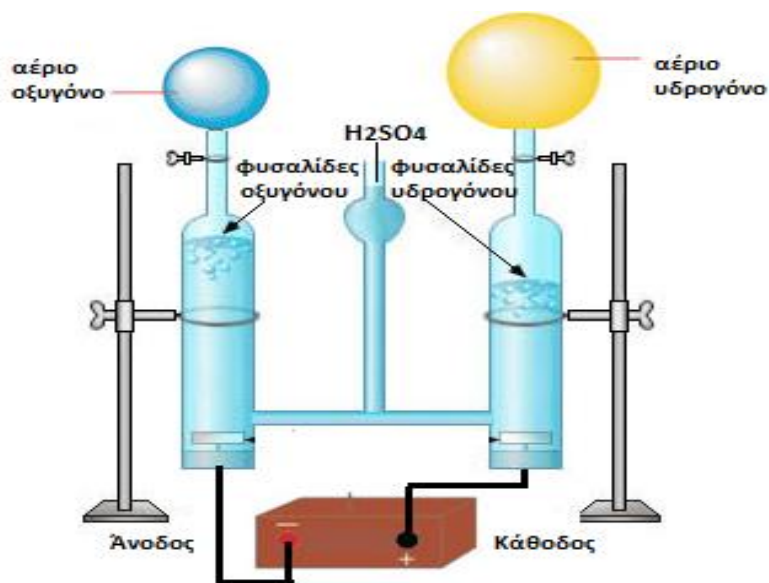


Σχήμα 4.3.2 Διεργασίες διάσπασης νερού

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

Θεωρητικά 1,23 V εφαρμοζόμενης τάσης αρκούν για τη διεξαγωγή της ηλεκτρόλυσης. Πρακτικά, χρειάζεται περισσότερη τάση (1,4 V με 1,55 V).

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



Σχήμα 4.3.3 Συσκευή ηλεκτρόλυσης Hoffman

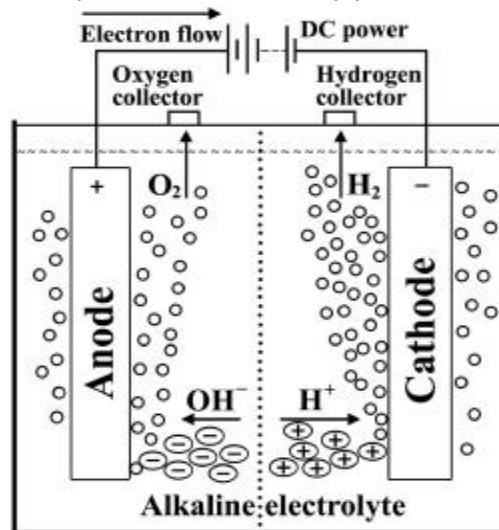
Η απευθείας ηλεκτρόλυση νερού μέχρι και τη δεκαετία του '50 είχε ευρεία χρήση στην παραγωγή υδρογόνου. Σήμερα, ένα μικρό μόνο ποσοστό υδρογόνου παράγεται κατά αυτόν τον τρόπο σε εφαρμογές κυρίως όπου χρειάζεται μικρός όγκος καθαρού υδρογόνου.

Ωστόσο παράλληλα παρατηρείται μια αναγέννηση του ενδιαφέροντος με την κατασκευή ολοκληρωμένων συστημάτων ηλεκτρολυτών σε συνδυασμό με εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακής ή αιολικής) για το οποίο θα επεκτείνουμε και παρακάτω.

Ηλεκτρόλυση του νερού μέσω ΑΠΕ

Η πιο καθαρή και ασφαλής μέθοδος παραγωγής είναι η ηλεκτρόλυση νερού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) όπως η ηλιακή, αιολική και η γεωθερμία, όπως και εμείς θα χρησιμοποιούμε την ηλιακή ενέργεια μέσω Φ/Β πλαισίου για να κάνουμε ηλεκτρόλυση στην συγκεκριμένη άσκηση. Αυτή η τεχνική μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση της ενέργειας από ΑΠΕ σε μορφή υδρογόνου σε κατάλληλες δεξαμενές, το οποίο μπορεί να μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρισμό, ιδανικά μέσω κυψελών καυσίμου, σε άλλες περιόδους.

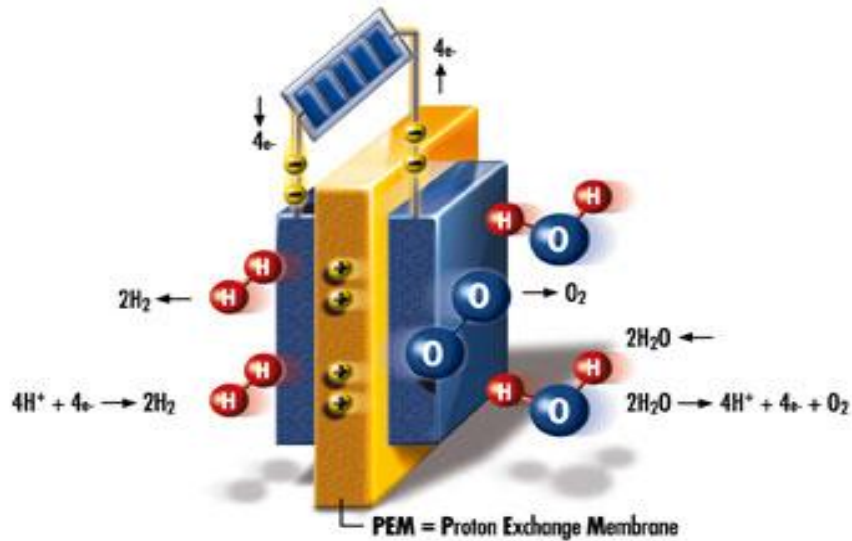
Υπάρχουν δύο ειδών μονάδες ηλεκτρόλυσης αρκετά αναπτυγμένες και οι δύο στις μέρες μας. Πέρα από τη συμβατική ηλεκτρόλυση νερού, όπου χρησιμοποιείται ένα μικρό-πορώδες διάφραγμα για το διαχωρισμό των παραγόμενων αερίων (οξυγόνο στην κάθοδο και υδρογόνο στην άνοδο) από το αλκαλικό διάλειμμα (*Αλκαλικές Μονάδες Ηλεκτρόλυσης*), κατασκευάζονται σήμερα μονάδες ηλεκτρόλυσης που παράγουν υδρογόνο σε υψηλή πίεση (έως 30bar), οι οποίες αποτελούνται από διπολικές πλάκες/ηλεκτρόδια, ενώ ερευνάται η λειτουργία τους σε πίεση έως 150bar.



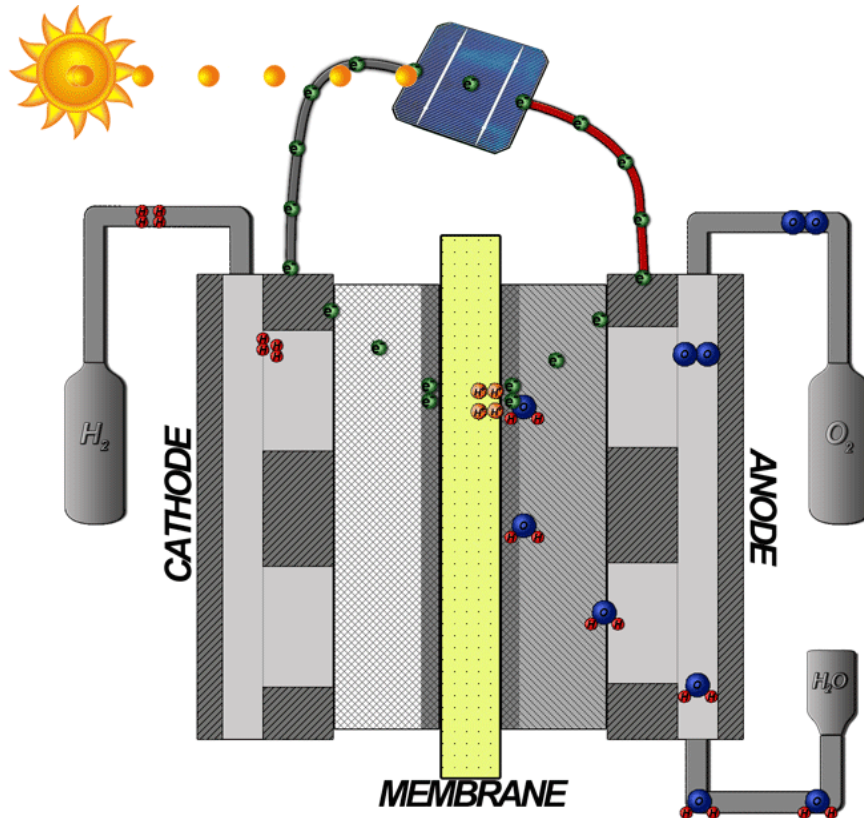
Σχήμα 4.3.4 Βασικό σχήμα για Αλκαλική ηλεκτρόλυση

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

Επίσης έχουν αναπτυχθεί και μονάδες ηλεκτρόλυσης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων *Μονάδες Ηλεκτρόλυσης τύπου PEM (Proton exchange membrane)*, οι οποίες δεν περιέχουν καυστική ποτάσα (όπως οι αλκαλικές), παράγουν καθαρότερο υδρογόνο, ενώ υπάρχει προοπτική για παραγωγή υδρογόνου υπό πίεση. Στις εικόνες 5 και 6 παρατηρούμε την διεργασία μέσα στον ηλεκτρολύτη και το βασικό σχήμα ηλεκτρόλυσης τύπου PEM μέσω Φ/Β πλαισίου.



Σχήμα 4.3.5 Χημικές διεργασίες για ηλεκτρόλυση τύπου PEM



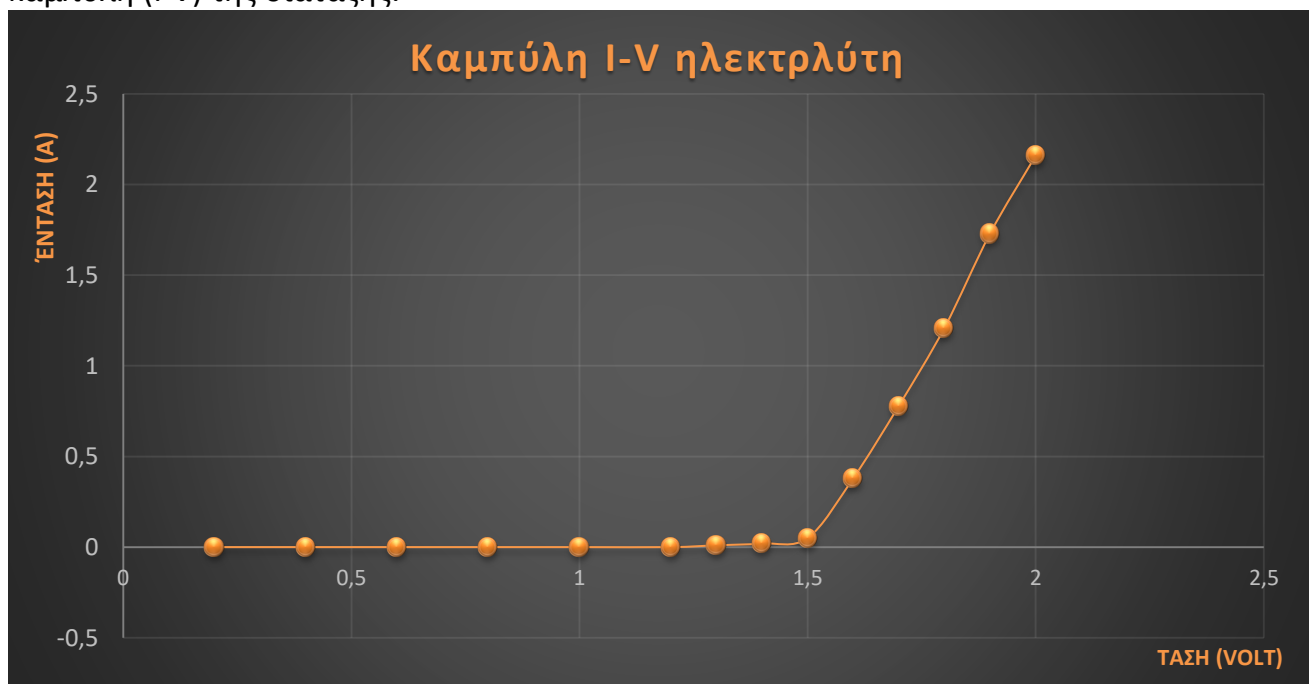
Σχήμα 4.3.6 Βασικό σχήμα ηλεκτρόλυσης τύπου PEM με χρήση Φ/Β πλαισίου

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

Το κεντρικό τμήμα του ηλεκτρολύτη είναι μια πολυμερή μεμβράνη, η οποία όταν έρθει σε επαφή με το νερό έχει την ιδιότητα να αφήνει ελεύθερα την διέλευση διαμέσου της ιόντων υδρογόνου πρωτονίων, ενώ αποκλείει την διέλευση των αρνητικών φορτισμένων ιόντων.

Η μεμβράνη αυτή είναι καλυμμένη με δυο χημικούς καταλύτες πλατίνας (Pt) σε κάθε πλευρά της. Όταν μια συνεχής τάση μεγαλύτερη από την τάση ηλεκτρόλυσης του νερού εφαρμοστεί στα ηλεκτρόδια του ηλεκτρολύτη ο οποίος έχει έρθει σε επαφή με το νερό τότε αυτός διασπάει το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο. Πιο συγκεκριμένα στην άνοδο του ηλεκτρολύτη το νερό οξειδώνεται, ελευθερώνοντας μοριακό οξυγόνο, πρωτόνια (H^+ ιόντα) και ελεύθερα ηλεκτρόνια. Καθώς το αέριο οξυγόνο μαζεύεται στην άνοδο, τα πρωτόνια (κίτρινα $+$) μετακινούνται μέσω της μεμβράνης στην κάθοδο όπου εκεί λαμβάνοντας τα απαιτούμενα ηλεκτρόνια μετατρέπονται σε αέριο υδρογόνο.

Όπως αναφέραμε και παραπάνω η ηλεκτρόλυση του νερού στην διάταξη που χρησιμοποιούμε ξεκινά όταν εφαρμόσω τάση 1,4 Volt και πάνω. Αυτό το βλέπουμε και παρακάτω στην εικόνα 7 όπου υπάρχει η χαρακτηριστική καμπύλη (I-V) της διάταξης.



Σχήμα 4.3.7 . Καμπύλη (I-V) του ηλεκτρολύτη

Βαθμός απόδοσης

Για να υπολογίσουμε τον βαθμό απόδοσης του ηλεκτρολύτη υπάρχουν 2 τρόποι.

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

A. Πρώτος τρόπος είναι με το δεύτερο νόμο του Faraday και το νόμο ιδανικού αερίου, παρακάτω παρατηρούμε και της σχέσεις που χρησιμοποιούνται.

$$\begin{array}{ll} \text{Δεύτερος νόμος του Faraday} & Q=I \cdot t=n \cdot z \cdot F \\ \text{Νόμος ιδανικού αερίου} & p \cdot V=n \cdot R \cdot T \end{array}$$

Με τον συνδυασμό των δυο παραπάνω τύπων μπορούμε θεωρητικά να υπολογίσουμε τον όγκο του υδρογόνου που παράγεται.

$$V = \frac{R \cdot I \cdot T \cdot t}{F \cdot p \cdot z}$$

Όπου:

V= θεωρητικός όγκος υδρογόνου που παράγεται σε m^3

R= Παγκόσμια σταθερά υδρογόνου = $8.314 \frac{J}{mol \cdot K}$

P= ατμοσφαιρική πίεση σε Pa = 1 Pa

F= σταθερά Faraday = $96485 \frac{C}{mol}$

T= ατμοσφαιρική θερμοκρασία σε K

I= Ένταση του ρεύματος σε A

t= Χρόνος σε sec

z= Αριθμός ηλεκτρονίων για να ελευθερωθεί ένα μόριο

για παράδειγμα: z(H₂) = 2 (2 μόρια ηλεκτρονίου χρειάζονται για ελευθερωθεί 1 mol υδρογόνου) z(O₂) = 4

Ο βαθμός απόδοσης Faraday υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση

$$N (\text{faraday}) = \frac{V (\text{παραγόμενη})}{V (\text{υπολογισμένο θεωρητικά})}$$

B. Δεύτερος τρόπος υπολογισμού βαθμού απόδοσης είναι ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε και στο πείραμα που θα κάνουμε.

Παρακάτω παρατηρούμε την σχέση του ενεργειακού βαθμού απόδοσης N(ενεργειακός) :

$$N (\text{ενεργειακός}) = \frac{E (\text{υδρογόνου})}{E (\text{ηλεκτρικού})}$$

Η ενέργεια υδρογόνου **E (υδρογόνου)** ισούται με την παρακάτω σχέση :

$$E (\text{υδρογόνου}) = V (\text{υδρογόνου}) * H (\text{υδρογόνου})$$

Όπου:

$$H (\text{υδρογόνου}) = \text{θερμιδική αξία υδρογόνου} = 12.745 * 10^6 \frac{J}{m^3}$$

$$V (\text{υδρογόνου}) = \text{ποσότητα υδρογόνου που παράγεται σε } m^3$$

Η ενέργεια ηλεκτρικού **E (ηλεκτρικού)** ισούται με την παρακάτω σχέση :

$$E (\text{ηλεκτρικού}) = U * I * t$$

Όπου:

U = Τάση σε volt

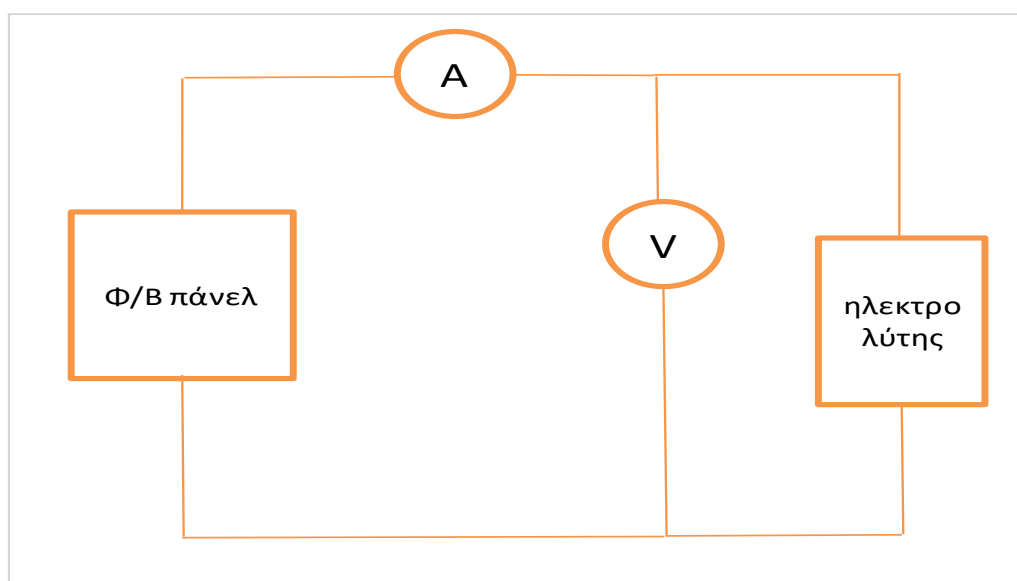
I = Ένταση του ρεύματος σε Ampere

t = χρόνος σε sec

Πειραματικό μέρος :

Σε αυτήν την άσκηση θα κάνουμε ηλεκτρόλυση του νερού και θα παράγουμε υδρογόνο με την βοήθεια του ηλεκτρολύτη χρησιμοποιώντας ως πηγή ενέργειας το Φ/Β πάνελ. Φτιάχνουμε το κατάλληλο κύκλωμα όπως φαίνεται και παρακάτω στις εικόνες (8 και 9) και στην συνέχεια θα αρχίσουμε την παραγωγή υδρογόνου και θα παίρνουμε μετρήσεις κάθε 5 cm^3 παραγόμενου υδρογόνου και θα μετράμε τον χρόνο t που χρειάστηκε, την τάση V και την ένταση του ρεύματος I. Θα συμπληρώσουμε τον Πίνακα 1 στο φύλλο εργασίας και στην συνέχεια θα φτιάξουμε την γραφική παράσταση V-t για να δούμε τον όγκο που παράγουμε ανάλογα με τον χρόνο.

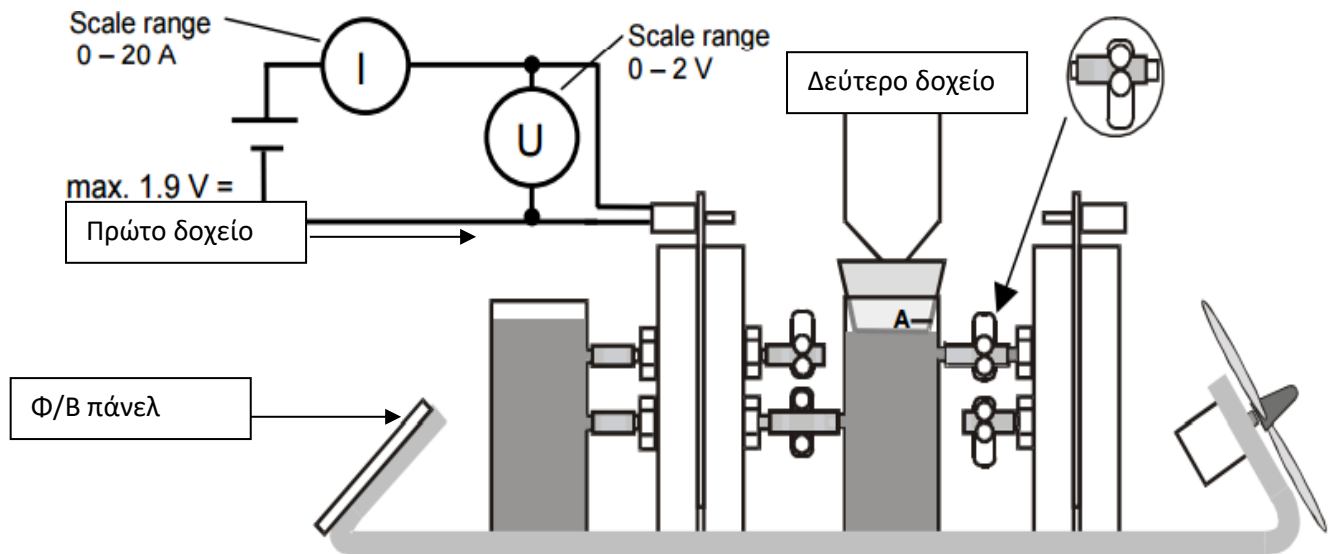
Το τελικό και πιο σημαντικό βήμα της άσκησης είναι να βρούμε τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης (N ενεργειακό) με την βοήθεια της θεωρίας και των μετρήσεων που θα πάρουμε.



Σχήμα 4.3.8 Κύκλωμα



Σχήμα 4.3.9 Φωτογραφία κυκλώματος



Σχήμα 4.3.10 Σχήμα της διάταξης

Βήματα πειράματος :

1. Φτιάχνουμε το κύκλωμα όπως φαίνεται και στις παραπάνω εικόνες 8 και 9.
2. Γεμίζουμε τα δύο δοχεία με απιονισμένο νερό μέχρι το σημείο A.
3. Κουμπώνουμε το ειδικό καπάκι στο δεύτερο δοχείο όπως φαίνεται στην εικόνα 10.
4. Με την βοήθεια του χάρακα τοποθετούμε τους λαμπτήρες έτσι ώστε το φως να πέφτει κάθετα στο πλαίσιο και να απέχει σε απόσταση 50 cm από αυτό.
5. Ανοίγουμε τους λαμπτήρες και περιμένουμε τουλάχιστο 1 λεπτό για να αποκατασταθεί θερμική ισορροπία.
6. Όταν ξεκινήσει η ηλεκτρόλυση μετράμε το χρόνο με χρονόμετρο.
7. Μετράμε την τάση την ένταση και το χρόνο κάθε φορά που θα έχει παραχθεί 5 cm^3 υδρογόνου.
8. Συμπληρώνουμε τον πίνακα 4.3.1 ανάλογα με τις μετρήσεις.
9. Όταν τελειώσει η ηλεκτρόλυση φτιάχνουμε την ΓΠ V-t για να δούμε την ποσότητα παραγωγής υδρογόνου σε σχέση με το χρόνο.
10. Σύμφωνα με τις μετρήσεις και την θεωρία βρίσκουμε τον ενεργειακό βαθμό απόδοσης του ηλεκτρολύτη PEM.

Φύλλο εργασίας

Τίτλος:

Όνοματεπώνυμο:

Ημερομηνία:

Σκοπός:

1. Συμπληρώστε τον παρακάτω πίνακα με βάση τις μετρήσεις που έχετε κάνει.

V (cm ³)	t (sec)	U (V)	I (A)	P (W)=U*I

Πίνακας 4.3.1.

2. Φτιάξτε την γραφική παράσταση V-t για να δείξετε την παραγωγή υδρογόνου σε σχέση με τον χρόνο.
3. Να βρείτε τον ενεργειακό βαθμό απόδοσης (N ενεργειακός) με την βοήθεια των σχέσεων στην θεωρία.

Κριτήριο αξιολόγησης:

1. Επέλεξε τη σωστή απάντηση
 - I. Η ηλεκτρόλυση του νερού στην διάταξη που χρησιμοποιούμε ξεκινά όταν εφαρμόσω τάση :
 - a) Από 0,1 Volt μέχρι 1 Volt
 - b) Από 3 Volt και πάνω
 - c) Από 1,4 Volt και πάνω
 - II. Ποιες από τις παρακάτω διεργασίες περιγράφουν το συνολικό μηχανισμό της ηλεκτρόλυσης :

- a) $2\text{H}_2\text{O}(\text{liq}) \rightarrow \text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2(\text{g})$
- b) $2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g})$
- c) $2\text{H}_2\text{O}(\text{liq}) \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 4\text{e}^-$

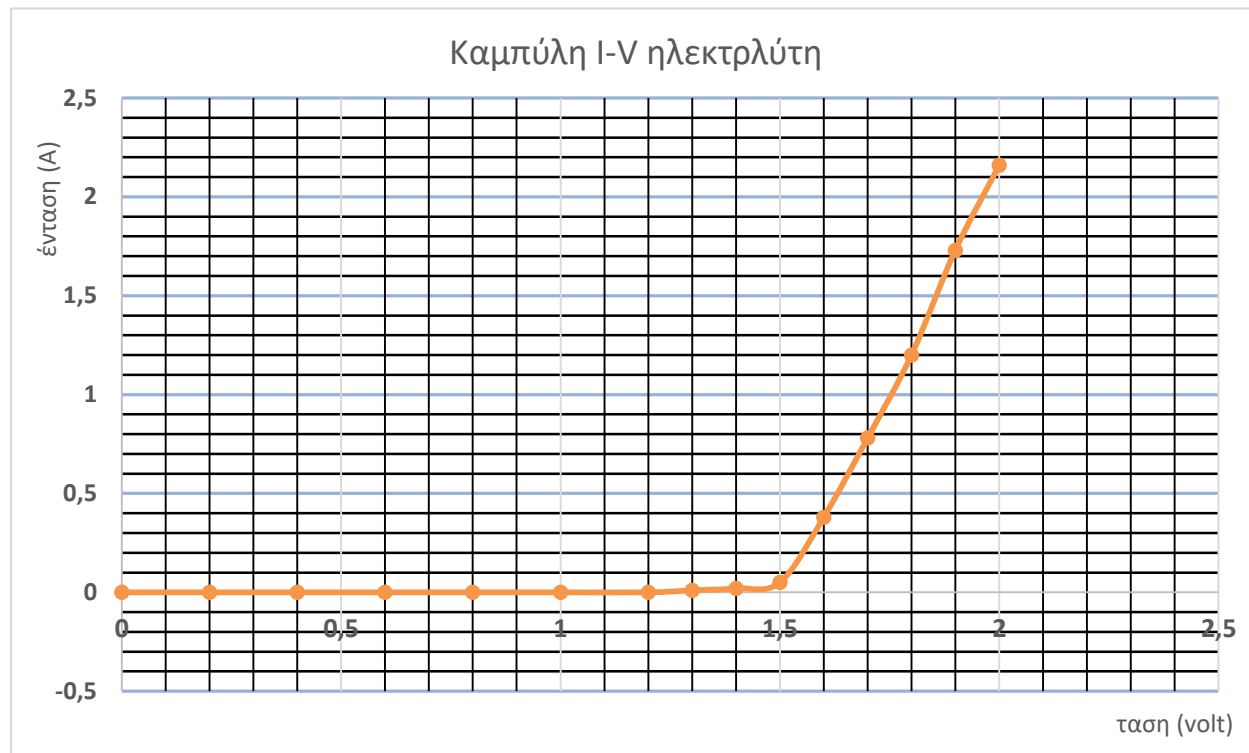
- III. Πόσο είναι η ενέργεια υδρογόνου σε Joule όταν έχουμε παράγει 20 cm^3 υδρογόνο
- a) 254900
 - b) 254,9
 - c) 2549

2. Ποιες από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστές και ποιες είναι λάθος :

- i. Δεύτερος νόμος του Faraday ισούται με $q = n \cdot F$.
- ii. Στην άνοδο του ηλεκτρολύτη το νερό οξειδώνεται, ελευθερώνοντας μοριακό οξυγόνο, πρωτόνια (H^+ ιόντα) και ελεύθερα ηλεκτρόνια.
- iii. Με την βοήθεια ενός ηλεκτρολύτη έχει παραχθεί 5 cm^3 οξυγόνο. Αν η τάση που εφαρμόσαμε στα άκρα του ηλεκτρολύτη ήταν 1,5 Volt η ένταση του ρεύματος 200 mA και ο χρόνος που χρειάστηκε για να παραχθεί η συγκεκριμένη ποσότητα υδρογόνου ήταν 190 sec τότε η ενέργεια ηλεκτρικού E (ηλεκτρικού) ισούται με 57 joule.
- iv. Ηλεκτρόλυση ονομάζεται η διαδικασία της ένωσης δύο ουσιών με τη βοήθεια του ηλεκτρικού ρεύματος.

3. Με την βοήθεια του παρακάτω διαγράμματος να βρείτε τον χρόνο (t) που χρειάστηκε για να παραχθεί μια συγκεκριμένη ποσότητα υδρογόνου όταν η ενέργεια ηλεκτρικού E (ηλεκτρικού) είναι 324 Joule και η τάση που εφαρμόστηκε στα άκρα του ηλεκτρολύτη 1,8 Volt.

t=



Απαντήσεις:

1.

- I. σωστή απάντηση = c
- II. σωστή απάντηση = a
- III. σωστή απάντηση = b

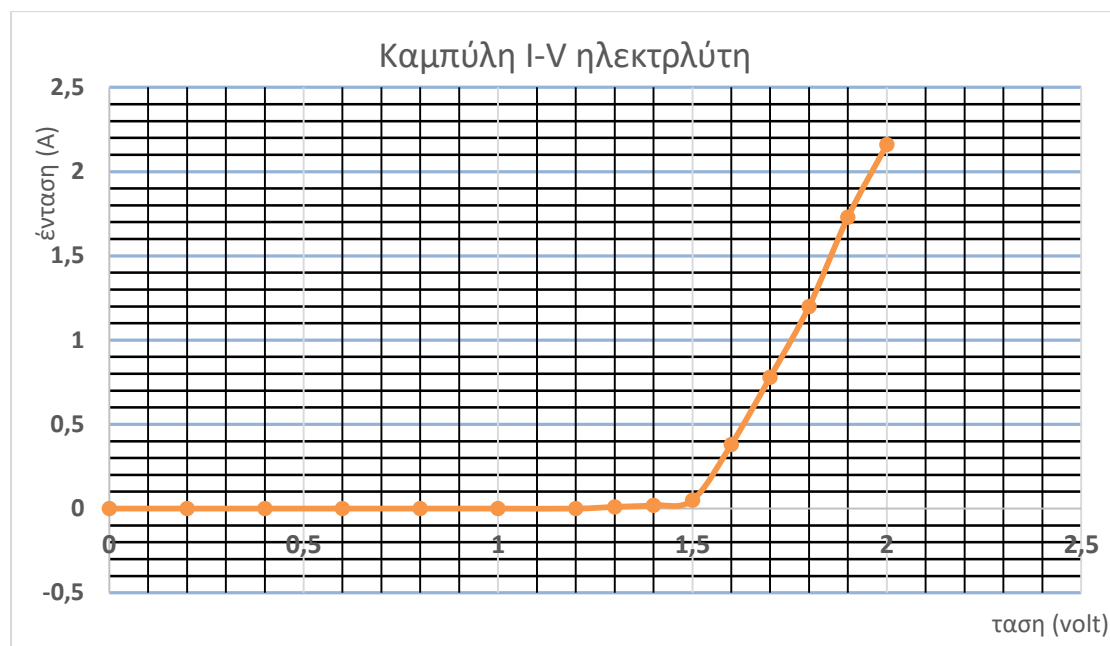
2.

- i. = Λ
- ii. = Σ
- iii. = Σ
- iv. = Λ

3.

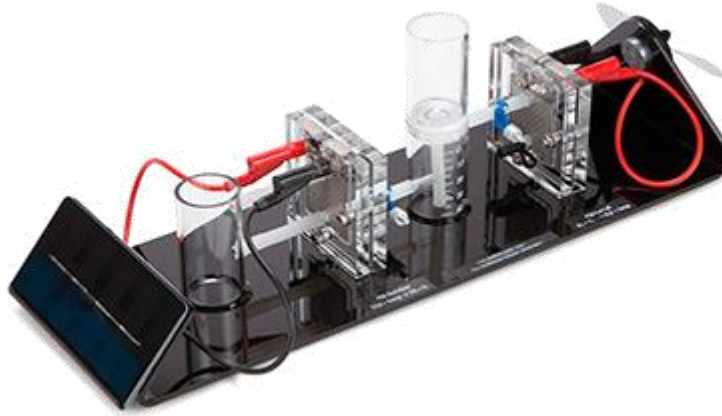
$$E = U \cdot I \cdot t$$
$$E = 324 \text{ Joule}$$
$$U = 1,8 \text{ Volt}$$
$$I = 1,2 \text{ A}$$
$$t = 150 \text{ sec}$$

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”



4.4 Άσκηση 4

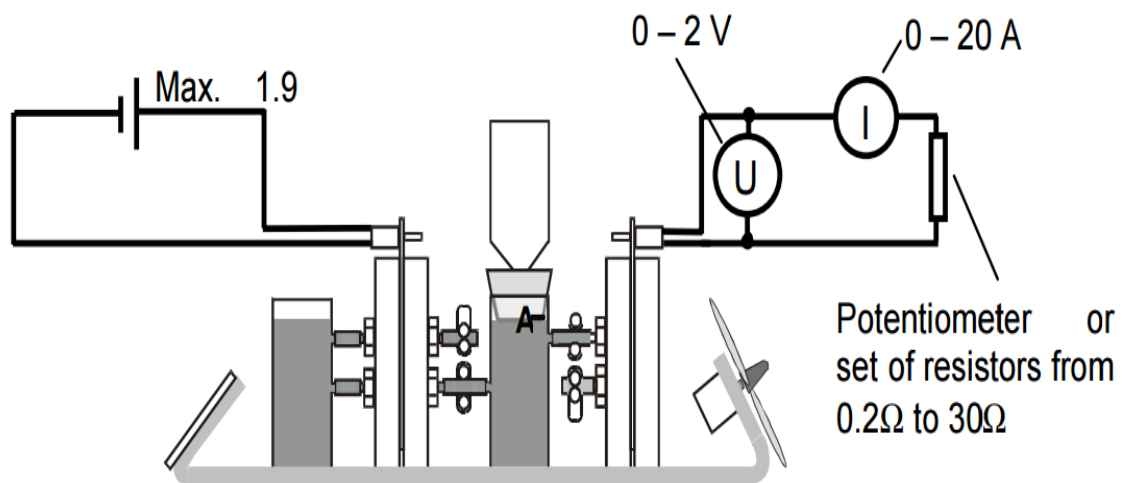
Χαρακτηριστική καμπύλη κυψέλης καυσίμου και ενεργειακός βαθμός απόδοσης



Σχήμα 4.4.1 Διάταξη PEMPower1-ECO

Σύνοψη :

Η άσκηση 4 αφορά την μελέτη της κυψέλης καυσίμου στην διάταξη PEMPower1-ECO. Με την βοήθεια ολόκληρης της διάταξης και άλλων εξαρτημάτων, που θα αναφέρουμε και παρακάτω και όπως φαίνεται η σύνδεση στην εικόνα 1 , θα βρούμε την χαρακτηριστική καμπύλη της κυψέλης και επίσης τον ενεργειακό βαθμό απόδοσης.



Σχήμα 4.4.2 Σύνδεση της διάταξης για το συγκεκριμένο πείραμα

Προαπαιτούμενη γνώση :

- Θεωρία κυψελών καυσίμου-Χαρακτηριστική καμπύλη- Βαθμός απόδοσης.
- Γραφικές παραστάσεις στο Excel.
- Χρήση πολυμέτρων.

Όργανα :

- Διάταξη PEMPower1-ECO.
- Φωτεινή πηγή (Λαμπτήρας).
- Βολτόμετρο, αμπερόμετρο και καλώδια.
- Απεικονισμένο νερό.
- Χρονόμετρο.
- Κιβώτιο αντιστάσεων από 1 Ω έως 300 Ω.
- Η/Υ - Microsoft Office Excel. (εφόσον οι γραφικές παραστάσεις γίνουν στο Excel).

Θεωρία

Η κυψέλη καυσίμου είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή που καταναλώνει υδρογόνο και οξυγόνο και παράγει:

- ηλεκτρική ενέργεια
- θερμότητα
- νερό

Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούνται από δυο ηλεκτρόδια (την άνοδο και την κάθοδο), τα οποία διαχωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη. Ο ηλεκτρολύτης είναι από πολυμερές ή άλλο υλικό, το οποίο επιτρέπει την διέλευση ιόντων, αλλά όχι τη διέλευση των ηλεκτρονίων.

Ένα καύσιμο που περιέχει υδρογόνο (π.χ. φυσικό αέριο) εισάγεται από την πλευρά της ανόδου, όπου τα ηλεκτρόνια του υδρογόνου ελευθερώνονται και κινούνται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα δίδοντας ηλεκτρικό ρεύμα. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου διαπερνούν τον ηλεκτρολύτη και φτάνουν στην κάθοδο, όπου ενώνονται με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και το οξυγόνο, παράγοντας νερό. Για να επιταχυνθεί η διαδικασία του ιονισμού του υδρογόνου χρησιμοποιείται ένας καταλύτης υψηλής αγωγιμότητας στα

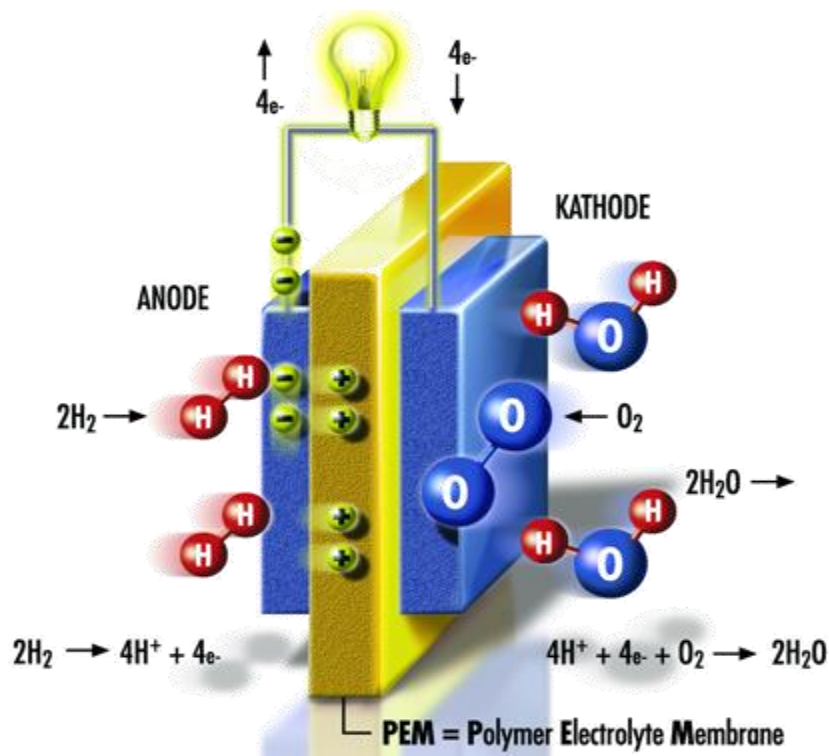
“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

ηλεκτρόδια (π.χ. πλατίνα). Όταν το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι καθαρό υδρογόνο, τα μόνα παράγωγα της διεργασίας αυτής είναι ηλεκτρικό ρεύμα, καθαρό νερό και θερμότητα.

Οι διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου χαρακτηρίζονται από τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν και είναι:

- PAFC – Φωσφορικό οξύ
- MCFC – Τηγμένα ανθρακικά άλατα
- SOFC – Σταθεροποιημένα οξειδία
- PEMFC – Μembrάνη ανταλλαγής πρωτονίων
- AFC – Αλκάλια

Το επιθυμητό καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο, που μπορεί όμως να παραχθεί και από κάποιο άλλο καύσιμο, φορέα υδρογόνου, μετά από κατάλληλη επεξεργασία. Τέτοιοι φορείς είναι η αμμωνία, το φυσικό αέριο, παράγωγα του πετρελαίου, το υγρό προπάνιο και η βιομάζα. Καθαρό υδρογόνο μπορεί επίσης να παραχθεί με την ηλεκτρόλυση νερού, η οποία όταν επιτυγχάνεται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως ηλιακή, αιολική και γεωθερμία.



Σχήμα 4.4.3 Κυψέλη καυσίμου PEM

PEMFC

Στις κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), χρησιμοποιείται πολυμερές περφλουροσουλφιδικό οξύ ως ηλεκτρολύτης. Ο καταλύτης αποτελείται από πλατίνα που εναποτίθεται σε στρώμα άνθρακα. Εάν η τροφοδοσία με υδρογόνο περιέχει μέρη μονοξειδίου του άνθρακα, τότε χρησιμοποιούνται κράματα Pt –Ru ως καταλύτες. Η θερμοκρασία λειτουργίας αυτών των κυψελών κυμαίνεται μεταξύ 60 και 80 οC. Τα PEMFC είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστικά για εφαρμογές στην αυτοκίνηση, αλλά και σε σταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας για καταναεμημένη παραγωγή.

Πλεονεκτήματα

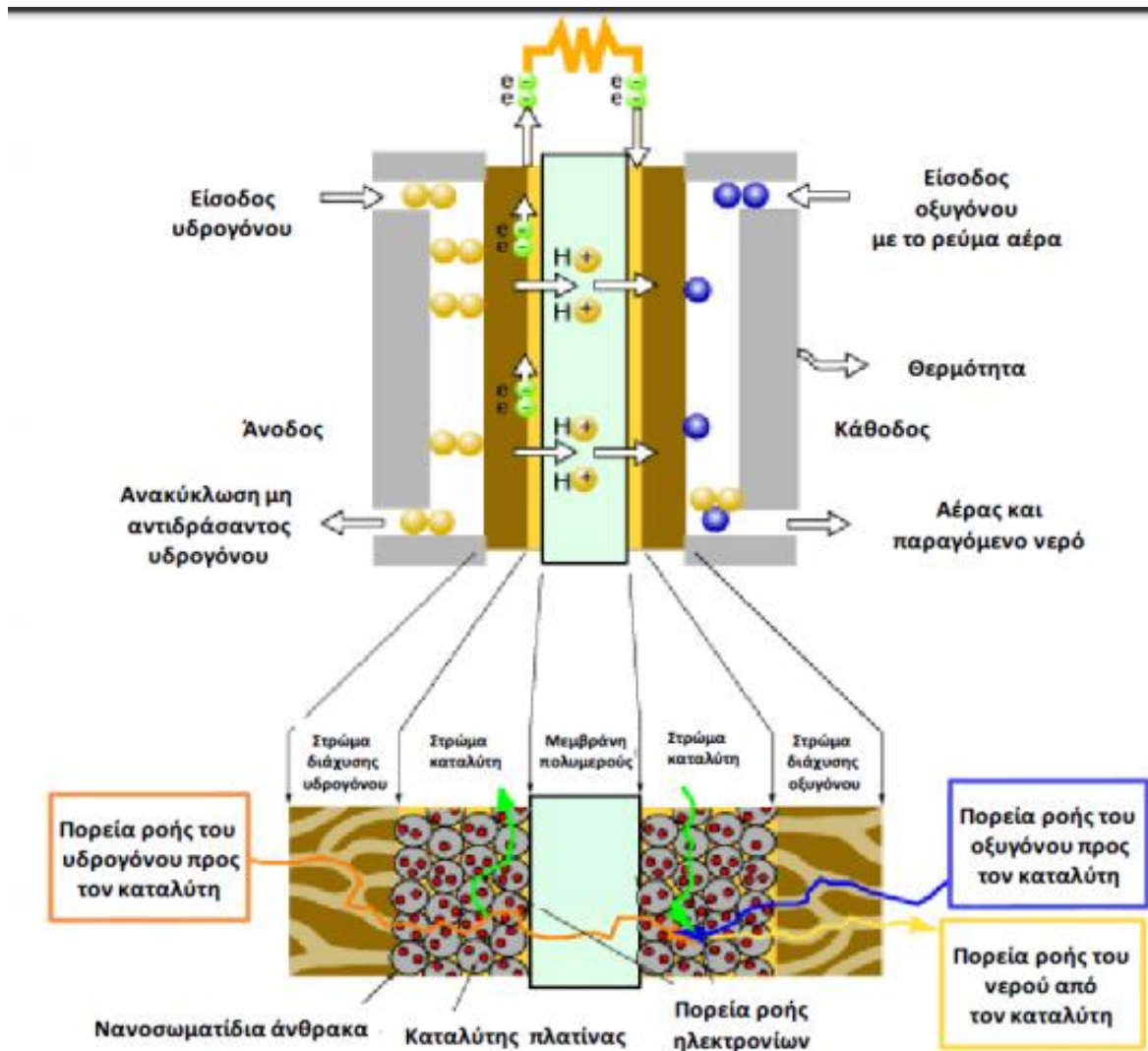
- Υψηλή απόδοση > 60%
- Πολύ αποδοτικές για την μετατροπή των καυσίμων σε ηλεκτρική ενέργεια, ακόμη και σε μερικό φορτίο
- Χαμηλές εκπομπές (ανάλογα με την πηγή καυσίμων)
- Χαμηλός θόρυβος
- Με τον μεταρρυθμιστή καυσίμου, ποικίλα καύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν
- Δεν έχουν κανένα περιστρεφόμενο μέρος, άρα είναι αξιόπιστες
- Άμεση παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας

Μειονεκτήματα

- Σχετικά υψηλό κόστος αγοράς
- Υψηλό κόστος συντήρησης (π.χ. αλλαγή του ηλεκτρολύτη)
- Η μεταρρύθμιση καυσίμων προσθέτει στην πολυπλοκότητα και το κόστος
- Χρονικοί περιορισμοί ζωής (δεν είναι γνωστός ο πραγματικός χρόνος ζωής)
- Χαμηλή διαθεσιμότητα
- Λίγοι προμηθευτές τεχνολογίας
- Ελλιπής υποδομή του υδρογόνου

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

Παρακάτω φαίνεται η δομή της κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων:



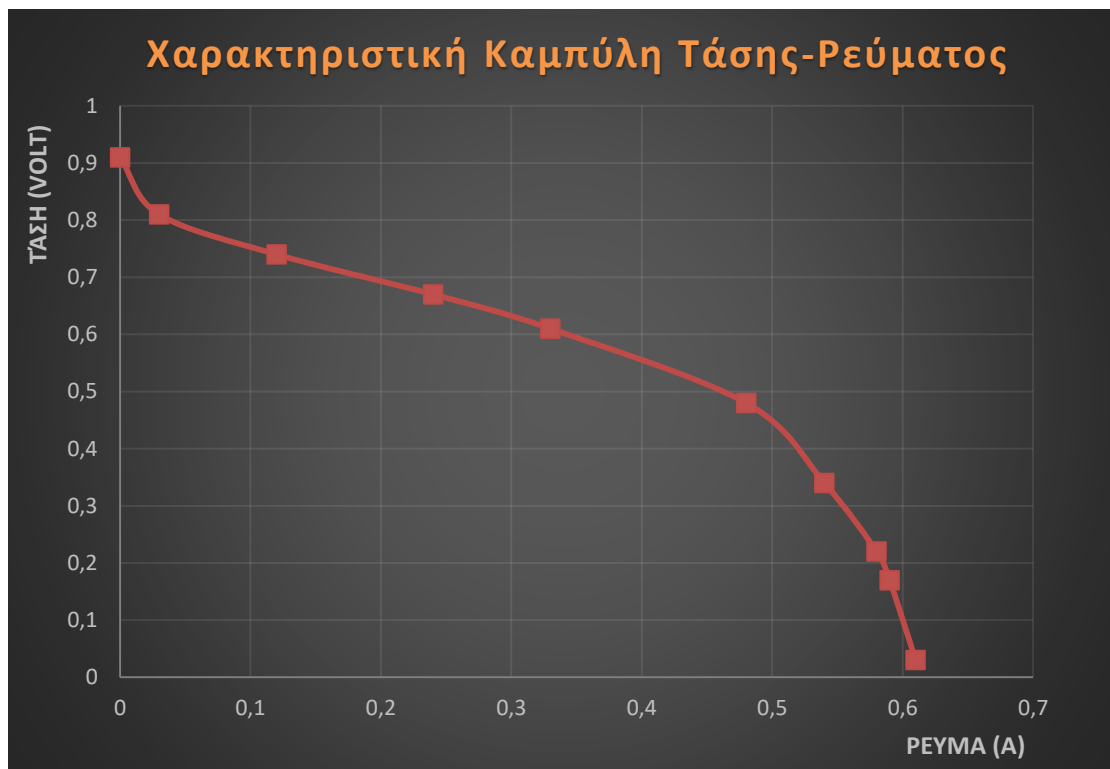
Σχήμα 4.4.4 Δομή της κυψέλης καυσίμου PEM

Παρατηρούμε από το παραπάνω σχήμα ότι στην άνοδο το υδρογόνο διασπάται στο ηλεκτρόδιο, σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Τα πρωτόνια κινούνται μέσω της μεμβράνης προς την κάθοδο ενώ τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσω εξωτερικού αγώγιμου κυκλώματος προς αυτήν. Το οξυγόνο ενώνεται στην κάθοδο με τα πρωτόνια από την άνοδο και με τα ηλεκτρόνια και έτσι σχηματίζεται νερό.

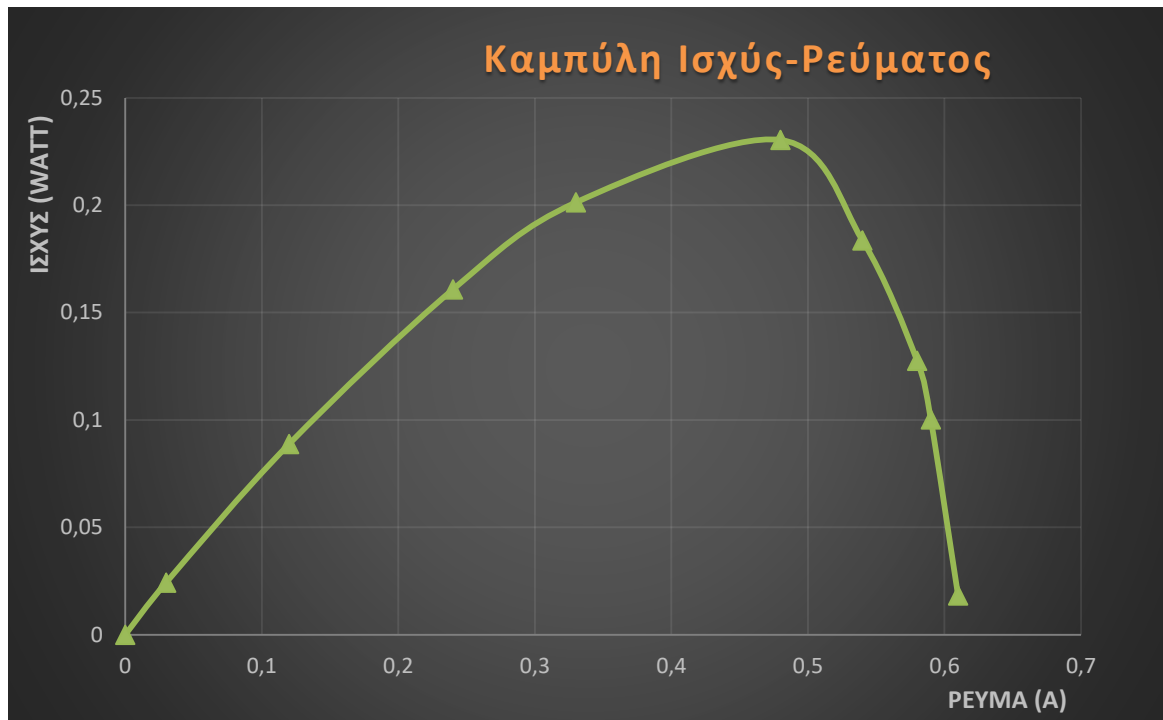
Πειραματικό μέρος :

Στην άσκηση 4 όπως αναφέραμε και στην σύνοψη θα ασχοληθούμε με την κυψέλη καυσίμου , αρχικά θα βρούμε την χαρακτηριστική της καμπύλη της κυψέλης **V-I** στην συνέχεια την χαρακτηριστική καμπύλη ισχύς **P-I** και στο τέλος τον ενεργειακό βαθμό απόδοσης **N (ενεργειακό)**.

Παρακάτω θα δούμε της θεωρητικές γραφικές παραστάσεις οι οποίες θα μας βοηθήσουν στην συνέχεια για να τα συγκρίνουμε με αυτές που θα φτιάξετε.



Σχήμα 4.4.5 Χαρακτηριστική καμπύλη κυψέλης καυσίμου



Σχήμα 4.4.6 Καμπύλη Ισχύος-Ρεύματος

Παρακάτω βλέπουμε την σχέση του ενεργειακού βαθμού απόδοσης N (ενεργειακός) :

$$N \text{ (ενεργειακός)} = E \text{ (ηλεκτρικού)} / E \text{ (υδρογόνου)}$$

1. Η ενέργεια υδρογόνου E (υδρογόνου) ισούται με την παρακάτω σχέση :

$$E \text{ (υδρογόνου)} = V \text{ (υδρογόνου)} * H \text{ (υδρογόνου)}$$

Όπου:

$$H \text{ (υδρογόνου)} = \text{θερμιδική αξία υδρογόνου} = 12.745 * 10^6 \frac{j}{m^3}$$

$$V \text{ (υδρογόνου)} = \text{ποσότητα υδρογόνου που παράγεται σε } m^3$$

2. Η ενέργεια ηλεκτρικού E (ηλεκτρικού) ισούται με την παρακάτω σχέση :

$$E \text{ (ηλεκτρικού)} = U * I * t$$

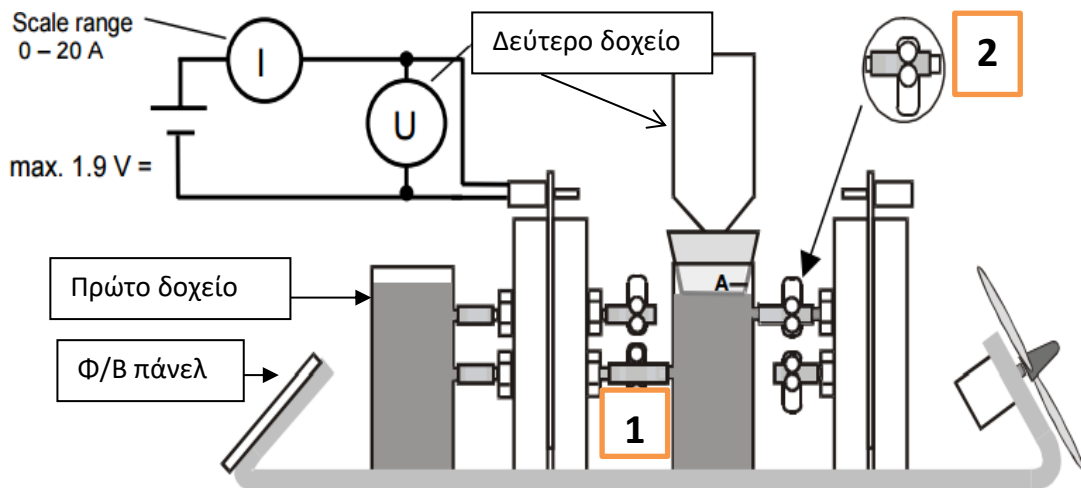
Όπου:

$$U = \text{Τάση σε volt}$$

$$I = \text{Ένταση του ρεύματος σε Ampere}$$

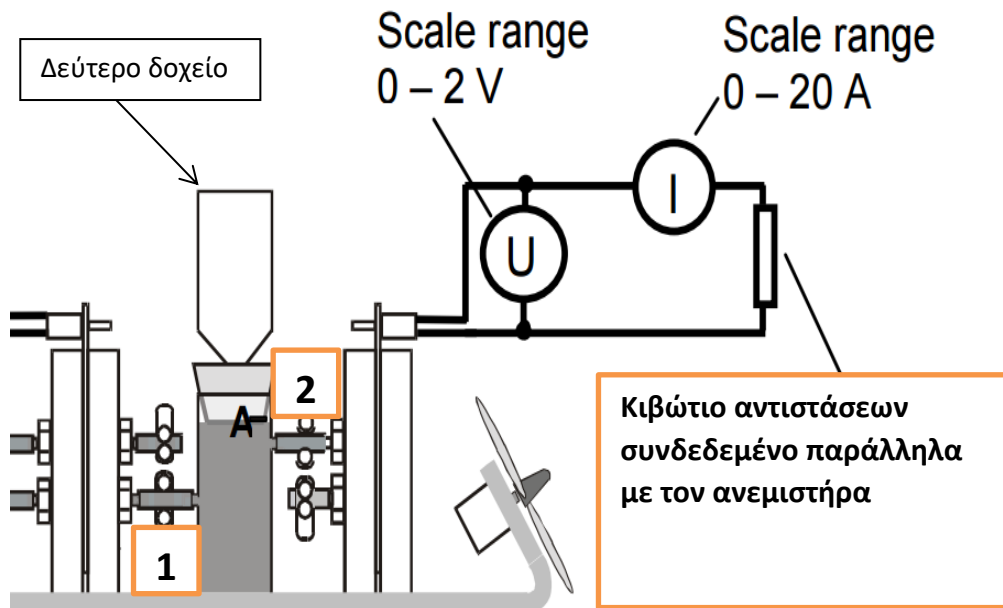
“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

$t =$ χρόνος σε sec



Σχήμα 4.4.7 Σχήμα σύνδεσης ηλεκτρολύτη

Στην παραπάνω εικόνα 6 παρατηρούμε δύο αριθμούς (1 και 2) όπου 1 είναι η βάννα που συνδέει τον ηλεκτρολύτη με το δεύτερο δοχείο στον οποίο αποθηκεύετε το υδρογόνο. Και 2 είναι η βάννα που συνδέει το δεύτερο δοχείο με την κυψέλη καυσίμου.



Σχήμα 4.4.8 Σύνδεση κιβωτίου αντιστάσεων

Βήματα πειράματος :

1. Αρχικά συνδέουμε το κύκλωμα όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4.7. Και όπως μάθαμε στην προηγούμενη άσκηση για να παράγουμε υδρογόνο.
2. Παράγουμε υδρογόνο λοιπόν με τον ίδιο τρόπο, τον οποίο θα χρησιμοποιήσουμε για να μελετήσουμε την κυψέλη και τα χαρακτηριστικά της.
3. Συνδέουμε παράλληλα με το ανεμιστήρα τον κιβώτιο των αντιστάσεων όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.4.8.
4. Κλείνουμε την βάνα 1 του ηλεκτρολύτη και έχουμε απομονωμένο στο δεύτερο δοχείο τον υδρογόνο.
5. Ανοίγουμε την βάνα 2 της κυψέλης καυσίμου για να καταναλώσουμε τον υδρογόνο και να θέσουμε σε λειτουργία την κυψέλη, στο σημείο αυτό ο ανεμιστήρας αρχίζει να περιστρέφεται.
6. Συνδέουμε τον κιβώτιο αντιστάσεων και στην συνέχεια αλλάζουμε την τιμή της αντίστασης κάθε φορά όπως φαίνεται και στον πίνακα 4.4.1 στο φύλλο εργασίας.
7. Παίρνουμε μετρήσεις της τάσης και της έντασης του ρεύματος για κάθε αντίσταση χωριστά. (Πίνακας 4.4.1)
8. Με της μετρήσεις αυτές θα φτιάξουμε σε Excel τις δύο γραφικές παραστάσεις V-I και P-I.
9. Το επόμενο βήμα θα είναι να βρούμε τον ενεργειακό βαθμό απόδοσης της κυψέλης. Χρειάζεται να ξανακάνουμε τα 5 πρώτα βήματα όπως αναφέραμε και παραπάνω, πλέον δεν χρησιμοποιούμε διάφορες αντιστάσεις αλλά μία σταθερή αντίσταση π.χ. 5Ω και χρονομετρούμε κάθε φορά που από το δεύτερο δοχείο θα έχει καταναλωθεί 5 cm^3 υδρογόνο.
10. Συμπληρώνουμε τον Πίνακα 4.4.2 στο φύλλο εργασίας και υπολογίζουμε τον ενεργειακό βαθμό απόδοσης με την βοήθεια των μετρήσεων και του παραπάνω τύπου για τον N (ενεργειακό).

Φύλλο εργασίας

Τίτλος:

Ονοματεπώνυμο:

Ημερομηνία:

Σκοπός:

1. Συμπληρώστε τους παρακάτω πίνακες με βάση τις μετρήσεις που έχετε κάνει :

R (Ω)	I (A)	U (Volt)	P (Watt) = U * I
0			
1			
2			
3			
4			
5			
10			
15			
20			
30			
50			
100			
200			
350			
500			
Άπειρο			

Πίνακας 4.4.1

V (cm ³)	t (sec)	U (Volt)	I (A)
0			
5			
10			
15			
20			
25			

Πίνακας 4.4.2

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

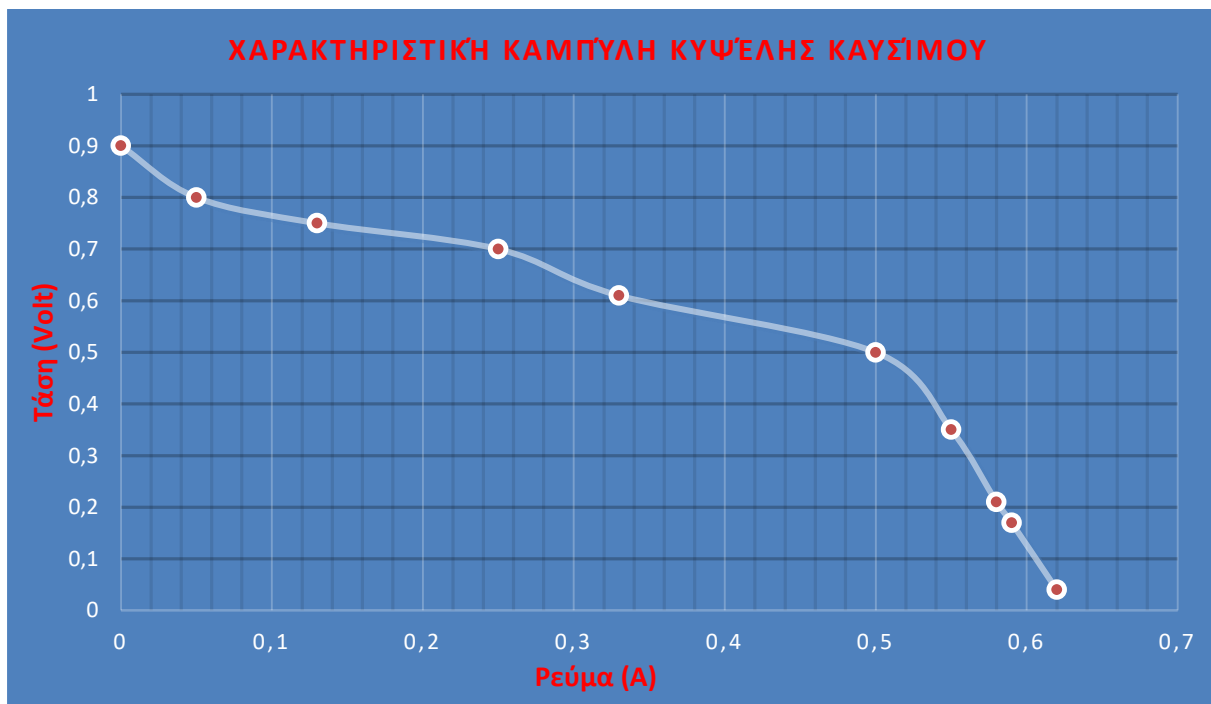
2. Με της μετρήσεις από τον πίνακα 4.4.1 να φτιάξετε σε Excel τις δύο γραφικές παραστάσεις V-I και P-I.
3. Να βρείτε τον ενεργειακό βαθμό απόδοσης της κυψέλης καυσίμου

Κριτήριο αξιολόγησης

1. Επέλεξε τη σωστή απάντηση
 - IV. Η θερμοκρασία λειτουργίας των κυψελών με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων κυμαίνεται μεταξύ :
 - A. 60 και 80 °C
 - B. 90 και 130 °C
 - C. 15 και 35 °C
 2. Πιο από τα παρακάτω είναι χαρακτηριστικό των κυψελών καυσίμου τύπου PEMFC :
 - a. Χαμηλό κόστος αγοράς
 - b. Υψηλός θόρυβος
 - c. Δεν έχουν κανένα περιστρεφόμενο μέρος
 3. Ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης της κυψέλης καυσίμου ισούται με :
 - a. N (ενεργειακός) = E (ηλεκτρικού) / E (υδρογόνου)
 - b. N (ενεργειακός) = E (υδρογόνου) / E (ηλεκτρικού)
 - c. N (ενεργειακός) = E (υδρογόνου) * E (ηλεκτρικού)
 4. Ποια από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστή όσον αφορά τον τρόπο λειτουργίας μίας PEMFC :
 - a) Το οξυγόνο ενώνεται στην άνοδο με τα πρωτόνια από την κάθοδο.
 - b) Στην κάθοδο το υδρογόνο διασπάτε σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια.
 - c) Τα πρωτόνια κινούνται μέσω της μεμβράνης προς την κάθοδο ενώ τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσω εξωτερικού αγωγίμου κυκλώματος προς αυτήν.

5. Να λύσετε τα παρακάτω προβλήματα :

- A) Εάν μία κυψέλη καυσίμου την συνδέουμε με ένα φορτίο 100Ω όπου μας δίνει τάση 900 mV και ρεύμα $0,01 \text{ A}$ να βρείτε την Ισχύ σε Watt.
- B) Με την βοήθεια της παρακάτω ΓΠ όπου έχουμε την χαρακτηριστική καμπύλη μίας κυψέλης καυσίμου να βρείτε την τάση σε Volt όταν η ένταση του ρεύματος είναι 50 mA



- C) Να βρείτε τον χρόνο t σε sec σε μία κυψέλη καυσίμου τύπου PEM όταν η ενέργεια ηλεκτρικού (E ηλεκτρικού) ισούται με 105 Joule ενώ η τάση είναι σταθερή $0,7 \text{ Volt}$ και ένταση του ρεύματος ισούται με $0,1 \text{ A}$.

Απαντήσεις

1.

I = α)

II = c)

III = a)

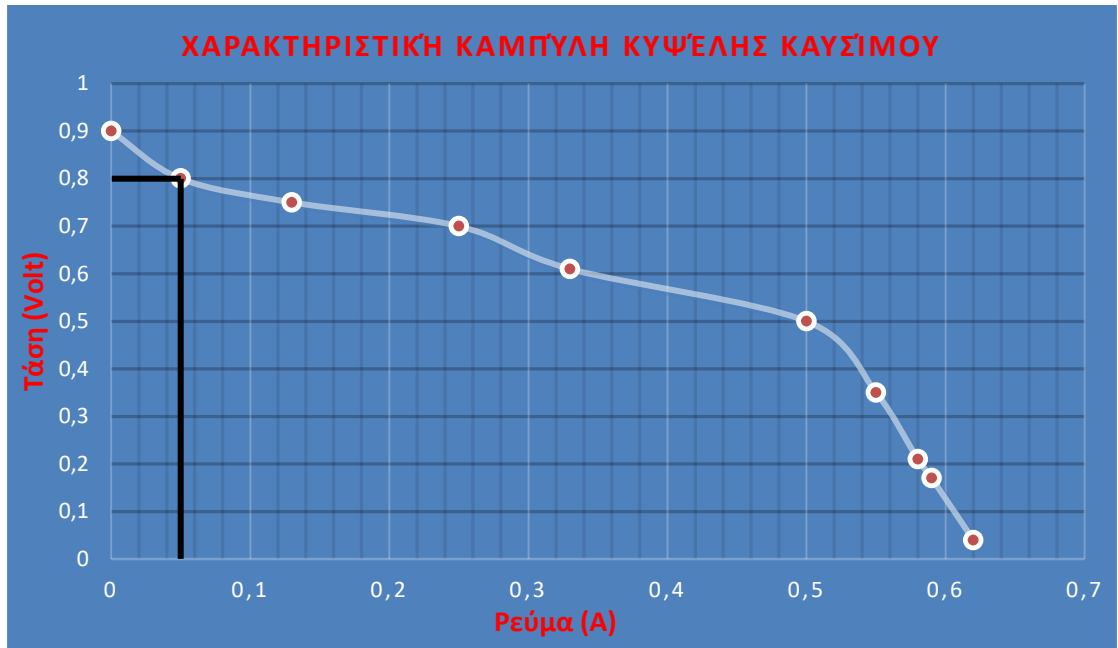
IV = c)

“ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΙΙ”

2.

A) $P = U \cdot I$ άρα $P = 0,9 \text{ Volt} \cdot 0,01 \text{ A}$ άρα $P = 0,009 \text{ Watt}$

B) Η σωστή απάντηση είναι 0,8 Volt



C) $E = U \cdot I \cdot t$

$E = 105 \text{ Joule}$

$U = 0,7 \text{ Volt}$

$I = 0,1 \text{ A}$

Άρα $t = 1500 \text{ sec}$

Βιβλιογραφία:

- Φωτοβολταϊκό σύστημα Βικιπαίδεια
https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CF%8A%CE%BA%CF%8C_%CF%83%CF%8D%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BC%CE%B1
- Ηλεκτρόλυση Βικιπαίδεια
<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CF%8C%CE%BB%CF%85%CF%83%CE%B7>
- Φωτοβολταϊκά συστήματα Ι. Ε. Φραγκιάδάκης. Εκδόσεις ΖΗΤΗ
- Fuel Cell Technology for Classroom Instruction Gornelia Voigt, Stefan Hoeller, Uwe Kueter. Εκδόσεις H-TEC EDUCATION
- PEMPower 1-Eco Instruction Manual H-TEC EDUCATION
- New technologies for Energy Efficiency Michael F.Hordeski
- Fuel Cell Technology Handbook Gregor Hoogers (CRC, 2003)
- Electricity from sunlight Lynn
- Pem Elecrolysis for Hydrogen Production – Principles and applications – Dmitri Bessarabov rt al. (CRC 2016).
- Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων
http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teetkm/DRASTHRIOTHES/OM_ADESERGASIAS/fwtovoltaika_ergwn.pdf
- Photovoltaics SEIA <http://www.seia.org/policy/solar-technology/photovoltaic-solar-electric>
- PEM Water Electrolysis (2017) Dmitri Bessarabov, Pierre Millet
- Hydrogen Production by Electrolysis, Knut Andreassen
- Hydrogen and Fuel Cell, Technologies and Market Perspectives Editors: Töpler, Johannes, Lehmann, Jochen (Eds.) © 2016