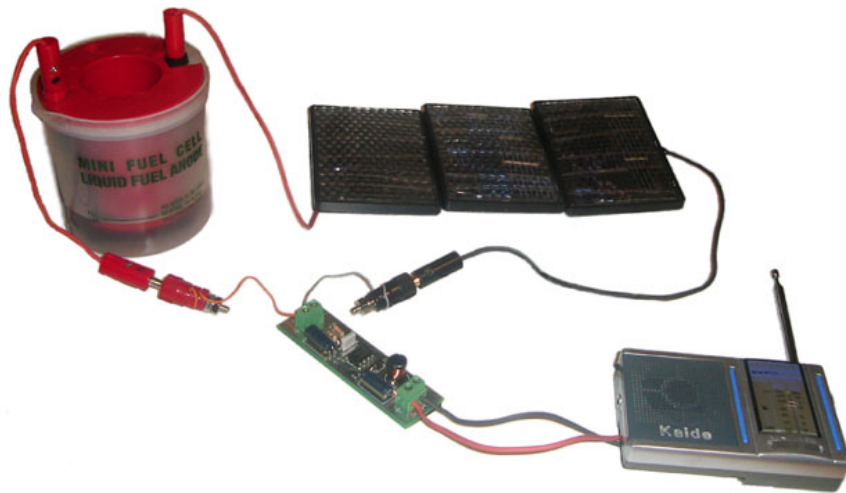




## ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΤΕΛΟΥΜΕΝΟ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΚΑΙ ΑΛΚΑΛΙΚΗ ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σπύρος Σκαρβέλης - Καζάνος

Χανιά 2005



## STUDY OF THE BEHAVIOR OF A HYBRID SYSTEM COMPRISED OF A PHOTOVOLTAIC ELEMENT AND A FUEL CELL.



Spyros Skarvelis-Kazakos

Chania 2005



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ  
ΑΠΟΤΕΛΟΥΜΕΝΟ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΚΑΙ ΑΛΚΑΛΙΚΗ  
ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.**

**Τομέας :**

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

**Φοιτητής :**

Σπύρος Σκαρβέλης – Καζάκος  
Α.Μ. 209

**Επιβλέπων Καθηγητής :**

Γιάννης Βουρδουμπάς

**Χανιά 2005**



## Ευχαριστίες

Η πραγματοποίηση αυτής της εργασίας δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την βοήθεια του επόπτη καθηγητή μου, κύριου Ιωάννη Βουρδουμπά, ο οποίος μου προσέφερε όλα τα απαραίτητα και κάθε ευκολία στο επίπεδο του εφικτού.

Επίσης, ιδιαίτερα σημαντική ήταν η συμβολή της σπάνιας και στενής φίλης και συμφοιτήτριας, Καλής-Στέλλας Ζωάννου, η οποία με βοήθησε και με στήριξε τόσο με τις ατέραιες γνώσεις της, αλλά κυρίως με την ηθική και ψυχολογική της υποστήριξη, που έπαιξε πολύ σημαντικό ρόλο για την προσωπικότητα και την ακεραιότητά μου, σε όλη την φοιτητική μου περίοδο μέχρι σήμερα και αισιοδοξώντας, στο μέλλον.

Θα πρέπει να αναφέρω και την αξιοσημείωτη προσφορά, κυρίως γνωστική και συμβουλευτική, του επόπτη της πρακτικής μου άσκησης, εργαζόμενου του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, κύριου Αριστομένη Νέρη, ο οποίος μου έδωσε αρκετή εμπειρία και γνώσεις για την βελτίωση της εργασίας αυτής και την αύξηση της απόδοσης μου ως φοιτητή και μελλοντικό επαγγελματία.

Τέλος, ανεκτίμητης αξίας είναι ο ρόλος που έπαιξαν οι γονείς μου στην διαμόρφωση της προσωπικότητας, των αρχών και της ακεραιότητάς μου ως άνθρωπος, όπως και η συμβολή και η υποστήριξή τους σε κάθε βήμα της ζωής μου.





## Πίνακας Περιεχομένων

Περιεχόμενα	4
Περίληψη	6
Abstract	7
<b>1. Εισαγωγή</b>	<b>8</b>
<b>2. Κυψέλη Καυσίμου</b>	<b>9</b>
2.1. Ιστορικά στοιχεία	9
2.2. Το υδρογόνο ως καύσιμο	13
2.3. Βασική αρχή λειτουργίας	14
2.4. Τύποι κυψελών καυσίμου	26
2.4.1. Αλκαλική (AFC)	26
2.4.2. Μembrάνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)	30
2.4.3. Υψηλής θερμοκρασίας (PAFC, MCFC, SOFC)	32
2.4.4. Άλλοι τύποι κυψελών καυσίμου	34
2.5. Παραδείγματα εφαρμογών	35
2.6. Προοπτικές Ανάπτυξης	36
2.7. Βιβλιογραφία	39
<b>3. Φωτοβολταϊκό στοιχείο</b>	<b>40</b>
3.1. Ιστορικά Στοιχεία	40
3.2. Ο ήλιος ως πηγή ενέργειας	41
3.3. Βασική αρχή λειτουργίας	46
3.4. Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων	52
3.4.1. Μονο / Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο	53
3.4.2. Αρσενικούχου Γαλλίου (GaAs)	54
3.4.3. Λεπτής Μembrάνης (Thin Film)	54
3.4.3.1. Άμορφου Πυριτίου (a-Si)	54
3.4.3.2. CIS - CIGS - CdTe	55
3.4.4. Άλλοι τύποι φωτοβολταϊκών	56
3.5. Εφαρμογές Φωτοβολταϊκών	58
3.6. Προοπτικές Ανάπτυξης	64
3.7. Βιβλιογραφία	66
<b>4. Ηλεκτρονικά Ισχύος – Chopper (DC/DC converter)</b>	<b>67</b>



<b>5. Πειραματική διαδικασία</b>	<b>72</b>
5.1. Υλικά - Διατάξεις – Περιγραφή συστήματος	72
5.2. Διαδικασία μέτρησης	75
5.3. Αποτελέσματα μετρήσεων – πειραματικά δεδομένα	76
5.3.1. Γραφήματα P – V και I – V	76
5.3.2. Σύγκριση τιμών	97
5.3.3. Μελέτη λειτουργίας του μετατροπέα DC/DC	106
5.3.4. Μελέτη χρονικής μεταβολής τάσης και ρεύματος της κυψέλης κατά την αλλαγή φορτίου	107
5.3.5. Συμπεράσματα μετρήσεων - σχολιασμός	109
5.4. Γενικά συμπεράσματα	114
5.5. Βιβλιογραφία	115



## Περίληψη

Η ιστορία των κυψελών καυσίμων ξεκινάει από το 1839, όταν ο Sir William Robert Grove κατάφερε να αντιστρέψει την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης, εφευρίσκοντας τον πρόδρομο των σύγχρονων κυψελών καυσίμων. Το 1939, ο Francis Thomas Bacon ξεκινάει να πειραματίζεται με τις πρώτες αλκαλικές κυψέλες καυσίμου. Το 1965 η NASA χρησιμοποίησε αλκαλική κυψέλη καυσίμου για την ηλεκτροδότηση του διαστημικού σκάφους Apollo<sup>[1]</sup>.

Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους άλλους τύπους κυψελών καυσίμου, αλλά έχουν ένα βασικό μειονέκτημα, που κατά κάποιον τρόπο αποτρέπει την ευρεία χρήση τους. Μερικά από τα πλεονεκτήματά της είναι ότι αντίθετα με πολλούς άλλους τύπους κυψελών μπορεί να λειτουργήσει σε χαμηλές θερμοκρασίες (από θερμοκρασία δωματίου έως και 80°C), όπως επίσης και ότι ο συντελεστής απόδοσής της μπορεί να φτάσει έως και 60-70%. Το βασικό της μειονέκτημα όμως είναι ότι κάποιες ενώσεις όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) αντιδρά με τον ηλεκτρολύτη (καυστικό κάλιο - KOH) παράγοντας παραπροϊόντα και μειώνοντας έτσι την απόδοση της κυψέλης.

Σε αυτή την εργασία διερευνάται η συμπεριφορά ενός υβριδικού συστήματος αποτελούμενο από μία μικρή, πειραματική, αλκαλική κυψέλη καυσίμου συνδεδεμένη με μικρό φωτοβολταϊκό στοιχείο. Οι συνδεσμολογίες που χρησιμοποιούνται μεταξύ των δύο πηγών στη μελέτη του κυκλώματος και την χάραξη χαρακτηριστικών καμπυλών, είναι οι εξής :

- κυψέλη καυσίμου χωρίς φωτοβολταϊκό στοιχείο,
- κυψέλη καυσίμου συνδεδεμένη παράλληλα με φωτοβολταϊκό στοιχείο,
- κυψέλη καυσίμου συνδεδεμένη εν σειρά με φωτοβολταϊκό στοιχείο,
- κυψέλη καυσίμου συνδεδεμένη παράλληλα με φωτοβολταϊκό στοιχείο και ανύψωση της τάσης με chopper (DC/DC converter) και
- κυψέλη καυσίμου συνδεδεμένη εν σειρά με φωτοβολταϊκό στοιχείο και ανύψωση της τάσης με chopper (DC/DC converter).

Οι παραπάνω συνδεσμολογίες χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος με διαφορετικά καύσιμα για την κυψέλη, καθώς και διαφορετικές συγκεντρώσεις του ηλεκτρολύτη (KOH). Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η συμπεριφορά του συστήματος σε συγκεντρώσεις ηλεκτρολύτη 1M και 4M, και σε αυτές τις συγκεντρώσεις χρησιμοποιούνται τα εξής καύσιμα : Μεθανόλη 99%, Αιθανόλη 95% (φαρμακευτικό οινόπνευμα) και Αιθανόλη περίπου 40% (Τσικουδιά).

Από τα αποτελέσματα των παραπάνω συνδυασμών προκύπτουν οι χαρακτηριστικές τιμές του κυκλώματος ( $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$ ,  $P_{MAX}$ ,  $V/I/P$  σε φορτίο 10Ω και σε πραγματικό φορτίο, δηλαδή μικρές συσκευές), οι οποίες συγκρίνονται για να εξαχθούν συμπεράσματα. Επίσης μελετάται η επίδραση της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη στις παραπάνω παραμέτρους της κυψέλης καυσίμου.

Τέλος, μελετάται και η λειτουργία του DC/DC converter στο σύστημα, για να υπάρχει μία πιο πλήρης εικόνα, καθώς και ο χρόνος απόκρισης της τάσης της κυψέλης καυσίμου κατά την αυξομείωση του φορτίου, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για πιο αξιόπιστες και πιο ακριβείς μετρήσεις.

[1] “Collecting the History of Fuel Cells” The Smithsonian Fuel Cell History Project, Smithsonian National Museum of American History, Behring Center. (<http://fuelcells.si.edu>)



## Abstract

The history of fuel cells starts in 1839, when Sir William Robert Grove managed to reverse the electrolysis process, inventing the forerunner of the modern fuel cells. Around 1939, Francis Thomas Bacon starts to experiment on the first alkali fuel cells, and in 1965, NASA utilized an alkali fuel cell to power the Apollo spacecraft. <sup>[1]</sup>

Alkali fuel cells have many advantages comparing to other types of fuel cells, but they have a major drawback, which in a way discourages their wide usage. Some of their advantages are that, in contrast with many other types of cells, they can operate in low temperatures (from room temperature up to 80°C), and their efficiency can reach values like 60-70%. Their major disadvantage, though, is that some substances such as carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) react with the electrolyte (potassium hydroxide - KOH), producing by-products and so reducing the overall efficiency of the cell.

In this essay we study the behavior of a hybrid system comprised of a small, experimental, alkali fuel cell connected with a small photovoltaic element. The types of connection used between the two sources, for the study of the circuit and drawing of the characteristic curves, are the following:

- fuel cell without a photovoltaic element,
- fuel cell connected in parallel with a photovoltaic element,
- fuel cell connected in series with a photovoltaic element,
- fuel cell connected in parallel with a photovoltaic element and voltage regulation with a chopper (DC/DC converter), and
- fuel cell connected in series with a photovoltaic element and voltage regulation with a chopper (DC/DC converter).

The above connections are used to study the behavior of the system with different fuel for the cell as well as different concentrations of the electrolyte (KOH). In particular, the behavior of the system is studied with electrolyte concentrations 1M and 4M, and with these concentrations the following fuels are used: Methanol 99%, Ethanol 95% (pharmaceutical alcohol) and Ethanol about 40% (Tsikoudia, a Greek beverage).

From the results of the above combinations, the representative values of the circuit ( $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$ ,  $P_{MAX}$ ,  $V/I/P$  on 10 Ohm load and real load, i.e. small devices) are taken, and then compared in order to draw conclusions.

Finally, in order to have a clearer image, the operation of the DC/DC converter in the system is studied, as well as the voltage and current response times, during a load change, which is then used for more reliable and accurate measurements.

[1] “Collecting the History of Fuel Cells” The Smithsonian Fuel Cell History Project, Smithsonian National Museum of American History, Behring Center. (<http://fuelcells.si.edu>)





## 1. Εισαγωγή

Με την παρούσα κατάσταση της αγοράς ενέργειας, γίνεται όλο και πιο επιτακτική η ανάγκη χρησιμοποίησης πηγών ενέργειας λιγότερο ρυπογόνες, πιο αποδοτικές, πιο φθηνές και κατά προτίμηση με μεγαλύτερες προοπτικές. Τη λύση σε αυτά, με εξαίρεση το κόστος, προς το παρόν, προσφέρουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ανανεώσιμη πηγή ενέργειας θεωρείται μία πηγή όταν προσφέρει την δυνατότητα είτε της ουσιαστικά αέναης παραγωγής ενέργειας, χωρίς τον φόβο της εξάντλησής της, βραχυπρόθεσμης ή μακροπρόθεσμης, είτε της ανανέωσής της ανά περιόδους. Ως τέτοιες πηγές μπορούν να χαρακτηριστούν ο ήλιος, ο άνεμος, η γεωθερμία, η βιομάζα, η υδροηλεκτρική ενέργεια, κ.α. Αυτές οι πηγές δεν εμπεριέχουν τον κίνδυνο της εξάντλησής τους, καθώς δεν προβλέπεται να σταματήσει να λάμπει ο ήλιος ή να σταματήσει να φυσάει ο άνεμος. Αυτό κάνει τις πηγές αυτές ιδανικές για έναν κόσμο που δεν βασίζεται στην κοντόφθαλμη λογική της προσωρινής κατανάλωσης, αλλά στην λογική της αξιοπιστίας και αειφόρου ανάπτυξης, χωρίς υποβάθμιση της ποιότητας ζωής των ανθρώπων ή των απογόνων τους. Οι τεχνολογίες, βέβαια, που μας επιτρέπουν την εκμετάλλευση αυτών των πηγών δεν είναι ακόμα αρκετά ανεπτυγμένες ώστε να αποτελούν έναν σημαντικό αντίπαλο στις συμβατικές μορφές ενέργειας όπως το πετρέλαιο, αν και με τις παρούσες εξελίξεις στον τομέα του πετρελαίου, αυτό αρχίζει και γίνεται αμφίβολο. Οι τεχνολογίες των ανανεώσιμων ενεργειακών πηγών έχουν τη δυνατότητα σημαντικής προόδου και αυτό όπως φαίνεται είναι που θα γίνει στο μέλλον. Ήδη η ανταγωνιστικότητα των τεχνολογιών αυτών έχει αρχίσει να αυξάνεται και σε λίγα χρόνια αναμένεται σημαντικό μέρος της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας να προέρχεται από τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών.

Οι επιλογές στη χρήση των Α.Π.Ε. είναι ευρείες, με κυριότερη προτίμηση στις ανεμογεννήτριες, στα φωτοβολταϊκά και στις κυψέλες καυσίμου. Και οι τρεις αυτές τεχνολογίες προσφέρουν το συνδυασμό χαμηλών έως μηδενικών εκπομπών ρυπογόνων ουσιών και της αρκετά μεγάλης πυκνότητας ισχύος, με κυρίαρχο τις κυψέλες καυσίμου, ακολουθούμενες από τις ανεμογεννήτριες και τελευταία τα φωτοβολταϊκά, τα οποία παρουσιάζουν κάποια πρακτικά προβλήματα, όπως την ανάγκη μεγάλης επιφάνειας που να είναι εκτεθειμένη σε ηλιακή ακτινοβολία. Οι εφαρμογές των κυψελών καυσίμου είναι σχεδόν απεριόριστες, αλλά η πιο εντυπωσιακή είναι στα οχήματα, ιδιωτικής ή δημόσιας χρήσης, όπου προσφέρουν τις ίδιες προδιαγραφές με τα αντίστοιχα συμβατικά, σε συνδυασμό με την συγκριτικά μηδενική περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Όταν κάποιος επιλέγει ένα σύστημα αυτόνομης παραγωγής ενέργειας, μία καλή επιλογή είναι τα λεγόμενα υβριδικά συστήματα. Αυτά τα συστήματα συνδυάζουν δύο ή περισσότερες τεχνολογίες και όταν αυτές, ή ένα μέρος αυτών, είναι ανανεώσιμες, τότε το περιβαλλοντικό όφελος αυξάνεται κατακόρυφα. Το κυριότερο πλεονέκτημα των υβριδικών συστημάτων είναι ότι οι πηγές του μπορούν να λειτουργήσουν συμπληρωματικά. Για παράδειγμα, σε ένα υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών, ανεμογεννήτριας και κυψέλης καυσίμου, τα φωτοβολταϊκά παράγουν ισχύ όταν επικρατεί ηλιοφάνεια, η ανεμογεννήτρια όταν υπάρχει αιολικό δυναμικό και η κυψέλη καυσίμου ανεξάρτητα από τις συνθήκες περιβάλλοντος, εφόσον υπάρχει διαθεσιμότητα καυσίμου. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να αποδώσει ισχύ τις ηλιόλουστες ημέρες, ακόμα και όταν επικρατεί άπνοια, τις ημέρες κακοκαιρίας και δυνατών ανέμων, που συνήθως η ηλιοφάνεια είναι χαμηλή, και τη νύχτα, ακόμα και με απουσία ανέμων. Αυτό φυσικά επιτυγχάνεται με την χρήση της εκάστοτε διαθέσιμης πηγής, ή το συνδυασμό πηγών. Άρα, φαίνεται πως ένα υβριδικό σύστημα αποτελεί μία σίγουρη λύση για αξιόπιστη παραγωγή ενέργειας.

Ένα τέτοιο υβριδικό σύστημα, μελετάται σε αυτή την εργασία. Οι πηγές αυτού του συστήματος είναι ένα φωτοβολταϊκό και μία κυψέλη καυσίμου. Η κλίμακα του συστήματος βέβαια είναι πολύ μικρή, αλλά ο σκοπός δεν είναι η μελέτη των στοιχείων του σε μεγάλες ισχύεις, αλλά σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Κύριος σκοπός αυτής της εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς του σε διαφορετικές συνδεσμολογίες των πηγών του, σε σειρά και παράλληλα και με χρήση μετατροπέα για ανύψωση της τάσης, όπως και η εύρεση των καλύτερων συνθηκών αποδοτικής λειτουργίας του συστήματος σε διάφορα φορτία. Γι' αυτό τον λόγο, γίνεται μία σειρά πειραμάτων που θα μας επιτρέψει να βγάλουμε αρκετά συμπεράσματα για τα παραπάνω, αλλά και για άλλα θέματα που αφορούν το σύστημα και τα επιμέρους στοιχεία του.

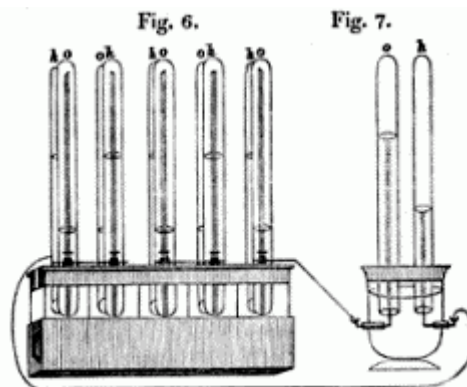


## 2. Κυψέλη Καυσίμου

### 2.1. Ιστορικά στοιχεία

#### Η Προέλευση Των Κυψελών Καυσίμου

Παρά τη σύγχρονη αύρα υψηλής τεχνολογίας τους, οι κυψέλες καυσίμου στην πραγματικότητα ήταν γνωστές στην επιστήμη για περισσότερο από 150 έτη. Παρ' όλο που γενικά αποτελούσαν κάτι περίεργο το 1800, οι κυψέλες καυσίμου έχουν γίνει το αντικείμενο έντονης έρευνας και ανάπτυξης, ειδικά από τον Δευτερο Παγκόσμιο Πόλεμο κι έπειτα. Ακολουθεί μια συνοπτική επισκόπηση μερικών από τους πρώτους ερευνητές κυψελών καυσίμου και των συνεισφορών τους.



Σχήμα 1 : Σχέδιο του William Grove μίας πειραματικής «μπαταρίας αερίων» από μία επιστολή του 1843. Εικόνα από το *Proceedings of the Royal Society*

Τα δύο παραπάνω σχήματα εμφανίζονται στη σελίδα 272 του *Philosophical Magazine and Journal of Science*, το 1843, με την επιστολή του William Grove για την «Βολταϊκή Μπαταρία Αερίου» (Gas Voltaic Battery). Ο Grove ανέλαβε μια σειρά τριάντα πειραμάτων που περιγράφονταν σε αυτήν την επιστολή όταν, «μετά από την αρχική δημοσίευσή μου έλαβα μια επιστολή από το Δρ Schoenbein [Christian F. Schönbein (1799-1868)] ... [ο οποίος] εκφράζει μια άποψη, ότι στην μπαταρία αερίου, το οξυγόνο δεν συμβάλλει αμέσως στην παραγωγή του ρεύματος, αλλά ότι παράγεται από το συνδυασμό υδρογόνου με το ύδωρ.»

Εδώ φαίνεται μια από τις διαμορφώσεις μπαταριών αερίου που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα του Grove. «Στο σχήμα 6 [Fig. 6], μια μπαταρία πέντε κυψελών... αναπαρίσταται όπως όταν είναι φορτισμένη [γεμάτη] με οξυγόνο και υδρογόνο, και για κάποιο χρόνο συνδεδεμένη με το βολτόμετρο (σχήμα 7 – Fig. 7), οι σωλήνες του οποίου είναι του ίδιου μεγέθους με εκείνους της μπαταρίας.» Αυτοί ονομάζονται «ο» και «h» στο σχέδιο.

Ο Grove έγραψε, «δέκα κυψέλες που φορτίστηκαν ως ένα δεδομένο σημάδι στο σωλήνα με διαλυμένο θειικό οξύ... οξυγόνο και υδρογόνο, συνδέθηκαν σε κύκλωμα με ένα βολτόμετρο... και επιτράπη να παραμείνουν έτσι για τριάντα έξι ώρες. Στο τέλος αυτού του χρονικού διαστήματος, 2,1 κυβικές ίντσες μικτού αερίου είχαν αναπτυχθεί στο βολτόμετρο. Το υγρό είχε ανέβει σε κάθε έναν από τους σωλήνες υδρογόνου της μπαταρίας 1,5 κυβική ίντσα, και στους σωλήνες οξυγόνου 0,7 κυβικές ίντσες, συνολικά 2,2 κυβικές ίντσες. Άρα, απορροφήθηκε 0,1 κυβική ίντσα παραπάνω υδρογόνο στους σωλήνες της μπαταρίας απ' όσο αναπτύχθηκε στο βολτόμετρο. Αυτό το πείραμα επαναλήφθηκε αρκετές φορές με το ίδιο γενικό συμπέρασμα.»

Στη διάρκεια αυτών των πειραμάτων, ο Grove παρείχε ισχυρές αποδείξεις ότι η παραγωγή ρεύματος απαιτούσε και υδρογόνο και οξυγόνο. Παρ' όλα αυτά, έθεσε και ερωτήματα σχετικά με την παραγωγή θερμότητας και «νέων αερίων και υγρών προϊόντων» - ερωτήματα τα οποία δεν μπορούσε



να απαντήσει με τον εξοπλισμό και τη θεωρητική γνώση που διέθετε. Αυτά τα ερωτήματα έγιναν γρίφοι για να τους λύσουν μετέπειτα ερευνητές.

Ο **William Robert Grove** (1811 -1896), ένας Άγγλος δικηγόρος που έγινε επιστήμονας, έγινε διάσημος για την ανάπτυξη μίας βελτιωμένης μπαταρίας υγρής κυψέλης το 1838. Η «κυψέλη Grove», όπως κατέληξε να ονομάζεται, χρησιμοποιούσε ένα ηλεκτρόδιο λευκόχρυσου εμβαπτισμένο σε νιτρικό οξύ και ένα ηλεκτρόδιο ψευδαργύρου σε θειούχο ψευδάργυρο, για να παράγει περίπου 12 αμπέρ ρεύματος στα 1,8 βολτ περίπου.

Ο Grove ανακάλυψε ότι, τοποθετώντας δύο ηλεκτρόδια λευκόχρυσου με τη μία άκρη του καθενός εμβαπτισμένη σε ένα δοχείο με θειικό οξύ και την άλλη άκρη τους σφραγισμένη σε δοχεία οξυγόνου και υδρογόνου, ένα συνεχές ρεύμα έρεε ανάμεσα στα ηλεκτρόδια. Τα σφραγισμένα δοχεία περιείχαν νερό μαζί με τα αέρια και παρατήρησε πως το επίπεδο του νερού ανέβαινε και στους δύο σωλήνες, καθώς έρεε το ρεύμα.

Το 1800, οι Βρετανοί επιστήμονες William Nicholson και Anthony Carlisle είχαν περιγράψει τη διαδικασία της χρήσης ηλεκτρισμού για την αποσύνθεση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο. Αλλά συνδυάζοντας τα αέρια για την παραγωγή ηλεκτρισμού και νερού ήταν, σύμφωνα με τον Grove, «ένα βήμα παραπέρα απ' ότι έχει καταγραφεί μέχρι τώρα.» Ο Grove συνειδητοποίησε ότι συνδυάζοντας αρκετές ομάδες από αυτά τα ηλεκτρόδια σε ένα κύκλωμα σε σειρά, θα μπορούσε να «πραγματοποιήσει την αποσύνθεση του νερού μέσω της σύνθεσής του.» Σύντομα πέτυχε αυτό το κατόρθωμα με τη συσκευή που ονόμασε «μπαταρία αερίου» - η πρώτη κυψέλη καυσίμου.

Ο χημικός **Ludwig Mond** (1839 -1909) πέρασε το μεγαλύτερο μέρος της καριέρας του αναπτύσσοντας βιομηχανική χημική τεχνολογία, όπως η παραγωγή ανθρακικού νατρίου και η διύλιση νικελίου. Το 1889, ο Mond και ο βοηθός του Carl Langer περιέγραψαν τα πειράματά τους με μία κυψέλη καυσίμου υδρογόνου-οξυγόνου, η οποία έφτανε τα 6 αμπέρ ανα τετραγωνικό πόδι (μετρώντας την επιφάνεια του ηλεκτροδίου) στα 0,73 βολτ. Η κυψέλη των Mond και Langer χρησιμοποιούσε ηλεκτρόδια από λεπτό, διάτρητο λευκόχρυσο. Σημείωσαν δυσκολίες στη χρήση υγρών ηλεκτρολυτών, λέγοντας ότι «επιτύχαμε μόνο χρησιμοποιώντας έναν ηλεκτρολύτη σε ημιστερεά μορφή, δηλαδή διαποτισμένο από ένα πορώδες, μη-αγώγιμο υλικό, κατά παρόμοιο τρόπο με τους αποκαλούμενους στεγνούς σωρούς και τις μπαταρίες.» Ένα παράδειγμα που δίνεται είναι ένα πήλινο πιάτο «διαποτισμένο από διαλυμένο θειικό οξύ.»



Σχήμα 2 : Ο Friedrich Wilhelm Ostwald, περίπου το 1905  
Εικόνα από ένα παστέλ του Anton Klamroth, Leipzig,  
από το *Transactions of the American Electrochemical Society*, 1905

Στο *Electrochemistry: History and Theory* , που εκδόθηκε το 1896, ο Wilhelm Ostwald περιέγραψε την μπαταρία αερίων του Grove ως «καμίας πρακτικής σημασίας, αλλά αρκετά σημαντική για το θεωρητικό της ενδιαφέρον.» Εκείνο τον καιρό, ο Ostwald και οι μαθητές του εμπλέκονταν βαθιά σε διαμάχες με άλλους ερευνητές. Οι νόμοι της θερμοδυναμικής ακόμη



καλλιεργούνταν, το ηλεκτρόνιο δεν είχε ανακαλυφθεί ακόμα, και οι θεωρίες που να εξηγούν τη φύση της ύλης αθρονούνταν. Σε αυτό το επιστημονικό κλίμα, η μπαταρία αερίου ήταν και ένα αίνιγμα και μια πηγή παθιασμένων συζητήσεων. «Ήταν ένας γρίφος,» έγραψε ο Ostwald, «το πώς αέρια που διαχωρίζονταν από ένα παχύ στρώμα υγρού ήταν δυνατό να ενωθούν, με τη βοήθεια της καταλυτικής δύναμης του λευκόχρυσου.»

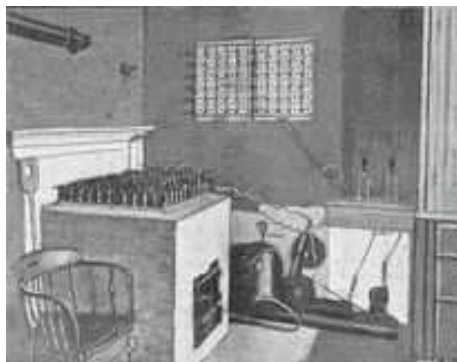
Ο Ostwald συνέδεσε αρκετές αντιμαχόμενες θεωρίες και τα λεπτομερή επιτυχημένα πειράματα του Grove της ηλεκτρόλυσης νερού με μία μπαταρία αερίου. Έπειτα έγραψε, «οι ιδέες του [Grove] ακούγονταν πολύ παράξενες εκείνες τις μέρες. Ο Grove απολογείται για τις εκφράσεις που χρησιμοποίησε. Αυτές οι ιδέες είναι αρκετά οικείες σε εμάς τώρα ως μία άμεση συνέπεια του νόμου για την διατήρηση της ενέργειας...»

«Η διαδικασία της αναπαράστασης φυσικών φαινομένων ως μηχανικά, είχε κατανοηθεί πλήρως από την επιστήμη εκείνης της εποχής. Ακόμα και σήμερα θεωρείται γενικά βάσιμη, ως αναμφίβολο αξίωμα. Αλλά τώρα βρίσκουμε ότι κάποιος δεν μπορεί να επιτύχει μια σωστή αναπαράσταση της πραγματικότητας με αυτόν τον τρόπο. Αυτό είναι ένα σημείο όπου η επιστήμη ξεκινά να ακολουθεί ένα άλλο μονοπάτι. Αυτός είναι ο σχηματισμός κατάλληλων νέων σκέψεων και η αντίστοιχη εκπαίδευση στην ικανότητα της σύλληψης ενός συσχετισμού μεταξύ των φαινομένων τα οποία δεν θα ήταν δυνατά σε ένα μηχανικό μοντέλο... Η μηχανική άποψη της πραγματικότητας αντικαθίσταται στον καιρό μας από σκέψεις ενέργειας.»

Στο τέλος του βιβλίου, ο Ostwald έλυσε τον «γρίφο της μπαταρίας αερίων του Grove.» Έγραψε, «Η απάντηση εμπεριέχεται στο γεγονός ότι οι οξειδωτικοί παράγοντες είναι πάντα ουσίες που σχηματίζουν αρνητικά ιόντα ή εξαφανίζουν τα θετικά ιόντα. Το αντίστροφο ισχύει για τα αναγωγικά μέσα... Το οξυγόνο και το υδρογόνο δεν είναι τίποτα άλλο από οξειδωτικούς και αναγωγικούς παράγοντες.»<sup>[1]</sup>

Ο **Friedrich Wilhelm Ostwald** (1853 -1932), ένας ιδρυτής του πεδίου της φυσικής χημείας, προσέφερε μεγάλο μέρος της θεωρητικής κατανόησης της λειτουργίας των κυψελών καυσίμου. Το 1893, προσδιόρισε πειραματικά τους αλληλοσυνδεδεμένους ρόλους των διαφόρων συστατικών της κυψέλης καυσίμου: ηλεκτρόδια, ηλεκτρολύτης, οξειδωτικοί και αναγωγικοί παράγοντες, ανιόντα και κατιόντα.

Ο Grove είχε εικάσει ότι η δράση στην μπαταρία αερίου του, συνέβαινε στο σημείο επαφής μεταξύ ηλεκτροδίου, αερίου και ηλεκτρολύτη, αλλά δεν μπορούσε να εξηγήσει περαιτέρω. Ο Ostwald, σχεδιάζοντας πάνω στο πρωτοποριακό έργο του για τη συσχέτιση φυσικών ιδιοτήτων και χημικών αντιδράσεων, έλυσε τον γρίφο της μπαταρίας αερίου του Grove. Η εξερεύνησή του, της συνεπαγόμενης χημείας των κυψελών καυσίμου έθεσε τη βάση για μετέπειτα ερευνητές των κυψελών καυσίμου.



Σχήμα 3 : Ο μηχανισμός της μπαταρίας άνθρακα, του William Jacques, 1896

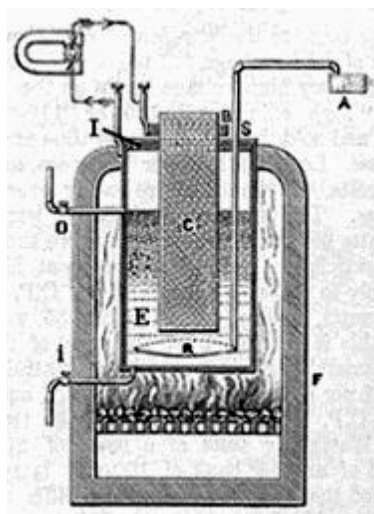
Ως εφευρέτης ηλεκτρικών συσκευών, ο William W. Jacques επέδειξε προσαρμοστικότητα. Ανέπτυξε διάφορα χρήσιμα μέρη του τηλεφώνου, ως μηχανικός στην American Bell, και τον Οκτώβριο του 1887 αυτός και ο συνεργάτης του Lowell Briggs συμβλήθηκαν με τον Thomas Edison για τα δικαιώματα της κατασκευής και διακίνησης της «ομιλούντος κούκλας» που είχαν εφεύρει και χρησιμοποιούσε φωνόγραφους του Edison.





Ως το 1896, ο Jacques είχε στραφεί στο πρόβλημα της δημιουργίας μίας πηγής ηλεκτρικής ισχύος που να είναι πιο αποδοτική από τις ήδη υπάρχουσες ατμομηχανές. Ανέπτυξε μία ηλεκτροχημική γεννήτρια που ήλπιζε ότι θα μετέτρεπε το κάρβουνο απευθείας σε ηλεκτρισμό. Ο μηχανισμός (επάνω) αποτελούνταν από 100 κυψέλες διατεταγμένες σε σειρές και τοποθετημένες στο πάνω μέρος ενός φούρνου που κρατούσε τη θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη μεταξύ 400 και 500 °C. Η έξοδος μετρήθηκε 16 αμπέρ στα 90 βολτ.

Αρχικά, ο Jacques ισχυρίστηκε μία απόδοση 82 τοις εκατό για την ανθρακική μπαταρία του, αλλά οι κριτικοί σύντομα επεσήμαναν ότι είχε παραλείψει να συνυπολογίσει την θερμική ενέργεια που χρησιμοποιούνταν στον φούρνο και την ενέργεια που χρησιμοποιούνταν για να περιστρέφει μία αντλία αέρος. Το αποτέλεσμα ήταν μία απόδοση μόνο 8 τοις εκατό. Περαιτέρω έρευνα κατέδειξε ότι το ρεύμα που παραγόταν από τον μηχανισμό του δεν λαμβάνονταν μέσω ηλεκτροχημικής δράσης, αλλά μάλλον μέσω θερμοηλεκτρικής δράσης. Αρκετοί ερευνητές που ακολούθησαν δήλωσαν πως η προσπάθεια του Jacques ήταν η τελευταία αξιόλογη προσπάθεια να παραχθεί ηλεκτρισμός απευθείας από το κάρβουνο.



Σχήμα 4 : Η κυψέλη άνθρακα του William Jacques, 1896 (βελτιωμένο ψηφιακά)  
Εικόνες από το *The Electrical Review*  
38, no. 970, p.826, 26 June 1896

Λεπτομέρειες της κυψέλης του Jacques φαίνονται στην παραπάνω εικόνα. «Ένας άνθρακας, C, βυθίζεται σε ένα διάλυμα καυστικής σόδας, E. Μία αντλία, A, εξαναγκάζει αέρα να εισχωρήσει σε ένα διάτρητο ακροφύσιο, R, το οποίο διανέμει τον αέρα ομοιόμορφα μέσα στον ηλεκτρολύτη. Ο θετικός πόλος είναι στερεωμένος στον σιδερένιο δέκτη, I, που περιέχει το διάλυμα, και ο αρνητικός πόλος [B] στον άνθρακα, ο οποίος στηρίζεται και μονώνεται από τον δέκτη με ένα κολάρο, S. Δύο σωλήνες, ο και i, χρησιμεύουν στην είσοδο και την εκκένωση του διαλύματος [του ηλεκτρολύτη].»

Ο **William W. Jacques** (1855 -1932) ήταν ηλεκτρολόγος μηχανικός και χημικός. Το 1896, «ξάφνιασε τον επιστημονικό κόσμο και το κοινό,» σύμφωνα με έναν επιστήμονα της εποχής, «με την ευρεία δήλωση ότι εφηύρε μία διαδικασία για την παραγωγή ηλεκτρισμού απευθείας από το κάρβουνο.» Ο Jacques κατασκεύασε μία «μπαταρία άνθρακα» στην οποία αέρας εγχέονταν σε έναν αλκαλικό ηλεκτρολύτη για να αντιδράσει (όπως νόμιζε) με ένα ηλεκτρόδιο άνθρακα (βλέπε εικόνα στα δεξιά). Αποδείχθηκε, όμως, ότι αντί για ηλεκτροχημική δράση με απόδοση 82 τοις εκατό, έπαιρνε θερμοηλεκτρική δράση με απόδοση περίπου 8 τοις εκατό.

Ο **Emil Baur** (1873 -1944) από την Ελβετία (μαζί με αρκετούς φοιτητές στο Braunschweig και τη Ζυρίχη), διεξήγαγαν ευρεία έρευνα για διαφορετικούς τύπους κυψελών καυσίμου κατά τη διάρκεια του πρώτου μισού του εικοστού αιώνα. Το έργο του Baur περιελάμβανε συσκευές υψηλής θερμοκρασίας (χρησιμοποιώντας χυτό άργυρο ως ηλεκτρολύτη) και μία μονάδα που χρησιμοποιούσε έναν στερεό ηλεκτρολύτη από πηλό και οξειδία μετάλλων.



Ο **Francis Thomas Bacon** (1904 -1992) ξεκίνησε να ερευνά τις κυψέλες καυσίμου αλκαλικού ηλεκτρολύτη στα τέλη της δεκαετίας του 1930. Το 1939, έφτιαξε μία κυψέλη που χρησιμοποιούσε ηλεκτρόδια από γάζα νικελίου και λειτουργούσε υπό πίεση τόσο υψηλή ως 3000 p.s.i. (Pounds per Square Inch). Κατά τη διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, ο Bacon εργάστηκε στην ανάπτυξη μίας κυψέλης καυσίμου που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στα υποβρύχια του Βασιλικού Ναυτικού, και το 1958 έκανε επίδειξη μίας αλκαλικής κυψέλης καυσίμου που χρησιμοποιούσε ηλεκτρόδια διαμέτρου 10 ιντσών για τον Εθνικό Ένωση Έρευνας και Ανάπτυξης της Βρετανίας (Britain's National Research Development Corporation).

Παρόλο που ήταν ακριβές, οι κυψέλες καυσίμου του Bacon αποδείχθηκαν αρκετά αξιόπιστες, ώστε να τραβήξουν την προσοχή των Pratt & Whitney. Η εταιρεία έδωσε άδεια στο έργο του Bacon για τις κυψέλες καυσίμου του διαστημόπλοιου Apollo. [2]

## 2.2. Το υδρογόνο ως καύσιμο

Το υδρογόνο είναι το πιο ελαφρύ και το πιο άφθονο στοιχείο στο σύμπαν. Είναι ένας φορέας ενέργειας, όχι μία πηγή ενέργειας, που σημαίνει ότι αποθηκεύει και αποδίδει ενέργεια σε μία χρησιμοποιήσιμη μορφή. Στην καθαρή του μορφή ( $H_2$ ), είναι ένα άχρωμο και άοσμο αέριο. Όμως, αφού ενώνεται εύκολα με άλλα στοιχεία, το υδρογόνο σπάνια συναντάται μόνο του στη φύση και συναντάται συνήθως ως μέρος άλλων ουσιών, συμπεριλαμβανομένων των ορυκτών καυσίμων, το φυτικό υλικό και το νερό.

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί χρησιμοποιώντας μία ποικιλία ενεργειακών πηγών – από ορυκτά καύσιμα, όπως ο λιθάνθρακας και το φυσικό αέριο, με δέσμευση και απομάκρυνση του άνθρακα, από ανανεώσιμες πηγές, όπως η βιομάζα και τεχνολογίες ανανεώσιμης ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ηλιακής, της αιολικής, της γεωθερμικής και της υδροηλεκτρικής, όπως και από πυρηνική ενέργεια. Συγκεκριμένες τεχνολογίες και διαδικασίες περιγράφονται παρακάτω.

### Θερμοχημικές διαδικασίες:

- Αναμόρφωση ατμού μεθανίου : Σε αυτή τη διαδικασία, ατμός υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για να εξαχθεί το υδρογόνο από μία πηγή μεθανίου, όπως το φυσικό αέριο. Αυτή είναι η πιο κοινή μέθοδος παραγωγής υδρογόνου. Περίπου το 95% του υδρογόνου που χρησιμοποιείται σήμερα παράγεται με αυτή τη διαδικασία.
- Μερική οξειδωση : Οι επιστήμονες εξερευνούν μία διαδικασία που παράγει υδρογόνο με τον ταυτόχρονο διαχωρισμό του οξυγόνου από τον αέρα και την μερική οξειδωση μεθανίου.
- Άλλες θερμικές μέθοδοι : Άλλες διαδικασίες περιλαμβάνουν α) το διαχωρισμό του νερού με τη χρήση της θερμότητας από έναν ηλιακό συλλέκτη και β) την αεριοποίηση ή καύση βιομάζας (δηλαδή βιολογικού υλικού, όπως φυτά ή αγροτικά απόβλητα) για την παραγωγή βιο-ελαίου ή βιο-αερίου, που αναμορφώνεται για να παράγει υδρογόνο.

### Ηλεκτρολυτικές διαδικασίες:

- Ηλεκτρόλυση : Στην ηλεκτρόλυση, ηλεκτρισμός χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό του νερού ( $H_2O$ ) σε υδρογόνο και οξυγόνο. Τα τρέχοντα συστήματα ηλεκτρόλυσης είναι πολύ ενεργοβόρα. Η πρόκληση είναι να αναπτυχθούν τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης χαμηλού κόστους και πιο αποδοτικές ενεργειακά.

### Φωτολυτικές διαδικασίες :

- Φωτολυτικές μέθοδοι : Στην φωτόλυση, ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται για να διαχωρίσει το νερό. Δύο φωτολυτικές διαδικασίες εξερευνώνται : α) οι φωτοβιολογικές μέθοδοι, στις οποίες μικροοργανισμοί, όταν εκτίθενται στην ηλιακή ακτινοβολία, διαχωρίζουν το νερό και παράγουν υδρογόνο και β) η φωτοηλεκτρόλυση, στην οποία ημιαγωγοί, όταν εκτίθενται σε ηλιακή ακτινοβολία και εμβαπτίζονται σε νερό, παράγουν αρκετό ηλεκτρισμό για να παράγουν υδρογόνο διαχωρίζοντας το νερό.



### 2.3. Βασική αρχή λειτουργίας

Ένας εναλλακτικός τρόπος για να δούμε την κυψέλη καυσίμου είναι να πούμε ότι το υδρογόνο «καίγεται», ή αναφλέγεται με την απλή αντίδραση :

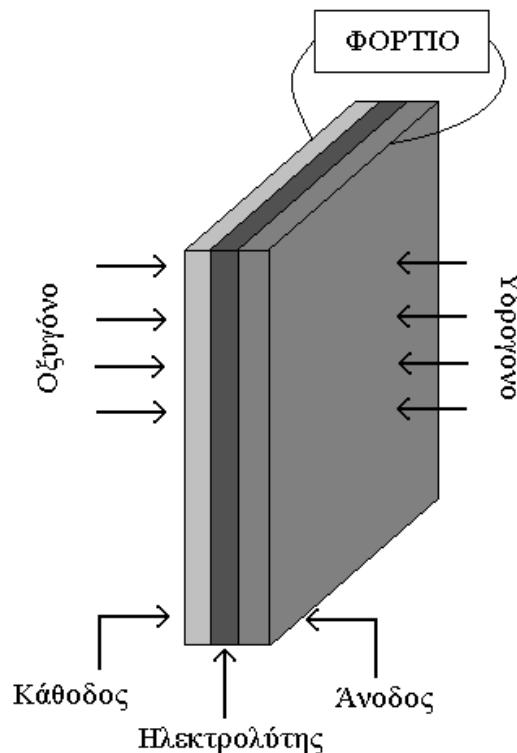


Παρ' όλα αυτά, αντί να απελευθερώνεται θερμότητα, παράγεται ηλεκτρική ενέργεια.

Στην πρώιμη μορφή τους οι κυψέλες καυσίμου απέδιδαν πολύ μικρό ρεύμα και οι κύριοι λόγοι γι' αυτό ήταν οι εξής :

- η μικρή «επιφάνεια επαφής» μεταξύ του αερίου, του ηλεκτροδίου και του ηλεκτρολύτη – βασικά μόνο ένα μικρό δαχτυλίδι, απ' όπου το ηλεκτρόδιο αναδύεται από τον ηλεκτρολύτη.
- η μεγάλη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων – ο ηλεκτρολύτης αντιστέκεται στην ροή του ηλεκτρικού ρεύματος

Για να υπερβούμε αυτά τα προβλήματα τα ηλεκτρόδια συνήθως φτιάχνονται επίπεδα, με ένα λεπτό στρώμα ηλεκτρολύτη, όπως στο σχήμα 5. Η δομή του ηλεκτροδίου είναι πορώδης, ώστε και ο ηλεκτρολύτης από τη μία μεριά, και το αέριο από την άλλη, να μπορούν να τον διαπεράσουν. Αυτό γίνεται για να δοθεί η μεγαλύτερη δυνατή επαφή μεταξύ του ηλεκτροδίου, του ηλεκτρολύτη και του αερίου.



Σχήμα 5 : Βασική δομή καθόδου – ηλεκτροδίου – ανόδου μίας κυψέλης καυσίμου.

Παρ' όλα αυτά, για να γίνει κατανοητό πως η αντίδραση μεταξύ υδρογόνου και οξυγόνου παράγει ηλεκτρικό ρεύμα και από πού έρχονται τα ηλεκτρόνια, πρέπει να μελετηθούν οι ξεχωριστές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε κάθε ηλεκτρόδιο. Αυτές οι σημαντικές λεπτομέρειες ποικίλουν για διαφορετικούς τύπους κυψελών καυσίμου, αλλά αν αρχίσουμε με μία κυψέλη βασισμένη σε όξινο ηλεκτρολύτη, όπως ήταν του Grove, θα αρχίσουμε με τον πιο απλό, αλλά και τον πιο συνηθισμένο τύπο.



Στην άνοδο μίας κυψέλης καυσίμου **όξινου ηλεκτρολύτη**, το αέριο υδρογόνο ιονίζεται, απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια και δημιουργώντας ιόντα  $H^+$  (ή πρωτόνια).

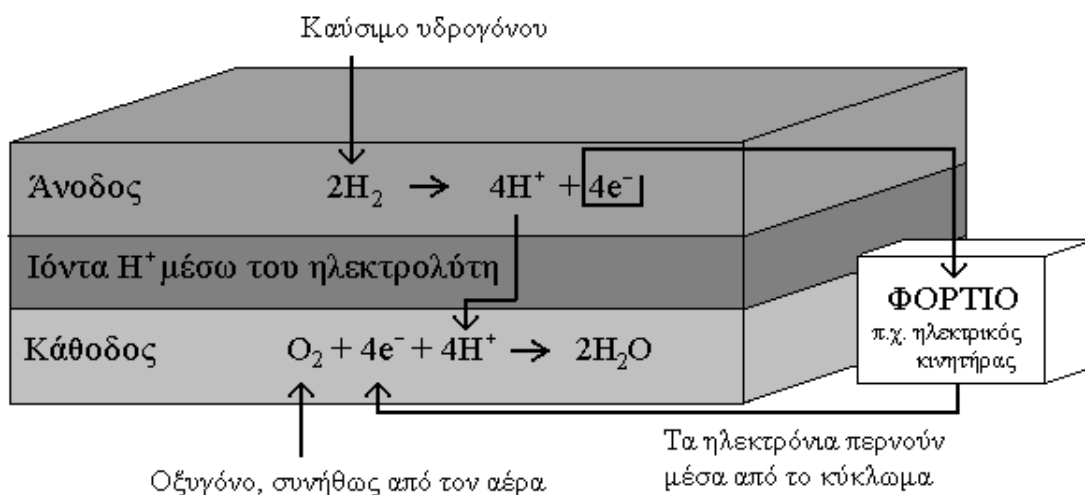


Αυτή η αντίδραση απελευθερώνει ενέργεια. Στην κάθοδο, οξυγόνο αντιδρά με ηλεκτρόνια παρμένα από το ηλεκτρόδιο και ιόντα  $H^+$  από τον ηλεκτρολύτη, για να σχηματίσει νερό.



Καθαρά, για να προχωρούν και οι δύο αυτές αντιδράσεις συνεχώς, τα ηλεκτρόνια που παράγονται στην άνοδο πρέπει να περνούν μέσα από ένα ηλεκτρικό κύκλωμα στην κάθοδο. Επίσης, τα ιόντα  $H^+$  πρέπει να περνούν μέσα από τον ηλεκτρολύτη. Ένα οξύ είναι ένα υγρό με ελεύθερα ιόντα  $H^+$  και έτσι εξυπηρετεί αυτό τον σκοπό πολύ ικανοποιητικά. Κάποια πολυμερή μπορούν επίσης να φτιαχτούν ώστε να περιέχουν κινητά ιόντα  $H^+$ . Αυτά τα υλικά λέγονται «μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων», καθώς ένα ιόν  $H^+$  είναι επίσης ένα πρωτόνιο.

Συγκρίνοντας τις εξισώσεις (2) και (3) μπορούμε να δούμε ότι δύο μόρια υδρογόνου θα χρειαστούν για κάθε μόριο οξυγόνου, για να κρατηθεί το σύστημα σε ισορροπία. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 6. Θα έπρεπε να σημειωθεί πως ο ηλεκτρολύτης πρέπει να επιτρέπει μόνο ιόντα  $H^+$  να περνούν από μέσα του και όχι ηλεκτρόνια. Αλλιώς τα ηλεκτρόνια θα πέρναγαν μέσα από τον ηλεκτρολύτη, όχι από το εξωτερικό κύκλωμα και θα χάνονταν όλα.



Σχήμα 6 : Αντιδράσεις των ηλεκτροδίων και ροή φορτίων για μία κυψέλη καυσίμου όξινου ηλεκτρολύτη. Πρέπει να σημειωθεί πως παρόλο που τα αρνητικά ηλεκτρόνια ρέουν από την άνοδο στην κάθοδο, το «συμβατικό» ρεύμα ρέει από την κάθοδο στην άνοδο.

Σε μία **κυψέλη καυσίμου αλκαλικού ηλεκτρολύτη** η συνολική αντίδραση είναι η ίδια, αλλά οι αντιδράσεις σε κάθε διαφορετικό ηλεκτρόδιο είναι διαφορετικές. Σε ένα αλκάλιο, τα ιόντα υδροξυλίου ( $OH^-$ ) είναι διαθέσιμα και κινητά. Στην άνοδο αυτά αντιδρούν με το υδρογόνο, απελευθερώνοντας ενέργεια και ηλεκτρόνια και παράγοντας νερό.



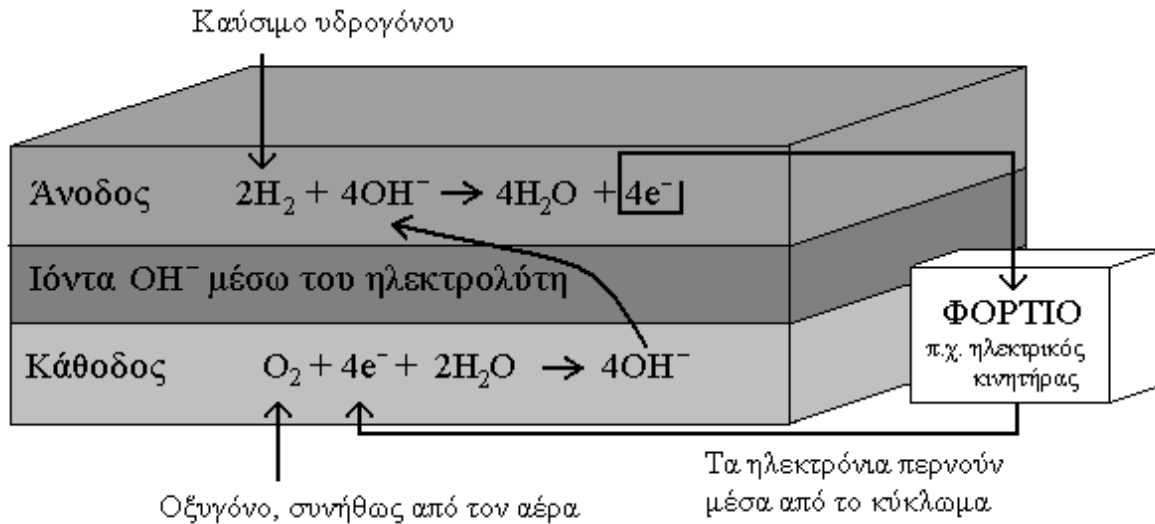
Στην κάθοδο, το οξυγόνο αντιδρά με ηλεκτρόνια που λαμβάνονται από το ηλεκτρόδιο και το νερό στον ηλεκτρολύτη, σχηματίζοντας νέα ιόντα  $OH^-$ .







Για να γίνονται συνεχώς αυτές οι αντιδράσεις, τα ιόντα  $\text{OH}^-$  πρέπει να μπορούν να περνούν μέσα από τον ηλεκτρολύτη και πρέπει να υπάρχει ένα εξωτερικό κύκλωμα για να πηγαίνουν τα ηλεκτρόνια από την άνοδο στην κάθοδο. Επίσης, συγκρίνοντας τις εξισώσεις (4) και (5) βλέπουμε ότι, όπως και στον όξινο ηλεκτρολύτη, χρειάζεται διπλάσιο υδρογόνο από ότι οξυγόνο. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 7. Πρέπει να σημειωθεί ότι παρόλο που το νερό καταναλώνεται στην κάθοδο, δημιουργείται δύο φορές πιο γρήγορα στην άνοδο.

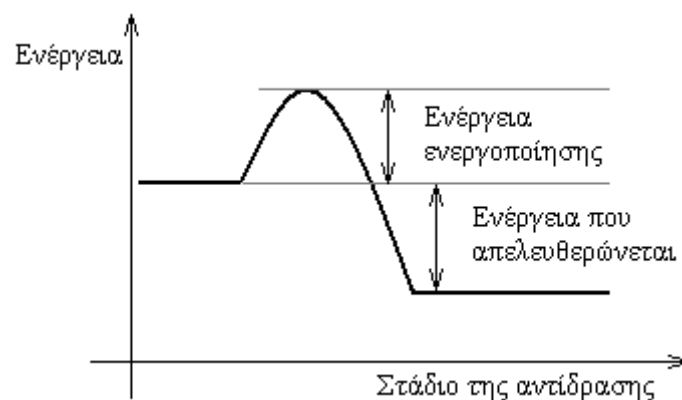


Σχήμα 7 : Αντιδράσεις των ηλεκτροδίων και ροή φορτίων για μία κυψέλη καυσίμου αλκαλικού ηλεκτρολύτη. Τα ηλεκτρόνια ρέουν από την άνοδο στην κάθοδο, αλλά το θετικό συμβατικό ρεύμα ρέει από την κάθοδο στην άνοδο.

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι κυψελών καυσίμου, με διαφορετικούς ηλεκτρολύτες. Οι λεπτομέρειες της αντίδρασης της ανόδου και της καθόδου είναι διαφορετικές για κάθε περίπτωση.

### Περιορισμοί

Στην άνοδο αντιδρά το υδρογόνο, απελευθερώνοντας ενέργεια. Παρ' όλα αυτά, το ότι απελευθερώνεται ενέργεια, δεν σημαίνει ότι η αντίδραση συνεχίζεται επ' άοριστον. Η αντίδραση έχει την «κλασσική» ενεργειακή μορφή που φαίνεται στο σχήμα 8.



Σχήμα 8 : Κλασσικό ενεργειακό διάγραμμα για μία απλή εξωθερμική χημική αντίδραση.

Παρόλο που απελευθερώνεται ενέργεια, η «ενέργεια ενεργοποίησης» πρέπει να δοθεί για να ξεπεραστεί ο «ενεργειακός λόφος». Αν η πιθανότητα ένα μόριο να έχει αρκετή ενέργεια είναι



χαμηλή, τότε η αντίδραση θα προχωρήσει αργά. Εκτός από τις υψηλές θερμοκρασίες, αυτό είναι συνηθισμένο για τις αντιδράσεις στις κυψέλες καυσίμου.

Οι τρεις κύριοι τρόποι να αντιμετωπιστούν οι αργοί ρυθμοί της αντίδρασης είναι :

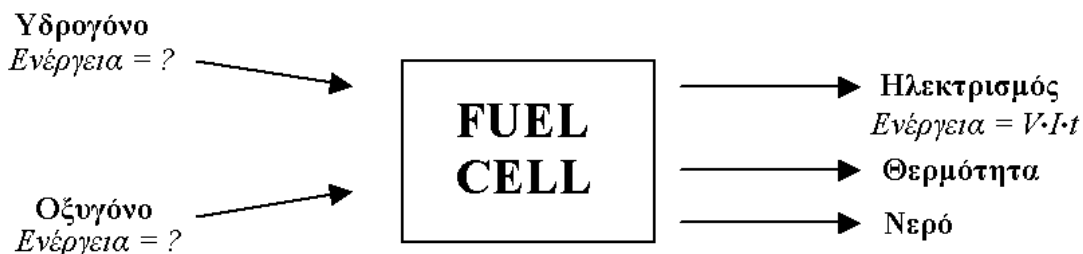
- η χρήση καταλύτη
- αυξάνοντας την θερμοκρασία
- αυξάνοντας την επιφάνεια των ηλεκτροδίων

Τα πρώτα δύο μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε χημική αντίδραση. Όμως το τρίτο είναι ξεχωριστό για τις κυψέλες καυσίμου και είναι πολύ σημαντικό. Αν πάρουμε μία αντίδραση σαν την (4), βλέπουμε πως χρειάζεται αέριο καύσιμο και ιόντα  $\text{OH}^-$  από τον ηλεκτρολύτη, όπως και η απαραίτητη ενέργεια ενεργοποίησης. Επιπροσθέτως, η ένωση του καυσίμου  $\text{H}_2$  και των ιόντων  $\text{OH}^-$  πρέπει να γίνει στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, καθώς τα ηλεκτρόνια που παράγονται πρέπει να απομακρύνονται. Καθαρά, ο ρυθμός με τον οποίο αυτό συμβαίνει θα είναι ανάλογος της επιφάνειας του ηλεκτροδίου. Αυτό είναι πολύ σημαντικό. Πράγματι, η επιφάνεια του ηλεκτροδίου είναι τόσο κρίσιμο θέμα, που η απόδοση ενός σχεδίου κυψέλης καυσίμου συχνά αναφέρεται σε όρους ρεύματος ανά  $\text{cm}^2$ .

Όμως η ευθεία επιφάνεια (μήκος επί πλάτος) δεν είναι το μοναδικό ζήτημα. Το ηλεκτρόδιο φτιάχνεται πορώδες. Αυτό έχει την ιδιότητα να αυξάνει σημαντικά την ενεργό επιφάνεια. Τα μοντέρνα ηλεκτρόδια κυψελών καυσίμου έχουν μία μικροδομή που τους δίνει επιφάνειες που μπορεί να είναι από εκατοντάδες, μέχρι και χιλιάδες φορές όσο η ευθεία επιφάνεια μήκος επί πλάτος. Συνεπώς, το μικρο-δομικό σχέδιο και κατασκευή ενός ηλεκτροδίου κυψέλης καυσίμου είναι πολύ σημαντικό θέμα. Επίσης, τα ηλεκτρόδια πρέπει να περιέχουν έναν καταλύτη και να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες και διαβρωτικό περιβάλλον.

### Ενέργεια και απόδοση

Σε μερικές ηλεκτροπαραγωγικές συσκευές, όπως οι ανεμογεννήτριες, είναι ξεκάθαρο ποια μορφή ενέργειας μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό. Στις κυψέλες καυσίμου αυτό είναι πιο δύσκολο να κατανοηθεί.



Σχήμα 9 : Είσοδοι και έξοδοι μίας κυψέλης καυσίμου.

Η ηλεκτρική ισχύς και ενέργεια υπολογίζεται εύκολα από του γνωστούς τύπους  $P = IV$  και  $E = Vit$ . Όμως η ενέργεια των χημικών εισόδων και εξόδων δεν καθορίζεται τόσο εύκολα. Σε ένα απλό επίπεδο θα μπορούσαμε να πούμε πως πρόκειται για την «χημική ενέργεια» των  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$  και  $\text{H}_2\text{O}$ . Το πρόβλημα όμως είναι πως η «χημική ενέργεια» δεν καθορίζεται εύκολα και χρησιμοποιούνται όροι όπως η ενθαλπία, η συνάρτηση Helmholtz, και η ελεύθερη ενέργεια Gibbs, όπως και παλιότεροι (αλλά ακόμη χρήσιμοι) όροι όπως η θερμιδική αξία.

Στην περίπτωση των κυψελών καυσίμου είναι η ελεύθερη ενέργεια Gibbs που είναι σημαντική. Αυτή μπορεί να οριστεί ως «η ενέργεια που μπορεί να παράγει εξωτερικό έργο, αγνοώντας το έργο παράγεται από μεταβολές σε πίεση ή και όγκο». Στις κυψέλες καυσίμου το εξωτερικό έργο σημαίνει ηλεκτρόνια που κινούνται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα και το έργο που παράγεται από μεταβολές στον όγκο και την πίεση δεν εκμεταλλεύεται από τις κυψέλες καυσίμου. Η συνάρτηση Helmholtz είναι απλά η ελεύθερη ενέργεια Gibbs μείον το γινόμενο πίεση επί όγκο. Η ενθαλπία είναι η ελεύθερη ενέργεια Gibbs συν την ενέργεια που συνδέεται με την εντροπία.



Όλες αυτές οι μορφές «χημικής ενέργειας» μοιάζουν με τη συνηθισμένη μηχανική «δυναμική ενέργεια» με δύο σημαντικούς τρόπους.

Ο πρώτος είναι ότι το σημείο μηδενικής ενέργειας μπορεί να οριστεί σχεδόν παντού. Δουλεύοντας με χημικές αντιδράσεις, το σημείο μηδενικής ενέργειας συνήθως ορίζεται ως αμιγή στοιχεία, σε Κανονικές Συνθήκες. Ο όρος «ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού Gibbs»,  $G_f$  χρησιμοποιείται όταν κάνουμε αυτήν την παραδοχή, αντί για την «ελεύθερη ενέργεια Gibbs». Παρομοίως χρησιμοποιείται η «ενθαλπία σχηματισμού» αντί για την «ενθαλπία». Για μία συνηθισμένη κυψέλη καυσίμου που λειτουργεί σε Κανονικές Συνθήκες αυτό σημαίνει ότι η «ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού Gibbs» της εισόδου είναι μηδέν, μία χρήσιμη απλοποίηση.

Ο δεύτερος παραλληλισμός με την μηχανική δυναμική ενέργεια είναι ότι η μεταβολή στην ενέργεια είναι που έχει σημασία. Σε μία κυψέλη καυσίμου είναι η μεταβολή στην ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού Gibbs,  $\Delta G_f$  που μας δίνει την ενέργεια που απελευθερώνεται. Αυτή η μεταβολή είναι η διαφορά μεταξύ της ελεύθερης ενέργειας Gibbs των προϊόντων και της ελεύθερης ενέργειας Gibbs των εισόδων ή αντιδρώντων.

$$\Delta G_f = G_f \text{ προϊόντων} - G_f \text{ αντιδρώντων} \quad (\text{Εξ. 6})$$

Για να απλοποιηθούν οι συγκρίσεις, είναι σχεδόν πάντα πιο βολικό να θεωρούνται αυτές οι ποσότητες στη γραμμομοριακή τους μορφή. Αυτές υποδεικνύονται από ένα  $\bar{\quad}$  πάνω από το αντίστοιχο μικρό γράμμα.

Πιο αναλυτικά, η συνάρτηση Gibbs ενός συστήματος ορίζεται με όρους ενθαλπίας και εντροπίας :

$$G = H - TS \quad (\text{Εξ. 7})$$

Παρομοίως, στη γραμμομοριακή τους μορφή :

$$\bar{g}_f = \bar{h}_f - T\bar{s} \quad (\text{Εξ. 8})$$

Στην προκειμένη περίπτωση σημαντική είναι η μεταβολή στην ενέργεια. Επίσης, σε μία κυψέλη καυσίμου η θερμοκρασία είναι σταθερή. Άρα :

$$\Delta \bar{g}_f = \Delta \bar{h}_f - T\Delta \bar{s} \quad (\text{Εξ. 9})$$

Η τιμή  $\Delta \bar{h}_f$  είναι η διαφορά μεταξύ του  $\bar{h}_f$  των προϊόντων και του  $\bar{h}_f$  των αντιδρώντων.

Άρα για την αντίδραση  $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$  έχουμε :

$$\Delta \bar{h}_f = (\bar{h}_f)_{\text{H}_2\text{O}} - (\bar{h}_f)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2}(\bar{h}_f)_{\text{O}_2} \quad (\text{Εξ. 10})$$

Αντίστοιχα, η  $\Delta \bar{s}$  είναι η διαφορά μεταξύ  $\bar{s}$  των προϊόντων και  $\bar{s}$  των αντιδρώντων. Οπότε, σε αυτή την περίπτωση :

$$\Delta \bar{s} = (\bar{s})_{\text{H}_2\text{O}} - (\bar{s})_{\text{H}_2} - \frac{1}{2}(\bar{s})_{\text{O}_2} \quad (\text{Εξ. 11})$$

Οι τιμές για την γραμμομοριακή απόλυτη εντροπία και την γραμμομοριακή ενθαλπία σχηματισμού καθώς και οι συναρτήσεις για διαφορετικές θερμοκρασίες μπορούν να βρεθούν σε θερμοδυναμικούς πίνακες και βιβλία αντίστοιχα.

Εφόσον δεν υπάρχουν απώλειες στην κυψέλη καυσίμου, ή αλλιώς αν η διαδικασία είναι «αντιστρέψιμη», τότε όλη αυτή η ελεύθερη ενέργεια Gibbs μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Στην πράξη, βέβαια, ένα μέρος απελευθερώνεται ως θερμότητα. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της αντιστρέψιμης τάσης ανοιχτού κυκλώματος μίας κυψέλης καυσίμου.

Όπως προαναφέρθηκε, για την κυψέλη καυσίμου υδρογόνου, δύο ηλεκτρόνια περνάνε από το εξωτερικό κύκλωμα για κάθε μόριο νερού που παράγεται και κάθε μόριο υδρογόνου που



καταναλώνεται. Έτσι, για ένα mole υδρογόνου που καταναλώνεται, 2N ηλεκτρόνια περνούν από το εξωτερικό κύκλωμα, όπου N ο αριθμός Avogadro. Αν το φορτίο ενός ηλεκτρονίου είναι  $-e$ , τότε το φορτίο που ρέει είναι

$$-2Ne = -2F \text{ Coulomb} \quad (\text{Εξ. 12})$$

όπου F είναι η σταθερά Faraday, ή αλλιώς το φορτίο σε ένα mole ηλεκτρονίων.

Αν E είναι η τάση της κυψέλης καυσίμου, τότε το ηλεκτρικό έργο που παράγεται με τη μετακίνηση αυτού του φορτίου μέσα από το κύκλωμα είναι :

$$\text{Παραγόμενο ηλεκτρικό έργο} = \text{φορτίο} \times \text{τάση} = -2FE \text{ Joule}$$

Αν το σύστημα είναι αναστρέψιμο (ή δεν έχει καθόλου απώλειες) τότε αυτό το ηλεκτρικό έργο που παράγεται θα είναι ίσο με την ελεύθερη ενέργεια Gibbs που απελευθερώνεται  $\Delta\bar{g}_f$ . Άρα :

$$\Delta\bar{g}_f = -2FE \quad (\text{Εξ. 13})$$

Συνεπώς :

$$E = \frac{-\Delta\bar{g}_f}{2F} \quad (\text{Εξ. 14})$$

Αυτή η στοιχειώδης εξίσωση δίνει την ηλεκτρεγερτική δύναμη της αναστρέψιμης τάσης ανοικτού κυκλώματος της κυψέλης καυσίμου υδρογόνου. Ας σημειωθεί πως οι τιμές του  $\Delta\bar{g}_f$  είναι αρνητικές, που σημαίνει πως απελευθερώνεται ενέργεια.

Για παράδειγμα, μία κυψέλη καυσίμου υδρογόνου που λειτουργεί στους  $200^\circ\text{C}$  έχει  $\Delta\bar{g}_f = -220 \text{ kJ}$ , άρα :

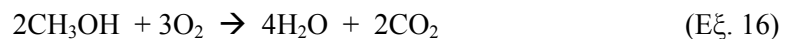
$$E = \frac{220000}{2 \times 96485} = 1.14 \text{ Volt}$$

Η παραπάνω εξίσωση (14) μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλες αντιδράσεις. Ο αριθμός 2 στο παρονομαστή αντιστοιχεί σε 2 ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται ανά μόριο καυσίμου, στην παραπάνω περίπτωση το υδρογόνο. Αν γενικευτεί αυτό σε οποιοδήποτε αριθμό ηλεκτρονίων ανά μόριο, η αντίδραση γίνεται :

$$E = \frac{-\Delta\bar{g}_f}{zF} \quad (\text{Εξ. 15})$$

Όπου z ο αριθμός των ηλεκτρονίων που απελευθερώνονται για κάθε μόριο καυσίμου.

Ένα άλλο χρήσιμο παράδειγμα είναι η κυψέλη καυσίμου μεθανόλης. Η συνολική αντίδραση είναι :



με 12 ηλεκτρόνια να μεταφέρονται από την άνοδο στην κάθοδο, δηλαδή 6 ηλεκτρόνια για κάθε μόριο μεθανόλης. Για την αντίδραση της μεθανόλης ξέρουμε ότι  $\Delta\bar{g}_f = -698,2 \text{ kJ/mol}$ . Αν αντικαταστήσουμε λοιπόν στην εξ. (15) έχουμε :

$$E = \frac{6.982 \times 10^5}{6 \times 96486,7} = 1.206 \text{ Volt}$$

Βέβαια, το  $\Delta\bar{g}_f$  μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και άλλους παράγοντες. Η μέγιστη δυνατή απόδοση εκφράζεται ως :



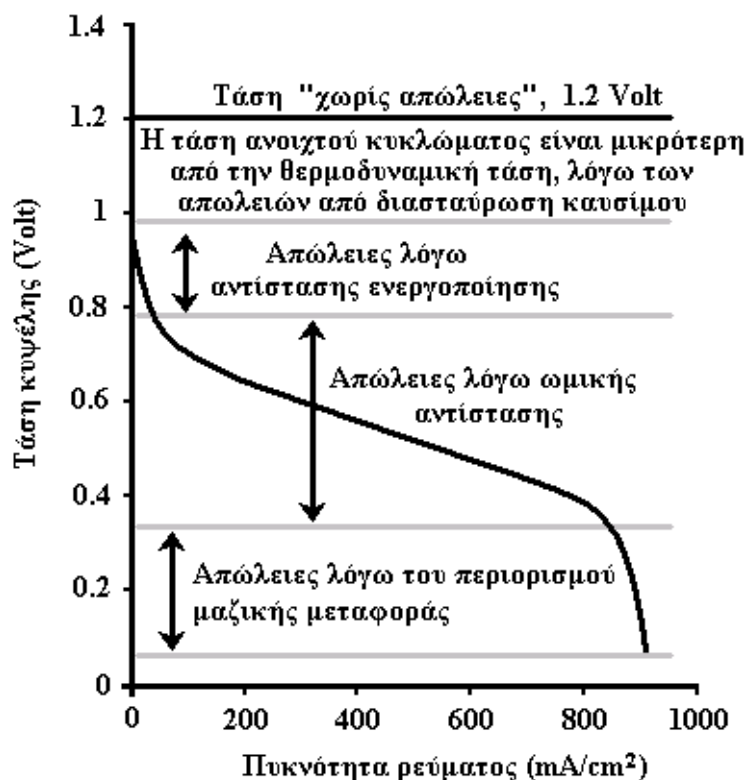
$$\eta_{\max} = \frac{\Delta \bar{g}_f}{\Delta \bar{h}_f} \times 100\% \quad (\text{Εξ. 17})$$

Επίσης, η απόδοση μίας κυψέλης καυσίμου υδρογόνου σε λειτουργία μπορεί να βρεθεί με την απλή εξίσωση :

$$\eta = \mu_f \frac{V}{1,48} \times 100\% \quad (\text{Εξ. 18})$$

Όπου  $\mu_f$  η χρήση του καυσίμου (συνήθως 0,95 περίπου) και V η τάση μίας κυψέλης καυσίμου από τη συστοιχία.

### Μη-αναστρεψιμότητες των κυψελών καυσίμου



Σχήμα 10 : Γράφημα που δείχνει την τάση για μία τυπική κυψέλη καυσίμου που λειτουργεί σε χαμηλή θερμοκρασία και ατμοσφαιρική πίεση.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 10, η τάση μίας κυψέλης καυσίμου στην πράξη δεν είναι σταθερή αλλά ούτε αυτή που υπολογίζεται από την εξίσωση (15). Το σχήμα αυτό αφορά κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες η τάση χωρίς απώλειες είναι μικρότερη, αλλά η πραγματική τάση λειτουργίας είναι γενικά υψηλότερη, γιατί η πτώση τάσης από τις μη-αναστρεψιμότητες είναι μικρότερη. Η χαρακτηριστική καμπύλη τάσης / πυκνότητας ρεύματος του σχήματος 10 προκύπτει από τέσσερις κύριες μη-αναστρεψιμότητες, οι οποίες αναλύονται παρακάτω.

1. *Απώλειες ενεργοποίησης.* Προκαλούνται από τον αργό ρυθμό των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Ένα μέρος της παραγόμενης τάσης χάνεται υποκινώντας τη χημική αντίδραση που μεταφέρει τα ηλεκτρόνια προς και από το ηλεκτρόδιο. Αυτή η πτώση τάσης είναι υψηλά μη-γραμμική.



Σε κυψέλες καυσίμου χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας, η υπέρταση ενεργοποίησης είναι η πιο σημαντική μη-αναστρεψιμότητα και αιτία για πτώση τάσης, ενώ συμβαίνει κυρίως στην κάθοδο. Η υπέρταση ενεργοποίησης και στα δύο ηλεκτρόδια είναι σημαντική σε κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν καύσιμα άλλα από το υδρογόνο, όπως η μεθανόλη. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις η υπέρταση ενεργοποίησης γίνεται λιγότερο σημαντική.

Είτε η πτώση τάσης είναι σημαντική και στα δύο ηλεκτρόδια, ή μόνο στην κάθοδο, το μέγεθός της σχετίζεται με την πυκνότητα ρεύματος  $i$  με την εξίσωση :

$$V = A \cdot \ln\left(\frac{i}{b}\right) \quad (\text{Εξ. 19})$$

Που λέγεται εξίσωση Tafel και όπου  $A$  και  $b$  είναι σταθερές που εξαρτώνται από το ηλεκτρόδιο και τις συνθήκες της κυψέλης. Αυτή η εξίσωση ισχύει μόνο εάν  $i > b$ .

Επίσης για την παραπάνω σταθερά :

$$A = \frac{RT}{2\alpha F} \quad (\text{Εξ. 20})$$

όπου το  $\eta$  σταθερά  $\alpha$  λέγεται «συντελεστής μεταφοράς φορτίου» και είναι η αναλογία της ηλεκτρικής ενέργειας που εφαρμόζεται και καταναλώνεται στην μεταβολή του ρυθμού μίας ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Πρέπει να είναι μεταξύ 0 και 1.0.

2. *Διασταύρωση καυσίμου και εσωτερικά ρεύματα.* Αυτή η απώλεια ενέργειας προκύπτει από την σπατάλη καυσίμου που περνάει μέσα από τον ηλεκτρολύτη και, σε μικρότερη έκταση, από την αγωγή των ηλεκτρονίων μέσα από τον ηλεκτρολύτη. Ο ηλεκτρολύτης θα έπρεπε μόνο να μεταφέρει ιόντα μέσα από την κυψέλη, όπως στα σχήματα 6 και 7. Παρ' όλα αυτά, ένα καθορισμένο ποσό διάχυσης καυσίμου και ροής ηλεκτρονίων θα είναι πάντα πιθανό. Η απώλεια καυσίμου και το ρεύμα είναι μικρά και η επίδρασή τους συνήθως δεν είναι πολύ σημαντική. Έχουν όμως μία αξιοσημείωτη επίδραση στην τάση ανοιχτού κυκλώματος των κυψελών καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας.
3. *Ωμικές απώλειες.* Αυτή η πτώση τάσης είναι η απ' ευθείας αντίσταση στη ροή των ηλεκτρονίων μέσω του υλικού των ηλεκτροδίων και των διάφορων διασυνδέσεων, όπως επίσης και η αντίσταση στη ροή των ιόντων μέσω του ηλεκτρολύτη. Αυτή η πτώση τάσης είναι ουσιαστικά ανάλογη με την πυκνότητα ρεύματος, είναι γραμμική και συνεπώς χρησιμοποιείται ο όρος «ωμικές» απώλειες, ή μερικές φορές απώλειες «αντίστασης».
4. *Απώλειες μαζικής μεταφοράς ή απώλειες συγκέντρωσης.* Αυτές προκύπτουν από τη μεταβολή της συγκέντρωσης των αντιδρώντων στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων, όσο καταναλώνεται το καύσιμο. Η συγκέντρωση επηρεάζει την τάση, άρα αυτός ο τύπος μη-αναστρεψιμότητας λέγεται μερικές φορές απώλειες «συγκέντρωσης». Επειδή η ελάττωση της συγκέντρωσης είναι αποτέλεσμα της ανεπάρκειας της μεταφοράς αρκετών αντιδρώντων στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, αυτός ο τύπος απωλειών λέγεται επίσης συχνά απώλειες «μαζικής μεταφοράς». Αυτό το είδος απωλειών έχει και ένα τρίτο όνομα, «Nernstianές» («Nernstian»). Αυτό επειδή οι συνδέσεις τους με την συγκέντρωση και η επίδραση της συγκέντρωσης περιγράφονται από την συγκέντρωση του Nernst.

Θα ήταν χρήσιμο να φτιαχτεί μια συνάρτηση που να συνδυάζει όλες τις παραπάνω απώλειες, για να μπορεί να βρεθεί το σύνολο των απωλειών και συνεπώς η πραγματική τάση μίας κυψέλης καυσίμου. Αυτό μπορεί να γίνει με την παρακάτω εξίσωση που αφορά την τάση λειτουργίας μίας κυψέλης καυσίμου σε μία πυκνότητα ρεύματος :

$$V = E - (i + i_n)r - A \ln\left(\frac{i + i_n}{i_0}\right) + B \ln\left(1 - \frac{i + i_n}{i_l}\right) \quad (\text{Εξ. 21})$$





Όπου:

$E$  : η αναστρέψιμη τάση ανοιχτού κυκλώματος, που δίνεται από την εξίσωση (15).

$i_n$  : η αντίστοιχη με την διασταύρωση καυσίμου και εσωτερική πυκνότητα ρεύματος.

$A$  : η κλίση της εξίσωσης Tafel, που περιγράφεται στην εξ. (20).

$i_0$  : η πυκνότητα του ρεύματος ανταλλαγής στην κάθοδο, αν η καθοδική υπέρταση είναι πολύ μεγαλύτερη από την ανοδική, ή συνάρτηση των δύο πυκνοτήτων ρεύματος ανταλλαγής.

$B$  : μία σταθερά που εξαρτάται από την κυψέλη καυσίμου και την κατάσταση λειτουργίας της

$i_l$  : η πυκνότητα ρεύματος περιορισμού στο ηλεκτρόδιο που έχει την χαμηλότερη πυκνότητα ρεύματος περιορισμού.

$r$  : η ειδική αντίσταση επιφάνειας.

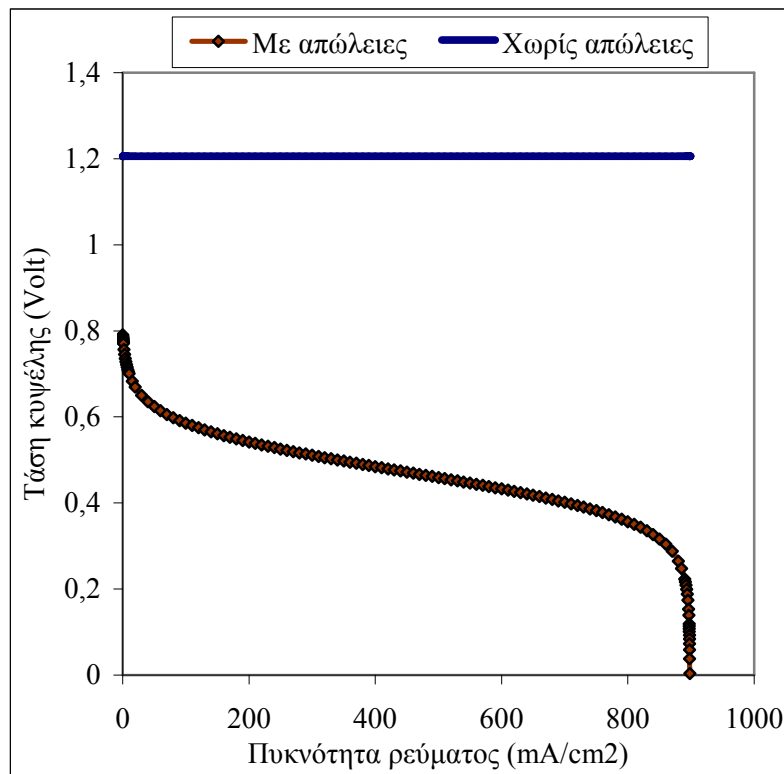
Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται κάποια παραδείγματα τιμών για δύο διαφορετικούς τύπους κυψελών καυσίμου.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1** : Παραδείγματα τιμών για την εξίσωση (21).

Σταθερά	Χαμηλής θερμοκρασίας, π.χ. PEMFC	Υψηλής θερμοκρασίας, π.χ. SOFC
$E$ (Volt)	1.2	1.0
$i_n$ (mA/cm <sup>2</sup> )	2	2
$r$ (kΩ/cm <sup>2</sup> )	$30 \times 10^{-6}$	$300 \times 10^{-6}$
$i_0$ (mA/cm <sup>2</sup> )	0.067	300
$A$ (Volt)	0.06	0.03
$B$ (Volt)	0.05	0.08
$i_l$ (mA/cm <sup>2</sup> )	900	900

Πρέπει να σημειωθεί πως μπορεί να υπάρξουν προβλήματα με την εξ. (21) σε χαμηλές πυκνότητες ρεύματος, καθώς ο τρίτος όρος της ισχύει μόνο αν  $(i + i_n) > i_0$ . Επίσης η εξίσωση δεν ισχύει όταν υπερβαίνεται η πυκνότητα ρεύματος περιορισμού, δηλαδή  $(i + i_n) > i_l$ . Αν χαραχθεί η καμπύλη για την εξίσωση αυτή, τότε θα μοιάζει με την καμπύλη του σχήματος **10**.

Εδώ μπορεί να παρουσιαστεί ένα παράδειγμα θεωρητικού υπολογισμού της τάσης με τις απώλειες. Το παράδειγμα που ακολουθεί αφορά τον τύπο κυψέλης καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση του πειραματικού μέρους αυτής της εργασίας. Για αυτό το είδος κυψέλης καυσίμου και για καύσιμο μεθανόλη, οι σταθερές της εξίσωσης (21) έχουν ως εξής :  $E = 1,206$  Volt,  $i_n = 2$  mA/cm<sup>2</sup>,  $r = 30 \times 10^{-6}$  kΩ/cm<sup>2</sup>,  $i_0 = 5 \times 10^{-4}$  mA/cm<sup>2</sup> (για καταλύτη λευκόχρυσο),  $A = 0,05$  Volt,  $B = 0,05$  Volt,  $i_l = 900$  mA/cm<sup>2</sup>. Γι' αυτά τα νούμερα, σχεδιάζοντας την αντίστοιχη γραφική παράσταση της εξίσωσης (21) έχουμε :



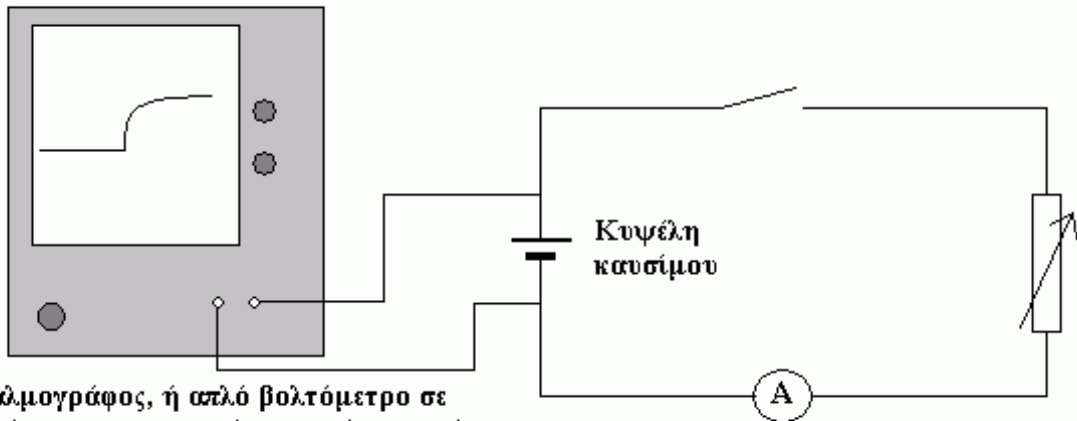
Σχήμα 11 : Παράδειγμα γραφήματος που δείχνει την τάση για μία τυπική αλκαλική κυψέλη καυσίμου διαλυτού καυσίμου, που λειτουργεί σε χαμηλή θερμοκρασία και ατμοσφαιρική πίεση.

Από τα αποτελέσματα του παραδείγματος βγαίνει μία τάση ανοιχτού κυκλώματος που είναι ίση με 0,791 Volt και οφείλεται κυρίως στις απώλειες ενεργοποίησης. Αυτή η τιμή, όπως θα δούμε και στο πειραματικό μέρος της εργασίας, είναι πολύ κοντά στην πραγματική.

Συνοψίζοντας, για να σχηματιστεί μία πιο ακριβής εικόνα των απωλειών, υπάρχουν κάποιοι τρόποι που μπορούν να διαπιστωθούν πειραματικά οι παραπάνω απώλειες, ή μη-αναστρεψιμότητες. Ο ένας είναι η *φασματοσκοπία ηλεκτρικής αντίστασης*. Κατά τη μέθοδο αυτή, ένα εναλλασσόμενο ρεύμα μεταβλητής συχνότητας περνάει μέσα από την κυψέλη καυσίμου, μετράται η τάση και υπολογίζεται η αντίσταση. Σε υψηλότερες συχνότητες η πυκνωτές στο κύκλωμα έχουν μικρότερη αντίσταση. Σχεδιάζοντας γραφήματα της αντίστασης συναρτήσει της συχνότητας είναι δυνατό να ξεχωρίσουν οι απώλειες της ανόδου και της καθόδου και σίγουρα να διαχωριστούν οι απώλειες τύπου μαζικής μεταφοράς και τύπου ενεργοποίησης.

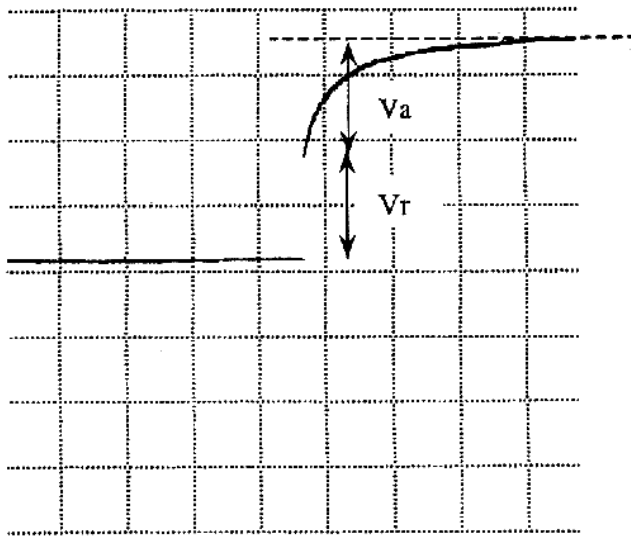
Ο άλλος τρόπος είναι η *τεχνική διακοπής ρεύματος*. Μπορεί να πραγματοποιηθεί με χαμηλού κόστους ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Έστω ότι μία κυψέλη καυσίμου δίνει ένα ρεύμα όπου η υπέρταση μαζικής μεταφοράς είναι αμελητέα. Τότε η πτώση τάσης θα προκαλείται από τις ωμικές απώλειες και την υπέρταση ενεργοποίησης. Έστω τώρα πως το ρεύμα αποκόπτεται. Η υπέρταση θα κάνει κάποιο χρόνο να εξαλειφθεί. Παρόλα αυτά, οι ωμικές απώλειες θα πέσουν απ' ευθείας στο μηδέν. Άρα θα περιμέναμε να δούμε μία καμπύλη μεταβολής όπως αυτές των παραδειγμάτων που ακολουθούν. Το ισοδύναμο κύκλωμα που χρησιμοποιείται για το πείραμα αυτό φαίνεται παρακάτω.





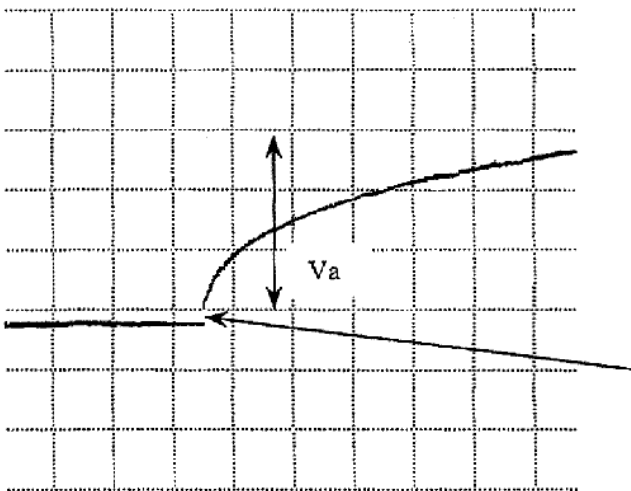
Σχήμα 12 : Ένα απλό κύκλωμα για την πραγματοποίηση ενός τεστ διακοπής ρεύματος.

Παρακάτω ακολουθούν κάποια παραδείγματα από τρία τεστ διακοπής ρεύματος. Τα πειράματα έγιναν με τρεις διαφορετικούς τύπους κυψελών καυσίμου, μία κυψέλη καυσίμου υδρογόνου PEM, μία κυψέλη καυσίμου ευθείας μεθανόλης (DMFC) και μία κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC). Σε κάθε περίπτωση η συνολική πτώση τάσης ήταν περίπου η ίδια, αλλά η πυκνότητα ρεύματος σίγουρα όχι.



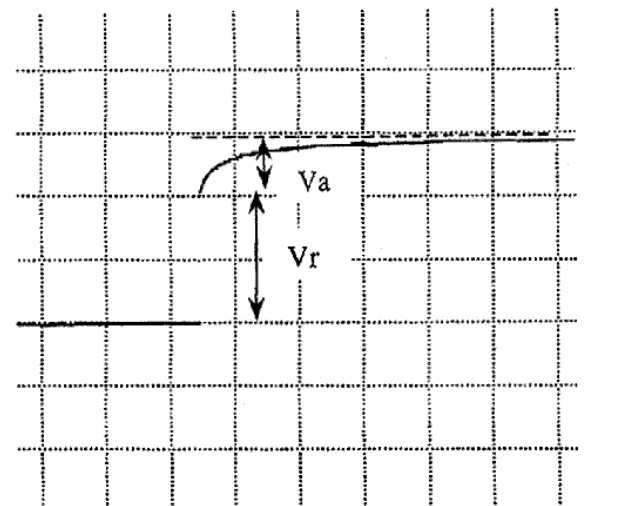
Σχήμα 13 :

Τεστ διακοπής ρεύματος για μία κυψέλη καυσίμου υδρογόνου χαμηλής θερμοκρασίας και πίεσης περιβάλλοντος. Οι ωμική πτώση τάσης και η πτώση λόγω υπέρτασης ενεργοποίησης είναι παρόμοιες. (Χρονική κλίμακα : 0,2 sec/div,  $i=100 \text{ mA/cm}^2$ )



Σχήμα 14 :

Τεστ διακοπής ρεύματος για μία κυψέλη καυσίμου ευθείας μεθανόλης (DMFC). Παρατηρείται μεγάλη υπέρταση ενεργοποίησης και στα δύο ηλεκτρόδια, με αποτέλεσμα η υπέρταση ενεργοποίησης να είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την ωμική, που μόλις που φαίνεται. (Χρονική κλίμακα : 2 sec/div,  $i=10 \text{ mA/cm}^2$ )



Σχήμα 15 :

Τεστ διακοπής ρεύματος για μία μικρή κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου με θερμοκρασία λειτουργίας περίπου 700°C. Η μεγάλη άμεση αύξηση στην τάση δείχνει ότι το μεγαλύτερο μέρος της πτώσης τάσης οφείλεται σε ωμικές απώλειες. (Χρονική κλίμακα : 0,02 sec/div,  $i=100 \text{ mA/cm}^2$ )



## 2.4. Τύποι κυψελών καυσίμου

Αφήνοντας στην άκρη πρακτικά προβλήματα όπως τα κόστη κατασκευής και υλικών, τα δύο θεμελιώδη τεχνικά προβλήματα με τις κυψέλες καυσίμου είναι :

- Ο αργός ρυθμός της αντίδρασης, που οδηγεί σε χαμηλά ρεύματα και ισχύεις και
- Ότι το υδρογόνο δεν είναι ένα εύκολα διαθέσιμο καύσιμο

Για να λυθούν αυτά τα προβλήματα, πολλοί διαφορετικοί τύποι κυψελών καυσίμου έχουν δοκιμαστεί. Οι διαφορετικοί τύποι συνήθως διακρίνονται από τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται, παρόλο που υπάρχουν πάντα και άλλες σημαντικές διαφορές. Η παρούσα κατάσταση υποδεικνύει πέντε κατηγορίες που αποδείχθηκαν βιώσιμες για το παρόν και το άμεσο μέλλον. Οι βασικές πληροφορίες γι' αυτές φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 2).

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2** : Τα δεδομένα των διαφορετικών τύπων κυψελών καυσίμου.

Τύπος κυψέλης καυσίμου	Κινητό ιόν	Θερμοκρασία λειτουργίας	Εφαρμογές και σημειώσεις
Αλκαλική – AFC	$\text{OH}^-$	50-200°C	Χρησιμοποιείται σε διαστημικά οχήματα, π.χ. Όχημα Apollo
Μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων – PEM	$\text{H}^+$	50-100°C	Ιδιαίτερα κατάλληλη για οχήματα και κινητές εφαρμογές, αλλά επίσης για χαμηλότερης ισχύος συστήματα συνδυασμένου κύκλου (CHP).
Φωσφορικού οξέος – PAFC	$\text{H}^+$	~220°C	Μεγάλο πλήθος συστημάτων συνδυασμένου κύκλου (CHP) των 200kW είναι σε χρήση.
Χυτού άνθρακα – MCFC	$\text{CO}_3^{2-}$	~650°C	Κατάλληλη για μέσης ως μεγάλης κλίμακας συστημάτων συνδυασμένου κύκλου (CHP), ισχύος μέχρι και MW.
Στερεού οξειδίου – SOFC	$\text{O}^{2-}$	500-1000°C	Κατάλληλη για συστήματα συνδυασμένου κύκλου (CHP) όλων των μεγεθών, από 2kW έως και πολλών MW.

### 2.4.1. Αλκαλική (Alkali Fuel Cell - AFC)

Οι βασικές αρχές της αλκαλική κυψέλης καυσίμου εξηγούνται στο κεφ. 2.3 και στο σχήμα 7. Τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα της κυψέλης καυσίμου αλκαλικού ηλεκτρολύτη είναι ότι η υπέρταση ενεργοποίησης στην κάθοδο είναι γενικά χαμηλότερη από ότι μίας κυψέλης καυσίμου όξινο ηλεκτρολύτη. Επίσης, τα ηλεκτρόδια μπορούν να κατασκευαστούν από μη-πολύτιμα μέταλλα και δεν χρειάζονται ιδιαίτερα εξωτικά υλικά.

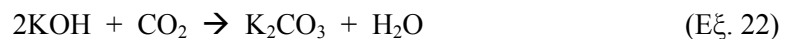
Ο ηλεκτρολύτης προφανώς πρέπει να είναι ένα αλκαλικό διάλυμα. Τα διαλύματα του υδροξειδίου του νατρίου και του υδροξειδίου του καλίου, που είναι τα φθηνότερα, πιο διαλυτά και όχι εξαιρετικά διαβρωτικά, είναι οι κύριοι υποψήφιοι. Φαίνεται πως το υδροξείδιο του καλίου είναι αρκετά πιο διαλυτό από το υδροξείδιο του νατρίου και αυτό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα. Αφού η διαφορά στο κόστος είναι μικρή, χρησιμοποιείται πάντα διάλυμα υδροξειδίου του καλίου ως ηλεκτρολύτης. Όμως αυτός είναι ο μόνος κοινός παράγοντας μεταξύ των διαφορετικών τύπων AFC. Άλλοι παράγοντες, όπως η πίεση, η θερμοκρασία και η δομή των ηλεκτροδίων ποικίλλουν σημαντικά. Για παράδειγμα, η κυψέλη καυσίμου του οχήματος Apollo λειτουργούσε στους 260°C, ενώ η θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου του Orbiter είναι περίπου 90°C. Οι διατάξεις για την διαχείριση του ηλεκτρολύτη, τα είδη ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται, οι καταλύτες και η επιλογή της πίεσης και της θερμοκρασίας είναι κάποιοι παράγοντες που διαφέρουν από τύπο σε τύπο.



Οι τύποι αλκαλικών κυψελών καυσίμου είναι οι εξής :

- Κινητού ηλεκτρολύτη

Στην κυψέλη καυσίμου κινητού ηλεκτρολύτη το διάλυμα ΚΟΗ αντλείται γύρω από την κυψέλη. Υδρογόνο παρέχεται στην άνοδο, αλλά πρέπει να κυκλοφορεί, καθώς στην άνοδο παράγεται νερό. Το υδρογόνο εξατμίζει το νερό, το οποίο στη συνέχεια συμπυκνώνεται στην μονάδα ψύξης μέσα από την οποία κυκλοφορεί το υδρογόνο. Το υδρογόνο έρχεται από έναν κύλινδρο συμπιεσμένου αερίου και η κυκλοφορία επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας έναν εκχυτήρα. Το σύστημα χρησιμοποιεί αέρα αντί για οξυγόνο και μαζί με τις επιθυμητές αντιδράσεις, το διοξείδιο του άνθρακα στον αέρα αντιδρά με τον ηλεκτρολύτη του υδροξειδίου του καλίου :



Το υδροξείδιο του καλίου συνεπώς σταδιακά μεταβάλλεται σε ανθρακικό κάλιο. Το αποτέλεσμα είναι πως η συγκέντρωση ιόντων  $\text{OH}^-$  μειώνεται καθώς αντικαθίστανται από ιόντα  $\text{CO}_3^{2-}$  το οποίο επηρεάζει σημαντικά την απόδοση της κυψέλης. Ένας τρόπος να ελαττωθεί το πρόβλημα είναι να αφαιρείται όσο το δυνατόν περισσότερο  $\text{CO}_2$  από τον αέρα και αυτό γίνεται στο σύστημα παροχής αέρα στην κάθοδο. Τα μειονεκτήματα του κινητού ηλεκτρολύτη επικεντρώνονται κυρίως στον περαιτέρω εξοπλισμό που απαιτείται, όπως και ότι μπορούν εύκολα να υπάρξουν διαρροές λόγω των εκτενών σωληνώσεων. Τα πλεονεκτήματά του βέβαια είναι ότι η κυκλοφορία του ηλεκτρολύτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως ψυκτικό σύστημα για την κυψέλη, καθώς και ότι το γεγονός ότι ο ηλεκτρολύτης κυκλοφορεί λύνει αρκετά προβλήματα. Επίσης είναι πολύ εύκολο να αντικατασταθεί ο ηλεκτρολύτης με άντληση. Αυτός ο τύπος κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιήθηκε από τον Βacon στις ιστορικές κυψέλες καυσίμου του τη δεκαετία του 1950, καθώς και μεταξύ άλλων στο διαστημικό όχημα Apollo.

- Στατικού ηλεκτρολύτη

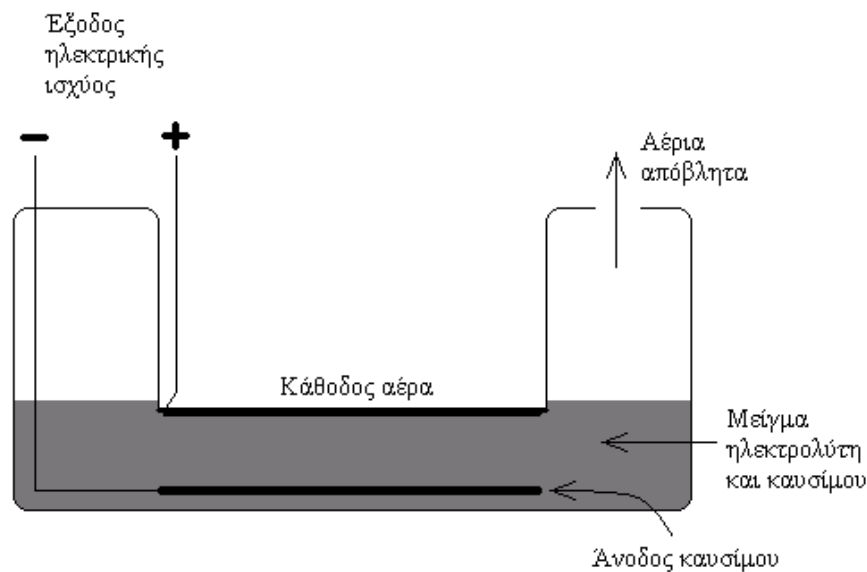
Μια εναλλακτική λύση από τον «ελεύθερο» ηλεκτρολύτη, που προαναφέρθηκε, είναι κάθε κυψέλη σε μία συστοιχία να έχει τον δικό της, ξεχωριστό ηλεκτρολύτη, ο οποίος να συγκρατείται σε ένα υλικό-μήτρα μεταξύ των ηλεκτροδίων. Σε ένα τέτοιο σύστημα, το διάλυμα ΚΟΗ συγκρατείται σε ένα υλικό-καλούπι, που συνήθως είναι ο αμίαντος. Αυτό το υλικό έχει εξαιρετικό πορώδες, σταθερότητα και αντίσταση στην διάβρωση, όμως φυσικά τα προβλήματα ασφάλειας θα ήταν μια δυσκολία για ένα σύστημα σχεδιασμένο για το ευρύ κοινό. Το σύστημα χρησιμοποιεί καθαρό οξυγόνο στην κάθοδο, παρόλο που αυτό δεν είναι αναγκαστικό. Το υδρογόνο κυκλοφορεί, όπως στο προηγούμενο σύστημα, για να αφαιρεθεί το παραγόμενο νερό. Στα διαστημικά σκάφη αυτό το νερό χρησιμοποιούνταν για πόση, μαγείρεμα και ρύθμιση της υγρασίας στην καμπίνα. Παρ' όλα αυτά, χρειάζεται και ένα σύστημα ψύξης και συνεπώς ψυκτικό υγρό.

Αυτό το σύστημα του ηλεκτρολύτη που συγκρατείται σε μήτρα είναι ουσιαστικά σαν την κυψέλη καυσίμου PEM, ο ηλεκτρολύτης είναι σε κάθε περίπτωση στερεός και μπορεί να τοποθετηθεί με οποιοδήποτε προσανατολισμό. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι ο ηλεκτρολύτης δεν χρειάζεται να αντληθεί, ή να «διαχειριστεί» με κάποιον τρόπο, όπως επίσης δεν υπάρχει το πρόβλημα του εσωτερικού βραχυκυκλώματος, που μπορεί να προκύψει στον αντλούμενο ηλεκτρολύτη. Όμως υπάρχει το πρόβλημα της διαχείρισης του παραγόμενου νερού, της εξάτμισης του νερού, καθώς και το γεγονός ότι το νερό χρησιμοποιείται στην κάθοδο. Ουσιαστικά, αυτό το πρόβλημα με το νερό είναι παρόμοιο με της κυψέλης PEM, μόνο ανεστραμμένο, γιατί σε αυτήν το νερό παράγεται στην άνοδο και απομακρύνεται από την κάθοδο. Για διαστημικές εφαρμογές, το πλεονέκτημα της μηχανικής απλότητας σημαίνει πως αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται. Για γήινες εφαρμογές όμως, που το πρόβλημα της μόλυνσης του ηλεκτρολύτη με διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να εμφανιστεί, πρέπει να μπορεί να ανανεωθεί ο ηλεκτρολύτης, και αυτό σημαίνει την ανακατασκευή της κυψέλης. Τέλος, υπάρχει το πρόβλημα του αμίαντου, που είναι επικίνδυνος για την υγεία και σε μερικές χώρες έχει απαγορευτεί η χρήση του.



- Αλκαλική κυψέλη διαλυτού καυσίμου

Αυτός ο τύπος κυψέλης καυσίμου είναι και ο τύπος κυψέλης που μελετάται σε αυτή την εργασία. Είναι απίθανο να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή σημαντικής ισχύος, αλλά είναι ο πιο απλός τύπος κυψέλης καυσίμου όσον αφορά την κατασκευή και δείχνει πως ο αλκαλικός ηλεκτρολύτης μπορεί να είναι η βάση για πολύ απλές κυψέλες καυσίμου. Έχει χρησιμοποιηθεί σε έναν αρκετά μεγάλο αριθμό επιτυχών επιδείξεων κυψελών καυσίμων. Η βασική αρχή φαίνεται στο σχήμα 16. Ο ηλεκτρολύτης είναι ένα διάλυμα KOH, με ένα καύσιμο, όπως η υδραζίνη, ή η αμμωνία, αναμεμιγμένο με αυτό. Η άνοδος καυσίμου έχει ως καταλύτη λευκόχρυσο. Το καύσιμο είναι σε πλήρη επαφή με την κάθοδο και αυτό κάνει το πρόβλημα της «διασταύρωσης καυσίμου» που συζητήθηκε παραπάνω, πολύ σοβαρό. Πάντως, σε αυτή την περίπτωση δεν έχει μεγάλη επίδραση, καθώς ο καταλύτης της καθόδου δεν είναι λευκόχρυσος, άρα ο ρυθμός της αντίδρασης του καυσίμου στην κάθοδο είναι πολύ αργός. Η κυψέλη ανεφοδιάζεται απλά προσθέτοντας περισσότερο καύσιμο στον ηλεκτρολύτη.



Σχήμα 16 : Κυψέλη καυσίμου διαλυτού καυσίμου, αναμφισβήτητα ο πιο απλός τύπος. Αυτός ο τύπος κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιήθηκε και σε αυτή την εργασία.

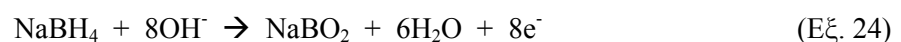
Ένα ιδανικό καύσιμο γι' αυτή την κυψέλη καυσίμου είναι η υδραζίνη,  $H_2NNH_2$ , καθώς σε ένα ηλεκτρόδιο κυψέλης καυσίμου διασπάται σε υδρογόνο και άζωτο. Το υδρογόνο τότε αντιδρά κανονικά. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να κατασκευαστούν κυψέλες καυσίμου χαμηλού κόστους, συνεπτυγμένες, απλές και εύκολα ανεφοδιάσιμες. Δυστυχώς, όμως, η υδραζίνη είναι τοξική, καρκινογόνος και εκρηκτική! Χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε συγκεκριμένες, πολύ καλά ρυθμισμένες περιπτώσεις, αλλά δεν είναι κατάλληλη για ευρεία χρήση και συνεπώς οι κυψέλες που την χρησιμοποιούν έχουν ως μόνο σκοπό την επίδειξη.

Ο τύπος αυτός κυψέλης καυσίμου, διαλυτού καυσίμου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και με άλλα καύσιμα, όπως τα βοροϋδρίδια, ή και με άλλα υγρά καύσιμα, όπως η μεθανόλη και η αιθανόλη.

Η αντίδραση που λαμβάνει χώρα στην κάθοδο είναι ίδια για όλα τα καύσιμα, και είναι η εξής :

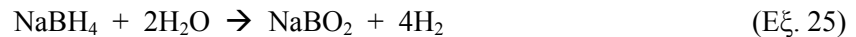


Για την άνοδο, οι αντιδράσεις διαφέρουν ανάλογα με το καύσιμο. Για το τετραβοροϋδρίδιο του νατρίου ισχύει :

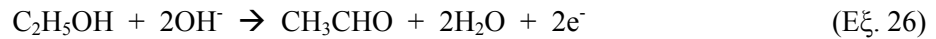




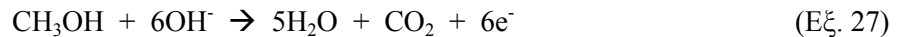
Αν και ο καταλύτης λευκόχρυσου προάγει και μία άλλη αντίδραση, που παράγει υδρογόνο :



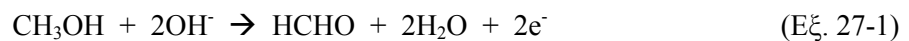
Επίσης, για την αιθανόλη, όπως και για οποιοδήποτε διάλυμα ή ποτό που περιέχει αιθανόλη (οινόπνευμα) ισχύει :



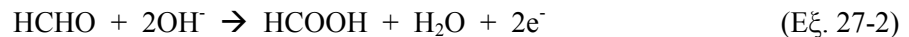
Και για την μεθανόλη, θα ισχύει :



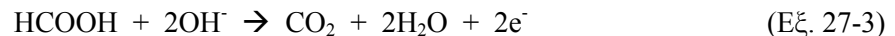
Αλλά η παραπάνω αντίδραση γίνεται σε τρία στάδια και σε κάθε στάδιο απελευθερώνονται και δύο ηλεκτρόνια. Στο πρώτο σχηματίζεται μεθανάλη (φορμαλδεϋδη) :



Στο δεύτερο στάδιο γίνεται η αντίδραση που μετατρέπει τη μεθανάλη σε μεθανοϊκό (μυρμηκικό) οξύ :



Και τέλος, το μεθανοϊκό οξύ οξειδώνεται σε διοξείδιο του άνθρακα.



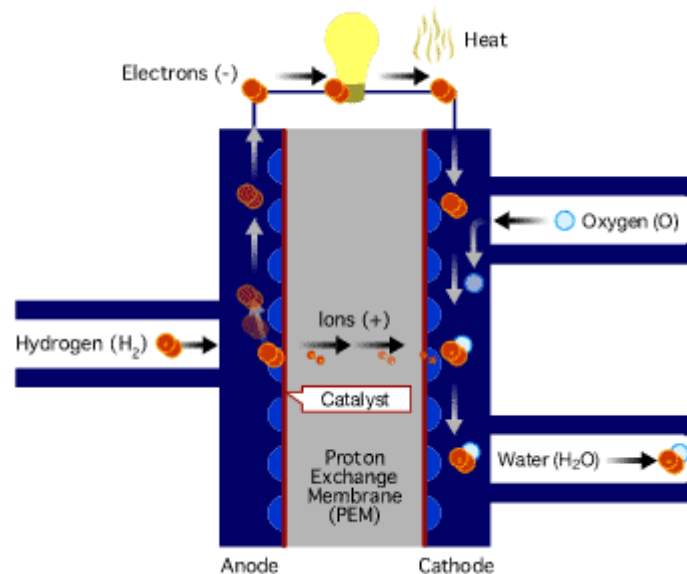
Έτσι, εκτός από ηλεκτρόνια, παράγεται και διοξείδιο του άνθρακα, που αντιδρά με το διάλυμα ΚΟΗ, όπως φαίνεται και στην εξίσωση (22), μετατρέποντάς το σε ανθρακικό άλας. Αυτό το φαινόμενο κάνει την κυψέλη αυτή ακατάλληλη για χρήση ως πηγή ισχύος. Μάλιστα, εφόσον ο ηλεκτρολύτης «αναλώνεται» από την αντίδραση της κυψέλης, μπορεί να υποστηριχθεί πως το σύστημα αυτό δεν είναι μία πραγματική κυψέλη καυσίμου.

Η αρχή του διαλυτού καυσίμου μπορεί, στη θεωρία, να χρησιμοποιηθεί και με κυψέλες καυσίμου όξινου ηλεκτρολύτη, όμως πρακτικοί δισταγμοί σημαίνουν πως μόνο τα αλκαλικά ηλεκτρόδια είναι βιώσιμα. Είναι πολύ δύσκολο, για παράδειγμα, να υπάρξει ένας ενεργός καταλύτης σε μία κυψέλη καυσίμου όξινου ηλεκτρολύτη χαμηλής θερμοκρασίας που δεν χρησιμοποιεί πολύτιμα μέταλλα και που συνεπώς δεν θα οξειδώσει το καύσιμο.





## 2.4.2. Μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMFC)



Σχήμα 17 : Ο τρόπος λειτουργίας μίας κυψέλης καυσίμου τύπου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFC).

Η κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), που λέγεται επίσης και κυψέλη καυσίμου στερεού πολυμερούς (Solid Polymer Fuel Cell – SPFC), αναπτύχθηκε πρώτα από την General Electric στις Η.Π.Α. τη δεκαετία του 1960 για χρήση από τη NASA στα πρώτα επανδρωμένα διαστημικά οχήματα.

Ο ηλεκτρολύτης είναι ένα πολυμερές που άγει ιόντα, σε κάθε πλευρά του οποίου είναι συνδεδεμένο ένα καταλυτικό πορώδες ηλεκτρόδιο. Η δομή άνοδος – ηλεκτρολύτης – κάθοδος είναι συνεπώς ένα αντικείμενο και είναι πολύ λεπτό. Αυτές οι «δομές μεμβράνης ηλεκτροδίου» (membrane electrode assemblies – MEAs) συνδέονται σε σειρά, συνήθως χρησιμοποιώντας την τεχνική των διπολικών πλακών.

Το κινητό ιόν που χρησιμοποιείται στα πολυμερή είναι ένα ιόν  $H^+$  ή πρωτόνιο, άρα η βασική λειτουργία της κυψέλης είναι ουσιαστικά η ίδια με της κυψέλης καυσίμου όξινου ηλεκτρολύτη, όπως φαίνεται στο σχήμα 6. Οι ηλεκτρολύτες πολυμερών λειτουργούν σε χαμηλή θερμοκρασία, το οποίο προσφέρει το επιπλέον πλεονέκτημα ότι μία κυψέλη καυσίμου PEM μπορεί να ξεκινήσει γρήγορα. Η λεπτότητα των MEA σημαίνει ότι μπορούν να φτιαχτούν συνεπτυγμένες κυψέλες καυσίμου. Περαιτέρω πλεονεκτήματα είναι ότι δεν υπάρχουν κίνδυνοι από διαβρωτικά υγρά και ότι η κυψέλη μπορεί να λειτουργήσει με οποιονδήποτε προσανατολισμό, το οποίο σημαίνει πως η κυψέλη καυσίμου PEM είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για χρήση σε οχήματα και φορητές εφαρμογές.

Μεμονωμένες κυψέλες καυσίμου μπορούν να συνδυαστούν σε μία συστοιχία. Ο αριθμός των κυψελών καυσίμου σε μία συστοιχία καθορίζει την συνολική τάση και η επιφάνεια της κάθε κυψέλης καθορίζει το συνολικό ρεύμα. Η συστοιχία PEMFC είναι η καρδιά του συστήματος. Είναι φτιαγμένη από μία MEA στριμωγμένη μεταξύ δύο στρωμάτων διάχυσης αερίου (Gas Diffusion Layers – GDLs) με διπολικές πλάκες σε κάθε πλευρά. Το αναμόρφωμα, που φτάνει από το σύστημα καθαρισμού από μονοξείδιο του άνθρακα (CO) τροφοδοτεί την πλευρά της κυψέλης που αφορά το καύσιμο. Το υδρογόνο στο καύσιμο περνάει από το GDL, το οποίο τυπικά έχει τρεις λειτουργίες σε μία κυψέλη PEM :

- Διαχέει τα αντιδρώντα αέρια κατά μήκος της επιφάνειας της μεμβράνης
- Διαχειρίζεται το νερό γύρω από την μεμβράνη
- Προσφέρει μία υψηλά αγωγίμη διαδρομή μεταξύ της μεμβράνης και των διπολικών πλακών



Η ΜΕΑ ιονίζει το υδρογόνο, μεταφέρει τα ιόντα υδρογόνου και συνενώνει τα ιόντα με οξυγόνο, για να παραχθεί νερό. Οι καταλύτες της μεμβράνης φτιάχνονται τυπικά από πολύτιμα μέταλλα όπως ο λευκόχρυσος. Η πρόοδος που έχει γίνει στην εφαρμογή του λευκόχρυσου στις ΜΕΑ είναι ένας κύριος λόγος για την μείωση του κόστους μιας κυψέλης καυσίμου PEM.

Το μέρος του συστήματος της κυψέλης καυσίμου που αφορά στην επεξεργασία του καυσίμου έχει δύο λειτουργικές μονάδες : α) τον αναμορφωτή καυσίμου, που επεξεργάζεται ένα καύσιμο υδρογονάνθρακα, όπως το φυσικό αέριο, σε ένα αέριο πλούσιο σε υδρογόνο, γνωστό ως αναμόρφωμα. β) Το αναμόρφωμα περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα, οπότε ένα σύστημα καθαρισμού από CO εφαρμόζεται, για να μειώσει τις συγκεντρώσεις σε αποδεκτά επίπεδα (κάτω από 50 ppm).

Οι αρχικές εκδόσεις της PEMFC, όπως χρησιμοποιήθηκαν από τη NASA στο διαστημικό σκάφος Gemini, είχαν διάρκεια ζωής μόνο περίπου 500 ώρες, αλλά αυτό ήταν αρκετό γι' αυτές τις περιορισμένες αρχικές αποστολές. Το πρόγραμμα ανάπτυξης προχώρησε με την ενσωμάτωση μιας νέας μεμβράνης πολυμερών, το 1967, που λέγεται Nafion. Αυτός ο τύπος μεμβράνης έγινε πρότυπο για την κυψέλη καυσίμου PEM και έτσι είναι και σήμερα.

Όμως το πρόβλημα της διαχείρισης του νερού στον ηλεκτρολύτη, κρίθηκε πολύ δύσκολο να διαχειριστεί αξιόπιστα και η NASA επέλεξε την «αντίπαλη» αλκαλική κυψέλη καυσίμου για τα οχήματα Apollo. Η General Electric επίσης επέλεξε να μην επιδιώξει εμπορική εκμετάλλευση της PEMFC, μάλλον επειδή τα κόστη φαίνονταν υψηλότερα από άλλες κυψέλες καυσίμου όπως του φωσφορικού οξέος, που αναπτύσσονταν τότε. Εκείνη την εποχή, η τεχνολογία καταλυτών ήταν τέτοια, που χρειαζόταν 28mg λευκόχρυσου για κάθε  $\text{cm}^2$  ηλεκτροδίου, σε αντίθεση με τα  $0,2\text{mg}/\text{cm}^2$  ή λιγότερο, που χρειάζονται σήμερα.

Η ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια έφερε τις πυκνότητες ρεύματος σε επίπεδα περίπου  $1 \text{ A}/\text{cm}^2$  και περισσότερο, ενώ την ίδια στιγμή μειώνοντας τη χρήση του λευκόχρυσου περισσότερο από 100 φορές. Αυτές οι πρόοδοι οδήγησαν σε μία τεράστια μείωση του κόστους ανά kW ισχύος, και σε μεγάλη βελτίωση της πυκνότητας ισχύος. Ένα παράδειγμα σύγκρισης είναι μία συστοιχία κυψελών του 1989, με πυκνότητα ισχύος 100 W/L και μία του 1996 με 1,1 kW/L.

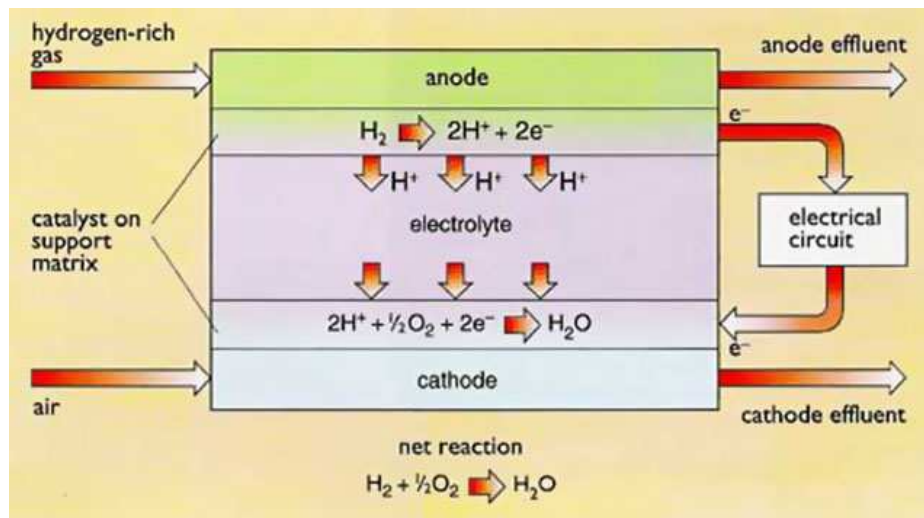
Οι PEMFC αναπτύσσονται ενεργά για ένα πλήθος εφαρμογών, από μερικά Watt για τροφοδότηση π.χ. κινητών τηλεφώνων, μερικά kW για οικιακές και άλλες χρήσεις, μερικές δεκάδες kW για αυτοκίνητα, έως και μερικές εκατοντάδες kW για λεωφορεία και βιομηχανικά συστήματα συνδυασμένου κύκλου (Combined Heat and Power – CHP). Σε όλες αυτές τις εφαρμογές, ο ηλεκτρολύτης, καθώς και η δομή των ηλεκτροδίων και ο καταλύτης που χρησιμοποιείται είναι τα ίδια, αλλά κάποιες άλλες παράμετροι κυμαίνονται ανάλογα με την εφαρμογή. Κάποιες από αυτές είναι :

- Η διαχείριση του νερού – ένα θέμα ζωτικής σημασίας για τις PEMFC
- Η μέθοδος ψύξης της κυψέλης καυσίμου
- Η μέθοδος σύνδεσης των κυψελών σε σειρά. Τα σχέδια διπολικών πλακών διαφοροποιούνται αρκετά και μερικές κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν εντελώς διαφορετικές μεθόδους.
- Το ερώτημα σε ποια πίεση να λειτουργήσει η κυψέλη καυσίμου
- Τα αντιδρώντα που χρησιμοποιούνται είναι επίσης ένα σημαντικό θέμα, καθώς το καθαρό υδρογόνο δεν είναι το μόνο καύσιμο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και οξυγόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί για ατμοσφαιρικό αέρα.





2.4.3. Κυψέλες καυσίμου μέσης και υψηλής θερμοκρασίας.  
α) Φωσφορικού οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cell - PAFC),  
β) Χυτού άνθρακα (Molten Carbonate Fuel Cell - MCFC) και  
γ) Στερεού οξειδίου (Solid Oxide Fuel Cell - SOFC)



Σχήμα 18 : Λειτουργία της κυψέλης καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)

Όπως είδαμε παραπάνω, η τάση ανοιχτού κυκλώματος χωρίς απώλειες σε μία κυψέλη καυσίμου υδρογόνου μειώνεται στις υψηλότερες θερμοκρασίες. Πράγματι, πάνω από τους περίπου  $800^\circ C$  η θεωρητική μέγιστη απόδοση μίας κυψέλης καυσίμου είναι στην πραγματικότητα μικρότερη από αυτή μίας θερμικής μηχανής. Δεν θα ήταν άρα συνετό να λειτουργήσουν κυψέλες καυσίμου σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Όμως αυτά τα εμφανή προβλήματα μερικές φορές αντισταθμίζονται από τα πλεονεκτήματα των υψηλότερων θερμοκρασιών. Τα κύρια πλεονεκτήματα είναι ότι:

- Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις προχωρούν πιο γρήγορα, το οποίο μεταφράζεται σε χαμηλότερες απώλειες ενεργοποίησης. Επίσης, καταλύτες ευγενών μετάλλων συχνά δεν είναι απαραίτητοι.
- Η υψηλή θερμοκρασία της κυψέλης και των εξαγόμενων αερίων σημαίνει πως υπάρχει αρκετή θερμότητα διαθέσιμη από την κυψέλη σε θερμοκρασίες αρκετά υψηλές για να χρησιμοποιηθεί στην εξαγωγή του υδρογόνου από άλλα, πιο άμεσα διαθέσιμα καύσιμα, όπως το φυσικό αέριο.
- Η υψηλή θερμοκρασία των εξαγόμενων αερίων και των ψυκτικών υγρών είναι μία πολύτιμη πηγή θερμότητας για κτίρια, διαδικασίες επεξεργασίας και εγκαταστάσεις κοντά στην κυψέλη καυσίμου. Με άλλα λόγια, τέτοιες κυψέλες καυσίμου δημιουργούν εξαιρετικά συστήματα συνδυασμένου κύκλου θερμότητας και ισχύος (CHP).
- Η υψηλή θερμοκρασία των εξαγόμενων αερίων και των ψυκτικών υγρών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κινήσει τουρμπίνες, που μπορούν να κινήσουν γεννήτριες, παράγοντας παραπάνω ηλεκτρισμό. Αυτό είναι γνωστό ως «κύκλος υποστρώματος». Αυτός ο συνδυασμός μίας κυψέλης καυσίμου και μίας θερμικής μηχανής επιτρέπει να χρησιμοποιηθούν τα συμπληρωματικά χαρακτηριστικά του καθενός με μεγάλο όφελος, προσφέροντας πολύ αποδοτική παραγωγή ηλεκτρισμού.

Υπάρχουν τρεις τύποι κυψελών καυσίμου μέσης και υψηλής θερμοκρασίας που θα αναφερθούν σε αυτό το κεφάλαιο. Η κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) είναι η πιο ανεπτυγμένη από τις τρεις. Πολλά συστήματα συνδυασμένου κύκλου PAFC ισχύος 200kW είναι εγκατεστημένα σε νοσοκομεία, στρατιωτικές βάσεις, κέντρα αναψυχής, γραφεία, εργοστάσια, ακόμα



και φυλακές, σε ολόκληρο τον κόσμο. Η απόδοση και η συμπεριφορά τους είναι εύκολα κατανοητή. Παρ' όλα αυτά, επειδή λειτουργούν σε θερμοκρασίες μόνο περίπου 200°C, χρειάζονται έναν καταλύτη ευγενούς μετάλλου και συνεπώς, όπως η κυψέλη καυσίμου PEM, καταστρέφεται από τυχόν μονοξείδιο του άνθρακα στο αέριο του καυσίμου. Αυτό σημαίνει ότι τα συστήματα επεξεργασίας καυσίμου είναι αναγκαστικά πολύπλοκα. Η κυψέλη καυσίμου PAFC έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με την κυψέλη PEM και είναι πιο εμπορικά προηγμένη από τις κυψέλες καυσίμου MCFC και SOFC.

Η κυψέλη καυσίμου ηλεκτρολύτη χυτού άνθρακα (MCFC) έχει μία ιστορία από τη δεκαετία του 1920. Λειτουργεί σε θερμοκρασίες περίπου 650°C. Τα κύρια προβλήματα με αυτόν τον τύπο κυψέλης καυσίμου συνδέονται με την υποβάθμιση των μερών της κυψέλης κατά μακρές περιόδους. Η MCFC όμως, προσφέρει μεγάλες προοπτικές για χρήση σε συστήματα συνδυασμένου κύκλου.

Η κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) είναι επίσης το αντικείμενο ερευνών για πολλά χρόνια. Η ανάπτυξή της μπορεί να αποδοθεί στο 1899 και στον Nernst. Εφόσον η (SOFC) είναι μία συσκευή στερεάς κατάστασης, έχει αρκετά πλεονεκτήματα από την άποψη της μηχανικής απλότητας. Η SOFC είναι επίσης πολύ ελαστική στον τρόπο κατασκευής της και στο πιθανό μέγεθός της. Έχει λοιπόν προοπτική για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Οι SOFC μπορούν να κατασκευαστούν από μία γκάμα υλικών, με διαφορετικές θερμοκρασίες λειτουργίας, από περίπου 650°C έως και 1000°C.

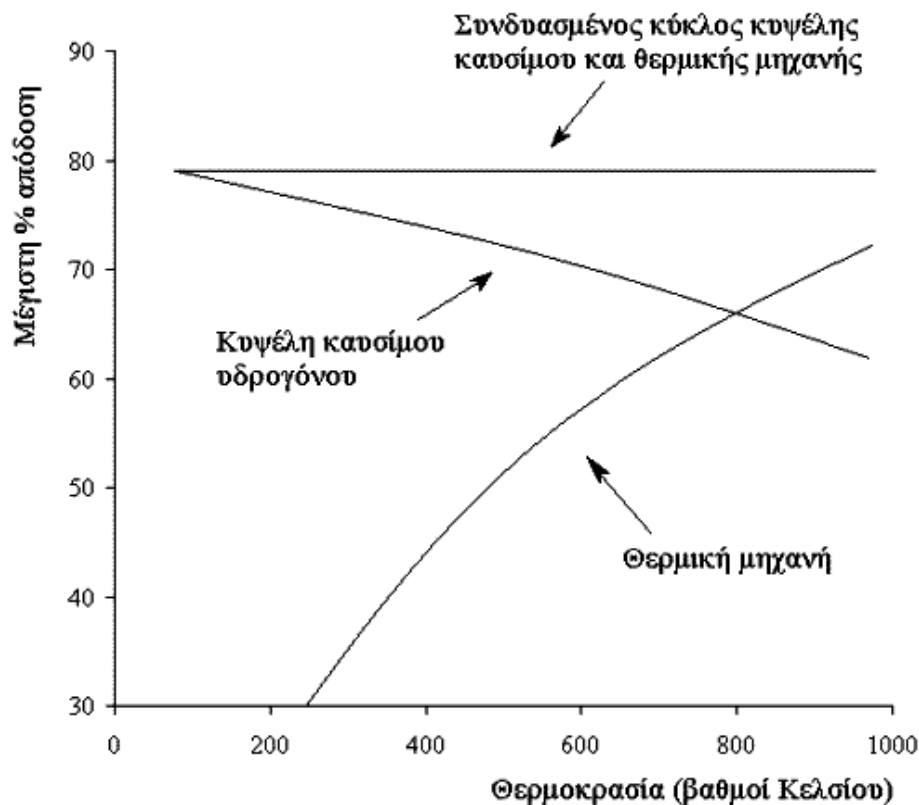
Πρέπει όμως να μελετήσουμε τα χαρακτηριστικά που είναι κοινά και για τους τρεις διαφορετικούς τύπους κυψελών καυσίμου μέσης και υψηλής θερμοκρασίας. Τρία από τα τέσσερα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω συνδέονται με το τι μπορεί να γίνει με την ανεκμετάλλευτη θερμότητα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναμόρφωση καυσίμων, να προσφέρει θερμότητα και να κινήσει μηχανές. Αυτό σημαίνει πως οι PAFC, MCFC και SOFC δεν πρέπει να εξετάζονται απλά ως κυψέλες καυσίμου, αλλά πρέπει πάντα να θεωρούνται ως ένα ακέραιο κομμάτι ενός ολοκληρωμένου συστήματος επεξεργασίας καυσίμου και παραγωγής θερμότητας. Τα ευρύτερα θέματα του συστήματος είναι ίδια σε μεγάλο βαθμό και για του τρεις τύπους κυψελών καυσίμου. Τα κοινά χαρακτηριστικά τους επισημαίνονται παρακάτω :

- Αυτές οι κυψέλες καυσίμου μέσης και υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιούν σχεδόν πάντα ένα καύσιμο που χρειάζεται επεξεργασία και αυτό γίνεται με αναμόρφωση του καυσίμου
- Το ερώτημα της εκμετάλλευσης του καυσίμου είναι ένα πρόβλημα για όλες αυτές τις κυψέλες καυσίμου. Το καύσιμο θα είναι σχεδόν πάντα ένα μείγμα υδρογόνου, οξειδίων του άνθρακα και άλλων αερίων. Όπως το καύσιμο περνάει μέσα από τη συστοιχία, το υδρογόνο καταναλώνεται και συνεπώς η συγκέντρωσή του στο μείγμα μειώνεται. Αυτό μειώνει και την τάση της τοπικής κυψέλης. Αν όλο το υδρογόνο καταναλώνονταν, τότε θεωρητικά η τάση στην έξοδο της συστοιχίας θα ήταν μηδέν. Το πρόβλημα για το πόσο από το καύσιμο υδρογόνου να χρησιμοποιηθεί σε μία κυψέλη καυσίμου είναι αρκετά περίπλοκο.
- Τα αέρια σε υψηλές θερμοκρασίες που φεύγουν από αυτές τις κυψέλες μεταφέρουν μεγάλα ποσά θερμικής ενέργειας. Σε αρκετές περιπτώσεις είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθούν τουρμπίνες που να μετατρέπουν αυτή της ενέργεια σε περαιτέρω ηλεκτρική ενέργεια. Αυτό μπορεί να γίνει και με τις τρεις κυψέλες καυσίμου που μελετώνται εδώ. Αυτός ο συνδυασμός κυψέλης καυσίμου και θερμικής μηχανής μπορεί να οδηγήσει σε ανυπέβλητα επίπεδα απόδοσης, με την κάθε μηχανή να αντισταθμίζει τα πρακτικά προβλήματα της άλλης.
- Η θερμότητα από τα καυσαέρια της συστοιχίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προθέρμανση του καυσίμου και του οξειδωτικού χρησιμοποιώντας κατάλληλους εναλλάκτες θερμότητας. Η καλύτερη χρήση της θερμότητας μεταξύ των συστημάτων κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας είναι ένα σημαντικό πλευρά του σχεδιασμού του συστήματος και οι χημικοί μηχανικοί συχνά αναφέρονται σε αυτό ως «ολοκλήρωση διαδικασίας». Για να εξασφαλιστούν υψηλές ηλεκτρικές και θερμικές αποδόσεις, η ελαχιστοποίηση της εξέργειας που χάνεται είναι ένα στοιχείο κλειδί και η «τεχνολογία οικονομίας» είναι μία μέθοδος που οι σχεδιαστές συστημάτων έχουν υπ' όψη τους για να βοηθήσει σε αυτό.

Εν πρώτοις, θεωρούμε αυτά τα χαρακτηριστικά κοινά σε όλες τις κυψέλες καυσίμου υψηλής και μέσης θερμοκρασίας. Ας σημειωθεί πως εφόσον αυτές οι κυψέλες καυσίμου χρειάζονται



επεξεργασμένο καύσιμο και αφού μπορεί να γίνει χρήση της εξαγόμενης θερμότητας, έχουν εφαρμοστεί κυρίως σε στάσιμα συστήματα παραγωγής ισχύος. Όμως, παρόλο που η SOFC μπορεί να βρει εφαρμογή και σε μερικές κινητές εφαρμογές, η πολυπλοκότητα της επεξεργασίας του καυσίμου συνήθως αποτρέπει την εφαρμογή των κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας για κινητή χρήση.



Σχήμα 19 : Όρια απόδοσης για μία θερμική μηχανή, μία κυψέλη καυσίμου υδρογόνου και ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου / τουρμπίνας συνδυασμένου κύκλου.

#### 2.4.4. Άλλοι τύποι κυψελών καυσίμου

##### Κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης (Direct Methanol Fuel Cell)

Υπάρχουν δύο τύποι DMFC, μία αλκαλική παραλλαγή και μία όξινη παραλλαγή, καμία από τις οποίες δεν χρειάζεται αναμορφωτή καυσίμου. Και οι δύο λειτουργούν σε ένα εύρος θερμοκρασίας μεταξύ της θερμοκρασίας δωματίου και περίπου 70°C. Η θερμοκρασία για τις κυψέλες που τροφοδοτούνται με ατμό μεθανόλης μπορούν να φτάσουν υψηλότερα. Οι εφαρμογές τους κυμαίνονται από μικρές μονάδες, για υπολογιστές, έως μονάδες 150 W για να χρησιμοποιηθούν στην επαναφόρτιση μπαταριών (στρατιωτική χρήση). Μεγέθη της τάξης των kW οραματίζονται, ακόμα και για κινητές χρήσεις. Στην όξινη DMFC, το διοξείδιο του άνθρακα εξατμίζεται, με αποτέλεσμα εκπομπές CO<sub>2</sub>. Στην αλκαλική παραλλαγή, το CO<sub>2</sub> λαμβάνεται από τους καυστικούς ηλεκτρολύτες (KOH ή NaOH) σχηματίζοντας σχεδόν ουδέτερα ανθρακικά άλατα. Ο αλκαλικός ηλεκτρολύτης, είναι σε αυτή την περίπτωση ένα μέρος της παροχής καυσίμου στην δεξαμενή.

Στην όξινη DMFC η δεξαμενή πρέπει να περιέχει ένα αντίστοιχο μείγμα μεθανόλης-νερού. Το πλεονέκτημα του όξινου συστήματος είναι ότι ο ηλεκτρολύτης μένει ουσιαστικά σταθερός εάν γίνεται η κατάλληλη διαχείριση των αποβαλλόμενων υδρατμών.

Το πλεονέκτημα της αλκαλικής DMFC είναι η κατά πολύ καλύτερη απόδοση του ηλεκτροδίου του αέρα, που δεν χρειάζεται καν καταλύτη από ευγενές μέταλλο (ή τουλάχιστον μία πολύ μικρότερη ποσότητα). Μην έχοντας καταλύτη ευγενούς μετάλλου στην πλευρά του αέρα επίσης



απομακρύνει το πρόβλημα της απώλειας λόγω διασταύρωσης. Η καθοδική υγραντική δράση από τη μεθανόλη ακόμα υπάρχει, αλλά είναι που ένας διαχωριστής με μικροπόρους (όχι PEM), χαμηλού κόστους, σε συνδυασμό με κυκλοφορία του ηλεκτρολύτη, ταιριάζει σαν λύση του προβλήματος. Σε κάποιον βαθμό η αλκαλική DMFC συσχετίζεται με μία κυψέλη Ψευδαργύρου-Αέρα (όπου τα ηλεκτρόδια αντικαθίστανται όταν εκφορτίζονται), αλλά είναι πολύ πιο εύκολο να αδειάσει και να ξαναγεμιστεί με μία αντλία.

#### *Υβριδικό σύστημα SOFC-PEM.*

Μία κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) υψηλής θερμοκρασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγει ηλεκτρισμό και να κάνει αναμόρφωση καυσίμου ταυτόχρονα. Η ροή εξαγωγής από μία SOFC μπορεί να κατεργαστεί από εναλλάκτες αντιδραστήρες και να εφοδιαστεί σε μία κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) χαμηλής θερμοκρασίας. Η συνολική απόδοση του υβριδικού συστήματος που υπολογίζεται, φαίνεται να είναι σημαντικά καλύτερη από ένα σύστημα Αναμορφωτή-PEM ή ένα σύστημα μόνο με SOFC. Τα κόστη κεφαλαίου και λειτουργίας δείχνουν κατά προσέγγιση αρκετά σημαντικά οφέλη συγκρινόμενα με τα δύο συστήματα.

## 2.5. Παραδείγματα εφαρμογών

Οι εφαρμογές των κυψελών καυσίμου μπορούν να είναι ποικίλες. Από πολύ μικρές εφαρμογές, για τροφοδότηση συσκευών μικρής ισχύος και φορητές, όπως π.χ. ραδιόφωνο τσέπης, κινητά τηλέφωνα, κομπιουτεράκι τσέπης, τηλεκοντρόλ, φωτογραφικές μηχανές, κ.α., μέχρι και αρκετά μεγάλες, της τάξεως των MW. Συστήματα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν επίσης για την τροφοδότηση οικιακών (και μη) συσκευών, όπως ένα φορητό ηχοσύστημα, ένας φορητός υπολογιστής, τηλεόραση, λαμπτήρες, κλπ. ή γενικότερα για την τροφοδότηση ενός σπιτιού.

Τα πλεονεκτήματά τους βέβαια τις κάνουν να είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για συστήματα συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ισχύος (CHP) και μεγάλης και μικρής κλίμακας, και σε κινητά συστήματα ισχύος, ειδικά σε οχήματα και ηλεκτρονικές συσκευές όπως οι φορητοί υπολογιστές, τα κινητά τηλέφωνα και ο στρατιωτικός εξοπλισμός επικοινωνίας. Αυτοί είναι οι τομείς που χρησιμοποιούνται κυρίως οι κυψέλες καυσίμου. Οι κυψέλες καυσίμου πάντως είναι μοναδικές ως μετατροπείς ενέργειας και το εύρος εφαρμογών τους υπερβαίνει όλα τα άλλα.

Φυσικά, εκτός από παραγωγή ενέργειας, οι κυψέλες καυσίμου είναι επίσης η βάση για μερικά είδη αισθητήρων. Ένας από τους πιο επιτυχής είναι ο αισθητήρας οιοπνεύματος βασισμένος σε κυψέλη καυσίμου (που χρησιμοποιείται στα αλκοτέστ από την αστυνομία). Αυτό μετράει τη συγκέντρωση του οιοπνεύματος στον αέρα που κάποιος εκπνέει από τα πνευμόνια του. Έχει αποδειχθεί ότι είναι άμεσα ανάλογο με την συγκέντρωση του οιοπνεύματος στο αίμα. Η βασική χημεία του είναι ότι το οινόπνευμα (αιθανόλη) αντιδρά σε μία απλή κυψέλη καυσίμου για να δώσει μία (πολύ μικρή) τάση. Θεωρητικά η αιθανόλη θα μπορούσε να οξειδωθεί πλήρως σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό, αλλά πιθανότατα δεν αντιδρά πλήρως και οξειδώνεται μερικώς σε αιθανάλη. Οι αντιδράσεις της καθόδου και της ανόδου είναι μάλλον οι ίδιες με τις εξ. (23) και (26) αντίστοιχα. Η τάση επηρεάζεται από τη συγκέντρωση των αντιδρώντων, άρα η τάση της κυψέλης θα επηρεάζεται από τη συγκέντρωση του οιοπνεύματος στο αέριο που φυσείται μέσα στην κυψέλη. Συνεπώς μπορούμε να πάρουμε μία μέτρηση της συγκέντρωσης του οιοπνεύματος στο αίμα. Αυτός ο τύπος κυψέλης καυσίμου είναι η βάση της πλειοψηφίας των οργάνων μέτρησης του οιοπνεύματος στο αίμα, που χρησιμοποιείται στα αλκοτέστ της αστυνομίας σε ολόκληρο τον κόσμο.

Ένα άλλο παράδειγμα που αξίζει να αναφερθεί είναι αυτό των αυτοκινήτων, που αντί για μηχανή εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούν κυψέλη καυσίμου για την κίνησή τους. Πιο συγκεκριμένα, το παράδειγμα αφορά ένα αυτοκίνητο που κατασκευάστηκε από την Daimler Chrysler με το όνομα Necar 5. Αυτό το αυτοκίνητο τροφοδοτείται με υγρή μεθανόλη, η οποία μετατρέπεται σε υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα με χρήση ενός ενσωματωμένου επεξεργαστή καυσίμου. Αυτό το όχημα δεν έχει ουσιαστικά καθόλου ρυπογόνες εκπομπές διοξειδίου του θείου, οξειδίων του αζώτου, μονοξειδίου του άνθρακα ή σωματιδιακής ύλης, που είναι οι πρωτεύοντες ρυπαντές της μηχανής





εσωτερικής καύσης. Η απόδοση μίας κυψέλης καυσίμου είναι περίπου διπλάσια από αυτή μίας μηχανής εσωτερικής καύσης και η απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα σημαντικά χαμηλότερη. Τέλος, αξ σημειωθεί πως το όχημα αυτό φαίνεται και συμπεριφέρεται σαν ένα συνηθισμένο αμάξι, έχει τελική ταχύτητα πάνω από 150 km/h, ισχύ εξόδου 75 kW (100 hp) και πιστεύεται πως χρειάζεται λιγότερη συντήρηση.



Σχήμα 20 : Δύο πρωτότυπα αυτοκίνητα, που κινούνται με κυψέλη καυσίμου, το NECAR 5 και το JEEP Commander, από την DaimlerChrysler

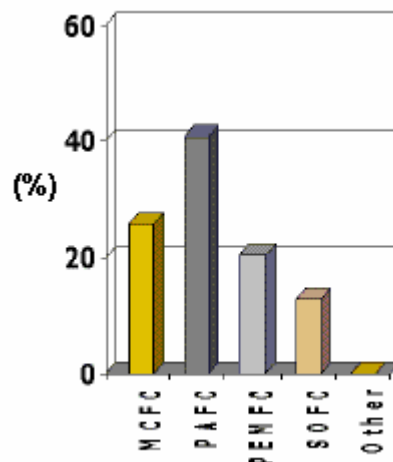
## 2.6. Προοπτικές Ανάπτυξης

Η τεχνολογία έχει προχωρήσει στο σημείο που οι κατασκευαστές κυψελών καυσίμου ελπίζουν να ξεκινήσει η εμπορευματοποίηση των κυψελών καυσίμου σε μερικά μόνο χρόνια. Εγκαταστάσεις επίδειξης σε πλήρη κλίμακα σχεδιάζονται ήδη σε ολόκληρο τον κόσμο. Επιπροσθέτως, στατικές εφαρμογές κυψελών καυσίμου είναι στο στόχαστρο για κάθε τομέα της παγκόσμιας αγοράς ενέργειας, από μικρές οικιακές συμπαραγωγές έως μεγάλους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής ισχύος. Στον πίνακα 3 δίνονται η αναμενόμενη ωριμότητα και εμπορική κατάσταση για κάποιους τύπους κυψελών καυσίμου :

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3** : Αναμενόμενη ωριμότητα και εμπορική κατάσταση.

	PEMFC	MCFC	SOFC
Αναμενόμενη ωριμότητα	2010	Ακαθόριστη	2015
Εμπορική κατάσταση	Προεμπορική/επίδειξη	Προεμπορική/επίδειξη	Προεμπορική/επίδειξη

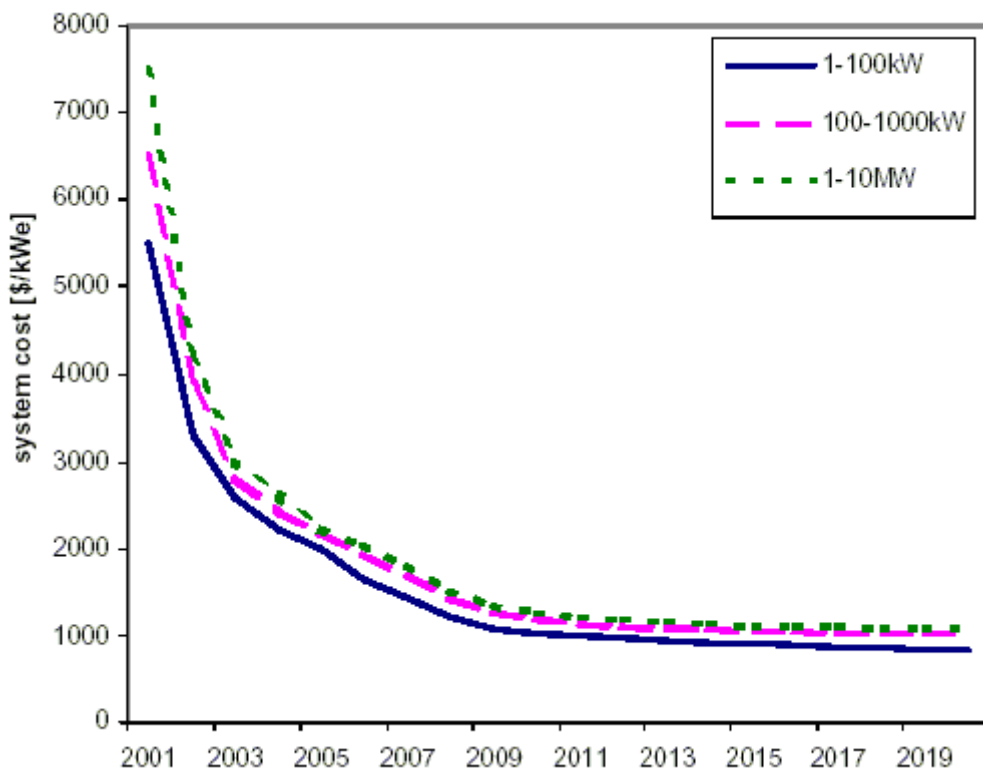
Το 2004 τέθηκαν σε λειτουργία περίπου 600 νέες μικρές σταθερές μονάδες και περισσότερες από 50 μεγάλες σταθερές μονάδες κυψελών καυσίμου. Το σχήμα 21 δείχνει το ποσοστό νέων μεγάλων σταθερών μονάδων που κατασκευάστηκαν το 2004 ανά τύπο τεχνολογίας



Σχήμα 21 : Τύπος τεχνολογίας μεγάλων στατικών μονάδων που κατασκευάστηκαν το 2004.

Επειδή οι κυψέλες καυσίμου είναι προϊόντα υπό ανάπτυξη, σποραδικά δεδομένα είναι διαθέσιμα όσον αφορά το κόστος, τον αντίκτυπο στο περιβάλλον, κλπ. Αξιόπιστες κυψέλες καυσίμου, με μεγάλη διάρκεια ζωής θέτουν τη βάση μίας οικονομία υδρογόνου που ελπίζεται πως θα είναι η ενεργειακή επανάσταση γι' αυτόν τον αιώνα.

Το μεγαλύτερο μέρος της μελλοντικής ανάπτυξης για όλα τα συστήματα κυψελών καυσίμου επικεντρώνεται στη μείωση του κόστους και τη βελτίωση της ανθεκτικότητας του συστήματος. Το σχήμα 22 δείχνει την αναμενόμενη εξέλιξη του κόστους κατά τα επόμενα χρόνια. Άλλες δοκιμασίες αποτελούν η αύξηση της απόδοσης του συστήματος και της πυκνότητας ισχύος, η μείωση των εξόδων συντήρησης, η επέκταση των χρόνων συντήρησης και η επιβεβαίωση της ανθεκτικότητας του προϊόντος.



Σχήμα 22 : Η εξέλιξη του κόστους των κυψελών καυσίμου.



Η πρόοδος στις κυψέλες καυσίμου PEM είναι επικεντρωμένη στην βελτίωση της τεχνολογίας των συστοιχιών για να αυξηθεί η θερμοκρασία λειτουργίας, η βελτίωση της αντοχής στο μονοξείδιο του άνθρακα και άλλα δηλητήρια, η βελτίωση της αντοχής των υλικών, καθώς και η αύξηση της πυκνότητας ισχύος.

Οι βελτιώσεις στην τεχνολογία των κυψελών MCFC είναι επικεντρωμένες στα προβλήματα με την αργή αποσύνθεση του νικελίου από την κάθοδο και η διαβρωτική φύση του ηλεκτρολύτη.

Τέλος, για τις τεχνολογίες SOFC, είναι σημαντικό να αυξηθούν οι συστοιχίες, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη δομική ακεραιότητα στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας τους, όπως και να βελτιωθεί η πυκνότητα ισχύος.



## 2.7. Βιβλιογραφία

- [1] Larminie, J.; Dicks, A. “Fuel Cell Systems Explained”, J.Wiley and Sons, Ltd.: Chichester, West Sussex, England, **2000**, pp. 2-6, 17-23, 28-35, 39-40, 45, 52-53, 56-59, 61-63, 109-115, 123-126, 131. (<http://www.wiley.com>)
- [2] Boyle G., Renewable Energy, Power For A Sustainable Future, 2<sup>nd</sup> Edition, Oxford University Press, **2004**, pp. 408
- [3] Ostwald, Wilhelm, *Electrochemistry: History and Theory*, trans. N. P. Date, (New Delhi: Amerind for the Smithsonian Institution and the National Science Foundation, 1980), pp. 668-79, 1119.
- [4] “Collecting the History of Fuel Cells” The Smithsonian Fuel Cell History Project, Smithsonian National Museum of American History, Behring Center. (<http://fuelcells.si.edu>)
- [5] FCTec : Fuel cell basics ([http://www.fc tec.com/fc tec\\_ howorks.asp](http://www.fc tec.com/fc tec_ howorks.asp))
- [6] A. Monis Shipley & R. Neal Elliot, “*Stationary Fuel Cells: Future Promise, Current Hype*”, American Council for an Energy-Efficient Economy, 2004. <http://www.aceee.org>
- [7] K. A. Adamson, A. Baker & D. Jollie “*Fuel Cell Systems: A Survey of Worldwide Activity*”, December 2004. [www.fuelcelltoday.com](http://www.fuelcelltoday.com)
- [8] A. Bauen & A. Hawkes, “*Decentralised Generation – Technologies and Market Perspectives*”, Decentralised Generation: Key Issues, Challenges, Roles for its Integration into main Power Systems IEA, Paris, March 2004.
- [9] Ogden, J. M. et al. *J. Power Sources*, 1999, 79. (2). 143-168.3
- [10] U.S. Department Of Energy : Energy Efficiency and Renewable Energy : Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program (<http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/education/hydrogen.html>)





### 3. Φωτοβολταϊκό στοιχείο

#### 3.1. Ιστορικά Στοιχεία

Τα κύρια συστατικά των φωτοβολταϊκών γεννητριών και η καρδιά κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια είναι τα *φωτοβολταϊκά ηλιακά στοιχεία* (ονομάζονται επίσης φωτοστοιχεία ή ηλιακά κύτταρα ή κυψελίδες), δηλαδή δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου, που καθώς δέχονται στην επιφάνεια τους την ηλιακή ακτινοβολία, εκδηλώνουν μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και στην πίσω όψη τους. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής του και την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται, ένα ηλιακό στοιχείο μπορεί να δώσει τάση μέχρι 0,5-1,0 V και πυκνότητα ρεύματος μέχρι 20-40 mA ανά cm<sup>2</sup> της επιφανείας του.

Η φωτοβολταϊκή μετατροπή είναι μία πολύ πρόσφατη τεχνολογική ανακάλυψη που βρίσκεται ακόμη στο στάδιο της ανάπτυξης της. Όπως όμως δείχνεται στον πίνακα 4, το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι γνωστό από τον περασμένο αιώνα. Ήδη το 1891, που είχε αρχίσει να γίνεται αισθητή η μόλυνση του περιβάλλοντος στις βιομηχανικές πόλεις, ο R. Appleyard έγραφε ότι είχε την ελπίδα ότι κάποτε: «ο ήλιος δεν θα σκορπάει άσκοπα την ενέργεια του στο διάστημα, αλλά με τη χρησιμοποίηση φωτοβολταϊκών στοιχείων η ενέργεια αυτή θα συγκεντρώνεται σε ηλεκτρικές αποθήκες, και έτσι θα καταργηθούν οι ατμομηχανές και θα απαλλαγεί η ατμόσφαιρα από τον καπνό». Εκείνη την εποχή το κυριότερο καύσιμο ήταν το κάρβουνο, αφού δεν είχε αρχίσει ακόμη η μαζική χρήση του πετρελαίου. Ήταν λοιπόν νωρίς για να προβλέψει ο Appleyard την υποκατάσταση και αυτής της πολύ ρυπογόνου ενεργειακής πηγής από την ηλιακή ακτινοβολία.

Η μεγάλη όμως ώθηση προς τις πρακτικές εφαρμογές της φωτοβολταϊκής μετατροπής δόθηκε με την πραγματοποίηση ορισμένων κρίσιμων τεχνολογικών προόδων, όπως η παρασκευή καθαρού πυριτίου με τη μέθοδο της τηγμένης ζώνης (1952) και ο σχηματισμός διόδων πυριτίου με διάχυση προσμίξεων (1954), που οδήγησαν τελικά στην κατασκευή ηλιακών στοιχείων σημαντικής απόδοσης (6%) το 1954 και ακόμη μεγαλύτερης (14%) το 1972. Πάντως, η αξιοπιστία τους είχε ήδη αποδειχθεί πολύ νωρίτερα, όταν τα πρώτα ηλιακά στοιχεία πυριτίου που τοποθετήθηκαν στον τεχνητό ερευνητικό δορυφόρο Vanguard 1, τον Μάρτη του 1958, όχι μόνον πέτυχαν να τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια τον πομπό του στην προβλεπόμενη ολιγόμηνη διάρκεια του προγράμματος, αλλά εξακολούθησαν να λειτουργούν χωρίς προβλήματα επί έξι συνολικά χρόνια, και μάλιστα στο πολύ εχθρικό διαστημικό περιβάλλον, με την έντονη κοσμική ακτινοβολία. Έτσι, από το 1969 και ύστερα όλοι οι τεχνητοί δορυφόροι και τα άλλα διαστημικά οχήματα, είναι εξοπλισμένα με ηλιακά φωτοβολταϊκά στοιχεία.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4 :** Οι κυριότεροι σταθμοί στην εξέλιξη της φωτοβολταϊκής μετατροπής.

1839	Παρατήρηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε μεταλλικά ηλεκτρόδια (Pt, Ag) βυθισμένα σε ηλεκτρολύτες (Becquerel).
1937	Κατασκευή ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου από PbS (Fischer και Godden).
1939	Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από Se, με απόδοση 1 % (Ohl).
1941	Κατασκευή του πρώτου ηλιακού στοιχείου από Si (Ohl).
1952	Ανακάλυψη της μεθόδου της τηγμένης ζώνης για την κατασκευή στερεών πολύ μεγάλης καθαρότητας (Pfann).
1953	Ανακάλυψη της μεθόδου σχηματισμού ενώσεων p-n με διάχυση προσμίξεων (Fuller).
1954	Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από Si με σχηματισμό ένωσης p-n με διάχυση προσμίξεων και με απόδοση 6% (Fuller, Pearson και Chapin).
1956	Εμπορική παραγωγή ηλιακών στοιχείων (Εταιρεία Hoffmann).
1958	Εκτόξευση του αμερικανικού τεχνητού δορυφόρου Vanguard 1, εξοπλισμένου με 6 μικρά στοιχεία Si, ισχύος 5 mW, ως βοηθητική ενεργειακή πηγή.
1958	Εκτόξευση σοβιετικού τεχνητού δορυφόρου με αποκλειστική τροφοδότηση από ηλιακά στοιχεία.
1959	Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από CdS, με απόδοση 5% (Hammond).
1972	Κατασκευή του «ώδους» ηλιακού στοιχείου Si, με απόδοση 14% (Lindmayer και Allison).



- 1976 Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από άμορφο Si, με απόδοση 0,01% (Carlson και Wronski).  
1977 Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από GaAs, με απόδοση 16% (Kameth)  
1981 Πτήση πάνω από τη Μάγχη του αεροπλάνου Solar Challenger, εξοπλισμένου με 16128 ηλιακά στοιχεία Si, ισχύος 2,7 kW.  
1983 Έναρξη εμπορικής λειτουργίας του φωτοβολταϊκού σταθμού της Βικτροβίλ, ισχύος 1MW.  
1984 Έναρξη βιομηχανικής παραγωγής ηλιακών στοιχείων στην Ιαπωνία από άμορφο πυρίτιο με απόδοση 5%.

Για την εκτίμηση του κόστους των ηλιακών στοιχείων χρησιμοποιείται συμβατικά ο όρος watt αιχμής ( $W_p$ , peak watt) που είναι η ελάχιστη απαιτούμενη επιφάνεια του στοιχείου για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος 1 W όταν δέχεται ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος  $1 \text{ kW/m}^2$ .

Το κόστος των φωτοβολταϊκών στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στις πρώτες διαστημικές εφαρμογές ήταν πολύ υψηλό, περίπου  $\$1000/W_p$ . Στη συνέχεια, όμως, με την αύξηση της παραγωγής και τη βελτίωση της τεχνολογίας, πραγματοποιήθηκε η ραγδαία μείωση του κόστους, που δείχνεται στον πίνακα 5. Έτσι έγινε δυνατό, εκτός από τις διαστημικές, να αρχίσουν σταδιακά και επίγειες εφαρμογές της φωτοβολταϊκής μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως η ηλεκτρική τροφοδότηση μικροσυσκευών (ρολόγια, υπολογιστές τσέπης, ραδιόφωνα) και απομονωμένων εγκαταστάσεων (τηλεπικοινωνιακοί αναμεταδότες, σηματοδότες, φάροι, αγροτικές αντλίες νερού, συστήματα καθοδικής προστασίας χαλύβδινων σωληνώσεων, εξαιρεσθήρες αποθηκευτικών χώρων, εγκαταστάσεις αφαλάτωσης νερού κ.λ.π.). Επίσης η φόρτιση των συσσωρευτών μικρών σκαφών και η κατασκευή αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξοχικά σπίτια ή ακόμα και σε ολόκληρους οικισμούς, κυρίως σε νησιά, έρημους, δάση και γενικά σε περιοχές που δεν εξυπηρετούνται από ηλεκτρικό δίκτυο.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5 :** Η εξέλιξη του κόστους των ηλιακών στοιχείων πυριτίου.

Έτος	Κόστος ανά $W_p$
1956	\$1000
1960	400
1970	100
1975	40
1980	10
1985	7
1990	5

### 3.2. Ο ήλιος ως πηγή ενέργειας

Μία πηγή ενεργείας, που φαίνεται να συνδυάζει ιδανικά τις απαιτήσεις για νέες ενεργειακές αναζητήσεις, και που η ενδεχόμενη αξιοποίησή της βρήκε ανεπιφύλακτη αποδοχή στη διεθνή κοινή γνώμη, είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε σε σημαντική κλίμακα, και παρουσιάζει απεριόριστες μελλοντικές προοπτικές, για την παραγωγή θερμότητας με σκοπό τη θέρμανση νερού (π.χ. στους οικιακούς θερμοσίφωνες), τη θέρμανση χώρων και πολλές άλλες οικιακές, γεωργικές ή βιομηχανικές χρήσεις. Π.χ. στην Ελλάδα, που έχει συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας περίπου  $100 \times 10^9 \text{ kWh}$ , η θέρμανση νερού σε κατοικίες και ξενοδοχεία απορροφά περίπου  $3,5 \times 10^9 \text{ kWh}$ . Από την ποσότητα αυτή, σήμερα, περίπου το 10% προέρχεται από ηλιακή ενέργεια, ενώ για το υπόλοιπο καταναλώνεται ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο.

Επίσης, η θερμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται, σε λίγες σχετικά εγκαταστάσεις, για την ατμοποίηση νερού που διαβιβάζεται στη συνέχεια σε μια στροβιλογεννήτρια



και παράγει τελικά ηλεκτρική ενέργεια. Ο μεγαλύτερος μέχρι σήμερα φωτοθερμικός ηλεκτρικός σταθμός έχει ισχύ 10MW, ενώ σχεδιάζεται η κατασκευή σταθμών ισχύος μέχρι 100MW.

Το ενδιαφέρον για την ηλιακή ενέργεια εντάθηκε όταν χάρη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, διαπιστώθηκε η πρακτική δυνατότητα της εύκολης, άμεσης και αποδοτικής μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια, με την κατασκευή φωτοβολταϊκών γεννητριών. Πράγματι, η φωτοβολταϊκή μέθοδος μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια έχει μόνον πλεονεκτήματα, αν εξαιρεθούν κυρίως το κόστος, που είναι ακόμα αρκετά υψηλό για τις περισσότερες εφαρμογές, και η αδυναμία της φωτοβολταϊκής γεννήτριας να παράγει συνεχώς ηλεκτρική ενέργεια λόγω των διακυμάνσεων της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του 24ώρου.

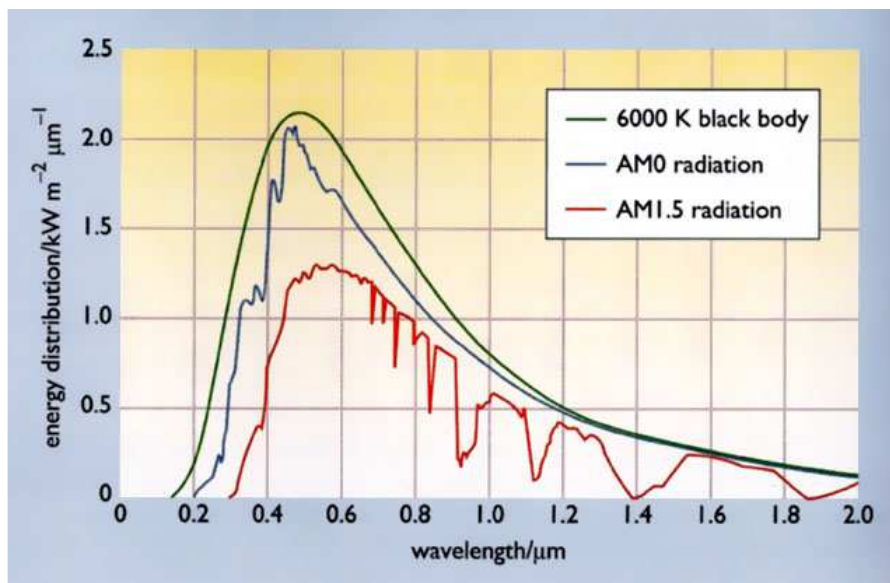
Η διαμόρφωση του φάσματος του φωτός που εκπέμπει ο ήλιος προσομοιάζεται συνήθως με την ακτινοβολία ενός μέλανος σώματος θερμοκρασίας περίπου 5800K, όση είναι, κατά μέσο, η θερμοκρασία της φωτόσφαιρας του ήλιου. Η προσέγγιση αυτή είναι επαρκής για τη μελέτη των θερμικών εφαρμογών της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως π.χ. η θέρμανση νερού («ηλιακοί θερμοσίφωνες»). Στις περιπτώσεις αυτές ενδιαφέρει συνήθως η συνολική θερμική ισχύς της ακτινοβολίας και ο μηχανισμός μετάδοσης της θερμότητας π.χ. στους ηλιακούς συλλέκτες του «θερμοσίφωνα» ή τους θερμοσυσσωρευτικούς τοίχους του κτιρίου κλπ. Δεν είναι όμως το ίδιο και για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ενέργειας αφού αυτή καθορίζεται από τη λεπτομερειακή φωτονική σύσταση της ακτινοβολίας. Άλλωστε, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι κατασκευασμένα από ημιαγωγούς, και όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η δυνατότητα της απορρόφησης των φωτονίων της ακτινοβολίας σε έναν ημιαγωγό εξαρτάται ουσιαστικά από τη σύγκριση της τιμής της ενέργειάς τους, σε σχέση με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού.

Εκτός από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ο ήλιος εκπέμπει και μια ασθενή σωματιδιακή ακτινοβολία, που αποτελείται από ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια, κυρίως ηλεκτρόνια και πρωτόνια, και ονομάζεται *ηλιακός άνεμος*. Σε περιπτώσεις ηλιακών εκρήξεων η ένταση του ηλιακού ανέμου αυξάνει σημαντικά και μπορεί να φτάσει π.χ. τα  $10^8$  πρωτόνια ανά  $\text{cm}^2$  και sec, στην απόσταση που βρίσκεται η γη. Πάντως, η μορφή αυτή της ηλιακής ακτινοβολίας δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον από πλευράς ενεργειακής εκμετάλλευσης.

Η ανάγκη για τη λεπτομερειακή εξέταση της φασματικής σύστασης της ηλιακής ακτινοβολίας στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές γίνεται φανερή στο σχήμα 23, που δείχνει τη μεγάλη διαφοροποίηση του πραγματικού φάσματος του ηλιακού φωτός στην επιφάνεια της γης, σε σχέση με την προσέγγιση που αναφέρθηκε παραπάνω. Βλέπουμε ότι το ηλιακό φως αποκτά τελικά μία πολύ ανώμαλη φασματική κατανομή, που οφείλεται σε εκλεκτικές απορροφήσεις και σκεδάσεις στα συστατικά της ατμόσφαιρας που διασχίζει.

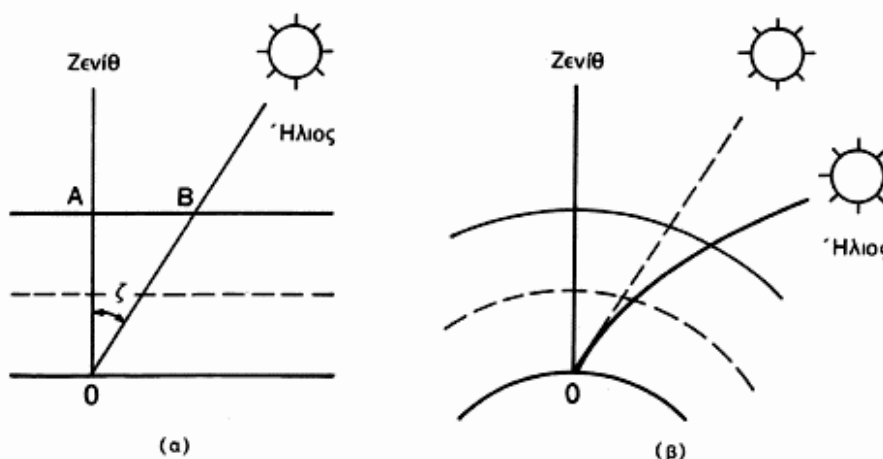
Ενδεικτική, άλλωστε, της επίδρασης της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία είναι η εξάρτηση της έντασης της από το υψόμετρο της τοποθεσίας της γης, που δέχεται την ακτινοβολία. Έτσι, έχει μετρηθεί ότι ενώ στη στάθμη της θάλασσας η μέγιστη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας φτάνει μέχρι περίπου  $900-1000 \text{ W/m}^2$ , η τιμή της αυξάνεται κατά περίπου  $7 \text{ W/m}^2$  για κάθε 100 m ύψους της τοποθεσίας, επειδή μειώνεται αντίστοιχα το πάχος του στρώματος της ατμόσφαιρας που διασχίζουν οι ηλιακές ακτίνες.

Το όζον, που είναι άφθονο στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, απορροφά έντονα την υπεριώδη ακτινοβολία, και ειδικότερα στην περιοχή  $0,2-0,35 \mu\text{m}$ , το μοριακό οξυγόνο απορροφά κυρίως στην περιοχή του ερυθρού (π.χ.  $0,63$  και  $0,69 \mu\text{m}$ ), το διοξείδιο του άνθρακα στο υπέρυθρο ( $2,7$  και  $4,3 \mu\text{m}$ ) και οι υδρατμοί στο ερυθρό και στο υπέρυθρο. Επίσης, από τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης συνήθως λιγότερο από το 60% είναι άμεση, σε μορφή δέσμης ακτινών, που μπορούν π.χ. να εστιαστούν με κάτοπτρα ή φακούς. Η υπόλοιπη είναι διάχυτη, διότι έχει προηγουμένως σκεδαστεί και ανακλαστεί στα διάφορα σωματίδια και σταγονίδια που αιωρούνται στον αέρα, ανάλογα βέβαια με τη σύσταση της ατμόσφαιρας και το μήκος της διαδρομής της ακτινοβολίας μέσα σ' αυτήν.



Σχήμα 23 : Το φάσμα της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην εκπομπή μέλανος σώματος θερμοκρασίας 5800 K (εξωτερική συνεχής γραμμή), το φάσμα της ίδιας πηγής ύστερα από απορροφήσεις από το όζον και από σκεδάσεις από τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας (ασυνεχής γραμμή), και το πραγματικό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης σε συνθήκες μέτριας υγρασίας (εσωτερική συνεχής γραμμή).

Πέρα από τη γεωγραφική θέση και το υψόμετρο, η τελική μορφή και η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης, διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τις εκάστοτε μετεωρολογικές συνθήκες, και κυρίως τη θέση του ήλιου στον ουρανό και την περιεκτικότητα της υγρασίας στην ατμόσφαιρα. Συμβατικά, το μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα μέχρι τη στάθμη της θάλασσας, που είναι άμεση συνέπεια της θέσης του ήλιου, χαρακτηρίζεται από μία κλίμακα **μάζας αέρα** *AM* (air mass, ονομάζεται επίσης οπτική αέρια μάζα) βαθμολογημένης με την τέμνουσα (το αντίστροφο του συνημίτονου) της **ζενιθιακής απόστασης** ( $\zeta$ ), δηλαδή της γωνίας ανάμεσα στη θέση του ηλίου και στην κατακόρυφο (Σχήμα 24). Δηλαδή η κλίμακα της μάζας αέρα δείχνει ουσιαστικά πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, σε σύγκριση με την κατακόρυφη διαδρομή της.



Σχήμα 24 : Η εξάρτηση της κλίμακας μάζας αέρα (*AM*) από τη θέση του ήλιου, (α) Απλοποιημένη απεικόνιση, με την ατμόσφαιρα να έχει επίπεδη ανάπτυξη σε άπειρη έκταση. Εξ ορισμού είναι  $AM = OB / OA = 1 / \cos \zeta$ . (β) Η πραγματική διαμόρφωση της γήινης ατμόσφαιρας, με τα στρώματα της να ορίζονται από σφαιρικές επιφάνειες, και η αντίστοιχη ατμοσφαιρική διάθλαση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διαδρομή της μέσα από τα στρώματα αυτά.





Συγκεκριμένα, ως  $AM1$  συμβολίζεται η συνθήκη για τη θέση του ήλιου στην κατακόρυφο, στο ζενίθ, που αντιστοιχεί στο ελάχιστο μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα. Όμοια, ως  $AM1,5$  συμβολίζεται η διαδρομή της ακτινοβολίας με τον ήλιο σε γωνία  $45^\circ$  από το ζενίθ, ως  $AM2$  με τον ήλιο σε γωνία  $60^\circ$  κ.λ.π. Το μηδέν της κλίμακας ( $AM0$ ) συμβολίζει την πλήρη απουσία ατμοσφαιρικής παρεμβολής, δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία στο διάστημα, σε θέση που να απέχει όση είναι η μέση απόσταση της γης από τον ήλιο. Στον πίνακα 6 γράφονται οι πυκνότητες της ισχύος και η μέση ενέργεια των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες πρότυπες συνθήκες στην κλίμακα μάζας αέρα. Πάντως, η παραπάνω προτυποποίηση δεν είναι πάρα πολύ αυστηρή. Έτσι π.χ. εκτός από τις τιμές του πίνακα, η  $AM0$  αναφέρεται επίσης ως  $1353 \text{ W/m}^2$ , η  $AM2$  ως  $740 \text{ W/m}^2$  κ.λ.π.

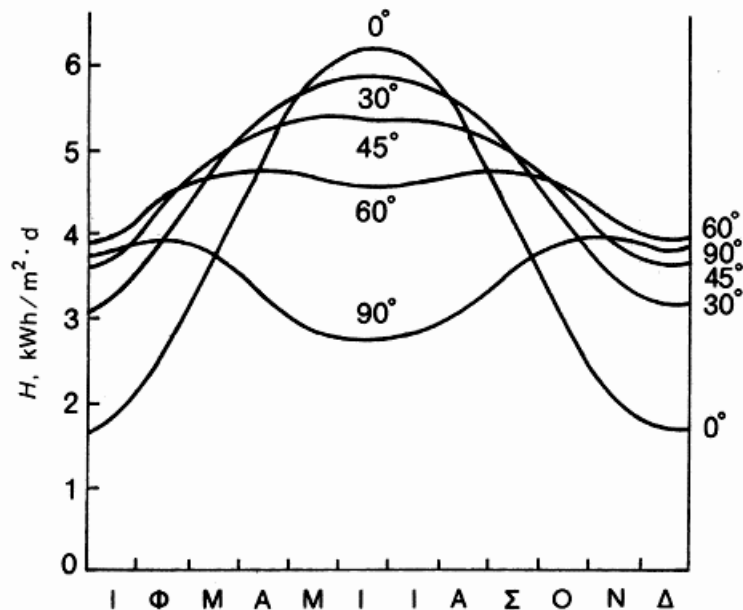
**ΠΙΝΑΚΑΣ 6 :** Οι πρότυπες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στην κλίμακα μάζας αέρα (Air Mass).

Τιμή μάζας αέρα	Συμβατικές συνθήκες	Ισχύς	Μέση ενέργεια των φωτονίων
$AM0$	Στο διάστημα, έξω από την ατμόσφαιρα.	$1350 \text{ W/m}^2$	1,48 eV
$AM1$	Ο ήλιος στο ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	$1060 \text{ W/m}^2$	1,32 eV
$AM2$	Απόσταση του ήλιου $60^\circ$ από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	$880 \text{ W/m}^2$	1,38 eV
$AM3$	Απόσταση του ήλιου $70,5^\circ$ από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	$750 \text{ W/m}^2$	1,21 eV

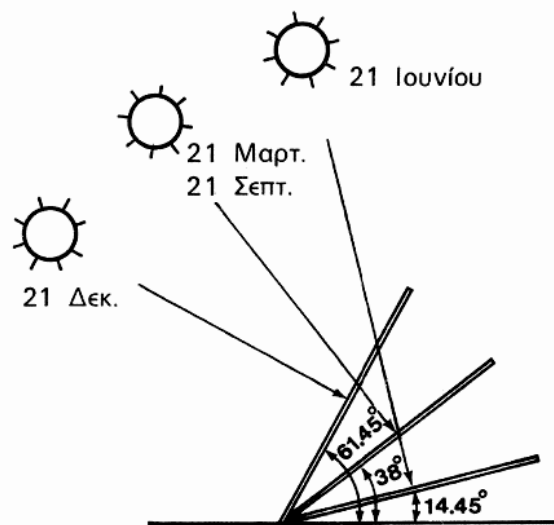
Στις συνηθισμένες περιπτώσεις οι συλλέκτες τοποθετούνται σε σταθερή κλίση και αζιμούθια γωνία, που επιλέγονται ώστε η γωνία της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας να είναι όσο το δυνατό μικρότερη, κατά τη διάρκεια του έτους. Η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας συνδέεται με τις άλλες γωνίες της ηλιακής γεωμετρίας, που αναφέρθηκαν παραπάνω, με τη σχέση:

$$\cos\phi = \cos\beta \sin\beta_\sigma \cos(\theta_\sigma - \theta) + \sin\beta \cos\beta_\sigma \quad (\text{Εξ. 28})$$

Στο βόρειο ημισφαίριο, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη, για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους, είναι ίση με την γεωγραφική παράλληλο του τόπου, και η αζιμούθια γωνία είναι  $0^\circ$  (προς το νότο). Αλλά λόγω της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη είναι διαφορετική για κάθε εποχή (Σχήμα 25). Έτσι, αν επιδιώκεται να παράγει το σύστημα όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια στη διάρκεια του καλοκαιριού, η κλίση του συλλέκτη επιλέγεται περίπου  $10^\circ$  ως  $15^\circ$  μικρότερη από την παράλληλο του τόπου, ενώ για τον χειμώνα η κλίση επιλέγεται περίπου  $10^\circ$  ως  $15^\circ$  μεγαλύτερη από την παράλληλο του τόπου. Στο σχήμα 26 δίνεται ένα παράδειγμα της βέλτιστης κλίσης για τον ηλιακό συλλέκτη στις χαρακτηριστικότερες ημερομηνίες του έτους.



Σχήμα 25 : Παράδειγμα της εξάρτησης της μέσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας  $H$ , που δέχεται μια επίπεδη επιφάνεια κατά τη διάρκεια των διαφόρων μηνών του έτους, σε συνάρτηση με την κλίση της. Το παράδειγμα είναι για τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος  $45^\circ$  και αφορά σε κλίσεις του ηλιακού συλλέκτη ( $\beta_0$ ) ίσες με  $0^\circ$  (οριζόντιο επίπεδο),  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ , και  $90^\circ$  (κατακόρυφο επίπεδο).



Σχήμα 26 : Η βέλτιστη κλίση ενός ηλιακού συλλέκτη στο θερινό (21 Ιουνίου) και το χειμερινό (21 Δεκεμβρίου) ηλιοστάσιο και στην εαρινή (21 Μαρτίου) και τη φθινοπωρινή (21 Σεπτεμβρίου) ισημερία, σε μια τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος  $38^\circ$ , όπως η Αθήνα. Τα ύψη του ήλιου που εικονίζονται αφορούν στα αντίστοιχα ηλιακά μεσημέρια.



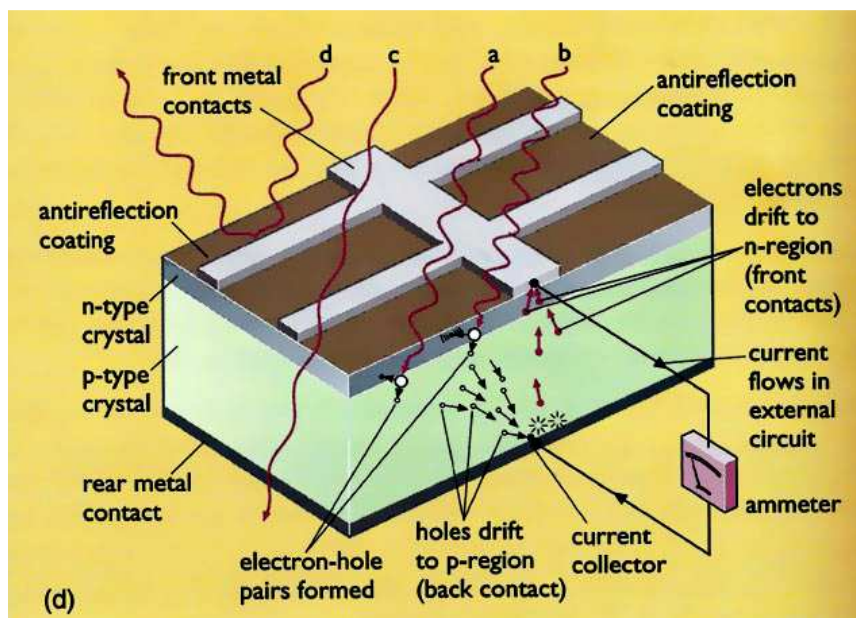


### 3.3. Βασική αρχή λειτουργίας

Η απευθείας μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια γίνεται σε επίπεδο πρακτικών εφαρμογών μέχρι σήμερα μέσω τριών γνωστών διαδικασιών που είναι η Θερμιοηλεκτρική Γεννήτρια, τα Θερμοηλεκτρικά Ζεύγη και τα Φωτοβολταϊκά Στοιχεία. Και για τις τρεις διαδικασίες το ποσό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται είναι ανάλογο της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, θεωρώντας δεδομένη τη φασματική της κατανομή. Βασικό πλεονέκτημα της φωτοβολταϊκής μετατροπής αποτελεί η χρήση του πυριτίου "Si" ως βασικό υλικό παραγωγής. Όπως είναι γνωστό το πυρίτιο αφθονεί (~25%) στο φλοιό του πλανήτη μας.

Τα φ/β στοιχεία αποτελούνται από δύο πλάκες ημιαγωγών (δίοδοι p-n, συνήθως πυριτίου), που βρίσκονται σε επαφή (βλέπε σχήμα 27). Η άνω πλάκα (n) εμπλουτίζεται με πολύ μικρή ποσότητα (π.χ.  $1 \cdot 10^6$ ) στοιχείου, το οποίο διαθέτει ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο (5 ηλεκτρόνια) στην εξωτερική του στιβάδα, σε σχέση με το χρησιμοποιούμενο ημιαγωγό. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις πλάκες τύπου "n" είναι μόρια αρσενικού "As" ή φωσφόρου "P". Αντίστοιχα η κάτω πλάκα (p) ενισχύεται με προσμίξεις κατάλληλου στοιχείου, που διαθέτει ένα ηλεκτρόνιο λιγότερο στην εξωτερική του στιβάδα (π.χ. Βόριο "B") σε σχέση με το υλικό του ημιαγωγού. Η άνω πλάκα με τα επιπλέον ηλεκτρόνια ονομάζεται ημιαγωγός τύπου "n" (negative - αρνητικό φορτίο), ενώ η κάτω πλάκα με τα λιγότερα ηλεκτρόνια είναι ημιαγωγός τύπου "p" (positive - θετικό φορτίο).

Κατά την κατασκευή του φ/β στοιχείου, στην επιφάνεια επαφής των δύο πλακών συγκεντρώνονται τα περίσσια ηλεκτρόνια της πλάκας (n), τα οποία έλκονται από τις κενές θέσεις (οπές) ηλεκτρονίων της πλάκας (p). Εάν η πλάκα (n) δεχτεί ηλιακή ακτινοβολία, τότε τα φωτόνια που διαπερνούν τον ημιαγωγό ενεργοποιούν ορισμένο αριθμό ηλεκτρονίων, τα οποία συσσωρεύονται κοντά στην επιφάνεια επαφής των δύο πλακών. Λόγω των απωστικών δυνάμεων μεταξύ ομώνυμων φορτίων εκκενώνονται επιπλέον θέσεις ηλεκτρονίων της πλάκας (p) οπότε και δημιουργούνται επιπλέον κενές θέσεις (οπές). Στην περίπτωση αυτή δημιουργείται διαφορά τάσεως μεταξύ των δύο πλευρών, που ονομάζεται τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$ . Η τιμή της τάσης  $V_{oc}$  είναι χαμηλή για μικρής έντασης ηλιακή ακτινοβολία, αλλά παραμένει σχεδόν σταθερή για τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας που υπερβαίνουν ένα προκαθορισμένο όριο, (βλέπε σχήμα 27). Το εν λόγω όριο εξαρτάται από το υλικό κατασκευής των φ/β κυψελών.



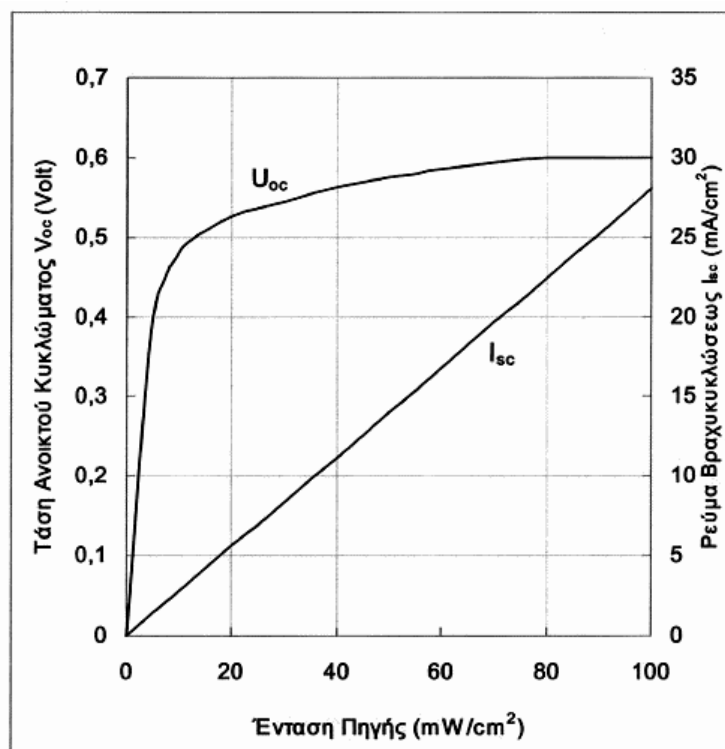
Σχήμα 27 : Ο μηχανισμός της εκδήλωσης του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε ένα ηλιακό στοιχείο.

Κατά τη διάρκεια έκθεσης του φ/β στοιχείου στην ηλιακή ακτινοβολία, ενώνοντας με κατάλληλο αγωγό τις δύο πλάκες του στοιχείου (p-n) δημιουργείται κλειστό κύκλωμα, που οδηγεί στην ανάπτυξη κυκλοφορίας των ηλεκτρονίων διαμέσου της επιφάνειας επαφής τους. Στο κλειστό



αυτό κύκλωμα (πρακτικά χωρίς φορτίο) η ένταση του ρεύματος είναι σταθερή και ονομάζεται ένταση βραχυκυκλώσεως  $I_{sc}$ . Η ένταση βραχυκυκλώσεως μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (βλέπε σχήμα 28).

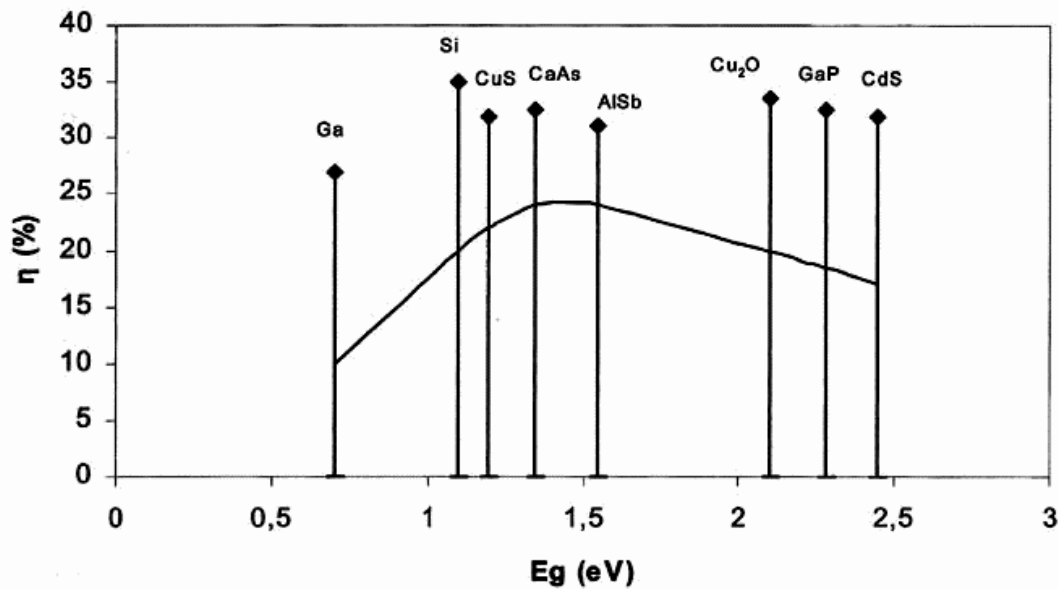
Κατά την πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στην επιφάνεια του φ/β, μόνο ορισμένα φωτόνια συγκεκριμένου μήκους κύματος (ή συχνότητας) μπορούν να ενεργοποιήσουν τα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού. Παράλληλα ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται στην επιφάνεια του υλικού, ενώ φωτόνια μεγάλης κινητικής ενέργειας διασχίζουν τον ημιαγωγό. Τέλος, φωτόνια με μικρή κινητική ενέργεια δεν είναι ικανά να συμμετάσχουν στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Σύμφωνα δε με την ισχύουσα θεωρία κυματικής μηχανικής κάθε φωτόνιο μπορεί να ενεργοποιήσει και να ελευθερώσει μόνο ένα ηλεκτρόνιο.



Σχήμα 28 : Μεταβολή του Ρεύματος Βραχυκυκλώσεως " $I_{sc}$ " και της Τάσης Ανοικτού Κυκλώματος " $V_{oc}$ " σε Συνάρτηση με την Ένταση της Ηλιακής Ακτινοβολίας " $G$ "

Η ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια ενός φωτονίου για την ενεργοποίηση και απελευθέρωση ενός ηλεκτρονίου του ημιαγωγού ονομάζεται "ενεργειακό κατώφλι" του ημιαγωγού (σχήμα 29). Φωτόνια που διαθέτουν πολύ μεγάλη ενέργεια μεταφέρουν μέρος της κινητικής τους ενέργειας στα απελευθερωθέντα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα η κινητική αυτή ενέργεια τελικά να μετασχηματίζεται σε θερμότητα, που οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού. Ανάλογος μετασχηματισμός συνοδεύει και την πρόσπτωση φωτονίων χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου.

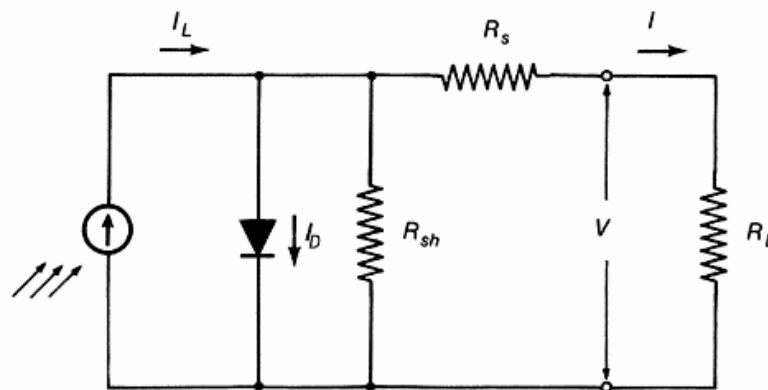
Για την απορρόφηση της παραγόμενης θερμότητας, η οποία επιδεινώνει και την ηλεκτρική απόδοση ενός φ/β στοιχείου, προτείνεται σε ολοκληρωμένες εφαρμογές η χρήση συστήματος φυσικής ή εξαναγκασμένης κυκλοφορίας ρευστού. Η απαγόμενη θερμότητα μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των θερμικών αναγκών καταναλωτών.



Σχήμα 29 : Ενεργειακό Κατώφλι Ημιαγωγών

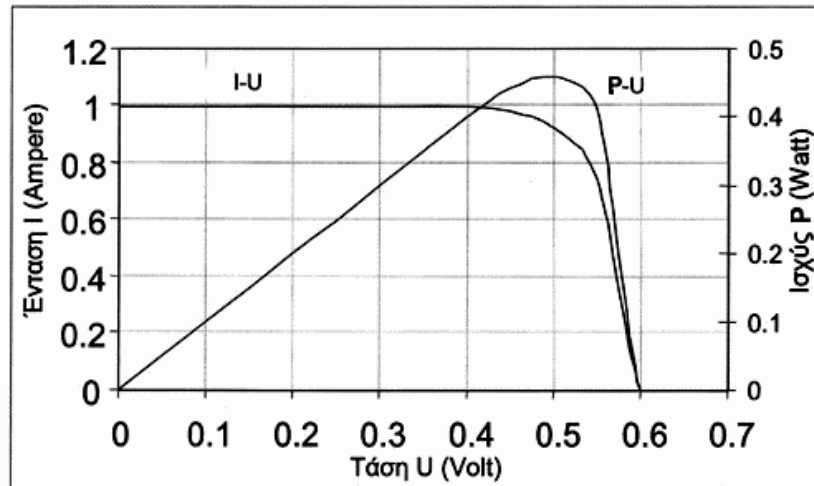
Η θεωρητική απόδοση των φ/β στοιχείων πυριτίου βάσει των μέχρι σήμερα ερευνών δεν ξεπερνά το 24% κατά την έκθεση τους στο ηλιακό φως. Πράγματι στις εργαστηριακές δοκιμές έχουν καταγραφεί αποδόσεις της τάξεως του 22%, ενώ στην πράξη ο πραγματικός βαθμός απόδοσης δεν ξεπερνά το 15-16%. Η μικρή απόδοση των φ/β στοιχείων οφείλεται κυρίως στο γεγονός της περιορισμένης δυνατότητας αξιοποίησης των φωτονίων που προσπίπτουν πάνω στην επιφάνεια τους με χαμηλό ή υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο, στην ανακλαστικότητα της επιφάνειάς τους, σε εσωτερικές απώλειες λόγω της κατασκευής τους και στην ατελή κρυσταλλική δομή τους.

Όπως προκύπτει και από την ανάλυση των διαθέσιμων στοιχείων, πέραν του βαθμού απόδοσης (εργαστηριακού και πραγματικού) των προτεινόμενων ημιαγωγών θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και το αναμενόμενο κόστος παραγωγής, καθώς και η σπανιότητα των απαραίτητων πρώτων υλών.



Σχήμα 30 : Απλοποιημένο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Συνδέοντας το φ/β σε κύκλωμα που παρεμβάλλεται ωμική αντίσταση  $R$ , σχήμα 30, παρατηρείται μεταβολή της τάσης  $V$  συναρτήσει της τιμής της αντίστασης από το μηδέν έως την τιμή τάσης ανοικτού κυκλώματος  $V_{OC}$ , (σχήμα 31). Παράλληλα με την αύξηση της αντίστασης η ένταση του ρεύματος παραμένει σταθερή μέχρι ενός χαρακτηριστικού σημείου, ενώ στη συνέχεια μειώνεται απότομα. Η καμπύλη ( $I$ - $V$ ) του σχήματος 31 αποτελεί τυπική χαρακτηριστική φ/β στοιχείων, και προκύπτει για σταθερή τιμή της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας  $G$  και της θερμοκρασίας του πλαισίου.



Σχήμα 31: Χαρακτηριστική Καμπύλη φ/β, Τάσης - Έντασης

Αναλυτικότερα, βασιζόμενοι στο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φ/β στοιχείου, σχήμα 30, η πλήρης εξίσωση μεταξύ εντάσεως και τάσεως του ηλεκτρικού ρεύματος στην έξοδο του φ/β δίνεται σαν:

$$I = I_L - I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{\alpha}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (\text{Εξ. 29})$$

οπού  $I_L$ : το φωτόρευμα

$I_0$ : το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης

$R_s$ : η αντίσταση σειράς

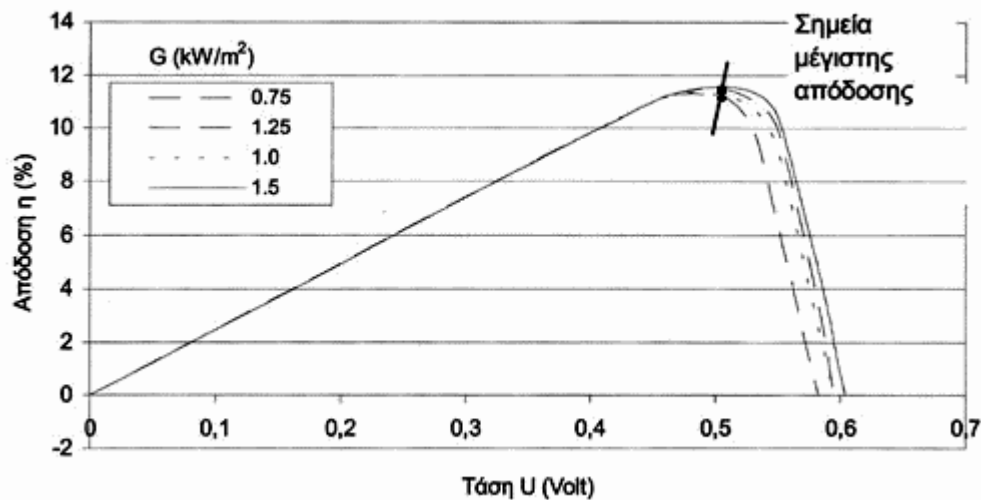
$R_{sh}$ : η ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση του φ/β

$\alpha$ : η θερμοκή τάση σε Volt

Αντίστοιχα η ισχύς "P", που αποδίδει ένα φ/β στοιχείο, δίνεται από την εξίσωση:

$$P = V \cdot I \quad (\text{Εξ. 30})$$

Η διακύμανση της αποδιδόμενης ισχύος σε συνάρτηση με την τάση V, παρουσιάζεται στο σχήμα 31, για σταθερή ένταση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας G και σταθερή θερμοκρασία πλαισίων.



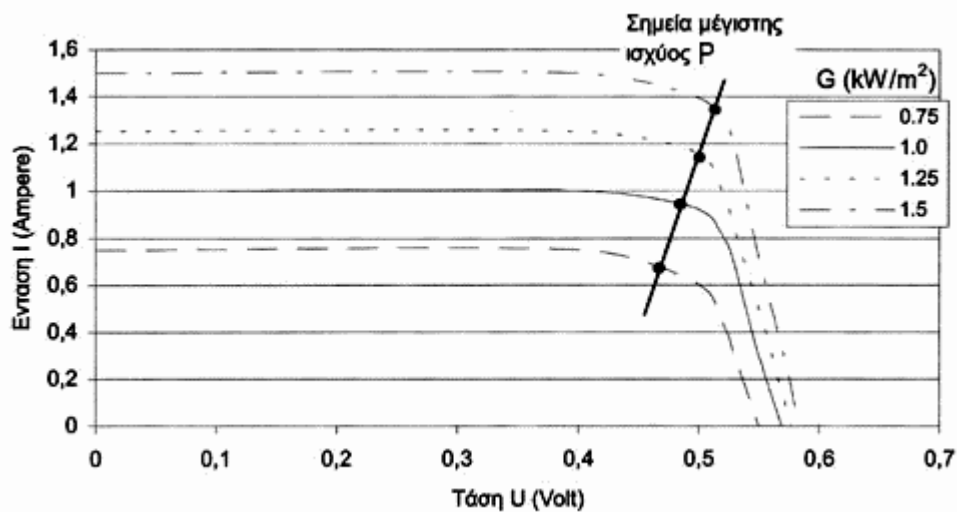
Σχήμα 32 : Βαθμός απόδοσης  $\eta/\beta$ , ( $\eta$ -V) για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας.

Όπως προκύπτει από το σχήμα 31, η μέγιστη ισχύς  $P_{MAX}$  αντιστοιχεί σε τιμή τάσεως  $V_{MP}$ , ελαφρά μικρότερη από την τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{OC}$ . Για ενδεικτικούς υπολογισμούς μπορεί να ληφθεί κατά προσέγγιση  $V_{MP} \approx 0,9 \cdot V_{OC}$ . Για μεγαλύτερη ακρίβεια απαιτείται η διερεύνηση του διαγράμματος (P-V), οπότε εντοπίζεται το σημείο της μέγιστης ισχύος του  $\eta/\beta$  και καθορίζεται η ακριβής τιμή της τάσης  $V_{MP}$  και η αντίστοιχη ένταση  $I_{MP}$ .

Ο βαθμός απόδοσης  $\eta$  ενός  $\eta/\beta$  πλαισίου είναι ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος  $P$  που παράγεται προς τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια, η οποία καθορίζεται σαν το γινόμενο της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας  $G$  επί το εμβαδόν  $A$  της επιφάνειας του  $\eta/\beta$ . Συνεπώς ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται από την εξίσωση (31), ενώ στο σχήμα 32 παρουσιάζεται η μεταβολή της απόδοσης  $\eta/\beta$  στοιχείου σαν συνάρτηση της τάσης του για διάφορες τιμές έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

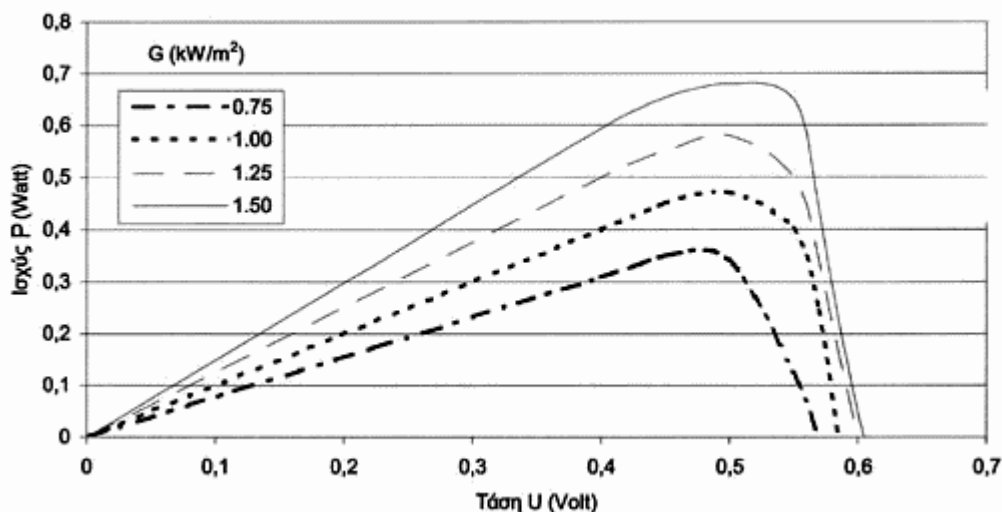
$$\eta = \frac{P}{G \cdot A} \quad (\text{Εξ. 31})$$

Όπως φαίνεται από το σχήμα 32 η καμπύλη του βαθμού απόδοσης παραμένει σχεδόν σταθερή για διάφορες μεταβολές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Συνεπώς η καμπύλη απόδοσης ( $\eta$ -V) του  $\eta/\beta$  δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ έχει παρόμοια μορφή με την καμπύλη ισχύος. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης εμφανίζεται στην ίδια περίπου τιμή τάσης λειτουργίας του  $\eta/\beta$ , με μικρή μετατόπιση προς τα δεξιά και προς τα πάνω, όσο αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου  $G$ .



Σχήμα 33 : Χαρακτηριστικές καμπύλες φ/β, (I-V) για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας.

Η μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, επιδρά σημαντικά στην καμπύλη λειτουργίας του φ/β στοιχείου. Δηλαδή η αύξηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνει το ρεύμα βραχυκυκλώσεως μετατοπίζοντας την καμπύλη (I-V) προς τα πάνω. Αντίστοιχα, η μείωση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας μετατοπίζει την καμπύλη λειτουργίας (I-V) προς τα κάτω, σχήμα 33. Αντίθετα, η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας δεν επηρεάζει σημαντικά την τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{OC}$  του φ/β.



Σχήμα 34 : Διάγραμμα (P-V) φ/β για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας.

Διερευνώντας τα δεδομένα του σχήματος 33 παρατηρείται ότι η καμπύλη που ενώνει τα σημεία στα οποία εμφανίζεται η μέγιστη ισχύς του φ/β, είναι ευθεία γραμμή σχεδόν κάθετη στον άξονα της V, με ελαφρά κλίση προς τα δεξιά. Συνεπώς, όπως έχει ήδη αναφερθεί το σημείο μέγιστης ισχύος εμφανίζεται πρακτικά για την ίδια τιμή τάσης V, ανεξάρτητα από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η πληροφορία αυτή επιβεβαιώνεται από τα στοιχεία του σχήματος 34, όπου παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες (P-V) για διάφορες τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.





Παράλληλα αλλαγές της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας ή του έτους επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά των φ/β στοιχείων. Συνεπώς η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση της τάσης ανοικτού κυκλώματος  $V_{OC}$  με αποτέλεσμα το κάθετο μέρος της καμπύλης (I-V) να μετακινείται προς τα αριστερά. Αντίστοιχα, η μείωση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση της τάσης, (βλέπε σχήμα 35). Ο ρυθμός μείωσης της τάσης για φ/β στοιχεία πυριτίου είναι περίπου  $2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ . Πιο συγκεκριμένα αποτέλεσμα η τάση του φ/β σε τυχαία θερμοκρασία να μπορεί να προσεγγισθεί από την ακόλουθη σχέση:

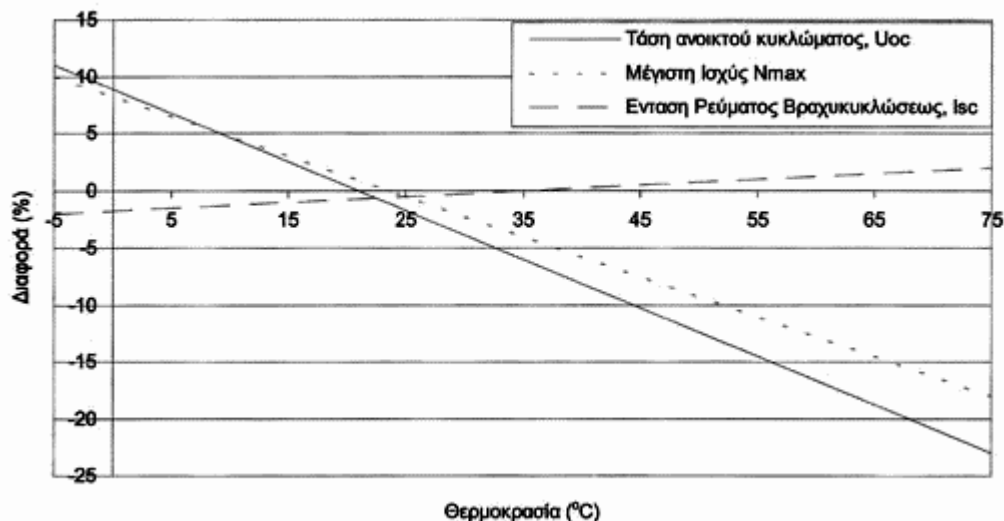
$$V_{\theta} = V_{25} \cdot [1 - 2 \cdot 10^{-3}(\theta - 25)] \quad (\text{Εξ. 32})$$

Η παρατηρούμενη μείωση αντισταθμίζεται μερικώς από την αύξηση της έντασης του ρεύματος βραχυκυκλώσεως  $I_{SC}$ , καθώς σύμφωνα με την εξίσωση (33) παρατηρείται μια ελαφρά αύξηση του ρεύματος εξόδου "I" (σε mA), δηλαδή:

$$I = I_{25} \cdot [(1 + 25 \cdot 10^{-3} \cdot A \cdot (\theta - 25))] \quad (\text{Εξ. 33})$$

όπου A : εμβαδόν του φ/β στοιχείου σε  $\text{cm}^2$ .

Τελικά η αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του φ/β, επηρεάζει την αποδιδόμενη μέγιστη ισχύ  $P_{MAX}$  με ρυθμό περίπου  $0,3\% / ^\circ\text{C}$  (σχήμα 35)



Σχήμα 35 : Επίδραση θερμοκρασίας στη συμπεριφορά ενός φ/β στοιχείου.

### 3.4. Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων

Από τα πολλά ημιαγωγικά υλικά που έχουν ως τώρα μελετηθεί για ηλιακή φωτοβολταϊκή μετατροπή, μεγάλη εφαρμογή έχει βρει μόνο το πυρίτιο, αν και άλλοι ημιαγωγοί έχουν δώσει καλύτερες αποδόσεις (πίνακας 7). Πολύ σημαντικές προοπτικές για σύντομη ανάπτυξη έχουν επίσης το θειούχο κάδμιο (CdS) λόγω χαμηλού κόστους, και το αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) λόγω μεγάλης απόδοσης. Πάντως η ερευνητική αναζήτηση συνεχίζεται έντονη με στόχο την ανακάλυψη και άλλων υλικών, ίσως οργανικής σύστασης, που ενδεχομένως να συνδυάζουν χαμηλό κόστος, εύκολη εφαρμογή και αξιόλογη απόδοση.



**ΠΙΝΑΚΑΣ 7 :** Οι μεγαλύτερες αποδόσεις φωτοβολταϊκής μετατροπής (πάνω από 10%), που έχουν πραγματοποιηθεί με ηλιακά στοιχεία, σε εργαστηριακές συνθήκες.

Υλικό	Τύπος στοιχείων	Μέγιστη απόδοση σε ακτινοβολία AM1
n-Ga <sub>0,3</sub> Al <sub>0,7</sub> As / p-GaAs	ομοένωση - ετεροδομή	24%
GaAs	ομοένωση	22%
n-AlAs / p-GaAs	ετεροένωση	18,5%
Si (μονοκρυσταλλικό)	ομοένωση	18%
Si (πολυκρυσταλλικό)	ομοένωση	16%
Au / Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / p-Si	Σότκυ	10%
p-Cu <sub>x</sub> S / n-CdS	ετεροένωση	10%

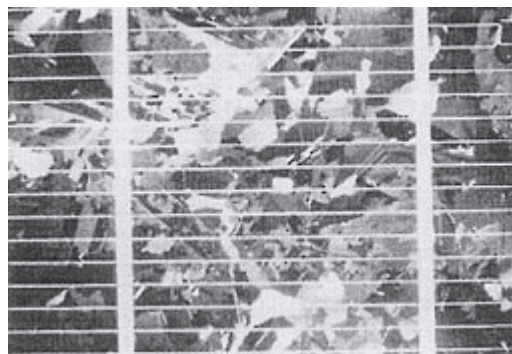
### 3.4.1. Μονο / Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο

Το πυρίτιο εξάγεται από την άμμο (SiO<sub>2</sub>) και επεξεργάζεται σε μία πολυκρυσταλλική μορφή. Μέχρι πρόσφατα, τα περισσότερα φωτοβολταϊκά κατασκευάζονταν από υπερβολικά αγνό μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, ένα υλικό με συνεχή κρυσταλλική δομή, σχεδόν χωρίς καθόλου ακαθαρσίες, το οποίο εξάγονταν από το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο με μία πολύ προηγμένη, αλλά ακριβή και ενεργοβόρα διαδικασία, τη διαδικασία Czochralski, που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία ηλεκτρονικών. Παρόλο που τα φ/β στοιχεία από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο έχουν μεγάλη απόδοση, η διαδικασία παραγωγής τους είναι πολύ αργή, ενεργοβόρα και χρειάζεται εξειδικευμένο προσωπικό.

Τα φωτοβολταϊκά όμως, μπορούν να κατασκευαστούν από πυρίτιο λίγο χαμηλότερης ποιότητας και αγνότητας από αυτό των ηλεκτρονικών, χωρίς σημαντικές απώλειες στην απόδοση, αλλά με μειωμένο κόστος.

Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο αποτελείται από μικρούς κόκκους μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Φωτοβολταϊκά μπορούν να κατασκευαστούν από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο με πολλούς τρόπους, ένας από τους οποίους είναι η έκχυση χυτού πυριτίου σε καλούπια και έπειτα κοπή σε λεπτά δισκία. Τα φ/β από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο είναι πιο φθηνά στην κατασκευή τους, από το μονοκρυσταλλικό, αλλά είναι λιγότερο αποδοτικά, γιατί οι φορείς (ηλεκτρόνια και οπές) επανενώνονται στα όρια των κόκκων της πολυκρυσταλλικής δομής. Έχει παρατηρηθεί όμως, ότι με συγκεκριμένο τρόπο κατασκευής και τοποθέτησης των κόκκων η απόδοση μπορεί να αυξηθεί σημαντικά. Η πρόοδος αυτή, καθώς και άλλες καινοτομίες έχουν φτάσει την απόδοση των εμπορικών φ/β πλαισίων από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο πάνω από 14%.

Μερικές εταιρείες αναπτύσσουν μεθόδους να αποθέσουν μία πολυκρυσταλλική μεμβράνη σε κεραμικό υλικό ή γυαλί, φτιάχνοντας έτσι ένα φ/β με απόδοση περίπου 10%. Οι μεμβράνες αυτές είναι κάπως πιο παχιές από αυτές που χρησιμοποιούνται στα φ/β λεπτής μεμβράνης, γι' αυτό λέγονται και «παχιάς μεμβράνης» πολυκρυσταλλικά στοιχεία.



Σχήμα 36 : Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, το οποίο αποτελείται από τυχαία τοποθετημένους κόκκους μονοκρυσταλλικού πυριτίου.



### 3.4.2. Αρσενικούχου Γαλλίου (GaAs)

Το πυρίτιο δεν είναι το μόνο υλικό που κατασκευάζονται τα φωτοβολταϊκά. Ένα άλλο υλικό είναι το αρσενικούχο γάλλιο (GaAs), ή όπως λέγεται, σύνθετος ημιαγωγός. Το GaAs έχει μία κρυσταλλική δομή παρόμοια με αυτή του πυριτίου, αλλά που αποτελείται από εναλλασσόμενα άτομα γαλλίου και αρσενικού. Είναι αρκετά κατάλληλο για φωτοβολταϊκές εφαρμογές γιατί έχει υψηλό συντελεστή απορρόφησης, έτσι χρειάζεται μόνο ένα λεπτό στρώμα υλικού. Επίσης έχει φάσμα απορρόφησης μεγαλύτερο απ' αυτό του πυριτίου, κοντά στο θεωρητικό βέλτιστο για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στη γη. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι μπορούν να λειτουργήσουν σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες, χωρίς την μείωση της απόδοσης που παρατηρείται στα αντίστοιχα στοιχεία από πυρίτιο και αυτό τα κάνει κατάλληλα για εφαρμογές σε συγκεντρωτικά φ/β συστήματα.

Τα βασικά τους μειονεκτήματα όμως είναι ότι η διαδικασία παραγωγής τους δεν είναι τόσο προηγμένη, καθώς και ότι το γάλλιο και το αρσενικό δεν υπάρχουν σε αφθονία σαν υλικά. Γι' αυτό, τα στοιχεία από GaAs έχουν επιλεγεί σε εφαρμογές που ενδιαφέρει κυρίως η υψηλή απόδοση και όχι τόσο το κόστος, όπως οι διαστημικές εφαρμογές.

### 3.4.3. Λεπτής Μεμβράνης (Thin Film)

#### 3.4.3.1. Άμορφου Πυριτίου (a-Si)

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να κατασκευαστούν από πολύ λεπτές μεμβράνες πυριτίου, σε μια μορφή γνωστή ως άμορφο πυρίτιο (a-Si), στην οποία τα άτομα του πυριτίου είναι πολύ λιγότερο πειθαρχημένα απ' ότι στις μορφές του πυριτίου που περιγράψαμε παραπάνω. Στο άμορφο πυρίτιο δεν είναι όλα τα άτομα δεμένα με τα γύρω τους, έτσι μένουν «ταλαντευόμενοι δεσμοί», που μπορούν να απορροφήσουν τα επιπλέον ηλεκτρόνια, θέτοντας την ένωση p-n ανεπαρκή. Παρ' όλα αυτά, ο τρόπος κατασκευής του στοιχείου από άμορφο πυρίτιο λύνει το παραπάνω πρόβλημα. Στη διαδικασία αυτή, ένα αέριο που περιέχει πυρίτιο και υδρογόνο, καθώς και μία μικρή ποσότητα πρόσμιξης (όπως Βόριο) επεξεργάζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να αποθέσει μία λεπτή μεμβράνη στο κατάλληλο υπόστρωμα. Το υδρογόνο που περιέχεται στο αέριο προσφέρει επιπρόσθετα ηλεκτρόνια, ώστε να ενωθούν με τους «ταλαντευόμενους» δεσμούς και να σχηματίσουν, τελικά, ένα κράμα πυριτίου και υδρογόνου. Η πρόσμιξη λειτουργεί με τον γνωστό τρόπο συνεισφοράς φορέων.

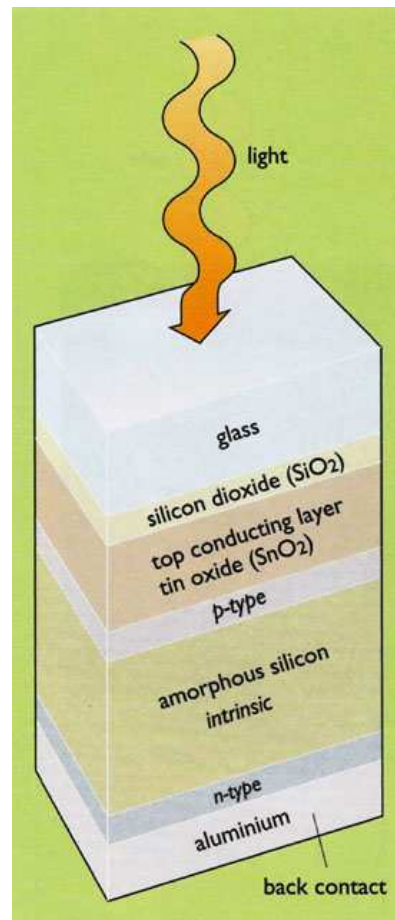
Τα ηλιακά στοιχεία άμορφου πυριτίου έχουν μία κάπως διαφορετική μορφή ένωσης μεταξύ του υλικού p- και του υλικού n-. Μία ένωση, που λέγεται «p-i-n» σχηματίζεται συνήθως, αποτελούμενη από ένα εξαιρετικά λεπτό στρώμα άμορφου πυριτίου τύπου p, ακολουθούμενο από ένα ενδογενές (i – intrinsic) παχύτερο στρώμα φτιαγμένο από a-Si χωρίς προσμίξεις και μετά από ένα πολύ λεπτό στρώμα a-Si τύπου n. Η δομή αυτή φαίνεται και στο σχήμα 37. Η φ/β λειτουργία στο άμορφο πυρίτιο είναι παρόμοια με του κρυσταλλικού πυριτίου, μόνο που το φάσμα απορρόφησης, παρόλο που είναι ευρύτερο, δεν είναι σαφώς καθορισμένο.

Τα στοιχεία από άμορφο πυρίτιο είναι αρκετά φτηνότερα στην παραγωγή τους από αυτά που φτιάχνονται από κρυσταλλικό πυρίτιο. Επίσης, το άμορφο πυρίτιο απορροφά πολύ καλύτερα το φως, γι' αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο λεπτά (και πιο φθηνά) στρώματα. Η διαδικασία κατασκευής τους απαιτεί χαμηλότερες θερμοκρασίες και συνεπώς λιγότερη ενέργεια και μπορούν να αποτεθούν σε μεγάλη γκάμα υλικών, όπως χάλυβα, γυαλί και πλαστικό.

Όμως τα στοιχεία από a-Si είναι προς το παρόν πολύ λιγότερο αποδοτικά από τα αντίστοιχα κρυσταλλικού πυριτίου, καθώς η μέγιστη απόδοση που έχει επιτευχθεί εργαστηριακά σε στοιχεία a-Si μονής ένωσης είναι της τάξης του 12%. Εκτός αυτού, η απόδοση των πλαισίων a-Si μονής ένωσης που είναι διαθέσιμα προς το παρόν, μετά από μερικούς μήνες έκθεσης σε ηλιακή ακτινοβολία υποβιβάζεται από το αρχικό 6-10% και σταθεροποιείται περίπου στο 4-8%. Σθεναρές προσπάθειες έχουν γίνει από τους κατασκευαστές για να αυξηθεί η απόδοση των στοιχείων από a-Si, και να λυθεί



το πρόβλημα της υποβίβασης της. Μία από αυτές είναι η ανάπτυξη στοιχείων με τεχνική πολλαπλών ενώσεων (multi-junction – παράγραφος 3.4.4.).



Σχήμα 37 : Η δομή ενός στοιχείου άμορφου πυριτίου. Η επάνω ηλεκτρική επαφή είναι φτιαγμένη από ένα ηλεκτρικά αγώγιμο, αλλά διαφανές, στρώμα οξειδίου του κασσίτερου που έχει αποτεθεί στο γυαλί. Το διοξείδιο του πυριτίου σχηματίζει ένα λεπτό «οριακό στρώμα» μεταξύ του γυαλιού και του οξειδίου του κασσίτερου. Η κάτω επαφή είναι φτιαγμένη από αλουμίνιο. Μεταξύ τους είναι στρώματα από τύπου p, i και n άμορφο πυρίτιο.

### 3.4.3.2. CIS - CIGS - CdTe

Το άμορφο πυρίτιο δεν είναι το μοναδικό υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή φ/β λεπτής μεμβράνης. Από τις υπόλοιπες τεχνολογίες λεπτής μεμβράνης, οι πιο ελπιδοφόρες είναι αυτές που βασίζονται σε σύνθετους ημιαγωγούς και συγκεκριμένα σε ημιαγωγούς από δισεληνίο χαλκοϊνδίο ( $\text{CuInSe}_2$  – συνήθης συντομογραφία CIS), δισεληνίο χαλκοϊνδιογάλλιο (CIGS) και τελλουρίδιο του καδμίου ( $\text{CdTe}$ ). Πλαίσια με αυτά τα υλικά έχουν φτάσει το στάδιο της παραγωγής, αλλά οι όγκοι παραγωγής είναι μικροί. Στοιχεία λεπτής μεμβράνης από CIGS έχουν φτάσει την υψηλότερη απόδοση από όλα τα στοιχεία λεπτής μεμβράνης, περίπου 17% εργαστηριακά, ενώ πλαίσια CIGS με σταθερή απόδοση 10% παράγονται από κάποιες εταιρείες.

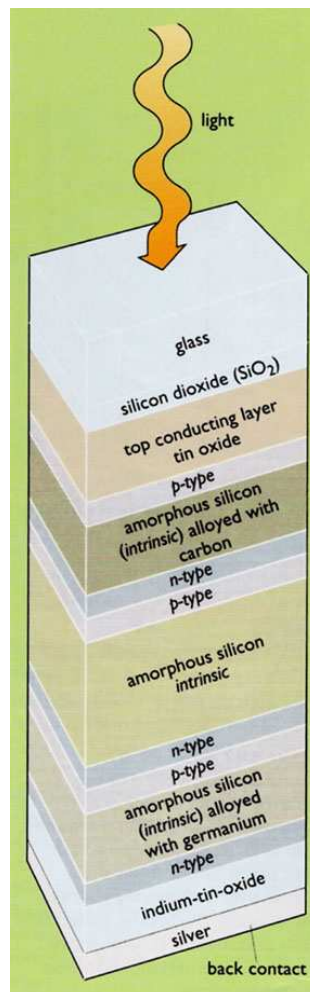
Τα πλαίσια από κάδμιο-τελλούριο μπορούν να κατασκευαστούν με χρήση μίας σχετικά απλής και φθηνής διαδικασίας τύπου γαλβανισμού. Το φάσμα απορρόφησης του  $\text{CdTe}$  είναι κοντά στο βέλτιστο και υποστηρίζεται ότι μπορεί να έχει απόδοση 10%, χωρίς την αρχική υποβάθμιση που παρατηρείται στα στοιχεία a-Si. Παρ' όλα αυτά, τα στοιχεία περιέχουν κάδμιο, μια ουσία υψηλά τοξική, έτσι πρέπει να λαμβάνονται πολύ αυστηρές προφυλάξεις στην διάρκεια της κατασκευής, χρήσης και πιθανής απόρριψής τους. Γι' αυτόν τον λόγο, κάποιες εταιρείες έχουν αποσυρθεί από την παραγωγή τέτοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων.



### 3.4.4. Άλλοι τύποι φωτοβολταϊκών

Εκτός από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες, έχουν αναπτυχθεί και άλλες αρκετά καινοτόμες, όπως τα στοιχεία πολλαπλών ενώσεων (multi-junction PV cells), τα συγκεντρωτικά φ/β συστήματα, οι σφαίρες πυριτίου και τα φωτοηλεκτροχημικά 1 στοιχεία, οι οποίες αναλύονται παρακάτω.

Ένας τρόπος να αυξηθεί η απόδοση της φ/β μετατροπής είναι η προσέγγιση των στοιχείων πολλαπλών ενώσεων, όπου δύο ή περισσότερα στρώματα υλικού είναι στοιβαγμένα, και το κάθε στρώμα εξάγει ενέργεια από ένα συγκεκριμένο κομμάτι του φάσματος του εισερχόμενου φωτός. Για παράδειγμα, το φάσμα απορρόφησης του άμορφου πυριτίου μπορεί να αυξηθεί με την πρόσμιξη άνθρακα, ώστε το παραγόμενο υλικό να απορροφά καλύτερα στην μπλε άκρη του φάσματος. Η πρόσμιξη με γερμάνιο, από την άλλη μεριά, ελαττώνει το φάσμα απορρόφησης, ώστε το υλικό να ανταποκρίνεται καλύτερα στο κόκκινο άκρο του φάσματος. Έτσι, μία ένωση ευρέος φάσματος μπορεί να τοποθετηθεί από πάνω, ώστε να απορροφά τα φωτόνια υψηλής ενέργειας στο μπλε άκρο του φάσματος, ακολουθούμενο από άλλες ενώσεις a-Si, με κατάλληλο φάσμα απορρόφησης, ώστε να απορροφούν χαμηλότερες συχνότητες φωτός, πιο κοντά στο κόκκινο άκρο του φάσματος (σχήμα 38). Πλαίσιμα πολλαπλής ένωσης με άμορφο πυρίτιο είναι διαθέσιμα στην αγορά με σταθερές αποδόσεις της τάξης του 8%. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στοιχεία διαφορετικών τύπων, όπως αυτά στα οποία ένα λεπτό μονοκρυσταλλικό στρώμα είναι στριμωγμένο ανάμεσα από δύο στρώματα άμορφο πυριτίου. Αυτό δίνει πολύ μεγάλες αποδόσεις με μικρό κόστος υλικού και χαμηλή απαιτούμενη ενέργεια κατασκευής. Ένα άλλο παράδειγμα είναι ένα «δίδυμο» στοιχείο, που έχει ένα στρώμα από a-Si από πάνω, και ένα λεπτό στρώμα «μικροκρυσταλλικού» πυριτίου από κάτω (δηλαδή πυρίτιο σε μορφή υπερβολικά μικρών κρυστάλλων, διαμέτρου μικρότερης από ένα μικρόμετρο.).



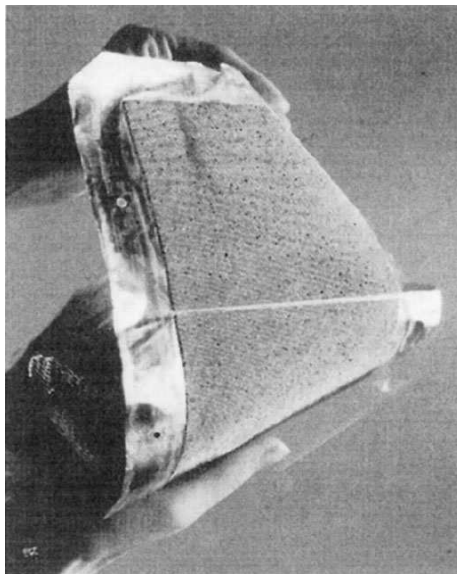
Σχήμα 38 : Η δομή ενός στοιχείου άμορφου πυριτίου πολλαπλής ένωσης.





Ένας άλλος τρόπος για να πάρουμε περισσότερη ενέργεια από ένα δεδομένο αριθμό φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι να χρησιμοποιηθούν καθρέφτες ή φακοί, για την συγκέντρωση της εισερχόμενης ακτινοβολίας στα στοιχεία, που έχει το πλεονέκτημα ότι χρειάζονται λιγότερα στοιχεία, εξαρτάται βέβαια από το βαθμό συγκέντρωσης, που μπορεί να φτάσει από δύο έως και μερικές εκατοντάδες φορές. Η επιφάνεια που πρέπει να καλύπτεται πρέπει να είναι ίση με αυτή ενός αντίστοιχου επίπεδου φ/β πλαισίου, για να συγκεντρώνεται η ίδια ενέργεια καθώς και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πρέπει να ψύχονται, παθητικά ή ενεργητικά, για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση. Τα συστήματα με την υψηλότερη συγκέντρωση χρησιμοποιούν έναν αριθμό από αισθητήρες, μηχανισμούς και κυκλώματα για να ακολουθούν τον ήλιο σε δύο άξονες, βεβαιώνοντας πως λαμβάνεται η μέγιστη δυνατή ηλιακή ακτινοβολία, ενώ αυτά με την μικρότερη συγκέντρωση χρησιμοποιούν πιο απλούς μηχανισμούς και ακολουθούν τον ήλιο σε έναν άξονα. Τέλος, τα περισσότερα τέτοια συστήματα μπορούν να εκμεταλλευτούν μόνο την απευθείας ηλιακή ακτινοβολία, πράγμα που αποτελεί πρόβλημα για χώρες όπως η Αγγλία, όπου σχεδόν η μισή ακτινοβολία είναι διάχυτη. Υπάρχουν, βέβαια και κάποια μη συμβατικά σχέδια που επιτρέπουν και μέρος της διάχυτης ακτινοβολία να συγκεντρώνεται.

Κάποια αμερικάνικη εταιρεία βρήκε έναν έξυπνο τρόπο να φτιάξει φ/β στοιχεία χρησιμοποιώντας μικροσκοπικές σφαίρες, μεγέθους χιλιοστού, από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο ενσωματωμένες σε κανονικά διαστήματα μεταξύ λεπτών φύλλων αλουμινίου. Μεταξύ των πλεονεκτημάτων αυτής της κατασκευής είναι ότι οι ατέλειες του πυριτίου τείνουν να διαχέονται προς την επιφάνεια της σφαίρας, απ' όπου μπορούν να αφαιρεθούν εύκολα. Αυτό επιτρέπει την χρήση πυριτίου σχετικά φθηνότερου και χαμηλότερης ποιότητας ως πρώτη ύλη και το αποτέλεσμα είναι φωτοβολταϊκά φύλλα, που είναι πολύ ευλύγιστα, το οποίο μπορεί να αποδειχθεί πολύ χρήσιμο σε κάποιες εφαρμογές. Αυτή η τεχνολογία εμπορευματοποιείται στον Καναδά, όπου είναι υπό κατασκευή μία εγκατάσταση 20MW<sub>p</sub>.



Σχήμα 39 : Φ/Β τεχνολογία «σφαιρών πυριτίου».

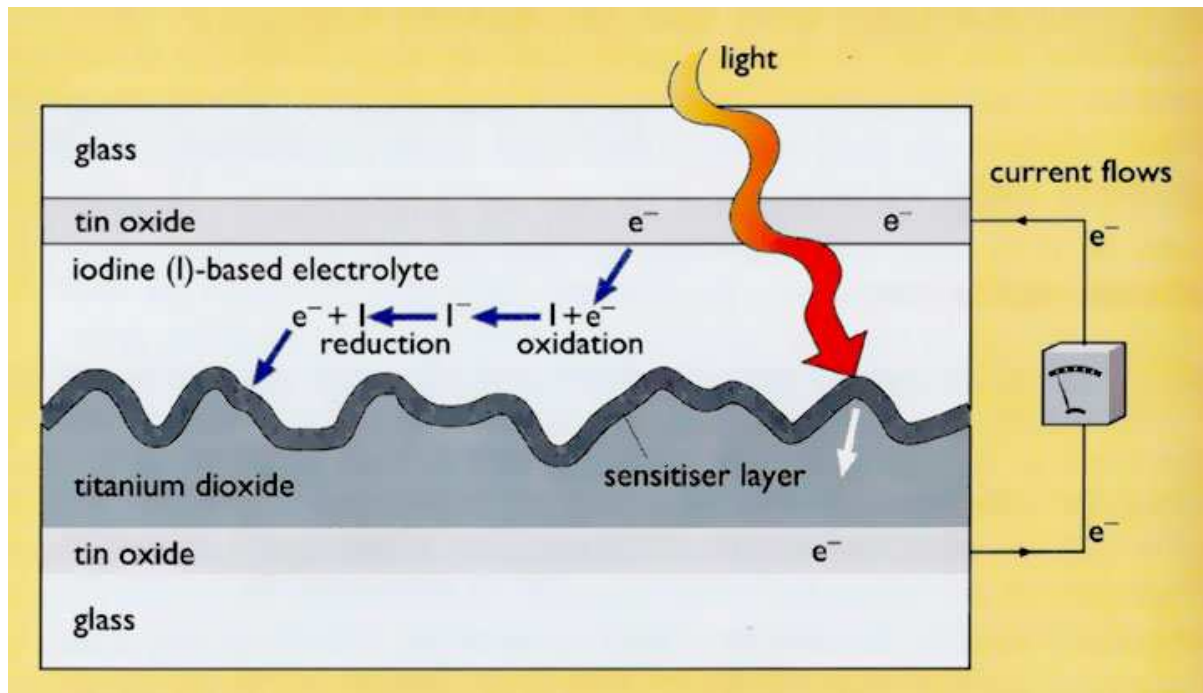
Μία τελείως διαφορετική, πρωτοπόρα, φωτοηλεκτροχημική προσέγγιση για την παραγωγή φθηνού ηλεκτρισμού από την ηλιακή ενέργεια παρουσιάστηκε από ερευνητές στην Ελβετία. Η ιδέα της χρήσης φωτοηλεκτροχημικών φαινομένων για την παραγωγή ενέργειας δεν είναι καινούργια, αντίθετα, τα πρωτοποριακά πειράματα του Becquerel ήταν πάνω σε συσκευές που χρησιμοποιούσαν υγρά (αυστηρά οι φωτοηλεκτροχημικές συσκευές δεν χαρακτηρίζονται ως φωτοβολταϊκά, καθώς ο όρος αυτός υπονοεί συσκευή στερεάς κατάστασης, ενώ οι φωτοηλεκτροχημικές συσκευές χρησιμοποιούν υγρά.). Οι ερευνητές πέτυχαν υψηλές αποδόσεις μετατροπής, με μία συσκευή που έχει εξαιρετικά χαμηλό κόστος παραγωγής. Βασικά αποτελείται από δύο λεπτές πλάκες γυαλιού, επικαλυμμένες με ένα λεπτό, διαφανές, ηλεκτρικά αγωγίμο στρώμα οξειδίου του κασσίτερου (σχήμα





40). Στη μία πλάκα έχει προστεθεί ένα λεπτό στρώμα διοξειδίου του τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ ), που είναι ημιαγωγός, και του οποίου η επιφάνεια έχει επεξεργαστεί ώστε να παρουσιάζει μεγάλη τραχύτητα, για μεγαλύτερη απορρόφηση του φωτός. Ακριβώς πάνω από το τραχύ στρώμα  $\text{TiO}_2$  είναι μία βαφή «ευαισθητοποιητή», πάχους μόνο ενός μορίου, φτιαγμένο από ένα μείγμα μετάλλων βασισμένο στο ρουθίνιο και το όσμιο. Μεταξύ αυτού και της άλλης πλάκας γυαλιού είναι ένας ηλεκτρολύτης βασισμένος στο ιώδιο. Με την απορρόφηση ενός φωτονίου κατάλληλου μήκους κύματος, το στρώμα ευαισθητοποιητή δίνει ένα ηλεκτρόνιο στην αγωγίμη λωρίδα του διοξειδίου του τιτανίου και τα ηλεκτρόνια που παράγονται με αυτόν τον τρόπο περνούν στο κάτω ηλεκτρόδιο, πηγαίνοντας στο εξωτερικό κύκλωμα και παράγοντας έργο. Στη συνέχεια επανέρχονται στο πάνω ηλεκτρόδιο, όπου εξαναγκάζουν μία οξειδοαναγωγική αντίδραση στο διάλυμα του ιωδίου, το οποίο προσφέρει ηλεκτρόνια στο στρώμα του ευαισθητοποιητή του  $\text{TiO}_2$ , επιτρέποντας στην διαδικασία να συνεχιστεί. Οι ερευνητές ισχυρίζονται πως έχουν επιτύχει αποδόσεις έως και 10% σε πλήρη ηλιακή ακτινοβολία (AM 1.5) και ότι τα στοιχεία τους παραμένουν σταθερά για μεγάλες περιόδους, παρόλο που μερικοί άλλοι ερευνητές αμφιβάλλουν γι' αυτό.

Τέλος, έρευνα γίνεται πάνω στα φωτοβολταϊκά στοιχεία «τρίτης γενιάς», που είναι κυρίως βασισμένη στην ναυτεχνολογία. (τα κρυσταλλικά φ/β θεωρούνται «πρώτης γενιάς», ενώ τα φ/β λεπτής μεμβράνης, «δεύτερης γενιάς»). Αν αυτή η έρευνα αποδώσει, θα μπορούμε να επιτύχουμε πολύ μεγάλες αποδόσεις μετατροπής με πολύ μικρό κόστος.



Σχήμα 40 : Οι αρχές της λειτουργίας του φωτοηλεκτροχημικού «Στοιχείου Grätzel», το οποίο αναπτύχθηκε στο Ελβετικό Ομοσπονδιακό Ινστιτούτο Τεχνολογίας (Swiss Federal Institute of Technology), στη Λοζάννη.

### 3.5. Εφαρμογές Φωτοβολταϊκών

Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνονται κάποιες εφαρμογές που έχουν πραγματοποιηθεί με χρήση φωτοβολταϊκών. Όπως φαίνεται οι κυριότερες εφαρμογές προς το παρόν αφορούν απομονωμένα συστήματα, που είτε προτιμάται, είτε είναι αναγκαίο να έχουν μία αυτόνομη και κατά προτίμηση ανανεώσιμη πηγή τροφοδοσίας. Υπάρχουν, βέβαια και μεγάλες εγκαταστάσεις, της τάξεως των  $\text{MW}_p$ , που χρησιμεύουν στην υποβοήθηση του δικτύου ηλεκτροδότησης.



Σχήμα 41 : (αριστερά) Φ/Β παρκόμετρο, (μέση) σημαδόυρα ναυσιπλοΐας, (δεξιά) τηλεμετρικό σύστημα.



Σχήμα 42 : Το εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας ισχύος 340kW στο Kobern-Gondorf, στη Γερμανία μία από τις αρκετές μεγάλες εγκαταστάσεις Φ/Β συνδεδεμένες με το δίκτυο, που διευθύνεται από την εταιρεία ηλεκτρισμού RWE.



Σχήμα 43 : Η οροφή αυτού του βενζινάδικου στο Λονδίνο έχει μία μεγάλη Φ/Β συστοιχία που προσφέρει αρκετό ηλεκτρισμό για να δουλέψουν τα φώτα και οι αντλίες.



Σχήμα 44 : Σε αυτό το ηλιακό σπίτι στην Οξφόρδη, μία συστοιχία 4 kW<sub>p</sub>, συνδεδεμένη με το δίκτυο, από Φ/Β πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου σχηματίζουν ένα ενδογενές τμήμα της οροφής, μαζί με ηλιακούς συλλέκτες για θέρμανση νερού.





Η Φ/Β τεχνολογία, όπως και οι περισσότερες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, παρουσιάζει ιδιαιτερότητες κατά τη χρήση της που δυσχεραίνει τη σύγκριση της με συμβατικές τεχνολογίες. Για παράδειγμα:

- δεν υπάρχει σαφής τρόπος αποτίμησης του περιβαλλοντικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικές τεχνολογίες
- δεν είναι εύκολο να συγκριθεί η εξοικονόμηση σε συμβατικά καύσιμα γιατί τα ισοδύναμα συμβατικά ενεργειακά συστήματα λειτουργούν συνήθως με σπατάλη καυσίμου, ενώ τα Φ/Β συστήματα σχεδιάζονται κατά κανόνα με γνώμονα τη μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας
- το κόστος της ενέργειας από Φ/Β συστήματα εξαρτάται από το κόστος της αρχικής επένδυσης, ενώ το κόστος λειτουργίας και συντήρησης τους είναι σχεδόν μηδαμινό

Ένα βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας των Φ/Β είναι η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο σημείο χρήσης. Άλλα πλεονεκτήματα είναι τα παρακάτω:

- μηδενική ρύπανση της ατμόσφαιρας
- μεγάλη διάρκεια ζωής των Φ/Β πλαισίων (πάνω από 20 χρόνια)
- αθόρυβη λειτουργία
- χαμηλό κόστος μεταφοράς
- μηδαμινό κόστος συντήρησης και λειτουργίας
- δυνατότητα ενσωμάτωσης τους σε οροφές, προσόψεις κτιρίων ως κύρια δομικά στοιχεία σε περίπτωση έλλειψης χώρου
- δυνατότητα επέκτασης του συστήματος ανάλογα με τις ενεργειακές απαιτήσεις

Το κόστος των Φ/Β πλαισίων αποτελεί το μεγαλύτερο μειονέκτημα για την ευρεία εξάπλωση της Φ/Β τεχνολογίας. Επίσης η απαίτηση χρήσης συσσωρευτών για την αποθήκευση ενέργειας σε αυτόνομα συστήματα είναι ένας επιπλέον λόγος που αυξάνει το κόστος του συστήματος. Τέλος η απαίτηση χρήσης σχετικά μεγάλων επιφανειών για την εγκατάσταση τους λόγω της μικρής ειδικής ισχύος αποτρέπει την εφαρμογή τους όταν οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι υψηλές.

Παρόλα αυτά, σε αρκετές περιπτώσεις, όπως σε απομακρυσμένες περιοχές ή σε περιοχές όπου το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλό, τα Φ/Β αποτελούν την πλέον ενδεδειγμένη, τεχνικά αξιόπιστη και οικονομικά αποδεκτή λύση.

Τα τελευταία χρόνια η παγκόσμια αγορά των Φ/Β παρουσιάζει συνεχή αύξηση. Παρόλα αυτά η δυνατότητα παραγωγής τέτοιων συστημάτων εξακολουθεί να υπερκαλύπτει την ζήτηση αγοράς. Η παγκόσμια παραγωγή Φ/Β κατά το 2000 ανήλθε στα 280 MW<sub>p</sub>. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία του 1998, ποσοστό πάνω από 80% της παραγωγής αφορά την τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό αφορά άλλες τεχνολογίες όπως άμορφου πυριτίου, CIS, CdTe, κλπ. Το 1998 οι Η.Π.Α. παράγααν το 37% (58 MW<sub>p</sub>) της παγκόσμιας παραγωγής Φ/Β, η Ιαπωνία το 30% (48 MW<sub>p</sub>), και η Ευρώπη το 23% (36 MW<sub>p</sub>). Λόγω των κινήτρων και της αυξημένης δραστηριότητας στο χώρο των Φ/Β σε Ιαπωνία και Ευρώπη τα τελευταία χρόνια, η παραγωγή Φ/Β αυξήθηκε σημαντικά στις χώρες αυτές, με την δημιουργία νέων γραμμών παραγωγής. Στην Ιαπωνία το 1999 παράχθησαν 80 MW<sub>p</sub> Φ/Β, ενώ στην Ευρώπη για το τέλος 2000 εκτιμάται δυνατότητα παραγωγής 85 MW<sub>p</sub> Φ/Β πυριτίου ετησίως.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα απευθύνονται σε περιοχές εφαρμογών όπου το σχετικά υψηλό κόστος τους δεν αποτελεί σημαντικό εμπόδιο. Οι εφαρμογές συνήθως χαρακτηρίζονται από:

- χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις
- έλλειψη ή υψηλό κόστος εναλλακτικών μεθόδων παροχής ενέργειας
- ανάγκη αξιοπιστίας
- απαίτηση χαμηλού κόστους συντήρησης



Οι κυριότερες κατηγορίες εφαρμογών των Φ/Β είναι οι κάτωθι:

- Καταναλωτικά προϊόντα  
Οι εφαρμογές αυτές χαρακτηρίζονται από μικρή ισχύ και αφορούν προϊόντα ευρείας κατανάλωσης, όπως αριθμητικούς υπολογιστές, φακούς κλπ. αλλά και μικρά αυτόνομα συστήματα όπως π.χ. τροχόσπιτα, σκάφη αναψυχής, κ.ά.
- Εφαρμογές εκτός δικτύου  
Στην κατηγορία αυτή συγκαταλέγονται συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μεσαίου μεγέθους, για κατοικίες και μικρούς οικισμούς σε απομονωμένες περιοχές εκτός δικτύου. Άλλες πιθανές εφαρμογές είναι η χρήση τους για άντληση, αφαλάτωση νερού, φωτισμό δρόμων, καθοδική προστασία μεταλλικών κατασκευών και σωλήνων, σε φάρους, κλπ.
- Τηλεπικοινωνίες  
Τα συστήματα αυτά αποτελούν σημαντικό κομμάτι της αγοράς των εφαρμογών σε απομονωμένες περιοχές και αφορούν συστήματα για τη τροφοδοσία τηλεπικοινωνιακών αναμεταδοτών (ραδιοφώνου, τηλεόρασης, κινητής τηλεφωνίας κλπ.), συστημάτων σηματοδότησης κ.ά.
- Διασυνδεδεμένα συστήματα  
Στην κατηγορία αυτή ανήκουν συστήματα που συνδέονται απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο, και περιλαμβάνουν τις εφαρμογές ενσωμάτωσης Φ/Β σε κατοικίες ιδιωτών και δημόσια κτίρια, που αναπτύσσονται ραγδαία τα τελευταία χρόνια.
- Υβριδικά συστήματα  
Στην κατηγορία αυτή τα Φ/Β συστήματα χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με γεννήτρια πετρελαίου.
- Κεντρικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας  
Η κατηγορία αυτή χαρακτηρίζεται από τη μεγάλο μεγέθους εγκατεστημένη ισχύ.

Η κατανομή της παγκόσμιας αγοράς σε σχέση με το είδος εφαρμογών των Φ/Β συστημάτων, για το έτος 1999, παρουσιάζεται στο διάγραμμα του σχήματος 45.



Σχήμα 45 : Παγκόσμια αγορά Φ/Β συστημάτων σε σχέση με το είδος εφαρμογών.

Στα Ελληνικά νησιά όπου το πρόβλημα ηλεκτροδότησης είναι έντονο, υπάρχουν 31 αυτόνομοι ηλεκτρικοί σταθμοί της ΔΕΗ και το κόστος ανά kWh είναι πολύ υψηλότερο από την Ηπειρωτική Ελλάδα. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί, ότι για πολλά νησιά το κόστος ηλεκτροπαραγωγής κατά της ώρες αιχμής είναι δύο και τρεις φορές μεγαλύτερο από το μέσο κόστος. Αυτό δείχνει ότι η χρήση Φ/Β συστημάτων στα νησιά πιθανόν να αποτελέσει ανταγωνιστική πρόταση στο μέλλον και πιθανόν την πλέον συμφέρουσα λύση σε περιπτώσεις ενίσχυσης του τοπικού δικτύου της ΔΕΗ.



Τα τελευταία χρόνια έχει εκδηλωθεί έντονο ενδιαφέρον για εφαρμογές Φ/Β συστημάτων ενσωματωμένων σε κτίρια. Στις εφαρμογές αυτές τα Φ/Β συστήματα εγκαθίστανται σε κτίρια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενώ συγχρόνως τα Φ/Β πλαίσια χρησιμοποιούνται και σαν δομικά στοιχεία για τη κάλυψη εξωτερικών επιφανειών του κτιρίου, όπως π.χ. σε στέγες, προσόψεις, σκίαστρα κλπ. Επίσης μπορούν να εγκατασταθούν ομοίως και σε κατασκευές του ευρύτερου οικιστικού περιβάλλοντος, όπως σε υπαίθρια πάρκινγκ, στέγαστρα, ηχοπετάσματα κλπ. Συνήθως στις περιπτώσεις αυτές, επειδή υπάρχει διαθέσιμο τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο, τα Φ/Β συστήματα συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο, χωρίς συσσωρευτές.

Τα οφέλη από τη μεγάλης κλίμακας εφαρμογή των Φ/Β σε κτίρια είναι πολλαπλά. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β είναι η μόνη τεχνολογία που μπορεί να εφαρμοσθεί σε αστικό περιβάλλον με μηδενική ρύπανση. Επίσης, αυξάνεται σημαντικά το ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β, συμβάλλοντας στην επίτευξη των στόχων του Κιότο, για 8% μείωση των εκπομπών που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου έως το 2010, με βάση τα επίπεδα του 1990.

Με την εγκατάσταση των Φ/Β συστημάτων σε επιφάνειες κτιρίων αποφεύγεται η χρήση γης για το σκοπό αυτό. Εκτιμάται ότι το διαθέσιμο δυναμικό από την εκμετάλλευση κατάλληλων επιφανειών σε στέγες κτιρίων στην Ευρώπη ανέρχεται σε 618 GW<sub>p</sub>. Στην Ελλάδα η συνολική ηλιακά εκμεταλλεύσιμη επιφάνεια σε στέγες κτιρίων εκτιμάται στα 81 τ.χλμ.

Η παραγωγή από Φ/Β προκύπτει κατά τις ώρες αιχμής της ζήτησης, υποστηρίζοντας το σύστημα παραγωγής ενέργειας σε περιόδους υψηλού κόστους παραγωγής. Λόγω δε της κατανομημένης παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας στα σημεία ζήτησης μειώνονται οι απώλειες στο σύστημα μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος η αύξηση της αγοράς των Φ/Β αναμένεται να επιφέρει μείωση στο κόστος των Φ/Β συστημάτων.

Τέτοιου είδους συστήματα έχουν εγκατασταθεί διεθνώς σε μεγάλη κλίμακα, υποστηριζόμενα από Εθνικά Προγράμματα. Στη Γερμανία, η οποία είναι πρωτοπόρος στο τομέα αυτό, αφού ολοκληρώθηκε επιτυχώς το πρόγραμμα «1.000 στέγες» με την εγκατάσταση 2.500 συστημάτων 2-4 kW<sub>p</sub>, βρίσκεται σε εξέλιξη πρόγραμμα για την εγκατάσταση 100.000 συστημάτων σε στέγες, συνολικής ισχύος 300 MW<sub>p</sub>. Στην Ιαπωνία βρίσκεται σε εξέλιξη πρόγραμμα για την εγκατάσταση 70.000 συστημάτων. Ήδη έχουν εγκατασταθεί 35.000 συστήματα σε στέγες κατοικιών συνολικής ισχύος 120 MW<sub>p</sub>. Στις Η.Π.Α. έχει αναγγελθεί πρόγραμμα με στόχο τις 1.000.000 Ηλιακές στέγες. Αντίστοιχα προγράμματα υπάρχουν σε εξέλιξη και σε άλλες χώρες, όπως Ολλανδία, Ελβετία, Ισπανία, Αυστραλία, Ιταλία.

Για την εγκατάσταση των συστημάτων αυτών δίδονται τα κατάλληλα κίνητρα, όπως στη Γερμανία όπου δίδεται 10ετές άτοκο δάνειο, με τη τελευταία δόση να δωρίζεται, και, κυρίως, επιδοτείται η παραγόμενη Φ/Β kWh για 20 χρόνια. Η επιδότηση της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και τα μέτρα προώθησης που αφορούν την αρχική επένδυση θα μειώνονται καθώς τα Φ/Β συστήματα θα γίνονται φθηνότερα με το χρόνο.

Σαν αποτέλεσμα όλων αυτών των προγραμμάτων, οι εγκαταστάσεις διασυνδεδεμένων Φ/Β σε κτίρια γίνεται η κυρίαρχη εφαρμογή στο χώρο των Φ/Β. Ενώ το 1996 οι εφαρμογές διασυνδεδεμένων συστημάτων ήταν στην 6η θέση σαν κατηγορία με ποσοστό 7,8%, το 1999 ήταν στην πρώτη θέση με ποσοστό 30% της συνολικής ετήσιας εγκατεστημένης ισχύος, ενώ συνέβαλαν και στην αύξηση της συνολικής αγοράς των Φ/Β.

Το κύριο όφελος για τον εγκαταστάτη Φ/Β σε κτίρια είναι η χρήση των Φ/Β και σαν δομικά στοιχεία τα οποία αντικαθιστούν άλλα υλικά της εξωτερικής επιφάνειας των κτιρίων. Τα υλικά αυτά πολλές φορές έχουν σημαντικό κόστος, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται για τη κάλυψη προσόψεων των κτιρίων. Η εξοικονόμηση που προκύπτει από την αποφυγή αυτού του κόστους καθιστά οικονομικότερη τη χρήση των Φ/Β.

Οι κυριότερες εφαρμογές ενσωμάτωσης Φ/Β σε κτίρια είναι:

- κάλυψη ολόκληρης ή μέρους της στέγης του κτιρίου
- η χρήση τους σε υάλινες προσόψεις του κτιρίου
- η χρήση τους σε επιφάνειες προστασίας από καιρικές συνθήκες όπως στέγαστρα, σκίαστρα.





Παραδείγματα εφαρμογής τέτοιου είδους συστημάτων φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες. Στις εφαρμογές αυτές ιδιαίτερη προσοχή δίδεται στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό ώστε τα Φ/Β πλαίσια να δένουν αισθητικά με την αρχιτεκτονική του κτιρίου. Κατά τη φάση της σχεδίασης του Φ/Β συστήματος απαιτείται πλέον και η ενεργός συμμετοχή των αρχιτεκτόνων, ώστε να συνδυασθεί η τεχνική λύση με αποτελέσματα που πληρούν τους όρους της αισθητικής.



Σχήμα 46 : Φ/Β σε στέγη



Σχήμα 47 : Φ/Β σε πρόσοψη κτιρίου



Σχήμα 48 : Φ/Β σε στέγαστρο.

Για εγκατάσταση Φ/Β πλαισίων σε υπάρχουσες κατασκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα κοινά πλαίσια με το πλαίσιο αλουμινίου που διαθέτουν. Σε αυτήν τη περίπτωση απαιτείται μια πρόσθετη ενδιάμεση κατασκευή πάνω στην οποία θα πρέπει να τοποθετηθούν τα Φ/Β πλαίσια. Για εφαρμογές Φ/Β συστημάτων σε νέα κτίρια είναι προτιμότερα τα πλαίσια χωρίς το πλαίσιο αλουμινίου (τύπου «laminated») τα οποία επιτρέπουν την ενσωμάτωσή τους σαν δομικές επιφάνειες του κτιρίου. Η στήριξη των πλαισίων μπορεί να γίνει με ειδικά σχεδιασμένα υλικά ή με τυποποιημένα υλικά που χρησιμοποιούνται στην αγορά για τη στήριξη υαλοπινάκων.

Οι κατασκευαστές Φ/Β πλαισίων μπορούν να διαθέσουν ένα πλήθος προϊόντων τα οποία μπορούν να δώσουν ενδιαφέρουσες αρχιτεκτονικές λύσεις για την ενσωμάτωση των Φ/Β σε κτίρια. Τα τυποποιημένα Φ/Β πλαίσια είναι σχήματος ορθογώνιου παραλληλογράμμου και διαφόρων διαστάσεων. Ένα τυπικό Φ/Β πλαίσιο τεχνολογίας κρυσταλλικού πυριτίου επιφάνειας  $1 \text{ m}^2$  παράγει ισχύ  $110 \text{ W}_p$ , ενώ υπάρχουν Φ/Β πλαίσια μέχρι  $3 \text{ m}^2$ .

Επίσης πολλές κατασκευάστριες εταιρείες μπορούν να παράγουν Φ/Β κατά παραγγελία σε συγκεκριμένες διαστάσεις ή ακόμα και σε διαφορετικά γεωμετρικά σχήματα. Για εφαρμογές ενσωμάτωσης Φ/Β πλαισίων σε κτίρια διατίθενται και πλαίσια διαφόρων χρωμάτων και βαθμού διαφάνειας, σε βάρος όμως της απόδοσης. Επίσης οι κατασκευαστές διαθέτουν και ειδικά προϊόντα όπως Φ/Β πλαίσια που μπορούν να αντικαταστήσουν απευθείας κεραμίδια, ή άλλα συμβατικά υλικά που χρησιμοποιούνται για τη κάλυψη οροφών.

Τέλος, τα συστήματα στήριξης των Φ/Β πλαισίων θα πρέπει να πληρούν ορισμένες προϋποθέσεις, όπως γρήγορη και εύκολη προσαρμογή σε κτίρια, δυνατότητα εύκολης επέκτασης,



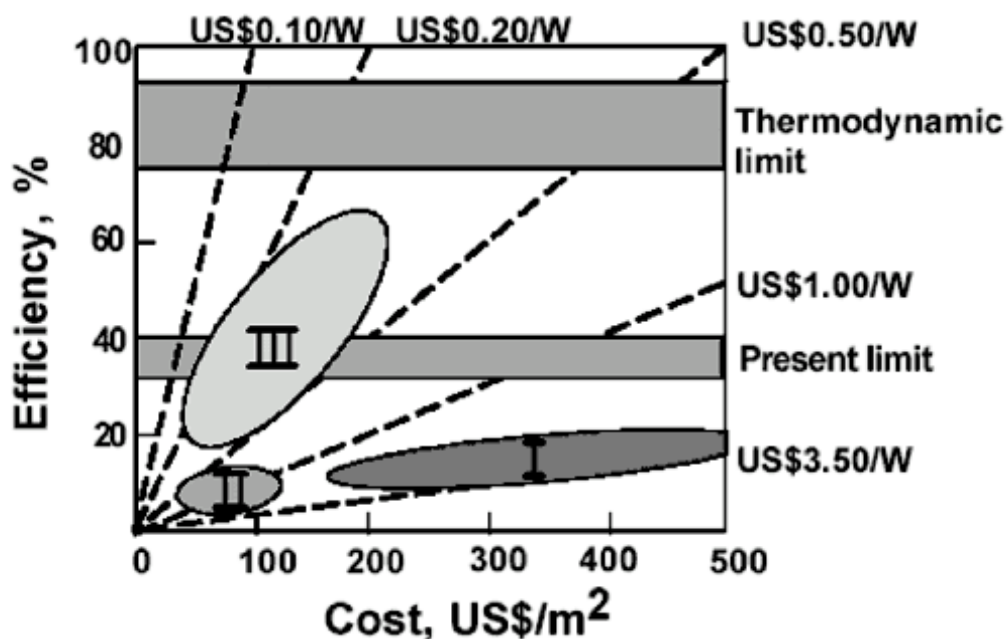


μεγάλο χρόνο ζωής χωρίς την ανάγκη συντήρησης, δυνατότητα αντικατάστασης μεμονωμένων πλαισίων, ανθεκτικότητα, ηλεκτρική μόνωση, εύκολη μεταφορά, και τέλος χαμηλό κόστος.

### 3.6. Προοπτικές Ανάπτυξης

Μέσα στα τελευταία 20 χρόνια, το κόστος των Ηλιακών Ενεργειακών Συστημάτων ελαττώθηκε κατά εφτά φορές. Πολλές κυβερνήσεις στην Ευρώπη όπως και η Ιαπωνία αναγνώρισαν τα ευρύτερα οικονομικά οφέλη του να είναι οι πρώτοι που οδηγούν μία τοπική αγορά και βιομηχανία ηλιακής ενέργειας. Ο κύριος λόγος που τα κόστη θα συνεχίσουν την καθοδική του πορεία δεν είναι η τεχνολογία (αν και μπορεί να βοηθήσει), αλλά ο όγκος παραγωγής. Όσο η αγορά συνεχίζει να αυξάνεται, τόσο τα κόστη θα κατέβουν περισσότερο και το ίδιο και οι χρόνοι οικονομικής απόσβεσης.

Παρ' όλο που η τεχνολογία των δισκίων πυριτίου είναι η κύρια της παρούσας βιομηχανίας φωτοβολταϊκών, τα κόστη των ενυπάρχοντων υλικών φαίνονται πολύ υψηλά για να γίνει αυτή η τεχνολογία ένας βασικός παίχτης στη σκηνή της παγκόσμιας μαζικής παραγωγής ενέργειας. Για να φτάσουν το πλήρες δυναμικό τους, τα φωτοβολταϊκά πρέπει να κάνουν μία μετάβαση σε τεχνολογία λεπτής μεμβράνης «δεύτερης γενιάς», πολύ λιγότερο βασισμένη στα υλικά και εν τέλει, σε μία «τρίτη γενιά» λεπτής μεμβράνης πολύ υψηλής απόδοσης. Εδώ περιγράφεται η πρόοδος σε ένα πρόγραμμα που έχει ως στόχο την «απόδειξη της ιδέας» για προσεγγίσεις λεπτής μεμβράνης υψηλής απόδοσης, στα επερχόμενα πέντε χρόνια.

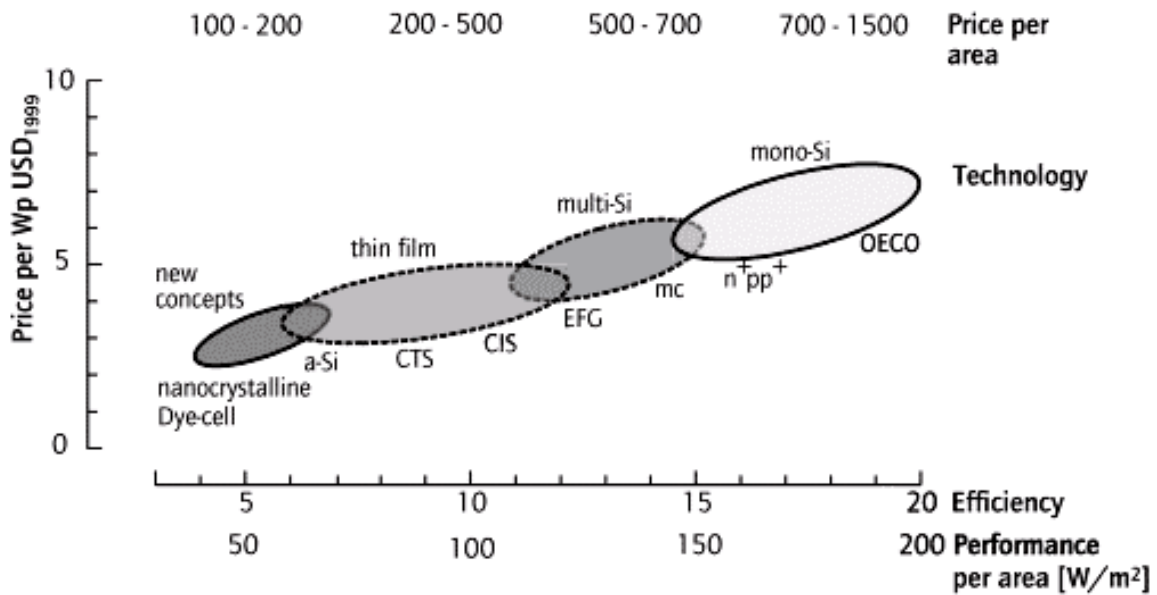


Σχήμα 49 : Οι περιοχές κόστους / απόδοσης για τις τρεις γενιές της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας : (I) δισκίων πυριτίου, (II) Λεπτής μεμβράνης, (III) εξελιγμένης λεπτής μεμβράνης.

Εάν μία τεχνολογία λεπτής μεμβράνης «δεύτερης γενιάς» μπορεί να φτάσει ή να ξεπεράσει τις προσδοκίες της αγοράς στις περιοχές της σταθερότητας, της ανθεκτικότητας, της μη-τοξικότητας και της απόδοσης ενεργειακής μετατροπής, σημαντικά χαμηλότερα κόστη θα γίνουν εφικτά. Όχι μόνον μπορούν τα κόστη των δισκίων να εξαλειφθούν, αλλά επίσης η πλαισίωση απλοποιείται σημαντικά, τουλάχιστον με τις πιο σταθερές προσεγγίσεις λεπτής μεμβράνης. Παρ' όλα αυτά, οι περισσότερες παρούσες προσεγγίσεις λεπτής μεμβράνης έχουν προβλήματα σε ένα ή περισσότερα από τα πεδία που ανέστειλαν την εμπορική επιδίωξη αυτού του πιθανού πλεονεκτήματος στο κόστος. Πρόσφατη πρόοδος σε αυτό το πεδίο, ιδιαίτερα με την πολύ αδρή προσέγγιση του «κρυσταλλικού



πυριτίου σε γυαλί» (CSG), μπορεί σύντομα να αλλάξει αυτή την κατάσταση. Η θερμοδυναμική δείχνει ότι το όριο απόδοσης καθορίζεται από το λόγο της ροής εντροπίας προς ενέργεια, της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Χάρη στην υψηλή θερμοκρασία της επιφάνειας του ήλιου, αυτό μεταφράζεται στο πολύ υψηλό θερμοδυναμικό όριο του 93% για απευθείας ηλιακή ακτινοβολία, και 74% για μη-κατευθυνόμενη ηλιακή ακτινοβολία. Για τα συνηθισμένα στοιχεία, αναπόφευκτες απώλειες μειώνουν το προαναφερθέν όριο στο 31%. Ο χώρος μεταξύ αυτών των δύο ορίων είναι η περιοχή που στοχεύουν τα φωτοβολταϊκά «τρίτης γενιάς».



Sources: NET Ltd. Switzerland, based on raw data from Durstewitz (1999),  
Systèmes Solaires/EurObserv'ER (2003); and Hoffmann / RWE Schott Solar GmbH.

Σχήμα 50 : Περιοχές κόστους / απόδοσης / ισχύος για διαφορετικές φωτοβολταϊκές τεχνολογίες.



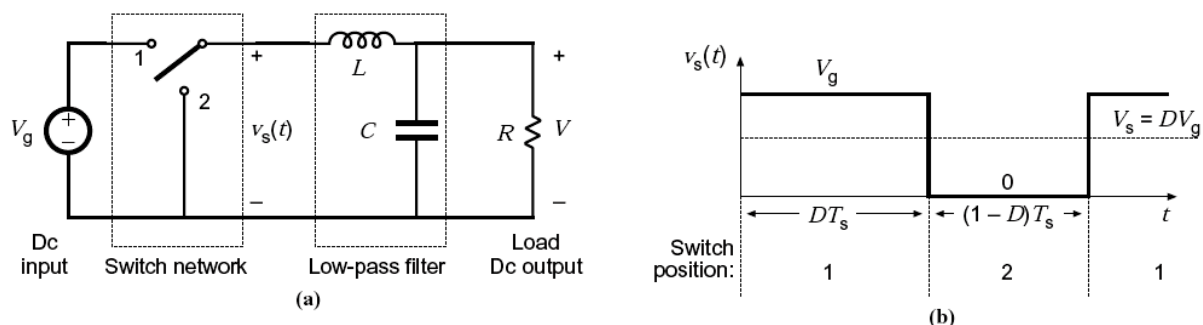
### 3.7. Βιβλιογραφία

- [1] Καραγιωργου Α.Α., Μπακα Π. Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Πανεπιστήμιο Κρήτης, **2003** ([http://www.materials.uoc.gr/courses/fisiki\\_II/ergfitit.htm](http://www.materials.uoc.gr/courses/fisiki_II/ergfitit.htm))
- [2] Καγκαράκης Κ. , Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, **1992**, pp. 2-6, 10, 11, 29-32, 39, 40, 46, 55,
- [3] Καλδέλης Ι.Κ., Καββαδίας Κ.Α. Εργαστηριακές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας, Εκδόσεις Σταμούλη Α.Ε., Αθήνα, **2001**, pp. 240-243, 246-251
- [4] Boyle G., Renewable Energy, Power For A Sustainable Future, 2<sup>nd</sup> Edition, Oxford University Press, **2004**, pp. 70,72, 75-82, 84, 86, 90, 91
- [5] “RENEWABLES FOR POWER GENERATION, Status & Prospects, 2003 Edition” International Energy Agency / Organization for Economic Co-operation and Development (OECD/IEA), **2003**
- [6] Green, Martin A., Centre of Excellence for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics, “THIRD GENERATION PHOTOVOLTAICS: THEORETICAL AND EXPERIMENTAL PROGRESS”, 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June **2004**, Paris, France
- [7] Νικολετάτος Ι., Πρωτογερόπουλος Χ., Τσελεπής Σ., Ζαχαρίου Α., Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία Εφαρμογές Στην Ελλάδα, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Μάρτιος **2001**, pp. 6-9.
- [8] <http://www.solarbuzz.com/Consumer/Payback.htm>



#### 4. Ηλεκτρονικά Ισχύος – Chopper (DC/DC converter)

Οι μετατροπείς ισχύος συνεχούς-συνεχούς (DC-DC) χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της τροφοδοσίας ισχύος για υπολογιστές, εξοπλισμό γραφείου, συστήματα ισχύος διαστημικών σκαφών, εξοπλισμό τηλεπικοινωνιών, καθώς και κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Η είσοδος σε έναν μετατροπέα DC-DC είναι μία ακανόνιστη συνεχής τάση  $V_g$ . Ο μετατροπέας παράγει μία ρυθμισμένη τάση εξόδου  $V$ , με μέγεθος (και πιθανόν πολικότητα) που διαφέρει από της  $V_g$ . Για παράδειγμα, σε μία τροφοδοσία υπολογιστή, η εναλλασσόμενη τάση 120V ή 240V του δικτύου, ανορθώνεται παράγοντας μία συνεχή τάση 170V ή 340V αντίστοιχα. Ένας μετατροπέας DC-DC τότε μειώνει αυτήν την τάση στη ρυθμισμένη 5V ή 3,3V που χρειάζεται ο επεξεργαστής. Υψηλή απόδοση χρειάζεται, χωρίς εξαίρεση, αφού η ψύξη μη αποδοτικών μετατροπέων ισχύος είναι δύσκολη και ακριβή. Ο ιδανικός μετατροπέας DC-DC παρουσιάζει απόδοση 100%, στην πράξη όμως, αποδόσεις από 70% έως 95% συνήθως επιτυγχάνονται. Αυτό πραγματοποιείται με την χρήση κυκλωμάτων μεθόδου διακοπής (switched-mode) ή τεμαχιστή (chopper), των οποίων τα στοιχεία καταναλώνουν αμελητέα ισχύ. Η διαμόρφωση του εύρους παλμού (pulse-width modulation – PWM) επιτρέπει τον έλεγχο και τη ρύθμιση της συνολικής τάσης εξόδου. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται και σε εφαρμογές που εμπλέκεται εναλλασσόμενο ρεύμα, συμπεριλαμβανομένων των μετατροπέων ισχύος συνεχούς-εναλλασσόμενου υψηλής απόδοσης (αντιστροφείς και ενισχυτές ισχύος), μετατροπείς εναλλασσόμενου-εναλλασσόμενου, καθώς και μερικούς μετατροπείς ισχύος εναλλασσόμενου-συνεχούς (ανορθωτές χαμηλών αρμονικών). Ένα βασικό κύκλωμα μετατροπέα, γνωστό ως *buck converter* φαίνεται στο σχήμα 51.



Σχήμα 51 : Ο μετατροπέας τύπου buck converter αποτελείται από ένα δίκτυο διακοπής που μειώνει το συνεχές στοιχείο της τάσης και ένα φίλτρο low-pass, που αφαιρεί τις αρμονικές της υψηλής συχνότητας διακοπής. (a) σχήμα, (b) κυματομορφή τάσης διακοπής.

Ένας μονοπολικός διακόπτης δύο θέσεων (single-pole double-throw – SPDT) είναι συνδεδεμένος στην τάση εισόδου  $V_g$ , όπως φαίνεται. Η τάση εξόδου του διακόπτη  $v_s(t)$  είναι ίση με την  $V_g$  όταν ο διακόπτης είναι στη θέση 1, ενώ είναι ίση με το μηδέν όταν ο διακόπτης είναι στη θέση 2. Η θέση του διακόπτη μεταβάλλεται περιοδικά, έτσι ώστε η  $v_s(t)$  είναι μία τετραγωνική κυματομορφή με περίοδο  $T_s$  και κύκλο απόδοσης  $D$  (από το duty cycle). Ο κύκλος απόδοσης είναι ίσος με το κλάσμα του χρόνου που ο διακόπτης είναι συνδεδεμένος στην θέση 1, συνεπώς  $0 \leq D \leq 1$ . Η συχνότητα διακοπής (switching frequency)  $f_s$  είναι ίση με  $1/T_s$ . Στην πράξη, ο διακόπτης SPDT πραγματοποιείται με τη χρήση ημιαγωγών όπως δίοδο, MOSFET ισχύος, IGBT, BJT, ή θυρίστορ. Τυπικές συχνότητες διακοπής κυμαίνονται μεταξύ 1kHz και 1MHz, ανάλογα με την ταχύτητα του ημιαγωγού. Το δίκτυο διακοπής αλλάζει τη συνεχή (DC) συνιστώσα της τάσης. Από ανάλυση Fourier, η συνεχή συνιστώσα μίας κυματομορφής δίνεται από την μέση τιμή της. Η μέση τιμή της  $v_s(t)$  δίνεται από την εξίσωση :

$$V_S = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} v_S(t) dt = DV_g \quad (\text{Εξ. 34})$$

Το ολοκλήρωμα είναι ίσο με την επιφάνεια κάτω από την κυματομορφή, ή με το ύψος της  $V_g$  πολλαπλασιασμένο επί  $DT_s$ . Μπορεί να παρατηρηθεί πως το δίκτυο διακοπής μειώνει τη συνεχή



συνιστώσα της τάσης κατά ένα συντελεστή ίσο με τον κύκλο απόδοσης  $D$ . Αφού  $0 \leq D \leq 1$ , η συνεχής συνιστώσα της τάσης  $V_S$  είναι ίση ή μικρότερη της  $V_g$ . Η ισχύς που καταναλώνεται από το δίκτυο διακοπής είναι ιδανικά ίση με το μηδέν. Όταν οι επαφές του διακόπτη είναι κλειστές, τότε η τάση μεταξύ των επαφών είναι ίση με το μηδέν και συνεπώς η κατανάλωση ισχύος είναι μηδέν. Όταν οι επαφές του διακόπτη είναι ανοιχτές, τότε το ρεύμα είναι μηδενικό και η κατανάλωση ισχύος είναι πάλι ίση με το μηδέν. Άρα, το ιδανικό δίκτυο διακοπής είναι ικανό να μετατρέπει τη συνεχή συνιστώσα της τάσης χωρίς κατανάλωση ισχύος. Εκτός από την επιθυμητή συνεχή συνιστώσα της τάσης  $V_S$ , η κυματομορφή διακοπής  $v_S(t)$  περιλαμβάνει επίσης και ανεπιθύμητες αρμονικές της συχνότητας διακοπής. Στις περισσότερες εφαρμογές, αυτές οι αρμονικές πρέπει να αφαιρούνται, έτσι ώστε η συχνότητα εξόδου του μετατροπέα  $v(t)$  να είναι ουσιαστικά ίση με της συνεχή συνιστώσα  $V=V_S$ . Ένα φίλτρο *low-pass* χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση. Ο μετατροπέας του σχήματος 51 περιέχει ένα φίλτρο *low-pass* L-C μονού μέρους (*single-section L-C low-pass filter*). Το φίλτρο έχει γωνιακή συχνότητα  $f_0$  που δίνεται από τον τύπο :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{Εξ. 35})$$

Η γωνιακή συχνότητα  $f_0$  επιλέγεται να είναι επαρκώς χαμηλότερη από την συχνότητα διακοπής  $f_S$ , ώστε το φίλτρο ουσιαστικά να περνά μόνο την συνεχή συνιστώσα  $v_S(t)$ . Στα όρια που το πηνίο και ο πυκνωτής είναι ιδανικά, το φίλτρο αφαιρεί τις αρμονικές διακοπής χωρίς κατανάλωση ισχύος. Άρα, ο μετατροπέας παράγει μία συνεχή τάση εξόδου, το μέγεθος της οποίας είναι ελεγχόμενο από τον κύκλο απόδοσης  $D$ , χρησιμοποιώντας στοιχεία κυκλώματος που (ιδανικά) δεν καταναλώνουν ισχύ.

Ο λόγος μετατροπής  $M(D)$  ορίζεται ως ο λόγος της συνεχούς τάσης εξόδου  $V$  προς την συνεχή τάση εισόδου  $V_g$ , κάτω από συνθήκες σταθερής κατάστασης :

$$M(D) = \frac{V}{V_g} \quad (\text{Εξ. 36})$$

Για τον μετατροπέα τύπου *buck converter*, το  $M(D)$  δίνεται ως :

$$M(D) = D \quad (\text{Εξ. 37})$$

Είναι φανερό πως η συνεχής τάση εξόδου  $V$  είναι ελεγχόμενη μεταξύ 0 και  $V_g$ , μέσω ρύθμισης του κύκλου απόδοσης  $D$ .

Ένας μεγάλος αριθμός κυκλωμάτων μετατροπέων DC-DC είναι γνωστός, που μπορούν να αυξήσουν ή να μειώσουν το μέγεθος της συνεχούς τάσης ή και να αντιστρέψουν την πολικότητά της. Το σχήμα 52 δείχνει αρκετά συχνά χρησιμοποιούμενα κυκλώματα μετατροπέων DC-DC, μαζί με τους αντίστοιχους λόγους μετατροπής τους. Σε κάθε παράδειγμα, ο διακόπτης πραγματοποιείται με τη χρήση MOSFET και διόδου. Όμως και άλλοι διακόπτες ημιαγωγών όπως IGBT, BJT, ή θυρίστρος μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υποκατάστατο, αν αυτό είναι επιθυμητό.

Ο πρώτος μετατροπέας είναι ο μετατροπέας που λέγεται *buck converter*, ο οποίος μειώνει την συνεχή τάση και έχει λόγο μετατροπής  $M(D) = D$ . Σε μία παρόμοια τοπολογία γνωστή ως *boost converter*, οι θέσεις του διακόπτη και του πηνίου αντιστρέφονται. Αυτός ο μετατροπέας παράγει μία τάση εξόδου  $V$  που είναι μεγαλύτερη σε εύρος από την τάση εισόδου  $V_g$ . Ο λόγος μετατροπής του είναι  $M(D) = 1/(1-D)$ .

Στον μετατροπέα που λέγεται *buck-boost converter*, ο διακόπτης εναλλακτικά συνδέει το πηνίο μεταξύ των τάσεων εισόδου ισχύος και εξόδου ισχύος. Αυτός ο μετατροπέας αντιστρέφει την πολικότητα της τάσης και μπορεί είτε να ανεβάσει, είτε να κατεβάσει το εύρος της τάσης. Ο λόγος μετατροπής είναι  $M(D) = -D/(1-D)$ .

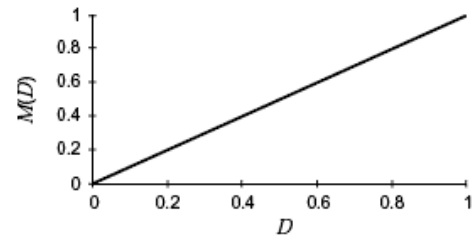
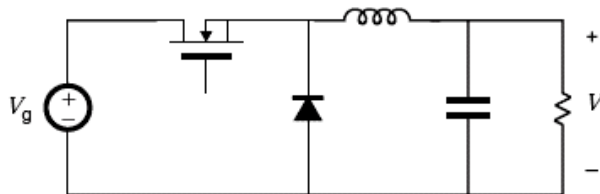
Ο μετατροπέας που λέγεται *Cuk converter* περιέχει πηνία σε σειρά με τις θύρες εισόδου και εξόδου του μετατροπέα. Το δίκτυο διακοπής διαδοχικά συνδέει έναν πυκνωτή στα πηνία εισόδου και εξόδου. Ο λόγος μετατροπής  $M(D)$  είναι όμοιος με αυτόν του μετατροπέα *buck-boost*. Συνεπώς,



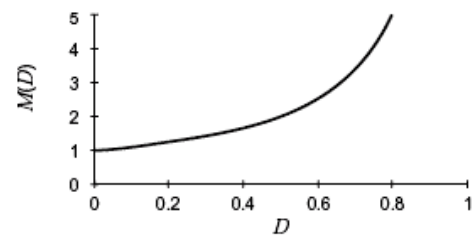
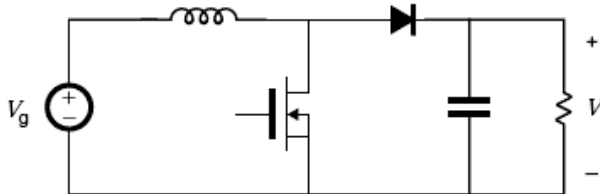
αυτός ο μετατροπέας επίσης αντιστρέφει την πολικότητα της τάσης, ενόσω είτε αυξάνει είτε μειώνει το εύρος της τάσης.

Ο μετατροπέας μονής άκρης πρωτεύοντος επαγωγής (Single-Ended Primary Inductance Converter – SEPIC) μπορεί επίσης είτε να ανεβάσει είτε να κατεβάσει το εύρος της τάσης, όμως δεν αντιστρέφει την πολικότητα. Ο λόγος μετατροπής είναι  $M(D) = D/(1-D)$ .

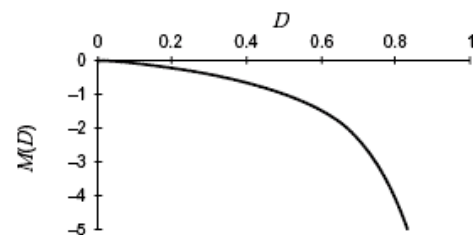
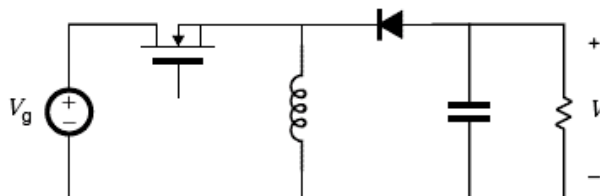
Buck converter



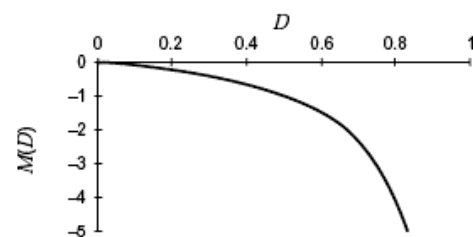
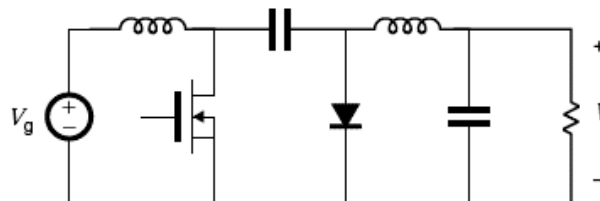
Boost converter



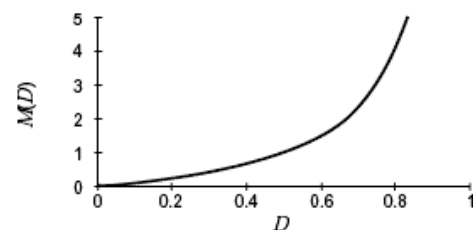
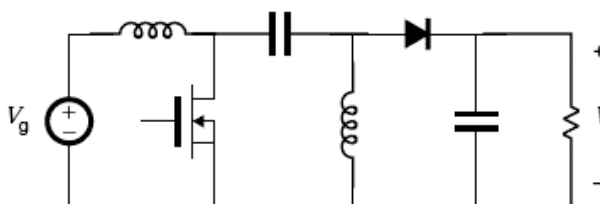
Buck-boost converter



Cuk converter



SEPIC

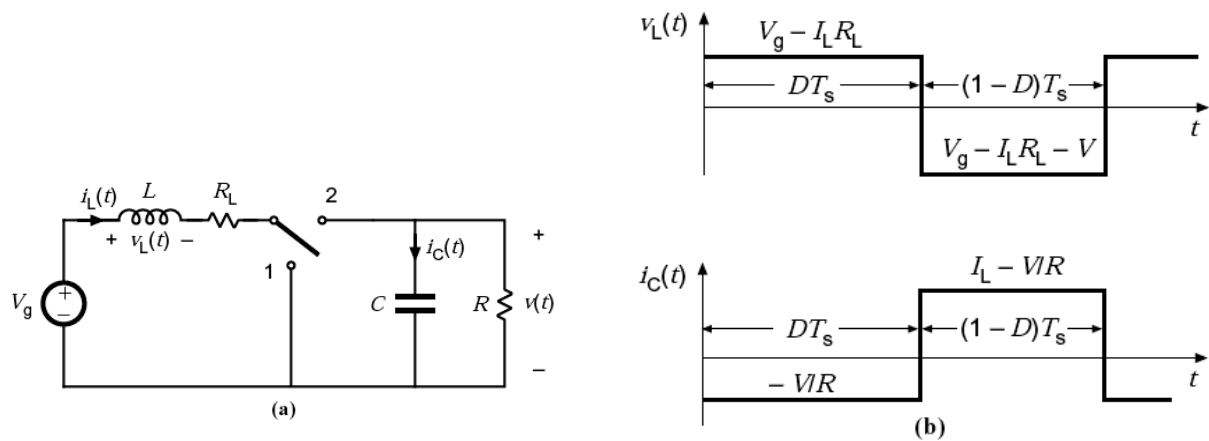


Σχήμα 52 : Κάποιοι βασικοί μετατροπείς DC-DC και οι λόγοι μετατροπής τους  $M(D) = V/V_g$ .

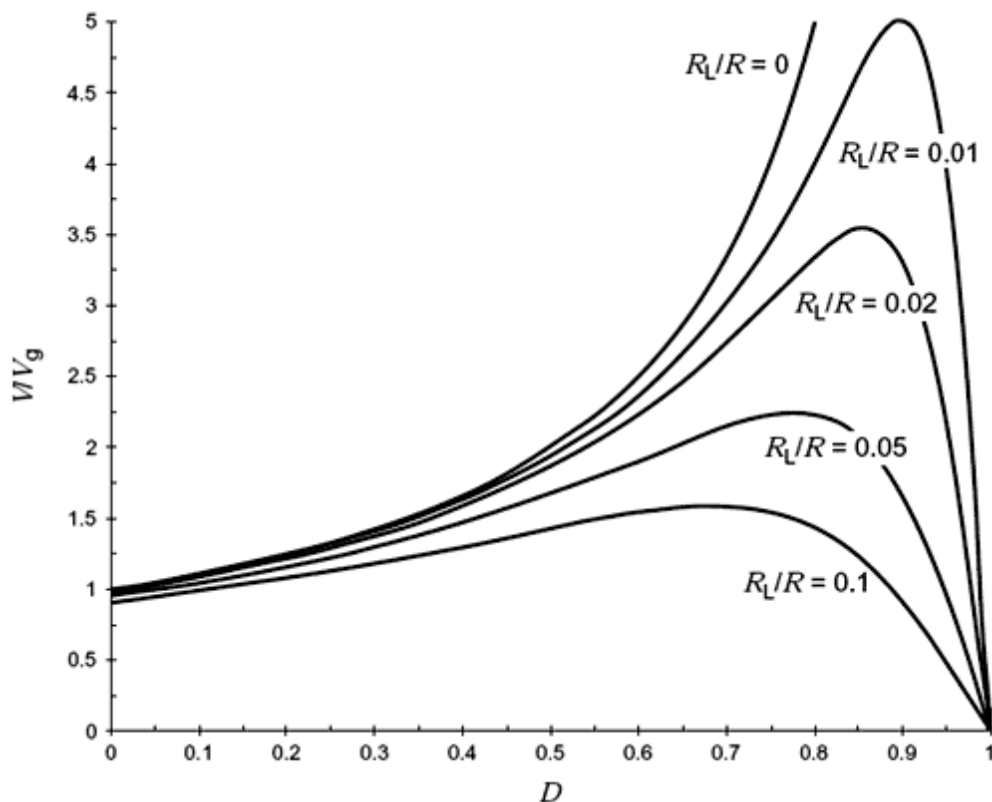




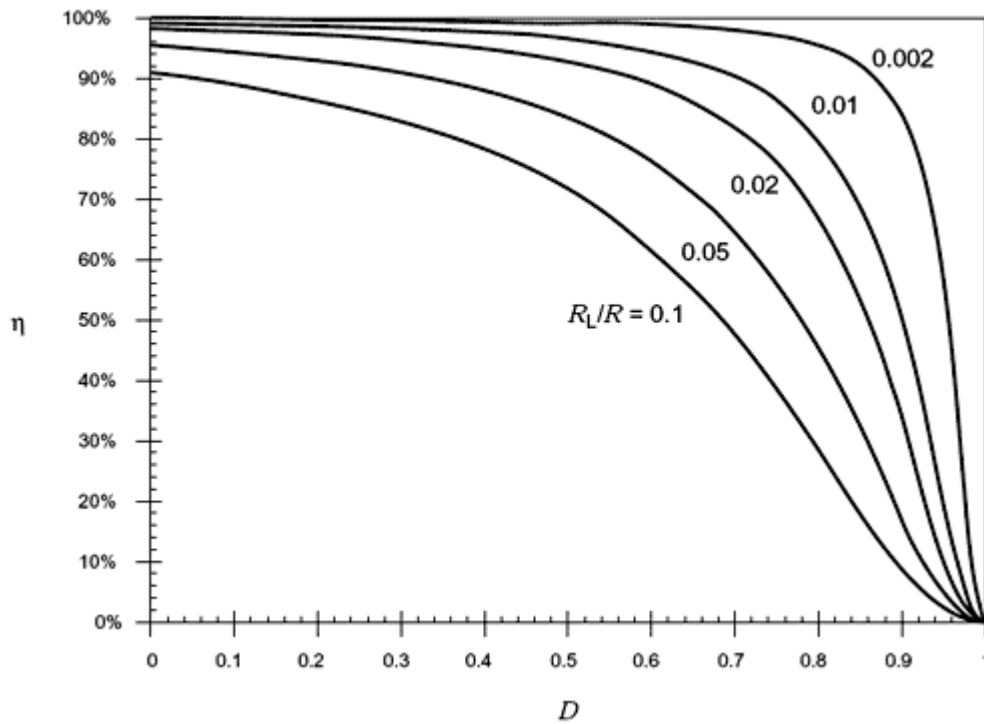
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται ένας μη-ιδανικός boost converter, οι κυματομορφές του καθώς και τα γραφήματα του κύκλου απόδοσης ως προς το λόγο τάσεων και ως προς την απόδοση του μετατροπέα.



Σχήμα 53 : Ένας μη ιδανικός μετατροπέας τύπου boost converter : (a) σχήμα, (b) κυματομορφές τάσης πηνίου και ρεύματος πυκνωτή.



Σχήμα 54 : Τάση εξόδου συναρτήσει του κύκλου απόδοσης D, για τον μη ιδανικό μετατροπέα του σχήματος 53.



Σχήμα 55 : Απόδοση συναρτήσει του κύκλου απόδοσης  $D$ , για τον μη ιδανικό μετατροπέα του σχ. 53.

Ας σημειωθεί εδώ πως ο τύπος μετατροπέα που χρησιμοποιήθηκε για την περάτωση των πειραμάτων αυτής της εργασίας ήταν τύπου *boost converter*.

- Βιβλιογραφία

- [1] Erickson R.W., “DC-DC Power Converters”, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Colorado, Boulder, CO 80309-0425, article in *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*.



## 5. Πειραματική Διαδικασία

### 5.1. Υλικά - Διατάξεις – Περιγραφή συστήματος

Τα υλικά και τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση των πειραμάτων είναι τα εξής :

#### Στοιχεία συστήματος :

1. FC01 - Mini Fuel Cell (αλκαλική κυψέλη καυσίμου διαλυτού καυσίμου.)
2. Μικρό φωτοβολταϊκό πλαίσιο, αποτελούμενο από τρία Φ/Β στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά, το καθένα με τάση ανοιχτού κυκλώματος 0,55V και ισχύ αιχμής ~16mW.
3. AU01 – DC/DC converter (chopper), για ανύψωση της τάσης εξόδου του συστήματος, βασισμένος στον μετατροπέα MAX757 της εταιρείας MAXIM.

#### Υλικά-όργανα για την κυψέλη καυσίμου :

1. Διαλύματα ηλεκτρολύτη (καυστικό κάλιο - KOH) συγκέντρωσης 1M, 2M, 3M, 4M και 5M για την λειτουργία της κυψέλης καυσίμου.
2. Μεθανόλη 99% χρησιμοποιούμενη ως καύσιμο για την κυψέλη καυσίμου.
3. Αιθανόλη 95% (φαρμακευτικό οινόπνευμα) χρησιμοποιούμενη ως καύσιμο για την κυψέλη καυσίμου.
4. Αιθανόλη ~ 40% (Τσικουδιά) χρησιμοποιούμενη ως καύσιμο για την κυψέλη καυσίμου.
5. Απιονισμένο νερό για την πλύση της κυψέλης καυσίμου μετά από κάθε πείραμα.
6. Ογκομετρικός κύλινδρος.

#### Όργανα μέτρησης :

1. Αμπερόμετρο εσωτερικής αντίστασης ~ 0,1Ω.
2. Βολτόμετρο εσωτερικής αντίστασης ~ 1MΩ.

#### Φορτία :

1. Αντιστάσεις τιμών 0.1Ω, 0.22Ω, 0.47Ω, 1Ω, 2.2Ω, 3.3Ω, 4.6Ω, 9.9Ω, 21.9Ω, 46.2Ω, 68.6Ω, 98.9Ω, 214.8Ω, 388.5Ω, 669Ω, 809Ω, 991Ω, 1.481KΩ, 2.151KΩ, 3.313KΩ, 9.78KΩ, 46.2KΩ, 97.5KΩ, 219.7KΩ. Οι τιμές των παραπάνω αντιστάσεων από 4.6Ω έως 219.7KΩ μετρήθηκαν με ωμόμετρο.
2. Μικρό ραδιόφωνο βέλτιστης τάσης λειτουργίας 3V και κατανάλωσης περίπου 20-60mW.
3. Ηλεκτρικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος, μικρής ισχύος.
4. Φωτοдиодος – LED τάσης λειτουργίας >2V περίπου.
5. Επαναφορτιζόμενη μπαταρία τάσης 2,4V και χωρητικότητας 100mAh.

#### Λοιπά στοιχεία :

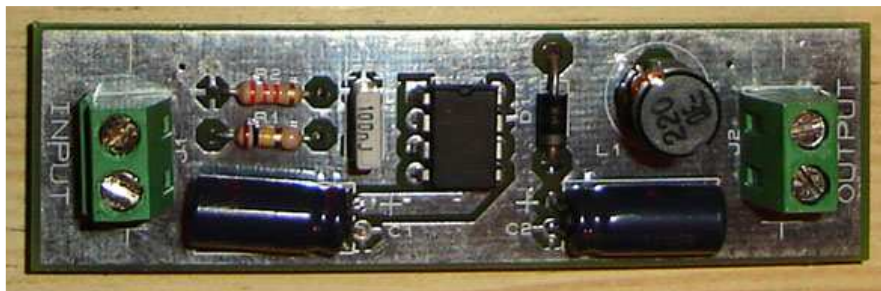
1. Καλώδια σύνδεσης.
2. Φωτιστικό με λαμπτήρα 60W για προσομοίωση της ηλιακής ακτινοβολίας, ώστε να υπάρχουν σταθερές συνθήκες για το φωτοβολταϊκό.
3. Γάντια προστασίας λόγω επικινδυνότητας των διαλυμάτων.



Σχήμα 56 : Αλκαλική Κυψέλη Καυσίμου



Σχήμα 57 : Φωτοβολταϊκό πλαίσιο



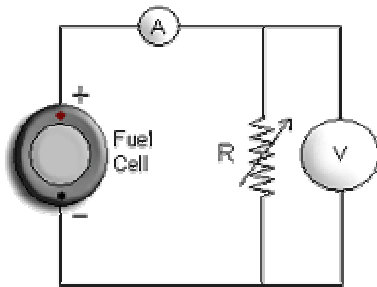
Σχήμα 58 : DC/DC converter



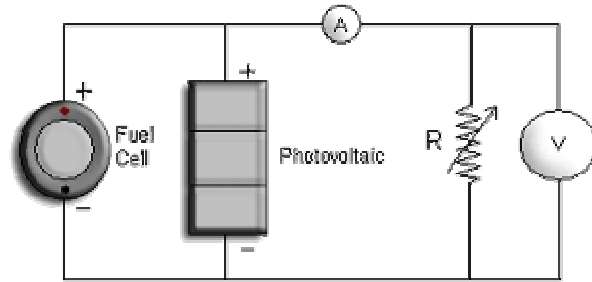
Σχήμα 59 : Το σύστημα συνδεδεμένο και σε λειτουργία.



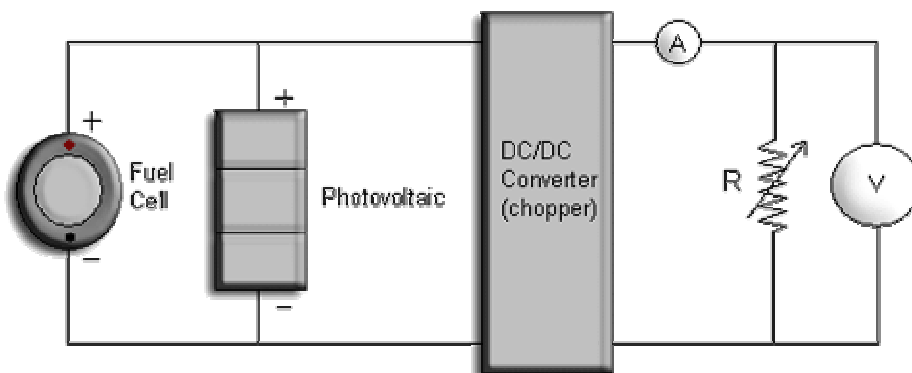
Οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση των μετρήσεων φαίνονται παρακάτω :



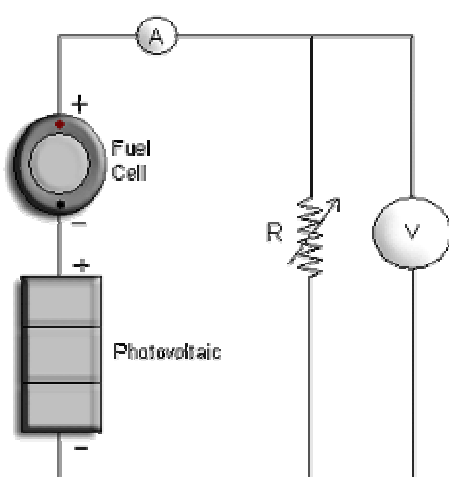
Σχήμα 60 : Μετρητική διάταξη κυψέλης καυσίμου.



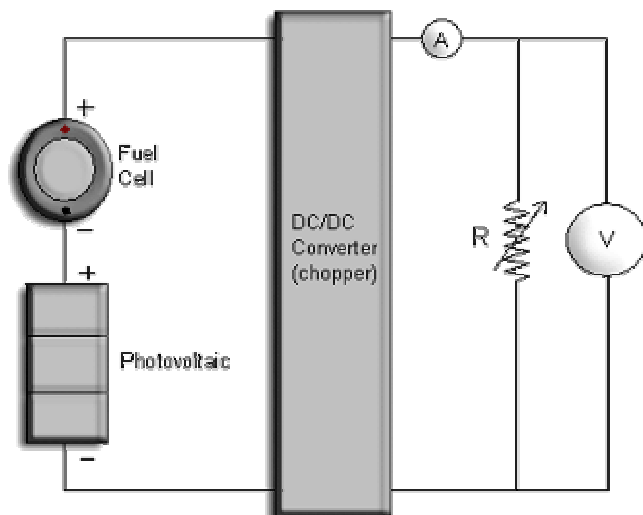
Σχήμα 61 : Μετρητική διάταξη κυψέλης καυσίμου παράλληλα με φωτοβολταϊκό.



Σχήμα 62 : Μετρητική διάταξη κυψέλης καυσίμου παράλληλα με φωτοβολταϊκό και ανύψωση της τάσης με DC/DC converter.



Σχήμα 63 : Μετρητική διάταξη κυψέλης καυσίμου σε σειρά με φωτοβολταϊκό



Σχήμα 64 : Μετρητική διάταξη κυψέλης καυσίμου σε σειρά με φωτοβολταϊκό και ανύψωση της τάσης με DC/DC converter

Το σύστημα έχει ως εξής : ως πηγές χρησιμοποιούνται η κυψέλη καυσίμου και, στις διατάξεις που το απαιτούν, ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Ως φορτίο χρησιμοποιούνται αντιστάσεις από 0,1 Ω έως 220 KΩ καθώς και κάποιες μικρές συσκευές. Όπου το σύστημα το απαιτεί (σε δύο από τις πέντε διατάξεις) χρησιμοποιείται DC/DC converter για να ανυψώσει την τάση του συστήματος περίπου στα 5V. Στην περίπτωση της παράλληλης σύνδεσης βέβαια η τάση δεν ανυψώνεται πάνω από τα 3,5-4V επειδή δεν επαρκεί η τάση εισόδου (~1V). Αυτό οφείλεται στην κατασκευή της συσκευής. Τέλος, για





την πραγματοποίηση της μέτρησης χρησιμοποιούνται ένα αμπερόμετρο (μικρής εσωτερικής αντίστασης ( $\sim 0,1\Omega$ ), για μεγαλύτερη αξιοπιστία της μέτρησης, αφού τα φορτία φτάνουν πολύ μικρές αντιστάσεις) καθώς και ένα βολτόμετρο. Το μεν αμπερόμετρο συνδέεται σε σειρά με την πηγή και το φορτίο («κόβει» το κύκλωμα), το δε βολτόμετρο συνδέεται παράλληλα με το φορτίο.

## 5.2. Διαδικασία μέτρησης

Η διαδικασία προετοιμασίας της κυψέλης καυσίμου έχει ως εξής :

- I. Μεταφέρονται 65ml ηλεκτρολύτη (KOH) της επιθυμητής συγκέντρωσης στον ογκομετρικό κύλινδρο.
- II. Μεταφέρονται 5ml του επιθυμητού καυσίμου (μεθανόλη / αιθανόλη / τσικουδιά) στον ογκομετρικό κύλινδρο.
- III. Αναδεύεται ελαφρώς ο ογκομετρικός κύλινδρος, για διάλυση του καυσίμου στον ηλεκτρολύτη.
- IV. Το μείγμα μεταφέρεται στο δοχείο της κυψέλης καυσίμου.

Όσον αφορά την διαδικασία μέτρησης, αρχικά συνδέονται οι πηγές και τα όργανα μέτρησης, με την εκάστοτε συνδεσμολογία και αν αυτή το απαιτεί, συνδέεται και ο μετατροπέας. Το πείραμα ξεκινάει από την καταγραφή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος του συστήματος. Έπειτα, συνδέεται και το φορτίο και, έπειτα από αναμονή κατάλληλου χρόνου για σταθεροποίηση κυρίως της τάσης, καταγράφεται η ένδειξη του βολτομέτρου και του αμπερομέτρου. Ο χρόνος αναμονής κυμαίνεται από 1 έως 5 λεπτά περίπου, ανάλογα με την αστάθεια που παρουσιάζει η μέτρηση. Σχετική αναφορά γίνεται παρακάτω (κεφ. 5.3.4). Πιο συγκεκριμένα, οι μετρήσεις για κάθε συνδυασμό συγκέντρωσης ηλεκτρολύτη και καυσίμου, καθώς και για κάθε διαφορετική διάταξη, γίνονται με την εξής σειρά :

- I. Μετράται η τάση ανοιχτού κυκλώματος του συστήματος ( $V_{OC}$ ).
- II. Συνδέεται η μεγαλύτερη αντίσταση και καταγράφονται οι ενδείξεις του βολτομέτρου και του αμπερομέτρου.
- III. Συνδέεται η αμέσως μικρότερη αντίσταση και καταγράφονται οι ενδείξεις του βολτομέτρου και του αμπερομέτρου. Αυτό το βήμα επαναλαμβάνεται μέχρι την αντίσταση τιμής  $0,1\Omega$ .
- IV. Μετράται το ρεύμα βραχυκυκλώματος ( $I_{SC}$ ).
- V. Τέλος, συνδέεται κάθε μία από τις προαναφερθείσες συσκευές ως φορτίο (ραδιόφωνο, κινητήρας, φωτοдиодος, μπαταρία) και καταγράφονται οι μετρήσεις τάσης και έντασης.

Οι διατάξεις για κάθε διαφορετικό συνδυασμό ηλεκτρολύτη και καυσίμου εναλλάσσονται με την σειρά που παρουσιάζονται στα παραπάνω σχήματα (60-64). Οι συνδυασμοί ηλεκτρολύτη και καυσίμου που χρησιμοποιήθηκαν στην κυψέλη καυσίμου, παρουσιάζονται παρακάτω :

- I. KOH συγκέντρωσης 1M και καύσιμο μεθανόλη 99%
- II. KOH συγκέντρωσης 4M και καύσιμο μεθανόλη 99%
- III. KOH συγκέντρωσης 1M και καύσιμο αιθανόλη 95%
- IV. KOH συγκέντρωσης 4M και καύσιμο αιθανόλη 95%
- V. KOH συγκέντρωσης 1M και καύσιμο αιθανόλη 40% περίπου (Τσικουδιά)
- VI. KOH συγκέντρωσης 4M και καύσιμο αιθανόλη 40% περίπου (Τσικουδιά)

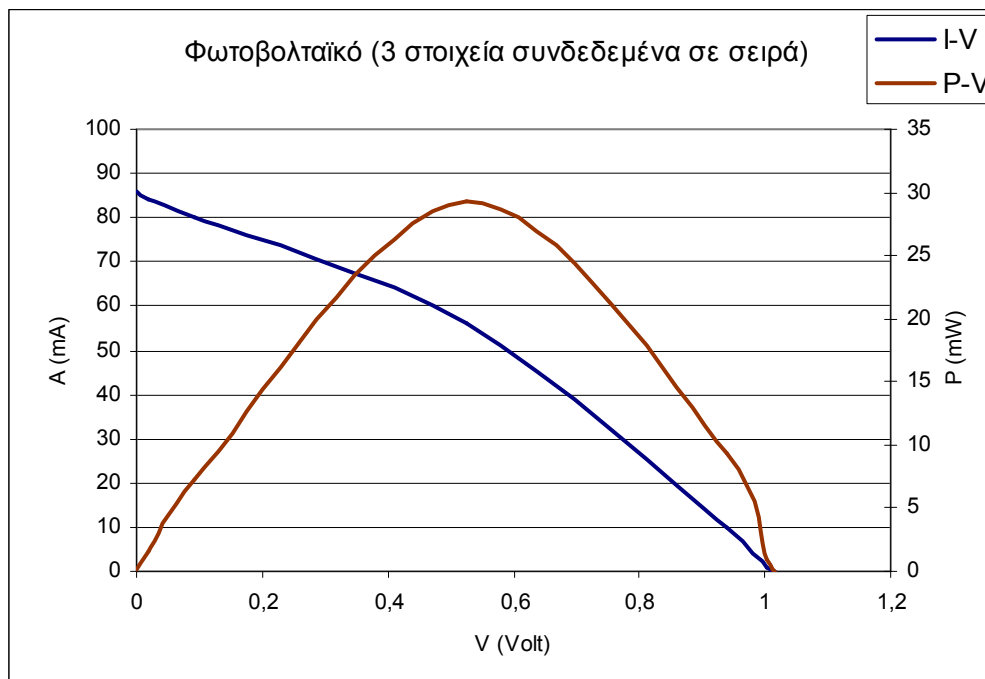
Επίσης, για την μελέτη της απόδοσης της κυψέλης καυσίμου σε διαφορετικές συγκεντρώσεις ηλεκτρολύτη, χρησιμοποιήθηκαν και οι συνδυασμοί διαλύματος μεθανόλης με KOH συγκέντρωσης 1M, 2M, 3M, 4M και 5M. Στους συνδυασμούς αυτούς έγιναν επίσης μετρήσεις με όλες τις διατάξεις. Τέλος, το σύνολο των μετρήσεων, εκτός των τελευταίων, πραγματοποιήθηκε τρεις φορές, για επαλήθευση και μεγαλύτερη αξιοπιστία.



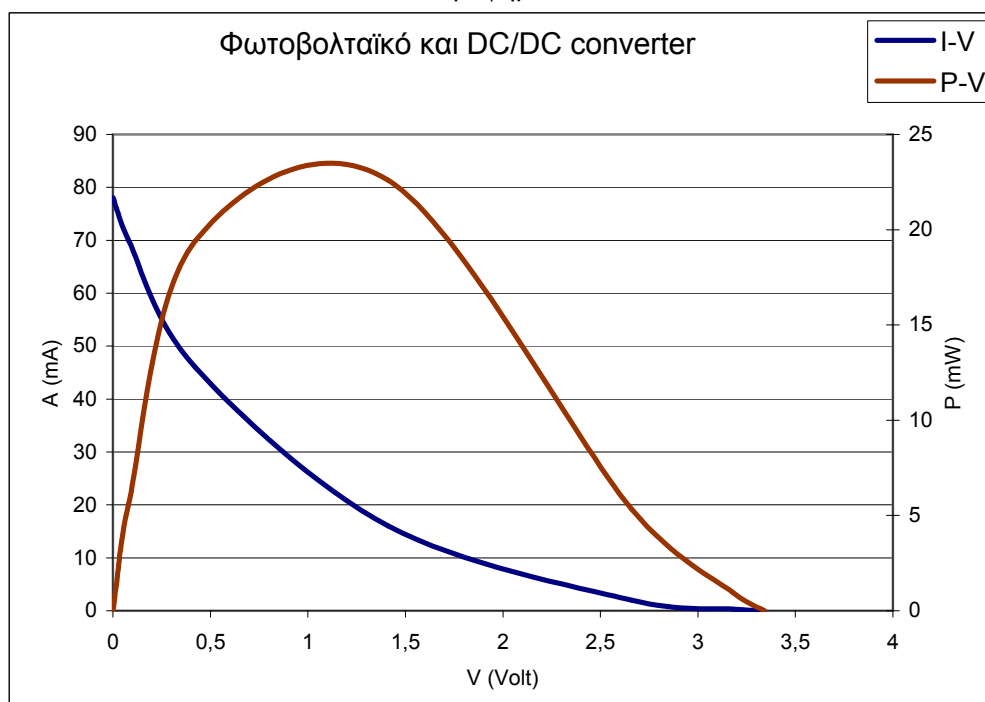
### 5.3. Αποτελέσματα μετρήσεων – πειραματικά δεδομένα

#### 5.3.1. Γραφήματα P – V και I – V

Παρακάτω παρουσιάζονται τα γραφήματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για το σύστημα που περιγράφηκε. Ας σημειωθεί πως κάποια γραφήματα παρουσιάζονται εις τριπλούν και αυτό γίνεται επειδή οι περισσότερες μετρήσεις έγιναν τρεις φορές για επαλήθευση. Γι' αυτό τον λόγο η αρίθμηση είναι η αντίστοιχη (π.χ. 1-α για την πρώτη επανάληψη, 1-β για τη δεύτερη και 1-γ για την τρίτη).



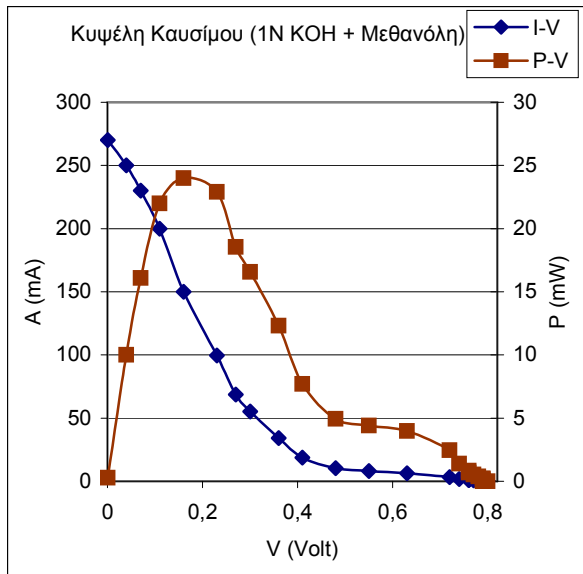
Γράφημα 1



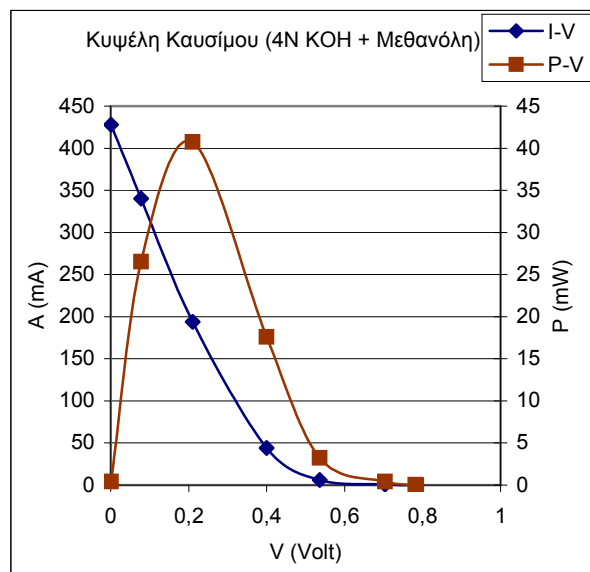
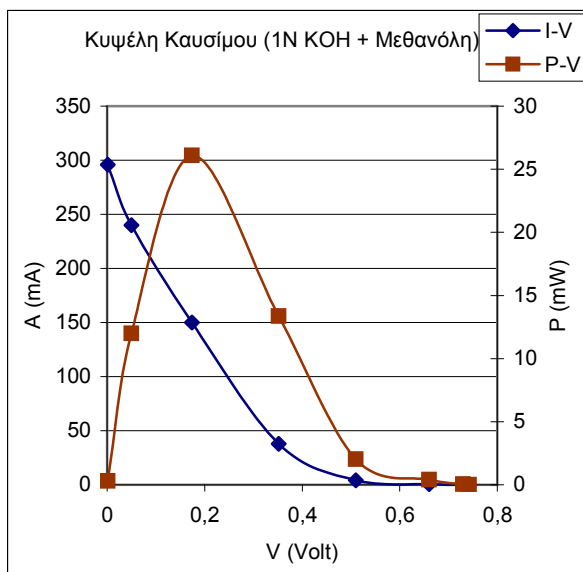
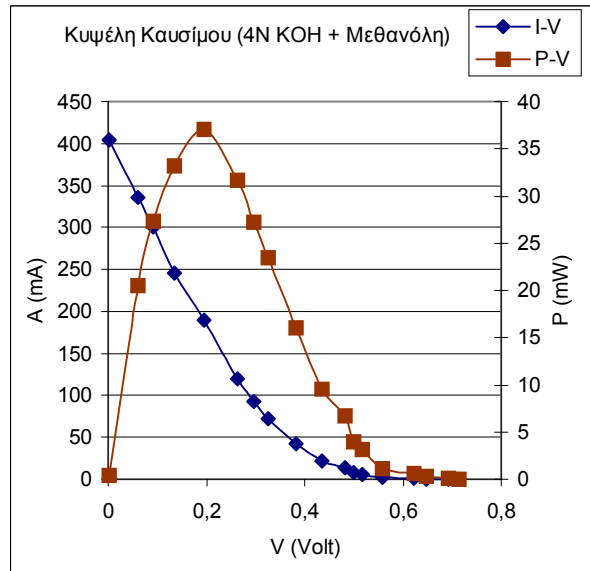
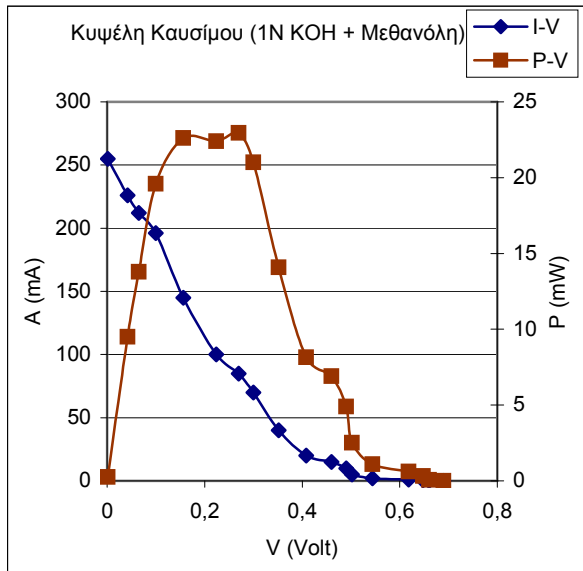
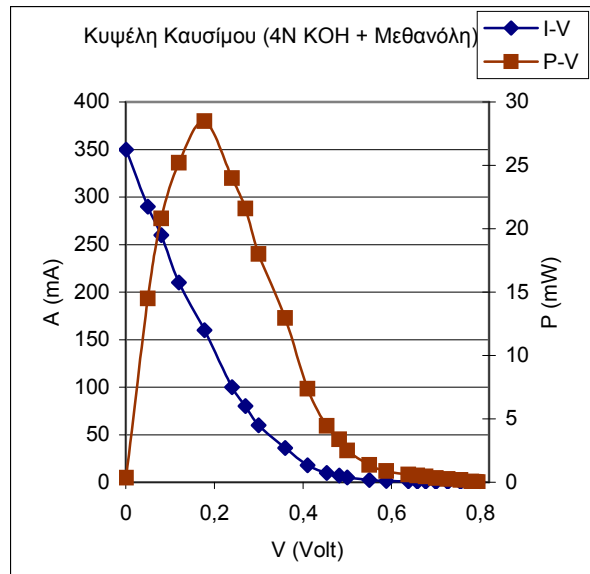
Γράφημα 2



Γραφήματα 1-α έως 1-γ

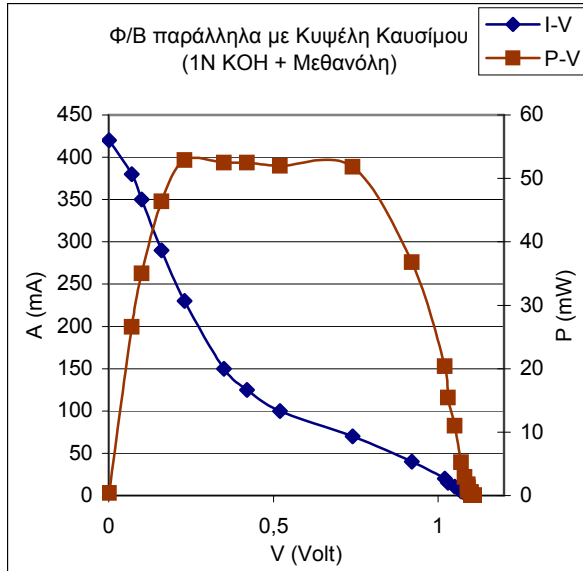


Γραφήματα 2-α έως 2-γ

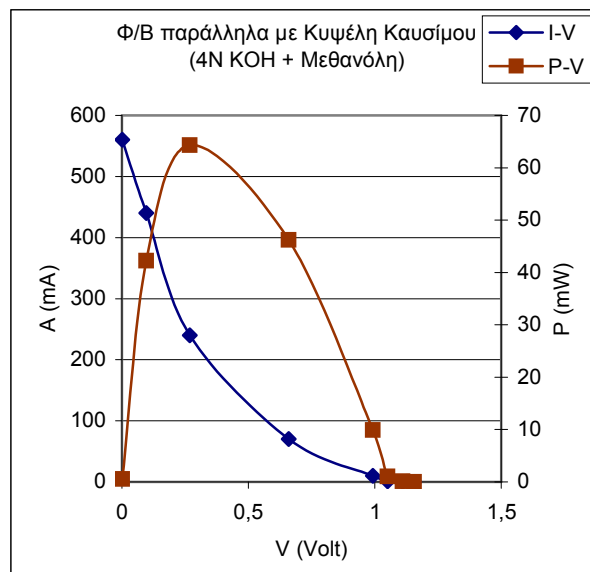
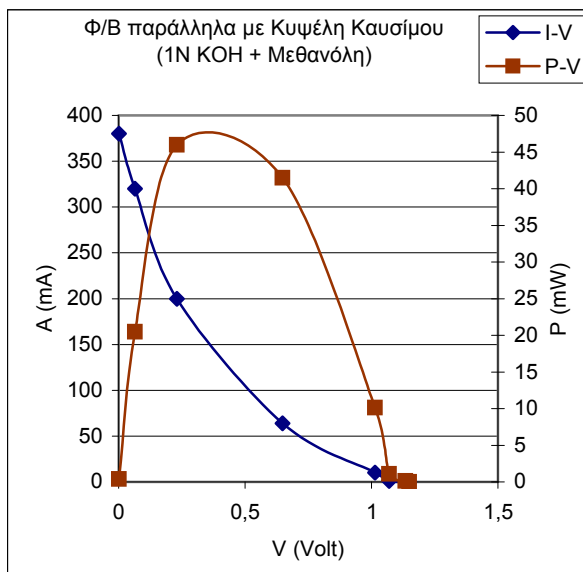
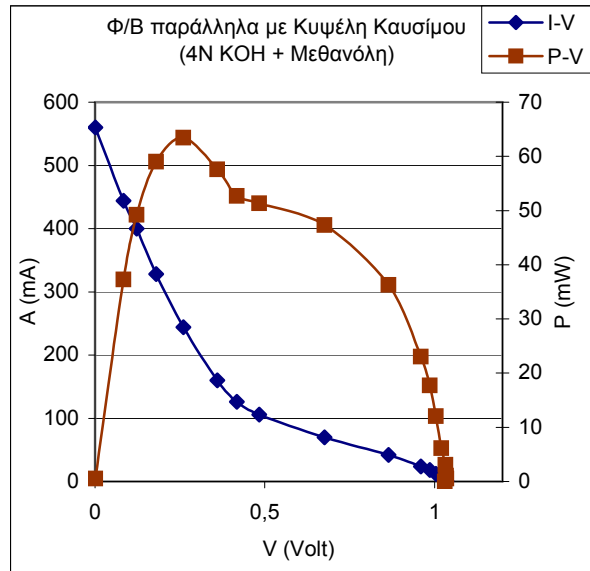
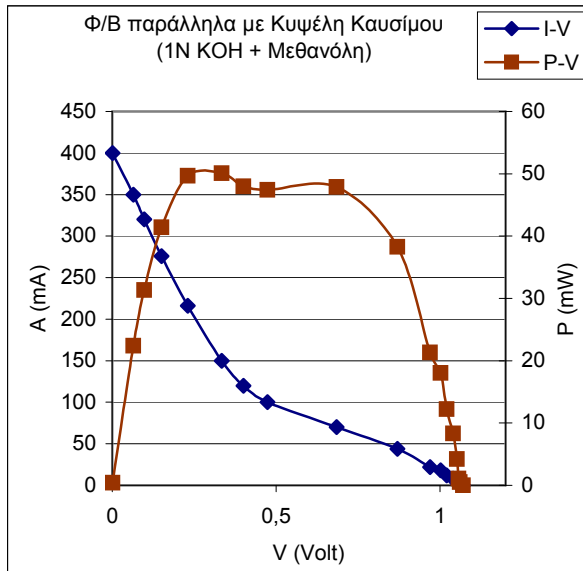
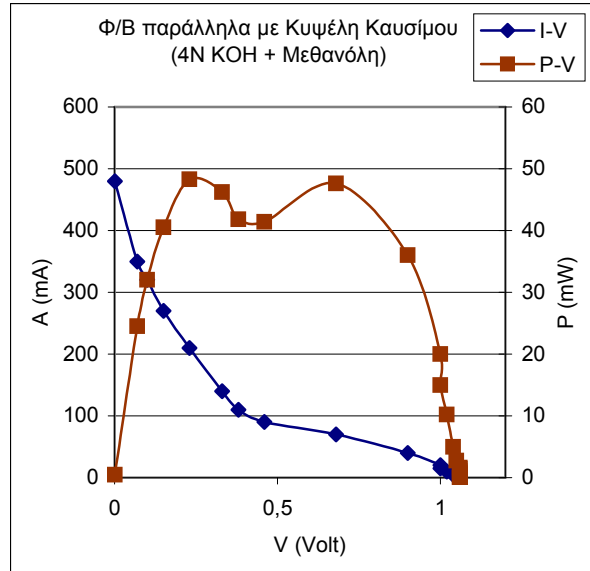




Γραφήματα 3-α έως 3-γ

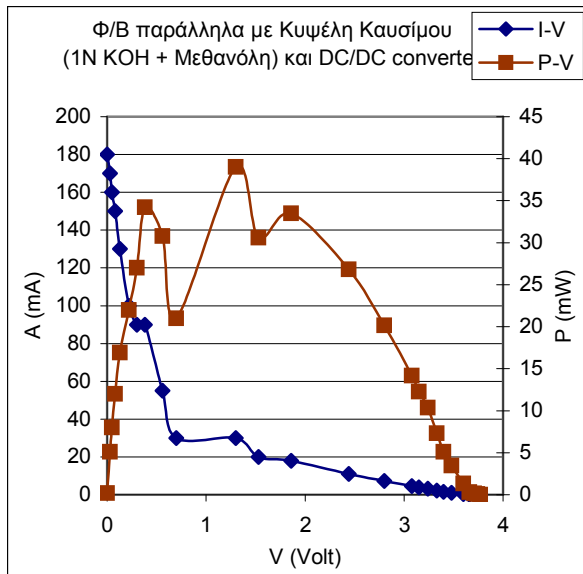


Γραφήματα 4-α έως 4-γ

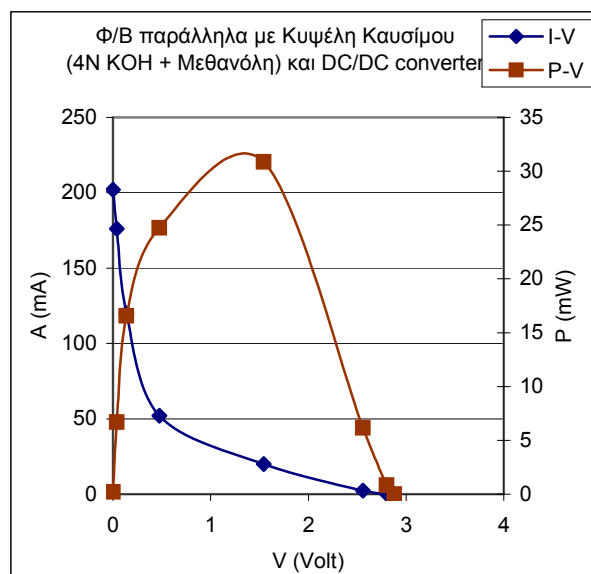
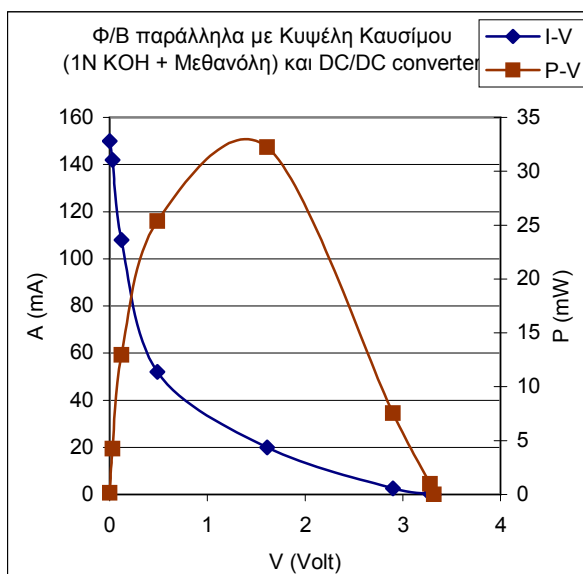
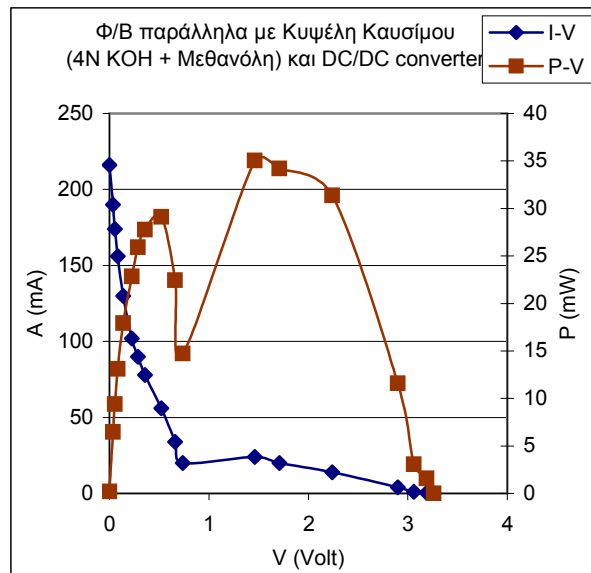
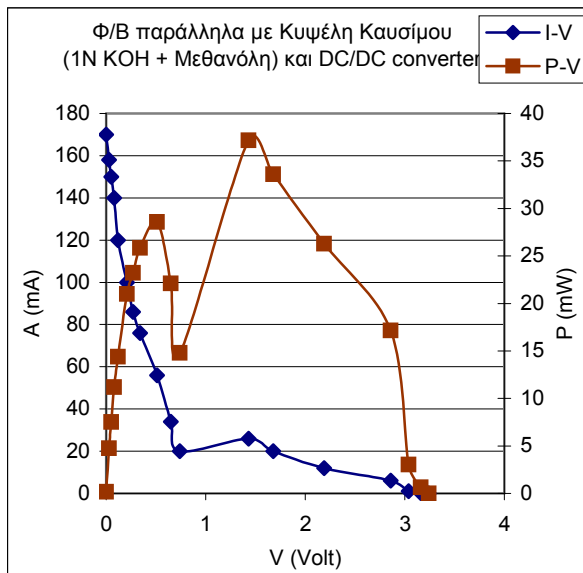
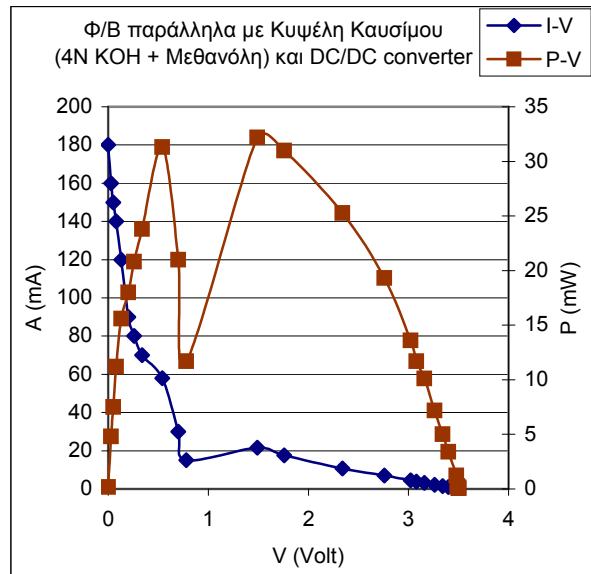




Γραφήματα 5-α έως 5-γ



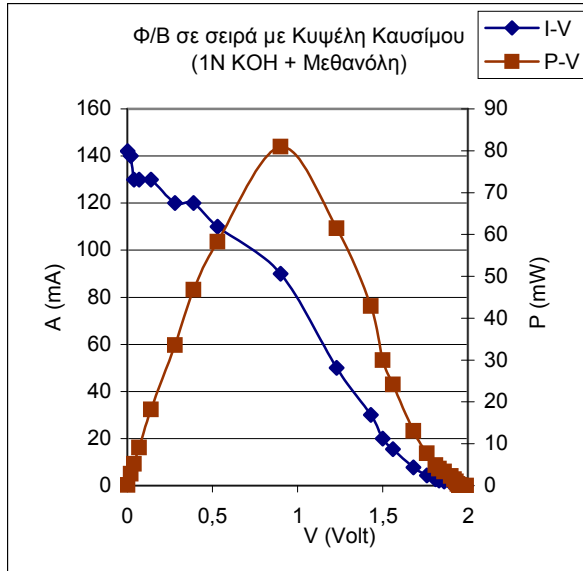
Γραφήματα 6-α έως 6-γ



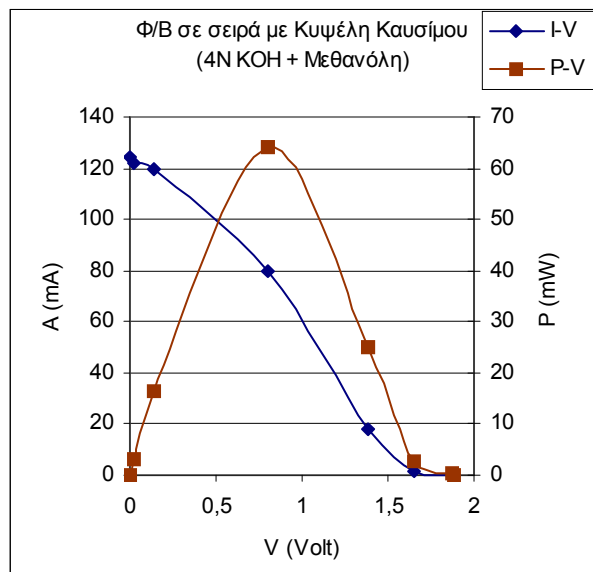
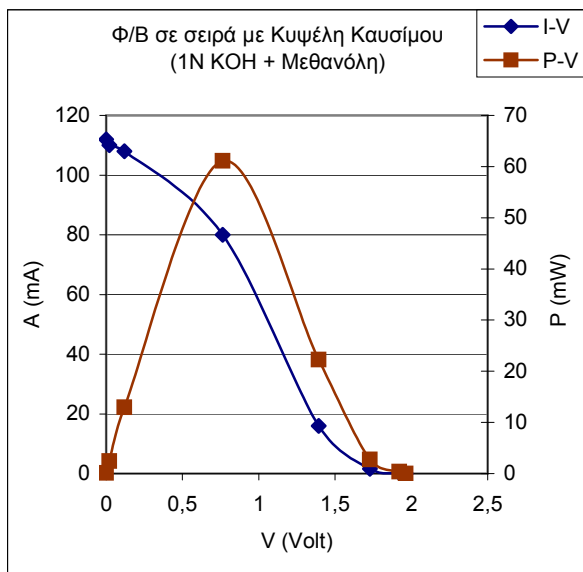
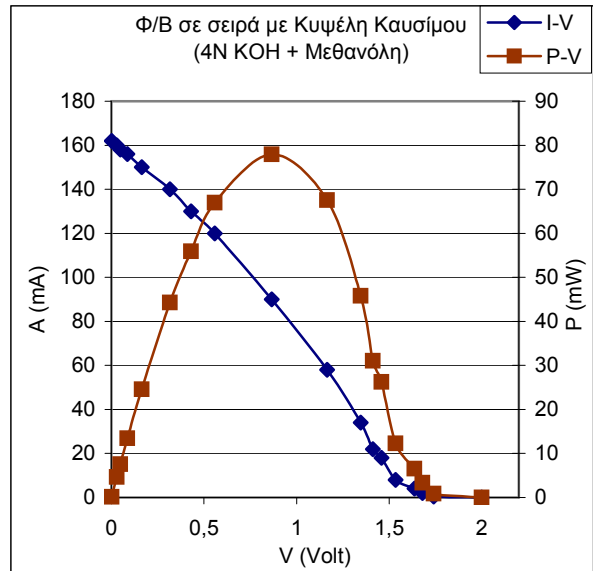
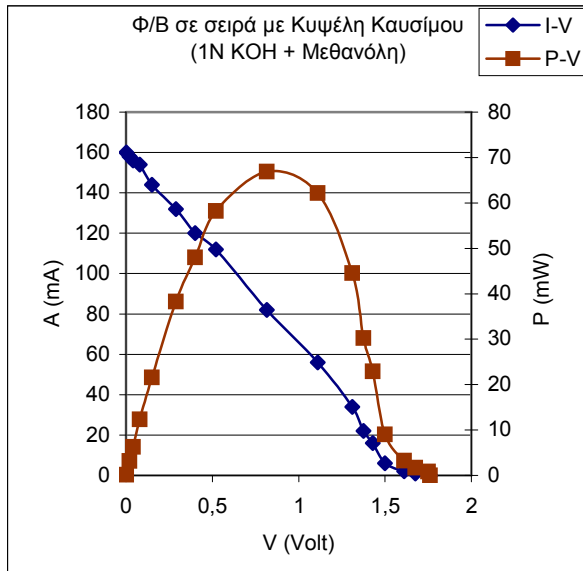
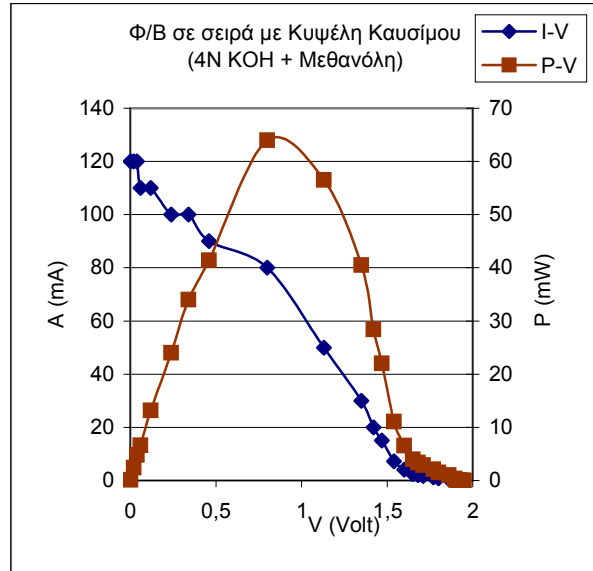




Γραφήματα 7-α έως 7-γ

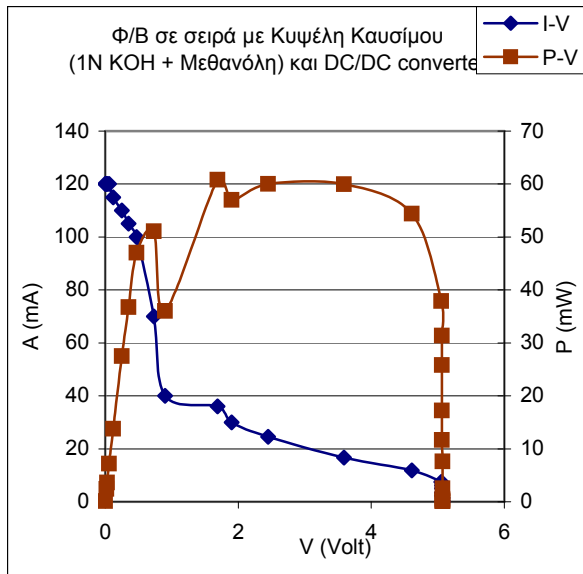


Γραφήματα 8-α έως 8-γ

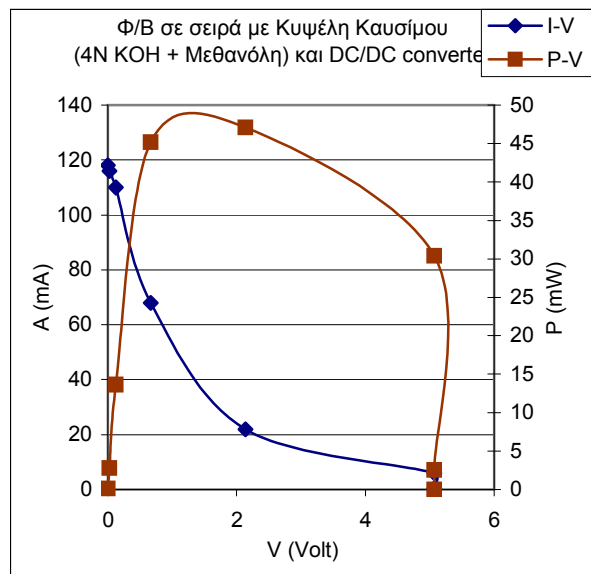
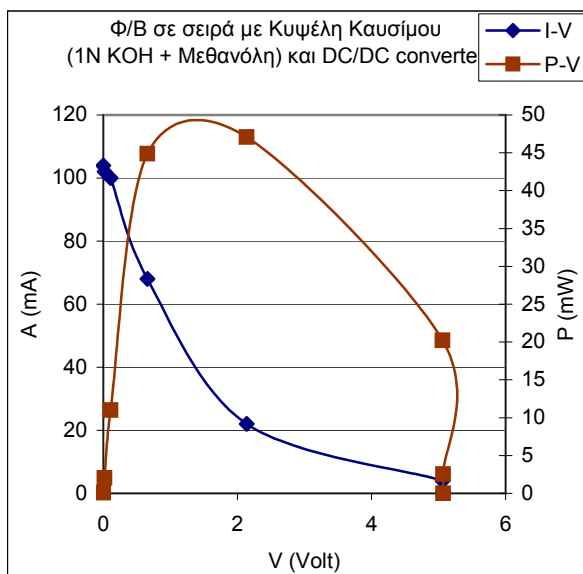
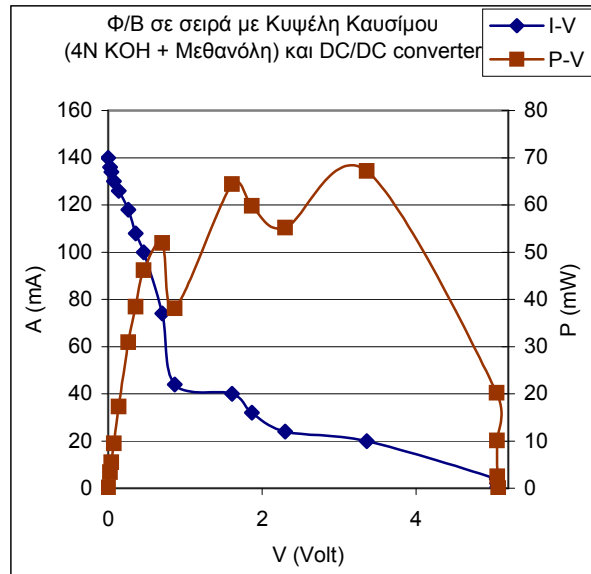
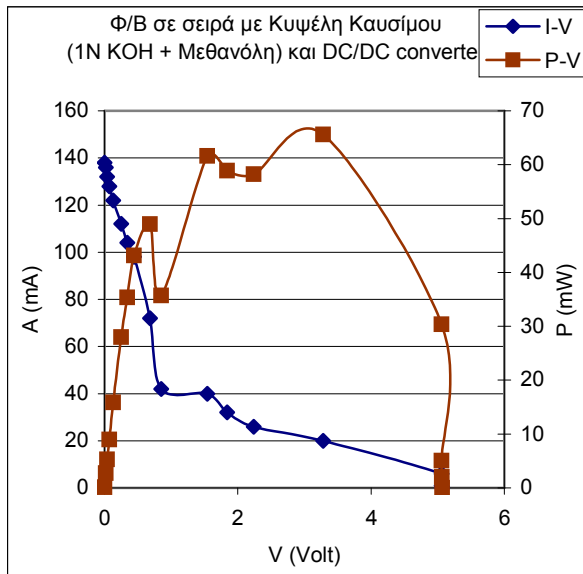
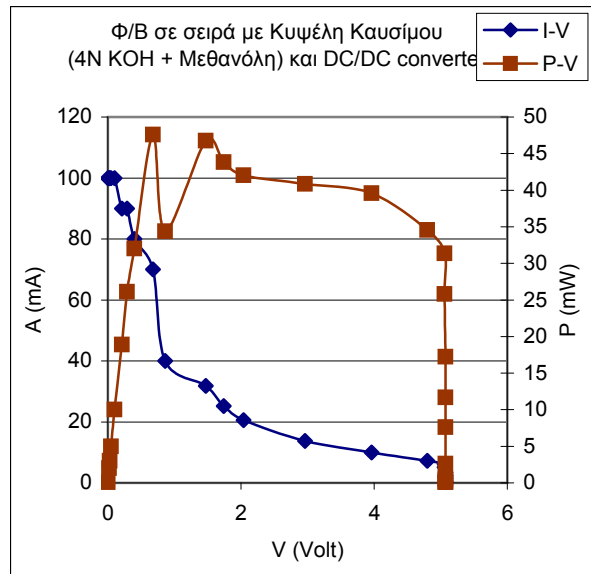




Γραφήματα 9-α έως 9-γ

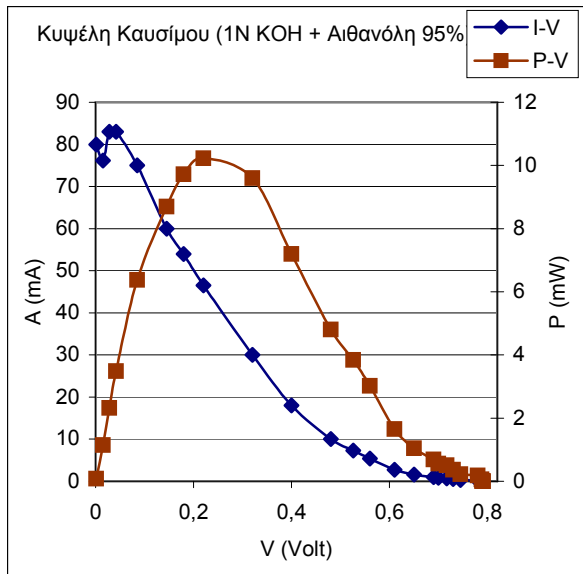


Γραφήματα 10-α έως 10-γ

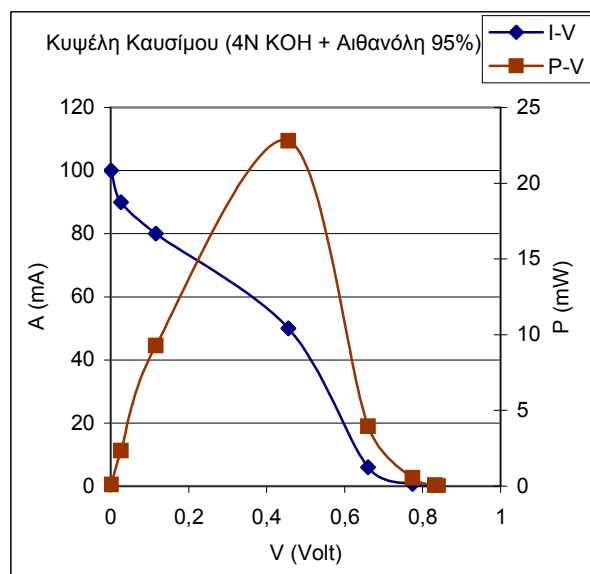
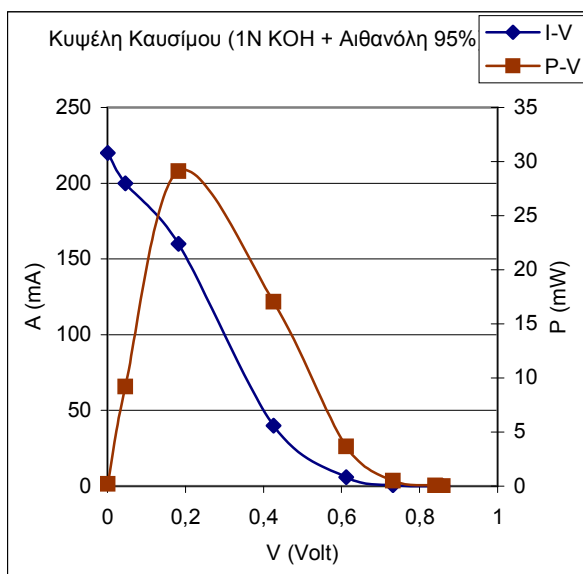
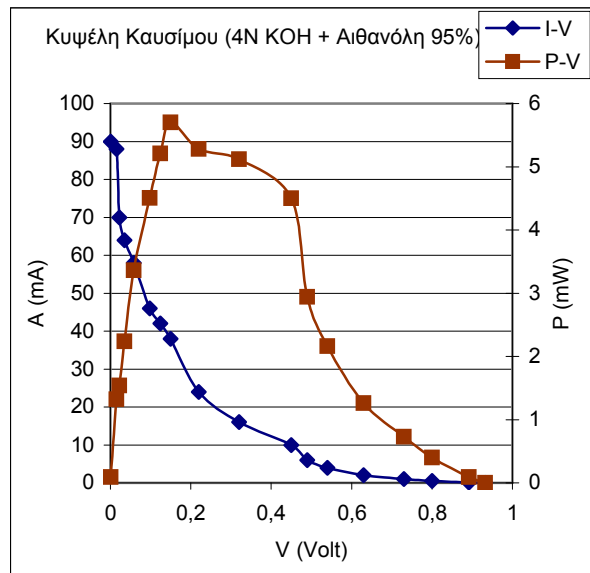
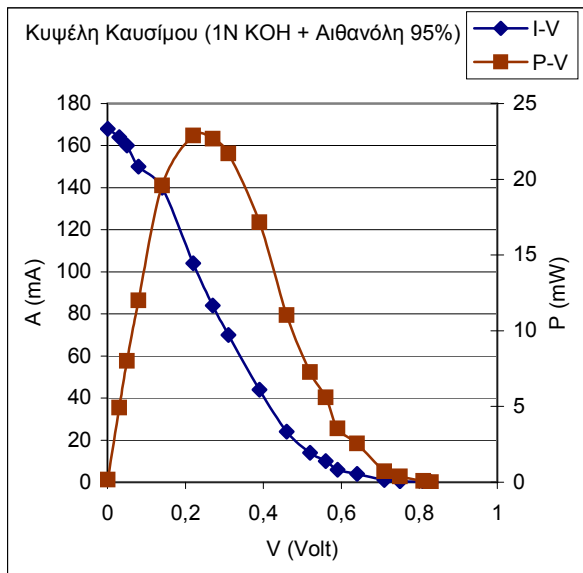
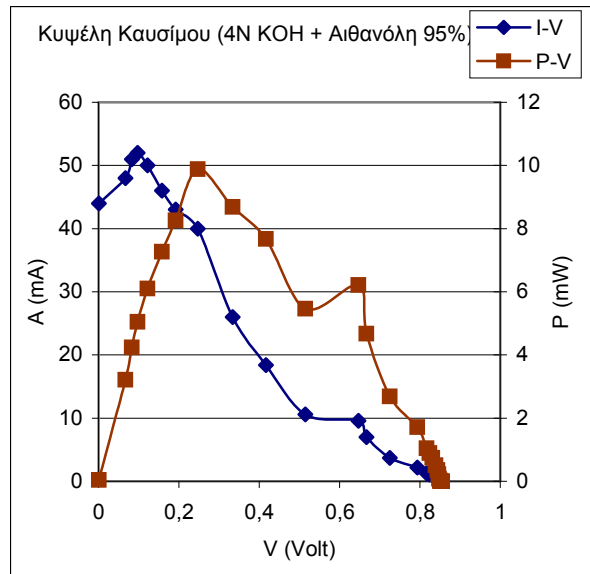




Γραφήματα 11-α έως 11-γ

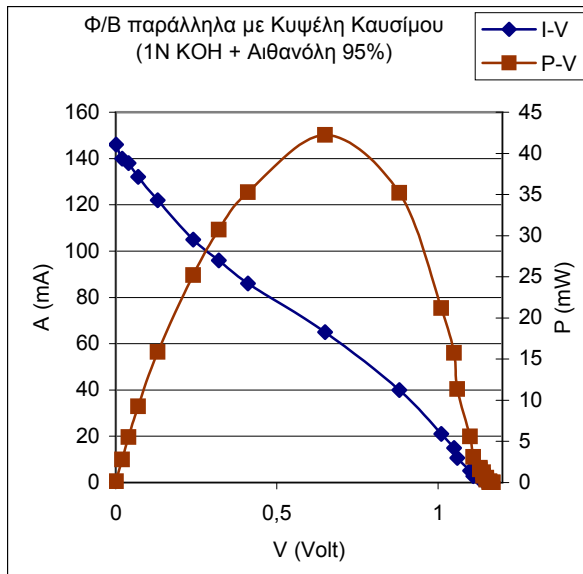


Γραφήματα 12-α έως 12-γ

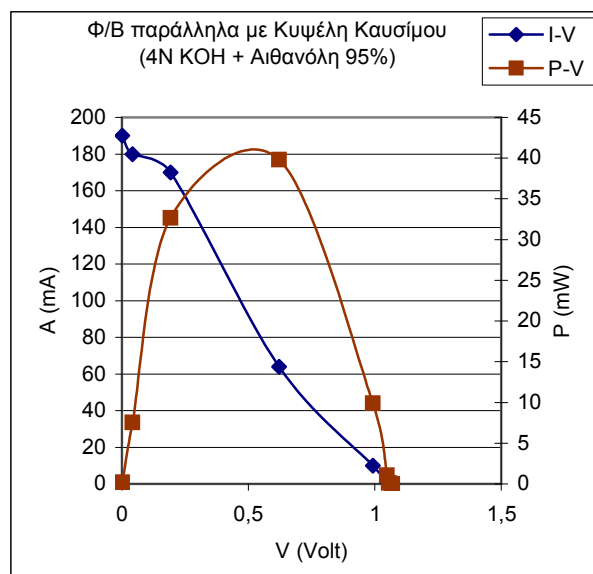
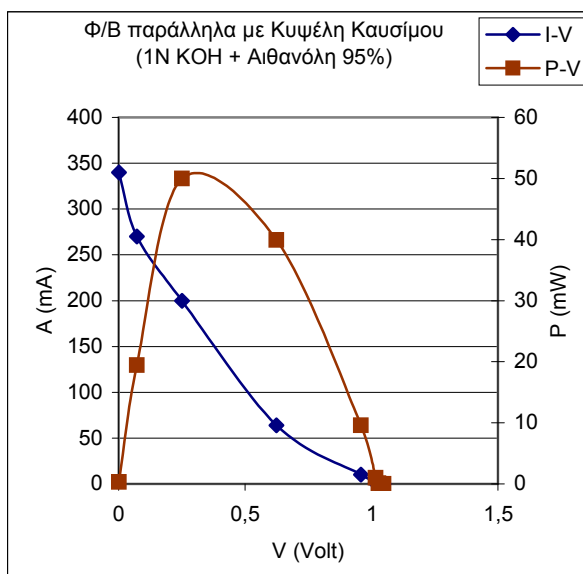
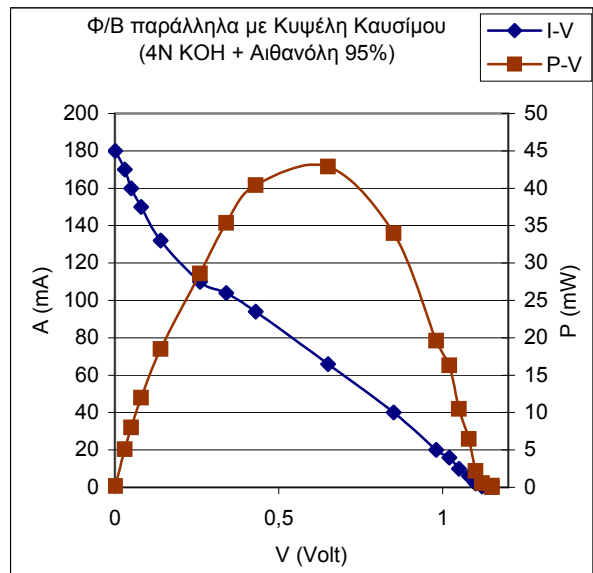
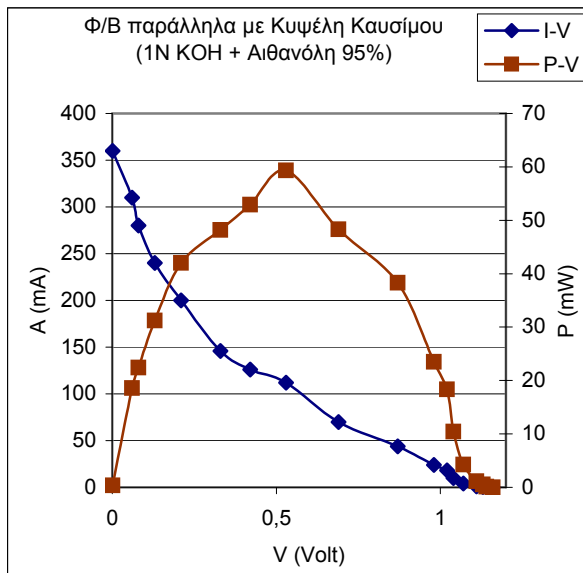
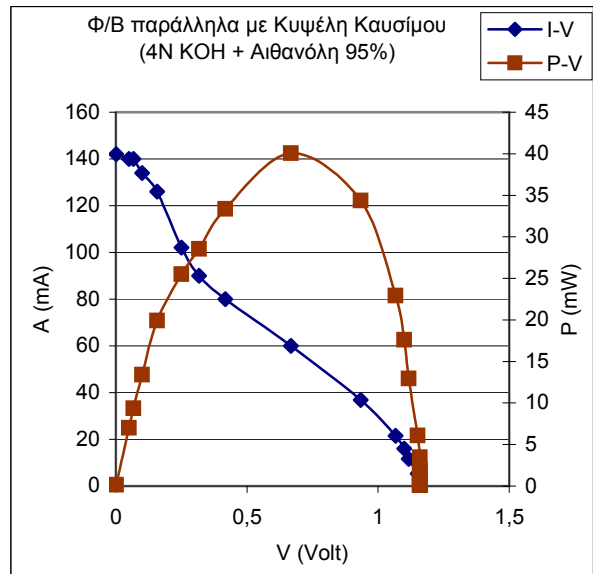




Γραφήματα 13-α έως 13-γ

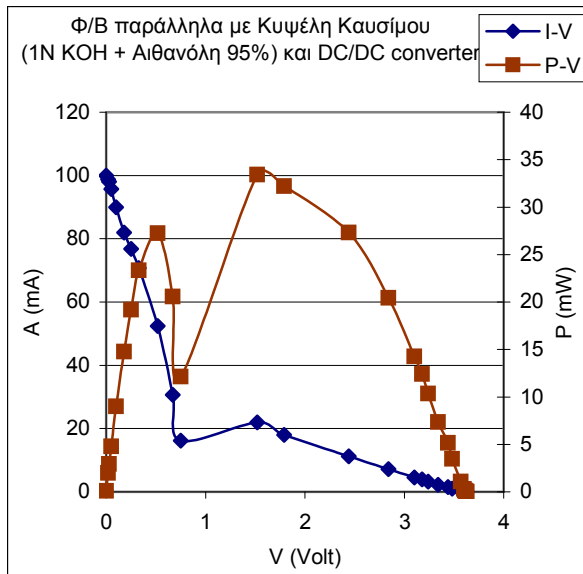


Γραφήματα 14-α έως 14-γ

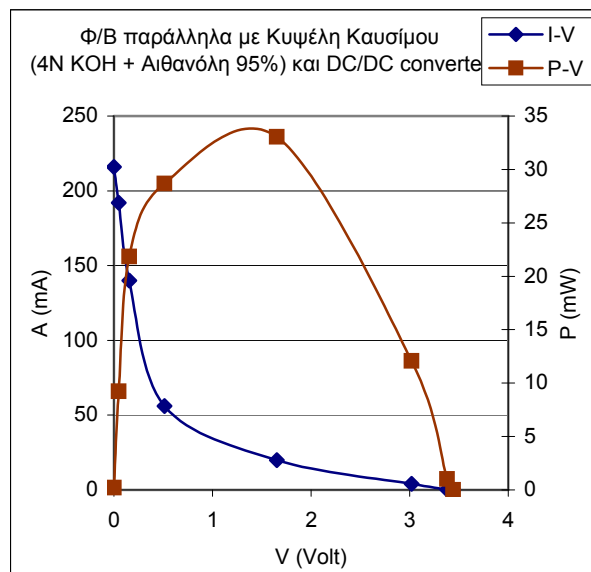
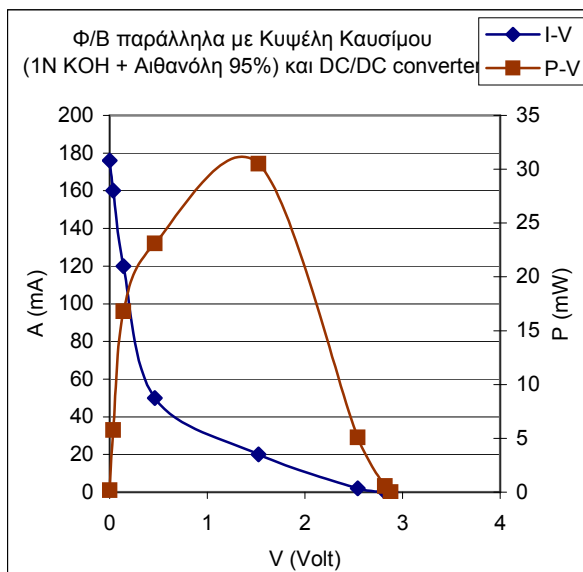
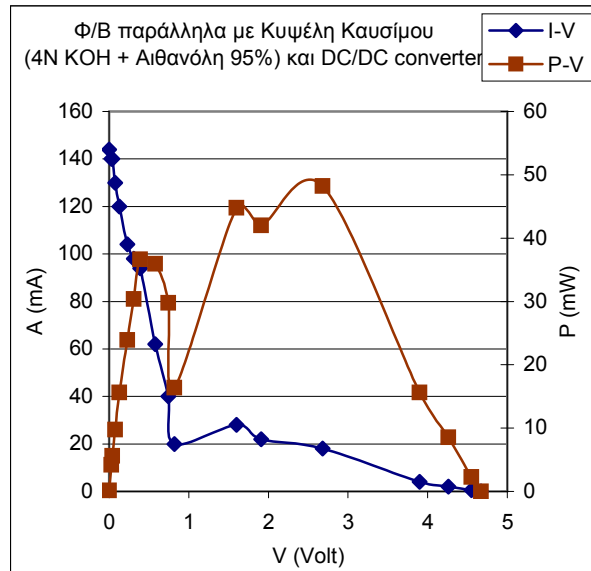
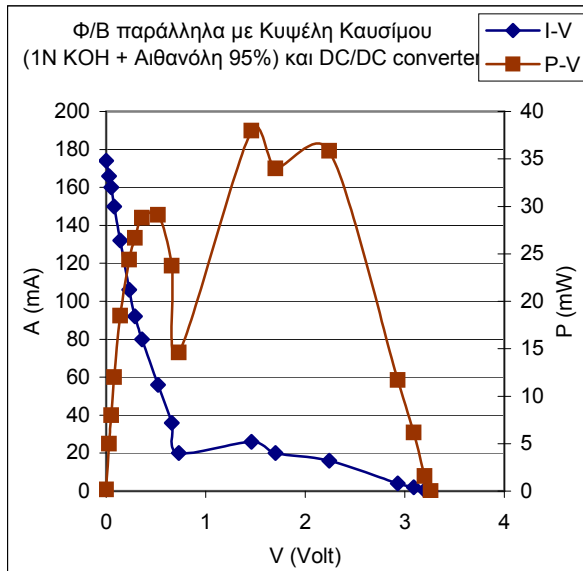
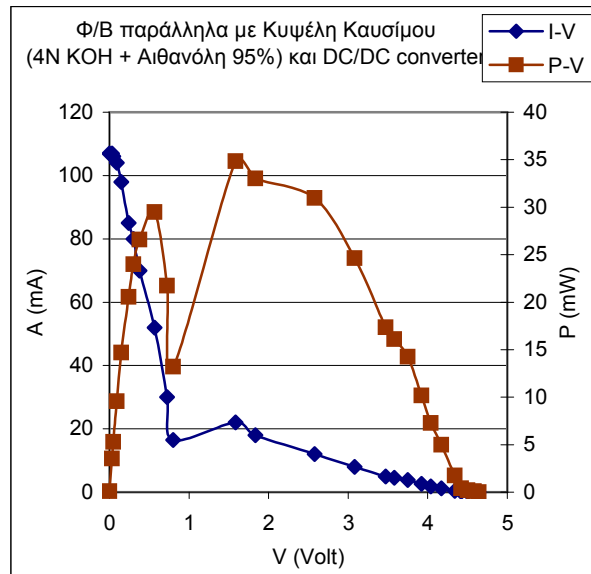




Γραφήματα 15-α έως 15-γ



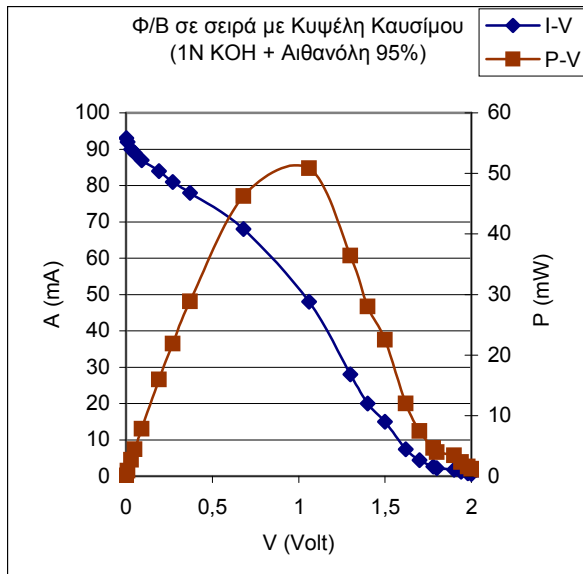
Γραφήματα 16-α έως 16-γ



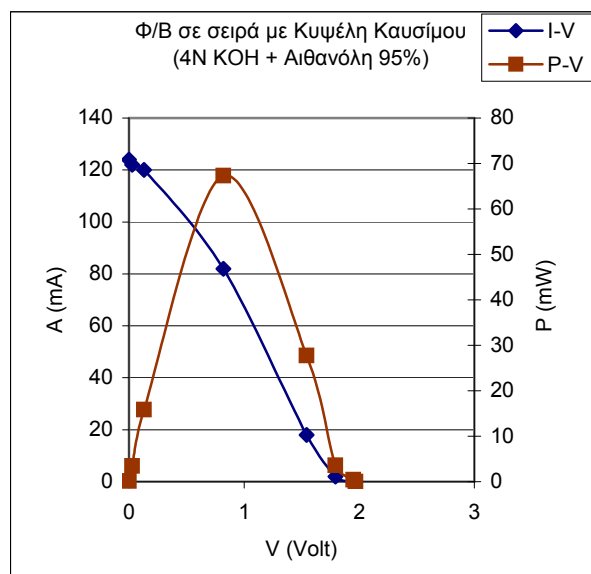
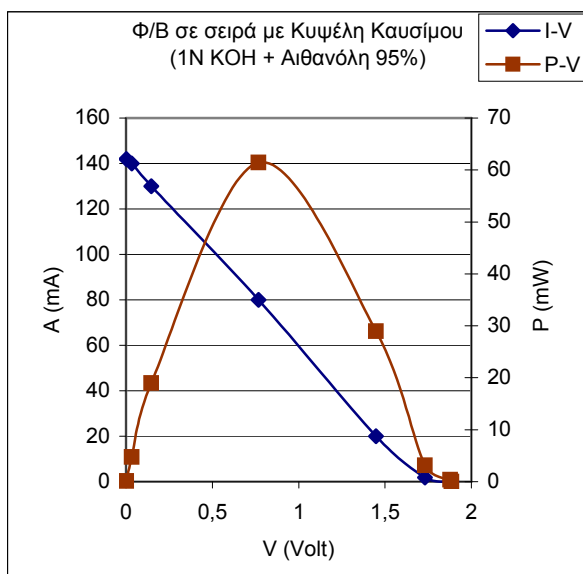
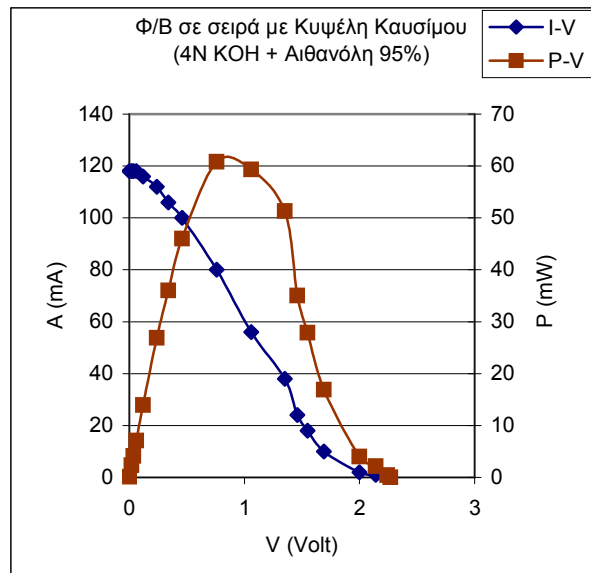
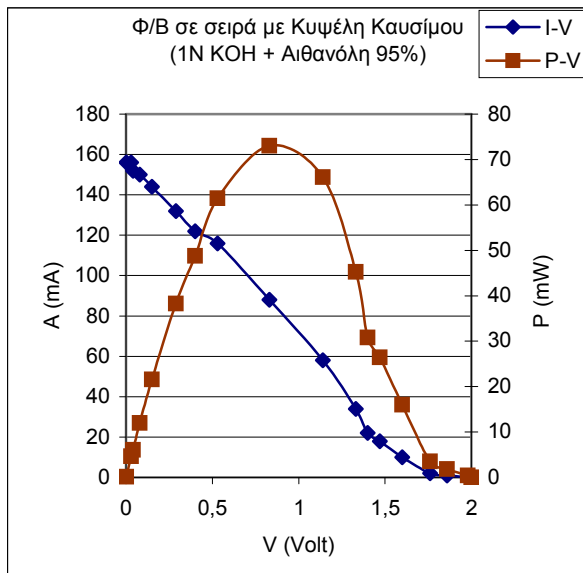
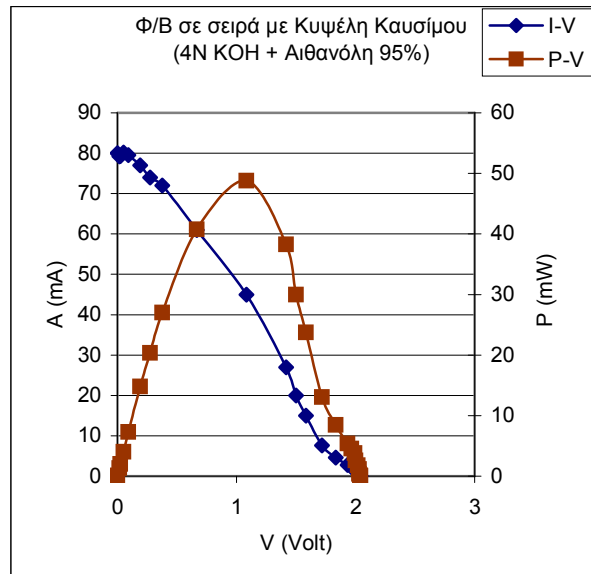




Γραφήματα 17-α έως 17-γ

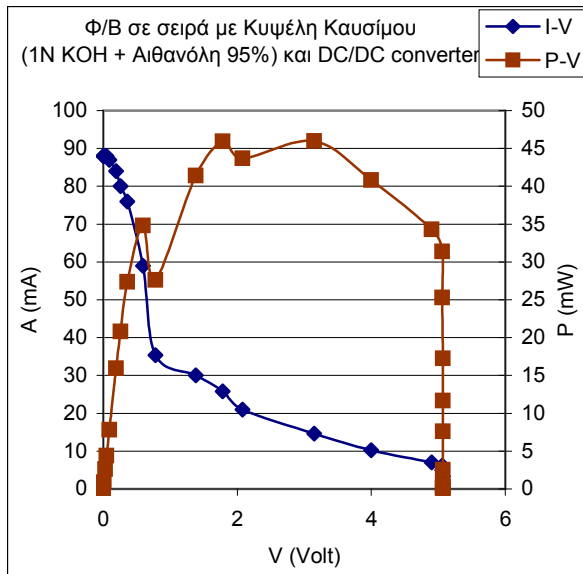


Γραφήματα 18-α έως 18-γ

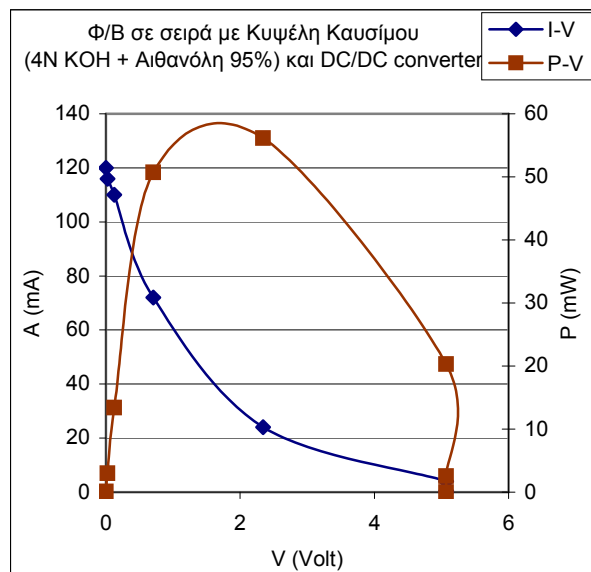
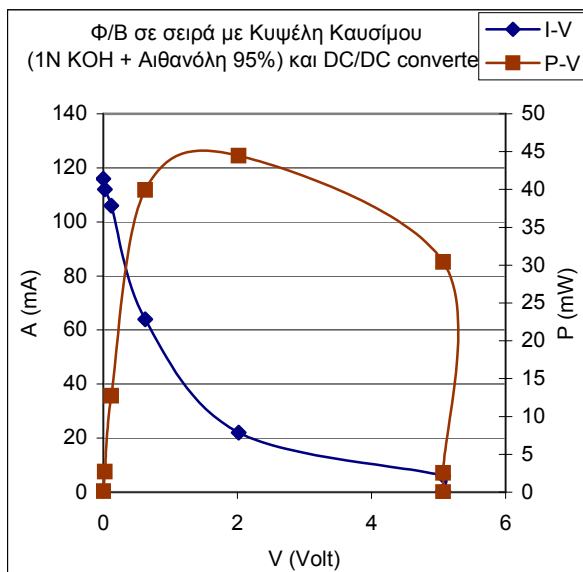
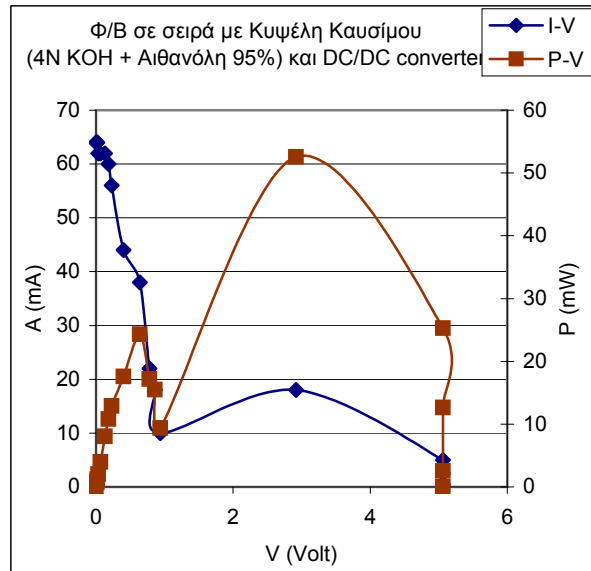
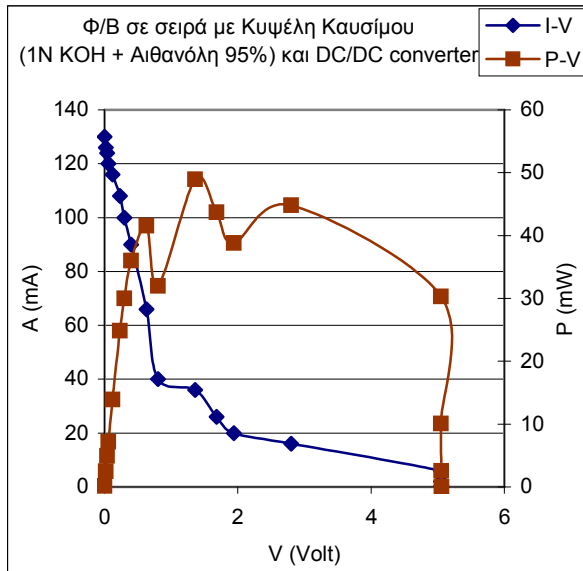
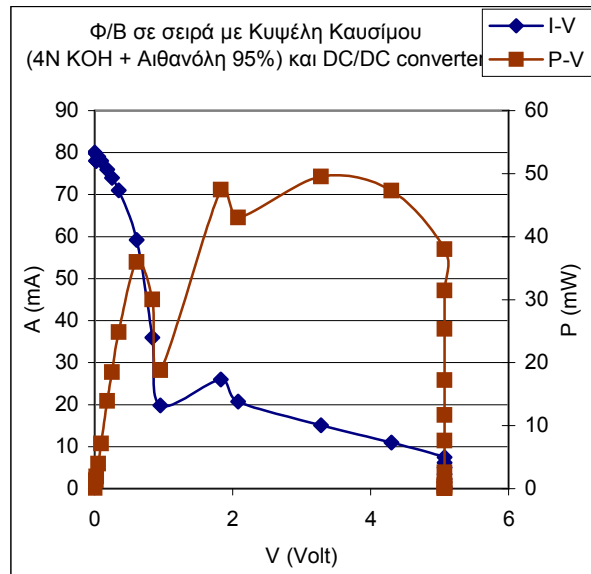




Γραφήματα 19-α έως 19-γ

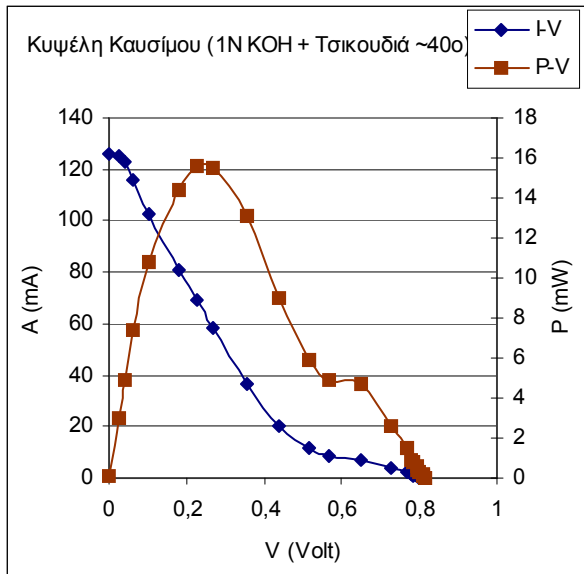


Γραφήματα 20-α έως 20-γ

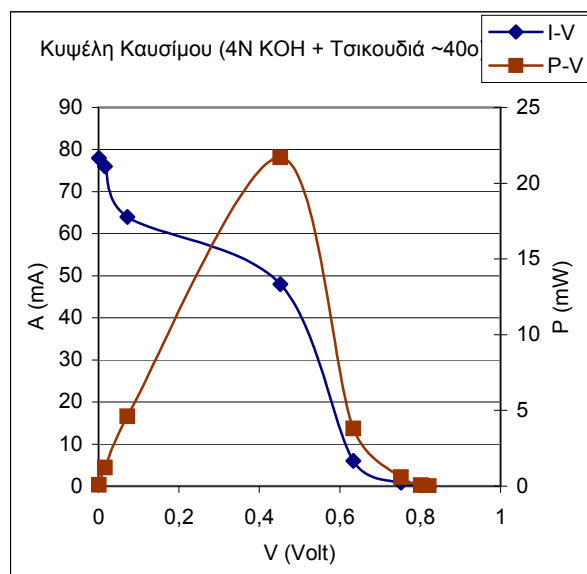
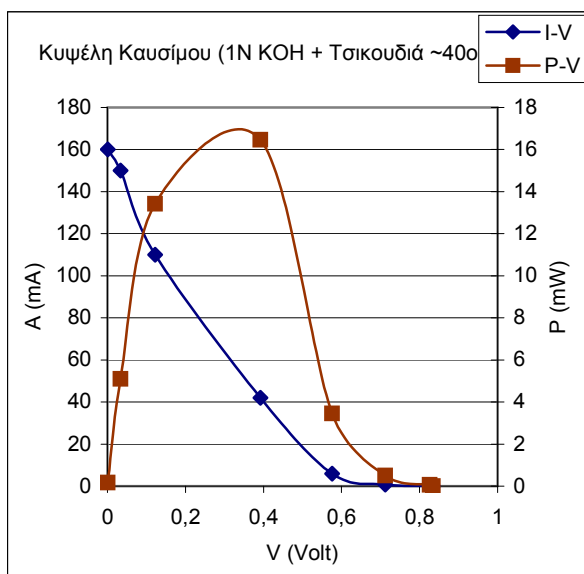
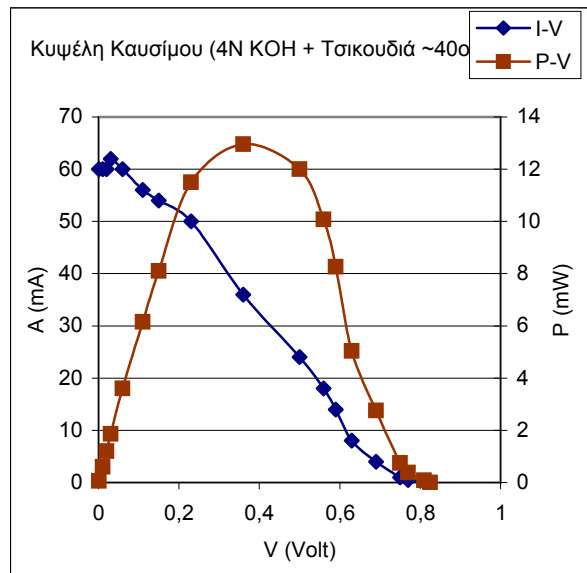
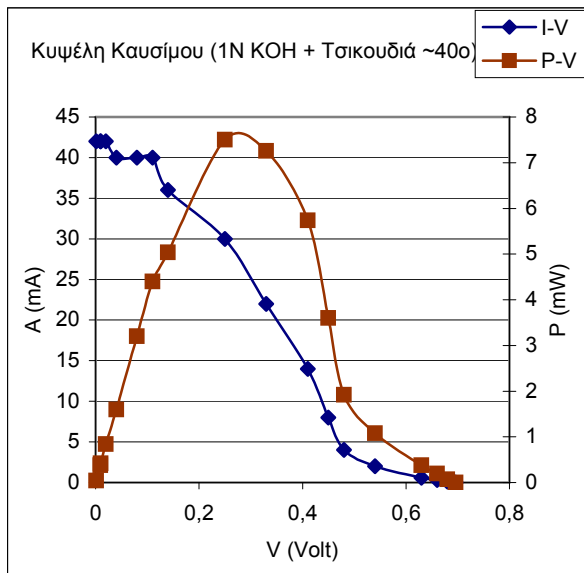
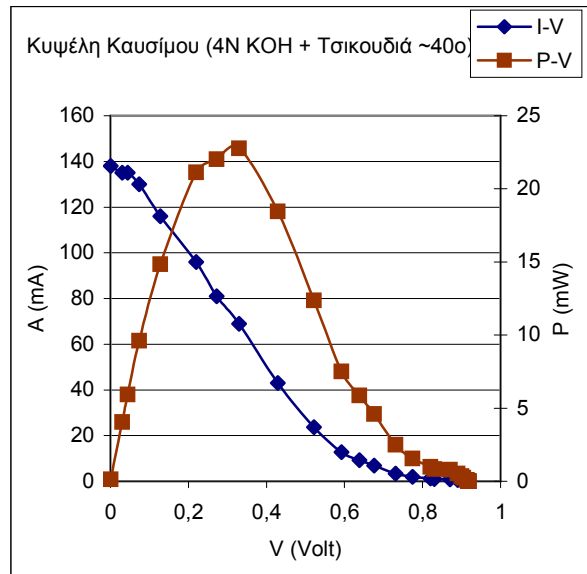




Γραφήματα 21-α έως 21-γ

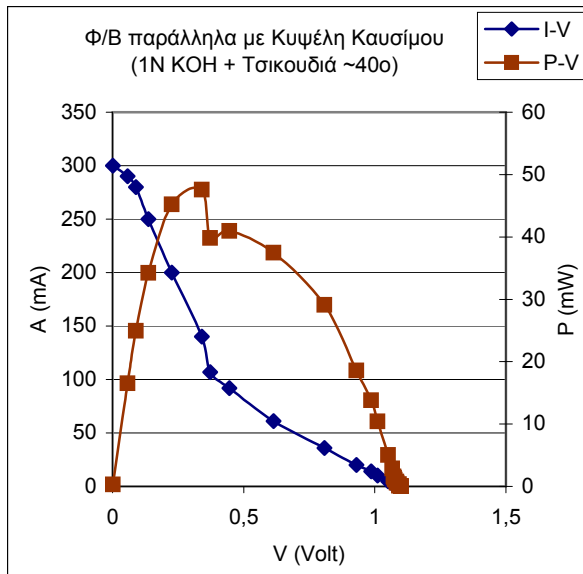


Γραφήματα 22-α έως 22-γ

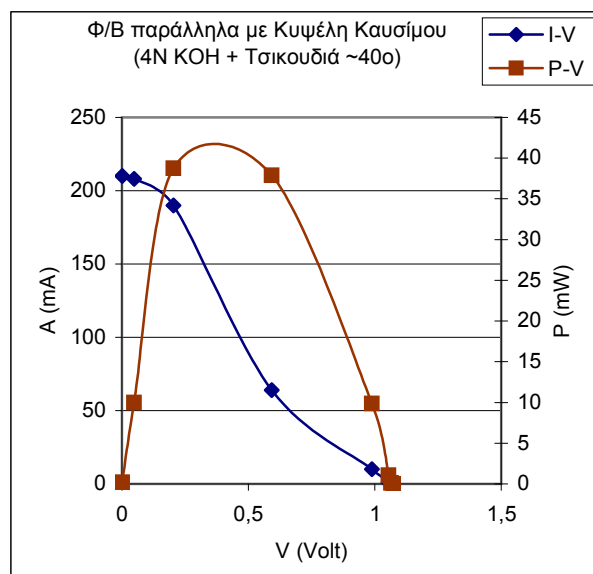
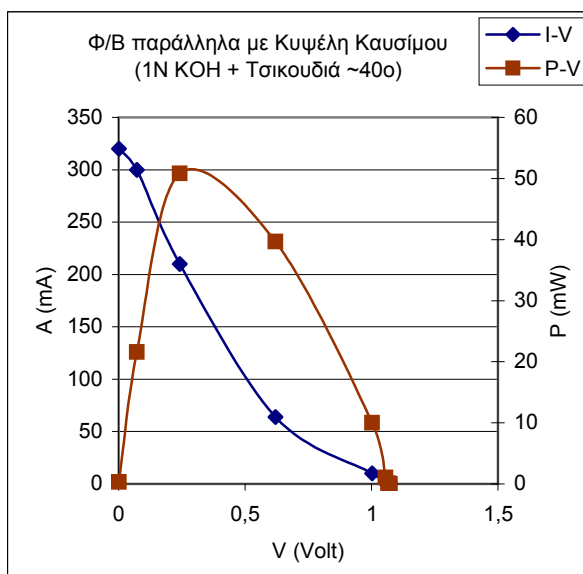
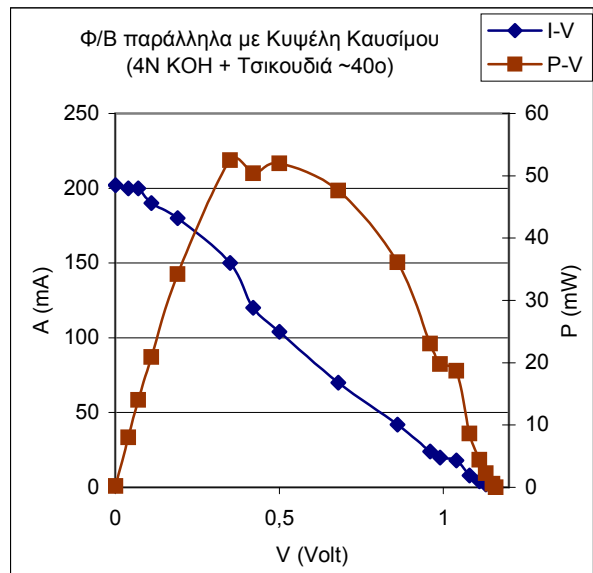
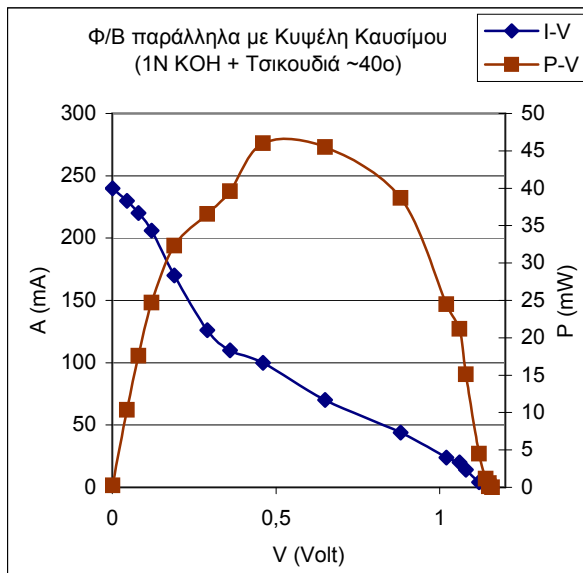
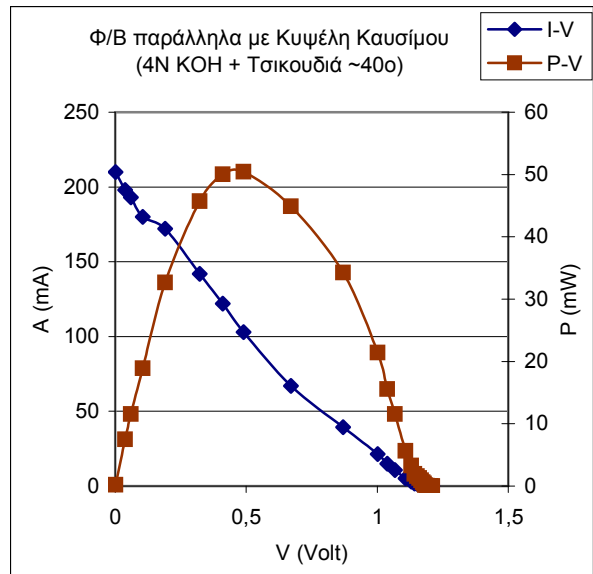




Γραφήματα 23-α έως 23-γ

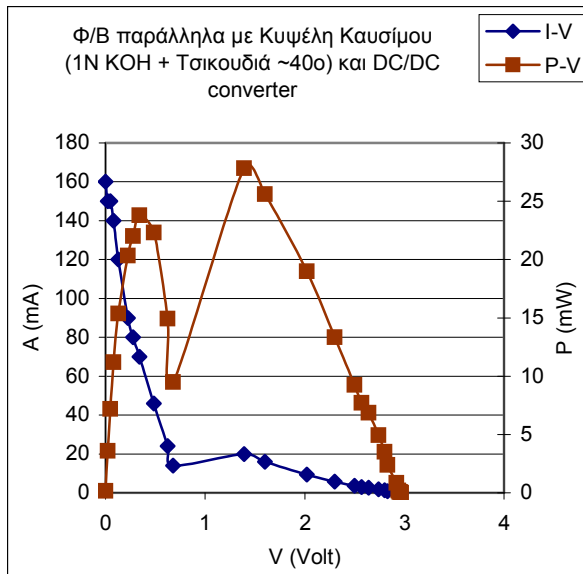


Γραφήματα 24-α έως 24-γ

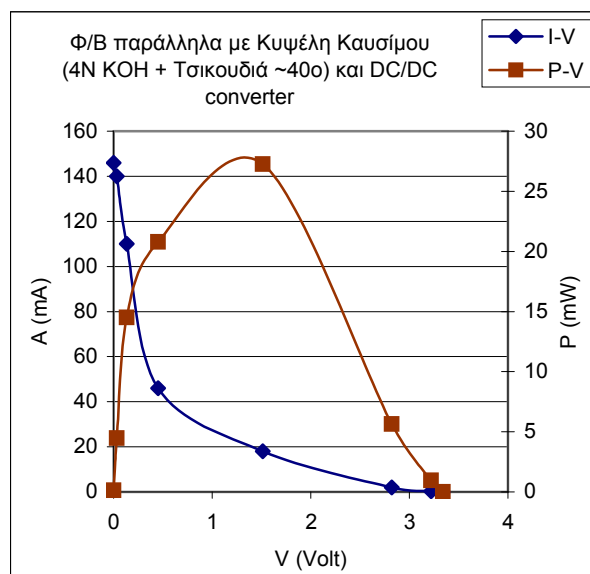
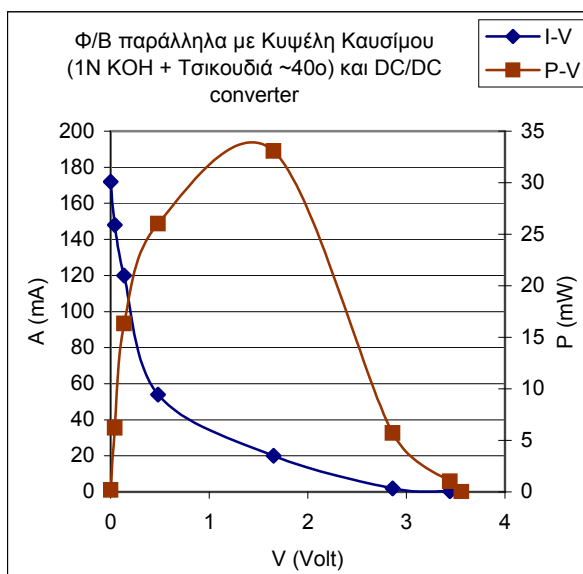
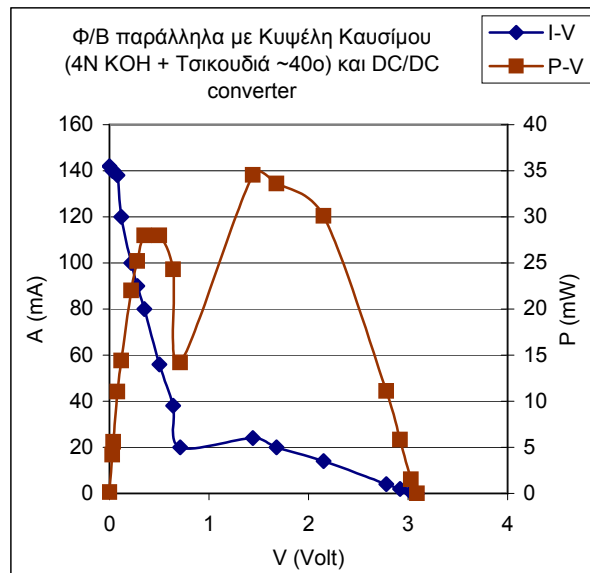
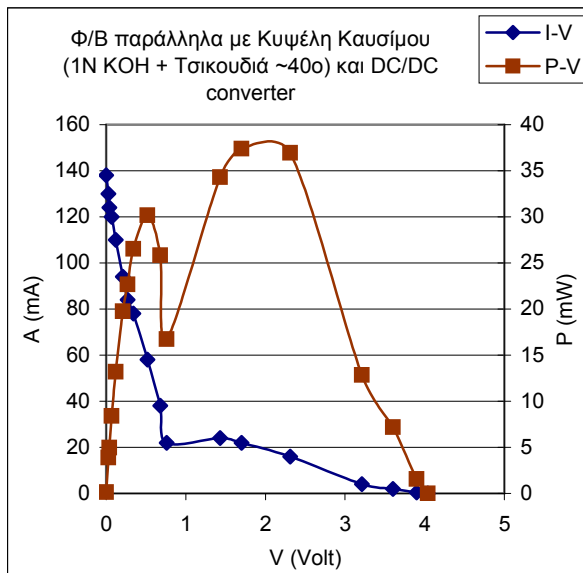
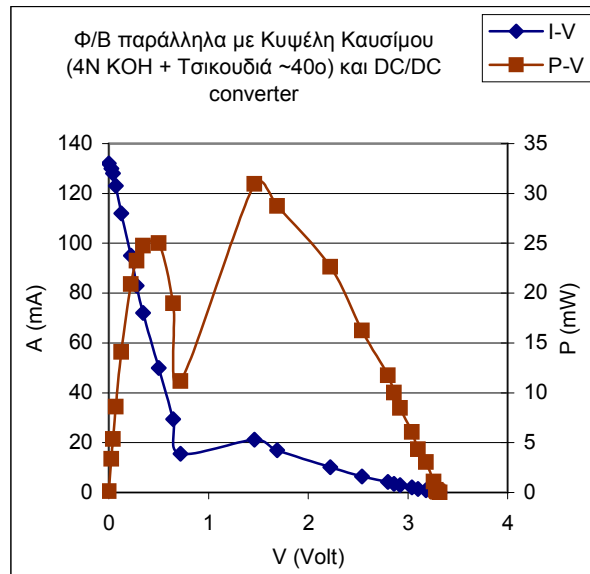




Γραφήματα 25-α έως 25-γ



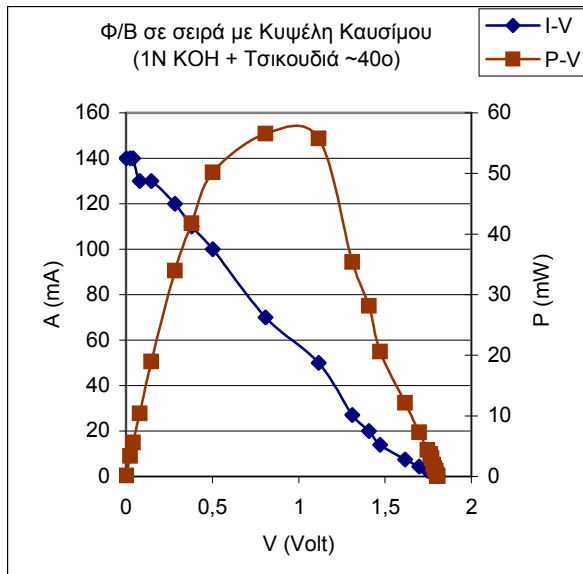
Γραφήματα 26-α έως 26-γ



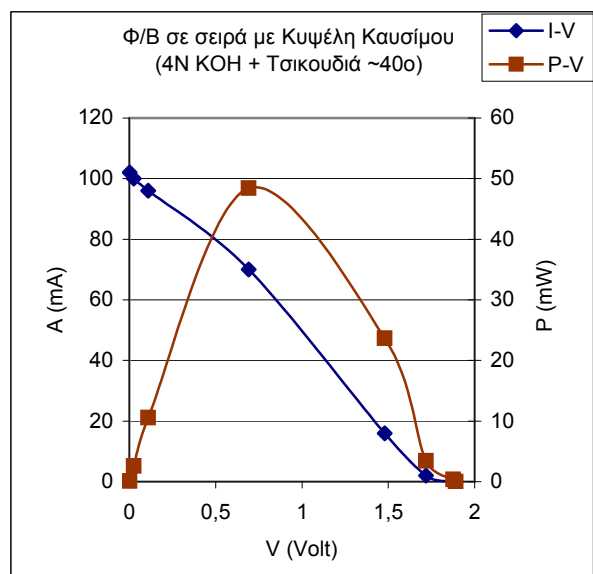
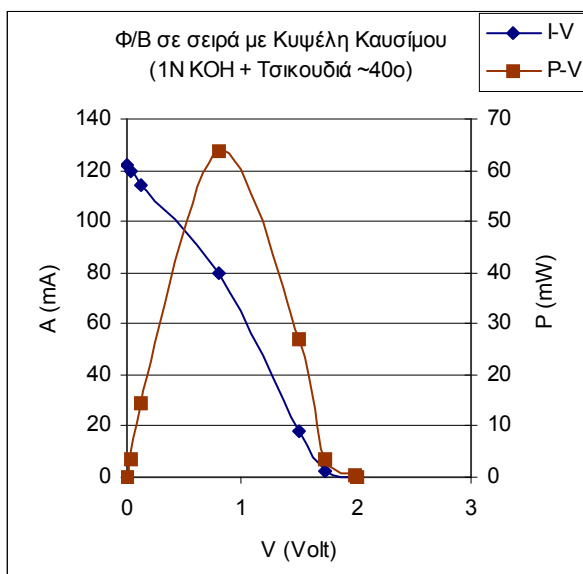
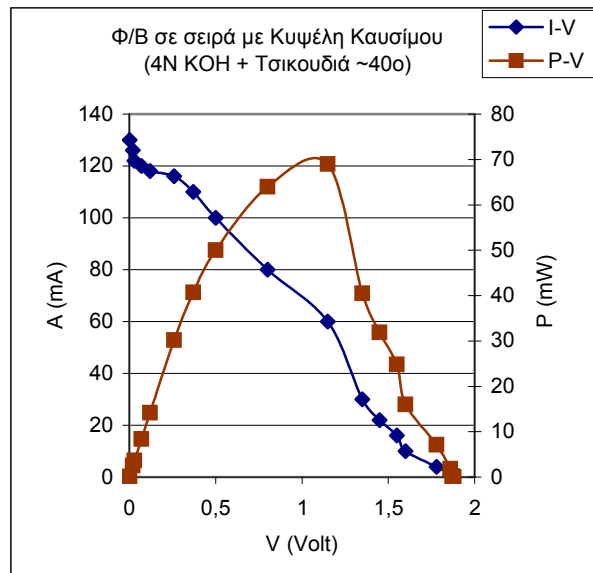
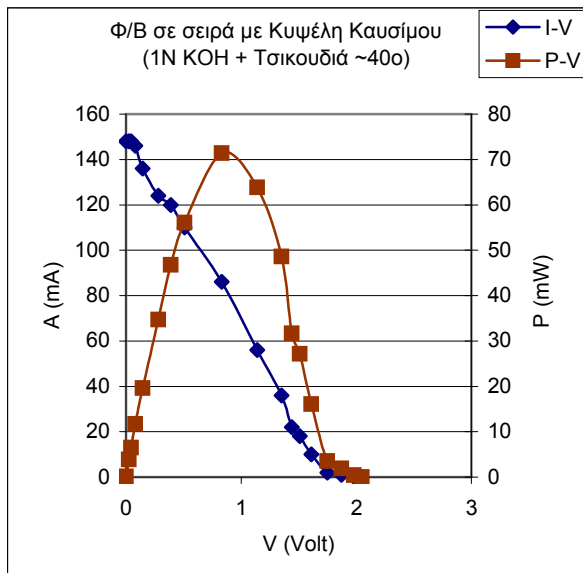
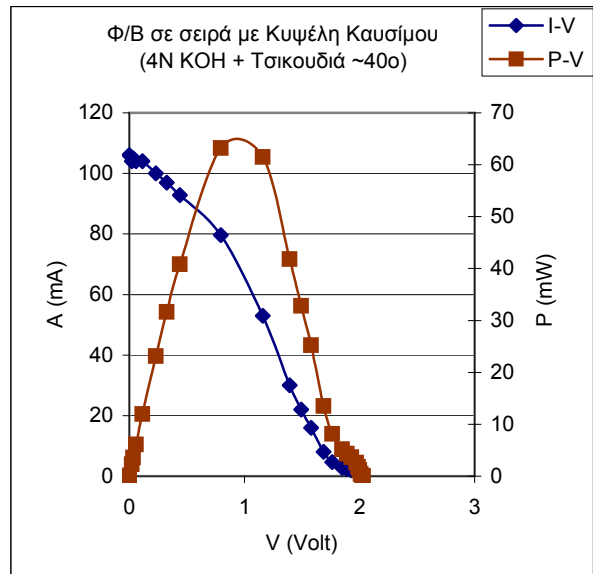




Γραφήματα 27-α έως 27-γ

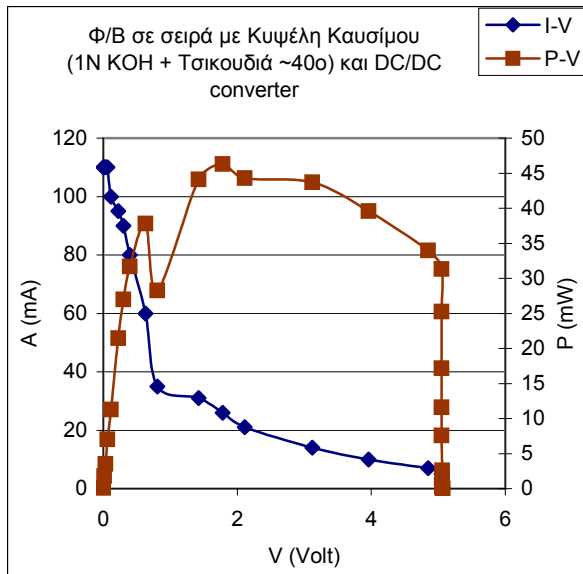


Γραφήματα 28-α έως 28-γ

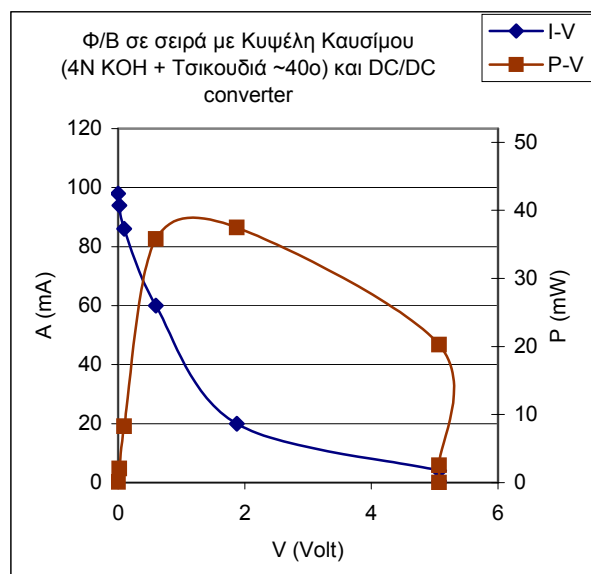
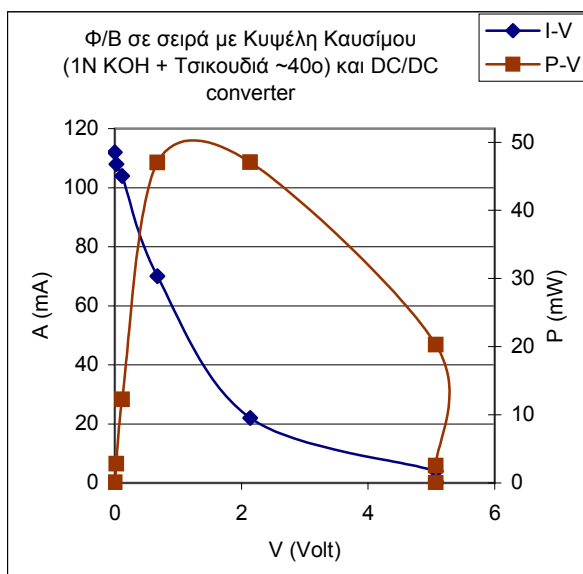
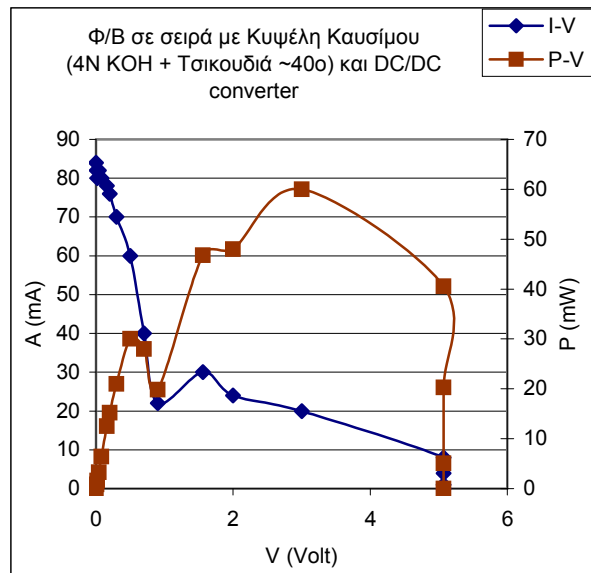
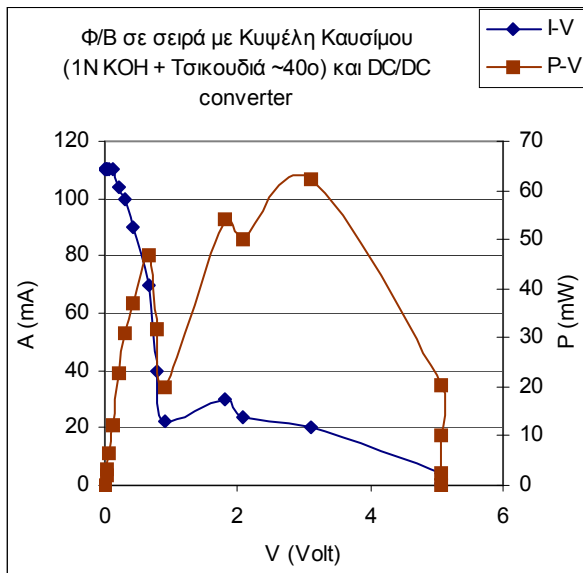
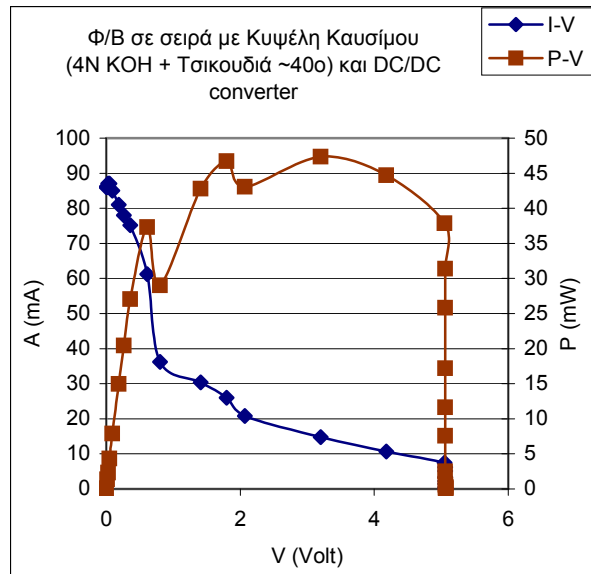


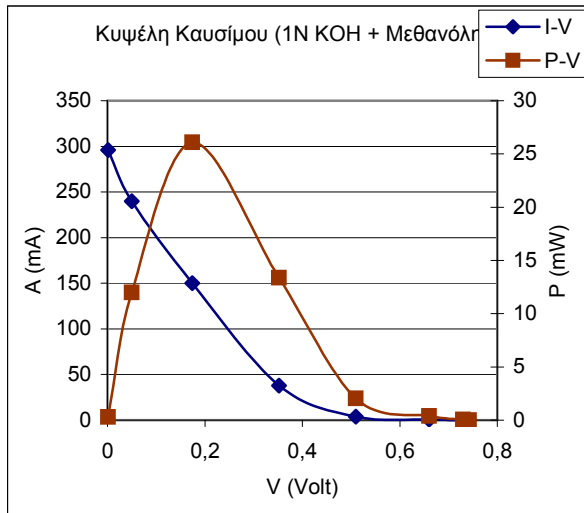


Γραφήματα 29-α έως 29-γ

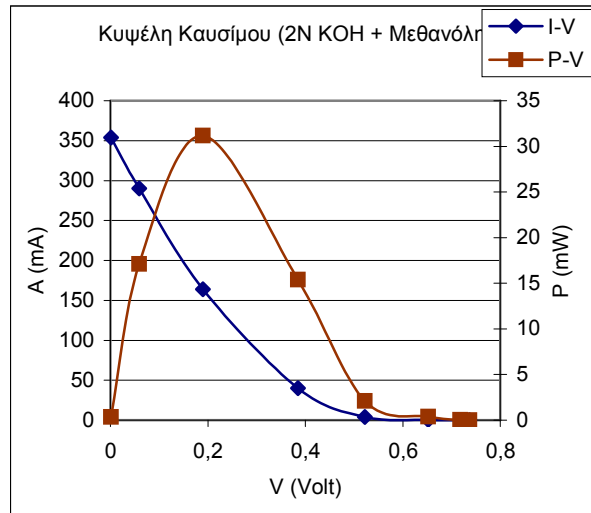


Γραφήματα 30-α έως 30-γ

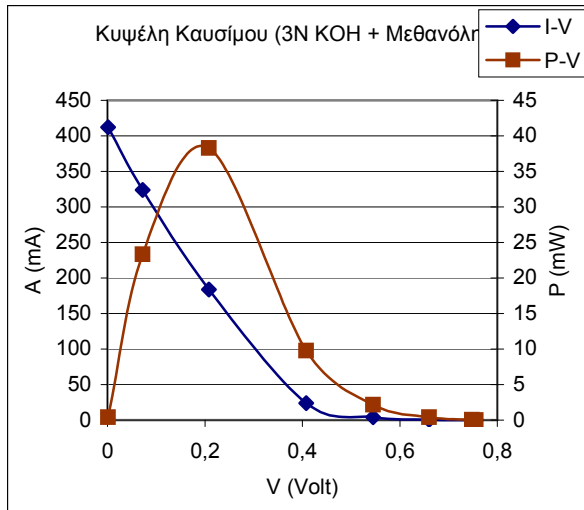




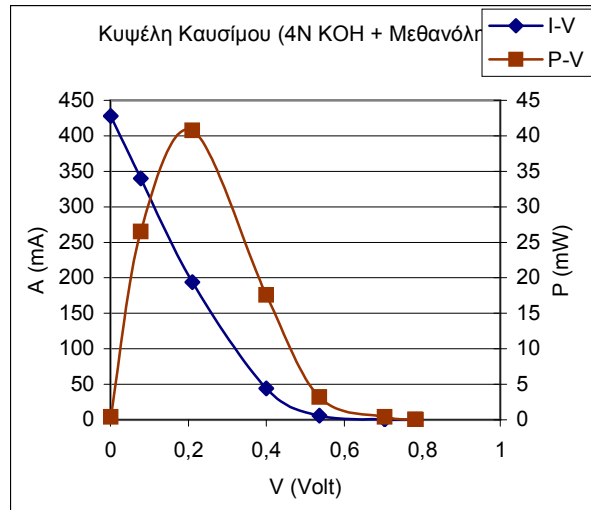
Γράφημα 31



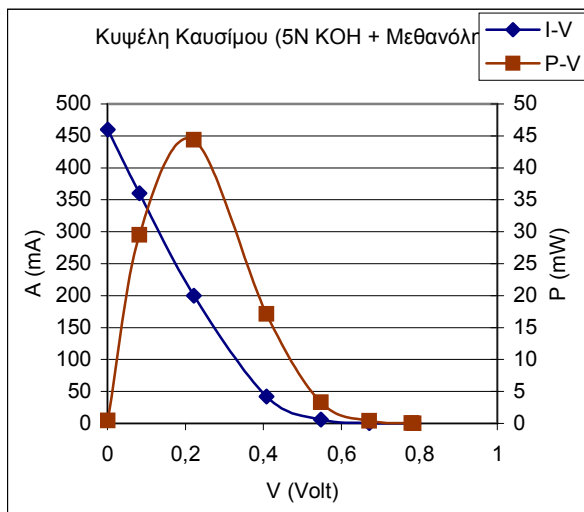
Γράφημα 32



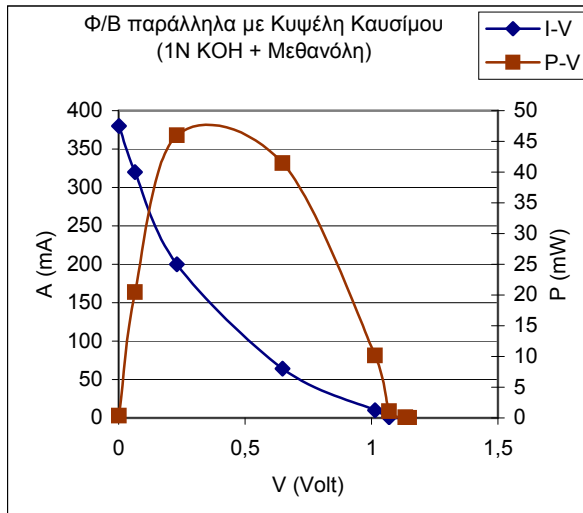
Γράφημα 33



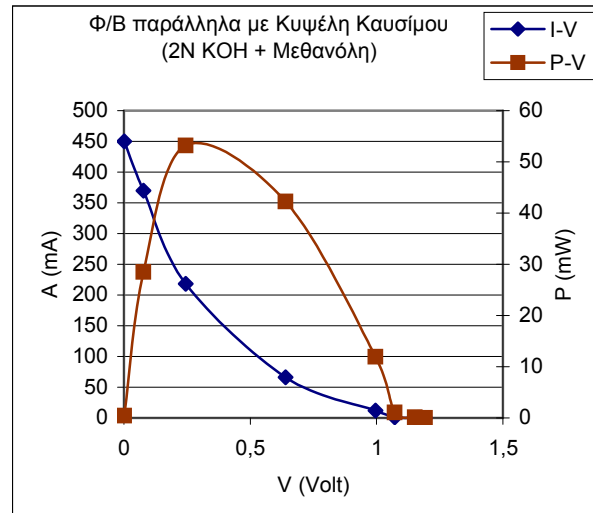
Γράφημα 34



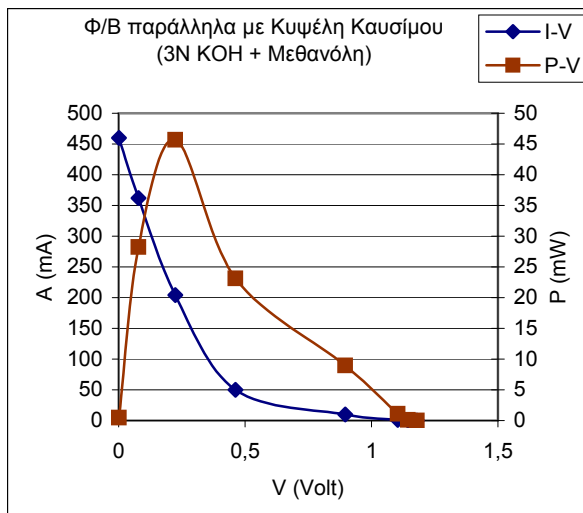
Γράφημα 35



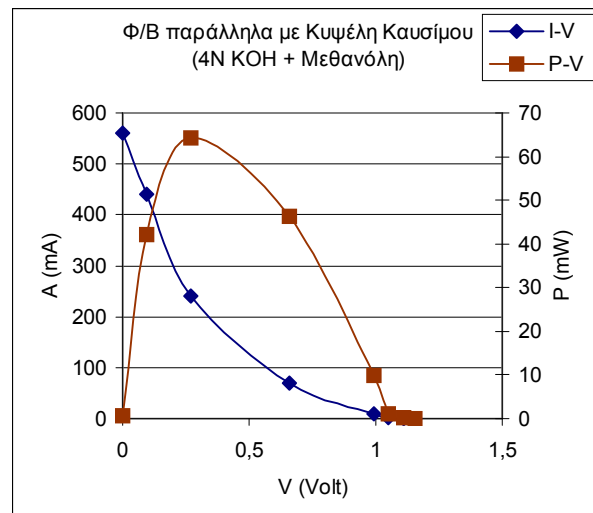
Γράφημα 36



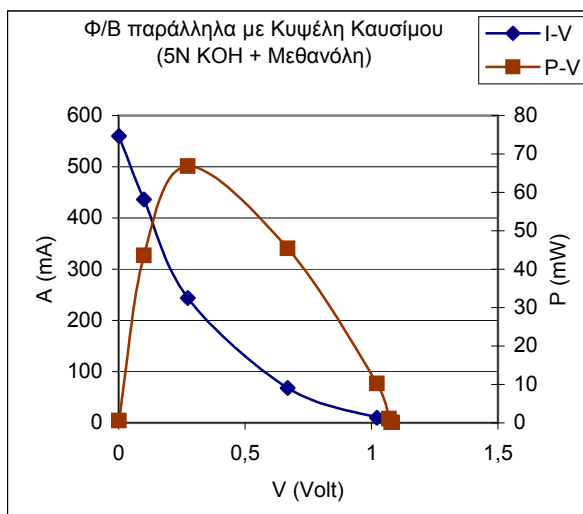
Γράφημα 37



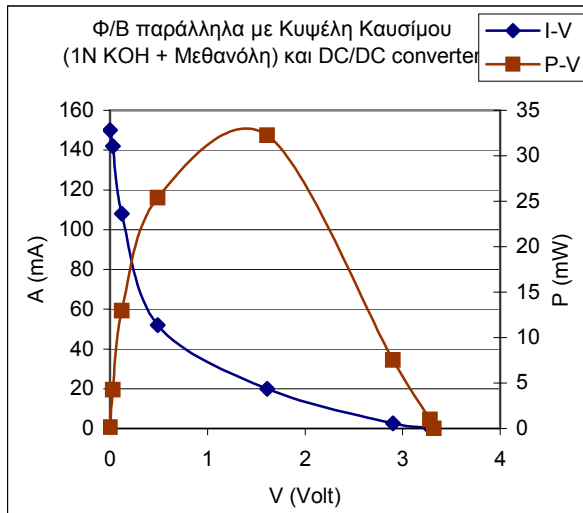
Γράφημα 38



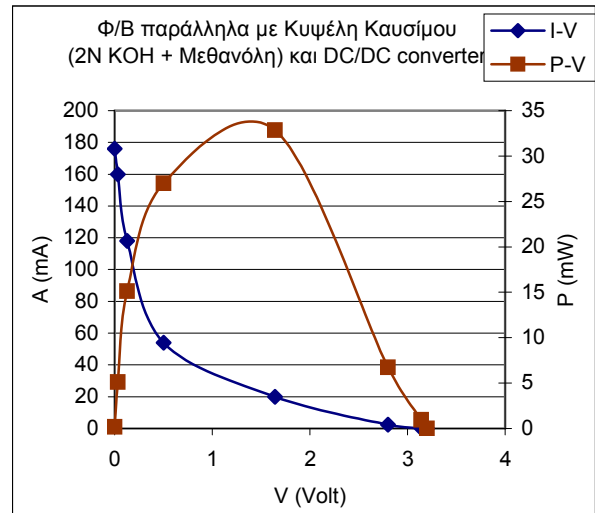
Γράφημα 39



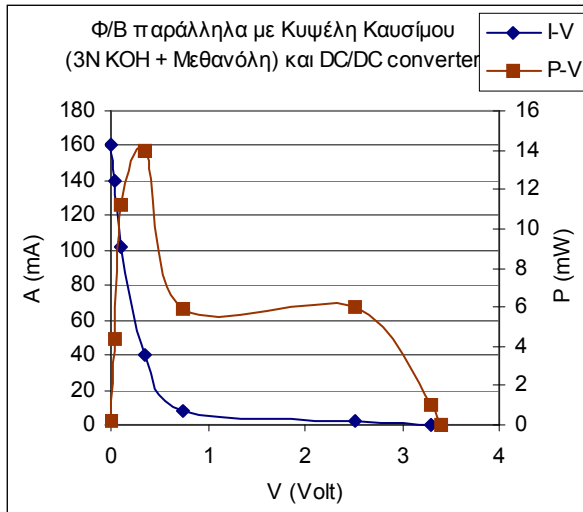
Γράφημα 40



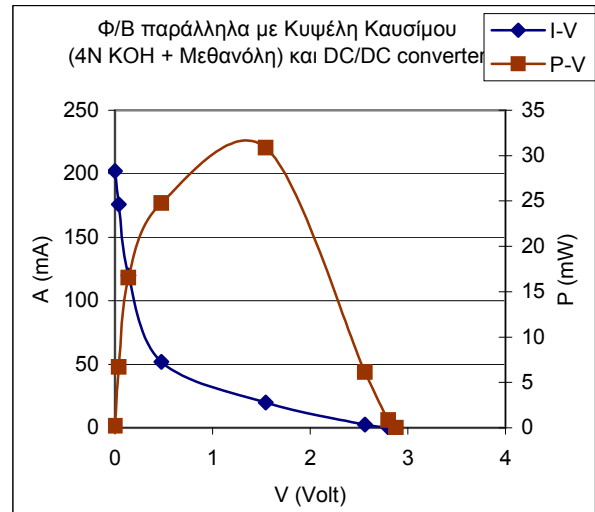
Γράφημα 41



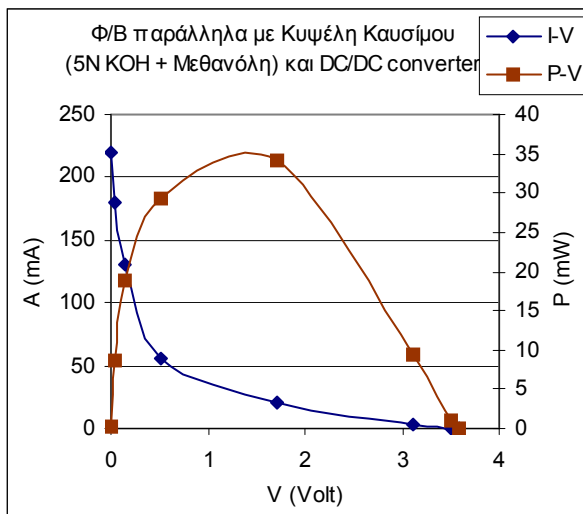
Γράφημα 42



Γράφημα 43

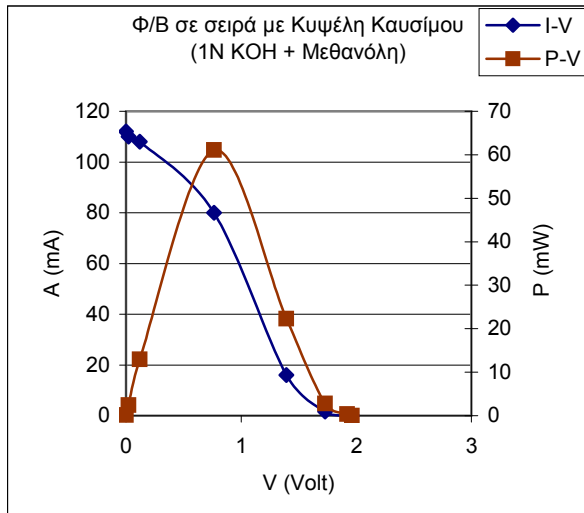


Γράφημα 44

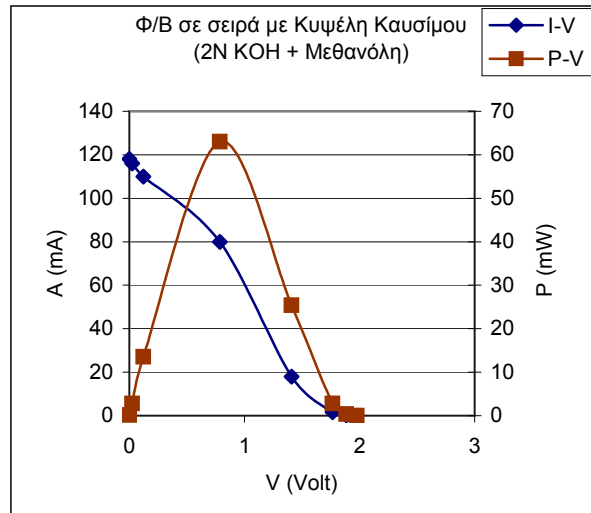


Γράφημα 45

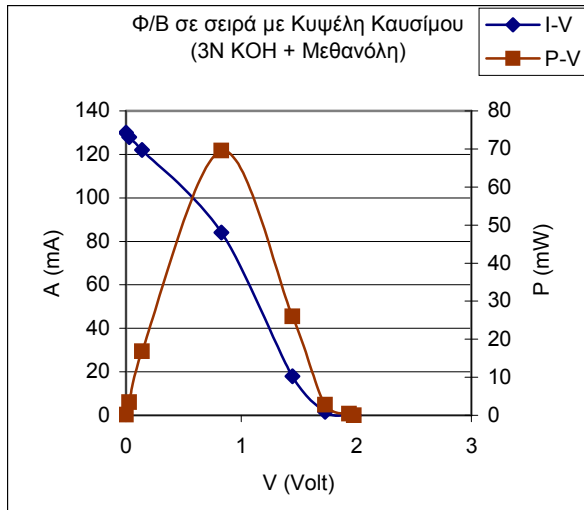




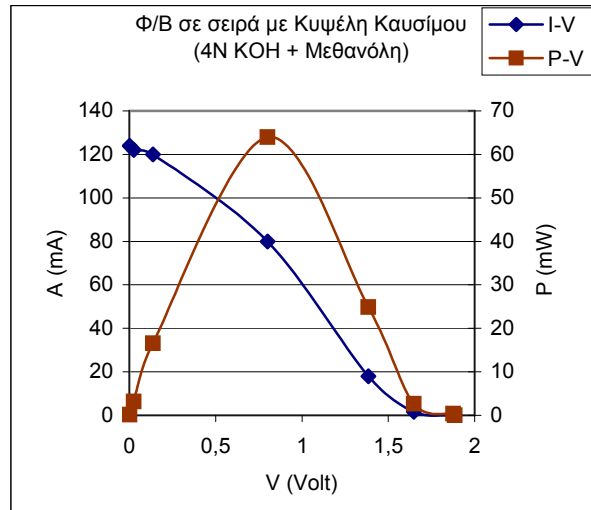
Γράφημα 46



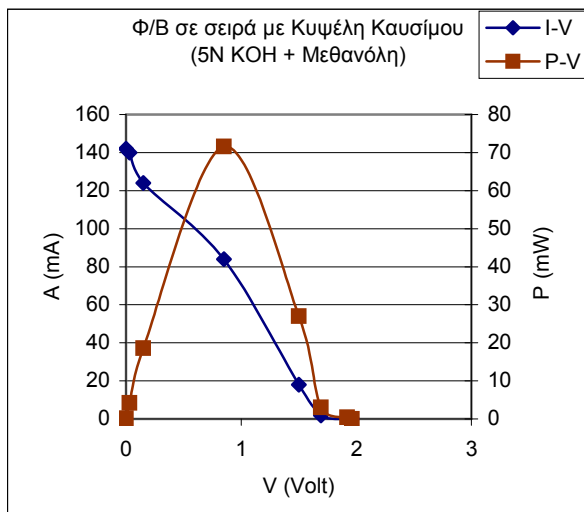
Γράφημα 47



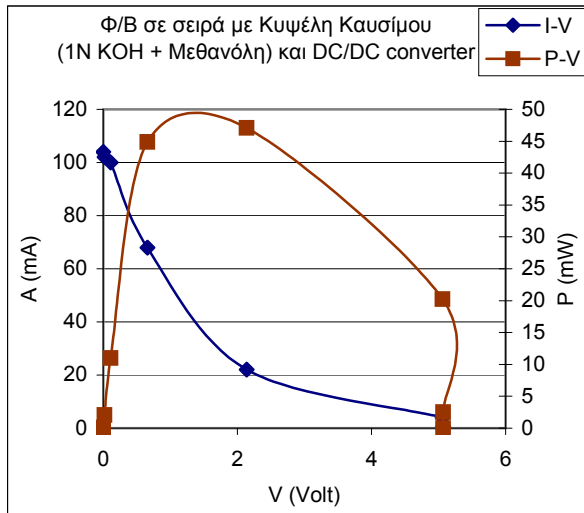
Γράφημα 48



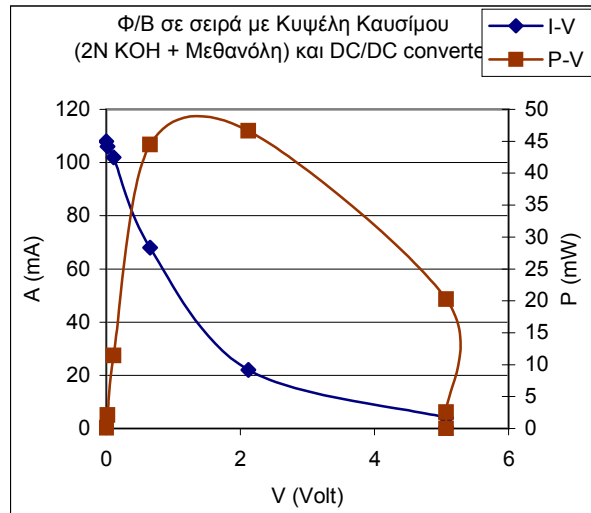
Γράφημα 49



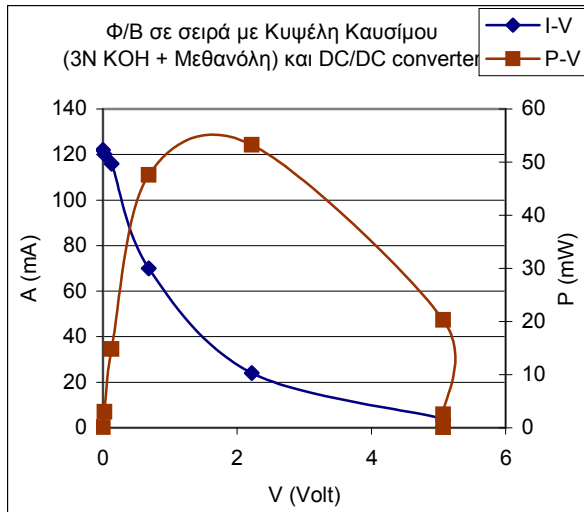
Γράφημα 50



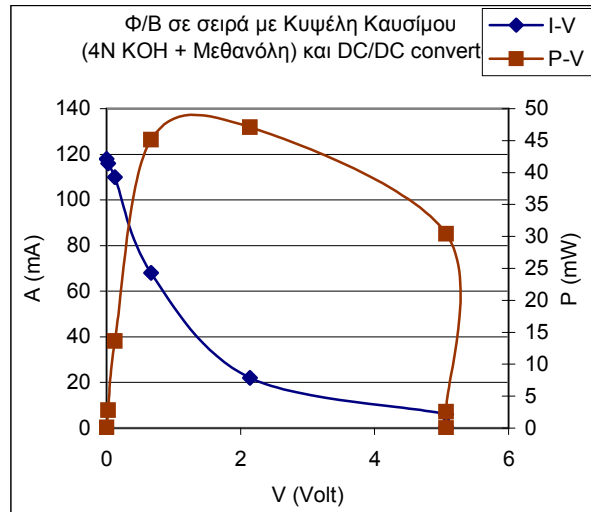
Γράφημα 51



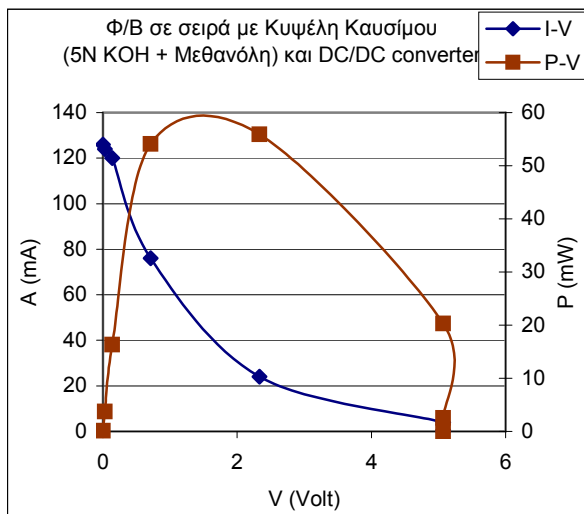
Γράφημα 52



Γράφημα 53



Γράφημα 54



Γράφημα 55



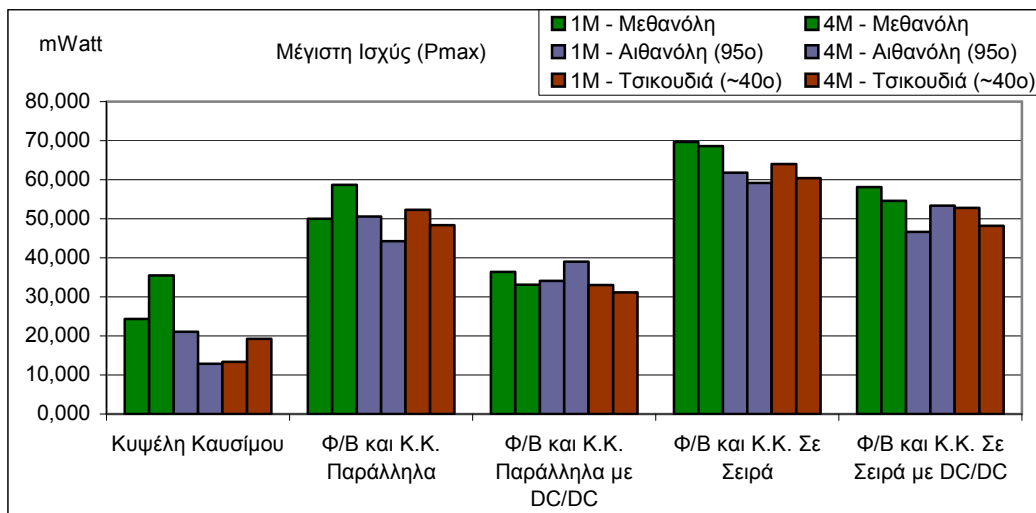
Φαίνεται ξεκάθαρα πως όλες οι καμπύλες ισχύος παρουσιάζουν σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point – MPP). Εξάιρεση αποτελούν οι καμπύλες που αφορούν τη συνδεσμολογία με τον μετατροπέα και το γεγονός αυτό εξηγείται στο κεφάλαιο 5.3.3. Το MPP είναι μία σημαντική παράμετρος που χαρακτηρίζει μία πηγή, και χρησιμοποιείται ιδιαίτερα στη μελέτη φωτοβολταϊκών συστημάτων. Περαιτέρω ανάλυση των καμπυλών γίνεται στο κεφ. 5.3.5.

### 5.3.2. Σύγκριση τιμών

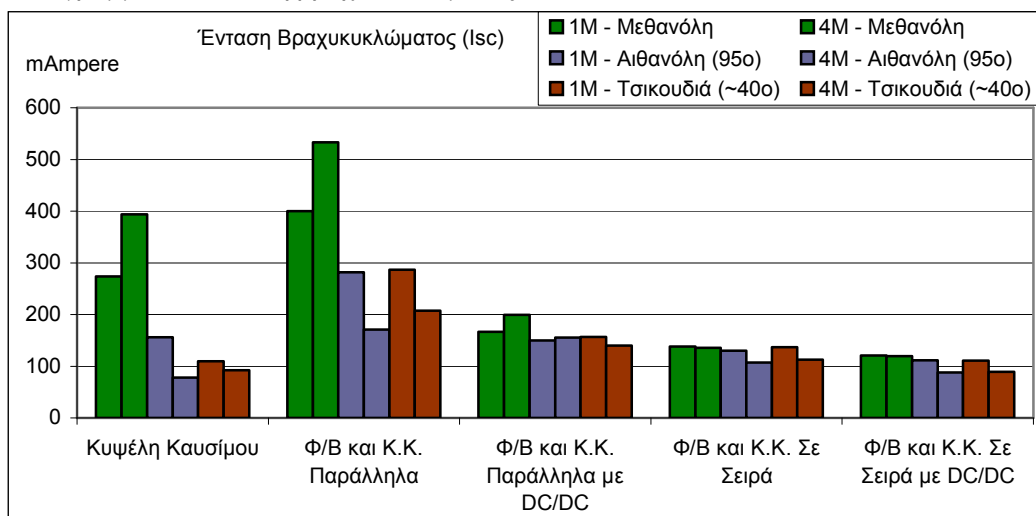
Ακολουθούν κάποια διαγράμματα σύγκρισης των πιο χαρακτηριστικών μετρήσεων του συστήματος για τους διάφορους συνδυασμούς διαλυμάτων και τις διαφορετικές συνδεσμολογίες.

Ας σημειωθεί εδώ, ότι τα παρακάτω διαγράμματα βασίζονται στους μέσους όρους των αντίστοιχων τιμών από τις τρεις επαναλήψεις των μετρήσεων, και αυτό έγινε για λόγους αξιοπιστίας και εγκυρότητας των μετρήσεων.

Διάγραμμα 1 : Μέγιστη Ισχύς Κυκλώματος

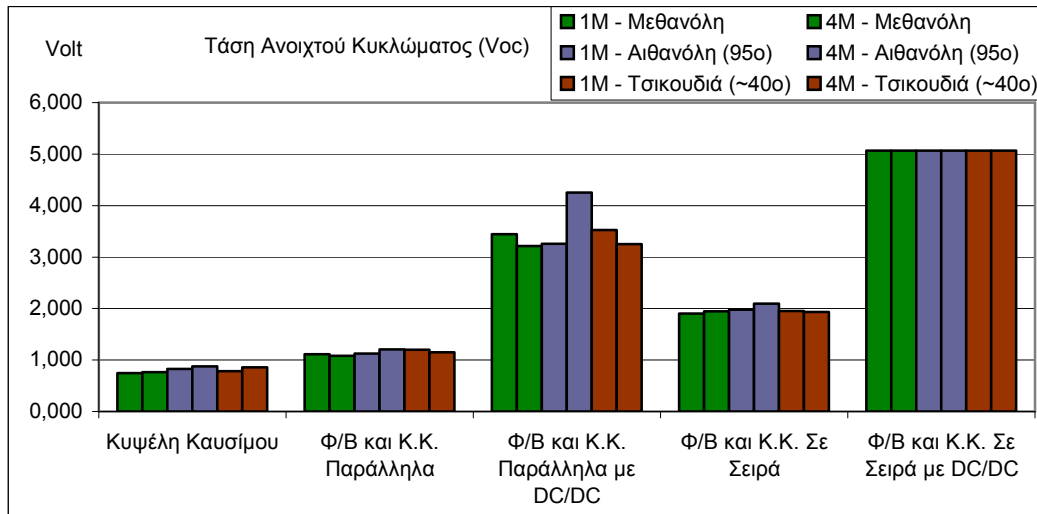


Διάγραμμα 2 : Ένταση βραχυκυκλώματος

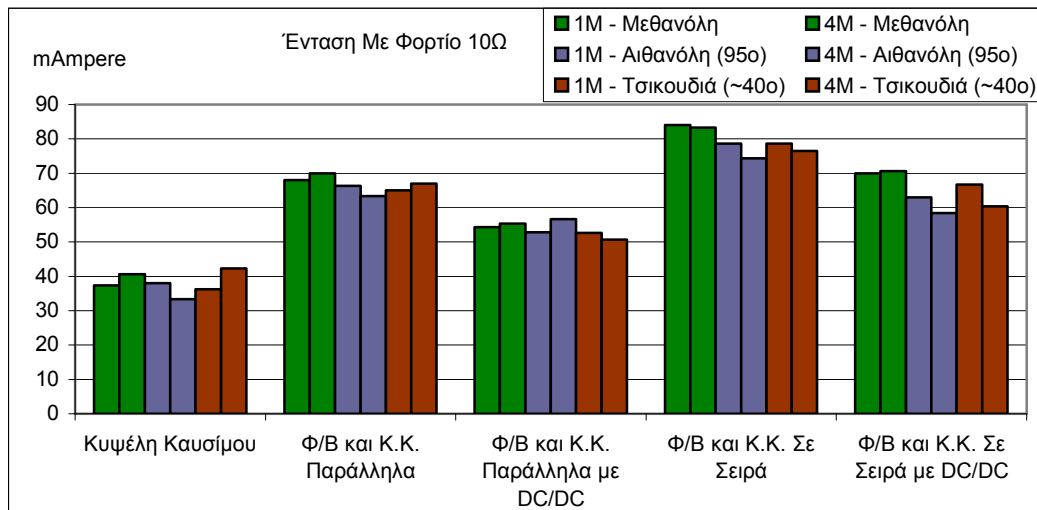




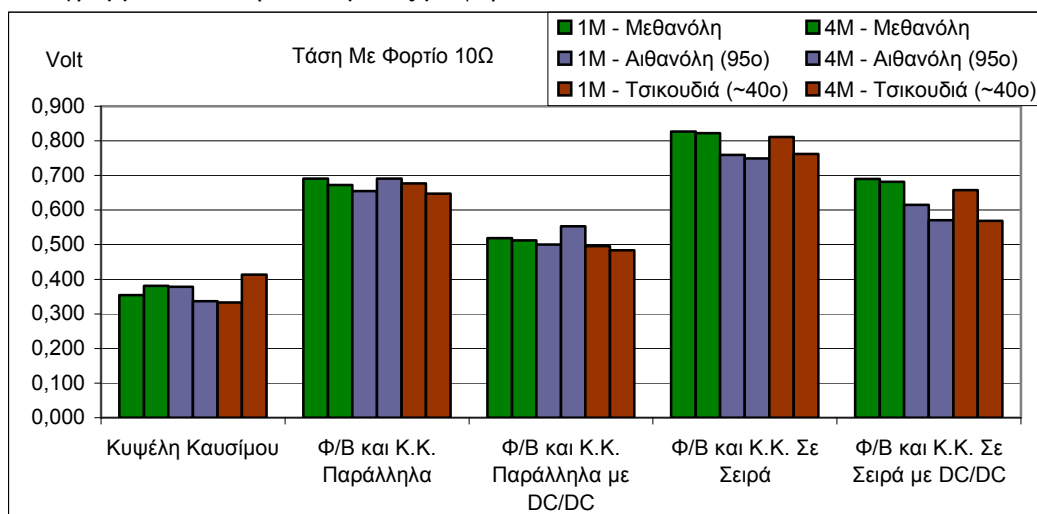
Διάγραμμα 3 : Τάση Ανοιχτού Κυκλώματος



Διάγραμμα 4 : Ένταση κυκλώματος με φορτίο 10Ω

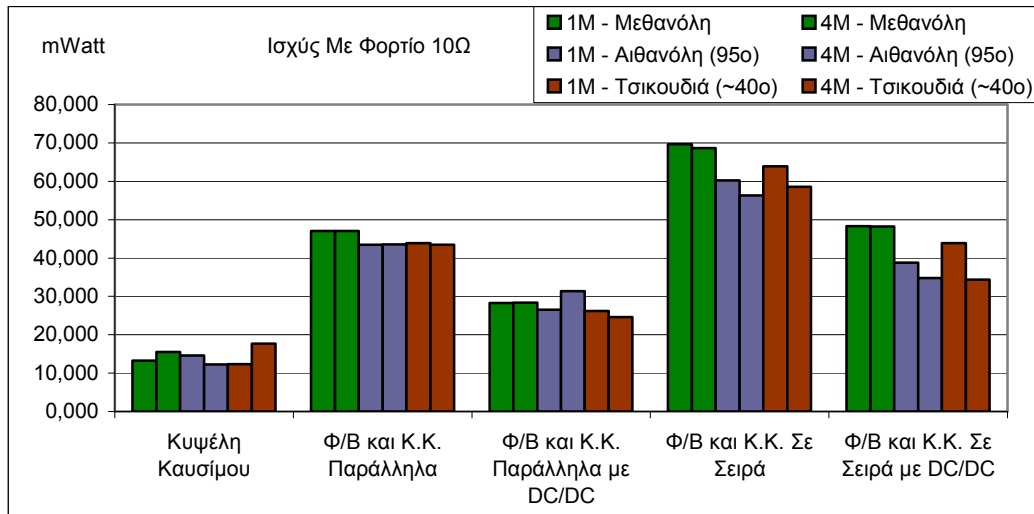


Διάγραμμα 5 : Τάση κυκλώματος με φορτίο 10Ω

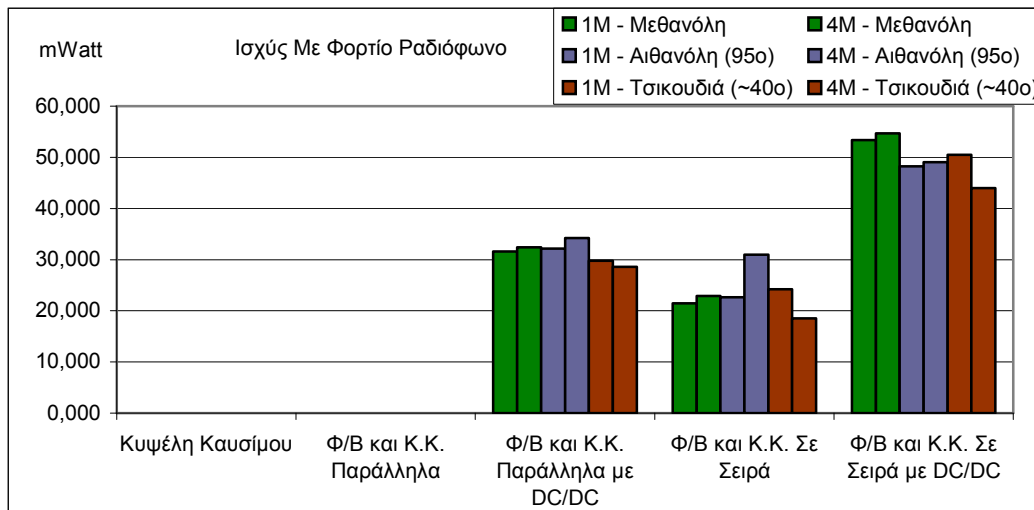




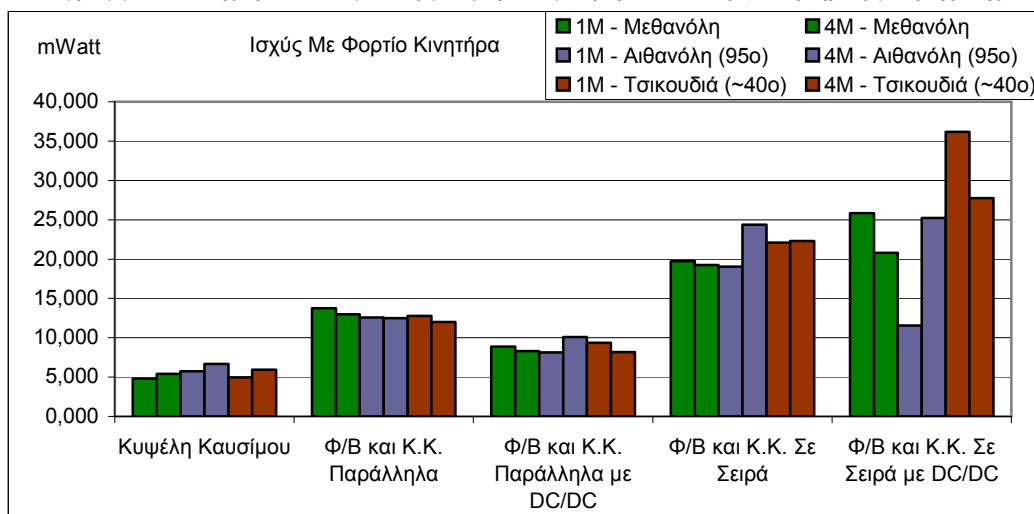
Διάγραμμα 6 : Ισχύς κυκλώματος με φορτίο 10Ω



Διάγραμμα 7 : Ισχύς Κυκλώματος με φορτίο μικρή συσκευή (ραδιόφωνο τσέπης)

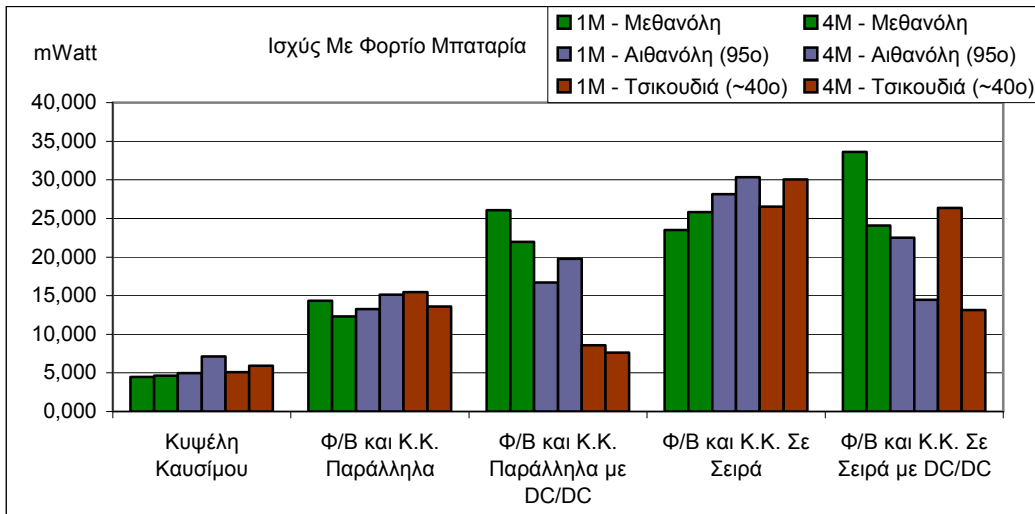


Διάγραμμα 8 : Ισχύς Κυκλώματος με φορτίο μικρή συσκευή (κινητήρας μικρής ισχύος)

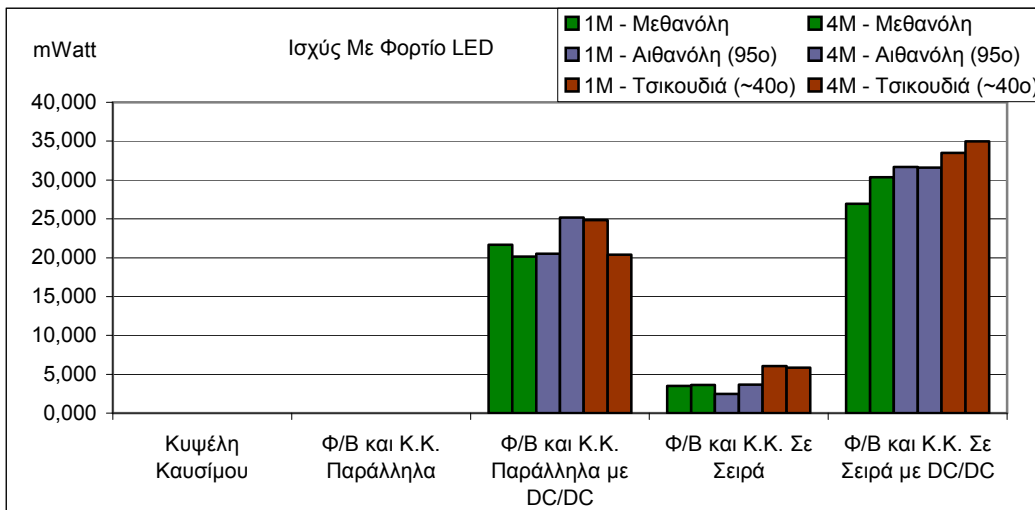




Διάγραμμα 9 : Ισχύς Κυκλώματος με φορτίο μικρή συσκευή (επαναφορτιζόμενη μπαταρία)



Διάγραμμα 10 : Ισχύς Κυκλώματος με φορτίο μικρή συσκευή (φωτοдиодος - LED)

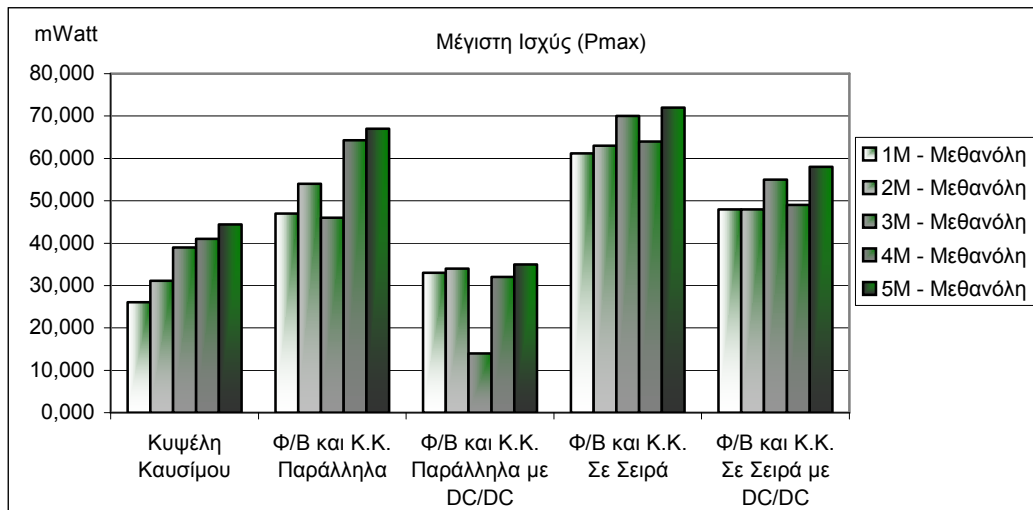




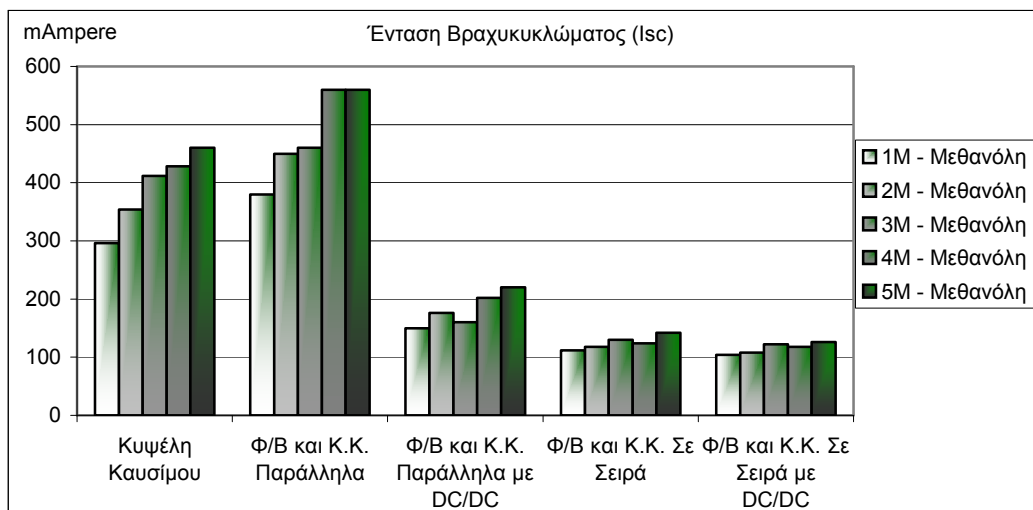


Τα παρακάτω διαγράμματα αφορούν τη σύγκριση των πιο χαρακτηριστικών τιμών της κυψέλης καυσίμου συναρτήσει της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη (M KOH).

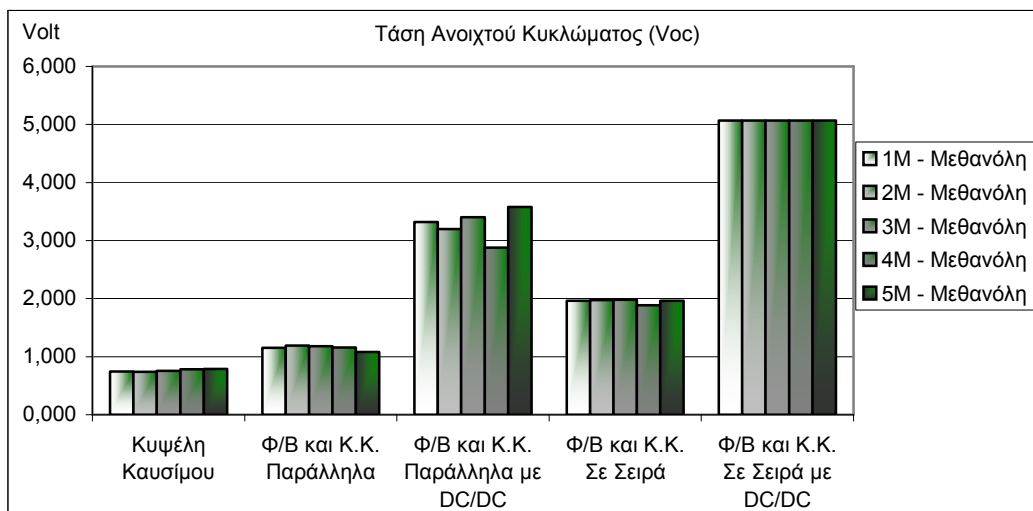
Διάγραμμα 11 : Μέγιστη Ισχύς Κυκλώματος



Διάγραμμα 12 : Ένταση βραχυκυκλώματος

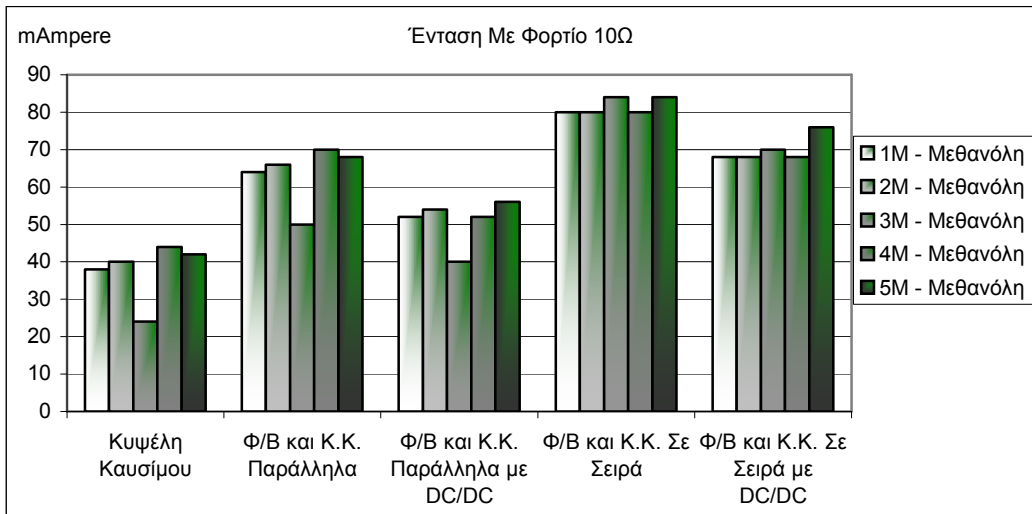


Διάγραμμα 13 : Τάση Ανοιχτού Κυκλώματος

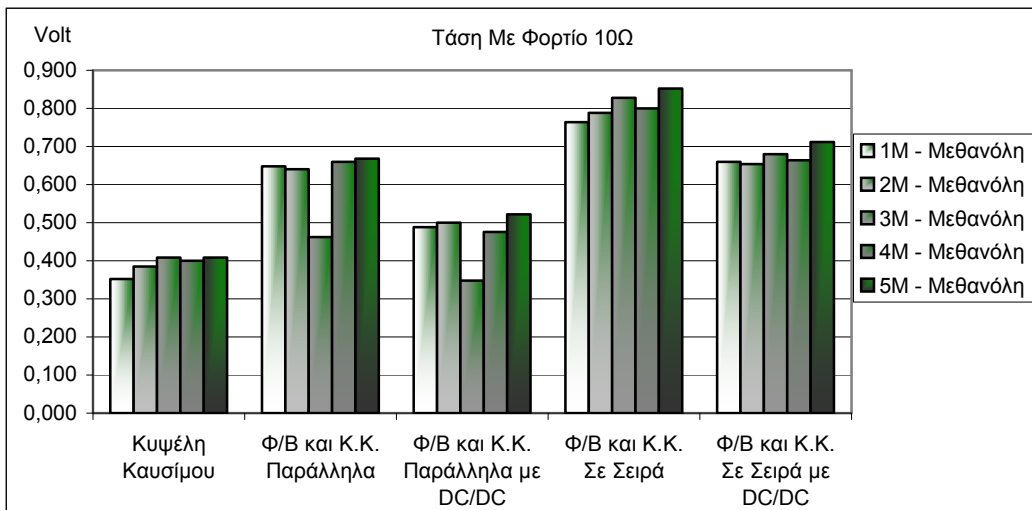




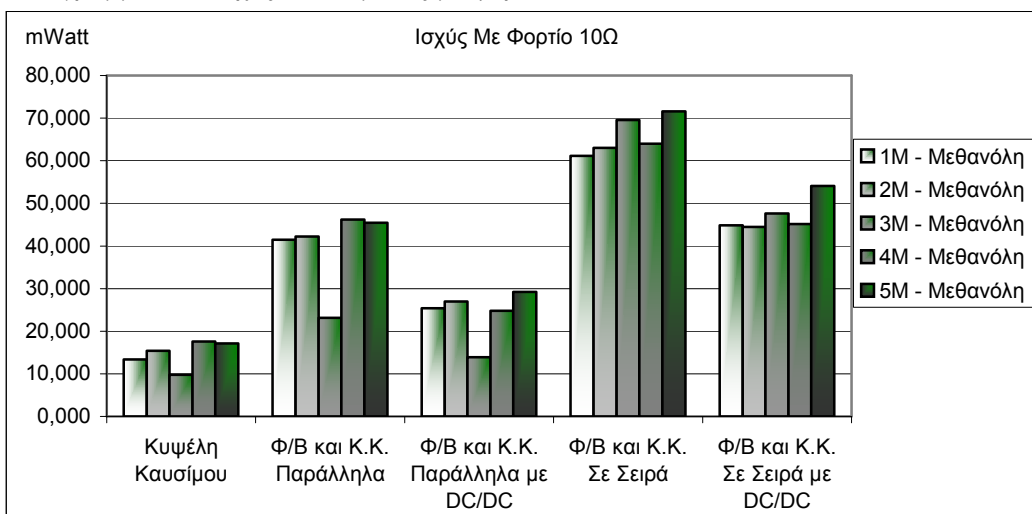
Διάγραμμα 14 : Ένταση κυκλώματος με φορτίο 10Ω



Διάγραμμα 15 : Τάση κυκλώματος με φορτίο 10Ω

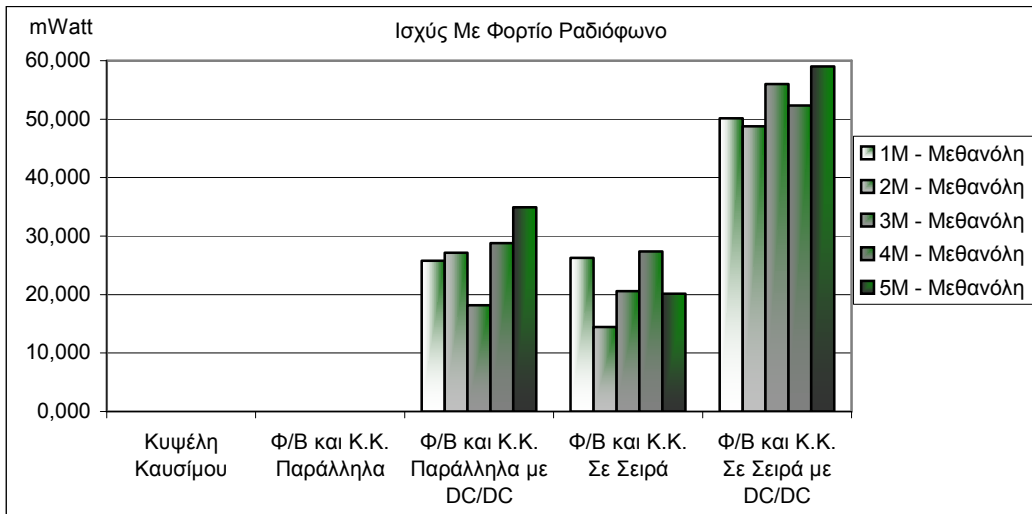


Διάγραμμα 16 : Ισχύς κυκλώματος με φορτίο 10Ω

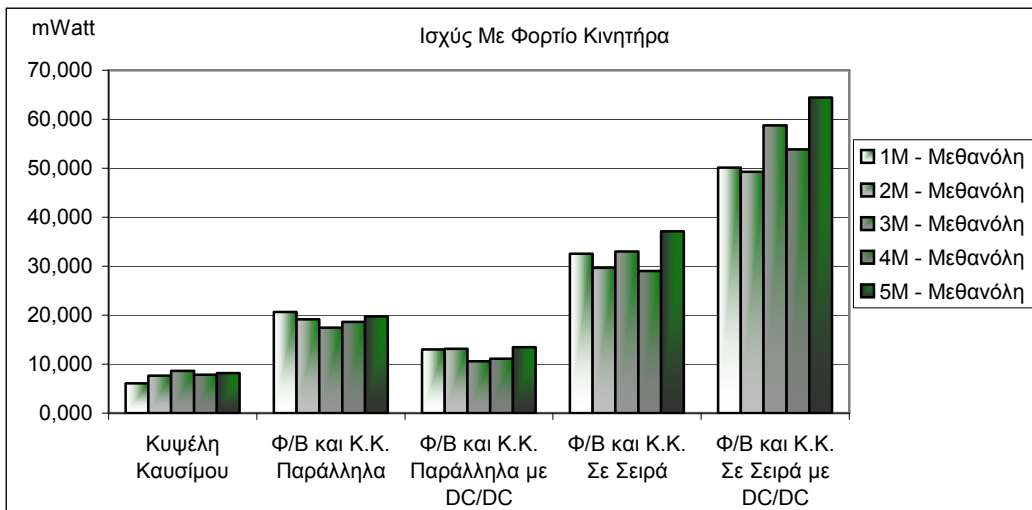




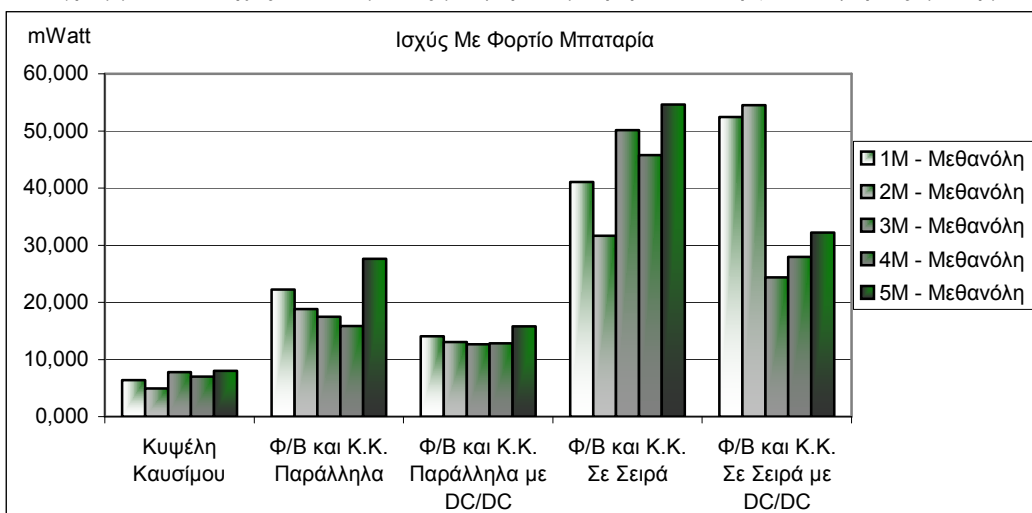
Διάγραμμα 17 : Ισχύς Κυκλώματος με φορτίο μικρή συσκευή (ραδιόφωνο τσέπης)



Διάγραμμα 18 : Ισχύς Κυκλώματος με φορτίο μικρή συσκευή (κινητήρας μικρής ισχύος)

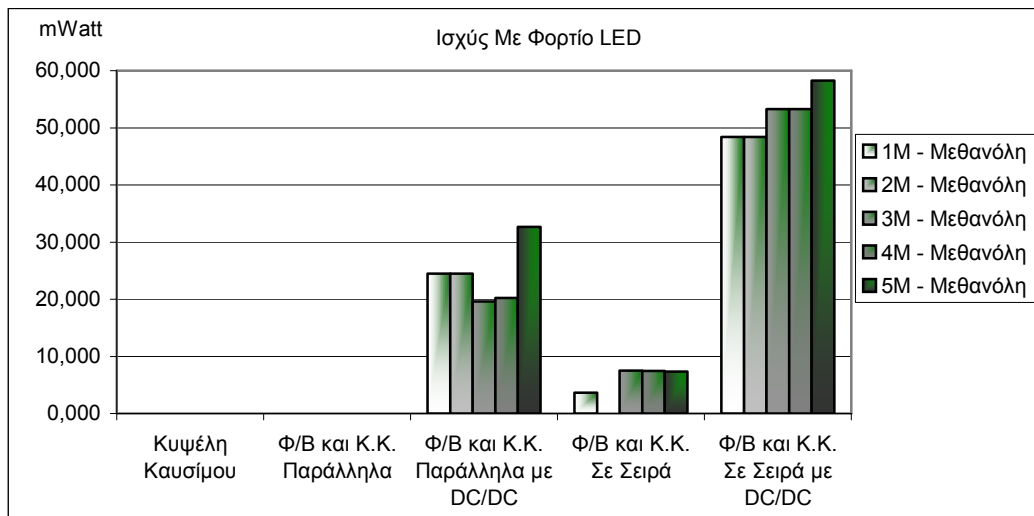


Διάγραμμα 19 : Ισχύς Κυκλώματος με φορτίο μικρή συσκευή (επαναφορτιζόμενη μπαταρία)



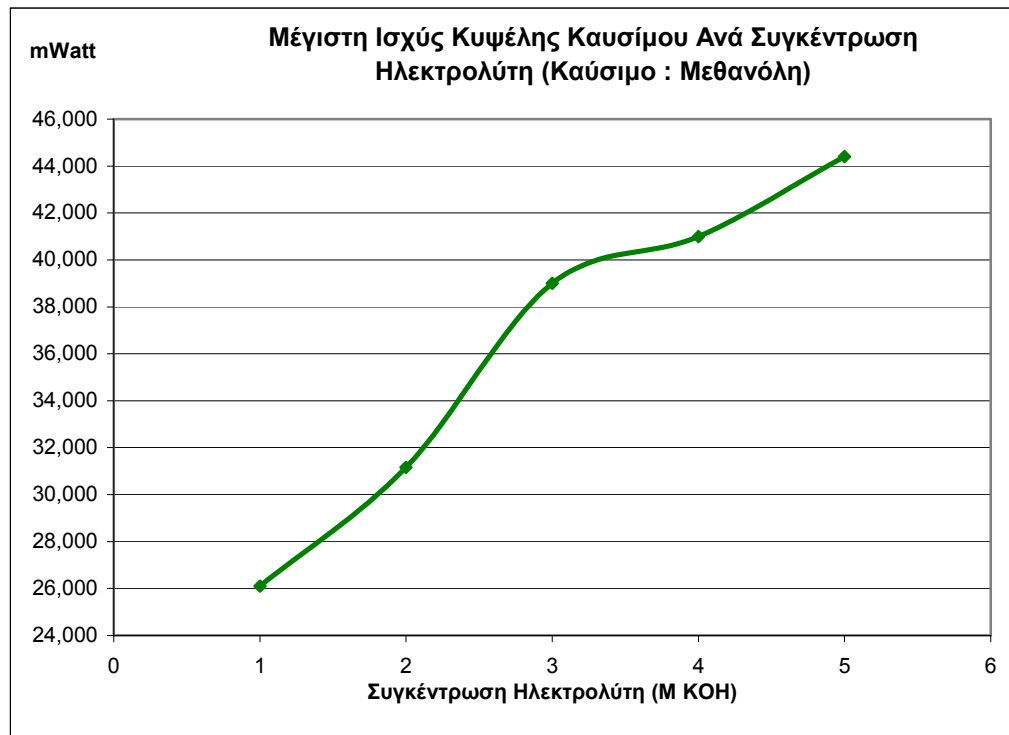


Διάγραμμα 20 : Ισχύς Κυκλώματος με φορτίο μικρή συσκευή (φωτοдиодος - LED)



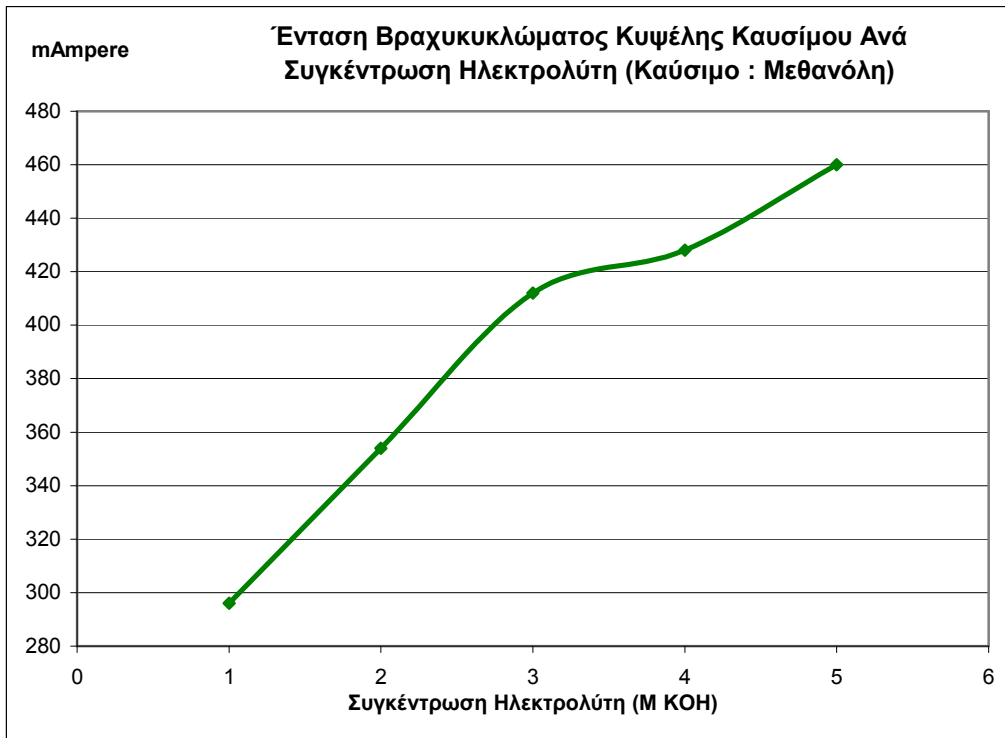
Οι ακόλουθες καμπύλες είναι μία λεπτομερέστερη αναπαράσταση για ευκολότερη κατανόηση των παραπάνω διαγραμμάτων, και για να τονιστεί η εξάρτηση των παραμέτρων από τη συγκέντρωση του διαλύματος.

Γράφημα Σ-1

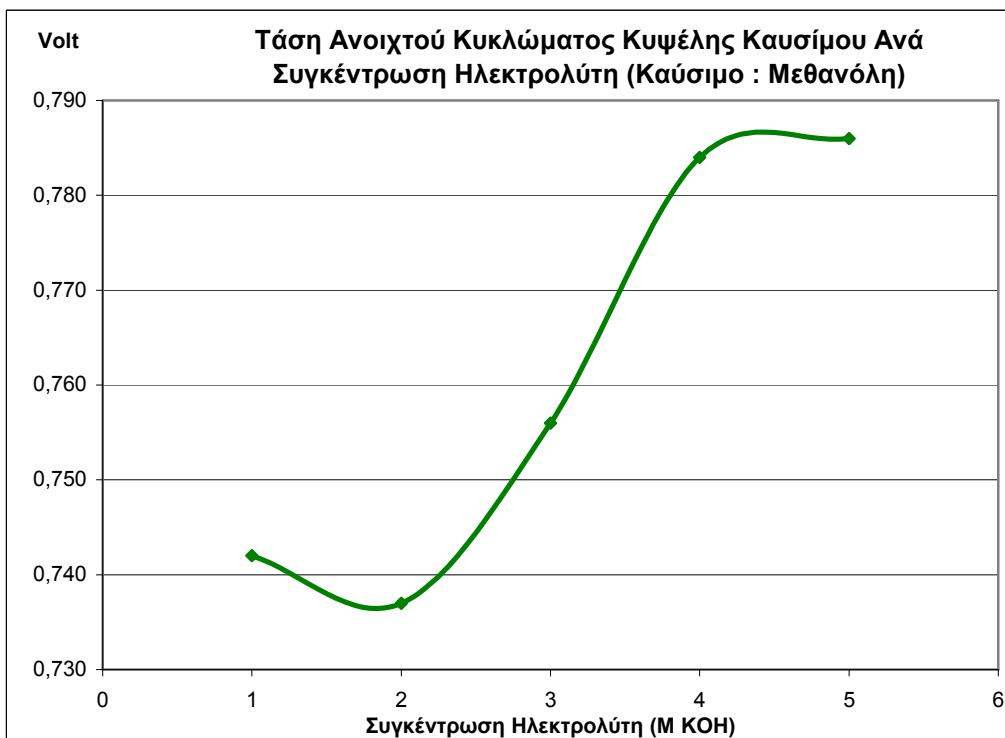




Γράφημα Σ-2



Γράφημα Σ-3

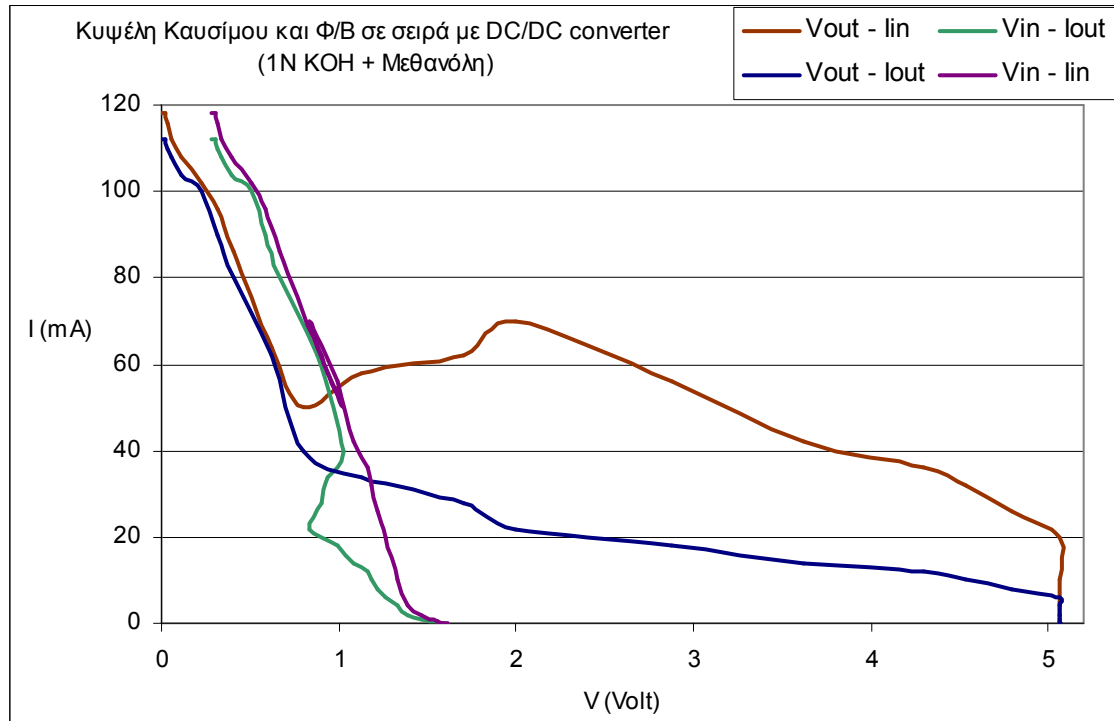


Είναι εμφανής μία σχέση αναλογίας μεταξύ των παραπάνω τιμών και της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη, αλλά πιο λεπτομερής ανάλυση ακολουθεί στο σχολιασμό (κεφ. 5.3.5).



### 5.3.3. Μελέτη λειτουργίας του μετατροπέα DC/DC στο σύστημα

Παρακάτω παρουσιάζεται η καμπύλη τάσης – έντασης σε συνδυασμούς της εισόδου με την έξοδο του DC/DC converter (chopper), για μελέτη της λειτουργίας του.



Γράφημα DC : Καμπύλες I – V για τον DC/DC converter.

Αυτές οι καμπύλες μας δίνουν την δυνατότητα να αντιληφθούμε την λειτουργία του converter. Αν παρατηρηθούν μαζί οι καμπύλες ( $V_{OUT} - I_{IN}$ ) και ( $V_{OUT} - I_{OUT}$ ), είναι εμφανές ότι από το σημείο των 0,7V περίπου κι έπειτα, το ρεύμα εισόδου ( $I_{IN}$ ) παρουσιάζεται αρκετά αυξημένο σε σχέση με το ρεύμα εξόδου ( $I_{OUT}$ ). Επίσης στο ζεύγος καμπυλών που περιλαμβάνει την τάση  $V_{OUT}$  παρουσιάζεται μία σταθερή πτώση τάσης περίπου 0,3V σε σχέση με το ζεύγος καμπυλών που περιλαμβάνει την τάση  $V_{IN}$ . Αυτό συμβαίνει μέχρι το σημείο των 0,7V ( $V_{OUT}$ ) – 1V ( $V_{IN}$ ) περίπου. Από αυτό το σημείο και πέρα, φαίνεται η τάση  $V_{IN}$  να μειώνεται και το ρεύμα  $I_{IN}$  να αυξάνεται, ενώ αντίθετα η τάση  $V_{OUT}$  αυξάνεται και το ρεύμα  $I_{OUT}$  μειώνεται.

Τα γεγονότα που περιγράφηκαν παραπάνω, οδηγούν ξεκάθαρα στο συμπέρασμα ότι μέχρι το σημείο που επισημάνθηκε παραπάνω [0,7V ( $V_{OUT}$ ) – 1V ( $V_{IN}$ )], ο converter δεν ενεργεί ανυψωτικά για την τάση, αλλά απλά μεταφέρει την είσοδο στην έξοδο, με κάποια πτώση τάσης, που οφείλεται στην λειτουργία των κυκλωμάτων του. Επίσης, είναι εμφανές πως από το σημείο αυτό και πέρα, καθώς το φορτίο αυξάνει, κατά συνέπεια και η τάση, ο converter ενεργοποιείται και αρχίζει την ανύψωση της τάσης.

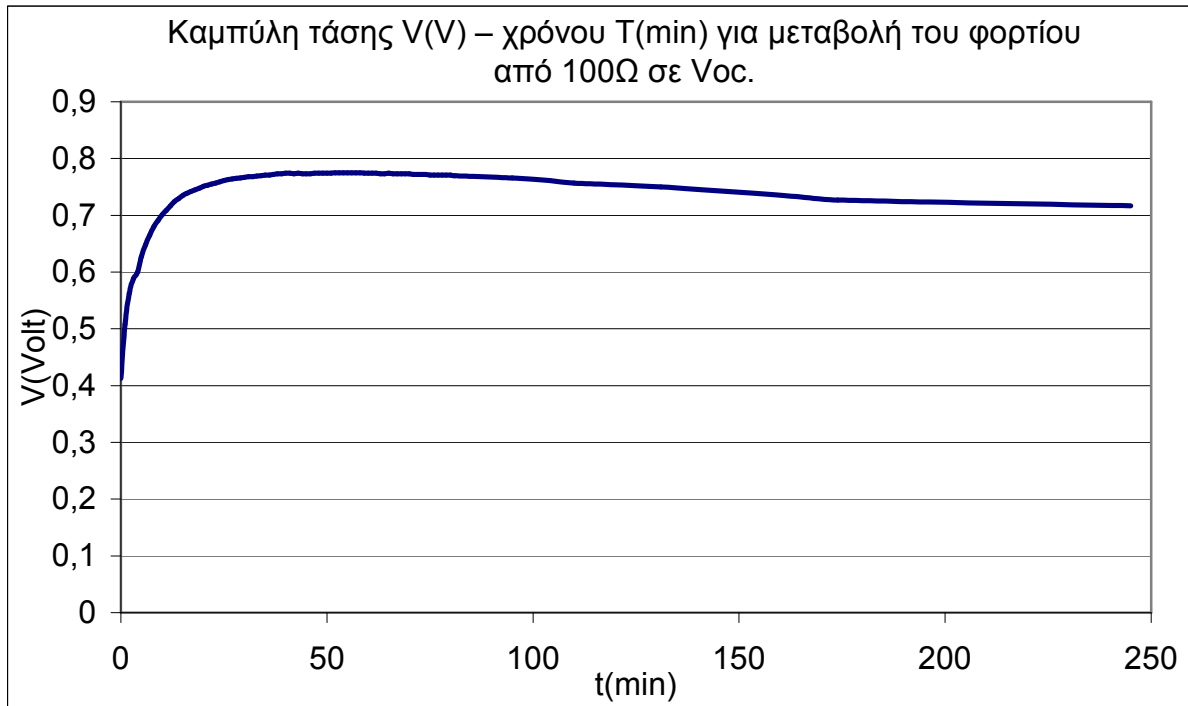
Ο παραπάνω ισχυρισμός επιβεβαιώνεται και από τις προδιαγραφές του κατασκευαστή, ο οποίος ορίζει τάση εισόδου του DC/DC converter τα 0,7 – 7 Volt, για κανονική λειτουργία, το οποίο σημαίνει στην ουσία πως κάτω από αυτό το όριο δεν γίνεται μετατροπή, ενώ πάνω από αυτό το όριο η συσκευή κινδυνεύει να καταστραφεί. Επίσης, ο κατασκευαστής αναφέρει χαρακτηριστικά πως η συσκευή έχει τη δυνατότητα εντοπισμού χαμηλής μπαταρίας, το οποίο σημαίνει πως έχει ορίσει ένα όριο (1,25 Volt) όπου αν η τάση εισόδου πέσει κάτω από αυτό το όριο τότε το σύστημα διαρρέει ρεύμα προς τη γείωση, μειώνοντας έτσι την τάση εξόδου. Αυτό παρατηρείται και στις παραπάνω καμπύλες με τον εξής τρόπο : όσο η τάση εισόδου υπερβαίνει τα 1,25V, η τάση εξόδου είναι σταθερά 5,06V. Από τη στιγμή που η τάση εισόδου πέσει κάτω από το παραπάνω όριο, η τάση εξόδου σταδιακά μειώνεται.. Όπως φαίνεται από τον τρόπο λειτουργίας του, ο μετατροπέας είναι τύπου *boost converter*.



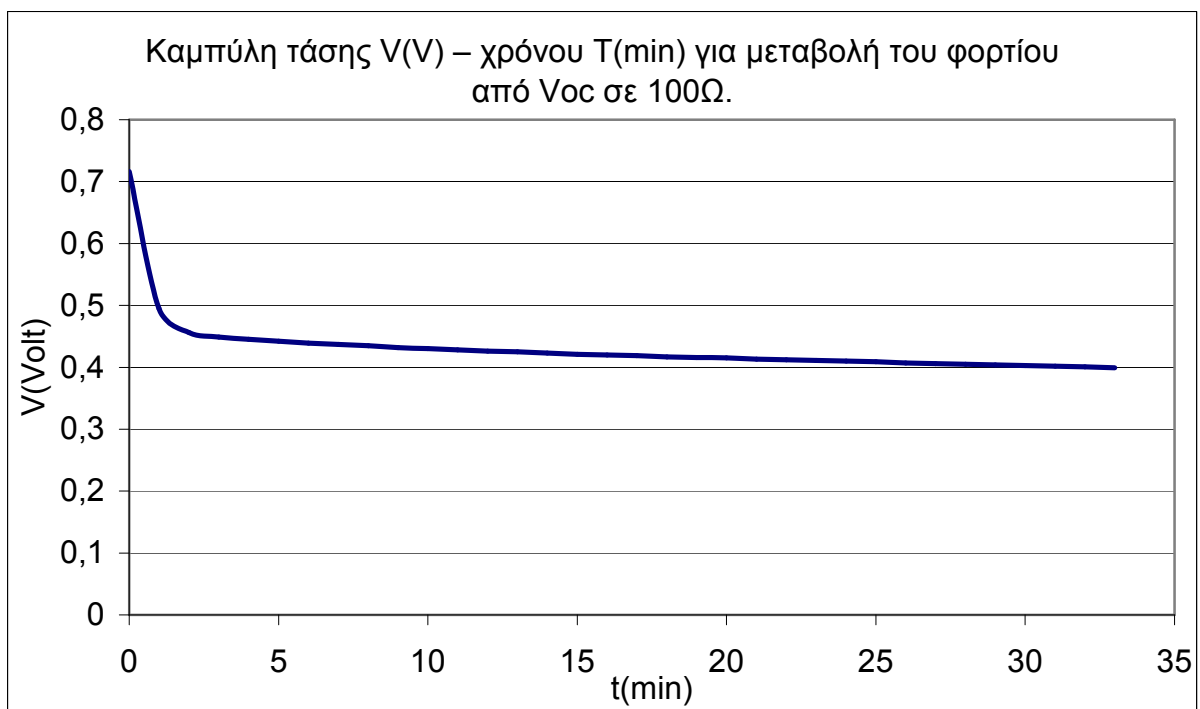


#### 5.3.4. Μελέτη χρονικής μεταβολής τάσης και ρεύματος της κυψέλης κατά την αλλαγή φορτίου

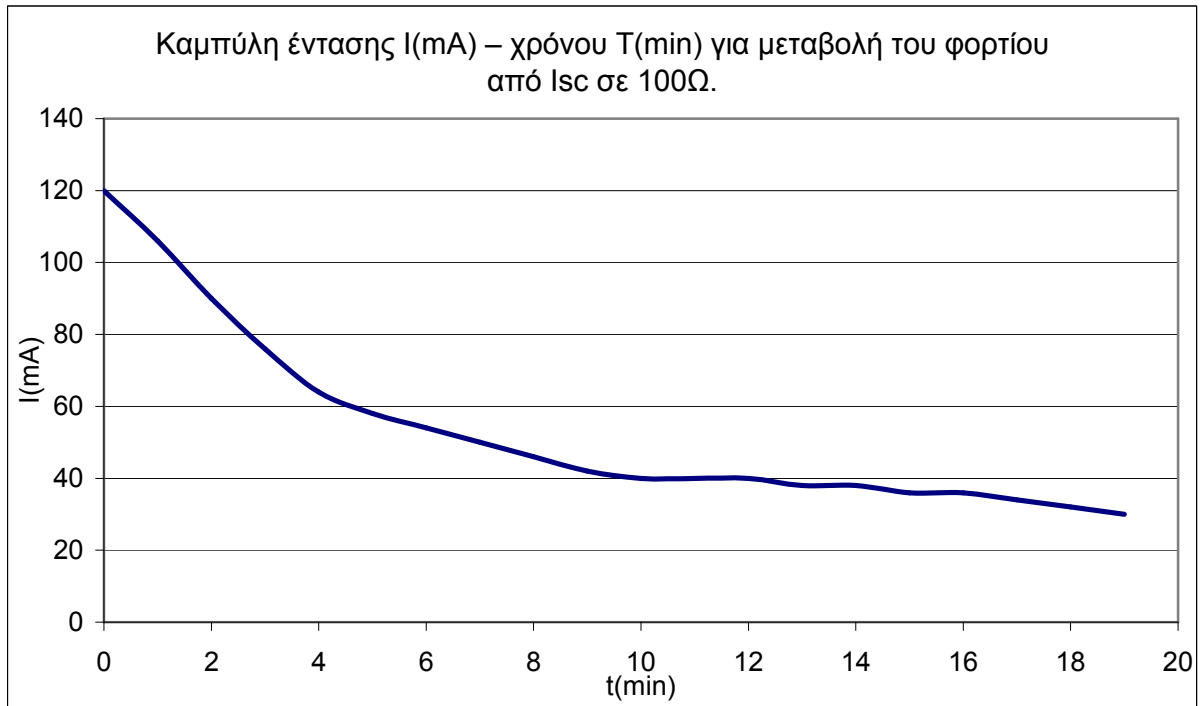
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι καμπύλες χρονικής μεταβολής της τάσης της κυψέλης καυσίμου κατά την αλλαγή του φορτίου.



Γράφημα T-1 : Καμπύλη τάσης V(V) – χρόνου T(min) για μεταβολή του φορτίου από 100Ω σε τάση ανοιχτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ )



Γράφημα T-2 : Καμπύλη τάσης V(V) – χρόνου T(min) για μεταβολή του φορτίου από τάση ανοιχτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ ) σε 100Ω.



Γράφημα **T-3** : Καμπύλη έντασης  $I$ (mA) – χρόνου  $T$ (min) για μεταβολή του φορτίου από ένταση βραχυκυκλώματος ( $I_{sc}$ ) σε  $100\Omega$ .

Από τις παραπάνω καμπύλες φαίνεται πως η κυψέλη καυσίμου χρειάζεται κάποιο ελάχιστο χρόνο για να προσαρμόσει την τάση της (κατά συνέπεια και την ένταση του ρεύματος) στις απαιτήσεις του φορτίου, όπως επίσης και ότι ο χρόνος αυτός δεν είναι δεδομένος, αλλά εξαρτάται από τη μεταβολή. Χαρακτηριστικά, χρειάζονται περίπου 20 λεπτά για να προσαρμοστεί η κυψέλη όταν το φορτίο του κυκλώματος γίνεται από  $100\Omega$ , θεωρητικά άπειρο ( $V_{oc}$  – ανοιχτό κύκλωμα), ενώ χρειάζονται μόνο 2 λεπτά για να γίνει το αντίθετο, δηλαδή να προσαρμοστεί η κυψέλη καυσίμου από θεωρητικά άπειρο φορτίο ( $V_{oc}$  – ανοιχτό κύκλωμα) σε φορτίο  $100\Omega$ .

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα παραπάνω, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η ένδειξη του βολτομέτρου (όπως και του αμπερομέτρου, όπως παρατηρήθηκε) δεν πρέπει να καταγράφεται αμέσως μετά την μεταβολή του φορτίου, γιατί δεν αποτελεί την πραγματική μέτρηση. Έτσι, χρησιμοποιήθηκε ένα δυναμικό όριο 1-5 λεπτών για την καταγραφή της ένδειξης, με την προϋπόθεση βέβαια ότι αυτή παρέμενε σταθερή στο τέλος του παραπάνω χρονικού διαστήματος. Αυτό συνέβαλε στην πιστότητα των μετρήσεων.



### 5.3.5. Συμπεράσματα μετρήσεων - σχολιασμός

Από τις μετρήσεις και τη σύγκριση τιμών, παρατηρήθηκαν τα εξής:

1. Η τάση ανοιχτού κυκλώματος της κυψέλης καυσίμου με καύσιμο μεθανόλη κυμαίνεται περίπου στα 0,72 – 0,78 Volt , ενώ με καύσιμο αιθανόλη η τάση κυμαίνεται περίπου στα 0,82 – 0,88 Volt, διαφορά αρκετά σημαντική, αν λάβει κανείς υπ' όψιν το εύρος της τάσης της κυψέλης καυσίμου.
2. Αντίθετα, η ένταση βραχυκυκλώματος όταν χρησιμοποιείται ως καύσιμο η μεθανόλη, κυμαίνεται περίπου στα όρια των 260 – 460 mAmpere, ενώ με καύσιμο αιθανόλη στα 80 – 160 mAmpere.
3. Ας σημειωθεί, πως στις δύο πρώτες παρατηρήσεις η διακύμανση αυτή που παρατηρείται στα αναφερόμενα μεγέθη οφείλεται εν μέρει σε πειραματικά σφάλματα, αλλά κυρίως εξαρτάται από την συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη, όπως φαίνεται και στο κεφ. 5.3.2. Επίσης, οι τιμές που καταγράφηκαν ενδέχεται να περιέχουν ένα συστηματικό σφάλμα, λόγω υποκειμενικότητας και μη επάρκειας της εμπειρίας του γράφοντος.
4. Επίσης, όσον αφορά την ένταση βραχυκυκλώματος, όπως αναφέρθηκε και στο σχόλιο 2, κυμαίνεται περίπου στα όρια των 260 – 460 mAmpere, για μεθανόλη ως καύσιμο, ενώ με καύσιμο αιθανόλη στα 80 – 160 mAmpere. Σε αυτά τα μεγέθη, μπορούμε να παρατηρήσουμε μία αναλογία περίπου 3 προς 1. Ξέρουμε από την θεωρητική χημεία ότι η μεθανόλη αποδίδει 6 ηλεκτρόνια για κάθε μόριο σε μία κυψέλη καυσίμου, ενώ η αιθανόλη 2 ηλεκτρόνια για κάθε μόριο, όπου παρατηρείται πάλι μια αναλογία 3 προς 1. Αυτά τα μεγέθη είναι πιθανόν να συσχετίζονται, εφόσον η πυκνότητα ρεύματος εξαρτάται και από τον αριθμό των ηλεκτρονίων.
5. Ξέρουμε πως η θεωρητική μέγιστη τάση ανοιχτού κυκλώματος για την κυψέλη καυσίμου με καύσιμο μεθανόλη είναι 1,206 Volt, όπως υπολογίστηκε στο θεωρητικό κομμάτι της εργασίας (σελ. 17). Αυτή όμως δεν είναι και η τιμή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος που μετρήσαμε, καθώς με καύσιμο μεθανόλη η μέγιστη τάση ανοιχτού κυκλώματος που μετρήθηκε έφτανε περίπου μέχρι τα 0,78V με 0,79 V. Άρα έχουμε μία διαφορά της τάξεως των 0,41V με 0,42V, η οποία μπορεί να αποδοθεί στις απώλειες της κυψέλης καυσίμου, δηλαδή:
  - Απώλειες ενεργοποίησης ,
  - Διασταύρωση καυσίμου και εσωτερικά ρεύματα ,
  - Ωμικές απώλειες ,
  - Απώλειες μαζικής μεταφοράς ή απώλειες συγκέντρωσης.Στην περίπτωση που δεν υπήρχαν απώλειες, η τάση ανοιχτού κυκλώματος της κυψέλης με καύσιμο μεθανόλη, θα ήταν 1,206 Volt, και η καμπύλη φορτίου της θα ήταν ευθεία, με σταθερή την τάση σε αυτή την τιμή. Αυτό φαίνεται καθαρά και στην σελίδα 21, όπου έχει γίνει ο θεωρητικός υπολογισμός των απωλειών. Από αυτούς του υπολογισμούς προκύπτει μία θεωρητική τάση ανοιχτού κυκλώματος, με απώλειες, της τάξης των 0,791 Volt. Όπως φαίνεται και από τις μετρήσεις μας, οι αντίστοιχες τιμές πλησιάζουν κατά πολύ την θεωρητική, όμως κυμαίνονται κατά περίπου 0,005V-0,06V χαμηλότερα. Αυτό μπορεί να αποδοθεί σε κακή εργαστηριακή πρακτική, λόγω έλλειψης εμπειρίας του γράφοντος. Αυτή μπορεί να αφορά μη επαρκή ανάδευση για ομογενοποίηση του μείγματος της κυψέλης καυσίμου, ανεπαρκή χρόνο αναμονής πριν την καταγραφή της μέτρησης, κ.α.
6. Έχοντας ως δεδομένο ότι σε ένα σύστημα δύο πηγών συνδεδεμένων παράλληλα, η συνολική τάση του συστήματος είναι ο μέσος όρος της τάσης των δύο πηγών, ενώ η ένταση αθροίζεται, έγινε μία πειραματική δοκιμή : εφαρμόστηκε παράλληλα στην κυψέλη καυσίμου, με



ηλεκτρολύτη KOH 1M και καύσιμο μεθανόλη, πηγή με τάση ανοιχτού κυκλώματος περίπου 1,6V (συγκεκριμένα το φωτοβολταϊκό, με ρυθμισμένη την ένταση της ακτινοβολίας ώστε να δίνει αυτή την τάση). Παρατηρήθηκε ότι η τάση ανοιχτού κυκλώματος του συστήματος, έφτασε τα 1,422V. Μετά από υπολογισμούς, η τάση της κυψέλης καυσίμου σε αυτό το σύστημα προκύπτει 1,244V. Μετά την αποσύνδεση της δεύτερης πηγής (φωτοβολταϊκό), η τάση της κυψέλης διατηρήθηκε >1,2V για περίπου 2 λεπτά, >1,1V για περίπου 10 λεπτά και >1V για περίπου 20 λεπτά, προτού επανέλθει στην εντός αναμενόμενων ορίων τιμή της. Αυτό, πιθανόν να υποδεικνύει ότι η τάση της κυψέλης καυσίμου μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα με το εξωτερικό κύκλωμα. Όπως είδαμε στον θεωρητικό υπολογισμό των απωλειών, το μεγαλύτερο μέρος της πτώσης τάσης οφείλεται στις απώλειες ενεργοποίησης και είναι της τάξης των 0,3V. Άρα, αν θεωρήσουμε έγκυρους τους υπολογισμούς μπορούμε ίσως να εικάσουμε πως αν εφαρμοστεί η ανάλογη τάση παράλληλα στα άκρα της κυψέλης καυσίμου, τότε οι απώλειες ενεργοποίησης μειώνονται, έως εκμηδενίζονται. Φυσικά, είναι εμφανές πως η κυψέλη καυσίμου δεν μπορεί να φτάσει την τιμή της τάσης 1,244V, καθώς το όριο της, όπως υπολογίστηκε είναι τα 1,206V. Αυτό πιθανότατα οφείλεται σε σφάλματα, είτε πειραματικά, είτε υπολογιστικά. Για να θεωρηθεί έγκυρο το πείραμα, θα πρέπει η τάση του φωτοβολταϊκού να είναι 1,638V για να βγαίνει μέσος όρος αυτής και της 1,206V, η τάση 1,422V που μετρήθηκε. Κάτι τέτοιο είναι πολύ πιθανόν να συμβαίνει, καθώς η τάση του φωτοβολταϊκού, μετά την αρχική της σταθεροποίηση στα 1,6V δεν ελέγχθηκε περαιτέρω. Μία άλλη εξήγηση γι' αυτό το φαινόμενο ίσως δίνεται στο σχόλιο 12.

7. Πρέπει να τονιστεί πως η απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται έντονα από την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται, καθώς και από την θερμοκρασία του. Οι παραπάνω παράμετροι κρατήθηκαν όσο το δυνατόν πιο σταθεροί, αλλά δεν μπόρεσε να αποφευχθεί ένα μη-συστηματικό σφάλμα. Ενδεικτικά αναφέρεται πως η τάση ανοιχτού κυκλώματος του πλαισίου κυμαινόταν από 1,05V έως και 1,15V και η ένταση βραχυκυκλώματος από 80mAmpere έως και 120mAmpere.
8. Θα ήταν ιδανικότερο να είχαν ρυθμιστεί οι συνθήκες ούτως ώστε η τάση ανοιχτού κυκλώματος του φωτοβολταϊκού να ήταν παραπλήσια της κυψέλης καυσίμου (~ 0,7–0,8 Volt) αλλά κάτι τέτοιο δεν συνέβη. Ο λόγος ήταν ότι έπρεπε να υπάρχει αρκετή ισχύς στο σύστημα για να μπορεί να τροφοδοτήσει κάποιες μικρές συσκευές (ραδιόφωνο, κινητήρας, μπαταρία, φωτοδιόδος), και για να εξασφαλιστεί η συνοχή των μετρήσεων, η τάση του φωτοβολταϊκού διατηρήθηκε όπως αναφέρεται στο σχόλιο 7.
9. Η ένδειξη της μέτρησης ήταν ασταθής, γι' αυτό και τέθηκε κάποιο χρονικό όριο για την λήψη της μέτρησης, όπως αναφέρθηκε και στην διαδικασία του πειράματος. Αυτά που παρατηρήθηκαν εμπειρικά ήταν τα εξής : με χρήση αιθανόλης ως καύσιμο, παρατηρήθηκε αρκετά μεγαλύτερη αστάθεια από ότι με χρήση μεθανόλης. Επίσης, η συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη είχε μία μικρή επίδραση στην αστάθεια των ενδείξεων, η οποία ήταν μικρότερη όσο αυξάνονταν η συγκέντρωση. Τέλος, η συνδεσμολογία σε σειρά φάνηκε να παρουσιάζει περισσότερη σταθερότητα, ειδικά σε φορτίο <math><10\Omega</math>, ενώ ο DC/DC converter φαίνεται πως βοήθησε αμυδρά στη σταθερότητα του συστήματος.
10. Επισημαίνεται, όπως είναι γενικότερα γνωστό, ότι η παράλληλη συνδεσμολογία, δύο ή περισσότερων πηγών, συνεπάγεται το άθροισμα των εντάσεων του ρεύματος για σταθερή τάση (τον μέσο όρο των τάσεων των πηγών), όπως και ότι η συνδεσμολογία στη σειρά, δύο ή περισσότερων πηγών, συνεπάγεται το άθροισμα των τάσεων για σταθερή ένταση του ρεύματος (την χαμηλότερη των πηγών). Είναι επίσης γνωστό, πως η τάση και η ένταση που αποδίδεται από το σύστημα καθορίζεται από το ηλεκτρικό φορτίο. Αυτά διαπιστώθηκαν και πειραματικά, καθώς : Όπως φαίνεται και από την σύγκριση των τιμών, η μέγιστη τάση ανοιχτού κυκλώματος του συστήματος παρατηρείται στη συνδεσμολογία στη σειρά, όπου χωρίς τον μετατροπέα αυτή έφτανε κοντά στα 2 Volt, ενώ με τον μετατροπέα στα 5,07 Volt.



Αντίστοιχα, η μέγιστη ένταση βραχυκυκλώματος παρατηρήθηκε στην συνδεσμολογία παράλληλα και έφτασε έως τα 560 mAmpere περίπου (τιμή αμφισβητήσιμη, καθώς ήταν λίγο έξω από την διαγράμμιση του οργάνου μέτρησης, - όχι όμως έξω από τις δυνατότητες μέτρησης αυτού - συνεπώς μπορεί να περιέχει σφάλμα). Τέλος, η μέγιστη απόδοση σε ισχύ του συστήματος, όσον αφορά την συνδεσμολογία, παρατηρήθηκε σε συνδεσμολογία σε σειρά, χωρίς μετατροπέα, όπου έφτασε τα 70 mWatt. Οι αντίστοιχες τιμές του κάθε στοιχείου ξεχωριστά αναφέρθηκαν στα σχόλια 1,2 και 7.

11. Όσον αφορά το καύσιμο της κυψέλης καυσίμου, μεγαλύτερη ισχύς και ένταση σημειώθηκε στην μεθανόλη, ενώ η τάση ήταν μεγαλύτερη στην αιθανόλη. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στη διαφορά στην ένταση του ρεύματος για τα δύο καύσιμα, που φαίνεται στο σχόλιο 2 και μάλλον εξηγείται από το σχόλιο 4.
12. Σχετικά με την επίδραση της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη στην απόδοση της κυψέλης καυσίμου, σημειώνονται τα εξής : όπως μπορεί να ερμηνευτεί από τις καμπύλες του κεφ. 4, στην μέγιστη ισχύ, καθώς και στην ένταση βραχυκυκλώματος, παρατηρείται μία σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ των παραμέτρων αυτών και της συγκέντρωσης. Όσο αυξάνεται η συγκέντρωση, τόσο αυξάνονται και οι τιμές των παραπάνω. Αυτό όμως δεν παρατηρείται στην τάση ανοιχτού κυκλώματος, καθώς γραμμικότητα μπορεί να αποδοθεί μόνο μεταξύ συγκεντρώσεων 2M και 4M. Σε συγκέντρωση μικρότερη των 2M, η τάση ανοιχτού κυκλώματος φαίνεται αρκετά σταθερή, όπως επίσης και σε συγκέντρωση μεγαλύτερη των 4M. Η θεωρητική βάση αυτού έγκειται στην εξίσωση Nernst, η οποία βέβαια αφορά την τάση της κυψέλης, στην προκειμένη περίπτωση την τάση ανοιχτού κυκλώματος. Η εξίσωση Nernst έχει διάφορες μορφές, και μία από αυτές είναι, στην περίπτωση μας η :

$$E = E_0 + \frac{RT}{6F} \ln \left( \frac{P_{CH_3OH} \cdot P_{KOH}^6}{P_{H_2O}^5 \cdot P_{CO_2}} \right) \quad (\text{Εξ. 38})$$

Όπου τα P είναι οι αντίστοιχες μερικές πιέσεις για κάθε ουσία της αντίδρασης,  $E_0$  η αρχική τάση που υπολογίζεται από την εξίσωση (15), E η υπολογιζόμενη τάση και R,T και F οι γνωστές σταθερές. Ο αριθμός 6 συμβολίζει τον αριθμό των ηλεκτρονίων που απελευθερώνονται (το z της εξ. 15) ενώ στον αριθμητή του κλάσματος του λογαρίθμου είναι οι μερικές πιέσεις των αντιδρώντων εις την δύναμη του στοιχειομετρικού συντελεστή τους στην αντίδραση και αντίστοιχα στον παρονομαστή οι μερικές πιέσεις των προϊόντων της αντίδρασης. Αν συνδυάσουμε την εξίσωση αυτή με την καταστατική εξίσωση των αερίων, κάνοντας την παραδοχή πως ισχύει και για τα υγρά, τότε η εξ. (38) γίνεται ως εξής :

$$E = E_0 + \frac{RT}{6F} \ln \left( \frac{c_{CH_3OH} \cdot c_{KOH}^6 \cdot RT}{c_{H_2O}^5 \cdot c_{CO_2}} \right) \quad (\text{Εξ. 39})$$

Όπου τα c είναι οι συγκεντρώσεις των ουσιών της αντίδρασης στο διάλυμα και όλα τα υπόλοιπα όπως στην εξ. (38). Έτσι, με τιμές συγκεντρώσεων  $c_{CH_3OH} = 1/6$  M,  $c_{KOH} = 1$  M,  $c_{H_2O} = 5/6$  M και  $c_{CO_2} = 1/6$  M, στους 27°C (300°K), βγαίνει μία τιμή  $E = 1,244$ V. Αυτή η τιμή ίσως και να είναι η εξήγηση για το θέμα του σχολίου 6. Έχοντας αυτή την τιμή και την εξίσωση Nernst υπ' όψιν και θεωρώντας ότι μεταβάλλεται μόνο η συγκέντρωση του διαλύματος του KOH, τότε βρίσκουμε πως η διαφορά στην τάση είναι :





$$\Delta V = \frac{RT}{6F} \ln \left( \frac{P_2^6}{P_1^6} \right) \quad (\text{Εξ. 40})$$

Όπου  $P_1$  και  $P_2$  είναι η μερική πίεση του ΚΟΗ πριν και μετά την μεταβολή της συγκέντρωσης. Αν αντικαταστήσουμε στην καταστατική εξίσωση των αερίων ( $PV = nRT$ ), το λόγο  $n/V$  με την συγκέντρωση, αυτή γίνεται :  $P = cRT$ . Έστω τώρα, ότι η αρχική συγκέντρωση είναι  $c_1$  και η τελική  $c_2$ , τότε ισχύει  $c_2 = Xc_1$ . Αντίστοιχα έχουμε  $P_1 = c_1RT$  και  $P_2 = c_2RT$ . Αντικαθιστώντας προκύπτει :  $P_2 = Xc_1RT$  και συνεπώς  $P_2 = XP_1$ . Αν αντικαταστήσουμε το τελευταίο στην εξ. (40), τότε αυτή γίνεται, στους  $300^\circ\text{K}$  :

$$\Delta V = \frac{RT}{6F} \ln(X^6) = \frac{RT}{F} \ln(X) = 0,025851 \cdot \ln(X) \quad (\text{Εξ. 40})$$

Όπου  $X$  είναι ο πολλαπλασιαστής της τελικής συγκέντρωσης ως προς την αρχική. Αν θεωρήσουμε ως αρχική συγκέντρωση ΚΟΗ το 1M, τότε π.χ. για τελική συγκέντρωση 2M, το  $X = 2$ . Με τους κατάλληλους υπολογισμούς προκύπτουν οι παρακάτω τιμές :

2M : $\Delta V = 0,018\text{V}$	(πειραματική : $V_{2M} - V_{1M} = 0,737 - 0,742 = -0,005\text{V}$ )
3M : $\Delta V = 0,028\text{V}$	(πειραματική : $V_{3M} - V_{1M} = 0,756 - 0,742 = 0,014\text{V}$ )
4M : $\Delta V = 0,036\text{V}$	(πειραματική : $V_{4M} - V_{1M} = 0,784 - 0,742 = 0,042\text{V}$ )
5M : $\Delta V = 0,042\text{V}$	(πειραματική : $V_{5M} - V_{1M} = 0,786 - 0,742 = 0,044\text{V}$ )

Όπως μπορούμε να δούμε, σε αντιδιαστολή με τις υπολογιζόμενες τιμές, οι πειραματικές τιμές που μετρήθηκαν, αν εξαιρεθεί η τιμή για συγκέντρωση 2M, φαίνονται να έχουν σχετικά μικρή απόκλιση. Η απόκλιση που παρατηρείται οφείλεται προφανώς σε εργαστηριακό σφάλμα και, όπως φαίνεται, συστηματικό, εφόσον η απόκλιση της πειραματικής από τη θεωρητική  $\Delta V$  μειώνεται όσο αυξάνεται η διαφορά της συγκέντρωσης.

- Όπως αναλύθηκε και στο κεφ. 5.3.3, η επίδραση του μετατροπέα συνεχούς σε συνεχές (chopper) στις καμπύλες που χαράχθηκαν είναι σημαντική. Αυτά που σημειώθηκαν στο κεφ. 5.3.3 μπορούν να εξηγήσουν την βύθιση που παρατηρείται στην καμπύλη των γραφημάτων που αφορούν σύστημα που να περιλαμβάνει τον DC/DC converter και είναι χαρακτηριστική της μικρής ισχύος των δύο πηγών. Σε περίπτωση που οι δύο πηγές απέδιδαν μεγαλύτερη ισχύ, η τάση εισόδου του μετατροπέα θα παρέμενε πάνω από το όριο των 1,25V, για πολύ μεγαλύτερο εύρος φορτίου, και κατά συνέπεια η τάση εξόδου θα παρέμενε στην ονομαστική τιμή των 5,06-5,07V για μεγαλύτερο διάστημα. Τα 1,25V είναι η τάση εισόδου που θέτει ο κατασκευαστής ως όριο, πάνω από το οποίο η τάση ανυψώνεται στα 5,07V. Κάτω από αυτό, η τάση εξόδου σταδιακά μειώνεται έως ότου η τάση εισόδου φτάσει τα 0,7V περίπου, όπου ο μετατροπέας τίθεται εκτός λειτουργίας και απλά αποδίδει την είσοδο στην έξοδο, μείον κάποια μικρή κατανάλωση ισχύος.
- Πρέπει επίσης να σημειωθεί, ότι με χρήση των δύο πρώτων συνδεσμολογιών (κυψέλη καυσίμου χωρίς φωτοβολταϊκό και κυψέλη καυσίμου παράλληλα με φωτοβολταϊκό χωρίς μετατροπέα) δεν είναι δυνατόν να λειτουργήσουν οι δύο από τις τέσσερις συσκευές που προαναφέρθηκαν (ραδιόφωνο, φωτοδιόδος), επειδή η ελάχιστη τάση λειτουργίας των παραπάνω (1,5-2V) δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί με τα χαρακτηριστικά των συνδεσμολογιών αυτών. Ακόμα και στην περίπτωση που θα μπορούσε να λειτουργήσει σε αυτή την τάση, το σύστημα δεν θα παρείχε αρκετή ισχύ, ώστε να λειτουργήσει κάποια από τις δύο συσκευές.
- Όπως εξηγείται στις σελίδες 22-23, υπάρχει μία απλή διαδικασία που μπορούν να παρατηρηθούν τα είδη των απωλειών στην κυψέλη καυσίμου. Αυτή η διαδικασία ακολουθήθηκε στα πειράματα και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5.3.4. Στις





καμπύλες που χαράχθηκαν (Γραφήματα T-1, T-2 και T-3), φαίνεται καθαρά πως το μεγαλύτερο μέρος των απωλειών αποτελούν οι απώλειες ενεργοποίησης. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί ιδιαίτερα από την καμπύλη του γραφήματος T-1, όπου είναι εμφανές ότι τη στιγμή σχεδόν της αποσύνδεσης του φορτίου η τάση, από τα 0,4V που είναι περίπου, ανεβαίνει απότομα λίγο πιο πάνω από τα 0,5V. Αυτές μπορούν να θεωρηθούν οι ωμικές απώλειες. Μετά από αυτό το σημείο όμως, η τάση ανεβαίνει σταδιακά, με αρκετά αργούς ρυθμούς, για να φτάσει μετά από περίπου 30 με 40 λεπτά την μέγιστη τάση, την τάση ανοιχτού κυκλώματος, που στην προκείμενη περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί ως υπέρταση ενεργοποίησης. Κάτι αντίστοιχο παρατηρείται και στην καμπύλη του γραφήματος T-3, σε μικρότερο βαθμό βέβαια και με ταχύτερη σταθεροποίηση της τάσης στον αναμενόμενο ρυθμό πτώσης της, λόγω κατανάλωσης του καυσίμου. Ένας άλλος λόγος που θεωρήθηκε απαραίτητο να μελετηθεί ο χρόνος απόκρισης της τάσης της κυψέλης καυσίμου σε αλλαγές φορτίου, είναι ότι αυτός ο χρόνος είναι ενδεικτικός του χρονικού διαστήματος που χρειάζεται να παρέλθει προτού θεωρηθεί αξιόπιστη η ένδειξη του οργάνου μέτρησης. Αυτός ο χρόνος αναμονής ακολουθήθηκε στο μεγαλύτερο μέρος των μετρήσεων, αλλά όχι πιστά, λόγω του όγκου των μετρήσεων, καθώς αν ακολουθούνταν πιστά θα ανέκυπταν άλλα προβλήματα. Κάποια χαρακτηριστικά προβλήματα είναι ότι, πρώτον θα χρειαζόταν αδικαιολόγητα μεγάλος χρόνος για την ολοκλήρωση των πειραμάτων, και δεύτερον, ότι υπήρχε η πιθανότητα κατά το χρονικό διάστημα της αναμονής, να εξαντλούνταν το καύσιμο της κυψέλης καυσίμου. Σε αυτή την περίπτωση θα χρειαζόταν αντικατάσταση του διαλύματος, πράγμα που θα οδηγούσε σε ακόμα μεγαλύτερα, μη-συστηματικά, σφάλματα. Το τελευταίο μπορεί να εκτιμηθεί θετικά, γιατί το σφάλμα που προέκυψε από αυτή τη διαδικασία είναι συστηματικό, άρα οι μετρήσεις προκύπτουν αναλογικές.

16. Τέλος, οι καμπύλες τάση-ισχύος και τάσης-έντασης (P-V και I-V) είναι αρκετά ξεκάθαρες. Το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) είναι στο μέγιστο της καμπύλης P-V, η τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι στο δεξιό άκρο της καμπύλης I-V, όπου μηδενίζεται η ένταση και η ένταση βραχυκυκλώματος είναι το αριστερό άκρο της καμπύλης I-V, όπου η τάση μηδενίζεται. Σε καμία περίπτωση αυτές οι καμπύλες δεν είναι ιδανικές, αλλά μόνο μοιάζουν με τις θεωρητικές. Αυτό είναι και το καλύτερο αποτέλεσμα που μπορούσε να βγει με τον συγκεκριμένο εξοπλισμό και τη δεδομένη εμπειρία του γράφοντος. Οι καμπύλες σε γενικές γραμμές μοιάζουν μεταξύ τους και στις καμπύλες που περιλαμβάνουν σύνδεση παράλληλα, ή εν σειρά, των δύο πηγών, φαίνεται πως οι καμπύλες που προκύπτουν είναι συνάρτηση των ξεχωριστών καμπυλών των δύο πηγών. Μοναδική εξαίρεση αποτελούν οι καμπύλες που αφορούν συνδεσμολογία που περιέχει τον μετατροπέα, αλλά αυτό αναλύθηκε ήδη εκτενώς. Από τη σύγκριση των τιμών μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως η μεθανόλη, ως καύσιμο αποδίδει πολύ καλύτερα από την αιθανόλη, είτε αυτή είναι σε μορφή καθαρού οινοπνεύματος, είτε σε μορφή οινοπνευματώδους ποτού. Παρ' όλα αυτά, φαίνεται ότι η τάση της κυψέλης είναι υψηλότερη με την αιθανόλη ως καύσιμο, αλλά αυτό δεν μπόρεσε να εξηγηθεί και πιθανώς να οφείλεται στη μειωμένη πυκνότητα ρεύματος που παρουσιάζει η κυψέλη με το καύσιμο αυτό. Αφού λοιπόν οι απώλειες εξαρτώνται και από την πυκνότητα ρεύματος, αυτό μπορεί να αποτελέσει μία εξήγηση. Στον αντίποδα, βέβαια και η βέλτιστη τάση της κυψέλης με αυτό το καύσιμο είναι μειωμένη (~ 0,99V σε αντίθεση με τα 1,206V της μεθανόλης), άρα το ερώτημα παραμένει. Όσον αφορά τη συνδεσμολογία είναι σίγουρο πως σε σειρά οι δύο πηγές αποδίδουν καλύτερα. Αυτό μπορεί να αποδοθεί ίσως στο γεγονός ότι οι καμπύλες ισχύος των δύο στοιχείων συμπίπτουν καλύτερα όταν είναι συνδεδεμένα σε σειρά, παράγοντας καλύτερο αποτέλεσμα απ' ότι όταν είναι παράλληλα. Από την άλλη μεριά, όταν είναι παράλληλα συνδεδεμένα έχουν μικρότερη απόδοση μέγιστης ισχύος, αλλά μεγαλύτερο εύρος φορτίου που αποδίδουν ισχύ κοντά στην ονομαστική. Το κύριο πρόβλημα με την παράλληλη σύνδεση είναι ότι η τάση του συστήματος είναι πολύ χαμηλή (~1V) και αυτό το αποτρέπει από το να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές, όπως η τροφοδοσία ραδιοφώνου τσέπης ή φωτοδιόδου, στις οποίες η σύνδεση σε σειρά μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σχετική άνεση. Αυτό κάνει αναγκαία τη χρήση μετατροπέα για την ανύψωση της τάσης, ο οποίος και



πάλι θα παρουσιάζει μικρή απόδοση, λόγω μειωμένης τάσης εισόδου. Συνεπώς αυτός είναι ένας ακόμη λόγος που είναι προτιμότερη η σύνδεση σε σειρά. Επίσης μεγαλύτερη απόδοση παρουσιάζει η σύνδεση σε σειρά και σε πραγματικά φορτία, όπως μικρές συσκευές, το οποίο προφανώς οφείλεται στην αυξημένη τάση του συστήματος και φαίνεται ακόμα εντονότερα όταν χρησιμοποιείται ο μετατροπέας. Εδώ μπορεί να προστεθεί η σύγκριση των ισχύων λειτουργίας με ωμικό φορτίο και με πραγματικό φορτίο (συσκευές), όπου φαίνεται πως στο ωμικό φορτίο μεγαλύτερη ισχύ αποδίδει το σύστημα με τις πηγές σε σειρά, χωρίς μετατροπέα, ενώ στο πραγματικό φορτίο ο μετατροπέας φαίνεται πως λειτουργεί θετικά, αυξάνοντας την ισχύ που αποδίδεται. Δεν πρέπει φυσικά να παραβλεφθεί πως στην πρώτη επανάληψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν όλες οι αντιστάσεις, σε αντίθεση με την δεύτερη και την τρίτη επανάληψη όπου παραλείφθηκαν μερικές τιμές αντιστάσεων, κυρίως για οικονομία χρόνου. Χαρακτηριστικά, στην δεύτερη επανάληψη παραλείφθηκαν οι αντιστάσεις με τιμές 388,5Ω, 669Ω, 809Ω, 1.481KΩ, 3.313KΩ, 46,2KΩ, 97.5KΩ και 219.7KΩ, ενώ στην τρίτη επανάληψη χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι αντιστάσεις με τιμές 0.1Ω, 1Ω, 9.9Ω, 98.9Ω, 991Ω και 9.78KΩ. Αυτό είναι φανερό αν παρατηρήσει κανείς τις καμπύλες. Η αφαίρεση όμως αυτών των αντιστάσεων από τη διαδικασία μέτρησης, δεν είχε σημαντικές απώλειες στην ακρίβεια χάραξης των καμπυλών. Το μόνο μειονέκτημα ήταν ότι στις συνδεσμολογίες που περιλαμβάνουν τον μετατροπέα δεν μπορεί να φανεί η βύθιση της απόδοσης του συστήματος λόγω του φαινομένου που προαναφέρθηκε. Αυτό συμβαίνει όμως μόνο στην τρίτη επανάληψη, που έχουν αφαιρεθεί οι περισσότερες αντιστάσεις. Από την άλλη μεριά υπάρχει και το πλεονέκτημα της ομαλότητας των μετρήσεων, που τις κάνει πιο εύκολα συγκρίσιμες. Επίσης, επειδή χρειάζονταν λιγότερος χρόνος για την ολοκλήρωση του πειράματος, τηρήθηκε πιο πιστά το χρονικό όριο που είχε τεθεί για την αξιοπιστία των μετρήσεων, άρα οι μετρήσεις της τρίτης επανάληψης μπορεί να είναι λιγότερες, αλλά είναι πιο αξιόπιστες.

#### 5.4. Γενικά συμπεράσματα

Τα γενικά συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από αυτή την εργασία έχουν ως εξής. Κατ' αρχάς, είναι ευκολονόητο πως το σύστημα που περιγράφεται, με τα χαρακτηριστικά του, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή σημαντικής ισχύος, παρά μόνο για τροφοδοσία πολύ μικρών συσκευών, όπως το ραδιοφωνάκι τσέπης, αλλά και πάλι οι δυνατότητες της λειτουργίας του θα είναι μειωμένες. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ίσως για τροφοδοσία τηλεκοντρόλ, ή σε μοτεράκι μικρής ισχύος, αλλά σε αυτές τις περιπτώσεις θα ήταν κάπως άβολο. Οριακά ίσως, θα μπορούσε να φορτίσει και μία επαναφορτιζόμενη μπαταρία, π.χ. NiMH, αλλά θα απαιτούνταν σχετικά μεγάλος χρόνος γι' αυτό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί μία συνηθισμένη μπαταρία NiMH τύπου AAA, τάσης 1,2V και χωρητικότητας 650mAh, οπότε και θα χρειαζόταν περίπου 10 ώρες για την πλήρη φόρτιση, θεωρώντας πως το σύστημα αποδίδει τη βέλτιστη ισχύ του, σε ένταση περίπου 60-65mA. Για τη φόρτιση όμως μεγαλύτερων μπαταριών, όπως μία τυπική μπαταρία κινητού τηλεφώνου, χωρητικότητας 1000 mAh στα 3,6V, θα χρειαζόταν περίπου 50 ώρες, χρονικό διάστημα απαράδεκτο για ευνόητους λόγους.

Αντίθετα, άλλα παρόμοια συστήματα μεγαλύτερης ισχύος θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδότηση οικιακών (και μη) συσκευών, πιο απαιτητικών σε ισχύ, όπως ένα φορητό ηχοσύστημα, ένας φορητός υπολογιστής, τηλεόραση, ακόμα και λαμπτήρες (με τον κατάλληλο εξοπλισμό μετατροπής του ρεύματος σε εναλλασσόμενο) και φυσικά, σε οποιαδήποτε συσκευή που λειτουργεί και με μπαταρίες. Στην περίπτωση βέβαια που η απαιτούμενη ισχύς είναι αρκετά μεγάλη, όπως η τροφοδότηση ενός σπιτιού, είναι αμφίβολο αν το παραπάνω σύστημα μπορεί να αποδειχθεί συμφέρον, οικονομικά και περιβαλλοντικά, ή ασφαλές, κυρίως λόγω της κυψέλης καυσίμου, όπως αναλύθηκε και στο αντίστοιχο κεφάλαιο (2.4.1).

Από την άλλη μεριά, αυτή η λύση του συνδυασμού δύο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δείχνει πολύ ελκυστική, όχι τόσο από οικονομικής άποψης, καθώς τα κόστη είναι σχετικά μεγάλα, αλλά περισσότερο από περιβαλλοντικής και πρακτικής άποψης. Οι περιβαλλοντικοί λόγοι είναι προφανείς και δεν χρειάζονται παραπάνω ανάλυση, καθώς η επίπτωση στο περιβάλλον μειώνεται



πολύ σημαντικά σε σύγκριση με τις συμβατικές μορφές ενέργειας. Οι πρακτικοί λόγοι αφορούν κυρίως το γεγονός ότι η απαιτούμενη ισχύς σε πραγματικές συνθήκες δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται με τον χρόνο. Έτσι, ο συνδυασμός δύο πηγών εξασφαλίζει την καλύτερη ικανοποίηση των αναγκών σε ισχύ, ανά το χρόνο. Επίσης, σε σύγκριση με την περίπτωση που χρησιμοποιούνταν μόνο φωτοβολταϊκό, όπου και θα ήταν απαραίτητη η χρήση μπαταριών, ή κάποιου μέσου αποθήκευσης ενέργειας, το υβριδικό σύστημα μπορεί να προτιμηθεί γιατί δεν χρειάζεται απαραίτητα η αποθήκευση ενέργειας, καθώς στις περιόδους που η μία πηγή δεν μπορεί να αποδώσει, π.χ. το φωτοβολταϊκό τη νύχτα, υπάρχει η άλλη πηγή, π.χ. η κυψέλη καυσίμου και συμπληρώνει τις απαιτήσεις. Επιπροσθέτως, αντιμετωπίζονται και άλλα ζητήματα όπως η έλλειψη της μεγάλης επιφάνειας που απαιτείται για τα φωτοβολταϊκά. Μπορούμε, τέλος, να δούμε πως με κατάλληλη επιλογή των χαρακτηριστικών του συστήματος, καθώς και κατάλληλη διάταξη αυτών, μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη απόδοση από όλα τα επιμέρους στοιχεία του, για διάφορους λόγους, μεταξύ αυτών και η συμπληρωματικότητα των πηγών, αυξάνοντας έτσι τη συνολική απόδοση και εξασφαλίζοντας καλύτερη λειτουργία των στοιχείων αυτών.

### 5.5. Βιβλιογραφία

- [1] Electro-Chem-Technic (<http://www.ectechnic.co.uk>)
- [2] MAXIM “MAX756/MAX757. 3.3V/5V/Adjustable-Output, Step-Up DC-DC Converters” - Evaluation Kit Manual. (<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/MAX756-MAX757.pdf>)
- [3] Larminie, J.; Dicks, A. “Fuel Cell Systems Explained”, J.Wiley and Sons, Ltd.: Chichester, West Sussex, England, **2000**, p. 19-23, 38-40. (<http://www.wiley.com>)