



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:**

**ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ  
ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΠΕ  
ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΑΥΤΗΣ ΣΕ ΥΔΡΟΓΟΝΟ  
ΓΙΑ ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΠΑΣΠΑΛΙΑΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**



**ΜΕΡΚΟΥΡΕΑΣ-ΚΑΡΡΑΣ ΑΛΚΙΒΙΑΔΗΣ**

**ΑΘΗΝΑ 2014**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Οφείλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή και Πρόεδρο της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών κ.Ιωάννη Πασπαλιάρη για την ευκαιρία που μου προσέφερε να ασχοληθώ με την εξαιρετικά πρωτότυπη και μελλοντικά υποσχόμενη Τεχνολογία ενός υβριδικού συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αποθήκευσης ενέργειας υπό μορφή υδρογόνου. Ακόμη οφείλω ευχαριστίες στον κ. Αντώνη Πέππα για την εξαιρετική καθοδήγηση που μου παρείχε στην πρόοδο και ολοκλήρωση της εργασίας. Ευχαριστώ επίσης τον κ. Πανώριο Μπενάρδο για τον χρόνο που διέθεσε στην επίλυση πρακτικών προβλημάτων που αντιμετώπισα κατά την επεξεργασία των δεδομένων.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ΤΟ ΖΗΤΗΜΑ ΤΗΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	1
1.2 ΠΡΟΦΙΛ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΖΗΤΗΣΗΣ .....	4
1.3 ΠΡΟΦΙΛ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΠΡΟΣΦΟΡΑΣ -ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΑΠΟΘΕΜΑΤΑ.....	7
1.4 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ .....	9
1.5 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ-ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ .....	9
1.6 Η ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ (GLOBAL WARMING) .....	11
1.7 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	14
1.8 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΕ-ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	18
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΜΕΣΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ</b> .....	<b>19</b>
2.1 ΥΔΡΟΓΟΝΟ.....	19
2.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ H <sub>2</sub> – ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ .....	20
2.3 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ- ΜΕΤΑΦΟΡΑ- ΑΣΦΑΛΕΙΑ .....	21
2.4 ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΩΣ H <sub>2</sub> .....	25
2.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ .....	26
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΑΓΩΓΗ H<sub>2</sub> ΑΠΟ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ ΝΕΡΟΥ</b> .....	<b>28</b>
3.1 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ .....	28
3.2 ΔΙΑΘΕΣΙΜΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ.....	30
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ</b> .....	<b>34</b>
4.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ .....	34
4.2 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ .....	34
4.3 ΔΙΑΘΕΣΙΜΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ .....	36
4.4 ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ .....	41
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ</b> <b>ΣΕ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b> .....	<b>44</b>
5.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	46
5.2 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	47
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ H<sub>2</sub>SUSBUILD</b> .....	<b>49</b>
6.1 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ H <sub>2</sub> SUSBUILD .....	49
6.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΛΑΥΡΙΟΥ .....	49
6.3 ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ H <sub>2</sub> SUSBUILD .....	49
6.4 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΠΕ.....	51

6.5 ΣΥΣΤΗΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ .....	51
6.6 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ .....	52
6.7 ΜΟΝΑΔΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ .....	52
6.8 ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ .....	54
6.9 ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ .....	56
6.10 ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ .....	56
6.11 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ .....	57
6.12 ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (EMCS) .....	58
6.13 ΓΕΝΙΚΗ ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ .....	59
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΛΛΟΓΗ-ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....</b>	<b>61</b>
7.1 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	61
7.2 ΚΤΙΡΙΟ ΕΠΙΔΕΙΞΗΣ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ.....	69
7.3 ΔΙΑΤΑΞΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ .....	72
7.4 ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ .....	88
7.5 ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ H <sub>2</sub> .....	110
7.6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ .....	117
7.7 ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΕ-H <sub>2</sub> .....	121
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>135</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....</b>	<b>138</b>

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία στοχεύει στον προσδιορισμό του ισοζυγίου ενέργειας σε υβριδικό σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αποθήκευσης ενέργειας υπό την μορφή χημικής ενέργειας υδρογόνου. Πυρήνα του συστήματος απετέλεσε ένα ειδικά διαμορφωμένο κτίριο εντός του Τεχνολογικού Πάρκου Λαυρίου, συνολικής επιφάνειας 525 m<sup>2</sup>. Το σύστημα βασίστηκε στην συλλογή ενέργειας από διάταξη φωτοβολταϊκών επιφανειών και από διάταξη ανεμογεννητριών, αμφοτέρων τοποθετημένων σε μικρές αποστάσεις από το κτίριο. Εντός του κτιρίου εγκαταστάθηκε μονάδα ηλεκτρόλυσης νερού, σύστημα αποθήκευσης του παραγόμενου υδρογόνου σε αέρια συμπιεσμένη μορφή, κυψέλη καυσίμου και καυστήρας υδρογόνου. Επιπλέον το σύστημα διαθέτει σύνδεση με το συμβατικό δίκτυο ηλεκτροδότησης παρέχοντας την δυνατότητα εισαγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά διαστήματα ενεργειακού ελλείμματος, και εξαγωγής ενέργειας κατά διαστήματα ενεργειακού πλεονάσματος. Η λειτουργία και ο συγχρονισμός των διαφόρων συσκευών που απαρτίζουν το σύστημα ρυθμίζεται από εγκατεστημένο εντός του κτιρίου ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου.

Η λογική του εγχειρήματος στηρίχθηκε στην πρωτογενή άντληση ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές, την αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας εντός διαστημάτων αυξημένης παραγωγής ως χημικής ενέργειας υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης νερού και τέλος την ικανότητα αξιοποίησης της αποθηκευμένης αυτής ενέργειας κατά διαστήματα μειωμένης παραγωγής μέσω οξείδωσης του υδρογόνου σε νερό εντός της κυψέλης καυσίμου ή του καυστήρα και λήψης ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας.

Η πειραματική εγκατάσταση αποτελεί προσομοίωση ενός παρομοίων διαστάσεων κτιρίου εμπορικού σκοπού (π.χ. συγκρότημα γραφείων) λαμβάνοντας υπόψιν την ισχύ των φορτίων και του μοτίβο κατανάλωσης που αυτά ακολουθούν.

Ο τελικός στόχος του εγχειρήματος συνοψίζεται στην εξασφάλιση μεγαλύτερης ή έστω ίσης ενεργειακής εξαγωγής προς το συμβατικό δίκτυο ενέργειας, σε σχέση με την ενεργειακή εισαγωγή από το δίκτυο η οποία θα ζητηθεί αναπόφευκτα κατά διαστήματα ελλείμματος. Η συνθήκη αυτή καθιστά το σύστημα ως εγκατάσταση "μηδενικών εκπομπών" δηλαδή ως εγκατάσταση της οποίας η λειτουργία εξασφαλίστηκε από ενέργεια προερχόμενη από τον ήλιο και τον άνεμο και όχι από την καύση ορυκτών καυσίμων.

Επιπλέον επιχειρείται η μελέτη της απόδοσης ενός συστήματος παραγωγής, αποθήκευσης και κατανάλωσης υδρογόνου εξετάζοντας τις δυνατότητες που παρέχει η συγκεκριμένη χημική ένωση ως αποθηκευτικό μέσο "πράσινης" ενέργειας και κατά συνέπεια ως ρυθμιστικό-εξισορροπητικό παράγοντα της διαλείπουσας φύσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 ΤΟ ΖΗΤΗΜΑ ΤΗΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Η ενέργεια υπό μία απλουστευτική ερμηνεία αποτελεί το θεμελιώδες φυσικό μέγεθος που δύναται να επιφέρει αλλαγή (μεταβολή) ενός φυσικού συστήματος υπό οποιαδήποτε μορφή. Η ενέργεια (energy) όπως και η ύλη (matter) αποτελούν τα δύο συνθετικά στοιχεία του σύμπαντος (observable universe). Τα συνθετικά αυτά στοιχεία αποτελούν διαφορετικές εκφάνσεις μίας ενιαίας ουσίας, καθώς η σύγχρονη κοσμολογική επιστήμη εκτιμά ότι υφίστανται αλληλεπίδραση, κάτι που σημαίνει πως το ένα στοιχείο δύναται να αποκτήσει την μορφή του άλλου και αντιστρόφως.

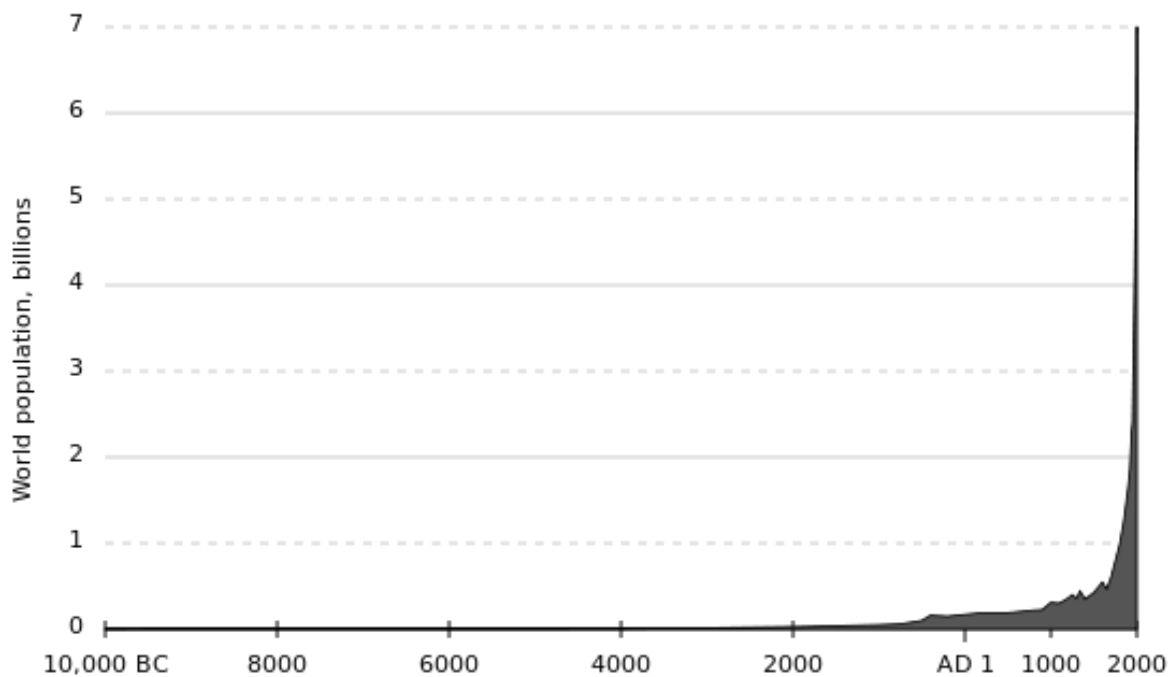
Η ανθρώπινη ιστορία είναι διαχρονικά συνυφασμένη με την χρήση και εκμετάλλευση πηγών ενέργειας. Ο άνθρωπος ως αυτόνομο βιολογικό σύστημα διαθέτει πρωτογενώς αντίστοιχες ενεργειακές ανάγκες, τις οποίες καλύπτει όντας ενταγμένος στον κύκλο του άνθρακα, μέσω της πρόσληψης τροφής, δηλαδή της κατανάλωσης φυτικών και ζωικών οργανισμών.

Η έμφυτη ροπή για την ικανοποίηση δευτερογενών αναγκών, ανεξάρτητων της πρωτογενούς βιολογικής ανάγκης κατανάλωσης τροφής, οδήγησε τον άνθρωπο -ως ευφυές ον- στην αναζήτηση αποθεμάτων ενέργειας από το περιβάλλον του. Οι δευτερογενείς ανάγκες του ανθρώπινου όντος ανάγονται από την απλή ανάγκη θέρμανσης και αίσθησης θαλπωρής η οποία εξασφαλίσθηκε από την καύση ξυλείας, από την ανάγκη απαλλαγής από την αχθοφορία η οποία έγινε εφικτή με την ανάθεση των φορτίων σε οικόσιτα ζώα, από την ανάγκη ακόμη εξαγωγής μετάλλων η οποία επιτεύχθηκε με την ανάμιξη μεταλλοφόρων πετρωμάτων και καύσιμων υλών (αναγωγική φρύξη), και καταλήγουν στις εξαιρετικά σύνθετες και εκλεπτυσμένες ανάγκες του παρόντος χρόνου. Κοινός παρονομαστής στην κάλυψη όλων των προαναφερθέντων βαθμιαία αυξανόμενων ποιοτικά και ποσοτικά "δευτερογενών" αναγκών αποτελούσε και αποτελεί η δέσμευση, ή ίσως εμφατικότερα η επιστράτευση ενέργειας από το περιβάλλον.

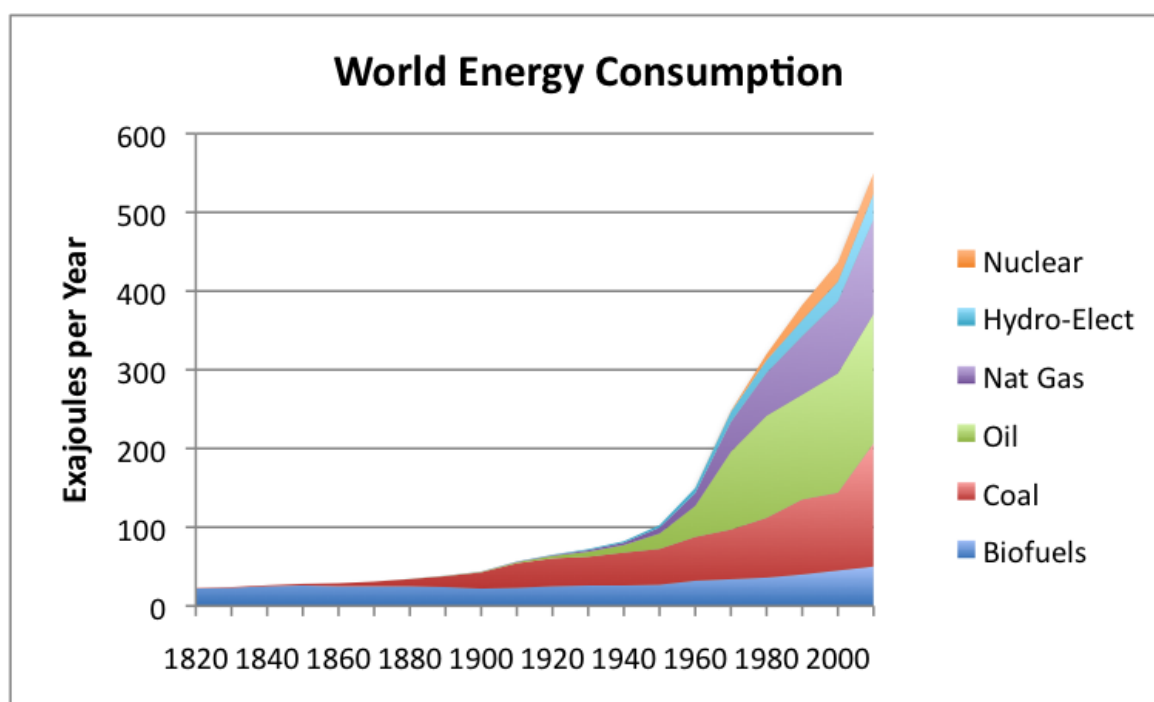
Διατρέχοντας την πορεία του ανθρώπινου πολιτισμού σε όρους μετρήσιμων μεγεθών, προκύπτει ως συμπέρασμα η κατά θετικό τρόπο σύνδεση της αύξησης του πληθυσμού και της αύξησης της συνολικής παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας, ανεξαρτήτως των πηγών από τις οποίες η ενέργεια αυτή προέρχεται.

Η σχέση των δύο μετρούμενων μεγεθών είναι δυναμική. Μπορεί να θεωρηθεί ότι η αύξηση της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας προκύπτει ως αποτέλεσμα της αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού ή αντιστρόφως ότι η αύξηση της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας συμπαρασύρει την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού.

Ωστόσο η σχέση-αιτίου αποτελέσματος είναι απόλυτη και τα ακόλουθα διαγράμματα μπορούν να καταδείξουν πλευρές του ζητήματος:



**Εικόνα 1:** Καμπύλη παγκόσμιου πληθυσμού μεταξύ των τελευταίων 12000 ετών. (Πηγή:U.S.Sensus Bureau)



**Εικόνα 2:** Καμπύλη παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης μεταξύ των τελευταίων 200 ετών. (Πηγή:Vaclav Smil,BP Statistical Data).

Η εικόνα που παρουσιάζουν τα παραπάνω διαγράμματα είναι ενδεικτική του συσχετισμού των υπό μελέτη μεγεθών. Η ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού (εκθετικού

τύπου) συμπίπτει με την ίδιας μορφής αύξηση της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας κατά το διάστημα του 20ου αιώνα.

Ο παράγων που επέδρασε καταλυτικά στην πορεία αυτή αναγνωρίζεται ότι είναι η εκπληκτική πρόοδος της Τεχνολογίας. Η αποκαλούμενη "Επιστημονική επανάσταση" και η ταυτόχρονη ανάπτυξη των θεωρητικών και ανθρωπιστικών επιστημών κατά το διάστημα 17ου - 18ου αιώνα στο γενικό πλαίσιο του "Διαφωτισμού" καθώς και ο κοινωνικός - θεσμικός μετασχηματισμός των Δυτικών κοινωνιών δημιούργησαν μία ισχυρή βάση σκέψης και πρακτικής στην οποία στηρίχθηκε η βιομηχανική επανάσταση.

Η βιομηχανική επανάσταση απετέλεσε το εφαλτήριο της απρόσκοπτης επιστημονικής προόδου και της ολοένα και μεγαλύτερης ενσωμάτωσης των τεχνολογικών εφαρμογών στην παραγωγική διαδικασία. Οι τεχνολογικές εφαρμογές απετέλεσαν αντικείμενο εκμετάλλευσης των επιχειρηματικών τάξεων ενώ ταυτόχρονα απέκτησαν τον ρόλο του χρηματοδότη της ανανέωσης και περαιτέρω τεχνολογικής και επιστημονικής προόδου σε όλο το φάσμα των γνωστικών πεδίων.

Τελικά η διάχυση των των αγαθών και η έκρηξη του εμπορίου, ο καταμερισμός της εργασίας και η σαφώς ολοένα και μεγαλύτερη πρόσβαση ανθρώπινου πληθυσμού στις αναπτυσσόμενες υποδομές, είχαν σαν αποτέλεσμα την βελτίωση των όρων ανθρώπινης διαβίωσης και εν τέλει την άνοδο του προσδόκιμου ζωής, την μείωση της παιδικής θνησιμότητας και της ευκαιρίας για παραγωγική εργασία και δημιουργία οικογένειας από πληθυσμούς που υπό πρότερες συνθήκες θα στερούνταν αυτών των ευκαιριών.

Η συνεχής ανάπτυξη της Τεχνολογίας, του εμπορίου και των μετακινήσεων όλων δηλαδή των συνέκδοχων της σύγχρονης οργάνωσης της οικονομίας, αποδίδει ως λογική συνέπεια την ολοένα και μεγαλύτερη ανάγκη άμεσα διαθέσιμων πηγών ενέργειας. Η ενέργεια και ως επί το πλείστον η ηλεκτρική ενέργεια καθώς και η χημική ενέργεια των ορυκτων καυσίμων αποτελούν την κινητήριο δύναμη του ανεπτυγμένου καθώς και μεγάλου πλέον μέρους του αναπτυσσόμενου κόσμου.

Η αυξημένη λοιπόν ζήτηση ενέργειας από έναν τεχνολογικά προηγμένο κόσμο προέρχεται από έναν αυξημένο πληθυσμό και ακολούθως ένας κόσμος με περισσότερες ευκαιρίες διαβίωσης λόγω της τεχνολογικής προόδου και της ενεργειακής επάρκειας τείνει να αυξάνεται περισσότερο.

Καθίσταται λοιπόν εμφανές ότι το μέλλον της ανθρωπότητας είναι συνυφασμένο σε πολύ ισχυρότερο βαθμό από ότι στο παρελθόν με την ευχερή πρόσβαση σε ενέργεια για το σύνολο -ει δυνατόν- ενός συνεχώς αυξανόμενου πληθυσμού.

Αποτελεί συνεπώς πρόκληση για το μέλλον η σωστή κατανομή των ήδη διαθέσιμων ενεργειακών πόρων καθώς και η ανάπτυξη νέων και αποδοτικότερων (efficient) συστημάτων παραγωγής ενέργειας.



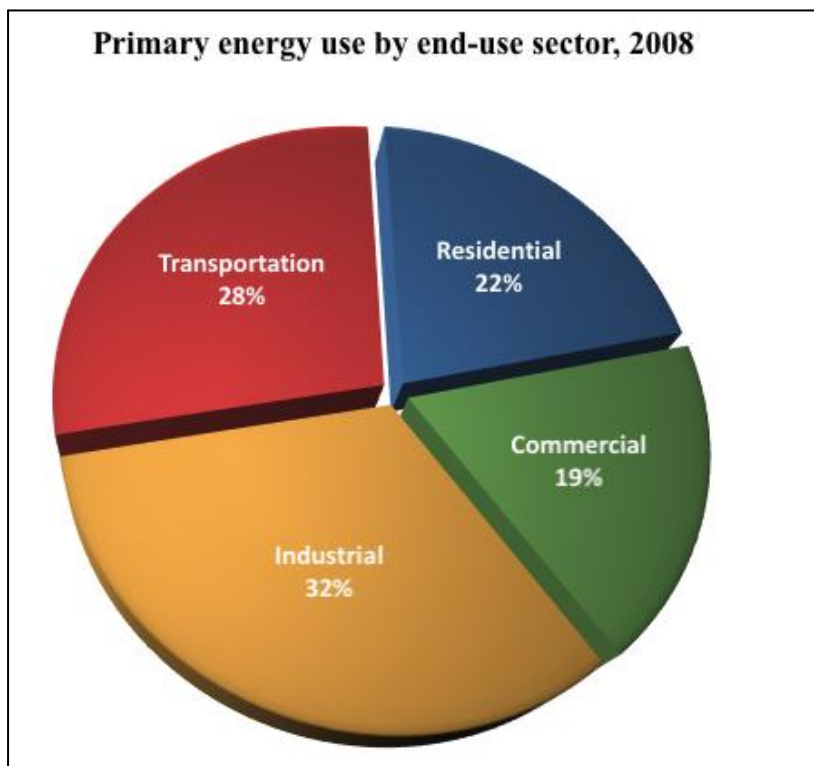
## 1.2 ΠΡΟΦΙΛ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΖΗΤΗΣΗΣ

Η παγκόσμια ζήτηση διαμορφώνεται από τα διαφορετικά είδη αναγκών προς κάλυψη. Το είδος της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται για την κάλυψη συγκεκριμένης ενεργειακής ανάγκης κατά κανόνα καθορίζει την μορφή της ενέργειας που απαιτείται (π.χ. πυρηνική ενέργεια, ή χημική ενέργεια φυσικού αερίου).

Η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας αφορά σε τέσσερις βασικούς τομείς:

- **Μεταφορές (Transportations)**
- **Κατοικία (Residential buildings)**
- **Εμπορική δόμηση (Commercial buildings)**
- **Βιομηχανία (Industry & Manufactory)**

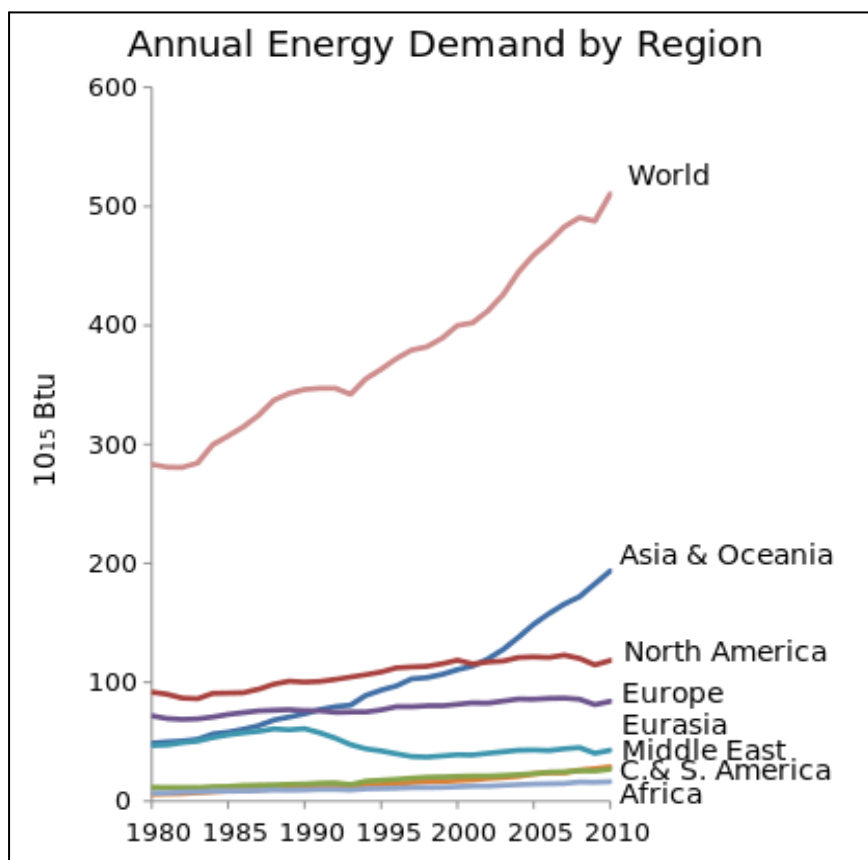
Ο βασικός αυτός διαχωρισμός είναι κοινώς παραδεκτός από όλους τους οργανισμούς μελετών ενέργειας όπως π.χ. η International Energy Agency (IEA) με έδρα το Παρίσι και η U.S. Energy Information Administration (EIA) με έδρα την Ουάσιγκτον. Η ανάλυση των πληροφοριών είναι εξαιρετικά χρονοβόρος διαδικασία και περιέχει την πολύπλοκη ανάλυση στοιχείων και την κατανομή επιμέρους ισοζυγίων ενέργειας με σκοπό την αποτελεσματική κατανόηση της παγκόσμιας ροής της ενέργειας και προσεγγιστικές μελλοντικές εκτιμήσεις.



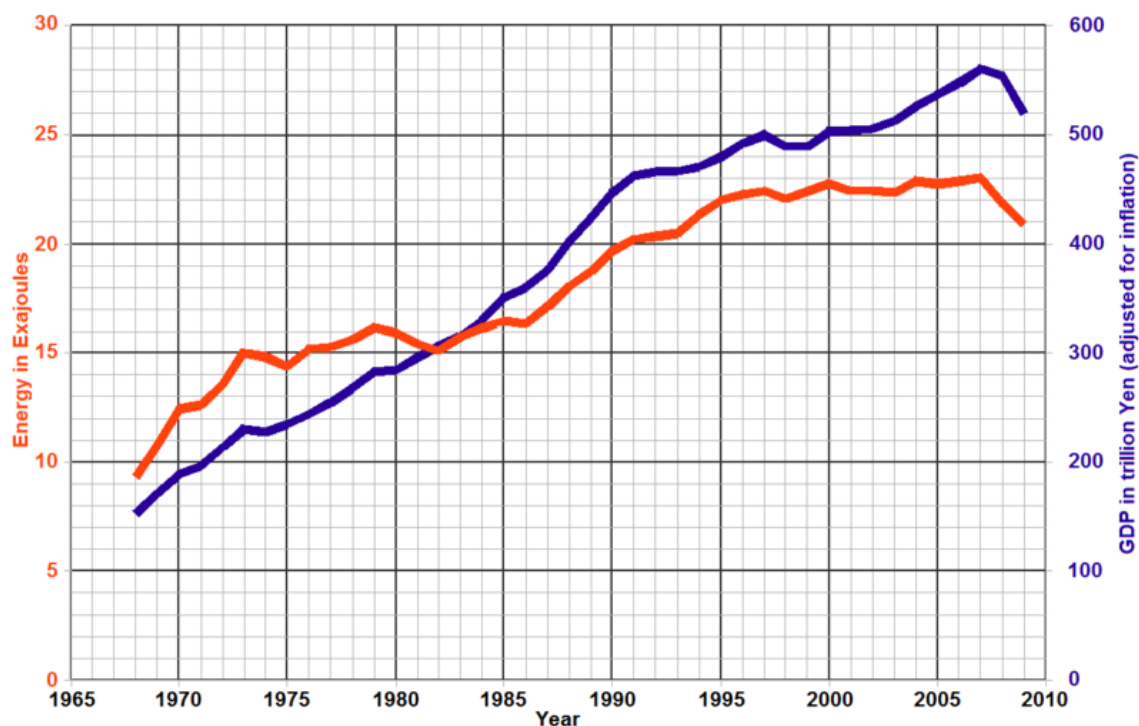
**Εικόνα 3:** Κατανομή παγκόσμιας ενέργειας με βάση την τελική χρήση. (Πηγή U.S. Energy Information Administration)

Η τάση της ζήτησης ενέργειας είναι σαφώς αυξητική. Η κατά κεφαλήν κατανάλωση των ανεπτυγμένων δυτικών κρατών της Δύσης όπως τα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι Ηνωμένες Πολιτείες ή ο Καναδάς είναι σαφώς μεγαλύτερη από χώρες της Ασίας της Αφρικής και της Λατινικής Αμερικής. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην ανεπτυγμένη οικονομική και βιομηχανική λειτουργία της πρώτης κατηγορίας κρατών, όπου το υψηλό βιοτικό επίπεδο (υψηλές αμοιβές, υψηλό επίπεδο υπηρεσιών, ανεπτυγμένο δίκτυο υποδομών) συνδυάζεται με την πρόσβαση σε ενεργοβόρο τρόπο ζωής, σε σχέση με την δεύτερη κατηγορία κρατών όπου ο σύγχρονος τρόπος ζωής δεν έχει διεισδύσει σε μεγάλο βαθμό και αντιθέτως διατηρούνται παραδοσιακές δομές οικονομικής παραγωγής χωρίς αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις. Παρά όμως την υστέρηση σε κατά κεφαλήν εισόδημα άρα και πρόσβαση σε ενέργεια, η ολική ενεργειακή κατανάλωση της Ασίας αναδεικνύεται ως η υψηλότερη σε σύγκριση με οποιαδήποτε άλλη ήπειρο, λόγω των εξαιρετικά πολυπληθών χωρών που την αποτελούν.

Η παραδοσιακή αυτή διαφορά μεταξύ ανεπτυγμένου - αναπτυσσόμενου κόσμου τείνει πλέον προς άμβλυνση, λόγω της δυναμικής εισόδου της Κίνας και της Ινδίας οι οποίες υιοθετώντας το οικονομικό μοντέλο της Δύσης αυξάνουν με εντυπωσιακούς ρυθμούς το Ακαθάριστο Εθνικό Προϊόν τους (ΑΕΠ) επιτρέποντας την ανάπτυξη δικτύων και συστημάτων σύγχρονης Τεχνολογίας (ανανέωση και επέκταση δικτύου ηλεκτροδότησης, αύξηση αγοράς ιδιόκτητων οχημάτων και ανάπτυξη συγκοινωνιών) και αυτομάτως μεγαλύτερη ζήτηση ενέργειας τόσο συνολικά όσο και κατά κεφαλήν.



**Εικόνα 4:** Ετήσια ενεργειακή απαίτηση ανά περιοχή του Πλανήτη κατά την τελευταία 20ετία. Αξιοσημείωτη η παρατηρούμενη ανοδική τάση της Ασίας & Ωκεανίας. (Πηγή: U.S. Energy Information Administration)



**Εικόνα 5:** Ενδεικτική εικόνα αύξησης της ενεργειακής κατανάλωσης συγχρόνως με την αύξηση του ΑΕΠ στην περίπτωση της Ιαπωνίας (1965-2010), απόδειξη του θετικού συσχετισμού των δύο παραμέτρων. (Πηγή: Japan statistics bureau).

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι η μέτρηση της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης ανέρχεται σε μονάδες ενέργειας αρμόζουσες σε τέτοια μεγάλη κλίμακα, όπως TWh (Terawatt-hours)  $\times 10^3$  ή Btu (British thermal units)  $\times 10^{15}$  ή επίσης Mtoe (Million tons of oil equivalent) όπου 1 toe ισοδυναμεί με την ολική εκλυόμενη θερμότητα που προκύπτει από την καύση 1 τόνου αργού πετρελαίου.

**Πίνακας 1:** Μεταβολή πληθυσμού και χρήσης ενέργειας κατά το διάστημα 1990-2008.

	Population (million)			Energy Use ( $\times 10^3$ TWh)		
	1990	2008	Growth	1990	2008	Growth
USA	250	305	22%	22.3	26.6	20%
EU-27	473	499	5%	19.0	20.4	7%
Middle East	132	199	51%	2.6	6.9	170%
China	1,141	1,333	17%	10.1	24.8	146%
Latin America	355	462	30%	4.0	6.7	66%
Africa	634	984	55%	4.5	7.7	70%
India	850	1,140	34%	3.8	7.2	91%
Others	1,430	1,766	23%	36.1	42.2	17%
<b>The World</b>	<b>5,265</b>	<b>6,688</b>	<b>27%</b>	<b>102.3</b>	<b>142.3</b>	<b>39%</b>

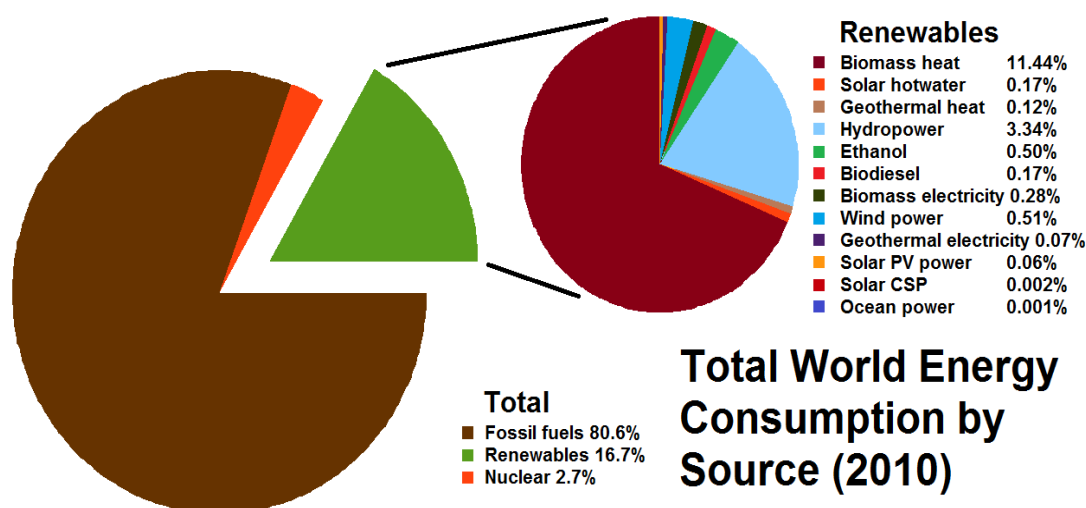
(Πηγή: IEA/OECD, Population OECD/World Bank)

### 1.3 ΠΡΟΦΙΛ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΠΡΟΣΦΟΡΑΣ -ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΑΠΟΘΕΜΑΤΑ

Η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας καλύπτεται από τις υπάρχουσες διαθέσιμες πηγές ενέργειας. Η τεχνολογία που χρησιμοποιεί κάθε κλάδος οικονομικής δραστηριότητας επηρεάζει το είδος της πηγής καθώς και την μορφή της ενέργειας που απαιτείται για την τροφοδότησή του.

Τα παγκόσμια αποθέματα ενέργειας κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- **Ορυκτά καύσιμα (Fossil fuels):** Πετρέλαιο, φυσικό αέριο, άνθρακας.
- **Πυρηνικά καύσιμα (Nuclear fuels):** Κυρίως τα ισότοπα  $^{235}\text{U}$  (ουράνιο),  $^{239}\text{Pu}$  (Πλουτώνιο).
- **Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Renewable resources):** Ηλιακή ενέργεια, Αιολική ενέργεια, Ενέργεια κυμάτων θαλάσσης και Παλιρροιακή ενέργεια, Γεωθερμική ενέργεια, Βιομάζα, Υδροηλεκτρική ενέργεια.

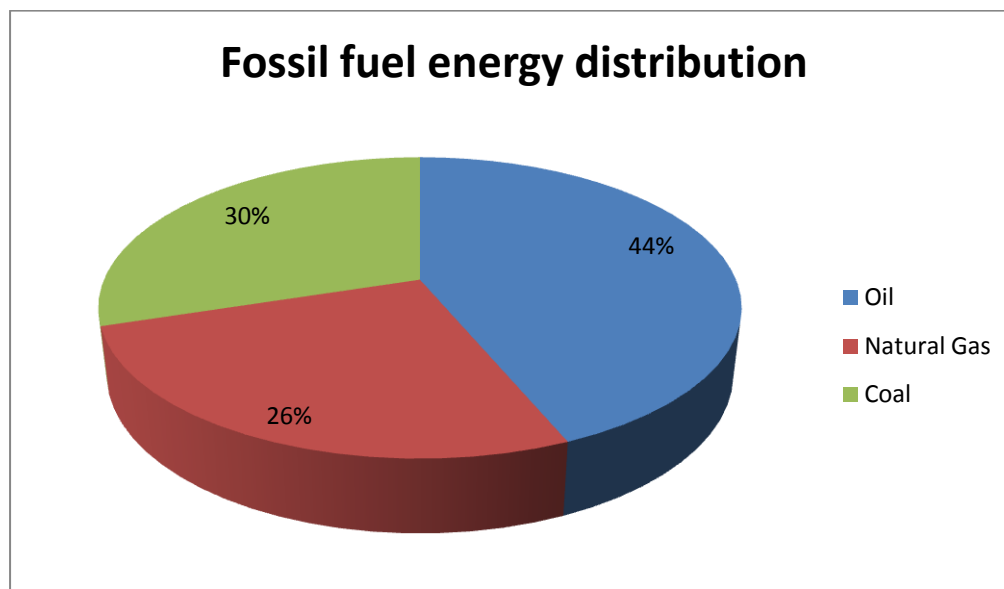


**Εικόνα 6:** Κατανομή της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης με βάση τις τρεις βασικές κατηγορίες πηγών. (Πηγές: REN21 2012Global status report)

Η ολική ζητούμενη παγκόσμια ενέργεια καλύπτεται κατά κύριο λόγο από τα ορυκτά καύσιμα σε ποσοστό που ξεπερνά το 80% όπως προκύπτει από διαφορετικές εκτιμήσεις. Η κατανομή των τριών ειδών ορυκτών καυσίμων (Πετρέλαιο, Φυσικό Αέριο, Άνθρακας) παρουσιάζει ανισότητες για τις διαφορετικές κατηγορίες ζήτησης.

- Το πετρέλαιο λόγω της μεγάλης γκάμας των παραγώγων του, καλύπτει σχεδόν όλες τις κατηγορίες του κλάδου των μεταφορών και αναλαμβάνει σημαντικό κομμάτι των αναγκών θέρμανσης που σχετίζεται με τις οικονομικές κατηγορίες εμπορικής κτιριακής υποδομής (Commercial) - Κατοικίας (residential). Αντιθέτως έχει μικρή συνεισφορά στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Το ενεργειακό του περιεχόμενο αποτελεί το 44% περίπου του ενεργειακού περιεχομένου των ορυκτών καυσίμων συνολικά.

- Το φυσικό αέριο καλύπτει πλέον το μεγαλύτερο μέρος των αναγκών θέρμανσης σε κτιριακές υποδομές, χρησιμοποιείται ευρύτατα στην βιομηχανία και ιδιαίτερα στην μεταλλουργία-τσιμεντοβιομηχανία. Ακόμη χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, όπου οι συσκευές που αξιοποιείται (Gas turbines) παρουσιάζουν υψηλή απόδοση και τίθενται σε λειτουργία εντός ωρών υψηλής ζήτησης (Peak demand). Χαμηλή συμμετοχή στον κλάδο των μεταφορών. Το ενεργειακό του περιεχόμενο αποτελεί το 26% περίπου του ενεργειακού περιεχομένου των ορυκτών καυσίμων συνολικά.
- Ο άνθρακας χρησιμοποιείται σχεδόν εξ ολοκλήρου για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος όπου και καταλαμβάνει το μεγαλύτερο κομμάτι συμμετοχής. Το ενεργειακό του περιεχόμενο αποτελεί το 30% περίπου του ενεργειακού περιεχομένου των ορυκτών καυσίμων συνολικά.



**Εικόνα 7:** Ποσοστό ενεργειακής συμμετοχής κάθε κατηγορίας ορυκτού καυσίμου σε σχέση με την ολικό ενεργειακό περιεχόμενο των ορυκτών καυσίμων συνολικά.

Τα πυρηνικά καύσιμα χρησιμοποιούνται σε σημαντικό βαθμό στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όπου καταλαμβάνουν σημαντικό ποσοστό όπως 13% στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρισμού(2012) έως και ποσοστά του 78,1% π.χ. στην Γαλλία το 2006.(Η χρήση στην κατασκευή πυρηνικών όπλων ή άλλων χρήσεων όπως στην ιατρική προφανώς δεν λαμβάνεται υπόψιν καθώς δεν υπάρχει αξιοποίηση για παραγωγή ενέργειας).

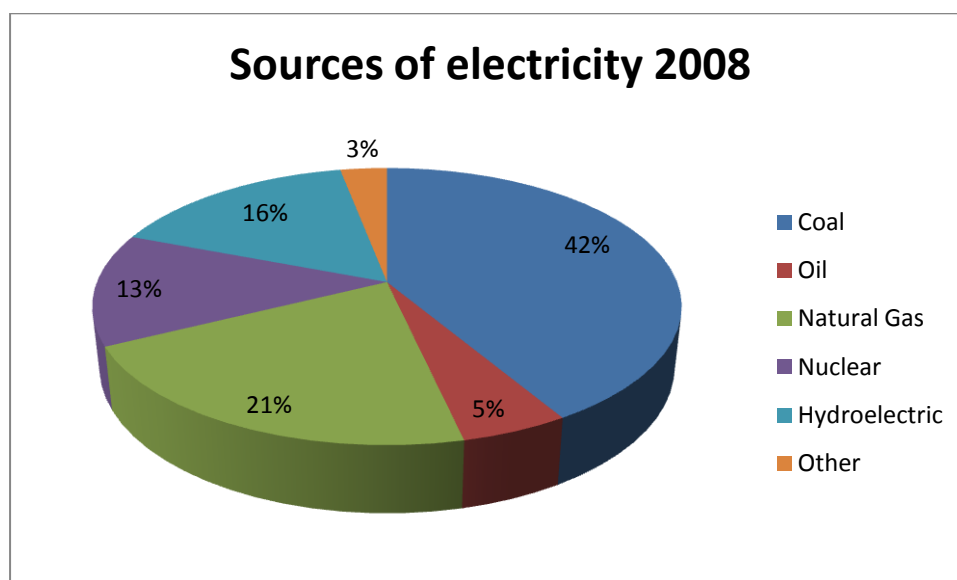
Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν σημαντική συνεισφορά στην κάλυψη της παγκόσμιας ζήτησης (16,7%).Ωστόσο το μεγαλύτερο τμήμα αυτού του ποσοστού αντιστοιχεί στην χρήση βιομάζας ή οποία κατά κύριο λόγο αποτελεί ξυλεία, γεγονός που επισύρει αρνητικές συνέπειες για το περιβάλλον.

#### 1.4 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ

Η ενέργεια συνολικά μετασχηματίζεται σε διαφορετικές μορφές, ωστόσο ο κυρίαρχος ενεργειακός φορέας στους εκτός των μεταφορών κλάδους αποτελεί ο ηλεκτρισμός. Ιστορικά ο ηλεκτρισμός μπορεί να θεωρηθεί ως ο θεμέλιος λίθος του σύγχρονου πολιτισμού.

Είναι λοιπόν αναμενόμενο ότι σημαντικό τμήμα των παγκόσμιων πρωτογενών αποθεμάτων καταναλώνεται και μετασχηματίζεται σε ηλεκτρικό ρεύμα στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Σύμφωνα με στοιχεία της International Energy Agency (IEA) η συνολική ενέργεια που καταναλώθηκε στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το έτος 2008 ανήλθε σε 4.398.768 ktoe (kilo ton of oil equivalent) ποσό που αντιστοίχησε στο 36% της παγκόσμιας κατανάλωσης για το έτος αυτό. Τελικά το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που αποδόθηκε στους καταναλωτές ανήλθε σε 1.445.285 ktoe δηλαδή το 33% του ποσού που καταναλώθηκε.



**Εικόνα 8:** Ενεργειακές πηγές εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρισμού για το έτος 2008. (International Energy Agency, "2008 Energy Balance for World", 2011.)

#### 1.5 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ-ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

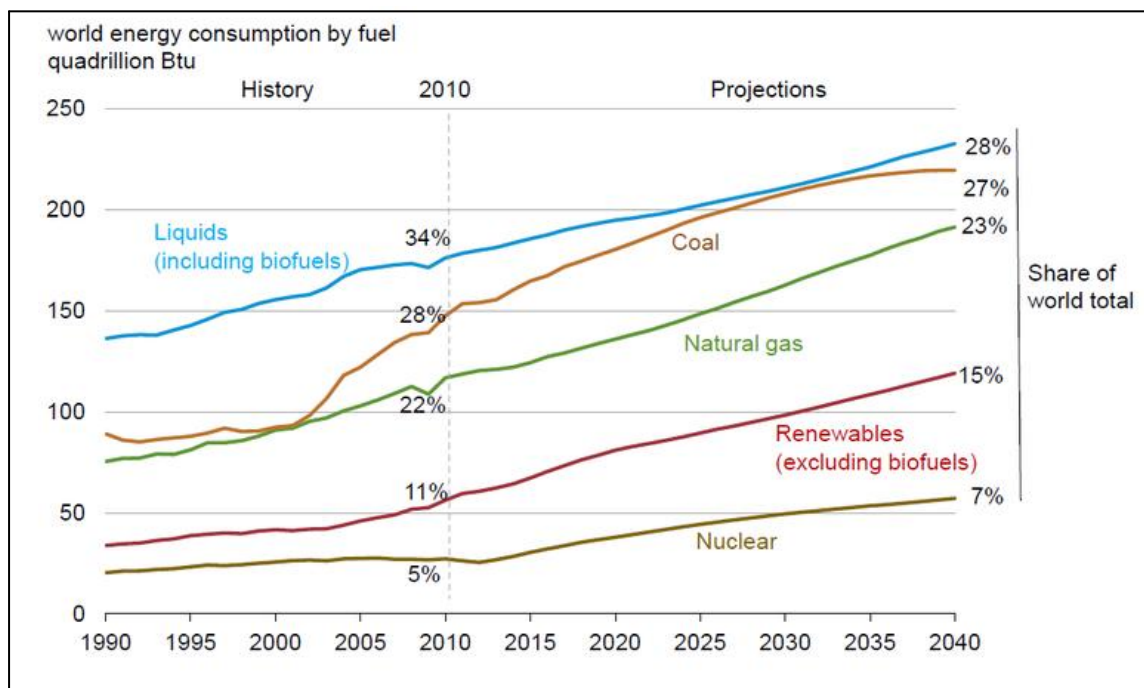
Η συστηματική κατανάλωση των διαφόρων ενεργειακών πόρων για τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις του σύγχρονου κόσμου συνεπάγεται μία σειρά επιπτώσεων στο περιβάλλον. Συνοπτικά αναφέρονται οι βασικές:

- **Κλιματική Αλλαγή:** Η σημαντική αύξηση της περιεκτικότητας του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) ως προϊόν της καύσης των ορυκτών καυσίμων (οξείδωση άνθρακα) επιφέρει επίταση του φαινομένου του θερμοκηπίου και άνοδο της μέσης θερμοκρασίας της Γης καθότι μεγαλύτερο ποσοστό της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπει ο Ήλιος εγκλωβίζεται στην ατμόσφαιρα. Η αύξηση της μέσης

θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πλανήτη έχει σαν συνέπεια την μεταβολή των φυσικοχημικών ισορροπιών που έχουν επικρατήσει τις τελευταίες χιλιετίες και εκφράζονται ως μετεωρολογικά φαινόμενα. Η επιρροή στα φαινόμενα αυτά επισύρει μία μεγάλη γκάμα ανεπιθύμητων μεταβολών όπως η τήξη των πάγων των Πόλων, η ερημοποίηση εκτάσεων με αποτέλεσμα την συρρίκνωση της έκτασης των καλλιεργήσιμων εδαφών, την συχνή έλευση καυσώνων απειλητικών για την ανθρώπινη ζωή κ.α.

- **Εξάντληση των διαθέσιμων πηγών:** Η συστηματική εκμετάλλευση κοιτασμάτων υδρογονανθράκων (πετρελαίου, φυσικού αερίου) και κοιτασμάτων γαιανθράκων (λιγνίτες, βιτουμενιούχοι άνθρακες, λιθάνθρακες, ανθρακίτες) συνολικά δηλαδή ορυκτών καυσίμων, μακροπρόθεσμα και πέραν της συνεισφοράς στην κλιματική αλλαγή, εμπεριέχει κινδύνους που σχετίζονται με την διαθέσιμη ποσότητα τους στον στερεό φλοιό της Γης. Είναι αποδεδειγμένο ότι τα υπάρχοντα κοιτάσματα προέκυψαν από πολύπλοκες γεωλογικές διαδικασίες αποσύνθεσης της οργανικής ύλης, των οποίων η διάρκεια εκτείνεται σε βάθος εκατομμυρίων χρόνων. Η ποσότητά τους είναι συνεπώς πεπερασμένη καθώς δεν διαθέτουν την ικανότητα ανανέωσης. Οι στατιστικές και οι εκτιμήσεις των επιστημόνων διαφέρουν όσον αφορά τις αποδεδειγμένες ποσότητες, ωστόσο σε αδρές γραμμές τείνει να επικρατήσει η άποψη του ότι η δυνατότητα παραγωγής (άντλησης ή εξόρυξης) θα αδυνατεί να ικανοποιήσει την ζήτηση σε μία προοπτική πέραν των 50 ετών.
- **Κίνδυνοι νεότερων τεχνικών εξόρυξης:** Η ανάγκη για μεγαλύτερη παραγωγή υδρογονανθράκων προκειμένου να υπάρξει κάλυψη των μελλοντικών αυξανόμενων απαιτήσεων στη ζήτηση, έχει ωθήσει την πετρελαϊκή βιομηχανία σε αναζήτηση και ανάπτυξη νέων μεθόδων γεώτρησης και άντλησης. Συγκεκριμένα οι μέθοδοι άντλησης υποθαλάσσιων κοιτασμάτων σε υψηλά βάθη (*Deepwater drilling*) και οι μέθοδοι εκμετάλλευσης σχιστολιθικών κοιτασμάτων πλούσιων σε υδρογονάνθρακες (μέθοδος *fracking*) επισύρουν κινδύνους λόγω αφενός των μεγάλων βαθών εξόρυξης που μπορούν να προκαλέσουν ατυχήματα (*Deepwater Horizon oil spill*, 2010) και αφετέρου λόγω της εκτεταμένης χρήσης χημικών στην περίπτωση του *fracking* και της εξαιρετικά εκτεταμένης επέμβασης σε σχηματισμούς συμπαγών πετρωμάτων που επισύρουν δευτερογενή γεωλογικά φαινόμενα (αλληλεπίδραση με υδροφόρο ορίζοντα κτλ.).
- **Κίνδυνοι πυρηνικής ενέργειας:** Η επικινδυνότητα των πυρηνικών σταθμών έγκειται αφενός στα προβλήματα διάθεσης των ραδιενεργών αποβλήτων και αφετέρου στα αυξημένα προβλήματα ασφάλειας που προκύπτουν κατά την λειτουργία των εργοστασίων παραγωγής. Το παράδειγμα του Τσέρνομπιλ (1986) και πολύ περισσότερο η πρόσφατη καταστροφή στην Φουκοσίμα της Ιαπωνίας (2011) καταδεικνύουν την ευάλωτη φύση των πυρηνικών σταθμών τόσο λόγω λαθών του προσωπικού όσο και λόγω της έκθεσης σε ακραία φυσικά φαινόμενα (γεωλογικά - μετεωρολογικά). Η μετά Φουκοσίμα περίοδος ανέδειξε τον διαχρονικό κίνδυνο ανεξέλεγκτης διαρροής ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον (εστίες έκθεσης του πληθυσμού σε υψηλής διεισδυτικότητας ακτινοβολία τύπου γ), την τεράστια

δυσκολία αντιμετώπισης μίας τόσο έκτακτης κατάστασης και το τεράστιο χρηματικό κόστος αποκατάστασης. Οι πλέον πρόσφατες εκτιμήσεις δείχνουν αμφιβολίες ως προς την ευχερή ανάπτυξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας στο μέλλον.



**Εικόνα 9:** Πορεία ενεργειακής κατανάλωσης βάσει πηγής ενέργειας και μελλοντική τάση με προοπτική τριακονταετίας. (Πηγή: U.S. DOE Energy Information Administration 2013, Wikipedia)

## 1.6 Η ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ (GLOBAL WARMING)

Το πλέον επιτακτικό ζήτημα της σύγχρονης ενεργειακής τεχνολογίας σε σχέση με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις αποτελεί σαφώς η παγκόσμια θέρμανση.

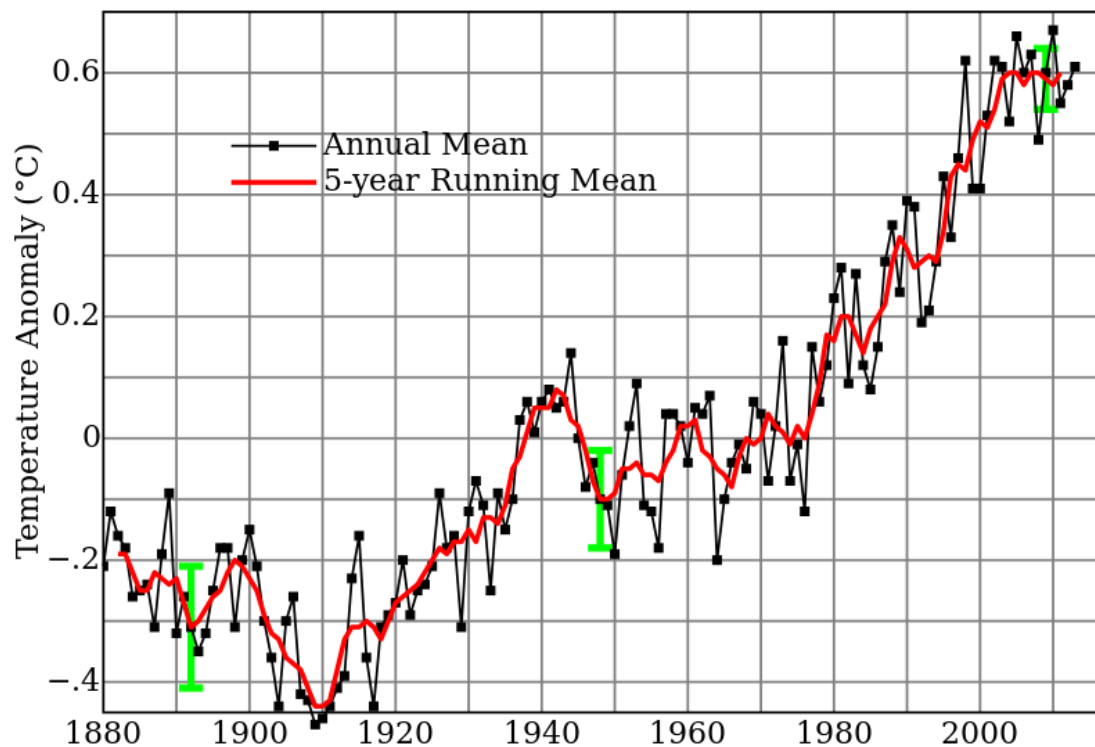
Η παγκόσμια θέρμανση ή κλιματική αλλαγή ή επίταση του φαινομένου του θερμοκηπίου, είναι όροι οι οποίοι αποδίδουν την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του κλιματικού συστήματος της Γης (ατμόσφαιρα ωκεανοί και στερεάς επιφάνειας).

Η επίσημη επιστημονική θέση πάνω στις κλιματικές μεταβολές, όπως αυτή εκφράζεται από την Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) του ΟΗΕ, είναι πως η μέση θερμοκρασία του πλανήτη έχει αυξηθεί  $0.6 \pm 0.2$  °C από τα τέλη του 19ου αιώνα και πως η αύξηση αυτή οφείλεται σημαντικά στην ανθρωπίνη δραστηριότητα των τελευταίων 50 ετών.

Σύμφωνα με επιστημονικές έρευνες της IPCC, η θερμοκρασία της Γης ενδέχεται να αυξηθεί κατά 1.4 - 5.8 °C εντός της χρονικής περιόδου 1990 και 2100. Οι συνέπειες μίας τέτοιας ενδεχόμενης αύξησης, επεκτείνονται και σε άλλου είδους μεταβολές, όπως αύξηση της στάθμης των θαλασσών ή δημιουργία ακραίων καιρικών φαινομένων όπως πλημμύρες, τυφώνες ή εξαφάνιση βιολογικών ειδών.



## Global Land-Ocean Temperature Index



**Εικόνα 10:** Διάγραμμα που καταδεικνύει την αυξητική πορεία της μέσης θερμοκρασίας της Γης (Πηγή: NASA)

Η αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας ουσιαστικά είναι απότοκο της επίτασης του φυσιολογικού και απαραίτητου για την ύπαρξη ζωής στον πλανήτη φαινομένου του θερμοκηπίου (greenhouse effect).

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου διαμορφώνεται από την ύπαρξη των αερίων του θερμοκηπίου (greenhouse gases). Διαθέτουν την ικανότητα της απορρόφησης μεγάλου μέρους της υπέρυθρης ακτινοβολίας και εν συνεχεία εκπομπής προς όλες τις κατευθύνσεις. Ένα ποσοστό αυτής της ποσότητας εκπέμπεται προς την επιφάνεια του πλανήτη θερμαίνοντας ξηρά και θάλασσα. Λόγω του φαινομένου αυτού επιτρέπει την επικράτηση μίας μέσης θερμοκρασίας 14°C στην επιφάνεια του πλανήτη. Δίχως την παρουσία του φαινομένου η μέση θερμοκρασία έχει υπολογιστεί ότι θα μπορούσε να βρίσκεται 33°C χαμηλότερα.

Το είδος των αερίων του θερμοκηπίου και η συνεισφορά τους στο φαινόμενο αποδίδεται στον ακόλουθο πίνακα:

**Πίνακας 2:** Αέρια του θερμοκηπίου και συνεισφορά στο φαινόμενο.

Compound	Formula	Contribution (%)
Water vapor and clouds	H <sub>2</sub> O	36 – 72%
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	9 – 26%
Methane	CH <sub>4</sub>	4–9%
Ozone	O <sub>3</sub>	3–7%

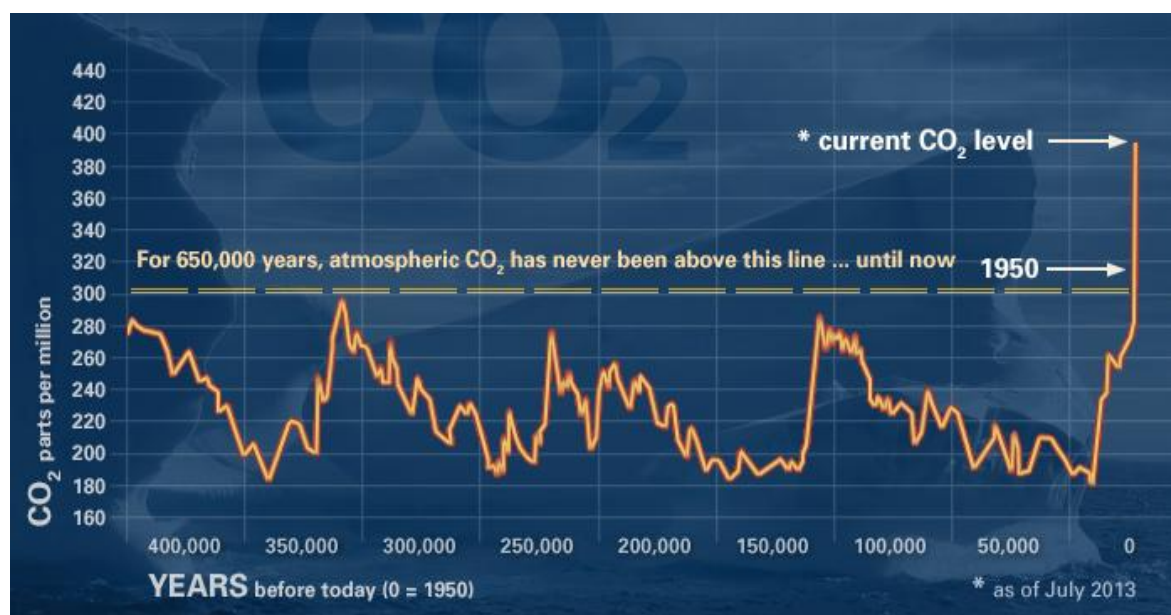
(Πηγή: Kiehl, J.T.; Kevin E. Trenberth (1997). "Earth's annual global mean energy budget")

Από τις παραπάνω χημικές ενώσεις αξιολογείται κυρίως η δεύτερη (CO<sub>2</sub>) όσον αφορά την συνεισφορά, λαμβάνοντας ως δεδομένη την σταθερότητα των ποσοστών των υπολοίπων αερίων.

Η απελευθέρωση ολοένα και μεγαλύτερων ποσοτήτων του διοξειδίου του άνθρακα λόγω της εκτεταμένης χρήσης ορυκτών καυσίμων (αύξηση ανθρωπογενούς προέλευσης) καθορίζει την αντίστοιχα δέσμευση ολοένα και μεγαλύτερου ποσοστού υπέρυθρης ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα και τελικά άυξηση της θερμοκρασίας.

Παραδοσιακά η περιεκτικότητα του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα παρουσίασε διακυμάνσεις μεταξύ των τιμών 180 ppm (parts per million) κατ'ελάχιστο κατά την εποχή των παγετώνων έως 280 ppm όπου έχει υπολογιστεί ότι βρισκόταν κατά την προ βιομηχανικής επανάστασης περίοδο.

Οι αυξημένες εκπομπές του αερίου στην ατμόσφαιρα ως προϊόντος οξείδωσης (κάυσης) του άνθρακα των ορυκτών καυσίμων, για την κάλυψη του μεγαλύτερου μέρους της ενεργειακής ζήτησης (όπως έγινε εμφανές από την ανάλυση προηγούμενης παραγράφου), οδήγησαν σε αύξηση της περιεκτικότητας αυτής σε 395 ppm σύμφωνα με τις πιο πρόσφατες μετρήσεις. Ο ρυθμός αύξησης προέκυψε μεγαλύτερος από το 1950 και έπειτα.

**Εικόνα 11:** Διακύμανση της τιμής περιεκτικότητας του CO<sub>2</sub> σε ppm διαχρονικά. (Πηγή: NASA)

Η ανάδειξη των δυσσιώνων προοπτικών όσον αφορά στις πηγές ενέργειας που τροφοδοτούν τον σύγχρονο κόσμο και των επιπτώσεων που παρουσιάζει η εκτεταμένη χρήση τους, καθώς και οι ήδη εμφανείς εκδηλώσεις της κλιματικής αλλαγής (ασυνήθιστα ακραία καιρικά φαινόμενα, περιβαλλοντική μετανάστευση, συρρίκνωση όγκου Πολικών πάγων) έχουν από κοινού συνεισφέρει στην συνειδητοποίηση της σοβαρότητας του φαινομένου για το μέλλον της ανθρωπότητας.

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 η κλιματική αλλαγή ως απότοκο της ανθρωπογενούς δραστηριότητας έχει γίνει κοινός τόπος αναφοράς σε όλα τα διεθνή οικονομικοπολιτικά φόρουμ, και προωθείται ψηλά στην θεματολογία των ΜΜΕ.

Η πραγματικότητα αυτή συνεισέφερε στην εμπέδωση των όρων "πράσινη ενέργεια" και "αισιφόρος ανάπτυξη" στο λεξιλόγιο λιγότερο ή περισσότερο εξειδικευμένων ανθρώπων.

Οι όροι αναφέρονται σε μία λογική διαχείρισης της ενέργειας η οποία θα πληροί τις ακόλουθες αρχές:

- Σταδιακή ελάττωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων λόγω εκπομπών CO<sub>2</sub> και λόγω περιορισμού διαθέσιμων ποσοτήτων.
- Σταδιακή υιοθέτηση πηγών ενέργειας που να διαθέτουν τον χαρακτήρα του ανανεώσιμου, να μην παράγουν CO<sub>2</sub> και ταυτόχρονα να μπορούν να καλύψουν την παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση.

### 1.7 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

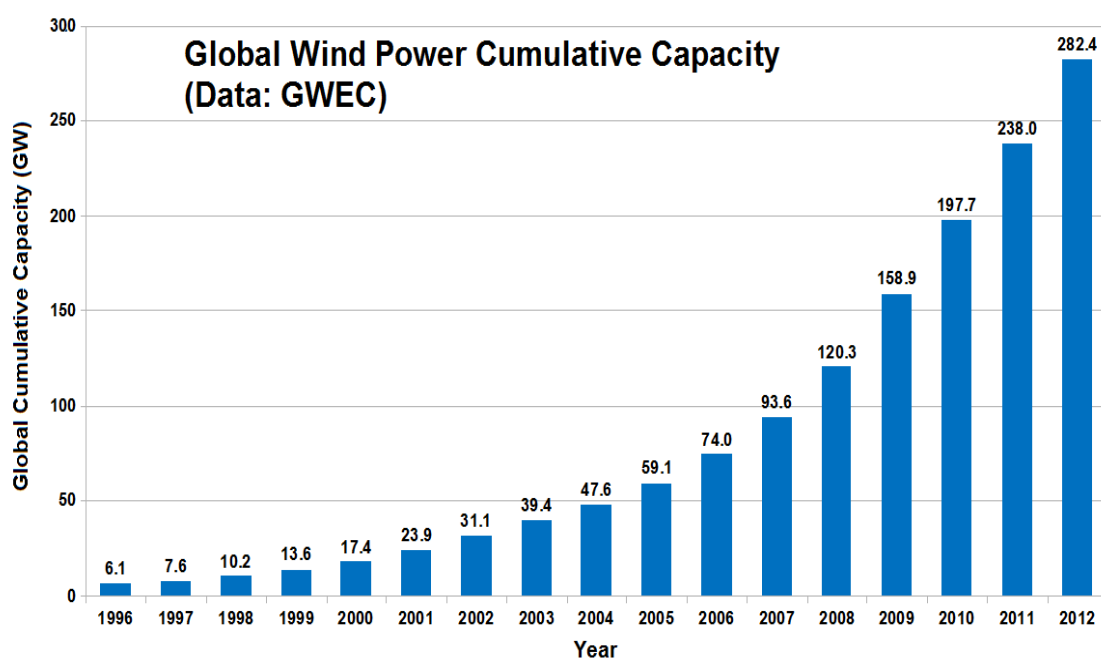
Όπως προαναφέρθηκε το 16% κατά προσέγγιση της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας καλύπτεται από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Το ποσοστό αυτό αναμένεται να αυξηθεί εντός των επόμενων δεκαετιών καθότι οι νέες μορφές ανανεώσιμων πηγών κατά την δεκαετία 2000-2010 παρουσίασαν αλματώδη ανάπτυξη.

Οι μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- **Αιολική ενέργεια:** Η κινητική ενέργεια του ανέμου μεταφέρεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της δράσης των ανεμογεννητριών.
- **Υδροηλεκτρική ενέργεια:** Η αποθηκευμένη δυναμική ενέργεια και ακολούθως μετατρέπόμενη σε κινητική ενέργεια του ρέοντος νερού στην βάση ενός τεχνητού ταμιευτήρα (φράγμα) που έχει δημιουργηθεί από την εκτροπή της ροής μεγάλων ποταμών, θέτει σε κίνηση ρότορα με αποτέλεσμα την παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στην αξιόλογη παραγωγικότητα συνεισφέρει η πυκνότητα του νερού που είναι 800 φορές μεγαλύτερη του αέρα.
- **Ηλιακή ενέργεια:** Η ενέργεια που μεταφέρουν οι προσπίπτουσες στην Γη ακτίνες του ηλίου συλλέγονται με αξιοποίηση είτε του ηλεκτρικού ρεύματος που μπορούν να παράξουν (φωτοβολταϊκή τεχνολογία) είτε της θερμότητας που παρέχουν (ηλιοθερμική τεχνολογία).

- **Βιομάζα:** Η βιομάζα προκύπτει από την συλλογή βιολογικής ύλης κατά κανόνα από φυτικούς οργανισμούς. Ως ενεργειακή πηγή η βιομάζα μπορεί είτε να αξιοποιηθεί με απευθείας καύση για παραγωγή θερμότητας, είτε μέσω επεξεργασίας να μετατραπεί σε βιοκαύσιμα (π.χ. βιοαιθανόλη). Κατά το μεγαλύτερο ποσοστό η βιομάζα αφορά στην ξυλεία. Ωστόσο υπάρχουν αρκετά πλάνα για περαιτέρω αξιοποίηση οργανικής ύλης, όπως π.χ. από χώρους απόθεσης απορριμάτων.
- **Βιοκαύσιμα:** Όπως προαναφέρθηκε, τα βιοκαύσιμα προκύπτουν από επεξεργασία βιομάζας μέσω θερμικών χημικών και βιοχημικών μεθόδων. Κυριαρχούν η βιοαιθανόλη που προκύπτει μέσω επεξεργασίας (αλκοολικής ζύμωσης) της ζάχαρης και το Biodiesel το οποίο προκύπτει από επεξεργασία φυτικών ελαίων.
- **Γεωθερμική ενέργεια:** Η γεωθερμική ενέργεια ή γεωθερμία αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας. Αποτελεί την θερμότητα που παράγει η Γη και προωθεί προς την επιφάνειά της από την ραδιενέργεια (radioactive decay) των ορυκτών. Μπορεί να αξιοποιηθεί με διαφορετικούς τρόπους και βασικά για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θέρμανσης. Ήδη η Ισλανδία καλύπτει το 30% των ενεργειακών της αναγκών μέσω γεωθερμίας και οι Φιλιππίνες το 27%.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας διαθέτουν μία σειρά πλεονεκτημάτων που τις καθιστούν κατάλληλες για ανάπτυξη στο μέλλον. Το βασικότερο αφορά στο αέναη φύση τους, στην δυνατότητα ανεξάντλητης προσφοράς ενέργειας. Το βασικό αυτό πλεονέκτημα σε συνδυασμό με την επιτακτική ανάγκη περιορισμού των εκπομπών CO<sub>2</sub> προωθούν ολοένα και περισσότερο την έρευνα και τις εφαρμογές στην τεχνολογία των ΑΠΕ.



**Εικόνα 12:** Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ανεμογεννητριών για το διάστημα 1996-2012.

Η κατηγοριοποίηση των ΑΠΕ με κριτήριο την χρονική περίοδο που ξεκίνησε η εφαρμογή τους στην αγορά της ενέργειας γενικά χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- **Πρώτης γενιάς:** Προέκυψαν κατά τα τέλη του 19ου αιώνα και αφορούν στην υδροηλεκτρική ενέργεια, καύση βιομάζας, γεωθερμία (ηλεκτρική και θερμική παραγωγή).
- **Δεύτερης γενιάς:** Κυρίως αφορούν στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας (Φωτοβολταϊκή τεχνολογία), και της αιολικής. Είναι αυτές που γνωρίζουν μεγάλη ανάπτυξη την τελευταία δεκαετία λόγω της εντατικής έρευνας πάνω στις συγκεκριμένες τεχνολογίες που πραγματοποιήθηκε από την δεκαετία του 1970. Η πετρελαϊκή κρίση της δεκαετίας εκείνης θεωρείται ότι συνετέλεσε στην έρευνα αυτή.
- **Τρίτης γενιάς:** Αφορούν μορφές όπως η παλιρροιακή ενέργεια (tidal power), η εκμετάλλευση της ενέργειας των κυμάτων καθώς και νέες τεχνικές επεξεργασίας της βιομάζας. Η εφαρμογή των συγκεκριμένων τεχνολογιών είναι μέχρι στιγμής περιορισμένη λόγω του ότι βρίσκονται σε αρχικό πειραματικό στάδιο.

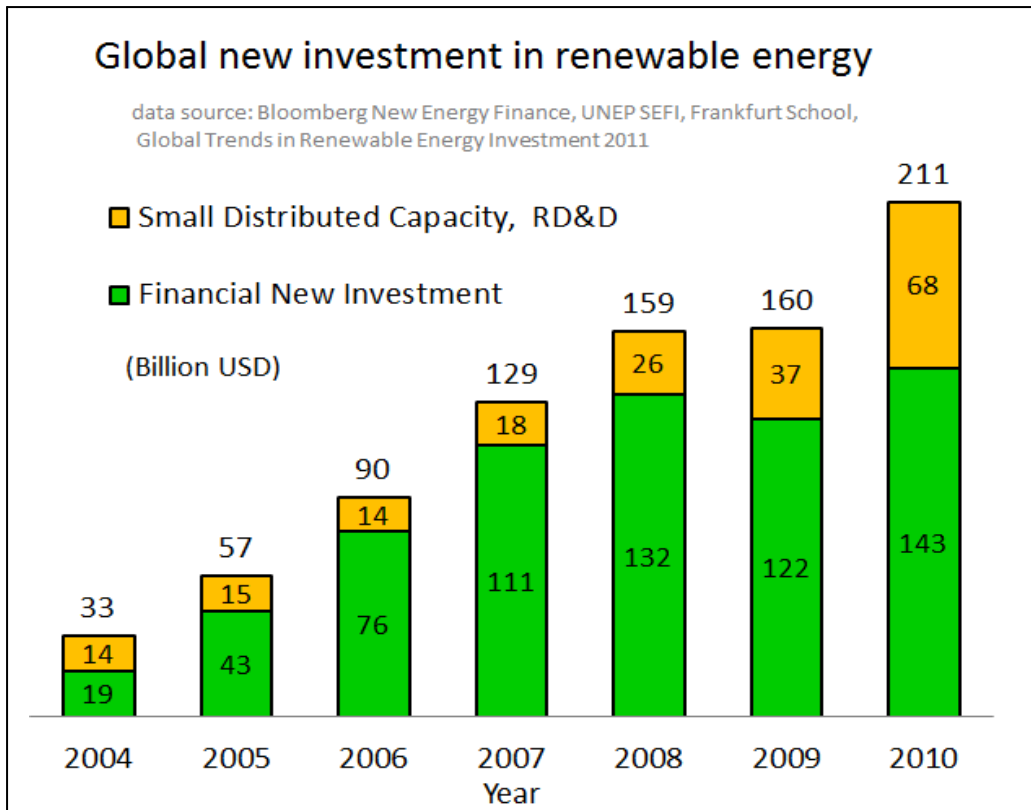
Η διείσδυση των ΑΠΕ στην αγορά ενέργειας συνιστά διαδικασία σύνθετη, χρονοβόρο και χαρακτηρίζεται από την παρουσία προβλημάτων. Ωστόσο η πορεία είναι σταθερή και ήδη η χρηματοδότηση στην έρευνα και στην ανάπτυξη αυξάνει σταθερά.

Το πρωτόκολλο του Κyoto όπως και η υιοθετημένη από το 2005 πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης "European Union Emissions Trading System" μέσω της οποίας αποσκοπείται αρχικά η μείωση των επομίων αερίων του θερμοκηπίου κατά 20% έως το έτος 2020, αποτελούν πρωτοβουλίες υψηλού επιπέδου.

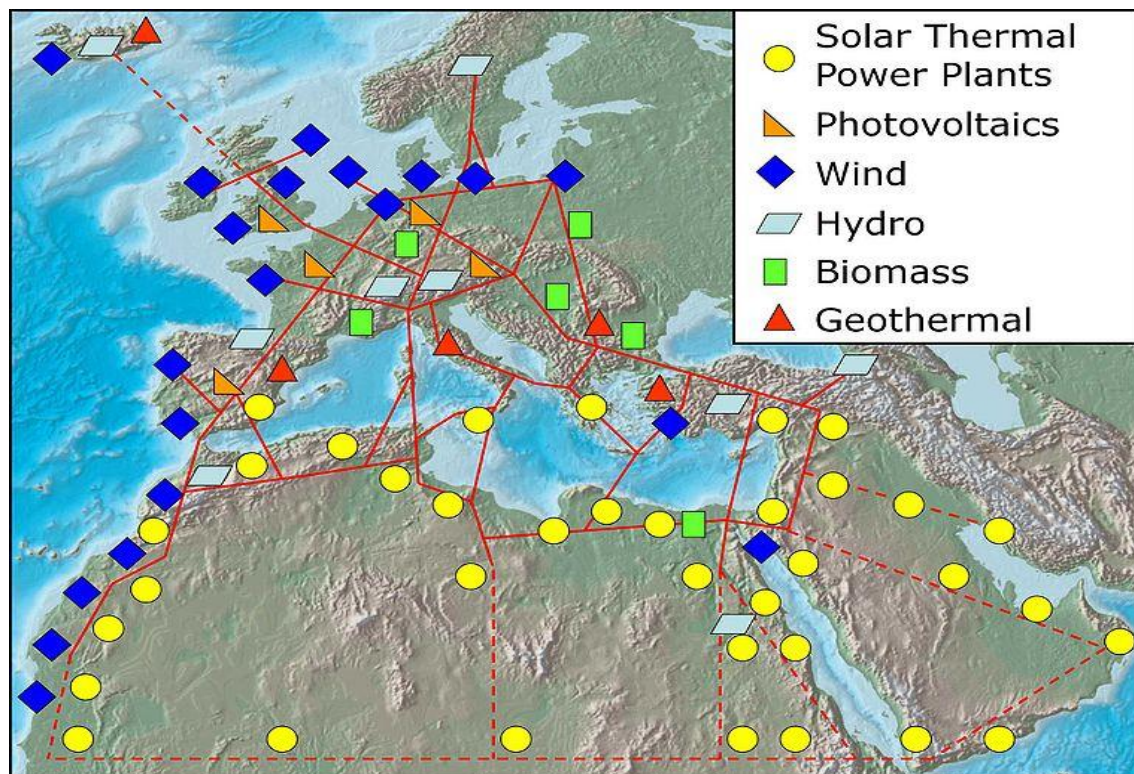
Οι πηγές δεύτερης γενιάς (αιολική, ηλιακή) αναμένεται να αποτελέσουν την εμπροσθοφυλακή στην διείσδυση των ΑΠΕ στην παραγωγή ενέργειας τις προσεχείς δεκαετίες.

Η εκμετάλλευση πηγών ενέργειας όπου παρουσιάζουν μεγαλύτερη αφθονία (π.χ. φωτοβολταϊκά σε περιοχές αυξημένης ηλιοφάνειας ή υπεράκτια αιολικά πάρκα όπου η ροή ανέμου είναι πρακτικά αδιάκοπη) και η σύνδεσή τους σε τοπικό δίκτυο παροχής ηλεκτρισμού ή ακόμη σε συμβατικό δίκτυο, η ανάπτυξη μεθόδων απομόνωσης ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> σε εξαντλημένους ταμειυτήρες υδρογονανθράκων (CO<sub>2</sub> sequestration) και τελικά η μακροπρόθεσμη φιλοδοξία για σύνδεση των επιμέρους πηγών σε ενιαίο δίκτυο διανομής ενέργειας, αποτελούν μερικές μόνο προοπτικές για την απαγκίστρωση από τα ορυκτά καύσιμα και την υιοθέτηση της "πράσινης ενέργειας".

Ακόμη, οι ΑΠΕ αποτελούν την μοναδική λύση σε περιοχές του πλανήτη με εξαιρετικά χαμηλό κατά κεφαλήν εισόδημα και μη ανεπτυγμένες ενεργειακές υποδομές όπως κεντρικό συμβατικό δίκτυο ηλεκτρισμού (π.χ. Αφρική, Ασία). Το ήδη χαμηλό και συνεχώς φθίνον κόστος του εξοπλισμού καθώς και η οικονομική βοήθεια από διεθνείς οργανισμούς όπως η Παγκόσμια Τράπεζα (World Bank) βοηθούν τμήματα του πληθυσμού να αποκτήσουν στοιχειώδη πρόσβαση σε ηλεκτρικό ρεύμα.



**Εικόνα 13:** Πορεία παγκόσμιας χρηματοδότησης σε ΑΠΕ. (Πηγή: Bloomberg New Energy Finance, UNEP SEFI, Frankfurt School, Global Trends in Renewable Energy Investment 2011)



**Εικόνα 14:** Προσομοίωση του ιδεατού πλάνου ενός μελλοντικού Ευρωδικτύου (European Supergrid). (Πηγή: www.DESERTEC.org)



## 1.8 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΕ-ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η εφαρμογή των συστημάτων εκμετάλλευσης ΑΠΕ και βασικά των ανεμογεννητριών-φωτοβολταϊκών παρουσιάζουν το μειονέκτημα της διαλείπουσας φύσης των (intermittent nature). Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι μία τοποθεσία με εγκατεστημένο σύστημα φωτοβολταϊκών ή ηλιοθερμικής εκμετάλλευσης θα είναι ικανό να παράξει ενέργεια μόνο κατά τις ώρες ηλιοφάνειας ή ένα αιολικό πάρκο μπορεί να παρουσιάζει χαμηλή παραγωγή λόγω παροδικής άπνοιας στην περιοχή.

Οι μεταβολές αυτές στην δυναμικότητα που παρουσιάζουν τα συστήματα ΑΠΕ αξιολογούνται ως σημαντικά καθότι θα ήταν αδιανόητο για ένα οργανωμένο δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας να εξαρτάται από την εκάστοτε διαθεσιμότητα κάθε πηγής.

Η μεταβαλλόμενη φύση λοιπόν των ανανεώσιμων πηγών καθορίζει ένα πρωτογενές πρόβλημα ανταπόκρισης στις ανάγκες φόρτισης όπως αυτές προκύπτουν από τις συνθήκες των καταναλωτών.

Γενικά οι αναντιστοιχίες στην προσφορά και την ζήτηση και όσον αφορά στα συμβατικά δίκτυα παραγωγής, είναι σπάνιες και όταν συμβαίνουν καλύπτονται από την επιστράτευση εφεδρικών μονάδων υψηλής ισχύος. Οι μονάδες αυτές είναι κυρίως φυσικού αερίου (Gas turbines) ή συχνά υδροηλεκτρικά εργοστάσια. Στην περίπτωση των μονάδων φυσικού αερίου επιστρατεύεται διαθέσιμη ποσότητα για να καλύψει μία έκτακτη ζήτηση (όπως π.χ. στις ημέρες καύσωνα) ενώ στην περίπτωση του υδροηλεκτρικού εργοστασίου επιστρατεύεται η δυναμική ενέργεια του νερού του ταμιευτήρα προς μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια.

Οι δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις αποκαλύπτουν ότι τίθεται ζήτημα αποθήκευσης ενέργειας ή δημιουργία ενεργειακών αποθεμάτων τα οποία θα διασφαλίσουν την απρόσκοπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε όλους τους καταναλωτές ενός δικτύου.

Το ζήτημα της αποθήκευσης ενέργειας προσαρμοζόμενο σε συνθήκες συστημάτων ανανεώσιμων πηγών αποτελεί μείζον ζήτημα για τους οραματιστές των μελλοντικών "πράσινων" μηδενικών εκπομπών CO<sub>2</sub> δικτύων.

Η μελέτη των νέων συστημάτων ενέργειας προσανατολίζεται σαφώς προς την λογική της αποθήκευσης. Συγκεκριμένα ο όρος "**Grid Energy Storage**" αφορά στην οργάνωση ενός συστήματος παραγωγής ενέργειας το οποίο θα βασίζεται στην αποθήκευση ενέργειας όταν η ζήτηση είναι χαμηλότερη της παραγωγής και αντίστοιχα αξιοποίηση της αποθηκευμένης ενέργειας όταν η παραγωγή αδυνατεί να καλύψει την ζήτηση.

Το κύριο μέσο αποθήκευσης που χρησιμοποιείται αυτή τη στιγμή σε μεγάλη κλίμακα (δηλαδή σε συνεργασία με τα συμβατικά εργοστάσια) και με επιτυχία είναι η υδροηλεκτρική ενέργεια με επανάντληση ποσοτήτων νερού στον ταμιευτήρα κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης/κόστους (rumped in storage). Δευτερευόντως εξετάζονται άλλες μορφές αποθήκευσης σε περισσότερο πειραματικό στάδιο και σε μικρότερη κλίμακα, όπως οι μπαταρίες (χημική ενέργεια) και ο πεπιεσμένος αέρας (μηχανική ενέργεια). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αποθήκευση υπό μορφή χημικής ενέργειας υδρογόνου (H<sub>2</sub>) μέσω ηλεκτρόλυσης νερού, και αυτή η περίπτωση θα απασχολήσει την παρούσα εργασία.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΜΕΣΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ****2.1 ΥΔΡΟΓΟΝΟ**

Το **υδρογόνο** (λατινικά *hydrogenium*, αγγλικά *hydrogen*) είναι το αμέταλλο χημικό στοιχείο με σύμβολο **H** και ατομικό αριθμό 1. Με ατομική μάζα 1,00794(7) amu, το υδρογόνο είναι το ελαφρύτερο χημικό στοιχείο του περιοδικού πίνακα. Η μονοατομική αλλομορφή του ( $H_1$ ), είναι η πιο άφθονη χημική ουσία στο σύμπαν, του οποίου θεωρείται ότι αποτελεί το 75% της συνολικής βαρυονικής του μάζας. Τα άστρα υπολείμματα άστρων κύριας ακολουθίας αποτελούνται κυρίως από υδρογόνο σε κατάσταση πλάσματος. Το πιο συνηθισμένο ισότοπο του υδρογόνου είναι το «πρώτιο» ( $^1H$ ), αν και σπάνια χρησιμοποιείται αυτό το όνομά του, με ένα πρωτόνιο και κανένα νετρόνιο, στον πυρήνα του.[1]

Οι γενικές ιδιότητες του υδρογόνου παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα:

**Πίνακας 3:** Ιδιότητες υδρογόνου.

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΤΙΜΗ
Ατομική μάζα	1,00794(7) amu
Πυκνότητα (αέρια κατάσταση)	0,08988 g/L (0°C/1 atm)
Πυκνότητα (υγρή κατάσταση στο σ.τήξης)	0,07 (0,0763 solid) g/cm <sup>3</sup>
Πυκνότητα (υγρή κατάσταση σ.βρασμού)	0,07099 g/cm <sup>3</sup>
Σημείο τήξης	13,99 K / -259,16 °C
Σημείο βρασμού	20,271 K / -252,879 °C
Τριπλό σημείο	13,8033 K / 7,041 kPa
Κρίσιμο σημείο	32,938 K / 1,2858 MPa
Ενθαλπία τήξης	(H <sub>2</sub> ) 0,117 kJ/mol
Ενθαλπία εξάτμισης	(H <sub>2</sub> ) 0,904 kJ/mol

Το υδρογόνο σε κανονικές συνθήκες (298K, 1 atm) απαντάται ως διατομικό μόριο υπό τον τύπο H<sub>2</sub>. Αποτελεί ένα άχρωμο, άοσμο, μη τοξικό και εξαιρετικά εύφλεκτο αέριο. Η μοριακή μορφή του υδρογόνου είναι εξαιρετικά σπάνια στην φύση. Αντιθέτως το άτομο του υδρογόνου δημιουργεί εύκολα ενώσεις με αμέταλλα στοιχεία και αποτελεί συστατικό σε μεγάλο αριθμό πολυατομικών χημικών ενώσεων με κυριότερες το νερό (H<sub>2</sub>O) και τους υδρογονάνθρακες. Επιπλέον μπορεί να αποκτήσει επαμφοτερίζοντα ρόλο, διαθέτοντας αρνητικό σθένος, σε ενώσεις με μεταλλικά στοιχεία(υδρίδια).

Το H<sub>2</sub> -όπως προαναφέρθηκε-δεν απαντάται σε μοριακή μορφή στην φύση, εντούτοις είναι εφικτή η παραγωγή του σε μεγάλες ποσότητες, μέσω ειδικών διεργασιών βιομηχανικής κλίμακας.

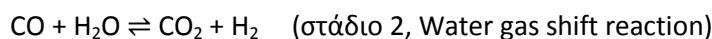
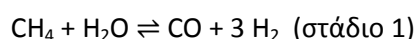


## 2.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ H<sub>2</sub> - ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Το H<sub>2</sub> παράγεται σε μεγάλες ποσότητες στην χημική βιομηχανία και ιδιαίτερα στους κλάδους της διύλισης πετρελαίου όπως και της λιπασματοβιομηχανίας. Η παραγωγή του επιτυγχάνεται ευχερώς και εν συνεχεία η παραχθείσα ποσότητα καταναλώνεται σε κοντινές μονάδες με σκοπό την παραγωγή τελικών προϊόντων. Τα τελικά προϊόντα περιέχουν άτομα υδρογόνου εντός των χημικών τους ενώσεων.

Οι τεχνικές παραγωγής είναι κυρίως τριών ειδών:

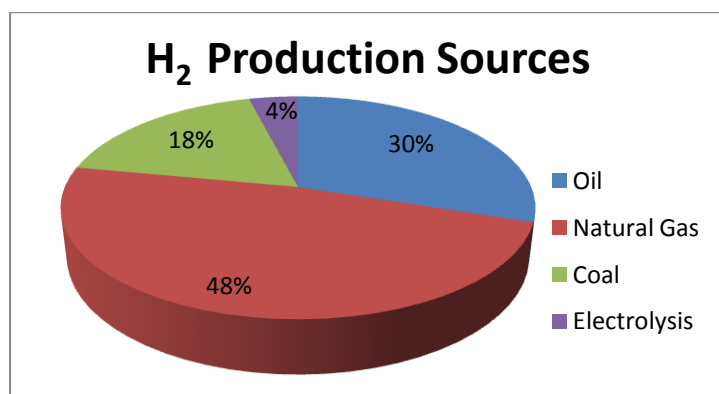
- **Διεργασία αναμόρφωσης με χρήση ατμού (Steam reform process):** Η τεχνική χρησιμοποιεί την αντίδραση υδρογονανθράκων, με βασικότερη πηγή το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), με υδρατμούς υπό υψηλή θερμοκρασία (700-1100 °C) υπό την παρουσία μεταλλικών καταλυτών (κυρίως Ni). Ιδιαίτερα με το μεθάνιο η αντίδραση ακολουθεί τα εξής βήματα:



- **Αεριοποίηση γαιανθράκων (Coal Gasification):** Αποτελεί μία σύνθετη διεργασία όπου ένα μίγμα γαιάνθρακα, οξυγόνου (O<sub>2</sub>) και υδρατμών, αντιδρώντας υπό υψηλή θερμοκρασία, αποδίδει ένα μίγμα αερίων H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO και CH<sub>4</sub>.
- **Ηλεκτρολυση νερού (Water electrolysis):** Αφορά στην διάσπαση του νερού σε αέριο υδρογόνο και αέριο οξυγόνο λόγω της διέλευσης ηλεκτρικού ρεύματος διαμέσω της μάζας του νερού. Η αντίδραση είναι:  $2 \text{H}_2\text{O}(l) \rightarrow 2 \text{H}_2(g) + \text{O}_2(g)$ .

Υπο μελέτη ακόμη βρίσκονται και άλλα είδη διεργασιών παραγωγής H<sub>2</sub>, αυστηρά όμως σε πειραματικό στάδιο. Ως πλέον οικονομικά συμφέρουσα λύση αξιολογείται η παραγωγή από φυσικό αέριο.

Συνολικά η παραγόμενη ποσότητα του H<sub>2</sub> με γνώμονα την πρώτη ύλη/τεχνική ανέρχεται όπως στην ακόλουθη εικόνα:



**Εικόνα 15:** Πηγές παγκόσμιας παραγωγής H<sub>2</sub>. (Πηγή: Hydrogenassociation.org)

Η παγκόσμια παραγωγή του υδρογόνου δεν έχει εκτιμηθεί με απόλυτη ακρίβεια δεδομένου ότι κατά κύριο λόγο η παραγωγή του συνήθως χρησιμεύει ως ενδιάμεσο στάδιο μίας ευρύτερης βιομηχανικής διεργασίας.

Εντούτοις μετρήσεις δείχνουν ότι η παγκόσμια παραγωγή για το 2004 ανήλθε σε 44,5 εκατομμύρια τόνους ή  $5 \times 10^{11} \text{ Nm}^3$ .

Το παραγόμενο  $\text{H}_2$  διοχετεύεται στα ακόλουθα είδη εφαρμογών:

- **Πετρελαϊκή βιομηχανία:** Το  $\text{H}_2$  χρησιμοποιείται σε διυλιστήρια για τον κατακερματισμό βαρέων πετρελαϊκών κλασμάτων σε ελαφρότερες υδρογονανθρακικές ενώσεις, με ταυτόχρονο εξευγενισμό, δηλαδή αντικατάσταση ατόμων θείου(S) και αζώτου(N) από άτομα υδρογόνου. Από τη συγκεκριμένη διεργασία (Hydrocracking) προέρχονται κατά κύριο λόγο τα αεροπορικά καύσιμα (Jet fuel), το καύσιμο τύπου Diesel, η Νάφθα και το LPG(Liquified Petroleum Gas).
- **Βιομηχανία λιπασμάτων (fertilisers):** Το  $\text{H}_2$  χρησιμοποιείται ως συστατικό της παραγωγής αμμωνίας ( $\text{NH}_3$ ) για την άμμεση ή έμμεση παραγωγή λιπασμάτων. Η αντίδραση που διεθνώς ονομάζεται Haber process είναι:  

$$\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{NH}_3$$
 Η αντίδραση απετέλεσε το εφαλτήριο της ανάπτυξης της λιπασματοβιομηχανίας και ακολούθως των εντατικών καλλιεργειών (intensive agriculture).
- **Λοιπές χρήσεις:** Το  $\text{H}_2$  χρησιμοποιείται ακόμη στην βιομηχανία τροφίμων για υδρογόνωση ελαίων, στην χημική βιομηχανία για την παραγωγή μεθανόλης και αιθανόλης, για παραγωγή συνθετικών καυσίμων, ως βασικό καύσιμο των πυραύλων, στη μεταλλουργία σε φούρνους υψηλής θερμοκρασίας και τέλος ως καύσιμο πειραματικών εφαρμογών εγκαταστάσεων κυψελών καυσίμου και ανάπτυξης οχημάτων με μηχανές εσωτερικής καύσης.

### 2.3 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ- ΜΕΤΑΦΟΡΑ- ΑΣΦΑΛΕΙΑ

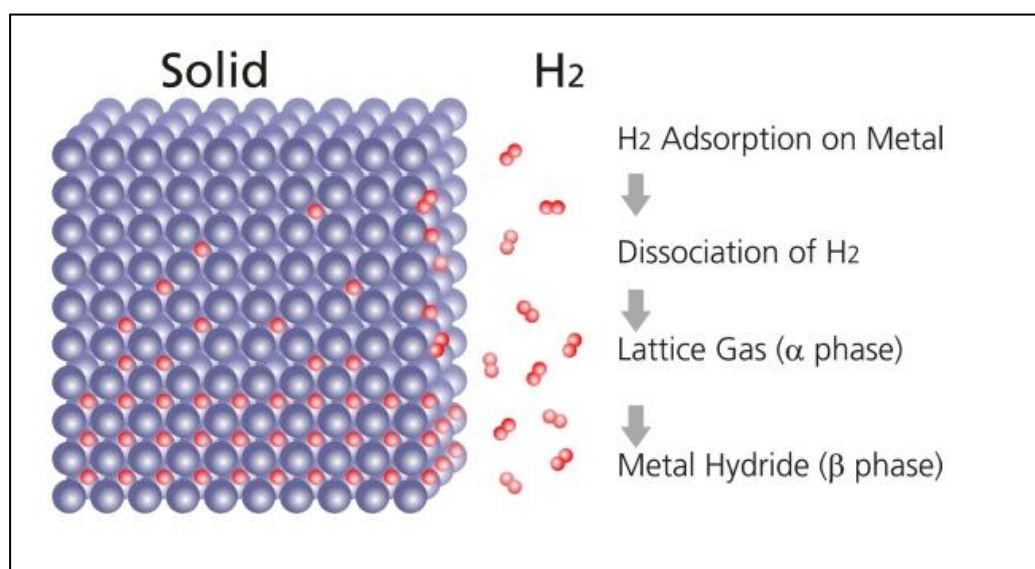
Η αποθήκευση, η μεταφορά και η ασφάλεια καθιστούν σημαντικά ζητήματα για την βιομηχανία και τις λοιπές εφαρμογές του  $\text{H}_2$ .

Το  $\text{H}_2$  αποθηκεύεται σε πεπιεσμένη μορφή (Compressed hydrogen), σε υγρή μορφή (Liquid Hydrogen) είτε σε "στερεά" κατάσταση δηλαδή απορροφημένο εντός ενός στερεού κράματος μεταλλικού υδριδίου.

- Η αποθήκευση  $\text{H}_2$  σε ειδική δεξαμενή επιτυγχάνεται ευχερώς με την διαμεσολάβηση ενός μηχανικού συμπιεστή(Compressor). Η τυπική πίεση των δεξαμενών συμπιεσμένου  $\text{H}_2$  κυμαίνονται μεταξύ 350-700 bar, τόσο για στατικές εφαρμογές όσο και για οχήματα.
- Η αποθήκευση  $\text{H}_2$  σε υγρή μορφή απαιτεί την κατανάλωση μεγάλων ποσών ενέργειας διότι η επίτευξη της υγροποίησης καθίσταται εφικτή με την αναγωγή της αποθήκης σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, της τάξεως των  $-252,87 \text{ }^\circ\text{C}$ . Τυπικά

χρησιμοποιείται ως καύσιμο για την προώθηση διαστημικών οχημάτων. Επίσης έχει χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε πειραματικά υποβρύχια και σε πειραματικά οχήματα (DeepC, BMW H2R).

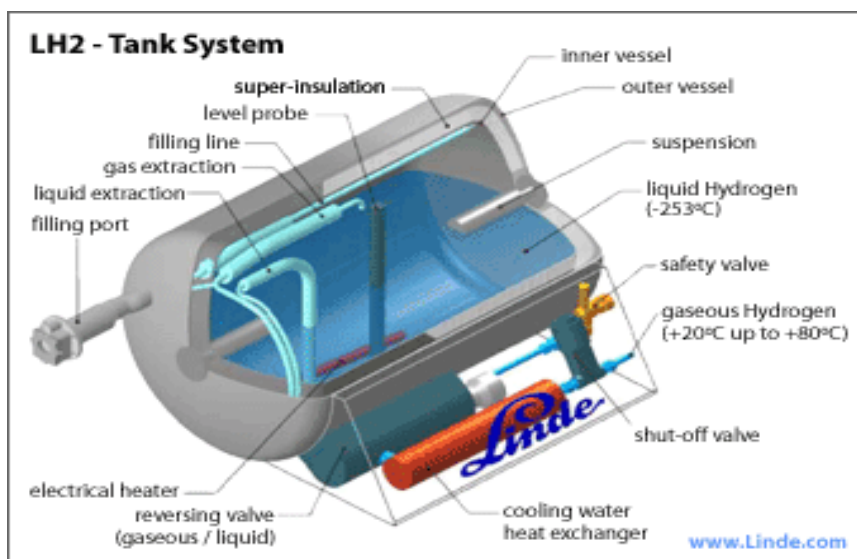
- Η αποθήκευση μέσω της απορρόφησης του  $H_2$  εντός πλέγματος κάποιων ειδών μεταλλικών υδριδίων αποτελεί μία μελλοντικά ενδεχομένως πρόσφορη μορφή. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται κράματα όπως  $MgH_2$ ,  $NaAlH_4$ ,  $LiAlH_4$ ,  $LiH$ ,  $LaNi_5H_6$ ,  $TiFeH_2$  και υδρίδιο του παλλαδίου, τα οποία απορροφούν μόρια υδρογόνου διαμέσου των διακένων του μεταλλικού τους ιστού σε χαμηλή πίεση και αποβάλλουν την μάζα αυτή σε υψηλή πίεση μέσω της θέρμανσης από κάποιον εξωτερικό παράγοντα όπως θερμό νερό ή ηλεκτρομαγνητικό πηνίο.



**Εικόνα 16:** Απλοποιημένη απεικόνιση αποθήκευσης σε μεταλλικά υδρίδια. (Πηγή: Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Advanced Materials (IFAM))

Προς το παρόν η έρευνα έχει δείξει ότι για συμβατικές χρήσεις όπως η χρήση πειραματικού αυτοκινήτου ή η τροφοδότηση κτιριακής υποδομής με κυψέλη καυσίμου, προτιμητέα μορφή αποτελεί το συμπιεσμένο  $H_2$ .

Τόσο η συμπιεσμένη μορφή ( $CGH_2$ ) όσο ακόμη και η υγρή μορφή ( $LH_2$ ) παρουσιάζουν ένα σημαντικό πρόβλημα που αφορά στην πυκνότητα ενέργειας. Συγκεκριμένα το  $H_2$  ενώ διαθέτει την δεύτερη μεγαλύτερη τιμή ενέργειας ανά μονάδα μάζας στην φύση, παρουσιάζει αισθητά χαμηλότερες τιμές ενέργειας ανά μονάδα αποθηκευμένου όγκου σε σχέση με την συμβατική βενζίνη. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο ότι το  $H_2$  ακόμη και σε υγρή μορφή διαθέτει πολύ χαμηλότερη πυκνότητα από την βενζίνη. Η πυκνότητα του υγροποιημένου  $H_2$  ισούται με  $0,07098 \text{ g/cm}^3$  ενώ η πυκνότητα της βενζίνης κυμαίνεται μεταξύ  $0,71-0,77 \text{ g/cm}^3$  δηλαδή αναλογία προσεγγιστικά 1/10.



Εικόνα 17: Δεξαμενή υγροποιημένου H<sub>2</sub>. (Πηγή: U.S. Department of Energy)



Εικόνα18: Εργοστασιακές εγκαταστάσεις (δεξαμενές) αποθήκευσης H<sub>2</sub>. (Πηγή: Wikipedia)

Πληρέστερα οι συσχετισμοί παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 4: Σύγκριση ειδικής ενέργειας και πυκνότητας ενέργειας H<sub>2</sub> - Βενζίνης.

FUEL	Specific Energy (MJ/kg)	Energy density (MJ/L)
H <sub>2</sub> compressed at 700 bar	141,86	5,6
H <sub>2</sub> , Liquid	141,86	8,491
Gasoline	46,4	34,2

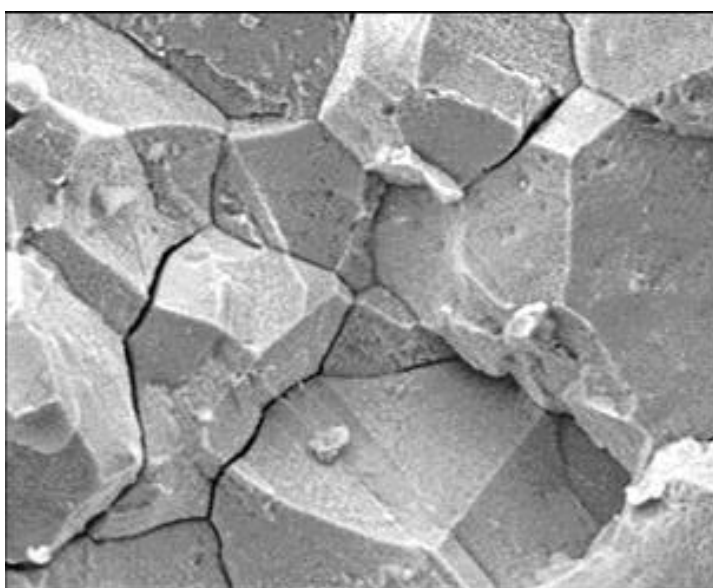
Η μεταφορά του H<sub>2</sub> πραγματοποιείται με δύο κυρίως τρόπους, πρώτον με μεταφορά μέσω οχημάτων (containers) ή δεξαμενόπλοιων, σε συμπιεσμένη ή υγροποιημένη κατάσταση και δεύτερον την αγωγή διαμέσου σωληνώσεων. Η μεταφορά ποσοτήτων H<sub>2</sub> παρουσιάζει δυσκολίες όσον αφορά την ασφάλεια και τον περιορισμό των απωλειών λόγω διαρροής.

Η μεταφορά του  $H_2$  διαμέσω σωληνώσεων είναι περιορισμένη μεταξύ εκατοντάδων μέτρων εντός βιομηχανικών εγκαταστάσεων ή περιοχών βιομηχανικών εγκαταστάσεων όπου πραγματοποιείται χρήση  $H_2$ . Πρακτικά οι περιπτώσεις αφορούν περιοχές με συγκροτήματα διύλισης πετρελαίου.

Υποθετικά σενάρια εξετάζονται για την μελλοντική χρήση των ήδη εκεταμένων δικτύων σωληνώσεων διανομής του φυσικού αερίου για μεταφορά  $H_2$  στο πλαίσιο μίας ευρύτερης μελλοντικής προοπτικής όπου το υδρογόνο θα αποτελεί το βασικό καύσιμο του πλανήτη και μίας "πράσινης" παραγωγικής οικονομίας.

Συνοπτικά τα προβλήματα που παρουσιάζονται είναι τα εξής:

1. Οι σωληνώσεις μεταφοράς  $H_2$  αποτελούνται από κράματα χάλυβα συγκεκριμένης σύστασης και αντοχής, ενισχυμένοι από επιπλέον επικαλύψεις ανθεκτικών υλικών στο εσωτερικό τους. Το  $H_2$  παρουσιάζει έντονη τάση προς διείσδυση εντός του μεταλλικού ιστού του σωλήνα και τη δημιουργία ενώσεων που υποβαθμίζουν αισθητά την αντοχή του υλικού καθιστώντας το επισφαλές σε αστοχία. Το συγκεκριμένο φαινόμενο (hydrogen embrittlement) καθιστά απαραίτητο τον συχνό έλεγχο των αγωγών μεταφοράς και την αντικατάσταση φθαρμένων τμημάτων.



**Εικόνα 19:** Επιφάνεια αποσαθρωμένου χάλυβα από την επαφή με  $H_2$ . (National Institute of Standards and Technology, US Department of Commerce).

2. Το  $H_2$  λόγω του ότι είναι μία χημική ένωση μικρού μεγέθους, είναι αντιστοίχως εύκολη η διαρροή ικανών ποσοτήτων του για μεταφορές μεγάλης απόστασης είτε μέσω μεταφορικών οχημάτων είτε διαμέσου σωληνώσεων και αγωγών. Η τάση του  $H_2$  προς διαφυγή είναι σαφώς μεγαλύτερη από αυτή του φυσικού αερίου.

Η έως σήμερα εγκατεστημένη υποδομή αγωγών  $H_2$  είναι όπως στον πίνακα:

**Πίνακας 5:** Συνολικό μήκος αγωγών  $H_2$  σε ΗΠΑ και Ε.Ε.

ΗΠΑ	1450 χλμ. αγωγών χαμηλής πίεσης (<100 bar)
Ευρωπαϊκή Ένωση	1500 χλμ. αγωγών χαμηλής πίεσης (<100 bar)

Τα ζητήματα αποθήκευσης και μεταφοράς συνεπάγονται και επιπλέον ζητήματα ασφάλειας που σχετίζονται με την εύφλεκτη φύση του αερίου και τους πιθανούς κινδύνους που απορρέουν κατά την χρήση σε κλειστούς κυρίως χώρους.

Αθροιστικά τα ζητήματα ασφάλειας κατά την χρήση του  $H_2$  είναι:

- Η άχρωμη άγευστη και άοσμη φύση του (δυσκολία εντοπισμού).
- Εξαιρετικά εύφλεκτο παρουσία οξυγόνου ή άλλων οξειδωτικών.
- Χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης.
- Υψηλή θερμοκρασία φλόγας.
- Άχρωμη φλόγα.
- Εύκολη διαρροή κατά την μεταφορά διαμέσω αγωγών.
- Μεγάλο εύρος μεταξύ κατώτερων και ανώτερων ορίων ανάφλεξης σε ανάμιξη με τον αέρα.
- Κίνδυνος ασφυξίας (όχι όμως τοξικότητας)

Πρακτικά το  $H_2$  προκύπτει ότι δεν είναι λιγότερο ή περισσότερο ασφαλές από κοινά καύσιμα σε αέρια ή υγρή μορφή. Ο ρυθμός διαρροής του  $H_2$  είναι 3,8 φορές περίπου μεγαλύτερος από τον ρυθμό διαρροής του φυσικού αερίου, ωστόσο το χαμηλό βάρος του (σαφώς ελαφρύτερο του αέρα) επιτρέπει την γρήγορη ανύψωσή του. Οι περιπτώσεις του κλειστών χώρων είναι που πρέπει να λαμβάνουν προσοχής καθότι οι ανοιχτοί χώροι επιτρέπουν την ταχεία διασπορά του  $H_2$  και την αποσόβηση κινδύνου ικανής συγκέντρωσης ανάφλεξης/έκρηξης (ο κίνδυνος για ανοιχτούς χώρους είναι πρακτικά μηδενικός). Οι κλειστοί χώροι ενέχουν κινδύνους που αποφεύγονται με την λήψη σειράς μέτρων ασφαλείας τα οποία αναλύονται διεξοδικότερα σε μετέπειτα χωρίο της παρούσης εργασίας.

#### 2.4 ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΩΣ $H_2$

Το  $H_2$  επιχειρείται να αποτελέσει μία καθαρή μορφή αποθήκευσης ενέργειας. Η ενσωμάτωση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας υπό μορφή χημικής ενέργειας  $H_2$  απαιτεί την εγκατάσταση συγκεκριμένου εξοπλισμού. Ο εξοπλισμός απαιτεί σύστημα παραγωγής, αποθήκευσης και κατανάλωσης προκειμένου της κάλυψης ενεργειακών αναγκών του συστήματος όταν αυτό απαιτηθεί.

Η παραγωγή του  $H_2$  ξεκινά από την συσκευή ηλεκτρόλυσης νερού. Η παραγωγή  $H_2$  μέσω διαδικασίας ηλεκτρόλυσης προφανώς είναι απαίτηση ενός συστήματος

μηδενικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, καθώς η παραγωγή από τις προαναφερθείσες βιομηχανικές διεργασίες θα είχε ως αποτέλεσμα την έκλυση CO<sub>2</sub>.

Η αποθήκευση του H<sub>2</sub> προσαρμόζεται στις ανάγκες του εκάστοτε συστήματος ανάλογα με την επιθυμητή ή επιτρεπτή χωρητικότητα, τις ανάγκες τροφοδοσίας και την έκταση του συστήματος, τις τοπικές συνθήκες, την κεφαλαιακή επάρκεια του εγχειρήματος. Σε διαφορετικές περιπτώσεις έχουν εφαρμοστεί όλα τα συστήματα όπως υγροποίηση, συμπίεση ή και χρήση υδριδίων μετάλλου.

Η κατανάλωση των αποθηκευμένων ποσοτήτων H<sub>2</sub> σχετίζεται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η οποία μπορεί να καλύπτει τις προκύπτουσες ενεργειακές ανάγκες του συστήματος. Η κατανάλωση του υδρογόνου πραγματοποιείται εντός των κυψελών καυσίμου, μία ευρύτατα αναπτυσσόμενη τεχνολογία. Η κυψέλη καυσίμου μπορεί να παρέχει την δυνατότητα συμπαραγωγής θερμότητας (σύστημα ανάκτησης) με ταυτόχρονη κάλυψη αναγκών θέρμανσης ή ψύξης.

## 2.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

Η επιλογή ενσωμάτωσης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας υπό μορφή υδρογόνου αποτελεί αντικείμενο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος στην διεθνή έρευνα και ιδιαιτέρως για εφαρμογές ενεργειακά αυτόνομων κατοικιών ή συγκροτημάτων κατοικιών. Το υδρογόνο ουσιαστικά παρέχει την δυνατότητα ενός χημικά καθαρού και ενεργειακά αποτελεσματικού αποθηκευτικού μέσου.

Ως ανταγωνιστική τεχνολογία σε υβριδικά συστήματα ανανεώσιμων πηγών συχνά προβάλλεται η χρήση συσσωρευτές ή μπαταρίες (batteries). Οι μπαταρίες αποτελούνται από συστοιχίες ηλεκτροχημικών κελιών όπου η ελεύθερη ενέργεια των οξειδοαναγωγικών αντιδράσεων συγκεκριμένων αντιδρώντων ουσιών, αντλείται με σκοπό την τροφοδότηση κυκλωμάτων (φορτίων). Η λειτουργία των μπαταριών σταματά άμα τη εξαντλήσει των αντιδρώντων ουσιών και τον σχηματισμό προϊόντων. Η δυνατότητα επαναφόρτισης εξαρτάται από την δυνατότητα αγωγής αντίστροφου ηλεκτρικού ρεύματος (προσφορά ενέργειας) με αποτέλεσμα την λύση των προϊόντων και την επαναφορά των αντιδρώντων στην αρχική τους διάταξη (ηλεκτρόλυση). Η δυνατότητα αυτή αντιστροφής της χημικής αντίδρασης μέσω ηλεκτρόλυσης σε συγκεκριμένα είδη μπαταριών, τις καθιστά ως "επαναφορτιζόμενες".

Οι μπαταρίες χωρίζονται σε κατηγορίες με βάση τις χημικές ουσίες που χρησιμοποιούν ως αντιδρώντα. Ως βασικές κατηγορίες αναφέρονται αυτές των Μολύβδου-Θειϊκού οξέος (lead-acid), Νικελίου-Καδμίου (NiCd), Νικελίου-Ψευδαργύρου (NiZn), Μεταλλικού υδριδίου του Νικελίου (NiMH) και Λιθίου (Li-ion).

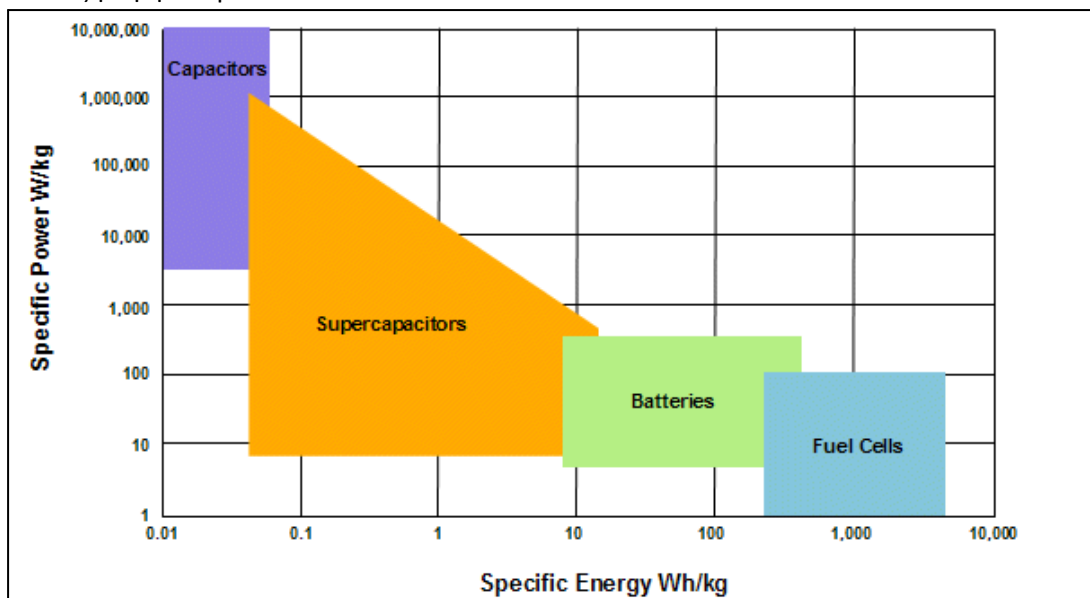
Το βασικό μειονέκτημα των μπαταριών αντιστοιχεί στην περιβαλλοντική μόλυνση του προκαλούν και στο οικολογικό αποτύπωμα που αφήνει η βιομηχανία κατασκευής τους. Τα προβλήματα αυτά σχετίζονται με τις χημικές ουσίες που οι μπαταρίες χρησιμοποιούν, οι οποίες είναι ως επί το πλείστον τοξικά βαρέα μέταλλα. Η απουσία συστημάτων ανακύκλωσης (τα οποία είναι κοστοβόρα) έχει ως αποτέλεσμα την

καταστροφή των διατάξεων των μπαταριών και την διάχυση των ουσιών τους στο περιβάλλον. Το εύρος των βλαβών που προκαλεί η διασπορά των βαρέων μετάλλων σε υδρογεωλογικούς και ατμοσφαιρικούς κύκλους -οι οποίοι έχουν ως τελικό αποδέκτη τον άνθρωπο- δεν είναι αμελητέο και έχει προκαλέσει την υιοθέτηση κατάλληλης νομοθεσίας εκ μέρους κοινοβουλίων, με στόχο την υποχρεωτική ανακύκλωση μπαταριών και την ανάκτηση ή εξουδετέρωση των βλαβερών περιεχομένων ουσιών τους. Επίσης σημαντικό θέμα αποτελεί η ανάγκη εξόρυξης των εν λόγω μεταλλικών στοιχείων από το περιβάλλον, διαδικασία που εγείρει ζητήματα επάρκειας κοιτασμάτων και εξάρτηση από πεπερασμένους πόρους.

Ως συνέπεια των ανωτέρω προκύπτει η δελεαστική προοπτική της χρήσης υδρογόνου ως αποθηκευτικού μέσου ενέργειας μέσω ενός κύκλου λύσης του νερού και παραγωγής υδρογόνου με χρήση "πράσινης" ενέργειας εκ μέρους των ΑΠΕ, και κατόπιν ανάκτησης του νερού και της αποθηκευμένης ενέργειας με οξείδωση του υδρογόνου, έναντι των επισφαλειών που προκύπτουν από την χρήση συσσωρευτών.

Επί πλέον αξιολογείται η εξαιρετικά υψηλή ειδική ενέργεια του  $H_2$  σε σύγκριση με τους συσσωρευτές όπως και άλλα είδη ουσιών στην φύση.

Το ακόλουθο σχήμα αποδίδει την εικόνα διαφόρων κοινών συστημάτων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας με βάση την ειδική ενέργεια(ενεργειακό περιεχόμενο) και την ειδική ισχύ τους (διαθεσιμότητα περιεχόμενης ενέργειας). Προκύπτει η ελαφρά υστέρηση των συστημάτων εκμετάλλευσης του  $H_2$  στις κατάλληλες διατάξεις (κυψέλες καυσίμου ή fuel cells) σε σχέση με τις μπαταρίες ως προς την ισχύ. Ωστόσο η έρευνα προσανατολίζεται προς την εξέλιξη της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου προς επίτευξη υψηλότερων αποδόσεων.



**Εικόνα 20:** Κατανομή τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας ως προς το ενεργειακό περιεχόμενο και την ισχύ. (Πηγή: CAP-XX Ltd)

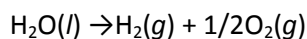


## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΑΓΩΓΗ Η<sub>2</sub> ΑΠΟ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ ΝΕΡΟΥ**

### **3.1 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ**

Η ηλεκτρόλυση νερού αποτελεί μία διαδικασία που απαιτεί την αγωγή ηλεκτρικού ρεύματος διαμέσου της μάζας του νερού. Η αγωγή ρεύματος εξαναγκάζει το νερό σε πόλωση και εν συνεχεία διάσπαση στα συστατικά του O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> τα οποία σε κανονικές συνθήκες είναι αέρια. Η ροή του ρεύματος εξασφαλίζεται από την σύνδεση της διάταξης με κατάλληλη πηγή (π.χ. μπαταρία) όπου το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει από την άνοδο (+) στην κάθοδο (-). Στο ηλεκτρόδιο της καθόδου σχηματίζεται (εμφάνιση φυσαλίδων) το H<sub>2</sub> κατόπιν αναγωγής των κατιόντων του και στο ηλεκτρόδιο της ανόδου σχηματίζονται οι φυσαλίδες του O<sub>2</sub> κατόπιν οξειδωσης των ανιόντων του.

Η χημική αντίδραση συνολικά περιγράφεται από τον τύπο:



Η πρότυπη ενθαλπία της αντίδρασης και για θερμοκρασία 298K, πίεση ίση με 1 atm είναι από την βιβλιογραφία:

$\Delta H = 285,9 \text{ kJ/mol}$  (Με βάση την ανώτερη θερμογόνο δύναμη Higher Heating Value, HHV)

Η ελεύθερη ενέργεια της αντίδρασης κατά Gibbs και για θερμοκρασία 298K προκύπτει επίσης από την βιβλιογραφία:

$$\Delta G = 237,2 \text{ kJ/mol}$$

Συνολικά ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής δίνει:

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

Στο σημείο αυτό ας δοθεί η ερμηνεία του νόμου: Η ολική ενέργεια που απαιτεί η αντίδραση προέρχεται από την ελεύθερη ή "ωφέλιμη" ενέργεια δηλαδή την προσφερόμενη ενέργεια του ηλεκτρικού ρεύματος και από την εισρέουσα θερμότητα από το περιβάλλον (όρος TΔS).

Το θετικό πρόσημο του ΔH υποδηλώνει τον ενδόθερμο χαρακτήρα της αντίδρασης, ενώ το θετικό πρόσημο της ΔG υποδηλώνει τον μη αυθόρμητο χαρακτήρα της αντίδρασης σε θερμοκρασία 298K. Η αντίδραση απαιτεί την εξωτερική προσφορά ενέργειας για να ολοκληρωθεί.

Η ελεύθερη ενέργεια κατά Gibbs στην ηλεκτροχημεία προσδιορίζεται από την εξίσωση:  $\Delta G = V_{\text{cell}} * n * F$  όπου F είναι η σταθερά του Faraday και είναι ίση με 96485 Coulomb/mol και n ο αριθμός των moles ηλεκτρονίων που μεταφέρονται στο άτομο του H κατά την αντίδραση, δηλαδή 2. Επιλύοντας την εξίσωση ως προς τον όρο του δυναμικού του ηλεκτρολυτικού κελιού προκύπτει ότι

$$V_{\text{cell}} = 237,2 \text{ kJ/mol} / 2 * 96485 \text{ Coulomb/mol} = 1,23 \text{ Volt.}$$

Ωστόσο σε τόσο χαμηλό δυναμικό, το οποίο αποτελεί το δυναμικό ανοικτού κυκλώματος, δεν παρατηρείται αντίδραση και για τον λόγο αυτό το σύνολο της απαιτούμενης ενέργειας από το περιβάλλον εισάγεται μέσω ηλεκτρισμού (απουσία θερμότητας από το περιβάλλον).

Προκύπτει λοιπόν :

$$V_{\text{cell}} = 285,9 \text{ kJ/mol} / 2 * 96485 \text{ Coulomb/mol} = 1,48 \text{ Volt.}$$

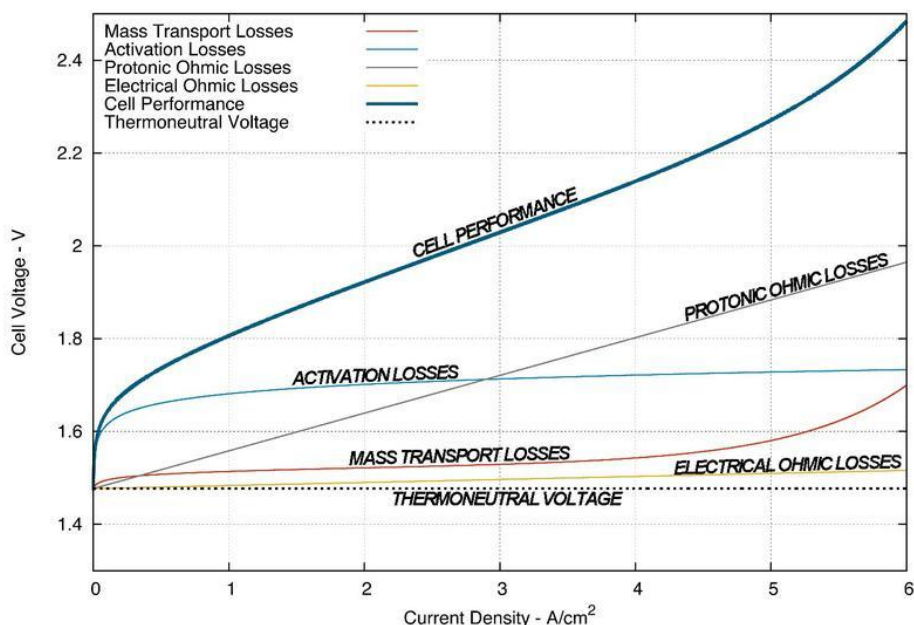
Το οποίο αποτελεί το ελάχιστο δυναμικό που απαιτείται από ένα ηλεκτρολυτικό κελί για την ηλεκτρόλυση 1 mol H<sub>2</sub>O σε κανονικές συνθήκες. Αποκαλείται Thermoneutral Voltage.

Στην πράξη το απαιτούμενο δυναμικό είναι σαφώς μεγαλύτερο διότι προκύπτουν ενεργειακά εμπόδια τα οποία η ηλεκτρολυτική διάταξη οφείλει να υπερβεί. Τα εμπόδια αυτά αναφέρονται ως overpotentials και αφορούν σε φαινόμενα όπως οι ωμικές απώλειες (Ohmic overpotentials), στην ασκούμενη πίεση των σχηματιζόμενων αερίων προϊόντων (Concentration overpotentials), και στην ενέργεια ενεργοποίησης της αντίδρασης (Activation overpotential). Οι ονομασίες στην βιβλιογραφία ποικίλουν.

Τελικά το απαιτούμενο δυναμικό για κάθε ηλεκτρολυτική διάταξη είναι:

$$V = V_{\text{THERMONEUTRAL}} + V_{\text{OVERPOTENTIALS}}$$

Ο συσχετισμός με την πυκνότητα του ρεύματος (Current density) που διαρρέει την διάταξη δίνει την ακόλουθη τυπική εικόνα:



**Εικόνα 21:** Καμπύλη ολικού δυναμικού λειτουργίας - πυκνότητας ρεύματος. (Πηγή: Wikipedia)

Η έρευνα της τεχνολογίας ηλεκτρόλυσης υλικών στοχεύει στην ανεύρεση υλικών κυρίως σε σχέση με την επένδυση της ανόδου και της καθόδου της διάταξης, τα οποία θα μειώσουν αισθητά τις απώλειες των overpotentials, δηλαδή επιτρέποντας στην συσκευή ηλεκτρόλυσης να λειτουργεί σε χαμηλότερο δυναμικό για δεδομένη τιμή πυκνότητας ρεύματος. Η νανοτεχνολογία αναμένεται να συνεισφέρει ουσιαστικά σε αυτό τον σκοπό.

Αξίζει να αναφερθεί ότι οι απώλειες αντίστασης παράγουν θερμότητα η οποία εν μέρει ανακτάται μειώνοντας την ανάγκη για ηλεκτρικό ρεύμα σε υψηλές θερμοκρασίες. Έρευνα πραγματοποιείται επίσης σε αυτή την βάση.

### 3.2 ΔΙΑΘΕΣΙΜΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ

Στο προηγούμενο χωρίο η αντίδραση της ηλεκτρόλυσης του νερού εξετάστηκε αυστηρά από πλευράς θερμοδυναμικής.

Πρέπει να τονιστεί ότι το καθαρό νερό είναι ηλεκτρικά μη αγώγιμο διαθέτοντας χαμηλό βαθμό ιονισμού των μορίων του, συνεπώς η ηλεκτρολυτική αντίδραση είναι ανέφικτη χωρίς την παρουσία μίας χημικής ουσίας που θα καταστήσει αγώγιμη μία ποσότητα νερού. Οι χημικές ουσίες με αυτήν την ιδιότητα ονομάζονται ηλεκτρολύτες (Electrolyte).

Στην περίπτωση της ηλεκτρόλυσης του νερού το είδος των ουσιών αυτών είναι που καθορίζουν την τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί.

Ανάλογα λοιπόν με το είδος του ηλεκτρολύτη, υπάρχουν δύο είδη τεχνολογιών ηλεκτρόλυσης έως τώρα.

- **Συσκευές αλκαλικού τύπου (Alkaline electrolyzers):** Χρησιμοποιούν ηλεκτρολυτικό υγρό διάλυμα ισχυρής βάσης όπως NaOH, KOH σε συγκεντρώσεις έως 30%.
- **Συσκευές μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM electrolyzers):** Χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη μία μεμβράνη συνθετικού υλικού η οποία είναι ηλεκτρικά μη αγώγιμη, εντούτοις όμως διαπερατή σε διέλευση πρωτονίων (H<sup>+</sup>).

Η χημική αντίδραση παρότι θερμοδυναμικά και στοιχειομετρικά είναι ενιαία, καταλύεται από διαφορετικά είδη ηλεκτρολύτη.

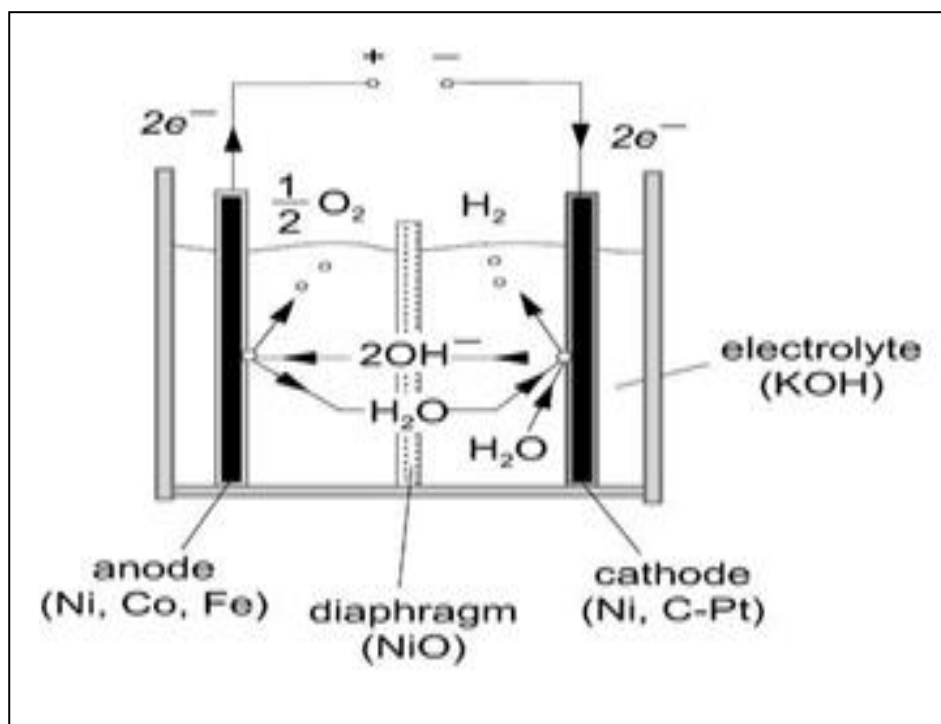
- **Αλκαλική τεχνολογία**  
Η αντίδραση στην συσκευή αλκαλικού τύπου πραγματοποιείται στα ακόλουθα βήματα (ημιαντιδράσεις):

Άνοδος (οξειδωση):  $2 \text{H}_2\text{O}(l) \rightarrow \text{O}_2(g) + 4 \text{H}^+(aq) + 4e^-$

Κάθοδος (αναγωγή):  $2 \text{H}^+(aq) + 2e^- \rightarrow \text{H}_2(g)$

Η αντίδραση ρυθμίζεται από τον ηλεκτρολύτη-ισχυρή βάση.

Οι συσκευές ηλεκτρόλυσης που κάνουν χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας (Alkaline electrolyzers) αντιπροσωπεύουν την πλέον ώριμη διαθέσιμη τεχνολογία, ιδιαίτερα για μεγάλες εγκαταστάσεις. Εσωτερικά της συσκευής τα κελιά διατάσσονται σε συστοιχίες (stacks) όπου κάθε κελί διαθέτει διάφραγμα (συνήθως από NiO) μεταξύ των ηλεκτροδίων ανόδου-καθόδου το οποίο διαχωρίζει τα παραγόμενα αέρια, ενώ αφήνει να διέρχονται ελεύθερα διαμέσω της μάζας του τα υδροξυλιόντα (OH<sup>-</sup>). Η απόδοση ενός Electrolyser αλκαλικού τύπου κυμαίνεται μεταξύ 52%-70%. Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι περίπου 70-100°C, και η πίεση εντός της συστοιχίας έως 30 bar.



**Εικόνα 22:** Τυπική διάταξη ηλεκτρολυτικού κελιού αλκαλικής τεχνολογίας. (Πηγή: Ulleberg, "Modelling of advanced alkaline electrolyser; a system simulation approach" International Journal of Hydrogen Energy 28 (2003) 1, 21-33.)

- **Τεχνολογία PEM (Proton exchange Membrane)**

Η αντίδραση στην συσκευή τύπου PEM Electrolyser πραγματοποιείται στα ακόλουθα βήματα (ημιαντιδράσεις):

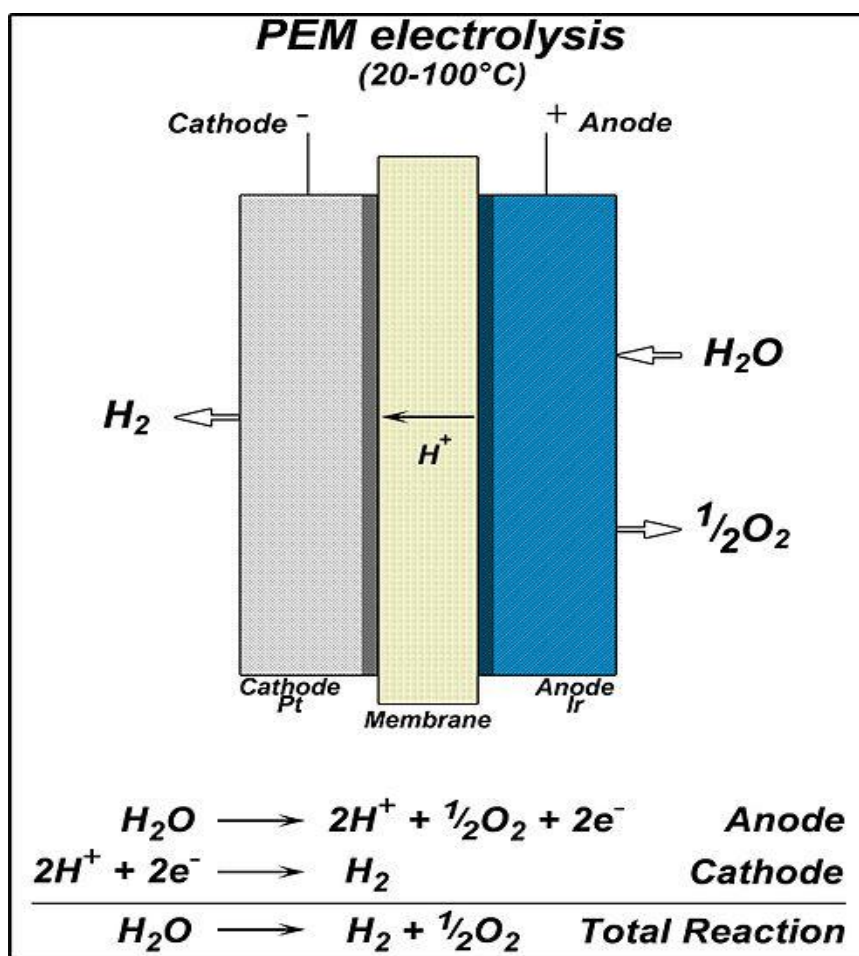
Άνοδος (οξειδωση):  $2 \text{H}_2\text{O}(l) \rightarrow \text{O}_2(g) + 4 \text{H}^+(aq) + 4e^-$

Κάθοδος (αναγωγή):  $2 \text{H}^+(aq) + 2e^- \rightarrow \text{H}_2(g)$

Ουσιαστικά στην περίπτωση αυτή η αντίδραση δεν χρειάζεται την ρύθμιση από αλκαλικό διάλυμα όπως στην προηγούμενη περίπτωση. Το νερό διασπάται στην άνοδο, το παραγόμενο οξυγόνο εξέρχεται από ειδικό πέρασμα και τα πρωτόνια (υδρογονοκατιόντα) διέρχονται της μεμβράνης αναγόμενα σε H<sub>2</sub>(g) στην κάθοδο.

Τα κελιά αυτού του τύπου της τεχνολογίας παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς συντάσσονται σε διπολικές πλάκες (bipolar plates) εντός των οποίων "πακετάρονται" τα MEAs (Membrane electrode assemblies).

Τα MEA είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται κοινότερα και στις κυψέλες καυσίμου αντίστοιχης τεχνολογίας και περιλαμβάνουν την τοποθέτηση της μεμβράνης διέλευσης πρωτονίων εντός των δύο ηλεκτροδίων (καθόδου - ανόδου).



**Εικόνα 23:** Απλοποιητική διάταξη ηλεκτρολυτικού κελιού τεχνολογίας τύπου PEM. (Πηγή: Wikipedia)

Το νερό εισάγεται από ειδικό πόρο από την πλευρά της ανόδου όπου και οξειδώνεται. Το O<sub>2</sub> εξέρχεται από ξεχωριστό πέρασμα της ίδιας πλευράς ενώ το σχηματιζόμενο H<sub>2</sub> εξέρχεται από την πλευρά της καθόδου. Το κελί διαχωρίζεται από τα άλλα κελιά μέσω των διπολικών πλακών. Οι πλάκες αποτελούνται από γραφίτη και επικάλυψη τιτανίου.

Η μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων κατασκευάζεται από συνθετικά υλικά με την συγκεκριμένη ιδιότητα. Το πλέον διαδεδομένο υλικό αυτής της κατηγορίας είναι το **Nafion** το οποίο κατασκευάστηκε από την εταιρεία DuPont.

Η τεχνολογία χρήσης στερεού ηλεκτρολύτη (PEM) έναντι υγρού διαλύματος βάσης για την ηλεκτρόλυση του νερού είναι σχετικά πρόσφατης επινόησης και παρουσιάζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα.

Αυτά συνοψίζονται ακολούθως:

- Καλύτερη προσαρμογή σε μικρής εμβέλειας εγκαταστάσεις ιδιαιτέρως σε εγκαταστάσεις που τροφοδοτούνται από ανανεώσιμες πηγές.
- Αποφυγή διαρροών επικινδύνων ουσιών όπως οι ισχυρές βάσεις.
- Ελαφρώς μεγαλύτερη απόδοση.
- Αποφυγή προβλημάτων διάβρωσης μεταλλικών στοιχείων από την χρόνια χρήση διαλυμάτων ισχυρών βάσεων
- Αξιοπιστία, εξού και η χρήση σε υψηλής ευαισθησίας εγχειρήματα όπως οι διαστημικοί σταθμοί και τα πυρηνικά υποβρύχια.

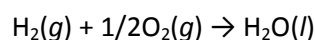
## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

### **4.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

Η παραγωγή ποσοτήτων  $H_2$  συνοδεύεται απαραίτητως από ένα σύστημα αποθήκευσης το οποίο κρίνεται ότι θα είναι καταλληλότερο.

Η διατήρηση ποσοτήτων  $H_2$  εντός συστήματος αποθήκευσης συνοδεύεται από ένα σύστημα εκμετάλλευσης της ενέργειας του  $H_2$  προς παραγωγή κυρίως ηλεκτρισμού.

Το υδρογόνο ως χημική ένωση που παρουσιάζει έντονη τάση αντίδρασης με το οξυγόνο. Η αντίδραση οξειδωσης του υδρογόνου από το οξυγόνο είναι:



Η αντίδραση είναι ακριβώς αντίθετη από την αντίδραση ηλεκτρόλυσης του νερού. Ομοίως λοιπόν η βιβλιογραφία δίνει την ενέργεια αντίδρασης (ενθαλπία αντίδρασης) ίση με την ενέργεια της ηλεκτρόλυσης κατά μέτρο αντίθετη όμως ως προς το πρόσημο:

$\Delta H = - 285,9 \text{ kJ/mol}$  (με βάση την ανώτερη θερμογόνο δύναμη HHV)

Η εκμετάλλευση της ενέργειας της αντίδρασης οξειδωσης του υδρογόνου από το οξυγόνο είναι εφικτή με την προσφορά μικρού μόνο ποσού ενέργειας (ενέργειας ενεργοποίησης) και σε φυσιολογικές συνθήκες οδηγεί σε άμεση ανάφλεξη, δηλαδή καύση. Η αντίδραση είναι έντονη και εξώθερμη κάτι που υποδηλώνεται και από το αρνητικό πρόσημο.

Ήδη από τα μέσα του 19ου αιώνα όμως παρατηρήθηκε η αντίδραση των δύο συστατικών εντός διάταξης ηλεκτροχημικού ή γαλβανικού κελιού. Με απλά λόγια παρατηρήθηκε ότι δεξαμενές που περιείχαν εκάστη το κάθε χημικό στοιχείο και συνδέονταν με μεμβράνη ηλεκτρικά μη αγωγίμη, η οποία όμως επέτρεπε την διέλευση ιόντων, καθώς και εξωτερικά με έναν αγωγό ηλεκτρικού ρεύματος, ο οποίος μετέφερε ηλεκτρόνια από την άνοδο προς την κάθοδο τότε ήταν εφικτή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η δυνατότητα αυτή εκμετάλλευσης των  $H_2$  και  $O_2$  ως αντιδρώντα ηλεκτροχημικού κελιού απετέλεσε την βάση για την δημιουργία συγχρόνων και τεχνολογικά προηγμένων τέτοιων συσκευών, οι οποίες ονομάζονται "κυψέλες καυσίμου" (Fuel Cells).

### **4.2 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ**

Η θερμοδυναμική προσέγγιση αναφέρεται στην αντίδραση σχηματισμού ενός mole  $H_2O$  σε κανονικές συνθήκες.

Η αντίδραση είναι:  $H_2(g) + 1/2O_2(g) \rightarrow H_2O(l)$

Όπου  $\Delta H = - 285,9 \text{ kJ/mol}$  και  $\Delta G = -237,2 \text{ kJ/mol}$

Παρατηρείται το αρνητικό πρόσημο της ελεύθερης ενέργειας, που υποδηλώνει τον αυθόρμητο χαρακτήρα της αντίδρασης.

Συνολικά ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής δίνει:

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

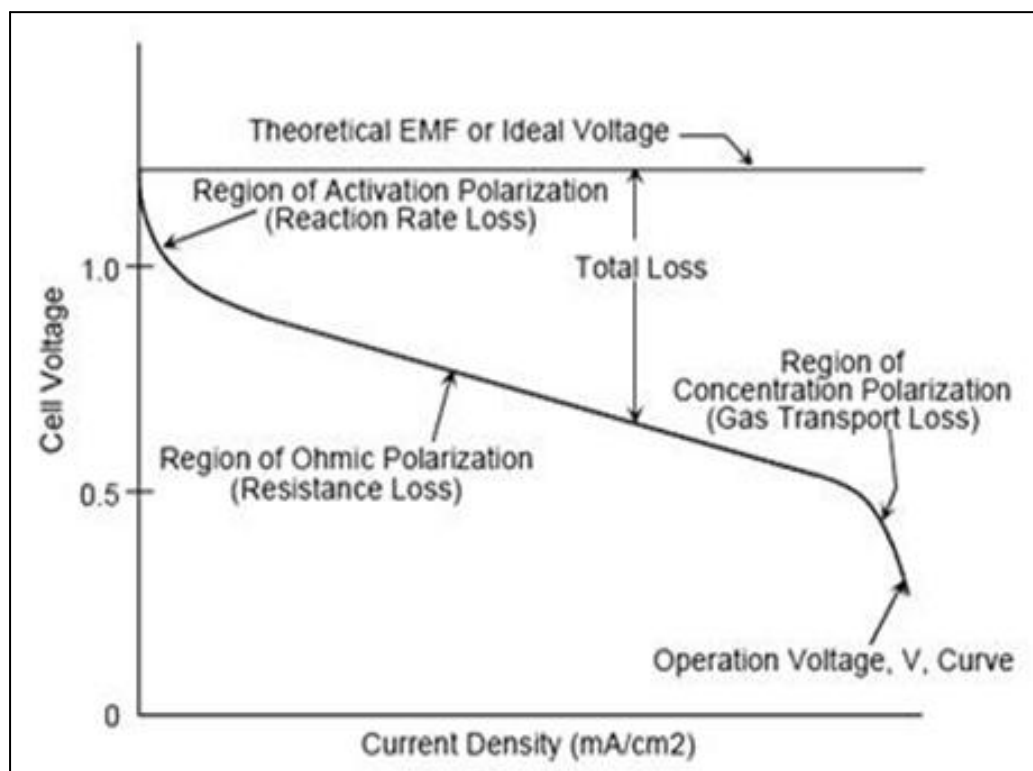
Στο σημείο αυτό ας δοθεί η ερμηνεία του νόμου: Η ολική ενέργεια που δύναται να παράξει η αντίδραση κατανέμεται σε ελεύθερη ή "ωφέλιμη" ενέργεια δηλαδή στην ενέργεια του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος και σε θερμότητα που ρέει προς το περιβάλλον (όρος  $T\Delta S$ ).

Αντικαθιστώντας τις δεδομένες τιμές προκύπτει ο βαθμός απόδοσης της αντίδρασης:

$$n = \Delta G/\Delta H = -237,2/-285,9 = 0,83 \text{ ή βαθμός απόδοσης } 83\%.$$

Ουσιαστικά το ευρεθέν ποσοστό αντιστοιχεί στον μέγιστο βαθμό μετατροπής της χημικής ενέργειας της αντίδρασης σε ηλεκτρική ενέργεια.

Ακολουθώντας την λογική υπολογισμού στο χωρίο της ηλεκτρόλυσης προκύπτει ότι το μέγιστο δυναμικό που μπορεί να αναπτύξει ένα τέτοια κελί αντιστοιχεί σε 1,23 Volt περίπου. Ωστόσο η τιμή αυτή δεν είναι εφικτή λόγω διαφορετικών ειδών αντιστάσεων (overpotentials) μειώνουν κατά πολύ το διαθέσιμο δυναμικό του κελιού, δηλαδή την ικανότητα προσφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.



**Εικόνα 24:** Καμπύλη ολικού δυναμικού λειτουργίας - πυκνότητας ρεύματος. (Πηγή:altenergymag.com)



Οι παράγοντες που εμπλέκονται στην είναι περίπου του ίδιου τύπου με αυτούς που επεξηγήθηκαν στο κομμάτι της ηλεκτρόλυσης και φαίνονται ευκρινώς στο διάγραμμα δυναμικού κελιού - πυκνότητας ρεύματος της εικόνας 24.

Η προσπάθεια της επιστήμης εστιάζεται στον περιορισμό των απωλειών μέσω της μελέτης των ιδιοτήτων των υλικών όσο και των φαινομένων που σχετίζονται με την μεταφορά μάζας (transport losses).

Τελικά οι ηλεκτρικές αποδόσεις που επιτυγχάνουν οι διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου κυμαίνονται κατά μεγάλη πλειοψηφία μεταξύ 40%-60%.

Αξιόλογο στοιχείο αποτελεί η δυνατότητα αξιοποίησης της εκλυόμενης θερμότητας σε σύστημα ανάκτησης όπου μπορεί να καλύψει ανάγκες θέρμανσης. Τέτοιου είδους συστήματα ονομάζονται συνδυασμένης παραγωγής (CHP-Combined Power Heat)

### 4.3 ΔΙΑΘΕΣΙΜΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Οι διαφορετικοί τύποι κυψελών που έχουν αναπτυχθεί ουσιαστικά διακρίνονται με την μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων που διαθέτουν, ή απλούστερα τον ηλεκτρολύτη.

Ο ηλεκτρολύτης σε όλες τις περιπτώσεις είναι στερεός και επιτρέπει την διέλευση συγκεκριμένων μόνο ειδών ιόντων. Απαραίτητη είναι η παρουσία κάποιου είδους μετάλλου (συνήθως Pt) ως καταλύτη της αντίδρασης.

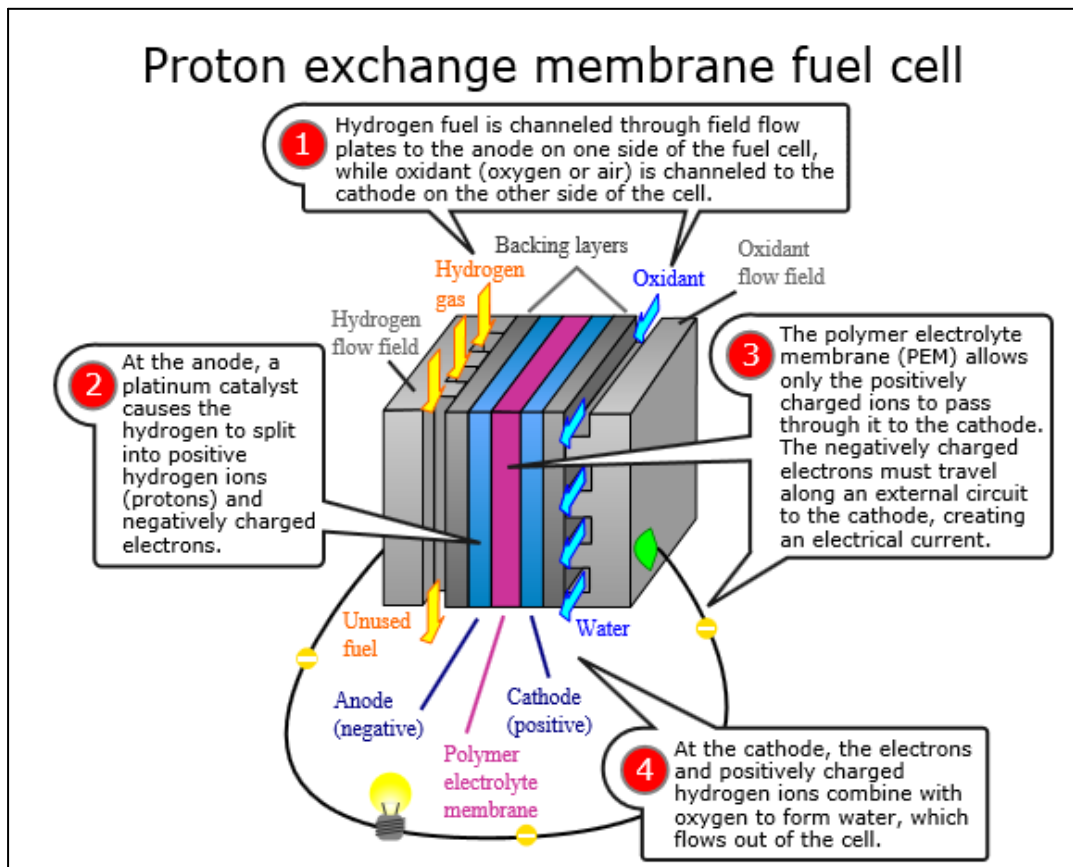
Έως την παρούσα στιγμή έχουν αναπτυχθεί διαφορετικά είδη κυψελών καυσίμου για διαφορετικές εφαρμογές πειραματικού ή μη ενδιαφέροντος, των οποίων η απαρίθμηση θα περιοριστεί στα βασικά μόνο είδη.

Γενικά τα βασικά είδη κυψελών καυσίμων που ήδη βρίσκουν εφαρμογή και των οποίων ο αριθμός αναμένεται να πολλαπλασιαστεί στο μέλλον, αποτελούν οι κυψέλες τύπου PEM (Proton Exchange Membrane) που χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη την πολυμερική μεμβράνη, οι κυψέλες που χρησιμοποιούν ηλεκτρολύτη φωσφορικό οξύ PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) οι κυψέλες στερεών οξειδίων SOFC (Solid Oxide Fuel Cells) οι κυψέλες αλκαλικού τύπου AFC (Alkaline Fuel Cells), οι κυψέλες MCFC (Molten carbonate fuel cells) και οι κυψέλες μεθανόλης (Direct Methanol Fuel Cell DMFC).

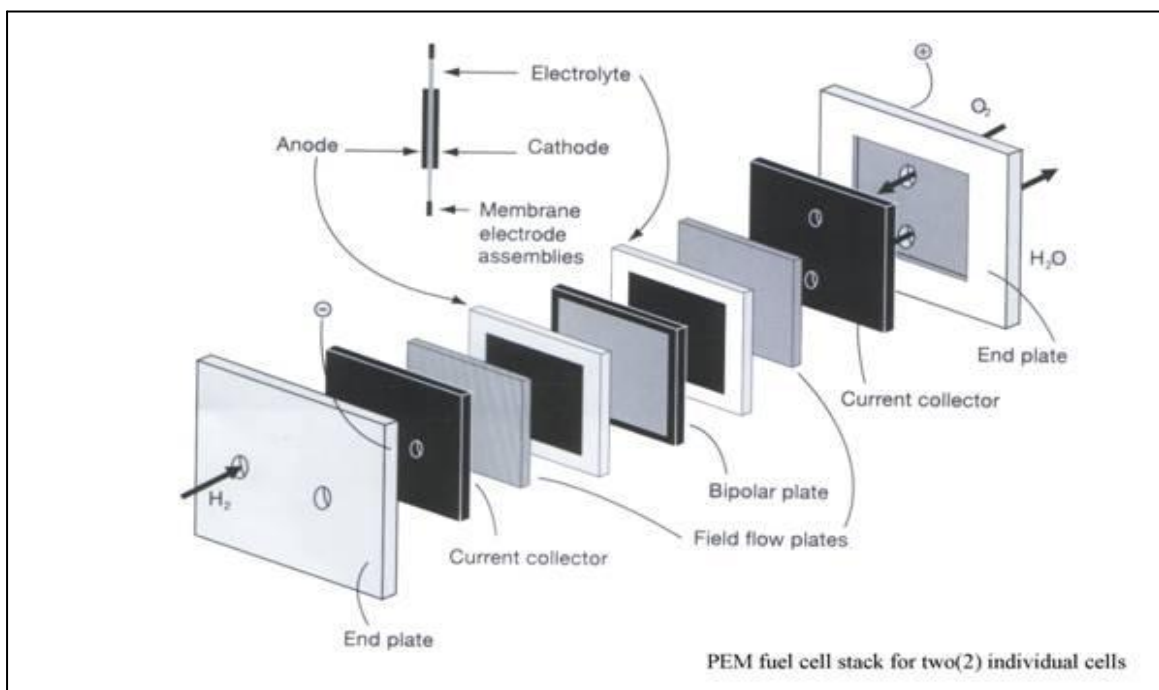
Αναλυτικότερα:

- **PEM Fuel cells:** Συγκροτούνται από συστοιχίες (stacks) κελιών διπολικών πλακών που περιέχουν εντός τους ως συμπτυγμένες μονάδες πολυμερικής μεμβράνης (κατά κανόνα από Nafion) και τα ηλεκτρόδια ανόδου καθόδου (MEA). Χρησιμοποιούν ως καταλύτη λευκόχρυσο (Pt) που αυξάνει το κόστος κατασκευής. Λειτουργούν εντός θερμοκρασιακού εύρους 50-100°C. Η ζήτησή τους παρουσιάζει αύξηση και ενίοτε κρίνονται προτιμητέες σε σχέση με τις παλαιότερου τύπου αλκαλικής τεχνολογίας. Απαιτούν τροφοδοσία H<sub>2</sub> υψηλής καθαρότητας >99,99% διότι ο καταλύτης λευκόχρυσου δηλητηριάζεται από την χρόνια έκθεση σε CO. Ως εκ τούτου κρίνεται προτιμητέα η τροφοδοσία με H<sub>2</sub> προερχόμενο από ηλεκτρόλυση νερού, παρά από αναμόρφωση ατμών (Steam

reform). Θεωρούνται ως εξαιρετικά ευέλικτοι καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο σε στατικές όσο και σε κινητές εφαρμογές (π.χ. ηλεκτρικό αυτοκίνητο). Το συγκεκριμένο είδος κυψέλης ενδιαφέρει ιδιαίτερα την παρούσα εργασία.



Εικόνα 25: Παραστατική εικόνα κελιού PEMFC. (Πηγή: Wikipedia)



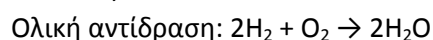
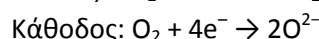
Εικόνα 26: Εικόνα συστοιχίας κελιών(stack) κυψέλης καυσίμου PEM.

- PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell):** Ο συγκεκριμένος τύπος χρησιμοποιεί ως ηλεκτρολύτη στερεό μίγμα φωσφορικού οξέος ( $H_3PO_4$ ) και μήτρας καρβιδίου του πυριτίου (SiC). Ο τύπος της αντίδρασης είναι ίδιος με αυτόν της κυψέλης πολυμερικής μεμβράνης. Αναγκαία είναι η παρουσία καταλύτη πλατίνας σε όλη την επιφάνεια των ηλεκτροδίων.

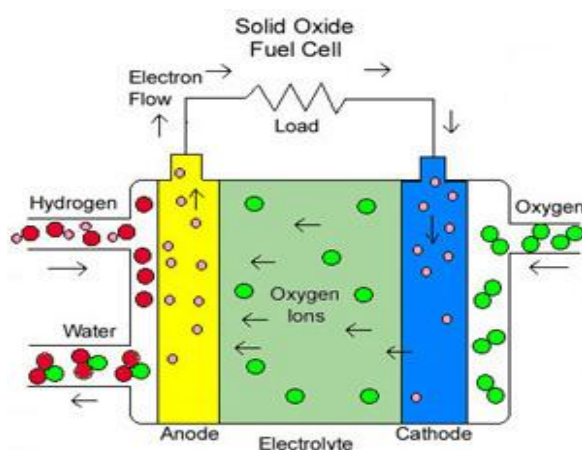
Η τυπική θερμοκρασία λειτουργίας είναι 150-210°C. Κρίνονται κατάλληλες για στατικές εφαρμογές όπως π.χ. συστήματα εξασφάλισης συνεχούς λειτουργίας (UPS) καθώς συμπαρατάσσονται αποκτώντας δυνατότητα παροχής ισχύος έως και 400kW. Ακόμη είναι ανθεκτικότερες στην δηλητηρίαση από CO και CO<sub>2</sub>. Προβλήματα παρουσιάζει η υψηλή οξυγόνωση του ηλεκτρολύτη.

- Solid Oxide Fuel Cells (SOFC):** Αποτελούν νέου είδους τεχνολογία όπου χρησιμοποιείται ως ηλεκτρολύτης κεραμικό υλικό και κατά κύριο λόγο οξειδία του ασβεστίου και του ζirkονίου. Κατασκευαστικά λόγω του ότι αποτελούνται από καθαρά στερεά υλικά, τα κελιά τους δεν απαιτούν διάταξη σε επίπεδα όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις αλλά μπορούν να αποκτήσουν και κυλινδρική μορφή.

Η αντίδραση διαφέρει αρκετά σε σχέση με τις κυψέλες πολυμερικής μεμβράνης καθώς ο ηλεκτρολύτης είναι διαπερατός σε ανιόντα οξυγόνου και όχι σε υδρογονοκατιόντα. Η αντίδραση έχει ως εξής:

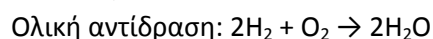
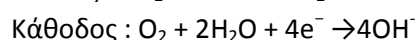


Η θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι ιδιαίτερα υψηλή (800-1000°C) η απόδοσή τους είναι υψηλή (60%), είναι σταθεροί στην χρόνια χρήση και το κόστος τους είναι χαμηλό καθώς δεν υπάρχει η ανάγκη χρήση πλατίνας ως καταλύτη (αντιθέτως χρησιμοποιείται Νικέλιο). Μπορούν να καταναλώσουν απευθείας φυσικό αέριο χωρίς να απαιτείται προστάδιο αναμόρφωσης λόγω της θερμοκρασίας. Επίσης η εκλυόμενη θερμότητα μπορεί να ανακυκλωθεί για να διατηρήσει την θερμοκρασία λειτουργίας υψηλή. Μειονεκτούν σε ζητήματα ελαστικότητας καθώς χρειάζονται μεγαλύτερα διαστήματα λειτουργίας μέχρι να θερμανθούν σε σχέση με άλλα είδη κυψελών. Επίσης είναι ακατάλληλες για κινητές εφαρμογές π.χ. αυτοκίνηση.



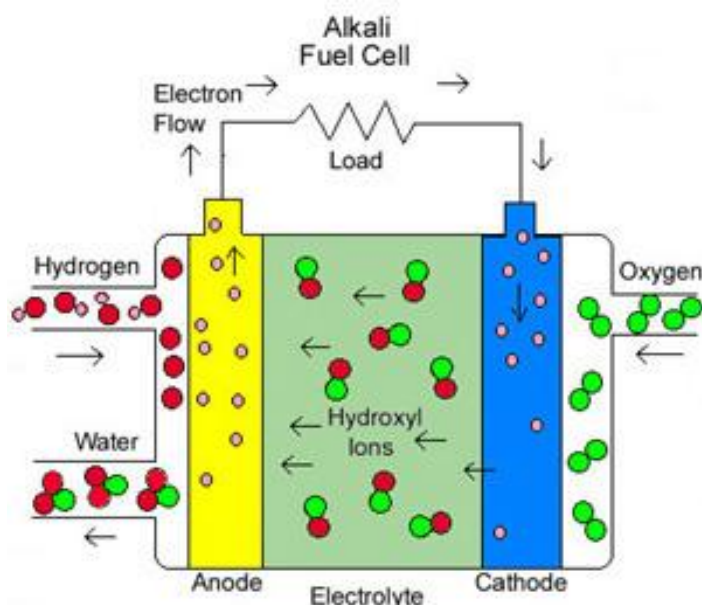
Εικόνα 27: Απλοποιητική εικόνα κελίου SOFC. (Πηγή: Smithsonian Institution)

- Alkanline Fuel Cells:** Αποτελούν ίσως την παλιότερης τεχνολογίας κυψέλες καυσίμου. Η NASA έχει χρησιμοποιήσει τις αλκαλικές κυψέλες καυσίμου από την δεκαετία του 1960 στις αποστολές Apollo. Χαρακτηρίζονται από την υψηλή τους ηλεκτρική απόδοση, έως 70%. Ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται υγρό διάλυμα ισχυρής βάσης, εντός πορώδους μήτρας. Η αντίδραση ρυθμίζεται από την ισχυρή βάση.



Η θερμοκρασία λειτουργίας ανέρχεται σε 150-200°C ενώ η ισχύς που παράγουν κυμαίνεται από 5 kW για απλές εφαρμογές, σε μεγάλη κλίμακα έως και 100 kW. Το κόστος κατασκευής τους το πλέον χαμηλό σε σχέση με όλα τα είδη καθότι αφενός δεν απαιτείται λευκόχρυσος ως καταλύτης, αφετέρου έχουν απλό σχεδιασμό. Μειονεκτούν στο ότι δηλητηριάζεται γρήγορα ο ηλεκτρολύτης από το CO<sub>2</sub> σχηματίζοντας ενώσεις που μειώνουν αποδοτικότητα της κυψέλης (π.χ. προκύπτει K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> όταν η ισχυρή βάση είναι το KOH). Για τον λόγο αυτό επιβάλλεται η εισαγωγή καθαρού οξυγόνου στην κάθοδο ή έστω ατμοσφαιρικού αέρα αυξημένης καθαρότητας.

Υπάρχουν πιο πρόσφατες ανακαλύψεις που αναμένεται να περιορίσουν το πρόβλημα της δηλητηρίασης όπως η επινόηση της μεμβράνης ανταλλαγής ανιόντων (alkali anion exchange membrane).

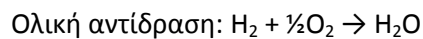
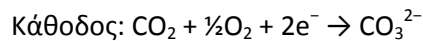
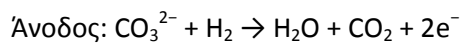


**Εικόνα 28:** Απλοποιητική εικόνα κελιού AFC. (Πηγή: Smithsonian Institution)

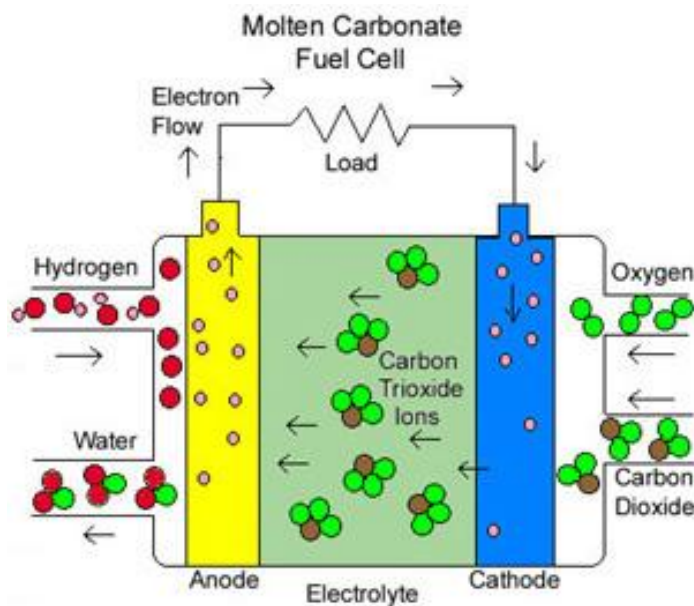
- Molten carbonate fuel cells:** Αποτελούν ιδιαίτερη κατηγορία κυψελών καυσίμου όπου χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη ανθρακικά άλατα μετάλλων όπως καλίου ή λιθίου τα οποία θερμαίνονται σε θερμοκρασίες εντός του εύρους των 650-1200°C όπου τήκονται και καθίστανται αγωγοί των ανθρακικών ιόντων. Δεν απαιτούν καταλύτες υψηλής αξίας όπως ο λευκόχρυσος, γεγονός που λειτουργεί ευνοϊκά στην διαμόρφωση του κόστους. Όπως και οι κυψέλες στερεών οξειδίων, λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας διαθέτουν την δυνατότητα να αναμορφώνουν φυσικό αέριο ή βιοαέριο σε υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα, αφαιρώντας την ανάγκη για εξωτερικό σύστημα αναμόρφωσης.

Η τροφοδοσία τους στην κάθοδο απαιτεί O<sub>2</sub> και CO<sub>2</sub>.

Η αντίδραση αναλυτικά έχει ως εξής:

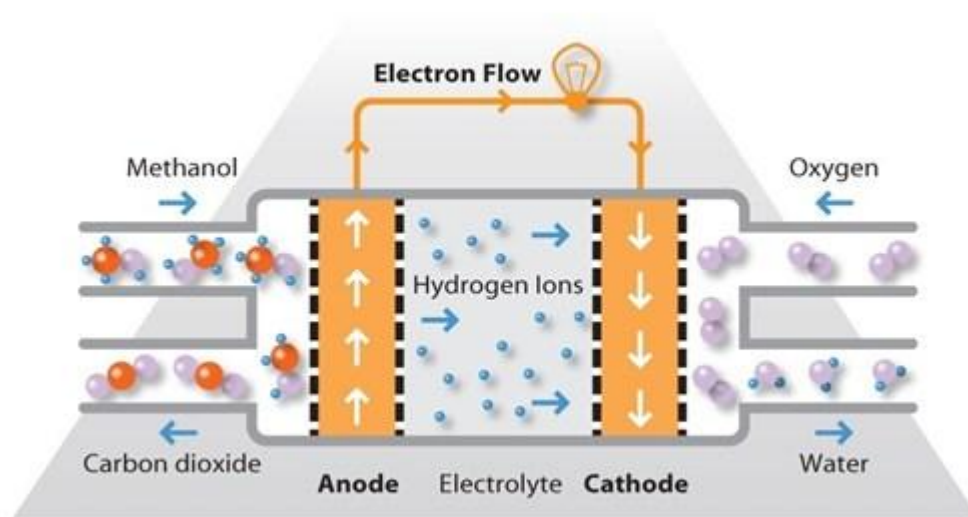


Η συγκεκριμένη τεχνολογία κυψελών καυσίμου παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα της υψηλής απόδοσης και δυναμικότητας όπως και της αντοχής σε δηλητηρίαση από μονοξείδιο του άνθρακα. Ως μειονέκτημα διαθέτουν τον περιορισμό σε στατικές εφαρμογές.



**Εικόνα 29:** Απλοποιητική εικόνα κελιού MCFC. (Πηγή: Smithsonian Institution)

- **Direct methanol fuel cells (DMFC):** Αποτελούν νεοσύστατη τεχνολογία κυψελών καυσίμου και προσομοιάζουν με τις κυψέλες πολυμερικής μεμβράνης. Λειτουργούν σε ανάλογες θερμοκρασίες (50-100°C) και διαθέτουν το πλεονέκτημα της άμεσης απόσπασης του μορίου του  $H_2$  από την χημική ένωση της μεθανόλης εντός των κελιών, αναιρώντας την ανάγκη εξωτερικού μετατροπέα. Παρουσιάζουν υψηλές αποδόσεις.



Εικόνα 30: Απλοποιητική εικόνα κελιού DMFC.(Πηγή:Fuelcelltoday.com)

#### 4.4 ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Οι κυψέλες καυσίμου διαθέτουν ακόμη μικρή διείσδυση στην αγορά ωστόσο παρουσιάζουν προοπτικές για το μέλλον.

Εν συνόψει τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν:

- Δυνατότητα κατανάλωσης  $H_2$ . Η ιδιότητα αυτή καθιστά την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου ιδανική για μία μελλοντική οικονομία "πράσινου" καυσίμου. Η αντίδραση με το οξυγόνο αποδίδει ως μοναδικό αντιδρόν το νερό. Επίσης ακόμη και σε περίπτωση χρήσης υδρογονανθράκων ως καύσιμη ύλη, παρουσιάζουν σαφώς υψηλότερο συντελεστή απόδοσης σε σχέση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης για το μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας.
- Η ελαφρά κατασκευή και η απουσία κινούμενων τμημάτων. Επίσης προσαρμόζονται σε μεγάλη ποικιλία εφαρμογών.
- Η δυνατότητα συμπαραγωγής δηλαδή εκμετάλλευσης της θερμότητας προς αύξηση της ολικής απόδοσης του συστήματος. Αυτό είναι εφικτό τόσο σε επίπεδο μεγάλης κλίμακας όσο και σε μικρότερη κλίμακα.

Ως μειονεκτήματα καταλογίζονται το υψηλό κόστος κατασκευής και η πολυπλοκότητα του μηχανισμού που συνήθως απαιτεί χειρισμό εξειδικευμένου προσωπικού.

Οι κυψέλες καυσίμου παρουσιάζουν δυνατότητα χρήσης σε εφαρμογές οι οποίες διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις στατικές εφαρμογές (Stationary applications) και τις κινητές εφαρμογές (Portable applications).

**Στατικές εφαρμογές:** Οι εφαρμογές αυτές αφορούν στην παροχή ενέργειας από κυψέλες καυσίμου σε κτιριακές εγκαταστάσεις και υποδομές.

- Παροχή ενέργειας σε σταθμούς εκπομπής σήματος κινητής τηλεφωνίας.
- Παροχή ενέργειας ως συστήματα έκτακτης ανάγκης (Emergency power stations) σε υποδομές όπως δημόσια κτίρια, νοσοκομεία ή ερευνητικά κέντρα, προκειμένου να μην υπάρξουν διακοπές στην λειτουργία τους.
- Στήριξη συστημάτων αδιάλειπτης παροχής ενέργειας UPS (Uninterruptible power supply).
- Την στήριξη συστημάτων αποκεντρωμένης ενέργειας (Decentralised power systems), δηλαδή συστημάτων που δεν συνδέονται με κεντρικό συμβατικό δίκτυο, αλλά εξασφαλίζουν αυτόνομα την ενεργειακή τους επάρκεια βασιζόμενα κυρίως σε ΑΠΕ.

**Κινητές εφαρμογές:** Οι εφαρμογές αυτές αφορούν κυρίως στην αντικατάσταση συμβατικών κινητήρων εσωτερικής καύσης για διάφορα είδη μεταφορικών μέσων από κυψέλες καυσίμου.

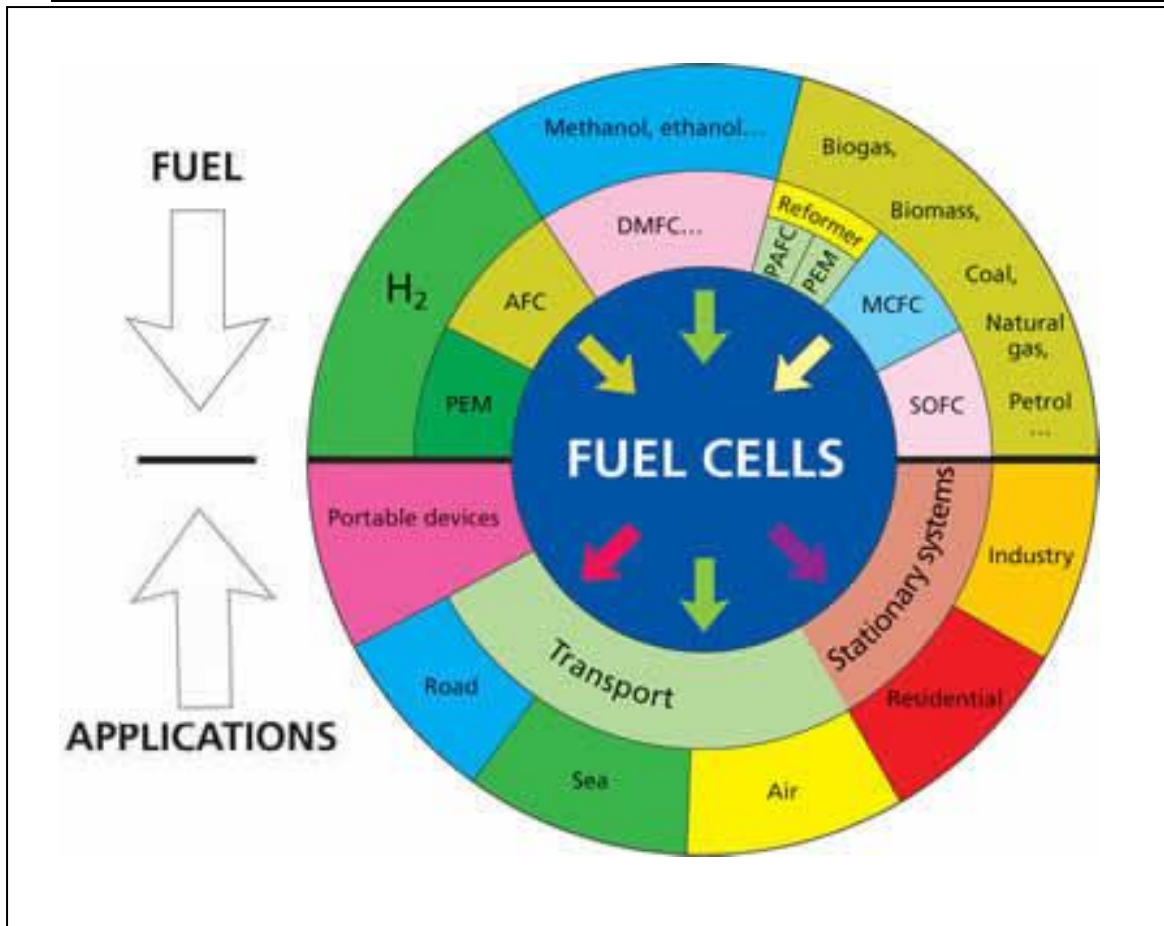
Οι κυψέλες καυσίμου καταρχάς διαθέτουν ευρεία εφαρμογή σε πολεμικά υποβρύχια και κυρίως σε διαστημικούς σταθμούς.

Επίσης επιχειρείται η ενσωμάτωση σε μεταφορικά μέσα όπως Ι.Χ., λεωφορεία ή ακόμη και πλοία. Ήδη πολλές εταιρείες έχουν κατασκευάσει αυτοκίνητα επίδειξης (μη εμπορικά διαθέσιμα), τα οποία συνδυάζουν σύστημα κυψέλης καυσίμου και ηλεκτροκινητήρα όπου η ηλεκτρική ενέργεια της κυψέλης μετεατρέπεται σε ροπή και κίνηση στους τροχούς μέσω του ηλεκτροκινητήρα. Τα οχήματα που χρησιμοποιούν τεχνολογία κυψελών καυσίμου ονομάζονται Fuel cell vehicles (FCVs). Επίσης η τεχνολογία αυτή μπορεί να συνδυαστεί με μηχανές εσωτερικής καύσης ή μπαταρίες σε οχήματα που καλύπτονται από την γενική ονομασία "Υβριδικά" (Hybrid Vehicles).

Επιπλέον υπάρχουν ήδη εφαρμογές μικροκλίμακας όπως ενσωμάτωση σε κυκλώματα υπολογιστών ή κινητών τηλεφώνων ως εναλλακτικές μη ρυπογόνες μπαταρίες.

Εν κατακλείδι οι συσκευές κυψελών καυσίμου αποτελούν αντικείμενο έρευνας πρώτης γραμμής παγκοσμίως. Οι δυνατότητες εφαρμογών είναι ακόμη δύσκολο να προσδιοριστούν κατά γενική ομολογία, ωστόσο το δέλεαρ των προοπτικών και των ενδεχόμενων πλεονεκτημάτων ωθούν προς την κατεύθυνση επέκτασης των χρήσεών τους.





**Εικόνα 31:** Συνοπτικό σχήμα ειδών και χρήσεων κυψελών καυσίμου. (Πηγή: National Science Foundation)



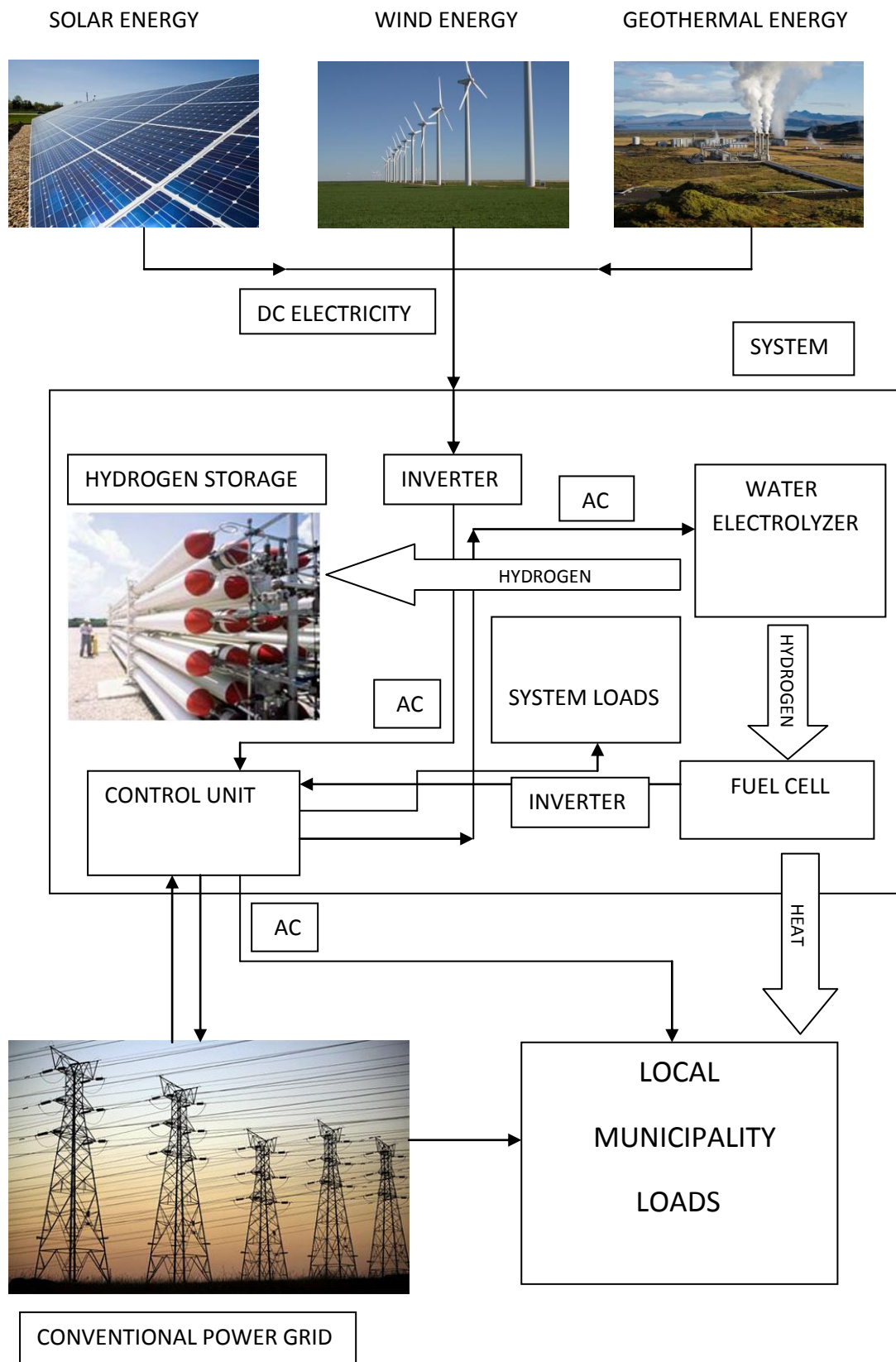
## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Τελικά ένα σύστημα υβριδικό σύστημα ΑΠΕ - αποθήκευσης υδρογόνου συνδυάζει την άμεση παραγωγή ενέργειας μέσω των ανανεώσιμων πηγών, την αποθήκευση του ενεργειακού πλεονάσματος σε χημική ενέργεια H<sub>2</sub> και την αξιοποίηση της αποθηκευμένης ενέργειας του H<sub>2</sub> σε κυψέλη καυσίμου.

Τα υβριδικά συστήματα τα οποία συμπεριλαμβάνουν το σύστημα παραγωγής αποθήκευσης και κατανάλωσης υδρογόνου απαιτούν επίσης κατάλληλο σύστημα ηλεκτρονικής διαχείρισης προκειμένου να υπάρξει κατά το δυνατόν βέλτιστη χρήση της ενέργειας. Συνήθως η σύνδεση με συμβατικό δίκτυο είναι απαραίτητη για την αποφυγή διακοπής παροχής ενέργειας σε πληθυσμό που τροφοδοτείται από τέτοια συστήματα. Σε κάθε περίπτωση τα συστήματα που αναλύονται βρίσκονται ακόμη σε πειραματικό στάδιο και ο βασικότερος στόχος της έρευνας είναι η αξιολόγηση της ικανότητας εξασφάλισης ενεργειακής αυτονομίας.

Τα συστήματα αυτού του τύπου απαιτούν επίσης οργανωμένο και διευθετημένο ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό συστήματα ασφάλειας έναντι αστοχιών ή διαρροής H<sub>2</sub>. Απαιτούν πολύπλοκες συνδέσεις και φυσικά την ύπαρξη αντιστροφών (inverters) οι οποίοι μετατρέπουν την συνεχή μορφή ρεύματος (DC) που λαμβάνουν από τις ΑΠΕ σε εναλλάσσόμενη μορφή (AC) που αποτελεί την κοινή μορφή ρεύματος που χρησιμοποιούν όλες οι τροφοδοτούμενες από ηλεκτρισμό συσκευές.

Σε πολύ γενική μορφή ένα σύστημα ΑΠΕ- H<sub>2</sub> παρουσιάζεται ως ακολούθως:



Η γκάμα των εφαρμογών που αποκτούν τα υβριδικά συστήματα με αποθήκευση  $H_2$  ποικίλει αναλόγως με τις κατά τόπους διαθέσιμες πηγές και τους σκοπούς που θέτει το κάθε πρόγραμμα. Κεντρικό στοιχείο κάθε μελέτης ωστόσο είναι η εξέταση της δυνατότητας ενεργειακής αυτονομίας με το πλεονέκτημα της ανάδειξης του  $H_2$  ως επαρκούς και μηδενικών εκπομπών αποθηκευτικού μέσου.

Πρέπει να τονιστεί ότι η λειτουργία τέτοιου είδους εγκαταστάσεων σχετίζεται ευρύτερα με την μελέτη της ανάπτυξης συστημάτων τα οποία δεν εξαρτώνται από τα συμβατικά δίκτυα ηλεκτροδότησης, αλλά μπορούν να δράσουν αυτόνομα. Υπάρχουν απόψεις που θέτουν υπό αμφισβήτηση την μελλοντική αξιοπιστία των συμβατικών δικτύων και υποστηρίζουν τις προσπάθειες ανάπτυξης αποκεντρωμένης ενεργειακής παραγωγής.

Η ιδέα αυτή της αποκεντρωμένης ενέργειας έλκει το ενδιαφέρον από το εξαιρετικά υψηλό κόστος που παρουσιάζει η σύνδεση μίας απομακρυσμένης περιοχής - η οποία διαθέτει περιορισμένες ενεργειακές ανάγκες - με συμβατικό δίκτυο.

### 5.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Αξίζει να γίνει αναφορά περιπτώσεων δοκιμαστικών έργων που υλοποιήθηκαν ανά διάφορα μέρη του πλανήτη και με χρήση διαφορετικών ειδών ανανεώσιμων πηγών.

- **Utsira (Norway)**

Η νήσος Utsira της Νορβηγίας αποτελεί ένα πρωτοποριακό εγχείρημα εγκατάστασης ανανεώσιμων πηγών σε συνδυασμό με σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με ηλεκτρόλυση νερού. Η νήσος διαθέτει πληθυσμό 212 κατοίκων (2008) και συνδέεται με το συμβατικό δίκτυο της Νορβηγίας μέσω υποθαλάσσιων καλωδιώσεων. Τοποθετήθηκαν 2 ανεμογεννήτριες των 600kW, ηλεκτρογεννήτρια με μηχανή εσωτερικής καύσης υδρογόνου ισχύος 55kW, κυψέλη καυσίμου 10kW, μονάδα ηλεκτρόλυσης ισχύος 48kW και δυναμικότητας 10 Nm<sup>3</sup>/h, συμπιεστής ισχύος 5,5kW, σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου 2400 Nm<sup>3</sup> και πίεσης έως 200bar και σφόνδυλος (flywheel) με αποθηκευμένη ενέργεια 5 kWh. Η εγκατάσταση πραγματοποιήθηκε από την εταιρεία NorskHydro και καλύπτει τις ανάγκες 10 οικιών.

- **RES2H2 Project**

Το πρόγραμμα RES2H2 υλοποιήθηκε κατά το διάστημα 2002-2009 και περιελάμβανε μία εγκατάσταση στην Κερατέα Αττικής (Ελλάδα) και μία στις Κανάριες νήσους (Ισπανία).

Η εγκατάσταση στο Λαύριο αντλούσε ενέργεια από μία ανεμογεννήτρια 500kW, ενώ ο εξοπλισμός συμπεριελάμβανε αλκαλική μονάδα ηλεκτρόλυσης ισχύος 25 kW και δυναμικότητας 0,45 kg  $H_2$ /h, έξι δεξαμενές μεταλλικών υδριδίων κράματος  $LaNi_5$  και χωρητικότητα 3,6 kg  $H_2$ , και ως μονάδα παραγωγής ισχύος μία κυψέλη καυσίμου τύπου PEM και ισχύος 7,5 kW.

Η εγκατάσταση στην Ισπανία αποσκοπούσε στην διερεύνηση ενδεχόμενης ενεργειακής αυτονομίας ενός θεωρητικά απομονωμένου χωριού. Φυσικά η σύνδεση του χωριού με το συμβατικό δίκτυο διατηρήθηκε καθόλη την διάρκεια του προγράμματος. Εκεί η

εγκατάσταση συμπεριέλαβε ανεμογεννήτρια 225 kW η οποία τροφοδοτούσε αλκαλική μονάδα ηλεκτρόλυσης δυναμικότητας 1 kg H<sub>2</sub>/h, και μονάδα αφαλάτωσης (αντίστροφης ώσμωσης) δυναμικότητας 110 m<sup>3</sup> νερού ημερησίως. Το σύστημα συμπληρώθηκε από κυψέλη καυσίμου ισχύος 5 kW.

- **PURE project**

Το πρόγραμμα PURE (Promoting Unst Renewable Energy) αποτελεί ένα ακόμη πειραματικό πρόγραμμα συνδυασμού ανανεώσιμων πηγών και αποθήκευσης υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης νερού. Η τοποθεσία ήταν στην νήσο Unst του συμπλέγματος νησιών Shetlands της Σκωτίας με υψηλό δυναμικό αιολικής ενέργειας. Τοποθετήθηκαν 2 ανεμογεννήτριες των 15 kW, αλκαλική μονάδα ηλεκτρόλυσης 15 kW, και κυψέλη καυσίμου PEM ισχύος 5 kW.

## 5.2 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η έρευνα των συστημάτων ΑΠΕ-H<sub>2</sub> όπως καθίσταται σαφές βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο.

Η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών υψηλής παραγωγής όπως π.χ. αιολικά πάρκα ή πάρκα φωτοβολταϊκών ή ηλιοθερμικής ενέργειας (Ισχύς >50 MW) που ήδη πραγματοποιείται σε διαφορετικά μέρη του κόσμου, ενισχύει το συμβατικό δίκτυο με "καθαρή ενέργεια" δηλαδή ηλεκτρική ενέργεια για την παραγωγή της οποίας δεν χρειάστηκε η καύση ορυκτών καυσίμων το οποίο εκπέμπουν CO<sub>2</sub>.

Ωστόσο η ανάπτυξη συστημάτων ενεργειακά αυτόνομων σε απομακρυσμένες περιοχές, τα οποία στηρίζονται σε παραγωγή ενέργειας in situ από ΑΠΕ και χρησιμοποιούν εξοπλισμό ηλεκτρόλυσης νερού για αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας υπό μορφή H<sub>2</sub> και εξοπλισμό εκμετάλλευσης του αποθηκευμένου H<sub>2</sub> εντός κυψελών καυσίμου, εντός μηχανών εσωτερικής καύσης υδρογόνου (ΜΕΚ) και εντός καυστήρων υδρογόνου, αποτελούν σημαντικό στοίχημα για το απώτερο μέλλον.

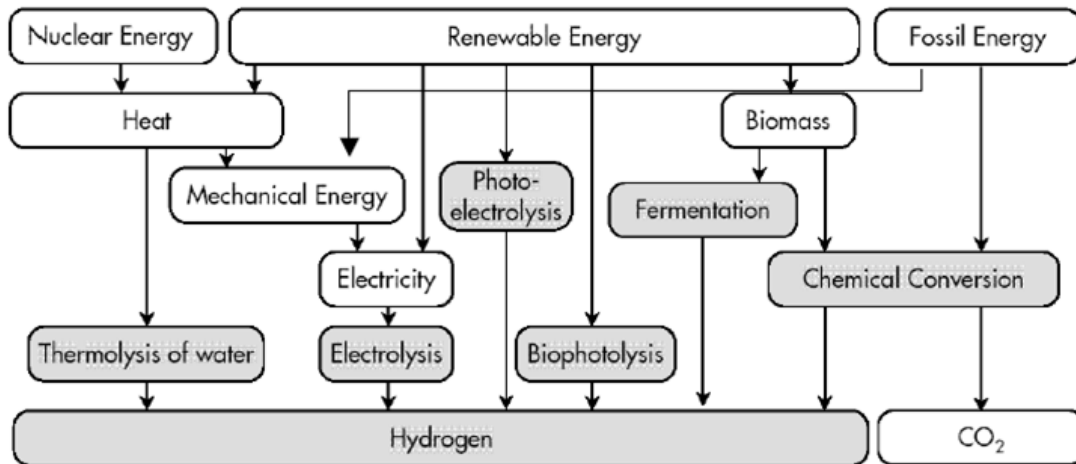
Η έρευνα αυτόνομων υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ-H<sub>2</sub> ουσιαστικά αποτελεί τμήμα της ευρύτερης έρευνας που διεξάγεται γύρω από την δυνατότητα αξιοποίησης του υδρογόνου ως καύσιμο του μέλλοντος το οποίο θα αντικαταστήσει τα ρυπογόνα ορυκτά καύσιμα.

Ο ενεργειακός κύκλος του νερού, που ξεκινά από την ηλεκτρόλυση του νερού και την παραγωγή υδρογόνου με ενέργεια προερχόμενη από ΑΠΕ (άρα μηδενικών εκπομπών) κατά τα διαστήματα που η παραγωγή των ΑΠΕ υπερβαίνει την ζήτηση, ακολουθεί την αποθήκευση του υδρογόνου και κλείνει με την οξείδωσή του με O<sub>2</sub> και την ανάκτηση τόσο αποθηκευμένης ενέργειας όσο και του νερού, αποτελεί μία εξαιρετικά ελκυστική προοπτική.

Η προοπτική αυτή θεμελιώνεται στην επίγνωση του ενεργειακού δυναμικού των ανανεώσιμων πηγών το οποίο αποτελεί τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από την ολική ενεργειακή κατανάλωση του πλανήτη.

Η έρευνα προσανατολίζεται στην ανάπτυξη της υπάρχουσας τεχνολογίας και στην αύξηση της απόδοσης των συστημάτων παραγωγής αποθήκευσης μεταφοράς και κατανάλωσης του H<sub>2</sub>.

Συμπερασματικά προκύπτει ότι ο απώτερος στόχος είναι μία "Οικονομία Υδρογόνου" όπως αποκαλείται από το 1970-όποτε και πρωτοαναφέρθηκε ο όρος- όπου το σύνολο της απαιτούμενης ενέργειας θα μπορούσε εξολοκλήρου να βασιστεί στο H<sub>2</sub> εξασφαλίζοντας ενεργειακά τις ανθρώπινες δραστηριότητες και απαλλάσσοντας τον άνθρωπο από την τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της οικονομίας των ορυκτών καυσίμων.



**Εικόνα 32:** Συνολική εικόνα της οικονομίας υδρογόνου.(Πηγή:Turner 1999,ClimateTechWiki)

Τελικά μπορεί να εκτιμηθεί ότι το κόστος των υποδομών που θα απαιτούσε μία τέτοια οικονομία θα ήταν κυριολεκτικά ανυπολόγιστο με βάση τα σημερινά δεδομένα, αφήνοντας στην άκρη την απουσία λειτουργικότητας για μία σειρά εφαρμογών.

Είναι ακριβώς για τον λόγο αυτό όπου αυξάνονται συνεχώς η χρηματοδότηση και η έρευνα των προαναφερθέντων υβριδικών συστημάτων όπως και εφαρμογών χρήσης υδρογόνου στην αυτοκίνηση και γενικότερα στις μεταφορές.

Προοπτική αποτελεί η σταδιακή μείωση του κόστους των τεχνολογιών υδρογόνου, όπου δεδομένης της αύξησης των τιμών των ορυκτών καυσίμων, της αναμενόμενης επίτευξης ικανοποιητικών αποδόσεων των τεχνολογιών υδρογόνου και της ανάγκης αναστροφής της κλιματικής αλλαγής, οι τεχνολογίες αυτές θα καταστούν οικονομικά ανταγωνιστικές. Σε αυτή την περίπτωση η αρχικά σταδιακή, έως πλήρης ενσωμάτωση τεχνολογίας υδρογόνου σε όλους τους κλάδους οικονομικών δραστηριοτήτων θα μπορούσε να καταστεί εφικτή.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ H2SUSBUILD**

### **6.1 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ H2SUSBUILD**

Η παρούσα εργασία επιτελέστηκε στα πλαίσια του προγράμματος **H2SUSBUILD** το οποίο αφορά στην εγκατάσταση και λειτουργία πρότυπου υβριδικού συστήματος Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και συστήματος αποθήκευσης H<sub>2</sub>.

Ο στόχος του προγράμματος είναι η ανάπτυξη ενός ευφυώς σχεδιασμένου αειφόρου και μηδενικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) ενεργειακού συστήματος, με σκοπό την κάλυψη των ηλεκτρικών και θερμικών αναγκών, καθώς και την ενεργειακή αυτονομία ενός εμπορικής χρήσης κτιρίου (Commercial Building). Στο παρόν σύστημα η ενέργεια εισάγεται από ανανεώσιμες πηγές και χρησιμοποιείται για την κάλυψη προκυπτουσών αναγκών ενώ το ενεργειακό πλεόνασμα μετατρέπεται σε H<sub>2</sub> με σκοπό να χρησιμοποιηθεί σαν αποθηκευτικό υλικό και να αξιοποιηθεί περαιτέρω ως "πράσινο" καύσιμο εντός κυψέλης καυσίμου ή καυστήρα H<sub>2</sub>.

Η εγκατάσταση το κτιρίου υβριδικής τεχνολογίας πραγματοποιήθηκε εντός του Τεχνολογικού Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου.

### **6.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΛΑΥΡΙΟΥ**

Το **Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου** (Τ.Π.Π.Λ.), είναι ένας οργανισμός επιστημονικής έρευνας, εκπαιδεύσεως, επιχειρηματικής δραστηριότητας και πολιτισμού. Ιδρύθηκε στη θέση της παλαιάς Γαλλικής Εταιρείας Λαυρίου (Compagnie Francaise des Mines du Laurium) το 1992, με πρωτοβουλία του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

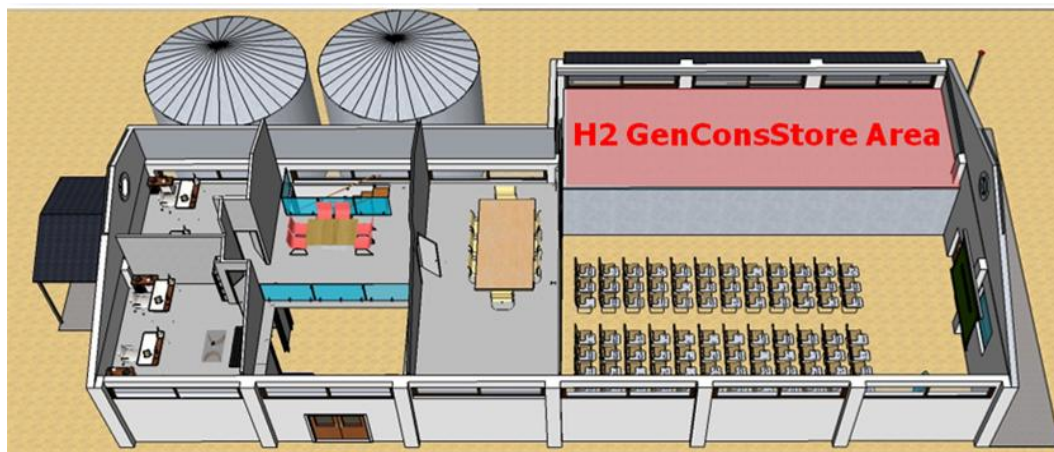
### **6.3 ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ H2SUSBUILD**

Η επιλογή της συγκεκριμένης περιοχής για την εγκατάσταση του συστήματος ΑΠΕ-H<sub>2</sub> βασίστηκε κυρίως σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας όπως:

- Η περιοχή είναι εκτεθειμένη σε ευνοϊκές μετεωρολογικές συνθήκες καθόλη τη διάρκεια του έτους, καθιστώντας την ως μία πολύ καλή τοποθεσία για την εγκατάσταση συστημάτων ΑΠΕ βασισμένων στην ηλιακή και αιολική ενέργεια. Συγκεκριμένα τα μετεωρολογικά δεδομένα που συλλέχθηκαν από έναν εγκατεστημένο εντός του Τ.Π.Π.Λ. σταθμό μετρήσεων, για τα έτη 2007-2008 έδειξε ότι η μέση ηλιακή ακτινοβολία διαθέτει ισχύ 1597 kWh/m<sup>2</sup> και 1657 kWh/m<sup>2</sup> και μέση ταχύτητα ανέμου 5,63 m/sec και 5,89 m/sec αντίστοιχα για τα δύο αυτά έτη.
- Η ποικιλία των διαθέσιμων κτιρίων που ανήκουν στο Τ.Π.Π.Λ. η οποία διευκόλυνε την επιλογή του πιο κατάλληλου. Κάποια από τα κριτήρια που ελήφθησαν υπόψιν ήταν η χρήση του κτιρίου, η ολική του επιφάνεια, η ικανότητα ενσωμάτωσης του απαιτούμενου εξοπλισμού κλπ.
- Το Τ.Π.Π.Λ. λόγω της φύσης του, προσελκύει δραστηριότητες υψηλού επιπέδου τόσο σε τεχνολογικό όσο και σε πολιτισμικό επίπεδο και δέχεται συχνά επισκέψεις από εταιρίες, εκπαιδευτικά ιδρύματα και ειδικούς της επιστημονικής κοινότητας. Αυτού του είδους το ενδιαφέρον αναμένεται να προωθήσει την προβολή του συστήματος H2SUSBUILD και να προκαλέσει το δημόσιο ενδιαφέρον.

Οι συνολικές διαστάσεις του επιλεγμένου κτιρίου ανέρχονται σε 30,50 m x 15,50 με μέγιστο ύψος περίπου 8,35m. Το κτίριο διαθέτει δάπεδο με επιφάνεια περίπου 375 m<sup>2</sup> και σοφίτα με επιφάνεια 150 m<sup>2</sup> (ολική επιφάνεια 525 m<sup>2</sup>).

Η τομή του κτιρίου αποτελείται από μία κατασκευή σκυροδέματος με τοιχοποιία δύο στρωμάτων τούβλων και μη μονωμένα παράθυρα. Η οροφή αποτελείται από μεταλλικές επιφάνειες με μόνωση 1 in πολουρεθάνης στην μέση.



**Εικόνα 33:** Κάτοψη υπό κλίση του H2SUSBUILD. Διακρίνονται σαφώς το ισόγειο (εν είδει συνεδριακού χώρου) η σοφίτα (στο δεξί μέρος) και ο χώρος στον οποίο έχει εγκατασταθεί ο εξοπλισμός του συστήματος H<sub>2</sub>.

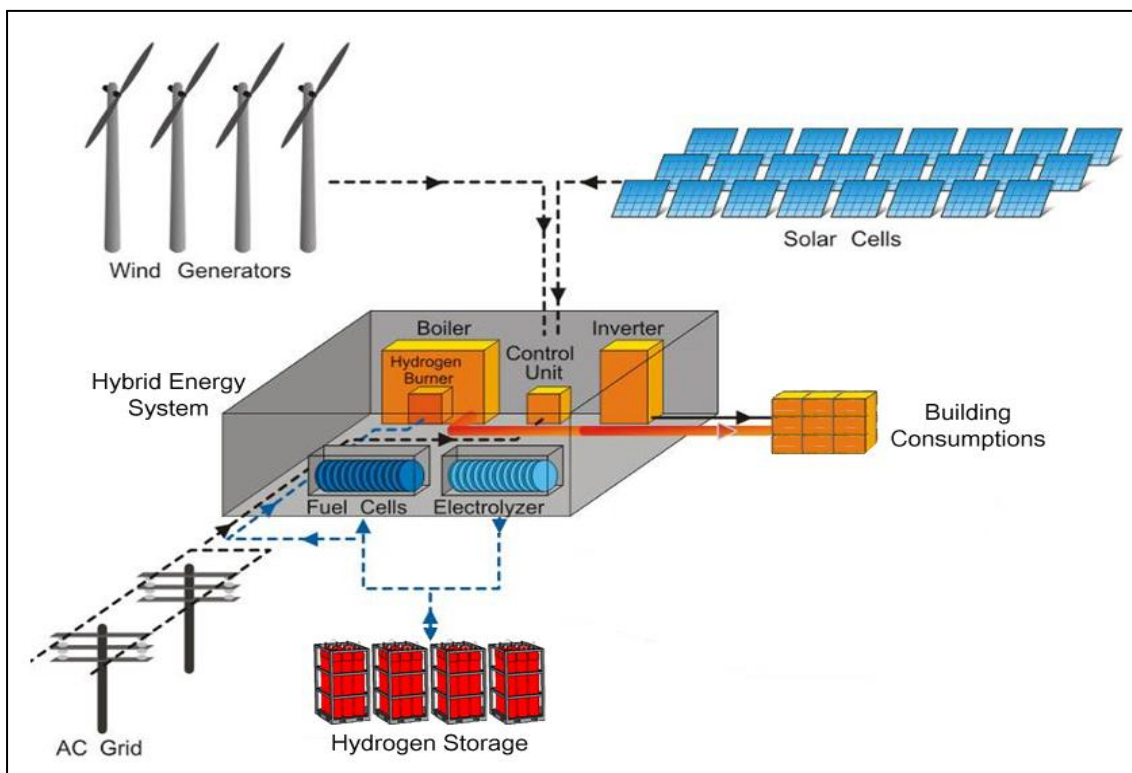
Η φιλοσοφία της ανάπτυξης συστήματος υβριδικής τεχνολογίας βασίζεται στην χρήση ΑΠΕ για την πρωτογενή άντληση ενέργειας ώστε να είναι άμεσα διαθέσιμη για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών του κτιρίου. Όταν η παραγωγή από τις ΑΠΕ είναι μεγαλύτερη από την ολική κατανάλωση του κτιρίου, η πλεονάζουσα ενέργεια αποθηκεύεται υπό την μορφή υδρογόνου (H<sub>2</sub>), το οποίο παράγεται από ηλεκτρόλυση νερού. Αντιθέτως, όταν η παραγωγή των ΑΠΕ είναι μικρότερη από την ολική κατανάλωση του κτιρίου, το αποθηκευμένο H<sub>2</sub> αξιοποιείται ως “πράσινο” καύσιμο με σκοπό την κάλυψη των ηλεκτρικών και θερμικών αναγκών, μετατροπή ενέργειας που λαμβάνει χώρα στην κυψέλη καυσίμου.

Ακολούθως τα βασικά στοιχεία του υβριδικού συστήματος είναι τα παρακάτω:

- Οι ΑΠΕ και συγκεκριμένα τα φωτοβολταϊκά (ολικής ισχύος 46,8 kW) για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας και οι ανεμογεννήτριες για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας.
- Μία μονάδα ηλεκτρόλυσης νερού (ισχύος 22,3 kW) για την παραγωγή αερίου H<sub>2</sub>.
- Δίκτυο διανομής του H<sub>2</sub> και αποθηκευτικές δεξαμενές (3480 λίτρων χωρητικότητας).
- Συμπιεστής με σκοπό την αποθήκευση H<sub>2</sub> σε υψηλή πίεση.
- Κυψέλη καυσίμου με σκοπό την μετατροπή αποθηκευμένου H<sub>2</sub> σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα.
- Καυστήρας H<sub>2</sub> για την παραγωγή θερμότητας.

Το σύστημα επιπλέον περιλαμβάνει ένα εξελιγμένο σύστημα ασφάλειας το οποίο αποτελείται από διαφορετικούς τύπους ανιχνευτών όσο και σύστημα διαχείρισης ενέργειας

για τον έλεγχο της ροής ενέργειας και την λειτουργία όλων των μονάδων της εγκατάστασης. Το σύστημα αποκαλείται EMCS (Energy Management and Control System). Η εξ αποστάσεως ρύθμιση και έλεγχος (remote control) είναι επίσης εφικτά.



**Εικόνα 34:** Γενική άποψη συστήματος.

#### 6.4 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΠΕ

Το πάρκο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) ευρίσκεται δίπλα στο πειραματικό κτίριο και περιλαμβάνει:

- 6 Ανεμογεννήτριες τριών λεπίδων και ισχύος 6 kW έκαστη.
- 624 φωτοβολταϊκές επιφάνειες, τεχνολογίας λεπτού φιλμ και με ολική ονομαστική ισχύ 46,8 kWp.

#### 6.5 ΣΥΣΤΗΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

Τα επιλεγμένα φωτοβολταϊκά κελιά που βασίζονται στην τεχνολογία λεπτού φιλμ, είναι κατασκευασμένα από αφομοιωτές Δισελινίδων Χαλκού-Ινδίου-Γαλλίου, με συντελεστή απόδοσης 9,9% περίπου. Η τεχνολογία των CIGS επιλέχθηκε διότι:

- Τα φωτοβολταϊκά κελιά λεπτού φιλμ παρουσιάζουν μικρότερη πτώση δυναμικού σε σχέση με παραδοσιακά χρησιμοποιούμενες φωτοβολταϊκές επιφάνειες, όσον αφορά συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας.
- Τα φωτοβολταϊκά κελιά λεπτού φιλμ παρουσιάζουν μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας σε συνθήκες ασθενούς φωτεινότητας και σκιάς.



Οι επιφάνειες εγκαθίστανται στην οροφή ενός κοντινού κτιρίου, ενώπιον Νότου, και με κλίση 23° κατά προσέγγιση. Η ολική επιφάνεια επικάλυψης ανέρχεται σε 475 m<sup>2</sup> και η αναμενόμενη ετήσια παραγωγή είναι περίπου 80000 kWh.

Οι επιφάνειες χωρίζονται σε 6 κύρια κυκλώματα τα οποία τροφοδοτούν 6 αντιστροφείς, οι οποίοι συνδέονται ανά ζεύγη. Η απόδοση των αντιστροφέων ανέρχεται σε 98% περίπου. Το σύστημα είναι εφοδιασμένο με ρυθμιστές ισχύος οι οποίοι επιτρέπουν κυκλωματική σύνδεση των εναλλακτών σε ένα χαμηλού δυναμικού και τριών φάσεων δίκτυο, το οποίο καλύπτει το κτίριο και ελέγχεται από κατάλληλο σύστημα εξισορρόπησης ισχύος.

## 6.6 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Οι ανεμογεννήτριες που έχουν εγκατασταθεί είναι εξοπλισμένες με σύστημα ελατών πτερυγίων το οποίο συνδέεται με την μόνιμη μαγνητική γεννήτρια, διάταξη που επιτρέπει στις ανεμογεννήτριες να παράξουν ισχύ τόσο σε ασθενείς όσο και σε ισχυρούς ανέμους (cut-in speed: 2,5 m/s). Τα πτερύγια συγκρατούνται από ελατήρια που τους προσδίδουν ευελιξία ακόμη και σε μεγάλης ταχύτητας ανέμους, γεγονός που ελαττώνει την ανάπτυξη πιθανώς επικίνδυνων τάσεων. Το σχήμα της ανεμογεννήτριας επιπροσθέτως περιλαμβάνει φρένο, το οποίο δρά στην άτρακτο του ρότορα και χρησιμοποιείται για λόγους συγκράτησης. Ο πυλώνας (ύψους 9 μέτρων) ο οποίος συνδέεται με το πλαίσιο της τουρμπίνας, διαθέτει χαλύβδινη βάση η οποία ενσωματώνει μηχανισμό ρύθμισης ύψους. Στην κορυφή του πυλώνα υπάρχει μηχανισμός που επιτρέπει την περιστροφή του πλαισίου της τουρμπίνας. Κατά συνέπεια ο ρότορας είναι ικανός να στρέφεται κατά γωνία 360° και να αυτό-προσανατολίζεται σε σχέση με την διεύθυνση και ταχύτητα του αέρα. Η αναμενόμενη ετήσια παραγωγή ανέρχεται σε 50000 kWh.

## 6.7 ΜΟΝΑΔΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ

Η μονάδα ηλεκτρόλυσης που χρησιμοποιείται στο H2SUSBUILD είναι κατασκευασμένη από την εταιρεία ErreDue, σειράς H03 και μοντέλο G4 – G6AP.

Η συσκευή ανήκει στην κατηγορία των Alkaline Electrolysers, όπου ο διαχωρισμός του H<sub>2</sub>O επιτυγχάνεται με την αγωγή ηλεκτρικού ρεύματος διαμέσω υδατικού διαλύματος NaOH πυκνότητας 20% w/w (διάλυμα ηλεκτρολύτη).

Η τροφοδοσία της συσκευής σε ηλεκτρική ενέργεια επιτυγχάνεται με την παροχή εναλλασσόμενης τάσης (AC) 400 Volt τριών φάσεων και συχνότητας 50 Hz.

Η ηλεκτρόλυση του νερού πραγματοποιείται στα ηλεκτρολυτικά κελιά τα οποία βρίσκονται συνδεδεμένα σε σειρά υπό ολική τάση 300 Volt συνεχούς ρεύματος (DC).

Τα αέρια που προκύπτουν από την ηλεκτρόλυση του νερού (H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>) αρχικά διαχωρίζονται με την διοχέτευσή τους σε δύο διαφορετικές δεξαμενές, στη συνέχεια οδηγούνται σε δεξαμενές αρχικού διαχωρισμού υγρής-αέριας φάσης (πρώτου βαθμού) και κατόπιν σε δεξαμενές περαιτέρω αφυδάτωσης (δευτέρου βαθμού). Το παραγόμενο αέριο διέρχονται διαμέσω εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος επιτυγχάνει τόσο την ψύξη τους όσο και την ακόμη μεγαλύτερη αφυδάτωσή τους. Διαμέσω εναλλάκτη θερμότητας ανακυκλώνεται και το διάλυμα ηλεκτρολύτη (NaOH) για την διατήρηση της θερμοκρασίας

του εντός των ορίων ασφάλειας. Τέλος ακολουθεί η φάση εξισορρόπησης των εσωτερικών πιέσεων των δεξαμενών λόγω της παραγωγής των δύο ειδών αερίων σε διαφορετικούς όγκους ( $V_{H_2}/V_{O_2} = 2/1$ ). Το παραγόμενο  $H_2$  διοχετεύεται προς το σύστημα αποθήκευσης σε πίεση 10-13 bar ενώ το οξυγόνο απελευθερώνεται κατά ελεγχόμενο τρόπο στην ατμόσφαιρα. Η μονάδα ελέγχεται από σύστημα PLC το οποίο επιτυγχάνει την αυτοματοποίηση της διαδικασίας.

Η συσκευή λειτουργεί με ασφάλεια σε θερμοκρασία 5°C-55°C και σε σχετική υγρασία μεταξύ 20%-90%.

Η συσκευή διαθέτει εισδοχή σωλήνα παροχής απιονισμένου νερού από εξωτερική δεξαμενή χωρητικότητας 50 λίτρων. Ταυτόχρονα υπάρχει εγκατεστημένο ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου της στάθμης. Το σύστημα αυτό ενεργοποιεί την άντληση νερού από την δεξαμενή όταν παρουσιαστεί έλλειψη στην συσκευή.

**Πίνακας 6:** Ηλεκτρικές προδιαγραφές συστήματος

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ
Τάση τροφοδοσίας	3 x 400Vac + Neutral
Συχνότητα	50 Hz
Ένταση ρεύματος	36.5 Ampere
Μέση ισχύς	22.3 kW
Ασφάλεια κυκλώματος	50 Ampere
Μέγιστη ροή $H_2$	4 Nm <sup>3</sup> /hr
Πίεση εξόδου $H_2$	10-13 bar
Καθαρότητα (περιεκτικότητα $H_2$ )	99.3% - 99.8%
Μέγιστη ροή $O_2$	2 Nm <sup>3</sup> /hr
Πίεση εξόδου $O_2$	10-13 bar
Καθαρότητα (περιεκτικότητα $O_2$ )	98.5% - 99.5%

**Πίνακας 7:** Επιπρόσθετες συνδέσεις τροφοδοσίας

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ
<b>1.Απιονισμένο νερό</b>	
Μέγιστη αγωγιμότητα	5 μS/cm
Μέγιστη κατανάλωση	3.4 Lt/hr
<b>2.Νερό ψύξης</b>	
Μέγιστη θερμοκρασία	35 °C
Μέγιστη ροή	2 m <sup>3</sup> /hr
Πίεση	2-5 bar
<b>3.Άζωτο καθαρισμού</b>	
Ροή	1 Nm <sup>3</sup> /hr
Πίεση	0.5 -1 bar
<b>4.Παροχή αέρα</b>	
Ελάχιστη πίεση	5 bar
Μέγιστη πίεση	8 bar

**Πίνακας 8:** Πληροφορίες ασφάλειας πίεσης αερίων

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ
Μέγιστη πίεση εξόδου (H <sub>2</sub> ) (Ενεργοποίηση βαλβίδας ασφαλείας)	15 bar
Μέγιστη πίεση εξόδου (O <sub>2</sub> ) (Ενεργοποίηση βαλβίδας ασφαλείας)	15 bar

Η μονάδα ηλεκτρόλυσης είναι επίσης εξοπλισμένη με ένα σύστημα τύπου SCADA με στόχο την επίτευξη επικοινωνίας με ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω σύνδεσης Ίντερνετ. Το υποσύστημα παραγωγής H<sub>2</sub> τελειοποιείται από σύστημα καθαρισμού (purifier) το οποίο αυξάνει την καθαρότητα του παραγόμενου υδρογόνου ώστε να πληρούνται οι απαιτήσεις της κυψέλης καυσίμου (H<sub>2</sub>%vol >99.999).

### 6.8 ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

Το δίκτυο διανομής του H<sub>2</sub> απάγει το αέριο από το σημείο της παραγωγής (μονάδα ηλεκτρόλυσης) στο τμήμα αποθήκευσης και ακολούθως το προωθεί από τις δεξαμενές αποθήκευσης στην κυψέλη καυσίμου καθώς και στον καυστήρα. Οι απαιτούμενες πληροφορίες για τον σχεδιασμό του δικτύου παροχής H<sub>2</sub> αφορούν κυρίως στην ροή, στη θερμοκρασία, στην πίεση και στην σύνθεση του H<sub>2</sub>. Οι σωληνώσεις είναι κατασκευασμένες από ανοξείδωτο χάλυβα 316 που εξασφαλίζει μέγιστη ασφάλεια.

Το σύστημα αποθήκευσης H<sub>2</sub> αποτελείται από δύο τμήματα:

- **Προσωρινή αποθήκη (Buffers):** Αποτελείται από 3 φιάλες χωρητικότητας 50 λίτρων εκάστη. Η συνολική χωρητικότητα λοιπόν ανέρχεται σε 150 Lt. Η προσωρινή αποθήκη τοποθετείται ενδιάμεσα της μονάδας ηλεκτρόλυσης και της μόνιμης αποθήκης και εκτελεί χρέη εξισορρόπησης της πίεσης του παραγόμενου H<sub>2</sub> το οποίο εξέρχεται υπό πίεση που πλησιάζει τα 12 bar. Οι φιάλες λειτουργούν αποσυμπιέζοντας το εισερχόμενο αέριο και μειώνοντας την ταχύτητά του, γεγονός που καθιστά ευχερέστερη την μετέπειτα προώθησή του στην μόνιμη αποθήκη.
- **Μόνιμη αποθήκη (Storage):** Αποτελείται από 12 φιάλες χωρητικότητας 50 λίτρων εκάστη και 36 φιάλες χωρητικότητας 80 λίτρων. Η συνολική χωρητικότητα της μόνιμης αποθήκης συνεπώς ανέρχεται σε  $(12 \times 50 + 36 \times 80) = 3480$  Lt. Η μόνιμη αποθήκη καθίσταται τελικός δέκτης της παραγόμενης ποσότητας H<sub>2</sub> σε υψηλές τιμές πίεσης. Η μέγιστη πίεση διαμορφώνεται στα 200 bar, και κατά συνέπεια ο μέγιστος αποθηκευμένος όγκος H<sub>2</sub> ισούται με 690 Nm<sup>3</sup> (ή ισοδυνάμως 62 περίπου kg H<sub>2</sub>).
- **Συμπιεστής H<sub>2</sub> (Compressor):** Οποιοδήποτε σύστημα αποθήκευσης αερίου σε υψηλή πίεση προϋποθέτει την ύπαρξη συστήματος συμπίεσης. Το σύστημα συμπίεσης υπερνικά την αντίσταση που προβάλλει η αποθηκευμένη ποσότητα του H<sub>2</sub> μέσω της άσκησης μηχανικής πίεσης, επιτυγχάνοντας την προώθηση μεγαλύτερων ποσοτήτων H<sub>2</sub> από την προσωρινή στην μόνιμη αποθήκη.

Η ασφάλεια του δικτύου διανομής και συστήματος αποθήκευσης εξασφαλίζεται από βαλβίδες ελέγχου και εκτόνωσης. Η παρουσία τριών στον αριθμό ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων οι οποίες ελέγχονται από το κεντρικό σύστημα ελέγχου έχουν την δυνατότητα να κλείσουν σε περίπτωση συναγερμού, απομονώνοντας έτσι διαφορετικά τμήματα του δικτύου διανομής αποκόπτοντας αποτελεσματικά έτσι την ροή του H<sub>2</sub>.



**Εικόνα 35:** Φωτογραφία του συστήματος αποθήκευσης H<sub>2</sub>.



**Εικόνα 36:** Φωτογραφία της εγκατάστασης H2SUSBUILD .

## 6.9 ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Στο σύστημα εντάσσεται κυψέλη καυσίμου τεχνολογίας PEM συνδυασμένης παραγωγής (CHP-Combined Heat and Power) με σκοπό την κάλυψη αναγκών τροφοδοσίας σε ηλεκτρική ενέργεια και ταυτόχρονα δέσμευση και εκμετάλλευση της εκλυόμενης θερμότητας.

Η κυψέλη καυσίμου παρουσιάζει προδιαγραφές όπως φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

**Πίνακας 9:** Ηλεκτρικές προδιαγραφές συσκευής.

DESCRIPTION	UNIT	VALUE
ELECTRIC POWER PRODUCTION (min – max)	kWel	6 – 15
VOLTAGE	VAC	3/400
CURRENT max (setpoint, manual operation)	A	29
FREQUENCY	Hz	50
ELECTRICAL EFFICIENCY (higher than)	%	40
THERMAL POWER PRODUCTION (min – max)	kWth	5 – 20
HOT WATER FLOW RATE (min – max)	m <sup>3</sup> /h	1 – 4
CHP DIMENSIONS	mm	1300x1200x2000
INVERTER DIMENSIONS	mm	1100x800x1400

Επιπλέον υπάρχει εγκατεστημένο σύστημα ανάκτησης της θερμότητας σε δεξαμενή 850 λίτρων η οποία συνδέεται με σύστημα αερικής ψύξης για την απαγωγή πλεονάζουσας θερμότητα και την διατήρηση της θερμοκρασίας σε λειτουργικά επίπεδα.

## 6.10 ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ

Η μονάδα ηλεκτρόλυσης, η κυψέλη καυσίμου και ο καυστήρας H<sub>2</sub> είναι εγκατεστημένα σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο εντός του κτιρίου ο οποίος ονομάζεται "H<sub>2</sub> GenConsStor". Ο χώρος είναι κατασκευασμένος διαθέτοντας φέροντα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα και τοιχοποιία διπλών τοίχων από τούβλα (οι οποίοι παρουσιάζουν ανθεκτικότητα σε συνθήκες φωτιάς για τουλάχιστον 60 λεπτά της ώρας). Ο χώρος διαθέτει δύο εισόδους στις οποίες έχουν εγκατασταθεί θύρες με αντοχή 60 λεπτών της ώρας σε συνθήκες πυρκαϊάς.

Κάθε συσκευή τοποθετείται σε ξεχωριστό χώρο (ουσιαστικά τρία ξεχωριστά δωμάτια) με διαστάσεις 5m x 5m x 5m έκαστο, κατά τέτοιον τρόπο ώστε διαμορφώνεται ένας ανοιχτός διάδρομος ο οποίος δρά ως έξοδος διαφυγής προς οποιαδήποτε από τις δύο κύριες θύρες σε περίπτωση σήμανσης συναγερμού.

Η συνεχής ανανέωση του αέρα εντός των τριών δωματίων εξασφαλίζεται από ειδικό σύστημα αερισμού (ventilation system).

Όλες οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις στον χώρο ανταποκρίνονται στα κριτήρια των οδηγιών ATEX, ενώ το δωμάτιο της μονάδας ηλεκτρόλυσης διαθέτει επίσης τοίχο ανακούφισης.

Το δίκτυο διανομής καθώς και το σύστημα αποθήκευσης του H<sub>2</sub> τοποθετούνται εκτός του κτιρίου. Οι σωληνώσεις εγκαθίστανται στον εξωτερικό τοίχο του κτιρίου ενώ οι αποθήκες του H<sub>2</sub> τοποθετούνται σε βάση από σκυρόδεμα και κάτω από προστατευτική οροφή προκειμένου να αποφευχθεί η άμεση έκθεση στον ήλιο και στην βροχή.

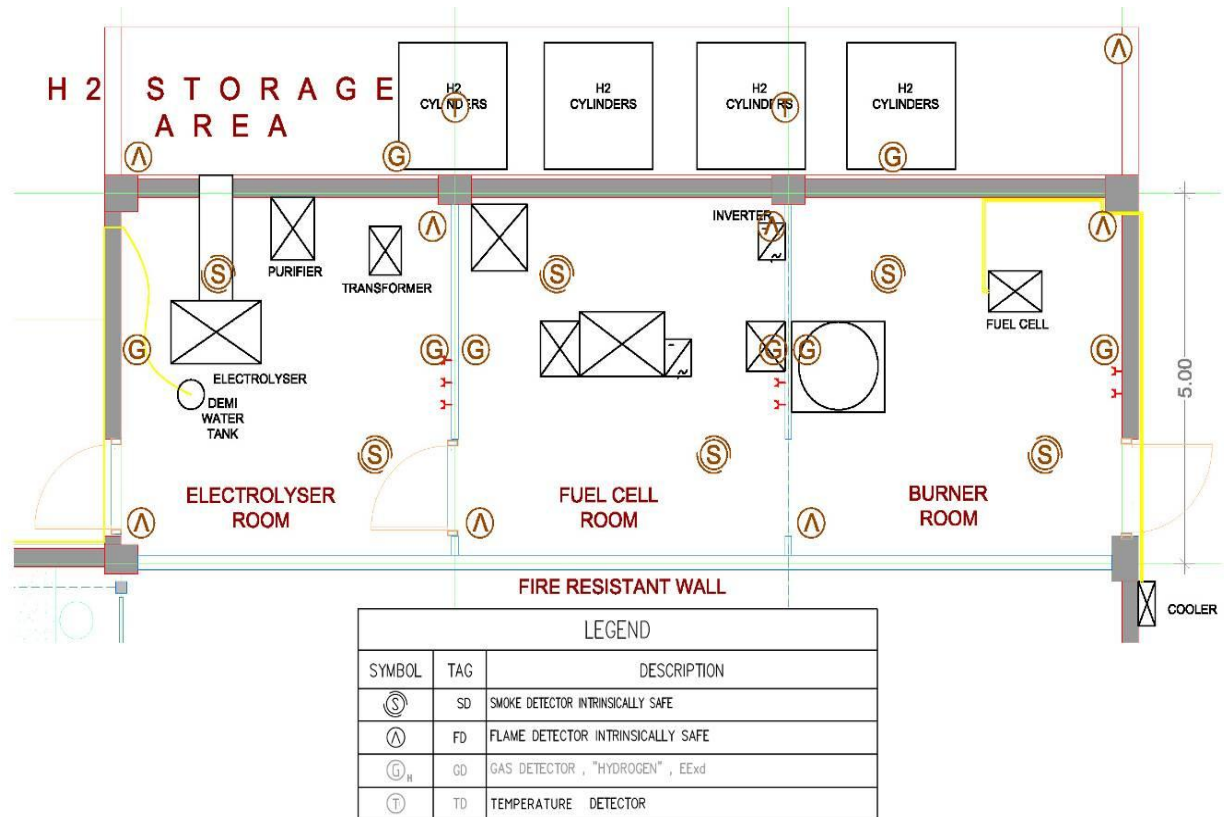
### 6.11 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Το εγκατεστημένο σύστημα ασφάλειας εντός του χώρου "H<sub>2</sub> GenConsStor" διαθέτει διαφορετικούς τύπους ανιχνευτών για την ρύθμιση διαφόρων ενδεχομένων συμβάντων. Τα είδη των ανιχνευτών έχουν ως ακολούθως:

- Ανιχνευτές H<sub>2</sub> για να ανιχνεύουν υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης του αερίου, κάτι που θα υπεδείκνυε διαρροή.
- Ανιχνευτές υπέρυθρης ακτινοβολίας για τον έλεγχο πυρκαϊάς που δημιουργήθηκε από H<sub>2</sub>. Ο λόγος χρήσης του συγκεκριμένου ανιχνευτή εντοπίζεται στο ότι η φλόγα της καύσης του H<sub>2</sub> δεν είναι ορατή από το ανθρώπινο μάτι (διάφανη φλόγα).
- Ανιχνευτές καπνού για τον έλεγχο φωτιάς που μπορεί να προκληθεί από πηγές εκτός H<sub>2</sub>.
- Διακόπτες επαφής στις εισόδους της H<sub>2</sub> GenConsStor area.
- Τοπικοί πίνακες ελέγχου δίπλα στις εισόδους.
- Ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες σε διαφορετικά τμήματα του δικτύου διανομής του υδρογόνου.
- Επιπροσθέτως των αισθητήρων που εγκαταστάθηκαν στον υπό μελέτη χώρο, τοποθετούνται και θερμικοί αισθητήρες για την παρακολούθηση της περιβάλλουσας θερμοκρασίας.
- Αγωγοί νερού ψύξης θα χρησιμοποιηθούν σε περίπτωση αυξημένης θερμοκρασίας περιβάλλοντος με σκοπό τον έλεγχο της απότομης αύξησης της θερμοκρασίας.
- Σε περίπτωση σοβαρού συναγερμού, λειτουργεί σύστημα απελευθέρωσης αδρανούς αερίου (N<sub>2</sub>) για αποτελεσματικότερη κατάσβεση.
- Οπτικοακουστικοί συναγερμοί.

Όλα τα παραπάνω είναι συνδεδεμένα με κεντρική αυτοματοποιημένη μονάδα ελέγχου και ρύθμισης. Υπάρχουν συγκεκριμένες ακολουθίες διαδικασιών που προβλέπονται για κάθε τύπο συναγερμού. Το σύστημα διαθέτει την δυνατότητα να στέλνει ειδοποιήσεις μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου και γραπτών μηνυμάτων. Με απλά λόγια μπορεί να υπάρχει αποτελεσματικός έλεγχος εξ αποστάσεως.

Το ακόλουθο σκαρίφημα αποκαλύπτει την κάτοψη του χώρου H<sub>2</sub> GenConsStor και αποδίδει αναλυτική εικόνα της κατανομής των ανιχνευτών - αισθητήρων.



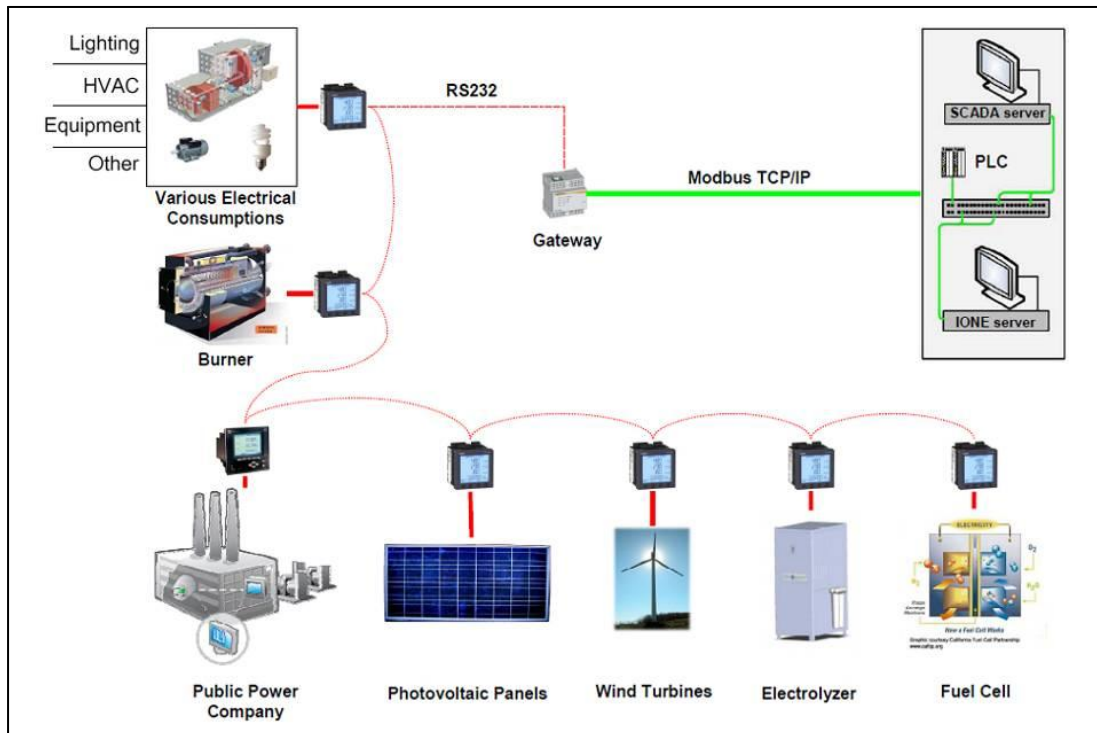
**Εικόνα 37:** Κάτοψη του χώρου H<sub>2</sub> GenConsStor. Διακρίνονται τα τρία ξεχωριστά δωμάτια, οι θύρες εξόδου και ο διαμορφωμένος διάδρομος διέλευσης - διαφυγής. Επίσης διακρίνεται ο εκτός κτιρίου χώρος που καταλαμβάνουν οι αποθήκες H<sub>2</sub>. Τέλος φαίνονται διάσπαρτες οι θέσεις των ανιχνευτών και των αισθητήρων.

- Σύμβολο S: Ανιχνευτές καπνού
- Σύμβολο L: Ανιχνευτές φλόγας H<sub>2</sub> (υπέρουθρης ακτινοβολίας).
- Σύμβολο G: Ανιχνευτές αέριας συγκέντρωσης H<sub>2</sub>.
- Σύμβολο T: Αισθητήρες θερμοκρασίας.

### 6.12 ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (EMCS)

Αποσκοπώντας στην ανάλυση της ροής της ενέργειας ανάμεσα στα διάφορα εξαρτήματα, το κτίριο διαθέτει εγκατεστημένο ένα κατάλληλο σύστημα ρύθμισης. Το σύστημα μπορεί να μετρά και να αποθηκεύει σε πραγματικό χρόνο την ενέργεια που παράγεται από τις ΑΠΕ ή την κυψέλη καυσίμου, και την ενέργεια που καταναλώνεται από τον εξοπλισμό του κτιρίου. Η ακριβής αυτή μέτρηση επιτυγχάνεται με την χρήση ευφυώς κατασκευασμένων μετρητικών συσκευών, οι οποίες εγκαθίστανται στο κεντρικό πίνακα ελέγχου του κτιρίου. Αυτές οι συσκευές επίσης προσφέρουν εξελιγμένες χρησιμότητες όπως συναγερμό, πρόβλεψη εκτίμηση τάσεων και άλλα. Η ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των εξαρτημάτων του συστήματος και του PLC επιτυγχάνεται με τη χρήση συστήματος BUS και Modbus TCP/IP.

Η αρχιτεκτονική του συστήματος ρύθμισης παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



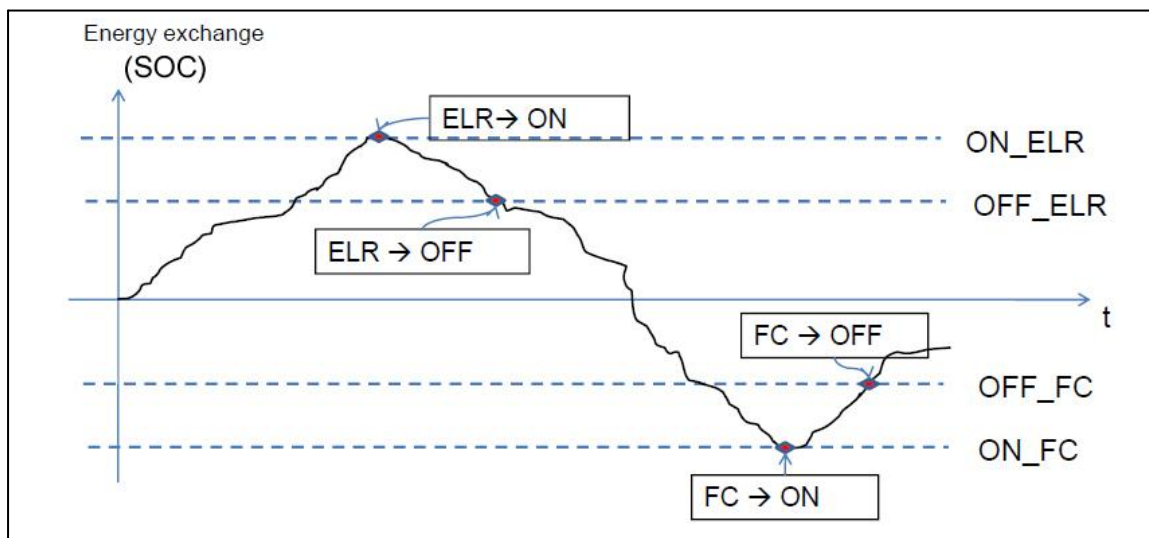
**Εικόνα 38:** Γραφική απεικόνιση συστήματος ελέγχου - διαχείρισης της πληροφορίας.

### 6.13 ΓΕΝΙΚΗ ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στον συσχετισμό μεταξύ της παραγωγής των ανανεώσιμων πηγών και της κατανάλωσης ενέργειας από τα τυχόντα φορτία για την δεδομένη στιγμή.

Ο συσχετισμός αυτός ονομάζεται κατάσταση φόρτισης (State of charge) και αφορά στην διαφορά παραγωγής - κατανάλωσης δηλαδή **SOC = Power produced - Power consumed**

Σχηματικά μπορεί να παρασταθεί όπως στην ακόλουθη εικόνα:



**Εικόνα 39:** Παραστατική μορφή αρχής λειτουργίας του συστήματος.



Η καμπύλη της κατάστασης φόρτισης αναπαρίσταται σε συνάρτηση με τον χρόνο. Η υπέρβαση ενός συγκεκριμένου ορίου θετικού συσχετισμού, δηλαδή υπεροχής της ισχύος παραγωγής επί της ισχύος κατανάλωσης θέτει σε λειτουργία την μονάδα ηλεκτρόλυσης, ενώ η μείωση της διαφοράς υπό ενός συγκεκριμένου ορίου θέτει τέλος στην λειτουργία της μονάδας. Αντιστοίχως η υπέρβαση ενός συγκεκριμένου ορίου αρνητικού συσχετισμού, δηλαδή υπεροχής της ισχύος κατανάλωσης επί της ισχύος παραγωγής θέτει σε λειτουργία την κυψέλη καυσίμου, ενώ η μείωση της διαφοράς σε λιγότερο αρνητικές τιμές, θέτει την κυψέλη καυσίμου εκτός λειτουργίας.

Σημαντικό ρόλο καταλαμβάνει η αλληλεπίδραση με το συμβατικό δίκτυο το οποίο παρέχει τις απαιτούμενες ποσότητες ενέργειας κατά διαστήματα έλλειψης ενέργειας, ενώ δέχεται ενεργειακές ποσότητες κατά διαστήματα ενεργειακού πλεονάσματος.

Το πρόσημο της συνολικής ανταλλαγής ενέργειας του συστήματος με το συμβατικό δίκτυο είναι ο τελικός κριτής όσον αφορά στην επιζητούμενη ενεργειακή αυτάρκεια του συστήματος για κάθε περίοδο μελέτης.

Σε περίπτωση που η συνολική ανταλλαγή διαθέτει θετικό πρόσημο σημαίνει ότι η ενέργεια που δόθηκε στο δίκτυο ήταν μεγαλύτερη από αυτή που δέχθηκε από το δίκτυο.

Σε περίπτωση που η συνολική ανταλλαγή διαθέτει αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι η ενέργεια που δόθηκε στο δίκτυο ήταν μικρότερη από αυτή που δέχτηκε από το δίκτυο.

Προφανώς στόχος του του συγκεκριμένου εγχειρήματος αποτελεί η επίτευξη θετικού προσήμου συνολικής ανταλλαγής και κατά συνέπεια η ενεργειακή αυτονομία χωρίς την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΛΛΟΓΗ-ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

### **7.1 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

#### **7.1.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ**

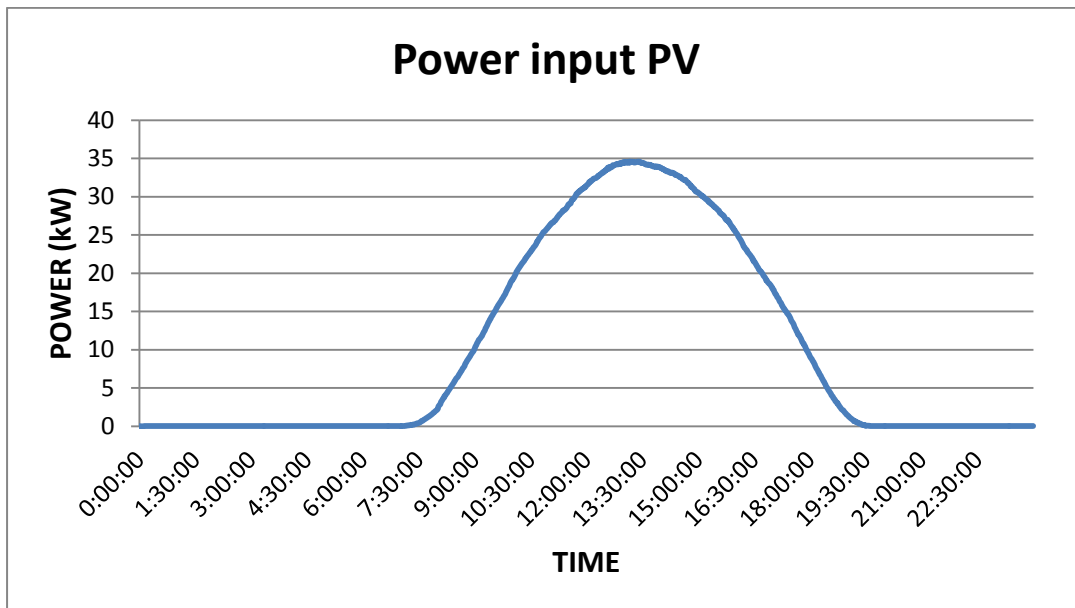
Στο ακόλουθο χωρίο θα μελετηθεί η συμπεριφορά και η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την διάταξη φωτοβολταϊκών επιφανειών.

Η καταγραφή της αναπτυσσόμενης ισχύος αλλά και της ολικής προσφερόμενης ενέργειας είναι συνεχής και παρέχεται σε αναφορά μορφής αρχείου Excel για την περίοδο μελέτης **1/5/2012** έως **8/5/2012**. Η καταγραφή επιτυγχάνεται μέσω του συστήματος EMCS (Energy Management and Control System) όπου παρέχονται ανά 1 λεπτό (min) οι τιμές αναπτυσσόμενης ισχύος της διάταξης καθώς και η ενεργειακή στάθμη παραγωγής ενέργειας.

##### **7.1.1.1 ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ**

Η αναπτυσσόμενη ισχύς των επιφανειών καταγράφεται με συχνότητα ενός λεπτού και προφανώς αποτελεί συνάρτηση της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

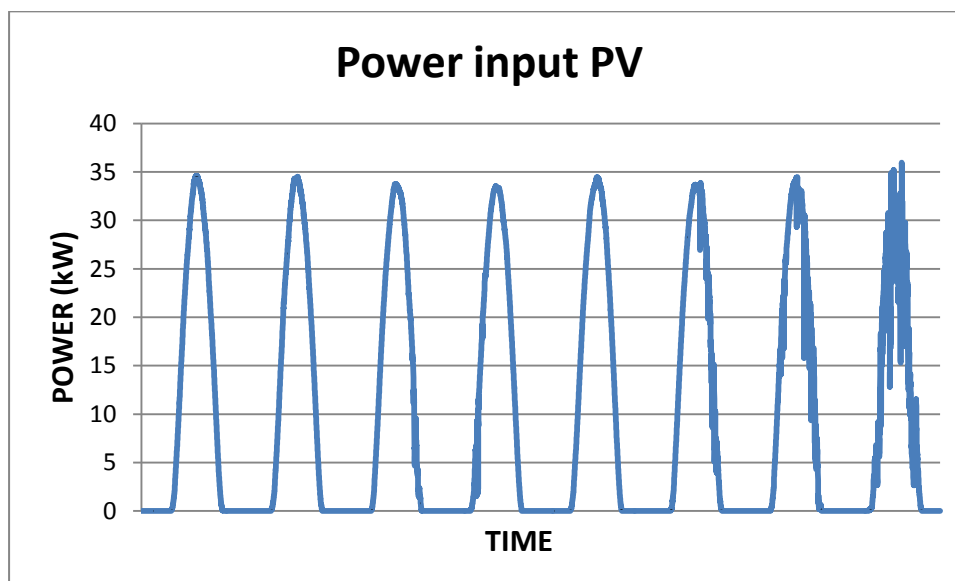
Στο ακόλουθο διάγραμμα μπορεί να φανεί η διακύμανση της ισχύος των Φ/Β κατά την διάρκεια της πρώτης ημέρας της περιόδου μελέτης **1/5/2012**.



**Διάγραμμα 1:** Διακύμανση καμπύλης ισχύος φωτοβολταϊκών επιφανειών για την 1/5/2012.

- Η αναπτυσσόμενη ισχύς των Φ/Β εξαρτάται εμφανώς από την παρουσία ή την απουσία ηλιακής ακτινοβολίας.
- Η καμπύλη της ισχύος είναι εξαιρετικά ομαλή (χωρίς έντονες αυξομειώσεις) γεγονός που καταδεικνύει την απουσία νεφώσεων και την επικράτηση αίθριου καιρού.

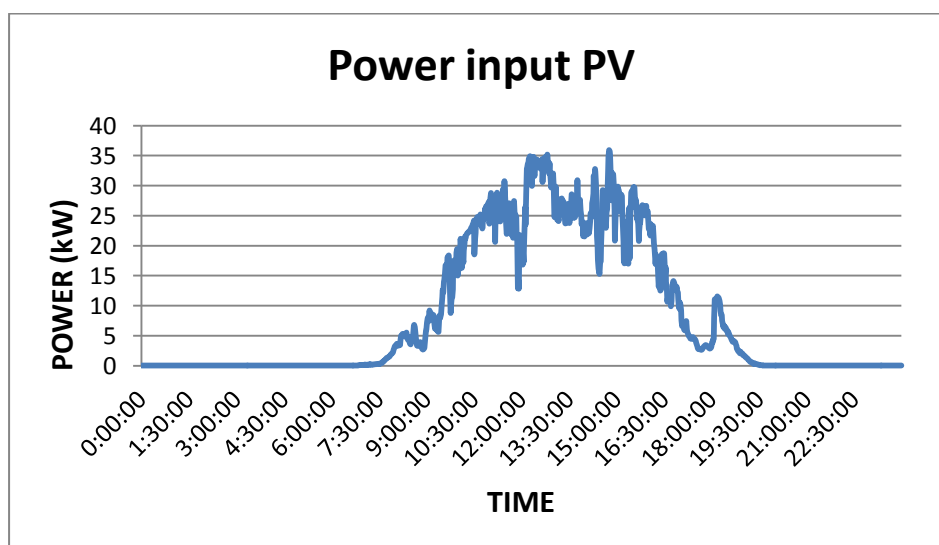
Η καμπύλη της ισχύος για το σύνολο της περιόδου μελέτης 1/5/2012 - 8/5/2012 μπορεί να παρασταθεί σε συνάρτηση με τον χρόνο και να αποκαλύψει την αυξομείωση της ισχύος ανάλογα με την ηλιοφάνεια.



**Διάγραμμα 2:** Διακύμανση καμπύλης ισχύος φωτοβολταϊκών επιφανειών για την περίοδο μελέτης 1/5/2012 - 8/5/2012.

- Παρατηρείται η ανάπτυξη ισχύος κατά τις ώρες ηλιοφάνειας και μεγιστοποίηση περί των μεσημβρινών ωρών (13:00).
- Η ένταση της αναπτυσσόμενης ισχύος δεν παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις. Η μέγιστη ισχύς για κάθε ημέρα ευρίσκεται εντός του διαστήματος 34-36 kW.

Η καμπύλη κατά την τελευταία (8η) ημέρα της περιόδου λειτουργίας αξίζει να μελετηθεί προσεκτικότερα καθότι δεν παρουσιάζει την ίδια ομαλότητα με τις καμπύλες των υπολοίπων ημερών.



**Διάγραμμα 3:** Διακύμανση καμπύλης ισχύος φωτοβολταϊκών επιφανειών για την 8/5/2012.

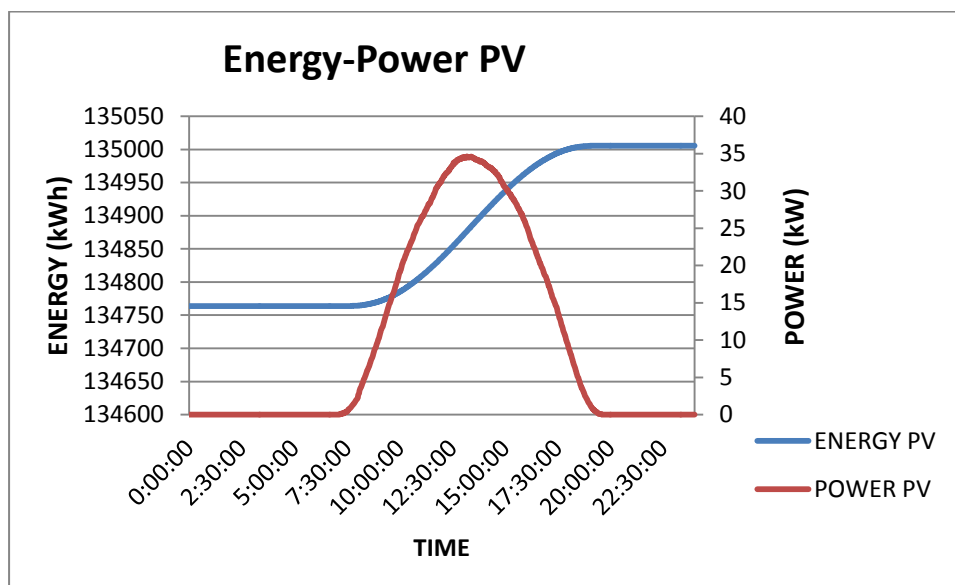
- Η καμπύλη της ισχύος παρουσιάζει αξιοσημείωτες διακυμάνσεις και αποκλίνει από την ομαλή πορεία των προηγούμενων ημερών. Προφανώς η μορφολογία της καμπύλης οφείλεται σε παρουσιά νεφώσεων που διαταράσσουν την ομοιόμορφη πρόσληψη ηλιακής ακτινοβολίας από την διάταξη των φωτοβολταϊκών.

#### 7.1.1.2 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ισχύς του ηλεκτρικού ρεύματος προερχόμενου από την διάτξη των φωτοβολταϊκών επιφανειών τροφοδοτεί το σύστημα με ηλεκτρική ενέργεια. Το σύστημα καταγραφής EMCS παρέχει την ενεργειακή στάθμη της εισερχόμενης ενέργειας ανά 1 λεπτό (ομοίως με την καταγραφή της ισχύος). Στη δεδομένη καταγραφόμενη χρονική στιγμή αντιστοιχεί τιμή ενεργειακής φόρτισης (Real Energy into the load) η οποία δίνει την ολική ηλεκτρική ενέργεια που έχει προσφέρει στο σύστημα η διάταξη φωτοβολταϊκών έως την χρονική στιγμή αυτή.

Η πορεία της εισερχόμενης ισχύος είναι προφανώς αύξουσα δεδομένου ότι παρατηρείται μόνο εισροή εντός του συστήματος.

Το ακόλουθο διάγραμμα αποδίδει την διακύμανση της τιμής της εισερχόμενης ενέργειας για την 1η ημέρα της περιόδου μελέτης, δηλαδή την 1/5/2012 κατά αντιπαραβολή με την καμπύλη ισχύος.

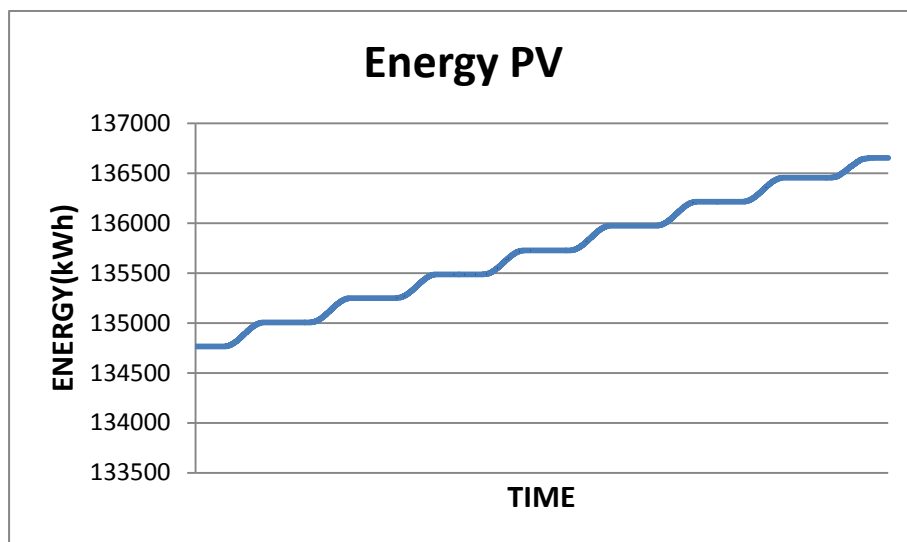


**Διάγραμμα 4:** Διακύμανση καμπύλης ισχύος φωτοβολταϊκών επιφανειών και καμπύλης ενεργειακής στάθμης για την 1/5/2012.

- Η καμπύλη της παρεχόμενης ενέργειας διαθέτει μηδενική κλίση κατά τα διαστήματα των νυχτερινών και πρώτων πρωινών ωρών λόγω απουσίας ηλιοφάνειας. Η κλίση αυξάνει κατά την ανατολή του ηλίου και γίνεται μέγιστη ταυτόχρονα με την μέγιστη ισχύ. Κατά το διάστημα της δύσης του ηλίου η κλίση της ευθείας μειώνεται.

- Τελικά το ολικό παρεχόμενο ποσό της ενέργειας στο σύστημα εκμέρους των φωτοβολταϊκών προκύπτει ως διαφορά της ενεργειακής στάθμης μεταξύ της αρχής και του τέλους της ημέρας.

Ακολούθως μπορεί να αποδοθεί η ενεργειακή μεταβολή καθ'όλο το διάστημα της περιόδου μελέτης.



**Διάγραμμα 5:** Διακύμανση καμπύλης ενεργειακής στάθμης για την περίοδο μελέτης 1/5/2012-8/5/2012.

- Η καμπύλη της ολικής αποδιδόμενης στο σύστημα ενέργειας αποτελείται από 8 ανοδικά τμήματα όμοια με την καμπύλη ενέργειας του διαγράμματος 4. Η ενέργεια που εισρέει στο σύστημα αντιστοιχεί στα χρονικά διαστήματα ηλιοφάνειας, με αποτέλεσμα συνολικά να δίδεται η εικόνα συνεχών και ίσων διαστημάτων ανόδων-παύσεων.

Συνοπτικά η ολική εικόνα παραγόμενης ενέργειας και μέγιστης αναπτυσσόμενης ισχύος της διάταξης φωτοβολταϊκών μπορούν να αποδοθούν στον ακόλουθο πίνακα.

**Πίνακας 10:** Παραγόμενη ενέργεια, μέγιστη ισχύς και λόγος μέγιστης ισχύος προς ονομαστική τιμή για κάθε ημέρα της περιόδου μελέτης.

Date	Energy delivered to building (kWh)	Peak Power (kW)	Peak Power to Nominal Power(%)
1/5/2012	242,189	34,610	73,953
2/5/2012	244,013	34,490	73,697
3/5/2012	237,087	33,750	72,115
4/5/2012	239,012	33,530	71,645
5/5/2012	247,879	34,470	73,654
6/5/2012	240,154	33,890	72,415
7/5/2012	240,032	34,480	73,675
8/5/2012	198,570	35,950	76,816

### 7.1.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

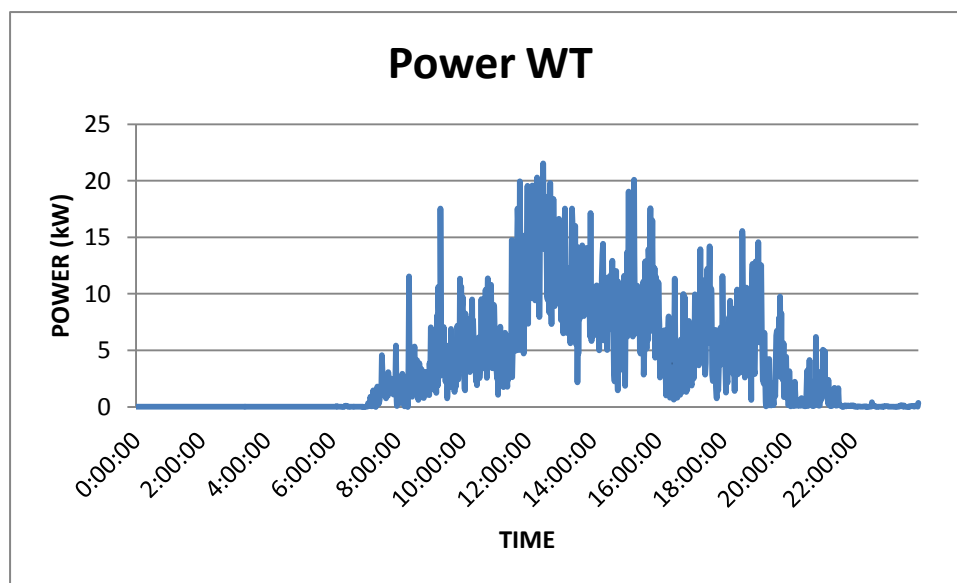
Στο ακόλουθο χωρίο θα μελετηθεί η συμπεριφορά και η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την διάταξη ανεμογεννητριών.

Η καταγραφή της αναπτυσσόμενης ισχύος αλλά και της ολικής προσφερόμενης ενέργειας είναι συνεχής και παρέχεται σε αναφορά μορφής αρχείου Excel για την περίοδο μελέτης **1/5/2012** εως **8/5/2012**. Η καταγραφή επιτυγχάνεται μέσω του συστήματος EMCS (Energy Management and Control System) όπου παρέχονται ανά 1 λεπτό (min) οι τιμές αναπτυσσόμενης ισχύος της διάταξης καθώς και η ενεργειακή στάθμη παραγωγής ενέργειας.

#### 7.1.2.1 ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Η αναπτυσσόμενη ισχύς των επιφανειών καταγράφεται με συχνότητα ενός λεπτού και προφανώς αποτελεί συνάρτηση της έντασης (ταχύτητας) καθώς και της διεύθυνσης των τοπικών ανέμων.

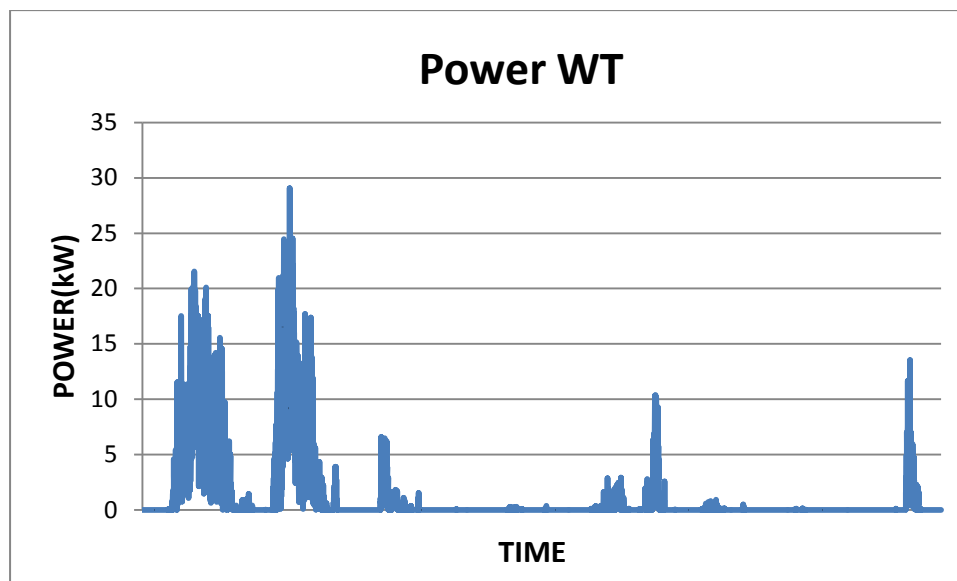
Στο ακόλουθο διάγραμμα μπορεί να φανεί η διακύμανση της αναπτυσσόμενης ισχύος των ανεμογεννητριών κατά την διάρκεια της πρώτης ημέρας της περιόδου μελέτης **1/5/2012**.



**Διάγραμμα 6:** Διακύμανση καμπύλης ισχύος ανεμογεννητριών για την 1/5/2012.

- Η ισχύς που αναπτύσσει η διάταξη των ανεμογεννητριών εξαρτάται από την ταχύτητα και διεύθυνση των τοπικών ανέμων.
- Η διαταξη διαθέτει την ικανότητα ανάπτυξης υψηλής ισχύος (έως και 21-22 kW εν προκειμένω).
- Η ισχύς που αναπτύσσουν οι ανεμογεννήτριες παρουσιάζει έντονες αυξομειώσεις (μη ομαλή μορφολογία διαγράμματος) λόγω της έντονα διαλείπουσας συμπεριφοράς του ανέμου.

Η διακύμανση της αναπτυσσόμενης ισχύος της διάταξης των ανεμογεννητριών μπορεί να φανεί μακροσκοπικά κατά το σύνολο του διαστήματος της περιόδου μελέτης.



**Διάγραμμα 7:** Διακύμανση καμπύλης ισχύος φωτοβολταϊκών επιφανειών για την περίοδο μελέτης 1/5/2012 - 8/5/2012.

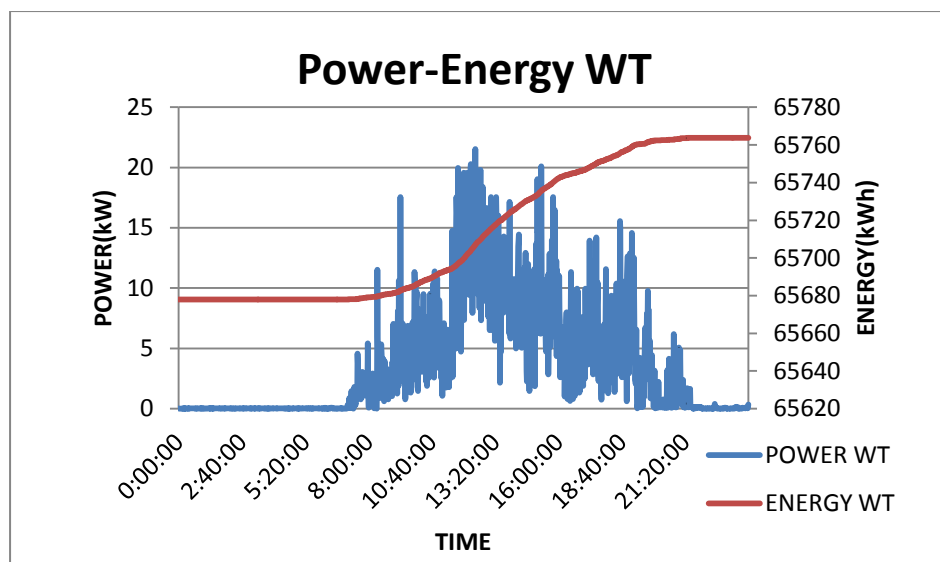
- Μελετώντας μακροσκοπικά την αυξομείωση της ισχύος του ηλεκτρικού ρεύματος σε όλη την έκταση της περιόδου μελέτης, καθίσταται σαφές ότι εξαιρουμένων των δύο πρώτων ημερών, η συνεισφορά των ανεμογεννητριών στο σύστημα είναι εξαιρετικά χαμηλή. Η ισχύς της διάταξης μετά το πέρας της 2/8/2012 διατηρεί σχεδόν μηδενική τιμή με εξαίρεση λίγες ανόδους σε όχι ιδιαίτερα υψηλές τιμές και μικρής διάρκειας.
- Προκύπτει ως συμπέρασμα η επικράτηση πρακτικά άπνοιας στην τοποθεσία της εγκατάστασης κατά το 8ήμερο λειτουργίας, με εξαίρεση τις πρώτες δύο ημέρες.

#### 7.1.2.2 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ισχύς του ηλεκτρικού ρεύματος προερχόμενου από την διάτξη των ανεμογεννητριών τροφοδοτεί το σύστημα με ηλεκτρική ενέργεια. Το σύστημα καταγραφής EMCS παρέχει την ενεργειακή στάθμη της εισερχόμενης ενέργειας ανά 1 λεπτό (ομοίως με την καταγραφή της ισχύος). Στη δεδομένη καταγραφόμενη χρονική στιγμή αντιστοιχεί τιμή ενεργειακής φόρτισης (Real Energy into the load) η οποία δίνει την ολική ηλεκτρική ενέργεια που έχει προσφέρει στο σύστημα η διάταξη ανεμογεννητριών έως την χρονική στιγμή αυτή.

Η πορεία της εισερχόμενης ισχύος είναι προφανώς αύξουσα δεδομένου ότι παρατηρείται μόνο εισροή εντός του συστήματος.

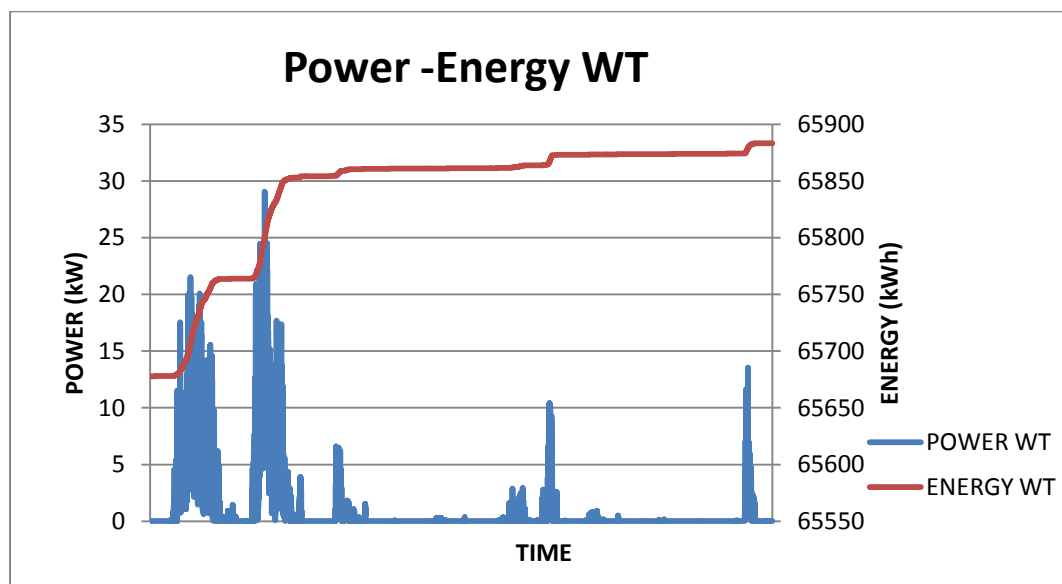
Το ακόλουθο διάγραμμα αποδίδει την διακύμανση της τιμής της εισερχόμενης ενέργειας για την 1η ημέρα της περιόδου μελέτης, δηλαδή την 1/5/2012 κατά αντιπαραβολή με την καμπύλη ισχύος.



**Διάγραμμα 8:** Διακύμανση καμπύλης ισχύος ανεμογεννητριών και καμπύλης ενεργειακής στάθμης για την 1/5/2012.

- Παρατηρείται για την συγκεκριμένη ημέρα η ουσιαστική αύξηση της εισρέουσας ενέργειας στο σύστημα ως απότοκο της λειτουργίας της διάταξης των ανεμογεννητριών σε ικανοποιητικές τιμές ισχύος (λαμβάνοντας υπόψιν την ονομαστική τιμή των 36 kW).

Ακολούθως μπορεί να αποδοθεί η ενεργειακή μεταβολή καθ'όλο το διάστημα της περιόδου μελέτης επίσης κατά αντιπαραβολή με την ισχύ.



**Διάγραμμα 9:** Διακύμανση καμπύλης ισχύος ανεμογεννητριών και καμπύλης ενεργειακής στάθμης για την περίοδο μελέτης 1/5/2012-8/5/2012.

- Η διακύμανση της καμπύλης ενεργειακής στάθμης ακολουθεί την καμπύλη της ισχύος. Σχεδόν το σύνολο της ενέργειας που παράχθηκε από τις ανεμογεννήτριες, προήλθε από το πρώτο 2-ήμερο.



**Πίνακας 11:** Παραγόμενη ενέργεια, μέγιστη ισχύς και λόγος μέγιστης ισχύος προς ονομαστική τιμή για κάθε ημέρα της περιόδου μελέτης.

Date	Energy delivered to building (kWh)	Peak Power (kW)	Peak Power to Nominal Power(%)
1/5/2012	85,822	21,540	59,833
2/5/2012	90,537	29,050	80,694
3/5/2012	6,587	6,610	18,361
4/5/2012	0,385	0,310	0,861
5/5/2012	2,594	2,940	8,167
6/5/2012	9,770	10,400	28,889
7/5/2012	0,401	0,490	1,361
8/5/2012	9,386	13,550	37,639

### 7.1.3 ΣΥΝΘΕΣΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ Φ/Β & ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

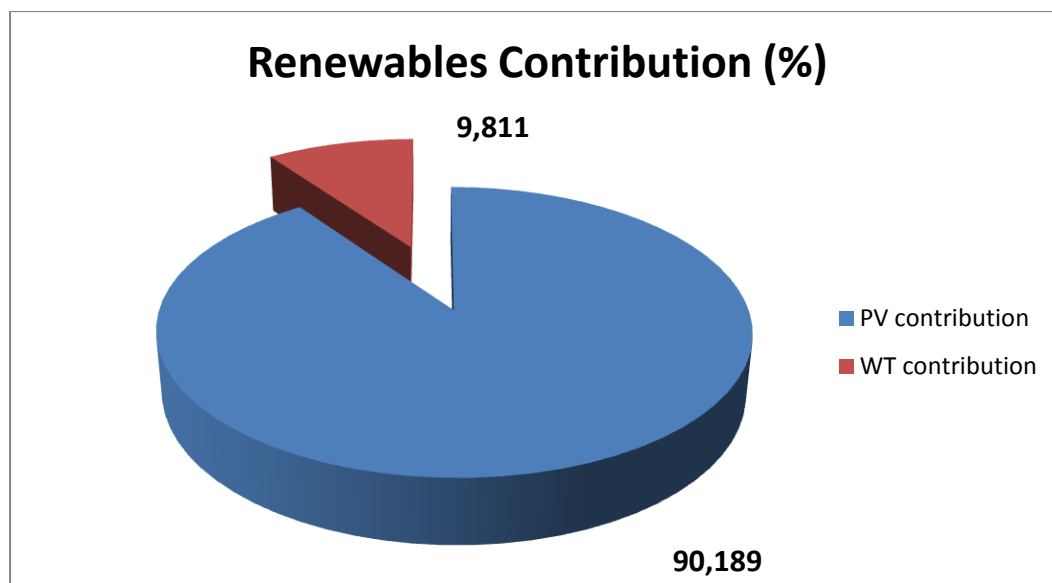
Η διάταξη των φωτοβολταϊκών επιφανειών, όπως και η διάταξη των ανεμογεννητριών αποτελούν τις μοναδικές πηγές λήψης ενέργειας από το περιβάλλον.

Προκύπτει λοιπόν ως λογική συνέπεια η αξιολόγηση της δυναμικότητας κάθε πηγής. Η δυναμικότητα της κάθε πηγής αναμένεται να αφορά στην ικανότητα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας προς το σύστημα.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα ολικά ποσά ενέργειας συνεισφοράς της κάθε πηγής στο σύστημα και ακολούθως η ποσοστιαία αναλογία τους, σε ημερήσιο και συνολικό επίπεδο.

**Πίνακας 12:** Παραγόμενη ενέργεια εκ μέρους των ΑΠΕ και ποσοστιαία συνεισφορά εκάστης.

Date	Energy delivered to building (kWh) PV	Energy delivered to building (kWh) WT	PV(%) Contribution	WT(%) Contribution
1/5/2012	242,189	85,822	73,836	26,164
2/5/2012	244,013	90,537	72,938	27,062
3/5/2012	237,087	6,587	97,297	2,703
4/5/2012	239,012	0,385	99,839	0,161
5/5/2012	247,879	2,594	98,964	1,036
6/5/2012	240,154	9,770	96,091	3,909
7/5/2012	240,032	0,401	99,833	0,167
8/5/2012	198,570	9,386	95,487	4,513
<b>TOTAL</b>	<b>1.888,936</b>	<b>205,482</b>	<b>90,189</b>	<b>9,811</b>



**Διάγραμμα 10:** Ποσοστιαία συνεισφορά ΑΠΕ στο σύστημα.

Παρατηρήσεις:

- Η συνεισφορά των ανεμογεννητριών στο σύστημα παρουσιάζει αξιόλογες τιμές κυρίως κατά το διάστημα των πρώτων δύο ημερών. Κατά το διάστημα 3/5/2012-8/5/2012 η παραγωγικότητά τους φθίνει σημαντικά και η δυνατότητα προσφοράς ενέργειας στο σύστημα σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά αποτυπώνεται σαφώς στο ολικό ποσοστό συμμετοχής το οποίο ανέρχεται μόλις στο **9,811%**.
- Αντιθέτως οι φωτοβολταϊκές επιφάνειες χαρακτηρίζονται αφενός από σταθερότητα στην παραγωγή ενέργειας (τα ημερήσια ποσά ενέργειας δεν διαφέρουν ουσιαστικά μεταξύ τους) και εξαιρετικά μεγαλύτερη δυναμικότητα. Η συμβολή τους στις εισροές ενέργειας των ΑΠΕ ανέρχεται σε **90,189%**.
- Η παρούσα εικόνα της αναλογίας συνεισφοράς φωτοβολταϊκών-ανεμογεννητριών πάντως δεν επιτρέπει την γενίκευση για την διαχρονική συμβολή και αξία κάθε πηγής στο σύστημα. Οι φωτοβολταϊκές επιφάνειες φαίνεται να αναπτύσσουν κατά κανόνα μεγαλύτερες τιμές ισχύος, οι οποίες ωστόσο αντιστοιχούν σε αυστηρά ορισμένο χρονικό διάστημα εντός της ημέρας. Οι ανεμογεννήτριες τείνουν να λειτουργούν σε χαμηλότερες τιμές ισχύος -κάτι που σχετίζεται και με την συνολικά χαμηλότερη εγκατεστημένη ισχύ- ωστόσο δεν περιορίζονται χρονικά, καθώς μπορούν να λειτουργούν τόσο την νύχτα όσο και τη ημέρα.

## 7.2 ΚΤΙΡΙΟ ΕΠΙΔΕΙΞΗΣ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ

Το κτίριο διαθέτει συσκευές οι οποίες καταναλώνουν ηλεκτρικό ρεύμα μεταβάλλοντας ανά διαστήματα την φόρτιση του κτιρίου. Ο προσδιορισμός των καταναλώσεων των εγκατεστημένων συσκευών εντός του κτιρίου καθίσταται απαραίτητος για την διαμόρφωση του τελικού ισοζυγίου του συστήματος.

Όλες οι εντός του κτιρίου συσκευές (οι οποίες μπορούν να αποκαλούνται "φορτία") καταμετρώνται ως προς την ένδειξη της ισχύος και ως προς την ενεργειακή κατανάλωση μέσω του συστήματος EMCS. Οι αναφορές του συστήματος καταγραφής παρέχονται σε αρχείο τύπου Excel προς επεξεργασία. Στο αρχείο αυτό παρέχονται οι τιμές κατανάλωσης ισχύος (kW), καθώς και η τιμή αθροιστικά καταναλωμένης ενέργειας σε μονάδες kWh. Η ένδειξη της ενέργειας κατανάλωσης προφανώς αυξάνεται προϊόντος του χρόνου. Η συχνότητα καταγραφής ισχύος και ενεργειακής στάθμης είναι ανά 1 λεπτό. Η μεθοδολογία καταγραφής είναι πανομοιότυπη με την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στις μετρήσεις των ΑΠΕ.

Τα φορτία του κτιρίου ομαδοποιούνται σε 4 βασικές κατηγορίες:

1. Θάλαμος ελέγχου (Control Room).
2. 2nd Switchboard.
3. Αίθουσα ισογείου (Ground floor). Η αίθουσα αποτελεί τον κεντρικό χώρο και περιλαμβάνει διαφορετικές συσκευές όπως φωτισμό ή air-condition.
4. Σοφίτα (Attic).

Η κάθε κατηγορία παρουσιάζει κατανάλωση ενέργειας η οποία όπως θα φανεί δεν είναι ομοιόμορφη σε συνάρτηση με τον χρόνο. Ωστόσο αυτό που ενδιαφέρει είναι η ολική κατανάλωση που παρουσίασε κάθε κατηγορία εντός της περιόδου μελέτης προκειμένου να προσδιοριστεί η ολική κατανάλωση του κτιρίου.

Ο ακόλουθος πίνακας αποδίδει την κατανάλωση καθεμίας από τις 4 επιμέρους κατηγορίες:

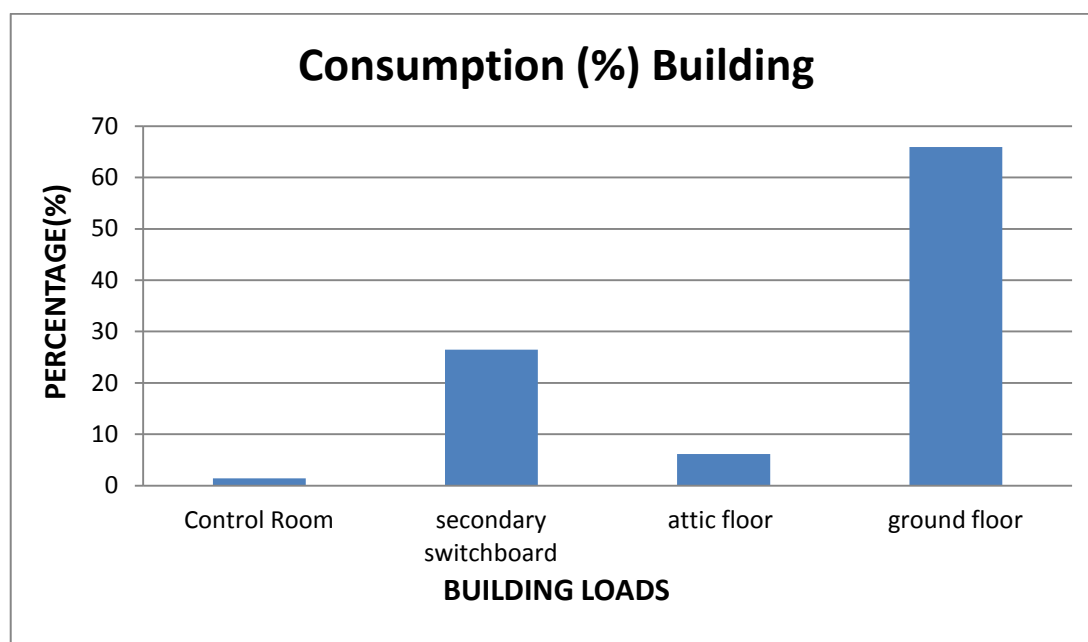
**Πίνακας 13:** Ενεργειακή κατανάλωση κάθε κατηγορίας φορτίου καθώς και του κτιρίου συνολικά.

Date	Energy consumed by Control Room lighting and fan-coil (kWh)	Energy consumed by secondary switchboard(kWh)	Energy consumed by attic floor (kWh)	Energy consumed by ground floor (kWh)	Total Energy consumed (kWh)
1/5/2012	3,364	47,938	13,929	127,435	192,666
2/5/2012	3,380	47,988	13,964	122,736	188,068
3/5/2012	3,376	47,627	13,874	134,407	199,284
4/5/2012	3,356	47,249	13,845	129,627	194,077
5/5/2012	0,207	47,291	2,970	98,099	148,567
6/5/2012	0,208	48,126	2,967	87,651	138,952
7/5/2012	3,383	48,021	13,946	124,175	189,525
8/5/2012	3,369	48,173	13,895	122,425	187,862
<b>TOTAL</b>	<b>20,643</b>	<b>382,413</b>	<b>89,390</b>	<b>946,555</b>	<b>1.439,001</b>

Ακολούθως μπορούν να προκύψουν τα ποσοστά κατανάλωσης κάθε ομάδας φορτίων:

**Πίνακας 14:** Ποσοστό συμμετοχής κάθε κατηγορίας φορτίου του κτιρίου.

Date	Energy consumed by Control Room lighting and fan-coil (kWh) (%)	Energy consumed by secondary switchboard(kWh) (%)	Energy consumed by attic floor (kWh) (%)	Energy consumed by ground floor (kWh) (%)
1/5/2012	1,742	24,827	7,220	66,211
2/5/2012	1,781	25,398	7,362	65,459
3/5/2012	1,683	23,833	6,921	67,564
4/5/2012	1,710	24,171	7,061	67,057
5/5/2012	0,139	31,788	1,992	66,082
6/5/2012	0,149	34,571	2,134	63,147
7/5/2012	1,771	25,216	7,305	65,708
8/5/2012	1,781	25,559	7,350	65,310
<b>TOTAL</b>	<b>1,424</b>	<b>26,460</b>	<b>6,171</b>	<b>65,945</b>



**Διάγραμμα 11:** Ποσοστό κατανάλωσης κάθε κατηγορίας φορτίου.

- Η ποσοστιαία κατανομή της κατανάλωσης κάθε τμήματος του κτιρίου αποδίδει μία καλή εικόνα των αναγκών που παρουσιάζονται.
- Η κατανάλωση αντιστοιχεί κατά κύριο ποσοστό στα φορτία του ισογείου δηλαδή τα φορτία που συνδέονται με την λειτουργία του κλιματισμού και τον φωτισμό.
- Σημαντική ενεργειακή επιβάρυνση προκύπτει από την λειτουργία του πίνακα ελέγχου, όπου τα είδη και ο αριθμός των εγκατεστημένων συσκευών, καθώς και η συνεχής λειτουργία τους απορροφούν υψηλό ποσοστό της εισρέουσας στο σύστημα ενέργειας.

### 7.3 ΔΙΑΤΑΞΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ

#### 7.3.1 ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ - ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

Στο ακόλουθο χωρίο θα μελετηθεί η συμπεριφορά και η δυνατότητα παραγωγής αερίου H<sub>2</sub> από την συσκευή Electrolyser καθώς και η απαιτούμενη ενεργειακή κατανάλωση. Ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς αυτής επιτυγχάνεται από τις μετρήσεις και υπολογισμούς συγκεκριμένων μεγεθών. Η μελέτη της λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης πραγματοποιήθηκε για το χρονικό διάστημα **1/5/2012** έως **8/5/2012**. Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε κατά συνεχή τρόπο μέσω του συστήματος EMCS.

Η συσκευή τίθεται σε λειτουργία όταν η κατάσταση φόρτισης του συστήματος (state of charge) υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο όριο, δηλαδή όταν η παραγόμενη ισχύς από τις ανανεώσιμες πηγές επαρκεί προκειμένου να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες τόσο των φορτίων του κτιρίου, όσο και της μονάδας ηλεκτρόλυσης.

Κατά το διάστημα μελέτης (**1/5/2012** έως **8/5/2012**) η μονάδα ετέθη σε λειτουργία τις ώρες μέγιστης ηλιοφάνειας (9:00 minimum - 16:50 maximum) εντός κάθε ημέρας, προφανώς λόγω της πλούσιας συγκομιδής ενέργειας από την συνεργασία φωτοβολταϊκών επιφανειών και ανεμογεννητριών. Η λειτουργία της μονάδας δεν ήταν συνεχής, αλλά τμηματική. Πραγματοποιήθηκε σε κύκλους (sessions) ηλεκτρόλυσης με κυμαινόμενη χρονική διάρκεια και με την μεσολάβηση σύντομων διαλειμμάτων, δηλαδή παύσεων λειτουργίας. Οι ενδιάμεσες διακοπές της λειτουργίας ήταν κατά κύριο λόγο διάρκειας 5 min. Η μονάδα λειτούργησε κάθε ημέρα αυστηρά μέσα στα χρονικά όρια του προαναφερθέντος διαστήματος, ωστόσο υπήρξαν διαφοροποιήσεις στην ώρα έναρξης και λήξης κάθε επιμέρους κύκλου λειτουργίας, στην συνολική διάρκεια λειτουργίας ανά ημέρα, καθώς και στο μέγιστο χρονικά κύκλο εντός της κάθε ημέρας. Ο ακόλουθος πίνακας συνοψίζει τις ώρες των κύκλων λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης για κάθε ημέρα της περιόδου μελέτης. Στον πίνακα επισημαίνονται εμφανώς (με έντονη γραφή ή Bold) οι μεγαλύτεροι σε χρονική διάρκεια κύκλοι, καθώς και η διάρκεια του καθενός σε λεπτά (min)

**Πίνακας 15:** Διαστήματα (κύκλοι) ημερήσιας λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης

1/5/2012	2/5/2012	3/5/2012	4/5/2012
9:54-10:54	9:04-10:44:10	10:04-11:04	<b>10:19-11:29(70min)</b>
<b>10:59-15:59(300min)</b>	<b>10:49:30-14:34(225)</b>	11:09-12:09	11:34-12:34
16:04-17:04	14:39-15:54	<b>12:14-13:14(60min)</b>	12:39-13:37
17:09-18:09	15:59-16:59	13:19-14:19	13:49-13:59
		14:24-15:24	14:04-15:04
		15:29-16:29	15:09-16:09
			16:14-17:14

5/5/2012	6/5/2012	7/5/2012	8/5/2012
9:54-10:59	9:54-10:54	10:34-11:34	10:24-11:24
11:04-12:04	10:59-11:59	11:39-12:39	11:29-12:29
<b>12:09-14:44(155min)</b>	<b>12:04-13:24(80min)</b>	12:44-13:44	12:34-13:34
14:49-15:49	13:29-14:29	13:49-14:49	13:39-14:39
15:54-16:54	14:34-15:34	<b>14:54-15:54(60min)</b>	<b>14:44-15:44(60min)</b>
17:04-18:04	15:39-16:39	15:59-16:59	15:49-16:49

### 7.3.2 ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Τα μεγέθη των οποίων η μελέτη θα αποδώσει την συμπεριφορά λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Μετρούμενα μεγέθη: Τα μεγέθη των οποίων οι τιμές παρέχονται από κατάλληλους αισθητήρες εντός του συστήματος.
- Υπολογιζόμενα μεγέθη: Τα μεγέθη των οποίων οι τιμές προκύπτουν από υπολογισμούς με βάση τα μετρούμενα μεγέθη.

#### 7.3.2.1 ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ

Τα μετρούμενα μεγέθη είναι ονομαστικά:

1. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε μονάδες kWh.
2. Η κατανάλωση ισχύος σε μονάδες kW.
3. Η πίεση εντός των προσωρινών αποθηκών H<sub>2</sub> (buffers) και εντός της μόνιμης αποθήκης υψηλής πίεσης H<sub>2</sub> (storage) σε μονάδες bar.

[Η καταγραφή των παραπάνω μεγεθών πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονα και με βήμα (χρονική διάρκεια μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων) 1 min. Τα αποτελέσματα της καταγραφής συντάχθηκαν σε ενιαίο φύλλο αναφοράς του προγράμματος Excel όπου για κάθε λεπτό είναι διαθέσιμες οι τιμές κατανάλωσης ενέργειας, κατανάλωσης ισχύος, πίεσης προσωρινών αποθηκών και πίεσης μόνιμης αποθήκης.]

4. Ο συντελεστής παραγωγής (production factor). Είναι αδιάστατο μέγεθος και εκφράζει το εκατοστιαίο ποσοστό παραγωγής του H<sub>2</sub> επί της ονομαστικής τιμής όγκου παραγωγής (4 Nm<sup>3</sup>/hr).

[Η καταγραφή του συντελεστή παραγωγής για το ίδιο χρονικό διάστημα πραγματοποιήθηκε σε ξεχωριστά ημερήσια φύλλα αναφοράς του προγράμματος Excel όπου η λήψη μετρήσεων ήταν συνεχής και σε βήμα 10sec. Στο ίδιο φύλλο αναφοράς παρέχονται επιπροσθέτως τιμές διαφοράς δυναμικού και έντασης ρεύματος εντός των ηλεκτρολυτικών κελιών, τιμές θερμοκρασίας του ηλεκτρολύτη (διάλυμα NaOH) και κελιών, καθώς και πίεσης εξόδου των παραγόμενων αερίων (H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>).]

#### 7.3.2.2 ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ

Τα υπολογιζόμενα μεγέθη προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρούμενων μεγεθών και είναι ονομαστικά:

1. Ο όγκος του παραγόμενου H<sub>2</sub> σε μονάδες Nm<sup>3</sup>.
2. Ο όγκος του αποθηκευμένου H<sub>2</sub> σε μονάδες Nm<sup>3</sup>.
3. Ο όγκος της απώλειας H<sub>2</sub> σε μονάδες Nm<sup>3</sup>.

4. Η ειδική κατανάλωση (specific yield) σε μονάδες kWh/Nm<sup>3</sup>. Το μέγεθος αυτό αποτελεί ένδειξη της απόδοσης του electrolyser και μέτρο σύγκρισης για άλλες συσκευές του ίδιου τύπου.

5. Η απόδοση της συσκευής (efficiency) ως εκατοστιαίο ποσοστό και αδιάστατο μέγεθος. Εκφράζει τον λόγο της περιεχόμενης χημικής ενέργειας του παραγόμενου όγκου H<sub>2</sub> (σε ανώτερη θερμογόνο δύναμη HHV) προς την ηλεκτρική ενέργεια που δαπανήθηκε για την παραγωγή του όγκου αυτού.

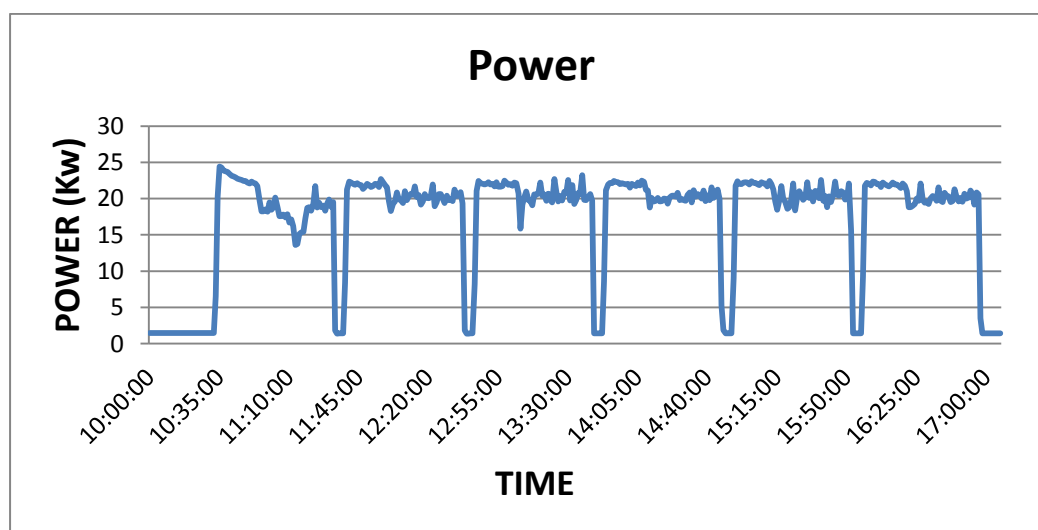
### 7.3.3 ΙΣΧΥΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ

Η κατανάλωση ισχύος όπως και η κατανάλωση ενέργειας καταγράφονται από ειδικό μετρητή εγκατεστημένο στην μονάδα ηλεκτρόλυσης.

Η καταγραφόμενη τιμή της ισχύος της συσκευής αποτελεί την άμεση ένδειξη έναρξης και λήξης της διαδικασίας ηλεκτρόλυσης. Κατά την έναρξη κάθε κύκλου ηλεκτρόλυσης καταγράφεται μία απότομη αύξηση της τιμής της ισχύος εντός περίπου ενός λεπτού, ενώ αντιστοίχως σημειώνεται απότομη πτώση κατά την λήξη. Η ονομαστική τιμή λειτουργίας ανέρχεται στα 22,3 kW, εντούτοις όπως θα φανεί παρακάτω η τιμή της ισχύος διακυμαίνεται.

Είναι αξιοσημείωτο ότι η τιμή της ισχύος δεν μηδενίστηκε σε κανένα σημείο της περιόδου μελέτης λόγω της συνεχούς ροής ηλεκτρικού ρεύματος σε περιφερειακά κυκλώματα. Η μονάδα τότε απλώς ευρίσκεται σε αδρανή κατάσταση (Idle). Η διατήρηση σε λειτουργία των περιφερειακών αυτών κυκλωμάτων -αποτέλεσμα της μόνιμης σύνδεσης με το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας- καταγράφεται από τους μετρητές, και κυμαίνεται στο διάστημα 1,40 kW έως 1,46 kW. Οι τιμές αυτές ισχύος προφανώς δεν επαρκούν ώστε να προκαλέσουν υδροηλεκτρόλυση.

Προκειμένου να προσδιοριστεί η απαίτηση της συσκευής σε ισχύ, αρκεί η μελέτη διαγραμμάτων διακύμανσης της καμπύλης ισχύος. Στο ακόλουθο διάγραμμα χαράσσεται η καμπύλη της ένδειξης ισχύος για το χρονικό διάστημα **10:00 - 17:00** της **7/5/2012**.



**Διάγραμμα 12:** Καμπύλη διακύμανσης της ισχύος λειτουργίας της συσκευής.

- Η μορφολογία της καμπύλης καταδεικνύει έξι διακριτούς κύκλους ηλεκτρόλυσης με ολιγόλεπτες διακοπές της λειτουργίας.
- Η ισχύς κατά την πλήρη λειτουργία της συσκευής κυμαίνεται μεταξύ των 20 kW, χωρίς ιδιαίτερες αποκλίσεις εκτός από τον πρώτο κύκλο ηλεκτρόλυσης που παρατηρείται μία κάμψη στην απόδοση.

#### 7.3.4 ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΙ ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΙΣΧΥΟΣ

Οι μετρήσεις παρέχουν την τιμή ισχύος ανά λεπτό (min) λειτουργίας επιτρέποντας με απλή θεώρηση τον εντοπισμό της μέγιστης τιμής που καταγράφεται, ενώ η μέση τιμή της ισχύος προκύπτει ως μέσος όρος των καταγεγραμμένων τιμών. Οι αναφορές συντάχθηκαν σε αρχείο Excel προκειμένου να μελετηθεί η καταναλισκόμενη ισχύς.

Η ανάλυση των μετρήσεων κατ'αυτό τον τρόπο για κάθε ημέρα συνολικά όσο και για τα εκτενέστερα χρονικά διαστήματα εντός κάθε ημέρας έδωσαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

**Πίνακας 16:** Αποτελέσματα υπολογισμών μέγιστης ισχύος για κάθε ημέρα.

Date	Peak Power (kW)
1/5/2012	24,47
2/5/2012	24,75
3/5/2012	25,12
4/5/2012	27,46
5/5/2012	25,4
6/5/2012	26,05
7/5/2012	24,44
8/5/2012	26,65

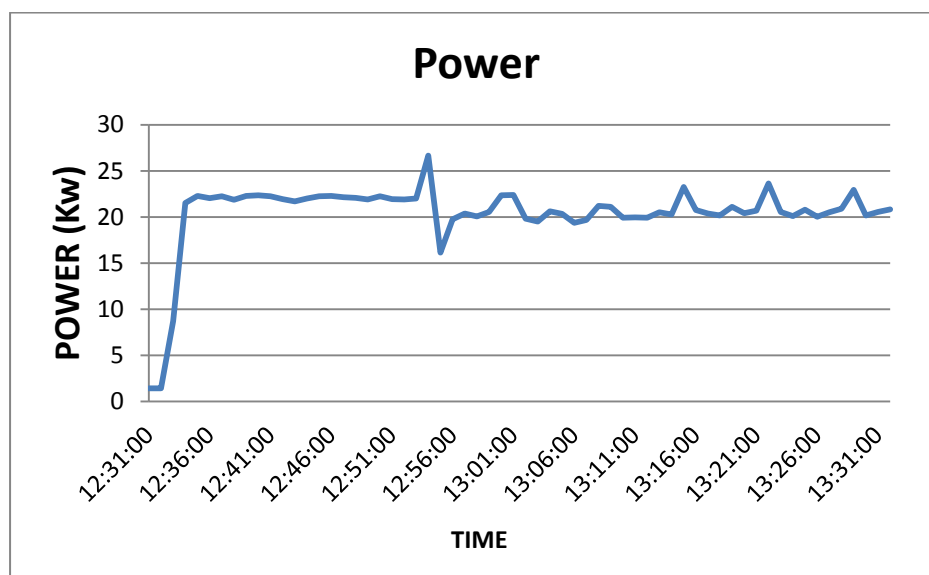
**Πίνακας 17:** Αποτελέσματα υπολογισμών μέγιστης και μέσης ισχύος για εκτενέστερα χρονικά συνεχή διαστήματα.

Date	Longest continuous operation (mins)	Maximum power consumed (kW)	Average power consumed (kW)
1/5/2012	300	23,92	19,987
2/5/2012	225	24,75	20,008
3/5/2012	60	23,95	20,738
4/5/2012	70	24,47	19,691
5/5/2012	155	23,75	20,645
6/5/2012	80	26,05	20,912
7/5/2012	60	22,55	20,64
8/5/2012	60	23,43	20,794

- Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων έγινε φανερό ότι ενώ η μέγιστη τιμή της ισχύος που καταναλώνεται ενίοτε υπερβαίνει την ονομαστική τιμή της συσκευής (22,3 kW), η μέση ισχύς λειτουργίας διατηρείται στα 20 kW.



Προς καλύτερη παρουσίαση των συμπερασμάτων παρατίθεται το ακόλουθο διάγραμμα όπου καταγράφεται η ισχύς για έναν κύκλο ηλεκτρόλυσης (συγκεκριμένα τον κύκλο **12:31 - 13:31** της 8/5/2012). Το διάγραμμα είναι αρκετά αντιπροσωπευτικό για οποιοδήποτε άλλο διάστημα λειτουργίας.



**Διάγραμμα 13:** Καμπύλη διακύμανσης της ισχύος λειτουργίας της συσκευής.

- Η καμπύλη της ισχύος δίνει την εικόνα σταθερής λειτουργίας της συσκευής. Είναι ευδιάκριτη μία απότομη αλλά σύντομη αυξομείωση της τιμής μεταξύ 26,65 kW έως 15,5 kW ενώ στο μεγαλύτερο τμήμα της διάρκειας η τιμή διατηρείται σχετικά σταθερή.

### 7.3.5 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η συσκευή ηλεκτρόλυσης διαθέτει μετρητή καταγραφής της καταναλισκόμενης ενέργειας σε μονάδες kWh. Ο μετρητής καταγράφει την στάθμη της κατανάλωσης με βήμα ενός λεπτού. Η τιμή της ενεργειακής κατανάλωσης για μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή είναι προφανώς μεγαλύτερη από οποιαδήποτε προηγούμενη χρονική στιγμή, τόσο κατά τα διαστήματα πλήρους λειτουργίας, όσο και κατά τα διαστήματα που η συσκευή βρίσκεται σε αδρανή κατάσταση (Idle). Κατά τη διάρκεια των διαστημάτων που η συσκευή βρίσκεται σε αδρανή κατάσταση υπάρχει μία ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας λόγω διατήρησης ροής ηλεκτρικού ρεύματος εντός διαφόρων κυκλωμάτων. Η ενεργειακή απαίτηση όμως γίνεται πολύ μεγαλύτερη κατά τα διαστήματα όπου η συσκευή τίθεται σε πλήρη λειτουργία πραγματοποιώντας ηλεκτρόλυση.

Η αυξητική τάση αυτή αποτυπώνεται στον πίνακα των μετρήσεων. Η διαφορά τιμών κατανάλωσης μεταξύ δύο διαδοχικών λεπτών σε διάστημα αδρανούς λειτουργίας είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών λεπτών κανονικής λειτουργίας. Οι μετρήσεις παρέχονται ομοίως σε αρχείο Excel.

Η διαφορά της τιμής κατανάλωσης αρχής και λήξης ενός διαστήματος λειτουργίας αποδίδει το ποσό της ενέργειας που κατανάλωσε η συσκευή κατά το διάστημα αυτό. Η τιμή της

καταναλισκόμενης ενέργειας για κάθε διάστημα λειτουργίας αποτελεί βασικό στοιχείο για την ερμηνεία της απόδοσης του συστήματος στην τελική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Η μαθηματική έκφραση είναι:

$$E_{\text{cons}} = E_{\text{end}} - E_{\text{start}}$$

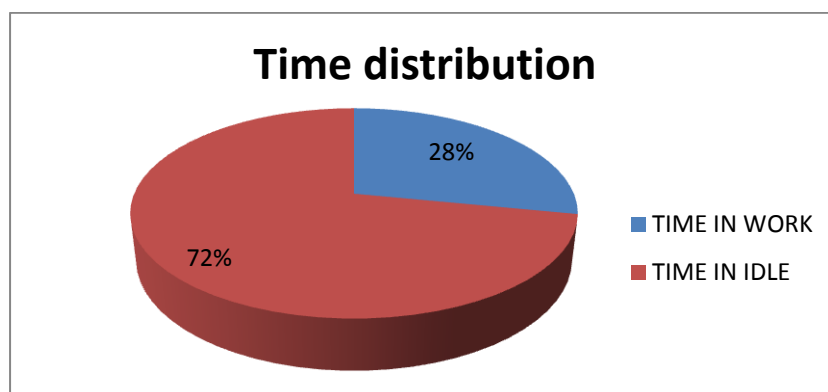
Η εφαρμογή της εξίσωσης στα διαστήματα λειτουργίας αποδίδει τα ποσά της ενέργειας που απαιτήσε η μονάδα ηλεκτρόλυσης. Η διαφορά της ενεργειακής κατανάλωσης για κάθε ημέρα ξεχωριστά είναι επίσης σημαντική διότι εκτός των διαστημάτων λειτουργίας, συμπεριλαμβάνει την κατανάλωση της μονάδας κατά την διάρκεια της αδρανούς κατάστασης.

**Πίνακας 18:** Αποτελέσματα υπολογισμών κατανάλωσης ενέργειας για κάθε ημέρα.

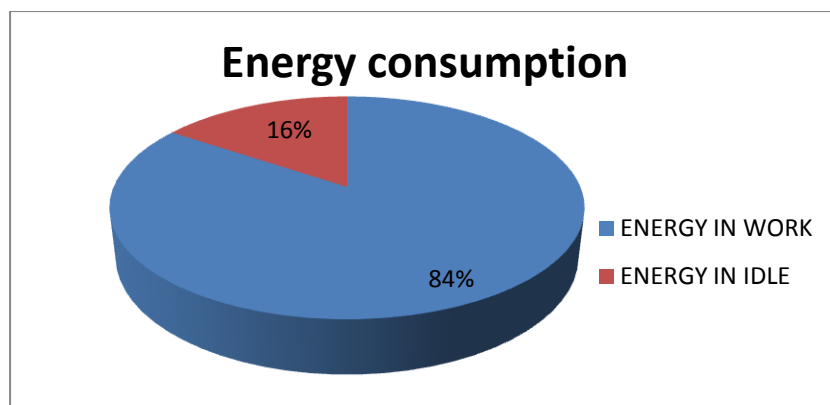
Date	Energy consumed (kWh)	Energy EL	Ratio energy EL/total (%)
1/5/2012	181,191	158,577	87,52
2/5/2012	174,844	151,515	86,66
3/5/2012	148,139	121,986	82,35
4/5/2012	153,372	126,969	82,78
5/5/2012	179,865	156,088	86,79
6/5/2012	155,002	129,2	83,35
7/5/2012	147,975	121,768	82,29
8/5/2012	148,122	122,026	82,38
<b>TOTAL</b>	<b>1288,51</b>	<b>1088,129</b>	<b>84,45</b>

Στην πρώτη στήλη φαίνεται η συνολική ενεργειακή απαίτηση της συσκευής για κάθε ημέρα ξεχωριστά. Στην δεύτερη στήλη φαίνεται το ποσό της ενέργειας που καταναλώθηκε κατά τα διαστήματα λειτουργίας (δηλαδή κατά τα διαστήματα που πραγματοποιήθηκε ηλεκτρόλυση). Η τελευταία στήλη αποδίδει το ποσοστό της ενέργειας που δαπανήθηκε για ηλεκτρόλυση ως προς την ολική ημερήσια ενεργειακή απαίτηση. Είναι εμφανές ότι το μεγαλύτερο μερίδιο της ολικής κατανάλωσης (84,45%)σε ηλεκτρική ενέργεια αντιστοιχεί στα διαστήματα πλήρους λειτουργίας.

Η σχηματική κατανομή της ώρας λειτουργίας και της καταναλισκόμενης ενέργειας αποδίδονται ως ακολούθως:



**Διάγραμμα 14:** Χρονική κατανομή λειτουργίας - αδρανούς κατάστασης.



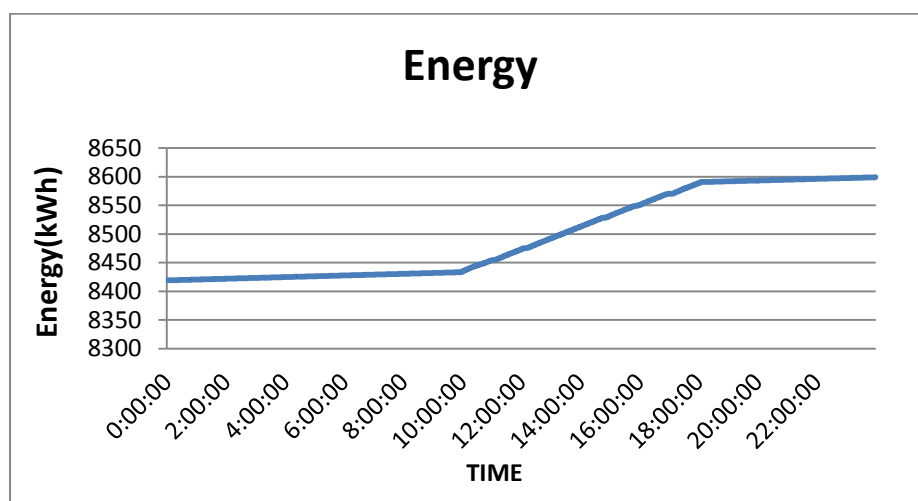
**Διάγραμμα 15:** Κατανομή καταναλισκόμενης ενέργειας λειτουργίας-αδρανούς κατάστασης.

Στον επόμενο πίνακα καταγράφονται οι τιμές κατανάλωσης ενέργειας από τον EL κατά τη διάρκεια των μέγιστων χρονικά διαστημάτων (sessions) ηλεκτρόλυσης για κάθε ημέρα ξεχωριστά.

**Πίνακας 19:** Αποτελέσματα υπολογισμών κατανάλωσης ενέργειας για εκτενέστερα χρονικά συνεχή διαστήματα.

Date	Longest continuous operation (mins)	Energy consumed (kWh)
1/5/2012	300	99,946
2/5/2012	225	74,715
3/5/2012	60	20,941
4/5/2012	70	22,661
5/5/2012	155	53,064
6/5/2012	80	27,556
7/5/2012	60	20,518
8/5/2012	60	20,554

Ακολούθως παρουσιάζεται το διάγραμμα καταγραφής της ενεργειακής κατανάλωσης για την 5/5/2012. Η τάση της καμπύλης καταδεικνύει την αυξητική πορεία κατά την πάροδο της ημέρας.



**Διάγραμμα 16:** Καμπύλη διακύμανσης της ενεργειακής κατανάλωσης της συσκευής.

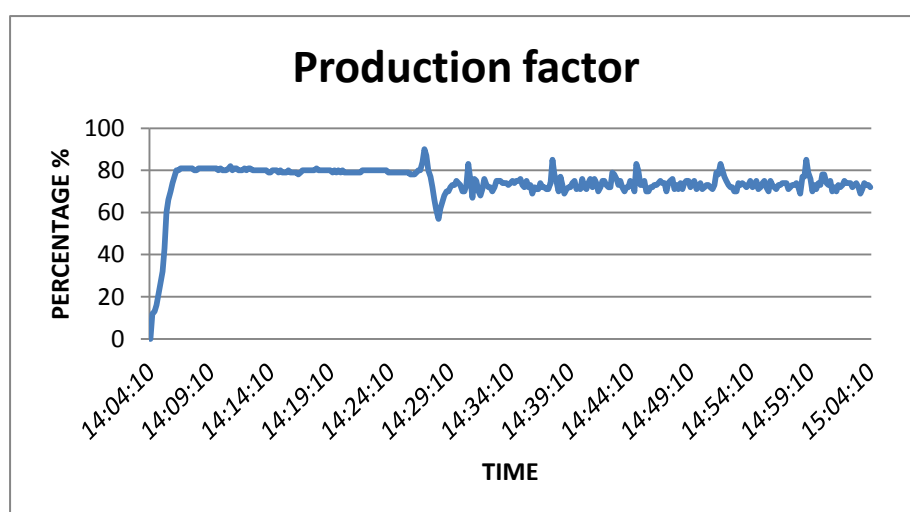
- Η καμπύλη αποτελείται από τρεις κλάδους κατά προσέγγιση μορφής ευθείας. Οι κλάδοι των χρονικών διαστημάτων 00:00-9:54 και 18:04-23:59 χαρακτηρίζονται από μικρή κλίση αποτέλεσμα της μειωμένης απαίτησης της μονάδας λόγω αδρανούς κατάστασης. Αντιθέτως ο κλάδος που αντιστοιχεί στο διάστημα 9:56-18:04 χαρακτηρίζεται από πολύ μεγαλύτερη κλίση. Η απότομα ανοδική τάση του διαγράμματος στον ενδιάμεσο κλάδο είναι προφανώς αποτέλεσμα της πλήρους λειτουργίας της μονάδας εντός του συγκεκριμένου διαστήματος σε κύκλους διάρκειας τουλάχιστον 60 λεπτών, συνοδευμένων από διακοπές των 5 λεπτών, οι οποίες δεν επηρεάζουν εμφανώς την πορεία της καμπύλης. Η ιδιαίτερα ενεργοβόρος διεργασία της ηλεκτρόλυσης αποτυπώνεται εμφανώς στο διάγραμμα.

### 7.3.6 ΟΓΚΟΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ H<sub>2</sub>

Η μονάδα ηλεκτρόλυσης διαθέτει εσωτερικό σύστημα μέτρησης της παραγόμενης ποσότητας H<sub>2</sub>. Η παραγόμενη ποσότητα εμφανίζεται ως ποσοστό επί του μέγιστου δυνατού όγκου παραγωγής, δηλαδή τα 4 Nm<sup>3</sup>/hr. Το ποσοστό αυτό ονομάζεται συντελεστή παραγωγής (production factor). Οι τιμές του Production factor παρέχονται από λεπτομερείς μετρήσεις εντός του EL (ως φύλλα αναφοράς του προγράμματος Excel )μαζί με τιμές που αφορούν το δυναμικό και το ηλεκτρικό ρεύμα των ηλεκτρολυτικών κελιών καθώς και την θερμοκρασία του ηλεκτρολυτικού διαλύματος. Ο προσδιορισμός της τιμής του συντελεστή πραγματοποιείται από ειδικούς αισθητήρες εντός της μονάδας ηλεκτρόλυσης κατόπιν σύγκρισης του ρυθμού παραγωγής σε πραγματικό χρόνο, με το εσωτερικό πρότυπο, το οποίο αντιστοιχεί στην ονομαστική τιμή.

Η καταγραφή λοιπόν της τιμής του συντελεστή παραγωγής αποτελεί την βάση του υπολογισμού του παραγόμενου όγκου H<sub>2</sub> από την μονάδα.

Στο ακόλουθο διάγραμμα μπορεί να προσδιοριστεί η διακύμανση της τιμής του συντελεστή παραγωγής στο χρονικό διάστημα λειτουργίας **14:04:10 - 15:04:10** (ωριαίος κύκλος λειτουργίας) της **4/5/2012**.



**Διάγραμμα 17:** Καμπύλη διακύμανσης του συντελεστή παραγωγής ως εκατοστιαίο ποσοστό εντός ενός κύκλου ηλεκτρόλυσης.

- Η τάση της καμπύλης αποκαλύπτει ότι ο Electrolyser αποδίδει με έναν συντελεστή παραγωγής κυμαινόμενο από 68% έως 81% σε όλο σχεδόν το διάστημα λειτουργίας του. Τυπικά η συσκευή αναπτύσσει την πλήρη ισχύ της σε 130-140 sec. Ο ανωτέρω κύκλος λειτουργίας είναι απολύτως αντιπροσωπευτικός καθώς η ίδια συσχέτιση εμφανίζεται κατά την μελέτη οποιουδήποτε άλλου κύκλου εντός του διαστήματος μελετης **1/5/2012 - 8/5/2012**.

Η λεπτομερής καταγραφή πραγματοποιείται με βήμα δέκα δευτερολέπτων (10 sec).

Η ονομαστική τιμή παραγωγής H<sub>2</sub> παρέχεται από τον κατασκευαστή, θεωρείται δεδομένη και ίση με 4 Nm<sup>3</sup>/hr. Η αναγωγή της ονομαστικής τιμής σε επίπεδο παραγωγής όγκου ανά δευτερόλεπτο αποδίδει 0,00111 Nm<sup>3</sup>/sec.

Συνεπώς η τιμή παραγόμενου όγκου H<sub>2</sub> για κάθε δεκάδα δευτερολέπτων ισούται με το γινόμενο:

$$V_{\text{prod.}} = \text{Prod.fact.}\% / 100 * 0,00111 * 10 \text{ Nm}^3$$

Το άθροισμα των όγκων ανά δεκάδα δευτερολέπτων για κάθε συνεχές διάστημα ηλεκτρόλυσης αποδίδει την τιμή του όγκου που παρήγαγε ο EL στο διάστημα αυτό.

Ως παράδειγμα κατανόησης λαμβάνεται το διάστημα λειτουργίας 9:54:30 έως 10:54:30 της **1/5/2012**.

- 9:54:30 - 9:54:40  $V_{\text{prod.1}} = 0,00077778 \text{ Nm}^3$
- 9:54:40 - 9:54:50  $V_{\text{prod.2}} = 0,00088889 \text{ Nm}^3$
- .....  $V_{\text{prod....}} = \text{..... Nm}^3$
- 10:54:20 - 10:54:30  $V_{\text{prod.360}} = 0,00788889 \text{ Nm}^3$

Συνεπώς για το διάστημα 9:54:30 έως 10:54:30

$$V_{\text{prod}} = V_{\text{prod.1}} + V_{\text{prod.2}} + V_{\text{prod....}} + V_{\text{prod.360}} = 2,81722222 \text{ Nm}^3$$

Ομοίως για κάθε ένα από τα συνεχή διαστήματα προκύπτει ο όγκος παραγωγής. Με άθροιση των επί μέρους συνεχών για κάθε ημέρα προκύπτει ο συνολικός όγκος παραγωγής H<sub>2</sub>.

Τελικά η εφαρμογή της μεθοδολογίας υπολογισμού στις αναφορές καταγραφής αποδίδει τους παραγόμενους όγκους H<sub>2</sub> για κάθε διάστημα λειτουργίας

**Πίνακας 20:** Αποτελέσματα υπολογισμών κατανάλωσης ενέργειας για κάθε ημέρα.

Date	Time on production (mins)	H <sub>2</sub> produced (Nm <sup>3</sup> )
1/5/2012	480	23,517
2/5/2012	460	22,53
3/5/2012	360	17,736
4/5/2012	377	18.539
5/5/2012	460	22,604
6/5/2012	380	18,739
7/5/2012	360	17,695
8/5/2012	360	17,721
<b>TOTAL</b>	<b>3237</b>	<b>159,081</b>

Ακολούθως προκύπτουν και οι παραγόμενοι όγκοι H<sub>2</sub> για τα εκτενέστερα χρονικά διαστήματα ηλεκτρόλυσης εντός κάθε ημέρας.

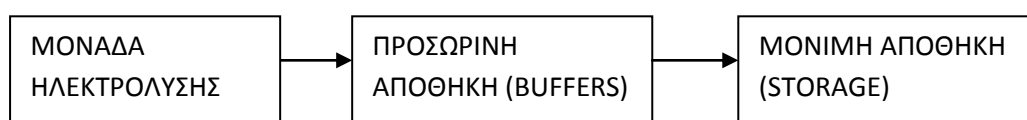
**Πίνακας 21:** Αποτελέσματα υπολογισμών κατανάλωσης ενέργειας για τα εκτενέστερα χρονικά συνεχή διαστήματα.

Date	Time on production (mins)	H <sub>2</sub> produced (Nm <sup>3</sup> )
1/5/2012	300	14,752
2/5/2012	225	11,075
3/5/2012	60	2,982
4/5/2012	70	3,322
5/5/2012	155	7,637
6/5/2012	80	3,983
7/5/2012	60	2,978
8/5/2012	60	2,971

### 7.3.7 ΟΓΚΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΟΥ H<sub>2</sub>

Το παραγόμενο H<sub>2</sub> από την λειτουργία της μονάδας ηλεκτρόλυσης, εξερχόμενο υπό υψηλή πίεση, διοχετεύεται απευθείας στο σύστημα αποθήκευσης. Το σύστημα αποθήκευσης του H<sub>2</sub> αποτελείται από την αποθήκη υψηλής πίεσης (storage,) η οποία αποτελεί και την μόνιμη αποθήκη του συστήματος, καθώς και την ενδιάμεση αποθήκη (buffers) η οποία εκτελεί χρέη εξασφάλισης της ομαλής διοχέτευσης του αερίου στην μόνιμη αποθήκη.

Συνοπτικά η πορεία του παραγόμενου H<sub>2</sub> περιγράφεται από το ακόλουθο διάγραμμα ροής:



Απόλυτος και άμεσα μετρήσιμος δείκτης της ιχνηθέτησης της πορείας του αερίου αποτελεί η πίεση εντός των αποθηκών. Τόσο η μόνιμη όσο και η προσωρινή αποθήκη διαθέτουν όργανα μέτρησης της πίεσης του H<sub>2</sub> εντός τους. Οι αυξομειώσεις της ποσότητας του H<sub>2</sub> εντός των δεξαμενών μεταφράζονται άμεσα σε αυξομειώσεις της ένδειξης της πίεσης.

Η ένδειξη της πίεσης καταγράφεται με συχνότητα ενός λεπτού (1 min) και παρέχεται σε αρχείο αναφοράς τύπου Excel. Η τιμή της πίεσης για το εκάστοτε στιγμιότυπο αποτελεί την βάση των υπολογισμών.

- Σκοπός των υπολογισμών αποτελεί η αντιστοίχιση της δεδομένης τιμής πίεσης (**P**) σε τιμή όγκου (**V**) υπό κανονικές συνθήκες (Normal Volume).
- Η τιμή της θερμοκρασίας κατά την υπολογιστική διαδικασία θα θεωρηθεί αμετάβλητη και ίση με 25°C.

Η εξίσωση που περιγράφει την μεταβολή των μεγεθών πίεσης όγκου και θερμοκρασίας ενός αερίου εντός δεδομένου χώρου είναι η καταστατική εξίσωση των αερίων:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Όπου

**P**: Η καταγραφόμενη πίεση στο εσωτερικό της μόνιμης/προσωρινής αποθήκης σε bar.

**V**: Ο όγκος της μόνιμης/προσωρινής αποθήκης σε m<sup>3</sup>.

**n**: Ο αριθμός των γραμμομορίων H<sub>2</sub>.

**R**: Η παγκόσμια σταθερά των αερίων.

**T**: Η θερμοκρασία του αερίου (Εν προκειμένω λαμβάνονται οι 25°C).

Η εφαρμογή της καταστατικής εξίσωσης για την μόνιμη αποθήκη (storage) δίνει:

$$P_{\text{storage}} \cdot V_{\text{storage}} = n_{\text{storage}} \cdot R \cdot T \quad (\text{όπου } V_{\text{storage}} = 3,48 \text{ m}^3)$$

Εαν θεωρηθεί κατά ιδεατό τρόπο ότι τα τοιχώματα της μόνιμης αποθήκης διέθεταν την ιδιότητα να εκτείνονται ελεύθερα, και ως μοναδικό ανασταλτικό παράγοντα στην έκτασή τους διέθεταν την εξωτερική πίεση, ο όγκος υπό κανονικές συνθήκες αναφέρεται στον όγκο που θα μπορούσε να καταλάβει η περιεχόμενη ποσότητα του αερίου εντός της αποθήκης, έως την εξίσωση της εσωτερικής πίεσης με την ατμοσφαιρική. Προφανώς η πίεση που αναπτύσσεται εντός της μόνιμης αποθήκης είναι σαφώς μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής, και γι'αυτό τον λόγο χρησιμοποιείται ο όρος "έκταση".

Σε αυτή λοιπόν την περίπτωση, η καταστατική εξίσωση θα αποκτούσε την μορφή:

$$P_N \cdot V_N = n_{\text{storage}} \cdot R \cdot T \quad (\text{όπου η πίεση } P_N = 1 \text{ atm} = 1,01325 \text{ bar})$$

Η κατά μέλη διαίρεση των ανωτέρω εξισώσεων, και η επίλυση ως προς τον όρο V<sub>N</sub> αποδίδει τον όγκο που καταλαμβάνει η περιεχόμενη ποσότητα H<sub>2</sub> της μόνιμης αποθήκης σε μονάδες Nm<sup>3</sup> (Normal cubic meters):

- $V_{N, \text{STOR}} = (P_{\text{storage}} \cdot V_{\text{storage}}) / P_N$

Υπό την ίδια ακριβώς μεθοδολογία αποδίδεται ο όγκος που καταλαμβάνει η περιεχόμενη ποσότητα H<sub>2</sub> της προσωρινής αποθήκης σε μονάδες Nm<sup>3</sup>.

$$P_{\text{buffers}} * V_{\text{buffers}} = n_{\text{buffers}} * R * T$$

και αντιστοίχως

$$P_N * V_N = n_{\text{buffers}} * R * T$$

Με διαίρεση κατά μέλη προκύπτει ο τύπος υπολογισμού:

- $V_{N,BUFF} = (P_{\text{buffers}} * V_{\text{buffers}}) / P_N$  (όπου  $V_{\text{buffers}} = 0,15 \text{ m}^3$ )

Η παραπάνω μεθοδολογία ουσιαστικά αποτελεί την αντιστοίχιση των καταγραφόμενων τιμών πίεσης σε μονάδες όγκου. Η σημασία της μετατροπής αυτής έγκειται στο ότι οι τιμές ενεργειακής πυκνότητας του  $H_2$  που συναντώνται στην βιβλιογραφία αναφέρονται σε κατανομή μονάδων ενέργειας ανά μονάδα  $Nm^3$ , κατά συνέπεια μόνο η χρήση μονάδων όγκου παραγόμενου/αποθηκευόμενου  $H_2$  έχει νόημα.

Σχηματικά:

**Pressure  $H_2$  (bar)**  $\longrightarrow$  **Normal Volume  $H_2$  ( $Nm^3$ )**

Ως τελικό ζητούμενο προκύπτει ο προσδιορισμός του αποθηκευόμενου όγκου  $H_2$ .

Η εισροή των παραγόμενων ποσοτήτων  $H_2$  από την μονάδα ηλεκτρόλυσης προκαλεί άμεσα άνοδος της τιμής της πίεσης τόσο της μόνιμης όσο και της προσωρινής αποθήκης. Όταν η λειτουργία της μονάδας σταματά, παρατηρείται επίσης άμεσα σταθεροποίηση της τιμής της πίεσης και ειδικότερα στην μόνιμη αποθήκη.

Η τιμή της πίεσης κατά την έναρξη ενός κύκλου λειτουργίας λαμβάνεται ως  $P_{\text{STOR,APX}}$  και  $P_{\text{BUFF,APX}}$  για την μόνιμη και την προσωρινή αποθήκη αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές μέσω των ανωτέρω εξισώσεων αντιστοιχίζονται σε τιμές όγκων  $V_{N,\text{STOR,APX}}$  και  $V_{N,\text{BUFF,APX}}$ .

Οι τιμές της πίεσης κατά το τέλος του ίδιου κύκλου λειτουργίας λαμβάνονται ως  $P_{\text{STOR,TEΛ}}$  και  $P_{\text{BUFF,TEΛ}}$ . Οι τιμές αυτές μέσω των ανωτέρω εξισώσεων αντιστοιχίζονται σε τιμές όγκων  $V_{N,\text{STOR,TEΛ}}$  και  $V_{N,\text{BUFF,TEΛ}}$ .

Το άθροισμα των διαφορών  $V_{N,\text{STOR,TEΛ}} - V_{N,\text{STOR,APX}}$  και  $V_{N,\text{BUFF,TEΛ}} - V_{N,\text{BUFF,APX}}$  αποδίδει τον αποθηκευμένο όγκο  $H_2$  συνολικά.

Υπό μορφή εξίσωσης:

$$V_{\text{STORED}} = (V_{N,\text{STOR,TEΛ}} - V_{N,\text{STOR,APX}}) + (V_{N,\text{BUFF,TEΛ}} - V_{N,\text{BUFF,APX}})$$

Εν ολίγοις οι διαφορές πίεσης που παρατηρούνται εντός ενός κύκλου λειτουργίας μεταφράζονται σε διαφορές όγκων. Η διαφορά όγκου που αντιστοιχεί σε κάθε κύκλο λειτουργίας ισούται με τον όγκο  $H_2$  που αποθηκεύτηκε κατά το διάστημα αυτό.

Η εξίσωση εφαρμοζόμενη στα διαστήματα λειτουργίας αποδίδει τον όγκο του αποθηκευόμενου  $H_2$  για οποιοδήποτε κύκλο λειτουργίας εντός της ημέρας.

Ο αποθηκευμένος όγκος  $H_2$  λοιπόν για τα εκτενέστερα χρονικά διαστήματα λειτουργίας εντός της ημέρας προσδιορίστηκε όπως στον κάτωθι πίνακα:



**Πίνακας 22:** Αποτελέσματα υπολογισμών αποθήκευσης H<sub>2</sub> για τα εκτενέστερα χρονικά συνεχή διαστήματα.

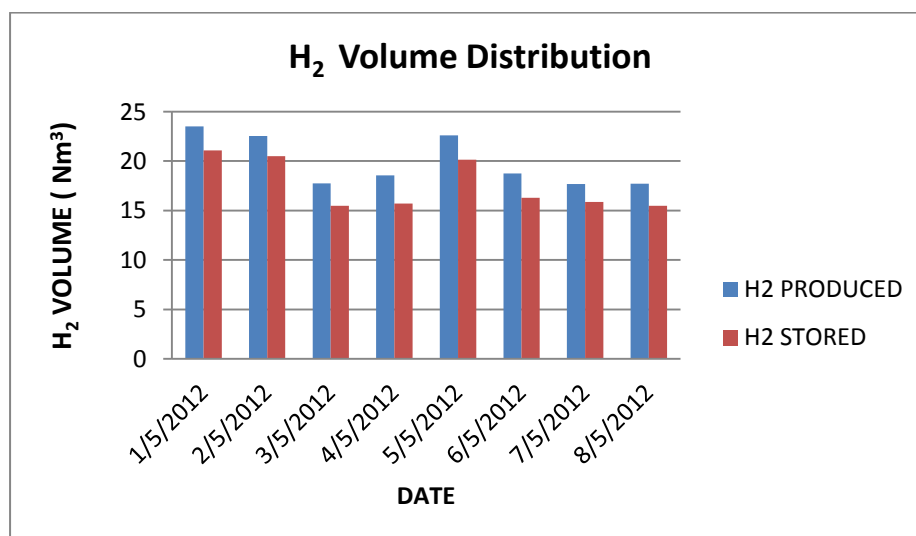
Date	Longest continuous operation (mins)	H <sub>2</sub> stored (Nm <sup>3</sup> )
1/5/2012	300	14,353
2/5/2012	225	10,684
3/5/2012	60	2,766
4/5/2012	70	2,943
5/5/2012	155	7,487
6/5/2012	80	4,044
7/5/2012	60	2,713
8/5/2012	60	3,29

Επίσης παρουσιάζονται οι ολικοί όγκοι αποθηκευμένου όγκου H<sub>2</sub> για κάθε ημέρα.

**Πίνακας 23:** Αποτελέσματα υπολογισμών συνολικής αποθήκευσης H<sub>2</sub> για κάθε ημέρα.

Date	H <sub>2</sub> stored (Nm <sup>3</sup> )
1/5/2012	21,082
2/5/2012	20,502
3/5/2012	15,475
4/5/2012	15,703
5/5/2012	20,142
6/5/2012	16,297
7/5/2012	15,853
8/5/2012	15,464
<b>TOTAL</b>	<b>140,518</b>

Η κατανομή του όγκου H<sub>2</sub> κατά την παραγωγή και αποθήκευση μπορούν να αναπαρασταθούν σχηματικά:



**Διάγραμμα 18:** Κατανομή όγκων παραγόμενου και αποθηκευμένου H<sub>2</sub>

### 7.3.8 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Οι μετρήσεις των παραγόμενων ποσοτήτων όγκου H<sub>2</sub> για δεδομένα διαστήματα λειτουργίας παρουσιάζουν πάντα μεγαλύτερες τιμές από τις μετρήσεις αποθηκευόμενων ποσοτήτων για τα ίδια πάντοτε διαστήματα. Οι προκύπτουσες αυτές διαφορές προκύπτουν ως αποτέλεσμα της διαρροής ποσοτήτων H<sub>2</sub> προς την ατμόσφαιρα, κατά τη διαδρομή του αερίου από τον ΕΙ έως και την μόνιμη αποθήκη (storage). Προφανώς κανένα σύστημα σωληνώσεων και μονώσεων δεν μπορεί να χαρακτηρίζεται από απόλυτη ασφάλεια. Οι απώλειες του H<sub>2</sub> για κάθε διάστημα λειτουργίας λυιπόν προκύπτουν ως απλή αριθμητική διαφορά του παραγόμενου όγκου H<sub>2</sub> μείον τον αποθηκευμένο όγκο H<sub>2</sub>, για το δεδομένο διάστημα λειτουργίας.

$$V_{H_2, \text{LOST}} = V_{\text{PRODUCED}} - V_{\text{STORED}}$$

Οι απώλειες του υδρογόνου όπως θα φανεί στην συνέχεια δεν είναι αμελητέες και επηρεάζουν την εκτίμηση της ολικής απόδοσης του συστήματος παραγωγής αποθήκευσης. Λαμβάνοντας υπόψιν τα δεδομένα των προηγούμενων υπολογισμών και εφαρμόζοντας την εξίσωση προκύπτουν οι τιμές της απώλειας.

**Πίνακας 24:** Αποτελέσματα υπολογισμών ημερησίων ολικών και ποσοστιαίων απωλειών H<sub>2</sub>.

Date	H <sub>2</sub> produced (Nm <sup>3</sup> )	H <sub>2</sub> stored (Nm <sup>3</sup> )	H <sub>2</sub> lost (Nm <sup>3</sup> )	H <sub>2</sub> lost (%)
1/5/2012	23,517	21,082	2,435	10,354
2/5/2012	22,53	20,502	2,028	9,001
3/5/2012	17,736	15,475	2,261	12,748
4/5/2012	18,539	15,703	2,836	15,297
5/5/2012	22,604	20,142	2,462	10,892
6/5/2012	18,739	16,297	2,442	13,032
7/5/2012	17,695	15,853	1,842	10,410
8/5/2012	17,721	15,464	2,257	12,736
<b>TOTAL</b>	<b>159,081</b>	<b>140,518</b>	<b>18,563</b>	<b>11,669</b>

**Πίνακας 25:** Αποτελέσματα απωλειών H<sub>2</sub> εντός των εκτενέστερων διαστημάτων λειτουργίας.

Date	H <sub>2</sub> produced (Nm <sup>3</sup> )	H <sub>2</sub> stored (Nm <sup>3</sup> )	H <sub>2</sub> lost (Nm <sup>3</sup> )	H <sub>2</sub> lost (%)
1/5/2012	14,752	14,353	0,399	2,705
2/5/2012	11,075	10,684	0,391	3,530
3/5/2012	2,982	2,766	0,216	7,243
4/5/2012	3,322	2,943	0,379	11,409
5/5/2012	7,637	7,487	0,15	1,964
6/5/2012	3,983	4,044	-0,061	-1,532
7/5/2012	2,978	2,713	0,265	8,899
8/5/2012	2,971	3,29	-0,319	-10,737

- Είναι προφανές ότι η συνολική διαφυγή του H<sub>2</sub> είναι ένα σαφώς υπολογίσιμο μέγεθος του οποίου η τιμή κυμαίνεται μεταξύ του διαστήματος 10%-15% της ολικής παραγωγής ημερησίως.

- Η διαφυγή αυτή αντιστοιχεί σε σημαντική απώλεια ενέργειας προς εκμετάλλευση και μειώνει σαφώς την ολική απόδοση του συστήματος.

### 7.3.9 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Η ανάλυση της απόδοσης της μονάδας ηλεκτρόλυσης στηρίζεται στον υπολογισμό της ποσότητας του H<sub>2</sub> που παράγεται, στην ενέργεια που δαπανήθηκε για την παραγωγή της ποσότητας αυτής, και επιπλέον στην ενεργειακή πυκνότητα του αερίου.

Η σύνθεση των ανωτέρω μεγεθών αποκαλύπτει την απόδοση του συστήματος.

Οι παράμετροι που αποτελούν εκφράσεις της απόδοσης είναι:

#### 1) Specific yield (kWh/Nm<sup>3</sup>)

Η παράμετρος Specific yield ή ειδική κατανάλωση αποδίδει το ποσό της ενέργειας που κατανάλωσε η συσκευή ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή ενός Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>.

Η Μαθηματική έκφραση είναι:  $Sp.yield = En.cons/V_{prod}$

Η εφαρμογή της εξίσωσης επί των δεδομένων τιμών ενεργειακής κατανάλωσης και παραγόμενου όγκου H<sub>2</sub> για τον εκτενέστερο κύκλο λειτουργίας εντός κάθε ημέρας αποδίδει την διαβάθμιση της ειδικής κατανάλωσης:

**Πίνακας 26:** Διαβάθμιση τιμών Specific yield (ειδικής κατανάλωσης) για τα εκτενέστερα χρονικά διαστήματα

Date	Energy consumed (kWh)	H <sub>2</sub> produced (Nm <sup>3</sup> )	Specific yield (kWh/Nm <sup>3</sup> )
1/5/2012	99,946	14,752	6,775
2/5/2012	74,715	11,075	6,746
3/5/2012	20,941	2,982	7,022
4/5/2012	22,661	3,322	6,821
5/5/2012	53,064	7,637	6,948
6/5/2012	27,556	3,983	6,918
7/5/2012	20,518	2,978	6,890
8/5/2012	20,554	2,971	6,918

#### 2) Efficiency (%)

Η παράμετρος efficiency ισούται με το πηλίκο της περιεχόμενης χημικής ενέργειας του παραχθέντος H<sub>2</sub> προς την ενέργεια που κατανάλωσε η συσκευή ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή του. Είναι ένα αδιάστατο μέγεθος που ουσιαστικά αποδίδει το ποσοστό αποθήκευσης ενέργειας. Για τον υπολογισμό λαμβάνεται βιβλιογραφικά ως δεδομένη η ενεργειακή πυκνότητα του H<sub>2</sub>:

- **Energy density = 12,7 Mjoulles/ Nm<sup>3</sup>**

Η τιμή αναφέρεται στην ανώτερη θερμογόνο δύναμη (Higher Heating Value) του H<sub>2</sub>

Επίσης βιβλιογραφικά η ισοδυναμία της μονάδας kWh με την μονάδα των Mjoulles έχει ως:

- **1 kWh = 3,6 Mjoules**

Με βάση τα ανωτέρω δεδομένα προκύπτει τελικά η ενεργειακή πυκνότητα του H<sub>2</sub> :

- **Energy density H<sub>2</sub> = 12,7 (Mjoules/ Nm<sup>3</sup>) \*1/3,6 (kWh/Mjoule) = 3,528 kWh/ Nm<sup>3</sup>**

Η ευρεθείσα τιμή θα αποτελέσει την βάση των υπολογισμών για όλη την εργασία.

Τελικά ο μαθηματικός τύπος που αποδίδει την παράμετρο Efficiency είναι:

$$\text{Eff.(\%)} = 100 * (V_{\text{prod}} * 3,528) / \text{En.cons}$$

Τελικά η εφαρμογή της εξίσωσης επί των δεδομένων τιμών ενεργειακής κατανάλωσης και παραγόμενου όγκου H<sub>2</sub> για τον εκτενέστερο κύκλο λειτουργίας εντός κάθε ημέρας αποδίδει την διαβάθμιση της επί τοις εκατό απόδοσης:

**Πίνακας 27:** Διαβάθμιση τιμών Efficiency (απόδοσης) για τα εκτενέστερα χρονικά διαστήματα

Date	Energy consumed (kWh)	H <sub>2</sub> produced (Nm <sup>3</sup> )	Efficiency (%)
1/5/2012	99,946	14,752	52,073
2/5/2012	74,715	11,075	52,296
3/5/2012	20,941	2,982	50,239
4/5/2012	22,661	3,322	51,719
5/5/2012	53,064	7,637	50,775
6/5/2012	27,556	3,983	50,994
7/5/2012	20,518	2,978	51,206
8/5/2012	20,554	2,971	50,996

### 7.3.10 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η λειτουργία της μονάδας ηλεκτρόλυσης χαρακτηρίζεται γενικά από ομαλή απόδοση και τυποποιημένη διακύμανση των διαφόρων παραμέτρων που ερευνώνται, τουλάχιστον κατά το χρονικό διάστημα της περιόδου μελέτης.

Διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

- Η λειτουργία της μονάδας κυμαίνεται μεταξύ 360 mins - 480 mins και κατά το διάστημα 9:00-10:00 μέχρι 17:00-18:00 για όλες τις ημέρες της περιόδου μελέτης. Η λειτουργία εντός των συγκεκριμένων ωρών σχετίζεται με την αυξημένη παραγωγή ισχύος από το σύστημα φωτοβολταϊκών - ανεμογεννητριών, η οποία οφείλεται στην αυξημένη ηλιοφάνεια που παρατηρείται κατά το διάστημα αυτό της ημέρας. Η αυξημένη ισχύς που εισρέει στο σύστημα εξασφαλίζει τέτοια ενεργειακά πλεονάσματα ώστε να είναι εφικτή η λειτουργία της μονάδας ηλεκτρόλυσης, χωρίς την ανάγκη εισαγωγής επιπρόσθετης ενέργειας από το συμβατικό ηλεκτρικό δίκτυο. Ως συμπέρασμα λοιπόν προκύπτει ότι η αποθήκευση της ενέργειας για το δεδομένο σύστημα λαμβάνει χώρα αυστηρά εντός του συγκεκριμένου τμήματος της ημέρας.

- Η απόδοση της μονάδας είναι σταθερή και παρουσιάζει ρυθμό παραγωγής κατά προσέγγιση  $2,9 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ . Η τιμή αυτή μεσοσταθμικά κρίνεται αξιόπιστη για την παρακολούθηση της λειτουργίας του συστήματος.
- Οι μετρούμενες παράμετροι λειτουργίας της μονάδας διατηρούν τις ίδιες τιμές τόσο κατά τα εκτενέστερα διαστήματα λειτουργίας, όσο και στα βραχύτερης διάρκειας. Η σταθερότητα αυτή υποδηλώνει την αξιοπιστία της συσκευής καθώς και την απουσία φαινομένων κάμψης της απόδοσης λόγω παρατεταμένης λειτουργίας.
- Η μονάδα ηλεκτρόλυσης παρουσιάζει ενδεχομένως ηπίως αυξημένη ειδική κατανάλωση ή ομοίως σχετικά χαμηλή απόδοση, σε σύγκριση με τις συσκευές ίδιας ή διαφορετικής τεχνολογίας. Συγκεκριμένα η μονάδα του συστήματος λειτουργεί καταναλώνοντας κατά μέσο όρο  $6,8 \text{ kWh/ Nm}^3$ , όταν η μέση κατανάλωση παρομοίων μονάδων, όπως προκύπτει από την βιβλιογραφία, κυμαίνεται μεταξύ  $4,5 \text{ kWh/ Nm}^3$  -  $5,5 \text{ kWh/ Nm}^3$ .

#### 7.4 ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

##### 7.4.1 ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ - ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

Στο ακόλουθο χωρίο θα μελετηθεί η συμπεριφορά και η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου (fuel cell) καθώς και η απαιτούμενη ποσότητα κατανάλωσης  $\text{H}_2$  από την μόνιμη αποθήκη (storage). Η κυψέλη καυσίμου είναι ενσωματωμένη στο σύστημα με σκοπό την κάλυψη αναγκών τροφοδοσίας σε ηλεκτρική ενέργεια των διαφόρων φορτίων του συστήματος, όταν η παραγωγή λόγω ΑΠΕ δεν επαρκεί.

Ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς αυτής επιτυγχάνεται από τις μετρήσεις και υπολογισμούς συγκεκριμένων μεγεθών. Η μελέτη της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου πραγματοποιήθηκε για το χρονικό διάστημα **1/5/2012** έως **8/5/2012**.

Η έναρξη της λειτουργίας της συσκευής αποτελεί συνάρτηση της κατάστασης φόρτισης του συστήματος (state of charge). Η κατάσταση φόρτισης -όπως προαναφέρθηκε- αποτελεί την κατάσταση ισορροπίας εισρέουσας -καταναλισκόμενης ισχύος και η υπέρβαση ενός συγκεκριμένου ορίου, ενεργοποιεί την παροχή ενέργειας στο σύστημα από την κυψέλη καυσίμου. Η αρνητική κατάσταση φόρτισης, δηλαδή το χρονικό σημείο κατά το οποίο η παραγωγή ενέργειας από το σύστημα ανεμογεννητριών-φωτοβολταϊκών επιφανειών αδυνατεί να καλύψει τις καταναλώσεις των διαφόρων φορτίων του κτιρίου, ενεργοποιεί την εισαγωγή ενέργειας από το συμβατικό δίκτυο. Η υπέρβαση ενός συγκεκριμένου ορίου ελλειμματικής κατάστασης φόρτισης, όπου το απαιτούμενο ποσό εισαγωγής ενέργειας είναι ιδιαίτερα αυξημένο, θέτει σε λειτουργία την κυψέλη καυσίμου του συστήματος.

Κατά το διάστημα μελέτης (**1/5/2012** έως **8/5/2012**) η κυψέλη καυσίμου ενεργοποιήθηκε κατά κύριο λόγο τις πρώτες πρωινές ώρες, καθώς και κατά τις βραδινές ώρες. Ωστόσο παρατηρήθηκαν ημέρες όπου δεν υπήρξε λειτουργία, ενώ κατεγράφησαν διαστήματα λειτουργίας απογευματινών ωρών. Ως γενική αρχή προέκυψε η ανάγκη επιστράτευσης της

συσκευής εντός ωραρίων μηδενικής ή ασθενούς ηλιοφάνειας, όπου προφανώς η ολική παραγόμενη ισχύς των ΑΠΕ είναι μειωμένη.

Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει τις ώρες των κύκλων λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου για κάθε ημέρα της περιόδου μελέτης. Στον πίνακα επισημαίνονται εμφανώς (με έντονη γραφή ή Bold) οι μεγαλύτεροι σε χρονική διάρκεια κύκλοι, καθώς και η διάρκεια του καθενός σε λεπτά (mins).

**Πίνακας 28:** Διαστήματα (κύκλοι) ημερήσιας λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου.

1/5/2012	2/5/2012	3/5/2012	4/5/2012
00:08-01:05	<b>00:08-01:05(57mins)</b>	<b>(continuous)</b>	<b>(continuous)</b>
01:13-02:10	01:23-02:00	00:00-00:15	00:00-00:40
02:23-03:20	23:08-23:59	00:28-01:25	17:18-18:15 <b>(57mins)</b>
<b>03:28-04:25(57mins)</b>	<b>(continuous)</b>	01:33-01:50	22:13-23:10
04:33-05:30		02:03-02:05	
05:43-06:40		<b>22:13-23:15(57mins)</b>	
06:53-07:50		23:58-23:59	
18:13-19:10		<b>(continuous)</b>	
22:23-23:20			

5/5/2012	6/5/2012	7/5/2012	8/5/2012
No work recorded	No work recorded	No work recorded	12:37-12:44
			<b>16:53-17:50(57mins)</b>
			22:33-23:30

#### 7.4.2 ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Τα μεγέθη των οποίων η μελέτη θα αποδώσει την συμπεριφορά λειτουργίας της μονάδας ηλεκτροδότησης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Μετρούμενα μεγέθη: Τα μεγέθη των οποίων οι τιμές παρέχονται από κατάλληλους αισθητήρες εντός του συστήματος.
- Υπολογιζόμενα μεγέθη: Τα μεγέθη των οποίων οι τιμές προκύπτουν από υπολογισμούς με βάση τα μετρούμενα μεγέθη.

##### 7.4.2.1 ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ

Τα μετρούμενα μεγέθη είναι ονομαστικά:

- Η παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της κυψέλης καυσίμου, σε μονάδες kWh, όπως και η ισχύς σε μονάδες kW.
- Η κατανάλωση ενέργειας από τις εγκατεστημένες συσκευές εντός του θάλαμου ελέγχου (ICI control cabinet) σε μονάδες kWh, όπως και η ισχύς σε μονάδες kW .
- Η κατανάλωση ενέργειας από το σύστημα ψύξης της κυψέλης καυσίμου, καθώς και του συμπιεστή υδρογόνου στην μόνιμη δεξαμενή, όπως και η ισχύς σε μονάδες kW.
- Η θερμοκρασία της δεξαμενής μέτρησης παραγόμενης θερμότητας, σε βαθμούς κελσίου (°C).

- Η τάση καθώς και η ένταση του ρεύματος που αναπτύσσει η συστοιχία κελιών της κυψέλης, σε μονάδες Volt και Ampere για τα δύο μεγέθη αντίστοιχα.

#### 7.4.2.2 ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ

Τα υπολογιζόμενα μεγέθη προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρούμενων μεγεθών και είναι ονομαστικά:

- Η ισχύς της συστοιχίας κελιών της κυψέλης καυσίμου (stack) σε μονάδες kW.
- Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την συστοιχία κελιών.
- Η παραγόμενη θερμότητα από την λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, σε μονάδες kWh.
- Η ολική παραγόμενη ενέργεια ως άθροισμα της ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, σε μονάδες kWh.
- Η κατανάλωση  $H_2$  από την κυψέλη καυσίμου, σε μονάδες  $Nm^3$ .
- Η κατανάλωση  $H_2$  από την μόνιμη αποθήκη, σε μονάδες  $Nm^3$ . Το μέγεθος αυτό προκύπτει από τους υπολογισμούς της λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης.
- Οι απώλειες  $H_2$  ως διαφορά όγκου της κατανάλωσης μόνιμης αποθήκης και της κατανάλωσης εντός της κυψέλης καυσίμου.
- Η ειδική απόδοση (specific yield) της κυψέλης καυσίμου, δηλαδή το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που δύναται να παράξει  $1 Nm^3 H_2$ . Μετράται σε μονάδες  $kWh/Nm^3$ .
- Η ηλεκτρική απόδοση (Electrical efficiency%) ως το πηλίκο της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς την περιεχόμενη χημική ενέργεια του καταναλισκόμενου  $H_2$ . Εκφράζεται ως εκατοστιαίο ποσοστό.
- Η θερμική απόδοση (Thermal efficiency%) ως το πηλίκο της παραγόμενης θερμότητας προς την περιεχόμενη χημική ενέργεια του καταναλισκόμενου  $H_2$ . Εκφράζεται ως εκατοστιαίο ποσοστό.
- Η ολική απόδοση (Total efficiency%) ως το άθροισμα των ανωτέρω αποδόσεων.

#### 7.4.3 ΙΣΧΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Η κυψέλη καυσίμου είναι ρυθμισμένη ώστε να παρουσιάζει λειτουργία δύο επιπέδων:

- Λειτουργία υψηλής ισχύος (10 kW)
- Λειτουργία χαμηλής ισχύος (5,8 kW)

Η ρύθμιση αυτή της συσκευής σε δύο επίπεδα λειτουργίας επιτυγχάνεται μέσω ελέγχου της λειτουργίας του αντιστροφέα (inverter). Η εντολή δίνεται μέσω ελέγχου της επιθυμητής έντασης ρεύματος του αντιστροφέα, ο οποίος με τη σειρά του ρυθμίζει το επίπεδο λειτουργίας.

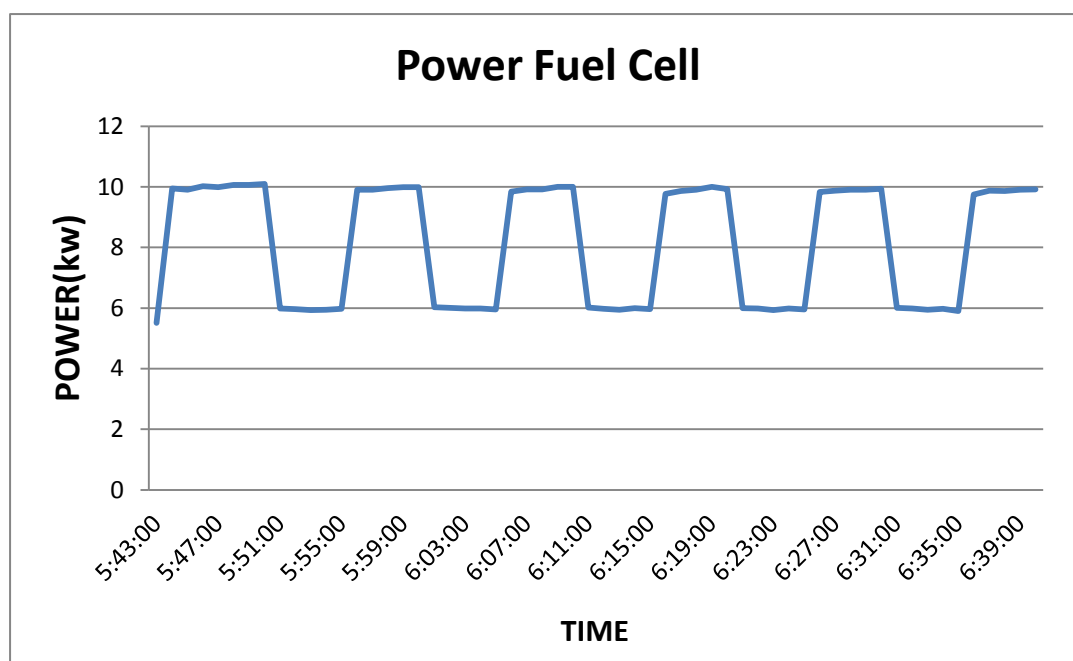
Η καταγραφή της ισχύος λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου πραγματοποιείται μέσω αναφοράς του EMCS με βήμα 1 λεπτού και σε μορφή αρχείου Excel, ομοίως δηλαδή με την καταγραφή της καταναλισκόμενης ισχύος, κατά την μελέτη της μονάδας ηλεκτρόλυσης.

Η κυψέλη αναπτύσσει τιμές ισχύος γενικά προσαρμοσμένες στις ανάγκες τροφοδοσίας του συστήματος σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο έλεγχος προσαρμογής της λειτουργίας επιτυγχάνεται από το κεντρικό σύστημα ελέγχου (control room).

Τελικά η ένδειξη της ισχύος που προκύπτει από το σύστημα καταγραφής καθορίζει την έναρξη και την λήξη κάθε κύκλου λειτουργίας και ακριβώς αυτός ο καθορισμός αποτελεί την αρχή των περαιτέρω υπολογισμών και του προσδιορισμού των διαφόρων παραμέτρων.

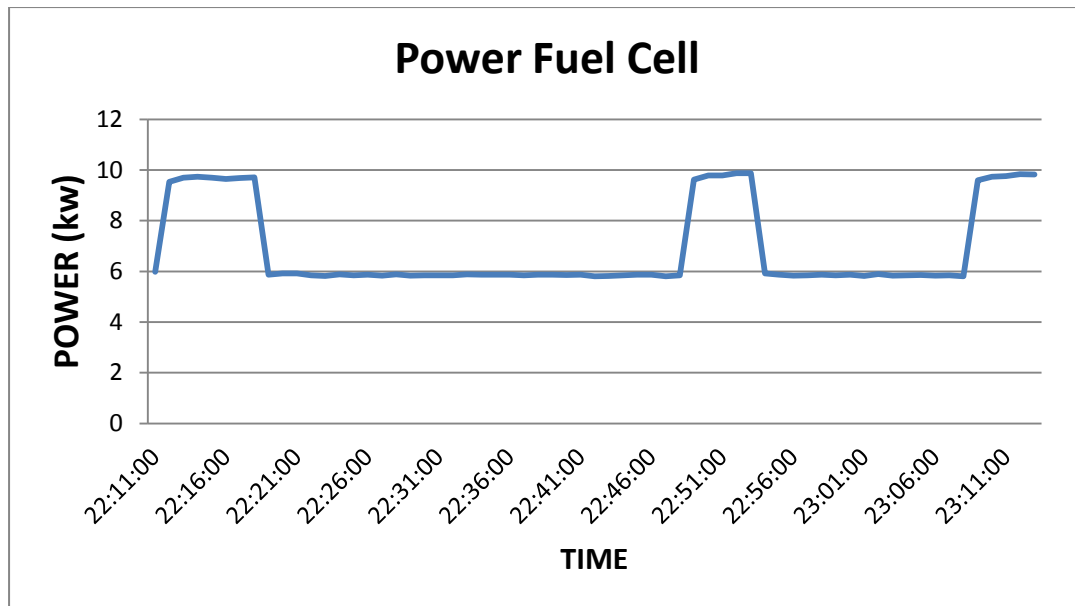
Η ισχύς της συσκευής ανιχνεύεται από αισθητήρες τόσο σε λεπτομερές επίπεδο της συστοιχίας κελιών, όπως και από περισσότερο μακροσκοπικές μετρήσεις δηλαδή διαφορετικού τύπου μετρητές. Η παραγόμενη ισχύς σε επίπεδο συστοιχίας κελιών αξιολογείται ειδικά σε επόμενο κεφάλαιο.

Τα ακόλουθα διαγράμματα αντιστοιχούν στα διαστήματα 5:43-6:40 της 1/5/2012 καθώς και 22:13-23:15 της 3/5/2012 αντίστοιχως και είναι ενδεικτικά της πορείας της ισχύος της κυψέλης:



**Διάγραμμα 19:** Καμπύλη μεταβολής της παραγόμενης ισχύος της κυψέλης καυσίμου εντός συγκεκριμένου κύκλου της 1/5/2012.





**Διάγραμμα 20:** Καμπύλη μεταβολής της παραγόμενης ισχύος της κυψέλης καυσίμου εντός συγκεκριμένου κύκλου της 3/5/2012.

- Η διακύμανση της καμπύλης των δύο κύκλων καταδεικνύει την σαφώς περιορισμένη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου μεταξύ των δύο επιπέδων λειτουργίας. Η κυψέλη παράγει ισχύ κατά προσέγγιση 10 kW ή επίσης προσεγγιστικά 6 kW. Δεν υφίστανται ενδιάμεσα επίπεδα λειτουργίας.
- Η ισχύς λειτουργίας ρυθμίζεται από τις ανάγκες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα. Οι κύκλοι ανωτέρω κύκλοι λειτουργίας παρατηρείται ότι ισοδυναμούν χρονικά, ωστόσο το παραγόμενο ποσό παραγόμενης ενέργειας του πρώτου κύκλου (1/5/2012) προφανώς είναι μεγαλύτερο από το ποσό που αναλογεί στον δεύτερο κύκλο (3/5/2012). Η διαφορά αυτή πιθανότατα οφείλεται σε αυξημένες ανάγκες διανομής, δηλαδή περισσότερα φορτία κατανάλωσης στην πρώτη περίπτωση και αντίστοιχα σε μικρότερο αριθμό φορτίων κατανάλωσης, άρα και μειωμένες ανάγκες διανομής στην δεύτερη περίπτωση.

#### 7.4.4 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η κυψέλη καυσίμου παρουσιάζει κατανάλωση μικρής ποσότητας ενέργειας λόγω αναγκών τροφοδοσίας εσωτερικών εξαρτημάτων. Ωστόσο η ποσότητα της ενέργειας που απαιτείται για την αποτελεσματική λειτουργία της συσκευής σχετίζεται με το σύστημα ψύξης και το σύστημα ελέγχου της κυψέλης καυσίμου. Οι συσκευές αυτές χαρακτηρίζονται ως περιφερειακές.

Η κυψέλη καυσίμου κατά την λειτουργία της, αναπτύσσει υψηλή θερμοκρασία, γεγονός που απαιτεί την εγκατάσταση συστήματος προς διατήρηση της θερμοκρασίας λειτουργίας εντός συγκεκριμένων ορίων. Η ψύξη επιτυγχάνεται με αερικό σύστημα (air cooler). Η κατανάλωση της περιφερειακής αυτής συσκευής συμπεριλαμβάνεται στους υπολογισμούς και συνιστά μη αμελητέα ποσότητα.

Πλησίον της κυψέλης καυσίμου υπάρχει εγκατεστημένη συσκευή ελέγχου της λειτουργίας. Η συσκευή αυτή αναφέρεται ως "ICI control cabinet" προφανώς λόγω της εταιρείας παραγωγής. Η περιφερειακή αυτή συσκευή καταναλώνει το μεγαλύτερο μερίδιο ενέργειας από την συνολική κατανάλωση ενέργειας της κυψέλης καυσίμου.

Ο υπολογισμός της συνολικής ενέργειας κατανάλωσης εκμέρους της κυψέλης καυσίμου λαμβάνεται ως άθροισμα των επί μέρους προαναφερθέντων καταναλώσεων.

Ο υπολογισμός της ενέργειας κατανάλωσης πρακτικά πραγματοποιείται ομοίως με τον υπολογισμό της ενέργειας της μονάδας ηλεκτρόλυσης. Η καταγραφή της ανά λεπτό ένδειξης της ενεργειακής στάθμης παρέχεται σε αρχείο τύπου Excel και είναι συνεχής για την περίοδο μελέτης 1/5/2012 - 8/5/2012.

Η μεθοδολογία μελέτης της συμπεριφοράς λειτουργίας της κυψέλης αφορά στον υπολογισμό τόσο σε επίπεδο ημέρας (ολικό ημερήσιο ποσό κατανάλωσης) όσο και σε επίπεδο εκτενέστερου χρονικά διαστήματος εντός κάθε ημέρας.

Ο ακόλουθος πίνακας συνοψίζει τις καταναλώσεις για κάθε ημέρα της περιόδου μελέτης:

**Πίνακας 29:** Αποτελέσματα υπολογισμών ημερήσια κατανάλωσης ενέργειας.

Date	Time on standby (mins)	Time on production (mins)	Energy consumed by FC (kWh)	Energy consumed by ICI control cabinet (kWh)	Energy consumed by external air-cooler (kWh)	Total electrical energy consumed (kWh)
1/5/2012	984	456	0,590	16,934	0,895	18,419
2/5/2012	1294	146	0,802	10,263	0,279	11,344
3/5/2012	1285	155	0,794	10,542	0,223	11,559
4/5/2012	1286	154	0,795	10,688	0,138	11,621
5/5/2012	1440	0	0,907	8,600	0,000	9,507
6/5/2012	1440	0	0,895	7,643	0,000	8,538
7/5/2012	1440	0	0,894	18,194	0,000	19,088
8/5/2012	1319	121	0,814	17,964	0,016	18,794
<b>TOTAL</b>	<b>10488</b>	<b>1032</b>	<b>6,491</b>	<b>100,828</b>	<b>1,551</b>	<b>108,87</b>

**Πίνακας 30:** Αποτελέσματα υπολογισμών κατανάλωσης ενέργειας για τα εκτενέστερα διαστήματα λειτουργίας κάθε ημέρας.

Date	Longest continuous operation (mins)	Energy consumed by FC (kWh)	Energy consumed by ICI control cabinet (kWh)	Energy consumed by external air-cooler (kWh)	Total energy consumed (kWh)
1/5/2012	57	0,000	1,305	0,132	1,437
2/5/2012	57	0,000	1,302	0,133	1,435
3/5/2012	62	0,000	1,321	0,000	1,321
4/5/2012	57	0,000	1,192	0,000	1,192
5/5/2012	-	-	-	-	-
6/5/2012	-	-	-	-	-
7/5/2012	-	-	-	-	-
8/5/2012	57	0,000	1,171	0,000	1,171

- Η μελέτη της ενεργειακής κατανάλωσης τόσο της κυψέλης καυσίμου όσο και του ICI control cabinet αναδεικνύει την απουσία συσχετισμού μεταξύ των διαστημάτων λειτουργίας της κυψέλης και μίας ενδεχομένως αυξημένης ενεργειακής κατανάλωσης. Η κατανάλωση ενέργειας προφανώς σχετίζεται με την τροφοδοσία επί μέρους παράλληλων λειτουργιών, ανεξάρτητων με την βασική λειτουργία της συσκευής, δηλαδή της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα.
- Αντιθέτως η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου συνδέεται σαφώς με την ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος ψύξης. Η μεγαλύτερη σε χρονική διάρκεια λειτουργία της κυψέλης (αυτό προκύπτει κυρίως από τον πίνακα 30 και την ημερήσια κατανάλωση) προκαλεί αντίστοιχα μεγαλύτερη ενεργειακή απαίτηση εκ μέρους του συστήματος ψύξης.

#### 7.4.5 ΟΓΚΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΘΕΝΤΟΣ H<sub>2</sub> ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Η κυψέλη καυσίμου απορροφά ποσότητες H<sub>2</sub> προς οξείδωση με O<sub>2</sub> και με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και H<sub>2</sub>O. Η απορρόφηση αυτών των ποσοτήτων προέρχεται προφανώς από την μόνιμη αποθήκη H<sub>2</sub> όπου το αέριο βρίσκεται συμπιεσμένο.

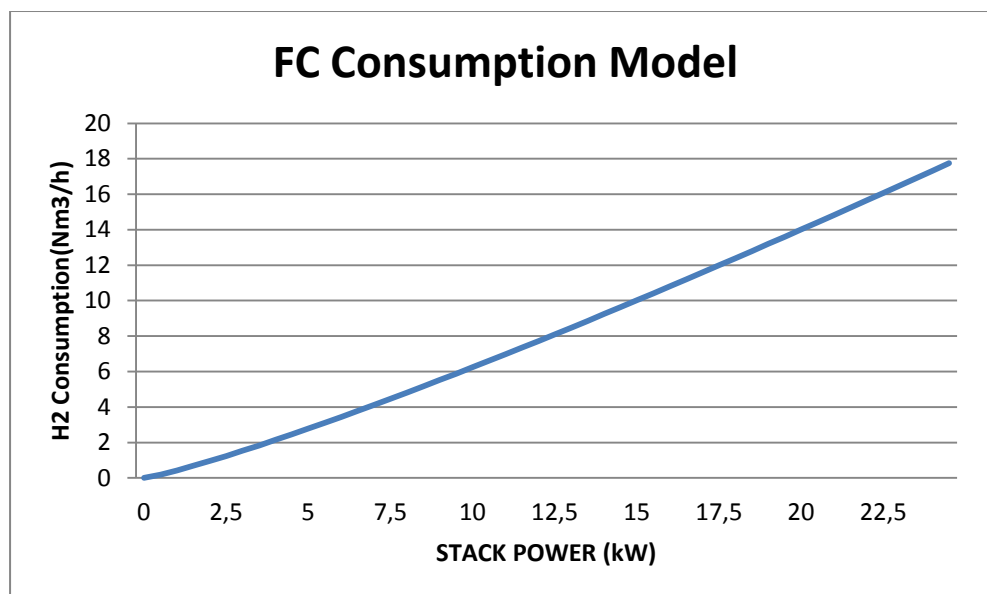
Ο προσδιορισμός του ρυθμού καταναλώσεως του H<sub>2</sub> από την κυψέλη καυσίμου αποτελεί την βάση των υπολογισμών σε σχέση με την συνολική κατανάλωση H<sub>2</sub> και τον περαιτέρω προσδιορισμό των λοιπών παραμέτρων απόδοσης. Το μοντέλο κατανάλωσης συνήθως διαφέρει για τις διαφορετικές τεχνολογίας και προδιαγραφών κυψέλες καυσίμου. Ο προσδιορισμός του μαθηματικού τύπου ο οποίος αποδίδει τελικά τον ρυθμό κατανάλωσης της συσκευής επιτυγχάνεται πειραματικά.

Το μοντέλο κατανάλωσης που εφαρμόζεται στην εγκατεστημένη στο σύστημα κυψέλη καυσίμου ορίζεται από τον ακόλουθο μαθηματικό τύπο:

- **Cons.rate = 0,4265 \* (P<sup>1,1656</sup>)** σε μονάδες Nm<sup>3</sup>/h

Όπου  $P$  είναι η ισχύς της συστοιχίας κυψελίδων σε μονάδες kW.

Η καμπύλη κατανάλωσης  $H_2$  σύμφωνα με το ακόλουθο μοντέλο αποκτά την ακόλουθη μορφή:



**Διάγραμμα 21:** Καμπύλη ρυθμού κατανάλωσης  $H_2$  σε συνάρτηση με την παραγόμενη ισχύ της συστοιχίας κυψελίδων.

Ως ζητούμενο λοιπόν, προκύπτει ο προσδιορισμός της ισχύος της συστοιχίας κυψελίδων (stack).

Ο προσδιορισμός της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος της συστοιχίας κυψελίδων βασίζεται σε ξεχωριστές μετρήσεις υψηλής ακριβείας οι οποίες αποδίδουν την ακριβή διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται στα άκρα της συστοιχίας ( $V$ ), καθώς και την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος ( $I$ ) που την διαρρέει.

Οι μετρήσεις τάσης και έντασης της συστοιχίας συντάσσονται σε αρχείο τύπου Excel με συνεχή καταγραφή και με χρονική διαφορά δύο διαδοχικών μετρήσεων μεταξύ 3-5 δευτερολέπτων (sec). Σε δεδομένη λοιπόν χρονική στιγμή αντιστοιχεί ένα ζεύγος τιμών τάσης-έντασης, το γινόμενο του οποίου μπορεί να αποδώσει την τιμή της ισχύος που αναπτύσσει η κυψέλη:

- $P_{STACK} = V \cdot I \cdot 10^{-3}$ , όπου η τάση μετράται σε Volt και η ένταση σε Ampere.

Η ισχύς της συστοιχίας κυψελίδων προσαρμόζεται σε μονάδες kW.

Κατόπιν η ευρεθείσα τιμή ισχύος για κάθε υποδιάστημα αντιστοιχεί μέσω της ανωτέρω εξίσωσης σε συγκεκριμένη τιμή όγκου καταναλωθέντος  $H_2$ . Λαμβάνοντας υπόψιν την χρονική προσαρμογή σε δευτερόλεπτα, ο καταναλισκόμενος όγκος  $H_2$  για κάθε υποδιάστημα διάρκειας μερικών δευτερολέπτων προκύπτει ως:

- $C = 0,426 * (P^{1,165}) * (t/3600)$

Όπου  $t$ : Η χρονική διάρκεια του υποδιαστήματος σε sec, και προφανώς η κατανάλωση λόγω αναγωγής στην ώρα προκύπτει σε μονάδες  $Nm^3/h$

Η κατανάλωση όγκου  $H_2$  κάθε διαστήματος λειτουργίας της καυψέλης καυσίμου, προκύπτει τελικά ως άθροισμα των τιμών όγκου των επιμέρους υποδιαστημάτων. Δηλαδή ένα διάστημα λειτουργίας που χωρίζεται σε  $x$  υποδιαστήματα χρονικής διάρκειας  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_x$  ισχύος  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_x$  και κατανάλωσης  $C_1, C_2, C_3, \dots, C_x$  αντιστοίχως, παρουσιάζει ολική κατανάλωση:

$$C_{tot} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_x$$

Δηλαδή συνοπτικά

DURATION (Seconds)	VOLTAGE (Volt)	CURRENT (Ampere)	POWER (kW)	VOL. $H_2$ CONS. ( $Nm^3/h$ )
$t_1$	$V_1$	$I_1$	$P_1$	$C_1$
$t_2$	$V_2$	$I_2$	$P_2$	$C_2$
$t_3$	$V_3$	$I_3$	$P_3$	$C_3$
.....	.....	.....	.....	.....
$t_x$	$V_x$	$I_x$	$P_x$	$C_x$
TOTAL				$C_{TOTAL}$

Η παραπάνω μεθοδολογία αποδίδει τον συνολικό καταναλωθέντα όγκο  $H_2$  σε ημερήσιο επίπεδο, όσο και σε επίπεδο εκτενέστερου χρονικά διαστήματος εντός κάθε ημέρας.

Τα αποτελέσματα παρατίθενται στους ακόλουθους πίνακες:

**Πίνακας 31:** Αποτελέσματα υπολογισμών καταναλισκόμενου όγκου  $H_2$  ανά ημέρα.

Date	Time on production (mins)	$H_2$ consumed by FC ( $Nm^3$ )
1/5/2012	513	46,179
2/5/2012	147	12,291
3/5/2012	155	14,179
4/5/2012	154	13,088
5/5/2012	0	0,000
6/5/2012	0	0,000
7/5/2012	0	0,000
8/5/2012	121	9,806
<b>TOTAL</b>	<b>1090</b>	<b>95,543</b>

**Πίνακας 32:** Αποτελέσματα υπολογισμών καταναλισκόμενου όγκου H<sub>2</sub> ανά εκτενέστερο διάστημα εντός ημέρας.

Date	Longest continuous operation (mins)	H <sub>2</sub> consumed by FC (Nm <sup>3</sup> )
1/5/2012	57	5,449
2/5/2012	57	5,158
3/5/2012	62	4,927
4/5/2012	57	3,949
5/5/2012	0	0,000
6/5/2012	0	0,000
7/5/2012	0	0,000
8/5/2012	57	3,987

- Εξετάζοντας τα αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό ότι διαστήματα λειτουργίας ίσης διάρκειας παρουσιάζουν αισθητά διαφορετικούς όγκους κατανάλωσης H<sub>2</sub>. Η παρατήρηση αυτή καταδεικνύει ότι είναι το επίπεδο λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου το οποίο επηρεάζει κατά κύριο λόγο την ποσότητα κατανάλωσης. Η λειτουργία της κυψέλης σε χαμηλό επίπεδο λειτουργίας (5,8 kW) θα απαιτήσει σαφώς μικρότερη ποσότητα H<sub>2</sub> σε σχέση με λειτουργία ίσου χρόνου, αλλά υψηλού επιπέδου ισχύος (10 kW).

#### 7.4.6 ΟΓΚΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΘΕΝΤΟΣ H<sub>2</sub> ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Η κυψέλη καυσίμου όπως προαναφέρθηκε απορροφά H<sub>2</sub> από την μόνιμη αποθήκη (storage). Η απομάκρυνση ποσοτήτων H<sub>2</sub> από την αποθήκη προφανώς θα αποτυπωθεί ως πτώση πίεσης και ακολούθως η πτώση πίεσης αυτή θα μεταφραστεί σε απώλεια όγκου που αποτελεί και το μέγεθος αναφοράς για αυτή την εργασία.

Η μεθοδολογία για την εύρεση του καταναλωθέντος όγκου από την αποθήκη είναι ακριβώς ίδια με αυτήν που εφαρμόστηκε για τον προσδιορισμό του αποθηκευμένου όγκου στην περίπτωση των μετρήσεων της μονάδας ηλεκτρόλυσης.

Η εφαρμογή της εξίσωσης

$$V_{\text{CONS}} = (V_{\text{N,STOR,TEΛ}} - V_{\text{N,STOR,ΑΡΧ}}) + (V_{\text{N,BUFF,TEΛ}} - V_{\text{N,BUFF,ΑΡΧ}})$$

στα διαστήματα λειτουργίας αποδίδει τον όγκο του καταναλωθέντος H<sub>2</sub> από την αποθήκη.

Τα αποτελέσματα έχουν ως ακολούθως:

**Πίνακας 33:** Όγκος καταναλωθέντος H<sub>2</sub> από την αποθήκη για κάθε ημέρα.

Date	Time on production (mins)	H <sub>2</sub> consumed from storage (Nm <sup>3</sup> )
1/5/2012	513	57,650
2/5/2012	147	14,670
3/5/2012	155	18,340
4/5/2012	154	16,980
5/5/2012	0	0,000
6/5/2012	0	0,000
7/5/2012	0	0,000
8/5/2012	121	13,042
<b>TOTAL</b>	<b>1090</b>	<b>120,682</b>

**Πίνακας 34:** Αποτελέσματα μετρήσεων κατανάλωσης H<sub>2</sub> από την αποθήκη για το μεγαλύτερο χρονικά συνεχές διάστημα λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου εντός κάθε ημέρας.

Date	Longest continuous operation (mins)	H <sub>2</sub> consumed from storage (Nm <sup>3</sup> )
1/5/2012	57	6,628
2/5/2012	57	5,570
3/5/2012	62	6,600
4/5/2012	57	5,126
5/5/2012	0	0,000
6/5/2012	0	0,000
7/5/2012	0	0,000
8/5/2012	57	5,620

- Ομοίως με τον προσδιορισμό καταναλωθέντος H<sub>2</sub> από την αποθήκη παρατηρείται (κυρίως από τον πίνακα εκτενέστερων διαστημάτων) η αναντιστοιχία διάρκειας λειτουργίας και ποσότητας κατανάλωσης.

#### 7.4.7 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Η αγωγή του H<sub>2</sub> από την αποθήκη στην κυψέλη καυσίμου πραγματοποιείται διαμέσω συστήματος σωληνώσεων και βαλβίδων και προκαλεί αναπόφευκτα την απώλεια μη αμελητέας ποσότητας αερίου.

Επιπλέον η αντίδραση οξείδωσης του H<sub>2</sub> προς H<sub>2</sub>O που λαμβάνει χώρα εντός των κελιών της κυψέλης χαρακτηρίζεται από βαθμό απόδοσης ο οποίος δεν αγγίζει ποτέ το 100%. Δηλαδή θα υπάρξει ποσότητα του H<sub>2</sub> η οποία δεν θα συμμετάσχει στην αντίδραση και θα διαρρεύσει από την κυψέλη.

Οι απώλειες του H<sub>2</sub> παρατηρούνται κατά τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου και αντιστοιχούν στην διαφορά όγκου του αντλούμενου H<sub>2</sub> από την αποθήκη και του καταναλωθέντος όγκου H<sub>2</sub> από την κυψέλη καυσίμου.

Η μαθηματική έκφραση των απωλειών H<sub>2</sub> αποτυπώνεται ως:

$$V_{H_2,LOST} = V_{CONS,STOR} - V_{CONS,FC}$$

Η εφαρμογή της παραπάνω εξίσωσης σε κάθε διάστημα λειτουργίας αποδίδει τις απώλειες H<sub>2</sub> για κάθε ημέρα, όσο και για το εκτενέστερο χρονικά διάστημα κάθε ημέρας ξεχωριστά. Επιπλέον η απώλειες αποδίδονται και ως εκατοστιαίο ποσοστό μέσω του τύπου:

$$V_{H_2,LOST}\% = (V_{H_2,LOST} / V_{CONS,STOR}) * 100\%$$

**Πίνακας 35:** Αποτελέσματα απωλειών H<sub>2</sub> για κάθε ημέρα.

Date	H <sub>2</sub> losses (Nm <sup>3</sup> )	H <sub>2</sub> losses (%)
1/5/2012	11,471	19,898
2/5/2012	2,379	16,217
3/5/2012	4,161	22,688
4/5/2012	3,892	22,921
5/5/2012	0,000	0,000
6/5/2012	0,000	0,000
7/5/2012	0,000	0,000
8/5/2012	3,236	24,812
<b>TOTAL</b>	<b>25,139</b>	<b>20,831</b>

**Πίνακας 36:** Αποτελέσματα απωλειών H<sub>2</sub> για για εκτενέστερα χρονικά συνεχή διαστήματα.

Date	H <sub>2</sub> losses (Nm <sup>3</sup> )	H <sub>2</sub> losses (%)
1/5/2012	1,179	17,788
2/5/2012	0,412	7,397
3/5/2012	1,673	25,348
4/5/2012	1,177	22,961
5/5/2012	0,000	0,000
6/5/2012	0,000	0,000
7/5/2012	0,000	0,000
8/5/2012	1,633	29,057

- Παρατηρείται ότι οι απώλειες σε H<sub>2</sub> δεν συγκλίνουν σε συγκεκριμένη τιμή. Κατά συνέπεια η πρόβλεψη απωλειών δεν είναι ασφαλής.

#### 7.4.8 ΠΑΡΑΧΘΕΙΣΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η παραχθείσα ηλεκτρική ενέργεια από την συστοιχία κυψελίδων προσδιορίζεται από την ίδια σειρά δεδομένων που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ισχύος και της κατανάλωσης H<sub>2</sub>.



- Οι μετρητές της συστοιχίας καταγράφουν τιμές έντασης και τάσης ανά διαστήματα 3 έως 5 δευτρολέπτων.
- Η ισχύς καθενός από τα προκύπτοντα υποδιάστημα προκύπτει από την εξίσωση ( $P = V \cdot I \cdot 10^{-3}$ ).
- Η παραχθείσα ενέργεια για κάθε υποδιάστημα (έστω υποδιάστημα ισχύος  $P_x$  και διάρκειας  $t_x$ ) προκύπτει από τον τύπο:  $W_x = P_x \cdot t_x$
- Επειδή το αποτέλεσμα της εξίσωσης 5 ανέρχεται σε Joules, η μετατροπή σε kWh προκύπτει από την αναλογία 1 kWh = 3,6 MJoules. Τελικά η εξίσωση τροποποιείται ως:  $W_x = P_x \cdot t_x \cdot (1/3600)$  και το αποτέλεσμα προκύπτει σε kWh.

Το άθροισμα των επιμέρους τιμών παραχθείσης ενέργειας αποδίδει την ολική ηλεκτρική ενέργεια που παράγει η κυψέλη σε κάθε κύκλο λειτουργίας, δηλαδή

$$W_{tot} = W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_x$$

Συνοψίζοντας προκύπτει:

DURATION (Seconds)	VOLTAGE (Volt)	CURRENT (Ampere)	POWER (kW)	ELECTRICAL ENERGY PRODUCED(kWh)
$t_1$	$V_1$	$I_1$	$P_1$	$W_1$
$t_2$	$V_2$	$I_2$	$P_2$	$W_2$
$t_3$	$V_3$	$I_3$	$P_3$	$W_3$
.....	.....	.....	.....	.....
$t_x$	$V_x$	$I_x$	$P_x$	$W_x$
<b>TOTAL</b>				$W_{TOTAL}$

Εφαρμόζοντας την ανωτέρω μεθοδολογία προκύπτουν οι υπολογισμοί για κάθε διάστημα λειτουργίας και ακολούθως για κάθε ημέρα. Οι ακόλουθοι πίνακες δίνουν τα αποτελέσματα για την περίοδο μελέτης.

**Πίνακας 37:** Αποτελέσματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ημέρα.

Date	Time on production (mins)	Electrical energy produced by stack (kWh)
1/5/2012	513	75,179
2/5/2012	147	20,201
3/5/2012	155	23,052
4/5/2012	154	21,486
5/5/2012	0	0,000
6/5/2012	0	0,000
7/5/2012	0	0,000
8/5/2012	121	16,220
<b>TOTAL</b>	<b>1090</b>	<b>156,138</b>

**Πίνακας 38:** Αποτελέσματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τα εκτενέστερα χρονικά διάστημα εντός κάθε ημέρας.

Date	Longest continuous operation (mins)	Electrical energy produced by stack (kWh)
1/5/2012	57	8,800
2/5/2012	57	8,389
3/5/2012	62	8,169
4/5/2012	57	6,696
5/5/2012	0	0,000
6/5/2012	0	0,000
7/5/2012	0	0,000
8/5/2012	57	6,750

- Η επισκόπηση των αποτελεσμάτων ομοίως αποκαλύπτει τον συσχετισμό της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με την ισχύ λειτουργίας και λιγότερο με τη χρονική διάρκεια λειτουργίας. Η σύγκριση της παραγόμενης ενέργειας της εκτενέστερης λειτουργίας της 3/5/2012 με την εκτενέστερη λειτουργία της 8/5/2012 αποδίδει ευκρινώς τον συσχετισμό αυτόν.

#### 7.4.9 ΠΡΟΣΦΕΡΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΟ ΚΤΙΡΙΟ

Η παραγόμενη από την συστοιχία της κυψέλης καυσίμου ηλεκτρική ενέργεια δεν διανέμεται απευθείας στα φορτία του κτιρίου. Αυτό οφείλεται στο ότι η μορφή του ηλεκτρικού ρεύματος που προκύπτει από την κυψέλη καυσίμου είναι συνεχής (DC) ενώ το κτίριο τροφοδοτείται με εναλλασσόμενης μορφής ρεύμα(AC). Για τον λόγο αυτό μεταξύ του κτιρίου και της κυψέλης παρεμβάλλεται ένας αντιστροφέας (Inverter) ο οποίος μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο.

Τελικά το σύστημα EMCS έδωσε τις κάτωθι πληροφορίες για την παροχή ενέργειας στο σύστημα:

**Πίνακας 39:** Παρεχόμενη στο σύστημα ενέργεια για κάθε ημέρα και συνολικά, ενεργειακές απώλειες.

Date	Electrical energy produced by stack (kWh)	Electrical energy delivered to building (kWh)	Energy loss (%)
1/5/2012	75,179	66,045	12,150
2/5/2012	20,201	17,666	12,549
3/5/2012	23,052	20,048	13,031
4/5/2012	21,486	18,803	12,487
5/5/2012	0,000	0,000	0,000
6/5/2012	0,000	0,000	0,000
7/5/2012	0,000	0,000	0,000
8/5/2012	16,220	14,232	12,256
<b>TOTAL</b>	<b>156,138</b>	<b>136,794</b>	<b>12,389</b>

Οι απώλειες που σημειώνονται κατά την μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος προς τα φορτία του κτιρίου σχετίζονται κυρίως με την συσκευή του αντιστροφέα.

Ακολούθως σε επίπεδο εκτενέστερων χρονικά διαστημάτων.

**Πίνακας 40:** Παρεχόμενη στο κτίριο ενέργεια για τα διαρκέστερα χρονικά διαστήματα και ύψος ενεργειακών απωλειών.

Date	Electrical energy produced by stack (kWh)	Electrical energy delivered to building (kWh)	Energy loss (%)
1/5/2012	8,800	7,683	12,693
2/5/2012	8,389	7,328	12,648
3/5/2012	8,169	7,100	13,086
4/5/2012	6,696	5,820	13,082
5/5/2012	0,000	0,000	0,000
6/5/2012	0,000	0,000	0,000
7/5/2012	0,000	0,000	0,000
8/5/2012	6,750	5,894	12,681

Παρατηρούνται απώλειες ομοίου βαθμού με αυτές που παρατηρήθηκαν σε συνολικό επίπεδο.

#### 7.4.10 ΠΑΡΑΧΘΕΙΣΑ ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Ο υπολογισμός της παραγόμενης θερμότητας της οξειδωτικής αντίδρασης που λαμβάνει χώρα εντός της κυψέλης καυσίμου αποτελεί απαραίτητο στοιχείο για τον προσδιορισμό της ολικής απόδοσης της συσκευής.

Κεντρικό στοιχείο στον προσδιορισμό της θερμότητας αποτελεί η μέτρηση της θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου που εν προκειμένω είναι το νερό.

Η συσκευή διαθέτει σύστημα αγωγής νερού διαμέσω των εξαρτημάτων του, το οποίο προσλαμβάνει την πλεονάζουσα θερμότητα αποκτώντας υψηλότερη θερμοκρασία. Το νερό ψύξης καθώς και το νερό που προκύπτει ως προϊόν της αντίδρασης των  $H_2 - O_2$  διέρχεται μέσω δεξαμενής χωρητικότητας 850 λίτρων. Η δεξαμενή διαθέτει σύστημα καταγραφής της θερμοκρασίας στο κατώτερο τμήμα (χαμηλότερη θερμοκρασία) καθώς και στο ανώτερο τμήμα (υψηλότερη θερμοκρασία). Η δεξαμενή συνδέεται με το σύστημα αερικής ψύξης (air-cooler) το οποίο τίθεται σε λειτουργία όταν η θερμοκρασία της δεξαμενής υπερβαίνει όρια πέραν των οποίων η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου θα παρουσίαζε δυσλειτουργίες. Το σύστημα αερικής ψύξης απάγει την πλεονάζουσα θερμότητα προς το περιβάλλον, ελαττώνοντας σημαντικά την θερμοκρασία της δεξαμενής σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Ο τελικός προσδιορισμός της παραγόμενης θερμότητας εξαρτάται από την μέση θερμοκρασία της δεξαμενής, η οποία προκύπτει ως μέση τιμή της χαμηλότερης και υψηλότερης θερμοκρασίας που καταγράφονται στη δεξαμενή, δηλαδή του υψηλότερου και

χαμηλότερου σημείου αντίστοιχα.(Η αναντιστοιχία αυτή προφανώς οφείλεται στην μικρή διαφορά πυκνότητας μεταξύ θερμού και ψυχρού)

Προκύπτει λοιπόν:  $T_{\text{AVERAGE}} = (T_{\text{HIGHER}} + T_{\text{LOWER}})/2$

Η μέση θερμοκρασία της δεξαμενής παρουσιάζει ανοδική τάση κατά τα διαστήματα λειτουργίας της κυψέλης λόγω της προσλαμβάνουσας θερμότητας. Η διαφορά θερμοκρασίας που παρατηρείται μεταξύ δύο χρονικών στιγμών λειτουργίας της συσκευής αποτελεί την βάση του υπολογισμού της θερμότητας που εκλύθηκε κατά το διάστημα αυτό.

Ο υπολογισμός πραγματοποιείται μέσω του γνωστού τύπου της θερμιδομετρίας:

- $Q = m_{\text{WATER}} * C_{\text{P (WATER)}} * \Delta T$

Όπου  $m_{\text{WATER}} = 850 \text{ Kg}$  (Προκύπτει από την αναλογία  $m_{\text{WATER}}/V_{\text{WATER}} = 1$  και  $V_{\text{WATER}} = 850 \text{ Lt}$ )

$C_{\text{P (WATER)}} = 4,1795 \text{ KJ/Kg*Kelvin} = 4,1795 * (1/3600) \text{ KWh/Kg*Kelvin}$  (Λόγω της ισοδυναμίας  $1 \text{ KWh} = 3600 \text{ KJoules}$ ). Η ποσότητα αυτή ονομάζεται ειδική θερμοχωρητικότητα και για το θερμοκρασιακό εύρος του διαστήματος μελέτης θεωρείται αμετάβλητη.

$\Delta T = T_{\text{AVERAGE,FINAL}} - T_{\text{AVERAGE,INITIAL}}$  (Είναι η διαφορά μέσης θερμοκρασίας κατά την έναρξη και την λήξη ενός κύκλου λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου).

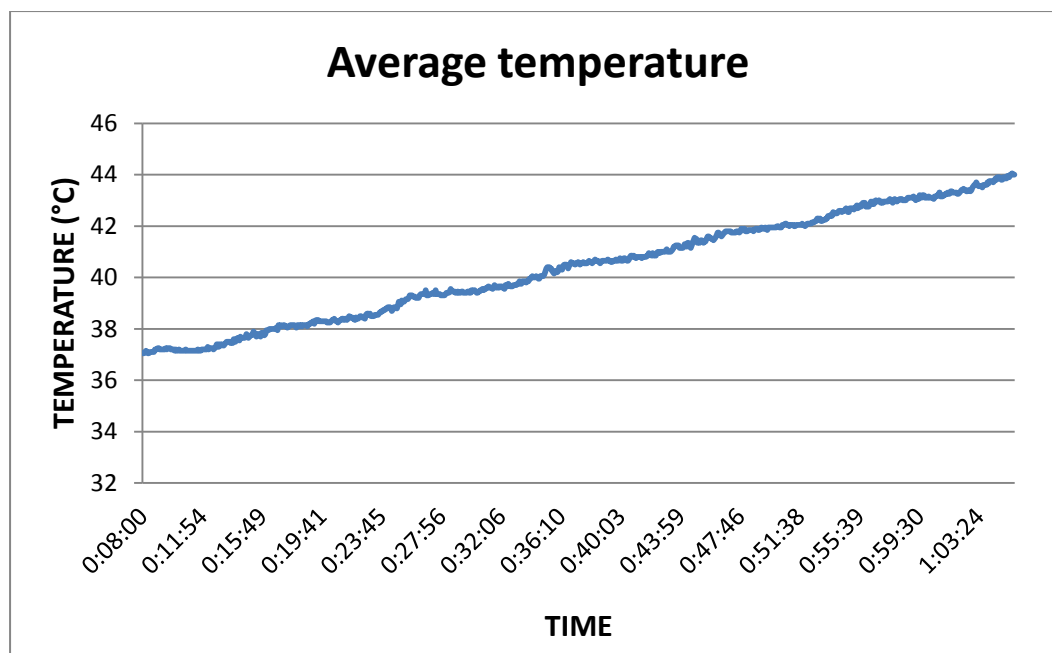
Η καταγραφή της θερμοκρασίας κατά το διάστημα μελέτης 1/5/2012 - 8/5/2012 ήταν συνεχής, με ταυτόχρονη καταχώρηση των τιμών χρόνου και μέγιστης-ελάχιστης θερμοκρασίας δεξαμενής σε αρχείο Excel. Το βήμα καταγραφής αντιστοιχεί σε 4-6 δευτερόλεπτα.

Προκειμένου να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός υπολογισμού της θερμότητας χρησιμοποιείται ως παράδειγμα ο κύκλος λειτουργίας **00:08:00 - 01:05:00** της **1/5/2012**.

Η καταγραφή των στοιχείων εν συνόψει έχει ως εξής:

TIME	TEMPERATURE (HIGHER) (°C)	TEMPERATURE (LOWER) (°C)	AVERAGE TEMPERATURE(°C)
00:08:00	37,3	36,8	37,05
00:08:03	37,3	36,8	37,05
00:08:07	37,3	36,9	37,1
00:08:11	37,3	37,0	37,15
.....	.....	.....	.....
01:04:56	43,9	44,1	44
01:05:00	43,9	44,1	44

Η μορφή του διαγράμματος της τιμής της μέσης θερμοκρασίας είναι απαραίτητη προκειμένου να υπολογιστεί η εκλυόμενη θερμότητα κατά το χρονικό διάστημα αυτό.



**Διάγραμμα 22:** Καμπύλη διακύμανσης της μέσης θερμοκρασίας για το διάστημα 00:08:00 - 01:05:00 της 1/5/2012.

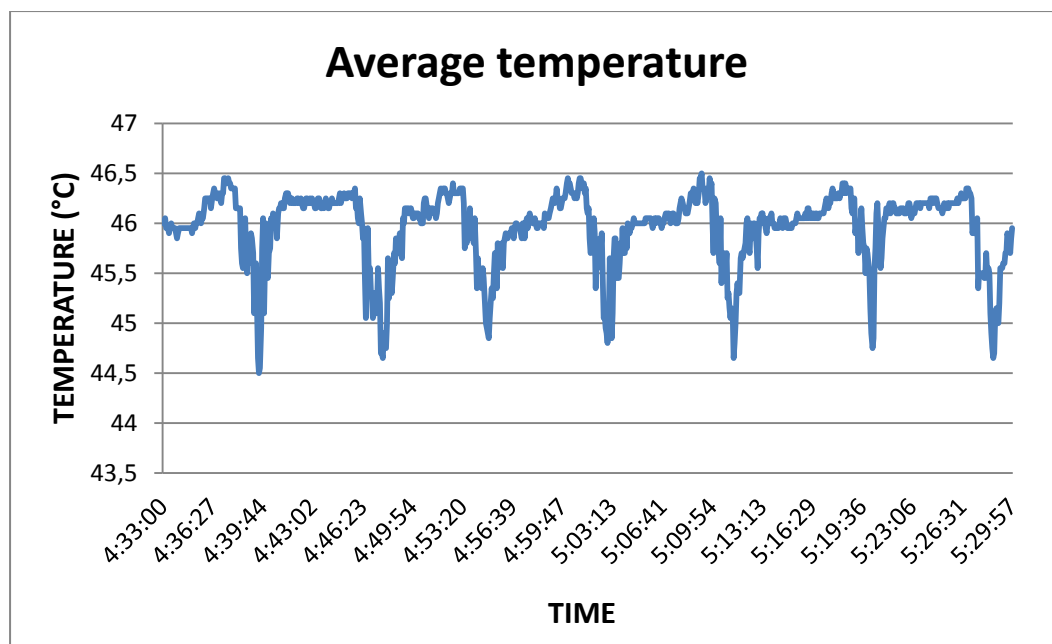
- Καθίσταται εμφανές ότι η μέση θερμοκρασία της δεξαμενής αυξάνει συνεχώς και καθ'όλη την διάρκεια λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου.
- Η συνεχώς ανοδική πορεία της θερμοκρασίας οφείλεται στην αδράνεια του συστήματος ψύξης για το συγκεκριμένο διάστημα. Η θερμοκρασία δεν απέκτησε τιμή που θα έθετε σε λειτουργία το σύστημα αερικής ψύξης. Σε περίπτωση ενεργοποίησης η καμπύλη θα παρουσίαζε κάμψη λόγω ελάττωσης της μέσης θερμοκρασίας.
- Η μέση θερμοκρασία της δεξαμενής εντός του διαστήματος λειτουργίας παρουσίασε αύξηση  $\Delta T = 44^{\circ}\text{C} - 37,05^{\circ}\text{C} = 6,95^{\circ}\text{C}$ .

Τελικά η θερμότητα που παράχθηκε κατά τον συγκεκριμένο κύκλο υπολογίζεται από την εξίσωση της θερμιδομετρίας και αποδίδει τιμή  $Q = 6,859 \text{ kWh}$ .

Η παραχθείσα θερμότητα υπολογίζεται αποκλειστικά και μόνο βάσει των ανοδικών τμημάτων της καμπύλης μέσης θερμοκρασίας καθότι οι καθοδικές τάσεις που παρουσιάζονται αντιστοιχούν σε λειτουργία του συστήματος ψύξης για την αποβολή της πλεονάζουσας θερμότητας και ακολούθως ελάττωση της θερμοκρασίας λειτουργίας της συσκευής.

Προκειμένου να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός υπολογισμού της θερμότητας σε περίπτωση ταυτόχρονης λειτουργίας του συστήματος ψύξης, χρησιμοποιείται ως παράδειγμα ο κύκλος λειτουργίας **04:33:00 - 05:30:00** της **1/5/2012**.

Η μορφή του διαγράμματος της τιμής της μέσης θερμοκρασίας είναι απαραίτητη προκειμένου να υπολογιστεί η εκλυόμενη θερμότητα κατά το χρονικό διάστημα αυτό.



**Διάγραμμα 23:** Καμπύλη διακύμανσης της μέσης θερμοκρασίας για το διάστημα 00:08:00 - 01:05:00 της 1/5/2012. Παρατηρείται λειτουργία του συστήματος ψύξης.

- Το σύστημα ψύξης λειτουργεί περιοδικά μειώνοντας σημαντικά την μέση θερμοκρασία.
- Η ολική παραχθείσα θερμότητα προκύπτει ως άθροισμα των τμημάτων ανόδου της μέσης θερμοκρασίας.
- Συνολικά λοιπόν προκύπτει:

$\Delta T_1$	46,45-45,85	0,6
$\Delta T_2$	46,35-44,5	1,85
$\Delta T_3$	46,4-44,65	1,75
$\Delta T_4$	46,45-44,85	1,6
$\Delta T_5$	46,5-44,8	1,7
$\Delta T_6$	46,4-44,85	1,55
$\Delta T_7$	46,35-44,75	1,6
$\Delta T_8$	45,9-44,65	1,25
$\Delta T_{TOTAL}$		<b>11,9</b>

Η ολική παραχθείσα θερμότητα του διαστήματος λειτουργίας προκύπτει τελικά μέσω της εξίσωσης υπολογισμού θερμότητας:

$$Q = m_{WATER} * C_{P(WATER)} * \Delta T_{TOTAL} = 11,743 \text{ KWh}$$

Με βάση την ανωτέρω μεθοδολογία υπολογίζεται η παραγόμενη θερμότητα για κάθε διάστημα λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου και ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την συνολική παραχθείσα θερμότητα κάθε ημέρας της περιόδου μελέτης καθώς και εντός του εκτενέστερου διαστήματος λειτουργίας εντός της ημέρας.

**Πίνακας 41:** Αποτελέσματα παραγωγής θερμότητας για κάθε ημέρα.

Date	Time on production (mins)	Heat produced (kWh)
1/5/2012	513	83,078
2/5/2012	147	18,553
3/5/2012	155	23,733
4/5/2012	154	21,414
5/5/2012	0	0,000
6/5/2012	0	0,000
7/5/2012	0	0,000
8/5/2012	121	10,312
<b>TOTAL</b>	<b>1090</b>	<b>157,090</b>

**Πίνακας 42:** Αποτελέσματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τα εκτενέστερα χρονικά διάστημα εντός κάθε ημέρας.

Date	Longest continuous operation (mins)	Heat produced (kWh)
1/5/2012	57	9,710
2/5/2012	57	9,375
3/5/2012	62	5,181
4/5/2012	57	3,849
5/5/2012	0	0,000
6/5/2012	0	0,000
7/5/2012	0	0,000
8/5/2012	57	4,638

#### 7.4.11 ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΥΨΕΛΗΣ

##### 7.4.11.1 ΛΟΓΟΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Ο λόγος ειδικής απόδοσης της κυψέλης αφορά στο ποσόν της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από την οξείδωση  $1 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2$  κατά την λειτουργία της συσκευής.

Η Μαθηματική έκφραση είναι:  $\text{Sp.yield} = \text{En.prod}/V_{\text{CONSUMED}}$

Η εφαρμογή της ανωτέρω εξίσωσης επί των δεδομένων τιμών ενεργειακής παραγωγής και καταναλισκόμενου όγκου  $\text{H}_2$  για τον εκτενέστερο κύκλο λειτουργίας εντος κάθε ημέρας αποδίδει την διαβάθμιση της ειδικής κατανάλωσης:

**Πίνακας 43:** Διαβάθμιση τιμών Specific yield (ειδικής απόδοσης) για τα εκτενέστερα χρονικά διαστήματα

Date	H <sub>2</sub> consumed by FC (Nm <sup>3</sup> )	Electrical energy produced by stack (kWh)	Specific yield (kWh/Nm <sup>3</sup> )
1/5/2012	5,449	8,800	1,615
2/5/2012	5,158	8,389	1,626
3/5/2012	4,927	8,169	1,658
4/5/2012	3,949	6,696	1,696
5/5/2012	0,000	0,000	0,000
6/5/2012	0,000	0,000	0,000
7/5/2012	0,000	0,000	0,000
8/5/2012	3,987	6,750	1,693

#### 7.4.11.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ

Η ηλεκτρική απόδοση της κυψέλης καυσίμου (fuel cell electrical efficiency) ισούται με το πηλίκο της ηλεκτρικής ενέργειας που παρήγαγε η κυψέλη καυσίμου εντός ενός δεδομένου διαστήματος λειτουργίας, προς την περιεχόμενη χημική ενέργεια του καταναλωθέντος H<sub>2</sub> κατά το ίδιο διάστημα.

Ουσιαστικά η έννοια της ηλεκτρικής απόδοσης έχει αναλυθεί σε αντίστοιχο κεφάλαιο κατά την μελέτη της λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης, υπό αντίστροφους όμως όρους, δηλαδή λόγου περιεχόμενης χημικής ενέργειας παραγόμενου όγκου H<sub>2</sub> προς την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώθηκε προκειμένου να παραχθεί η συγκεκριμένη ποσότητα.

Για τον υπολογισμό λαμβάνεται βιβλιογραφικά ως δεδομένη η ενεργειακή πυκνότητα του H<sub>2</sub> σε τιμές ανωτέρας θερμογόνου δύναμης (Higher Heating Value) όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο (7.3.7) του χωρίου μελέτης της μονάδας ηλεκτρόλυσης.

Είναι λοιπόν: **Energy density H<sub>2</sub> = 3,528 kWh/ Nm<sup>3</sup>**

Τελικά ο μαθηματικός τύπος που αποδίδει την παράμετρο Electrical Efficiency είναι:

- **Electr.Eff.(%) = Electrical En.prod/(V<sub>CONS</sub> \* 3,528 )**

Τελικά η εφαρμογή της ανωτέρω εξίσωσης επί των δεδομένων τιμών ενεργειακής παραγωγής και καταναλισκόμενου όγκου H<sub>2</sub> για τον εκτενέστερο κύκλο λειτουργίας εντός κάθε ημέρας αποδίδει την διαβάθμιση της επί τοις εκατό απόδοσης:



**Πίνακας 44:** Διαβάθμιση τιμών Electrical Efficiency (απόδοσης) για τα εκτενέστερα χρονικά διαστήματα.

Date	Electrical energy produced by stack (kWh)	H <sub>2</sub> consumed by FC (Nm <sup>3</sup> )	Electrical Efficiency (%)
1/5/2012	8,800	5,449	45,776
2/5/2012	8,389	5,158	46,100
3/5/2012	8,169	4,927	46,996
4/5/2012	6,696	3,949	48,062
5/5/2012	0,000	0,000	0,000
6/5/2012	0,000	0,000	0,000
7/5/2012	0,000	0,000	0,000
8/5/2012	6,750	3,987	47,988

#### 7.4.11.3 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ

Η θερμική απόδοση της κυψέλης καυσίμου (fuel cell thermal efficiency) ισούται με το πηλίκο της θερμότητας (**Q**) που παρήγαγε η κυψέλη καυσίμου εντός ενός δεδομένου διαστήματος λειτουργίας, προς την περιεχόμενη χημική ενέργεια του καταναλωθέντος H<sub>2</sub> κατά το ίδιο διάστημα.

Ο μαθηματικός τύπος που αποδίδει την παράμετρο Thermal Efficiency είναι:

- **Therm.Eff.(%) =  $Q_{\text{PRODUCED}} / (V_{\text{CONS}} * 3,528)$**

Τελικά η εφαρμογή της ανωτέρω εξίσωσης επί των δεδομένων τιμών παραγόμενης θερμότητας και καταναλισκόμενου όγκου H<sub>2</sub> για τον εκτενέστερο κύκλο λειτουργίας εντός κάθε ημέρας αποδίδει την τιμή της θερμικής απόδοσης της κυψέλης καυσίμου:

**Πίνακας 45:** Διαβάθμιση τιμών Thermal Efficiency (απόδοσης) για τα εκτενέστερα χρονικά διαστήματα

Date	Heat produced (kWh)	H <sub>2</sub> consumed by FC (Nm <sup>3</sup> )	Thermal Efficiency (%)
1/5/2012	9,710	5,449	50,510
2/5/2012	9,375	5,158	51,518
3/5/2012	5,181	4,927	29,806
4/5/2012	3,849	3,949	27,627
5/5/2012	0,000	0,000	0,000
6/5/2012	0,000	0,000	0,000
7/5/2012	0,000	0,000	0,000
8/5/2012	4,638	3,987	32,973

Για την τελική σύνθεση των αποτελεσμάτων αρκεί ο υπολογισμός της συνδυασμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας.

#### 7.4.11.4 ΟΛΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ

Η ολική απόδοση αποτελεί την αθροιστική απόδοση της ηλεκτρικής ενέργειας και της θερμότητας που παράγει κάθε κύκλος λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου.

Προφανώς αναμένεται η ολική αυτή απόδοση να πλησιάζει το 100% λαμβάνοντας υπόψιν ότι η χημική ενέργεια του H<sub>2</sub> αναμένεται να μετατραπεί αποκλειστικά σε αυτά τα δύο είδη ενέργειας. Ουσιαστικά αυτό το συμπέρασμα προκύπτει από τον δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής όπως περιγράφηκε στο θεωρητικό τμήμα κατά την περιγραφή της θερμοδυναμικής των κυψελών καυσίμου.

Ως μαθηματική μορφή λοιπόν προκύπτει ότι η ολική απόδοση αντιστοιχεί σε:

$$\text{Total efficiency}(\%) = 100 * (\text{El. energy} + \text{Heat}) / (V_{\text{CONS}} * 3,528)$$

Η απλούστερα  $\text{Total efficiency}(\%) = \text{El. efficiency}(\%) + \text{Thermal efficiency}(\%)$

Με εφαρμογή της εξίσωσης στα διαστήματα μελέτης της λειτουργίας (δηλαδή τα εκτενέστερα σε λειτουργία) προκύπτουν οι ολικές αποδόσεις όπως στον ακόλουθο πίνακα:

**Πίνακας 46:** Ολική απόδοση κυψέλης καυσίμου.

Date	Electrical Efficiency (%)	Thermal Efficiency (%)	Total Efficiency (%)
1/5/2012	45,776	50,510	96,286
2/5/2012	46,100	51,518	97,618
3/5/2012	46,996	29,806	76,802
4/5/2012	48,062	27,627	75,689
5/5/2012	0,000	0,000	0,000
6/5/2012	0,000	0,000	0,000
7/5/2012	0,000	0,000	0,000
8/5/2012	47,988	32,973	80,960

Η ολική απόδοση όπως φαίνεται προσεγγίζει το 100% σε δύο περιπτώσεις, εντούτοις παρεκκλίνει κατά πολύ στις υπόλοιπες περιπτώσεις. Η απόκλιση αυτή οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα στην λειτουργία του συστήματος αερικής ψύξης το οποίο απάγει ποσά θερμότητας προς το περιβάλλον με αποτέλεσμα την συνολική υποτίμηση της παραγόμενης θερμότητας.

#### 7.4.12 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η κυψέλη καυσίμου παρουσιάζει εξαιρετική σταθερότητα όσον αφορά στην ηλεκτρική απόδοση κατά συνέπεια και σταθερή λειτουργία στην παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στο σύστημα. Εντούτοις την ίδια εικόνα σταθερότητας δεν παρουσιάζει το σύστημα ανάκτησης θερμότητας, καθώς οι τιμές για κάθε κύκλο λειτουργίας παρουσιάζουν αποκλίσεις γεγονός που καθιστά δύσκολη την επιτυχή πρόβλεψη θερμικών εισροών για κάθε κύκλο λειτουργίας, στην περίπτωση εγκατάστασης ενός συστήματος εκμετάλλευσης της θερμότητας.

## 7.5 ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ H<sub>2</sub>

### 7.5.1 ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ- ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

Στο ακόλουθο χωρίο θα μελετηθεί η συμπεριφορά και η δυνατότητα συμπίεσης παραγόμενου H<sub>2</sub> από την συσκευή συμπίεσης ή συμπιεστή (Compressor).

Η παραγόμενη ποσότητα αερίου H<sub>2</sub> προερχόμενη από την μονάδα ηλεκτρόλυσης, διέρχεται αρχικά από την προσωρινή αποθήκη (buffers) και κατόπιν προωθείται διαμέσω συστήματος σωληνώσεων προς την μόνιμη αποθήκη. Η κίνηση του αερίου διαμέσω των σωληνώσεων είναι αυθόρμητη και ταχεία λόγω της υψηλής πίεσης στην οποία προωθείται, η οποία κυμαίνεται μεταξύ τιμών 11-4 bar. Η μόνιμη αποθήκη (storage) όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο διατηρεί ποσότητα H<sub>2</sub> η οποία ασκεί πιέσεις εντός του εύρους των 26-36 bar. Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη υπερνίκησης της πίεσης της υπάρχουσας ποσότητας H<sub>2</sub> εντός της μόνιμης αποθήκης από την εισέρχουσα ποσότητα H<sub>2</sub> η οποία διαθέτει χαμηλότερη τιμή πίεσης. Η προκύπτουσα αυτή ανάγκη καλύπτεται από την διαμεσολάβηση ενός συστήματος άσκησης μηχανικής πίεσης μέσω εμβόλου το οποίο αποτελεί τον συμπιεστή H<sub>2</sub>. Ο συμπιεστής απορροφά την εισρέουσα ποσότητα H<sub>2</sub> με σχετικά σταθερό ρυθμό, και ταυτόχρονα θέτει σε λειτουργία έμβολο το οποίο μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει η συσκευή σε μηχανική. Η πίεση στην οποία προωθεί το H<sub>2</sub> ο συμπιεστής μέσω του εμβόλου, στην μόνιμη αποθήκη, είναι σαφώς μεγαλύτερη από την πίεση του H<sub>2</sub> εντός της αποθήκης, με αποτέλεσμα την επιτυχή εισροή και αποθήκευση νέων ποσοτήτων αερίου.

Ο συμπιεστής που χρησιμοποιείται στο σύστημα παρουσιάζει τεχνικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στο ακόλουθο πίνακα.

**Πίνακας 47:** Τεχνικές προδιαγραφές συμπιεστή H<sub>2</sub>.

CHARACTERISTICS	VALUES
Maximum Power Consumption	13,6 kW
Electric motor rating	15 kW
Electrical supply voltage	380-400 Volt
Supply frequency	50 Hz
Power supply phase	3
Speed	1450 cycles/min
Hydrogen delivery pressure	10 to 18 barg
Compressor capacity at 10 barg input pressure	3,6 Nm <sup>3</sup> /h
Compressor capacity at 18 barg input pressure	6,4 Nm <sup>3</sup> /h
Compressor discharge pressure	220 barg
Maximum design outlet pressure	400 barg
Weight	680 kg

Η συσκευή τίθεται σε λειτουργία τυπικά κατά 43 λεπτά έπειτα από το ξεκίνημα της ημερήσιας λειτουργία της μονάδας ηλεκτρόλυσης, ενώ παύει να λειτουργεί περίπου 20-22 λεπτά κατόπιν της λήξεως του τελευταίου κύκλου ηλεκτρολυτικής εργασίας. Η έναρξη

λειτουργίας του συμπιεστή προφανώς συνδέεται με την αυξημένη ασκούσα πίεση των συσσωρευόμενων παραγόμενων ποσοτήτων  $H_2$  κατά την πλήρη λειτουργία της μονάδας ηλεκτρόλυσης, ενώ αντιστοίχως η λήξη λειτουργίας συνδέεται με την λήξη λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης, η οποία αποτυπώνεται στην μείωση έως σχεδόν μηδενισμό της πίεσης που δεχεται ο συμπιεστής λόγω απουσίας εισροής νέων ποσοτήτων  $H_2$ .

Κατά το διάστημα μελέτης (**1/5/2012** έως **8/5/2012**) ο συμπιεστής  $H_2$  ετέθη σε λειτουργία εντός διαστημάτων προσαρμοσμένων στα ωράρια λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης όπως αναφέρθηκε ανωτέρω. Τονίζεται ότι το διάστημα λειτουργίας του συμπιεστή εντός κάθε ημέρας είναι συνεχές και αδιάλειπτο.

Ο ακόλουθος πίνακας συνοψίζει το ημερήσιο ωράριο λειτουργίας του συμπιεστή κατά την περίοδο μελέτης.

DATE	TIME IN WORK
1/5/2012	10:39-18:31
2/5/2012	9:49-17:21
3/5/2012	10:49-16:50
4/5/2012	11:04-17:35
5/5/2012	10:39-18:27
6/5/2012	10:39-17:03
7/5/2012	11:19-17:23
8/5/2012	11:08-17:14

## 7.5.2 ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Τα μεγέθη των οποίων η μελέτη θα αποδώσει την συμπεριφορά λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Μετρούμενα μεγέθη: Τα μεγέθη των οποίων οι τιμές παρέχονται από κατάλληλους αισθητήρες εντός του συστήματος.
- Υπολογιζόμενα μεγέθη: Τα μεγέθη των οποίων οι τιμές προκύπτουν από υπολογισμούς με βάση τα μετρούμενα μεγέθη.

### 7.5.2.1 ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ

Τα μετρούμενα μεγέθη είναι ονομαστικά:

1. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε μονάδες kWh.
2. Η κατανάλωση ισχύος σε μονάδες kW.
3. Η πίεση εντός της μόνιμης αποθήκης υψηλής πίεσης  $H_2$  (storage) σε μονάδες bar.

### 7.5.2.2 ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ

Τα υπολογιζόμενα μεγέθη προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρούμενων μεγεθών και είναι ονομαστικά:

1. Ο όγκος του συμπιεσμένου  $H_2$  σε μονάδες  $Nm^3$ .

2.Ο ρυθμός συμπίεσης του H<sub>2</sub> σε μονάδες Nm<sup>3</sup>/h.

3.Η ειδική κατανάλωση (specific yield) σε μονάδες kWh/Nm<sup>3</sup>. Το μέγεθος αυτό αποτελεί αποκλειστικό δείκτη της απόδοσης του συμπιεστή H<sub>2</sub>.

### 7.5.3 ΙΣΧΥΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ H<sub>2</sub>

Η κατανάλωση ισχύος όπως και η κατανάλωση ενέργειας καταγράφονται από ειδικό μετρητή εγκατεστημένο στην συσκευή συμπίεσης H<sub>2</sub>.

Η καταγραφόμενη τιμή της ισχύος της συσκευής αποτελεί την άμεση ένδειξη έναρξης και λήξης της διαδικασίας συμπίεσης αερίου.

Η καταγραφή της ισχύος λειτουργίας του συμπιεστή πραγματοποιείται με βήμα 1 λεπτού και παρέχεται σε αρχείο τύπου Excel, ομοίως δηλαδή με την καταγραφή της καταναλισκόμενης ισχύος, κατά την μελέτη της μονάδας ηλεκτρόλυσης και της κυψέλης καυσίμου.

Ο εγκατεστημένος συμπιεστής του συστήματος διαθέτει ονομαστική τιμή λειτουργίας 13,6 kW, ωστόσο όπως θα φανεί στην συνέχεια δεν απαιτείται παρά ένα μικρό μέρος αυτής της δυνατότητας συμπίεσης για το εύρος των πιέσεων της μόνιμης αποθήκης που παρατηρήθηκε κατά την περίοδο μελέτης.

Η ένδειξη ισχύος είναι μηδενική κατά τα διαστήματα εκτός λειτουργία, λόγω της απουσίας περιφερειακών συσκευών όπως στις περιπτώσεις της μονάδας ηλεκτρόλυσης και της κυψέλης καυσίμου. Κατά τα διαστήματα λειτουργίας αναπτύσσει σχετικά χαμηλή τιμή ισχύος, και χωρίς την παρουσία έντονων αυξομειώσεων.

Η απλή επισκόπηση της παρεχόμενης αναφοράς σε αρχείο Excel μπορεί να αποδώσει την μέση καθώς και την μέγιστη ισχύ λειτουργίας.

Ακολουθως προκύπτουν τα αποτελέσματα:

**Πίνακας 48:** Μέγιστη και μέση ισχύς λειτουργίας του συμπιεστή H<sub>2</sub>

Date	Time on compression (mins)	Maximum power consumed (kW)	Average power consumed (kW)
1/5/2012	472	2,62	1,51
2/5/2012	452	2,38	1,45
3/5/2012	361	2,37	1,45
4/5/2012	391	2,59	1,47
5/5/2012	468	2,53	1,47
6/5/2012	384	2,33	1,49
7/5/2012	363	2,4	1,44
8/5/2012	366	2,57	1,46

#### 7.5.4. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ο υπολογισμός της κατανάλωσης ενέργειας πρακτικά πραγματοποιείται ομοίως με τον υπολογισμό της ενέργειας της μονάδας ηλεκτρόλυσης. Η ένδειξη του μετρητή ενεργειακής κατανάλωσης είναι αρκετή για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτήθηκε για συγκεκριμένο διάστημα.

Η διαφορά της τιμής κατανάλωσης αρχής και λήξης ενός διαστήματος λειτουργίας αποδίδει το ποσό της ενέργειας που κατανάλωσε η συσκευή κατά το διάστημα αυτό.

$$E_{\text{CONS}} = E_{\text{END}} - E_{\text{START}}$$

Ο ακόλουθος πίνακας αποδίδει τις τιμές κατανάλωσης ενέργειας.

**Πίνακας 49:** Συνολική κατανάλωση ενέργειας συμπιεστή H<sub>2</sub>

Date	Energy consumed (kWh)
1/5/2012	11,847
2/5/2012	10,980
3/5/2012	8,823
4/5/2012	9,473
5/5/2012	11,437
6/5/2012	9,465
7/5/2012	8,822
8/5/2012	8,903
<b>TOTAL</b>	<b>79,750</b>

#### 7.5.5 ΟΓΚΟΣ ΣΥΜΠΙΕΣΘΕΝΤΟΣ H<sub>2</sub>

Ο υπολογισμός του συμπιεσθέντος όγκου H<sub>2</sub> προκύπτει μέσω του συστήματος EMCS (Energy Management and Control System) όπου η τιμή της πίεσης εντός της μόνιμης αποθήκης καταγράφεται με συχνότητα μέτρησης 1 min και η αναφορά συντάσσεται σε αρχείο τύπου Excel.

Ακολούθως η καταγραφόμενη τιμή πίεσης ( $P_{\text{STORAGE}}$ ) αντιστοιχίζεται σε τιμή κανονικού όγκου ( $V_{\text{STORAGE}}$ ) με την βοήθεια της μεθοδολογίας του χωρίου μελέτης της μονάδας ηλεκτρόλυσης.

Σχηματικά:

Pressure H<sub>2</sub> (bar)  $\longrightarrow$  Normal Volume H<sub>2</sub> (Nm<sup>3</sup>) (START) V<sub>1</sub>

Pressure H<sub>2</sub> (bar)  $\longrightarrow$  Normal Volume H<sub>2</sub> (Nm<sup>3</sup>) (STOP) V<sub>2</sub>

Τελικά η διαφορά V<sub>2</sub> - V<sub>1</sub> που παρατηρείται κατά την έναρξη-λήξη κάθε διαστήματος λειτουργίας ισούται με τον όγκο H<sub>2</sub> που συμπιέστηκε στο διάστημα αυτό.

Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών για κάθε ημέρα:

**Πίνακας 50:** Συνολικός συμπιεσθείς όγκος H<sub>2</sub>

Date	H <sub>2</sub> compressed (Nm <sup>3</sup> )
1/5/2012	20,538
2/5/2012	21,122
3/5/2012	15,799
4/5/2012	15,799
5/5/2012	20,264
6/5/2012	17,172
7/5/2012	15,970
8/5/2012	15,009
<b>TOTAL</b>	<b>141,673</b>

- Οι τιμές του συμπιεσμένου όγκου H<sub>2</sub> κατά προσέγγιση ταυτίζονται με τις υπολογισμένες τιμές αποθηκευμένου όγκου κατά την μελέτη της μονάδας ηλεκτρόλυσης. Οι ενδεχόμενες διαφορές αποδίδονται σε απώλειες κατά την διαδικασία συμπίεσης.

#### 7.5.6 ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΚΑΙ ΜΕΣΟΣ ΡΥΘΜΟΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

Ο ρυθμός συμπίεσης της συσκευής αφορά στον όγκο του H<sub>2</sub> που προωθείται στην μόνιμη αποθήκη ανά μονάδα χρόνου. Η μονάδα χρονικής αναφοράς του συμπιεστή είναι η ώρα (hr) δεδομένου ότι η λειτουργία είναι συνεχής και διαρκεί 5-6 ώρες ημερησίως.

Ο υπολογισμός του ρυθμού συμπίεσης επιτυγχάνεται μέσω του ίδιου αρχείου αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε στον υπολογισμό του συμπιεσθέντος όγκου H<sub>2</sub>. Επίσης χρησιμοποιείται η ίδια μεθοδολογία για την αντιστοίχιση τιμών πίεσης σε τιμές κανονικού όγκου.

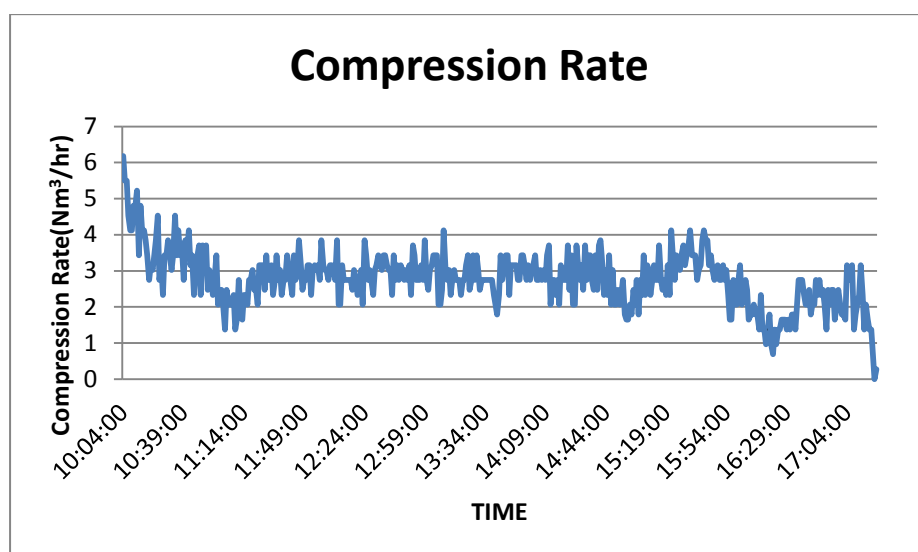
Τελικά ο υπολογισμός πραγματοποιείται μέσω των ακόλουθων βημάτων:

- Υπολογίζονται οι διαφορές όγκου της μόνιμης αποθήκης που προκύπτουν ανά λεπτό, που είναι και η συχνότητα καταγραφής. Ουσιαστικά οι προκύπτουσες τιμές αντιστοιχούν σε ρυθμό συμπίεσης ανά λεπτό (Nm<sup>3</sup>/min)
- Οι ευρεθείσες διαφορές όγκων παρουσιάζουν συνήθως θετικές τιμές, ωστόσο παρουσιάζουν και αρνητικές τιμές, γεγονός που δεν αιτιολογείται δια της λογικής καθότι κατά την συμπίεση του H<sub>2</sub> η ροή του αερίου είναι μονοσήμαντα προσανατολισμένη προς την μόνιμη αποθήκη αυξάνοντας συνεχώς τον αποθηκευμένο όγκο. Οι διαφορές αυτές εμπίπτουν σε στατιστικά λάθη που παρουσιάζουν οι αισθητήρες, δεδομένου ότι ο ανά λεπτό συμπιεζόμενος όγκος είναι πολύ μικρός σε σχέση με τον ήδη αποθηκευμένο.
- Η εξομάλυνση του ρυθμού συμπίεσης προκειμένου να προκύπτουν αντιπροσωπευτικότερες τιμές και κυρίως μη αρνητικές, λαμβάνεται κινητός μέσος όρος των 15 τελευταίων μετρήσεων (οι οποίες αντιστοιχούν σε 15 λεπτά

λειτουργίας εαν ληφθεί υπόψιν η συχνότητα μέτρησης). Ο τύπος που δίνει τον κινητό μέσο όρο του ρυθμού συμπίεσης είναι:  
**Compress.rate** =  $(\Delta V_1 + \Delta V_2 + \dots + \Delta V_{15}) / 15$  (Nm<sup>3</sup>/min)

- Ο ευρεθείς ρυθμός συμπίεσης της ανωτέρω εξίσωσης αντιστοιχεί σε χρονική μονάδα λεπτού. Η επιζητούμενη αναγωγή σε επίπεδο ώρας επιτυγχάνεται με τροποποίηση της εξίσωσης ως εξής: **Compress.rate** =  $[(\Delta V_1 + \Delta V_2 + \dots + \Delta V_{15}) / 15] * 60$  (Nm<sup>3</sup>/hr)

Μέσω της ανωτέρω μεθοδολογίας προσδιορίζεται αποτελεσματικά ο ρυθμός συμπίεσης της συσκευής και προσδιορίζεται ακριβέστερα η δυναμική που αναπτύσσει κατά την διάρκεια της λειτουργίας του.



**Διάγραμμα 24:** Καμπύλη ρυθμού συμπίεσης H<sub>2</sub> για την 2/5/2012

Στο διάγραμμα παρουσιάζεται η τυπική μορφολογία της δυναμικής του ρυθμού συμπίεσης της συσκευής. Οι αρχικά αυξημένες τιμές συμπίεσης συνοδεύονται από μείωση και εξομάλυνση της λειτουργίας.

Ο μέσος ρυθμός συμπίεσης του συμπιεστή γενικά προκύπτει ως το πηλίκο του ολικού συμπιεσθέντος όγκου H<sub>2</sub> προς τον συνολικό χρόνο συμπίεσης και ακολούθως αναγωγή του αποτελέσματος σε επίπεδο ώρας.

$$\text{Average compress.rate} = (V_{H_2(\text{comp.})} / t_{\text{COMP}}) * 60 \quad (\text{Nm}^3/\text{hr})$$

Ο κατωτέρω πίνακας αποδίδει συνοπτικά και για κάθε ημέρα τον μέσο και μέγιστο ρυθμό συμπίεσης.



**Πίνακας 51:** Μέγιστος και μέσος ρυθμός συμπίεσης H<sub>2</sub>

Date	Time on compression (mins)	H <sub>2</sub> compressed (Nm <sup>3</sup> )	Maximum compressor capacity (Nm <sup>3</sup> /h)	Average compressor capacity (Nm <sup>3</sup> /h)
1/5/2012	472	20,538	5,907	2,611
2/5/2012	452	21,122	6,182	2,804
3/5/2012	361	15,799	5,907	2,626
4/5/2012	391	15,799	5,495	2,424
5/5/2012	468	20,264	5,770	2,598
6/5/2012	384	17,172	5,907	2,683
7/5/2012	363	15,970	5,907	2,640
8/5/2012	366	15,009	5,770	2,460

### 7.5.7 ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ειδική κατανάλωση ενέργειας (Specific Yield) αποτελεί την μοναδική έκφραση της απόδοσης του συμπιεστή συναρτώντας την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και συμπιεζόμενου όγκου.

Η μαθηματική έκφραση του μεγέθους είναι:  $Sp.yield = En.cons/V_{COMPRESSED}$

Τελικά η σύνθεση των ήδη ευρεθέντων αποτελεσμάτων ενέργειας και συμπιεσθέντος όγκου αποδίδει την τιμή της ειδικής κατανάλωσης για κάθε ημέρα.

**Πίνακας 52:** Μέγιστος και μέσος ρυθμός συμπίεσης H<sub>2</sub>

Date	Energy consumed (kWh)	H <sub>2</sub> compressed (Nm <sup>3</sup> )	Specific yield (kWh/Nm <sup>3</sup> )
1/5/2012	11,847	20,538	0,577
2/5/2012	10,980	21,122	0,520
3/5/2012	8,823	15,799	0,558
4/5/2012	9,473	15,799	0,600
5/5/2012	11,437	20,264	0,564
6/5/2012	9,465	17,172	0,551
7/5/2012	8,822	15,970	0,552
8/5/2012	8,903	15,009	0,593

### 7.5.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο συμπιεστής H<sub>2</sub> αποτελεί μία συσκευή χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης. Συμπιέζει ποσότητες υδρογόνου με σταθερό ρυθμό, όπως φαίνεται στο διαγραμμα 24. Η ειδική κατανάλωση της συσκευής επίσης δεν παρουσιάζει διακυμάνσεις για κάθε ημέρα μελέτης.

## 7.6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

### 7.6.1 ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ H<sub>2</sub>

Το σύστημα που απαρτίζεται από την μονάδα ηλεκτρόλυσης, τον συμπιεστή και την κυψέλη καυσίμου ουσιαστικά αποτελεί το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας και κατανάλωσης της αποθηκευμένης αυτής ενέργειας. Μπορεί να ονομαστεί σύστημα υδρογόνου ή σύστημα H<sub>2</sub>. Δεν πρέπει να συγχέεται με τον όρο "Σύστημα" που χρησιμοποιείται για την ολική εγκατάσταση.

Η μελέτη της λειτουργίας του συστήματος παραγωγής-αποθήκευσης- κατανάλωσης H<sub>2</sub> μπορεί να καταστεί εφικτή μέσω της συναρμογής των πορισμάτων που πρέκυσαν για κάθε επί μέρους τμήμα του ξεχωριστά.

Κεντρικό σημείο στην αξιολόγηση του συστήματος H<sub>2</sub> αποτελεί η μελέτη της απόδοσής του. Η απόδοση κάθε επί μέρους τμήματος προσδιορίστηκε ήδη στα προηγούμενα κεφάλαια, και αφορά στην ολική ενέργεια που κατανάλωσε κάθε συσκευή, σε σχέση με την ενέργεια που προσέφερε.

Η μελέτη της απόδοσης κάθε τμήματος του συστήματος H<sub>2</sub> πραγματοποιήθηκε εντός συνεχών διαστημάτων λειτουργίας. Επειδή όμως η ταυτόχρομη λειτουργία μονάδας ηλεκτρόλυσης-συμπιεστή και κυψέλης καυσίμου είναι ανέφικτη, θα ακολουθηθεί ένας προσεγγιστικός τρόπος υπολογισμού της απόδοσης του συστήματος H<sub>2</sub> σε επίπεδο ημέρας και συνολικά.

### 7.6.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Η μεθοδολογία υπολογισμού της απόδοσης του συστήματος H<sub>2</sub> ακολουθεί την μεθοδολογία των επί μέρους τμημάτων η οποία συνοψίζεται στον υπολογισμό του κλάσματος:

**Efficiency H<sub>2</sub> System = Energy out of the system/Energy into the system**

- Η εισερχόμενη ενέργεια για κάθε ημέρα λειτουργίας και συνολικά προκύπτει στον ακόλουθο πίνακα:

**Πίνακας 53:** Κατανάλωση ενέργειας συστήματος H<sub>2</sub> ανά ημέρα και συνολικά.

Date	Total electrical energy consumed by FC (kWh)	Energy consumed by Electrolyzer (kWh)	Energy consumed by Compressor (kWh)	Total energy consumed by H <sub>2</sub> System (kWh)
1/5/2012	18,419	181,191	11,847	211,457
2/5/2012	11,344	174,844	10,980	197,168
3/5/2012	11,559	148,139	8,823	168,521
4/5/2012	11,621	153,372	9,473	174,466
5/5/2012	9,507	179,865	11,437	200,809
6/5/2012	8,538	155,002	9,465	173,005
7/5/2012	19,088	147,975	8,822	175,885
8/5/2012	18,794	148,122	8,903	175,819
<b>TOTAL</b>	<b>108,87</b>	<b>1288,51</b>	<b>79,750</b>	<b>1.477,130</b>

- Η εξερχόμενη ενέργεια για κάθε ημέρα της περιόδου μελέτης αντιστοιχεί στην ενέργεια που απέδωσε η κυψέλη καυσίμου. Εντούτοις υπόψιν δεν θα ληφθεί η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις μετρήσεις της συστοιχίας (stack) αλλά η ενέργεια που προσέφερε τελικά η κυψέλη καυσίμου στο κτίριο.

**Πίνακας 54:** Προσφορά ηλεκτρικής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου προς το κτίριο ανά ημέρα και συνολικά.

Date	Electrical energy delivered to building by FC (kWh)
1/5/2012	66,045
2/5/2012	17,666
3/5/2012	20,048
4/5/2012	18,803
5/5/2012	0,000
6/5/2012	0,000
7/5/2012	0,000
8/5/2012	14,232
<b>TOTAL</b>	<b>136,794</b>

Ωστόσο οι υπολογισμοί της απόδοσης του συστήματος H<sub>2</sub> προφανώς οφείλουν να λάβουν υπόψιν την μεταβολή του όγκου του H<sub>2</sub> στην αποθήκη.

**Πίνακας 55:** Μεταβολή ποσότητας H<sub>2</sub> στην αποθήκη ανά ημέρα και συνολικά.

Date	H <sub>2</sub> stored (Nm <sup>3</sup> )	H <sub>2</sub> consumed from storage (Nm <sup>3</sup> )	Net H <sub>2</sub> storage exchange (Nm <sup>3</sup> )
1/5/2012	21,082	57,650	-36,568
2/5/2012	20,502	14,670	5,832
3/5/2012	15,475	18,340	-2,865
4/5/2012	15,703	16,980	-1,277
5/5/2012	20,142	0,000	20,142
6/5/2012	16,297	0,000	16,297
7/5/2012	15,853	0,000	15,853
8/5/2012	15,464	13,042	2,422
<b>TOTAL</b>	<b>140,518</b>	<b>120,682</b>	<b>19,836</b>

Εξετάζοντας τον πίνακα 55 γίνεται αντιληπτό ότι υπήρξαν ημέρες όπου αποθηκεύτηκε μεγαλύτερη ποσότητα H<sub>2</sub> από αυτή που καταναλώθηκε (άρα ολική μεταβολή θετικού προσήμου) και ημέρες που καταναλώθηκε μεγαλύτερη ποσότητα από αυτή που αποθηκεύτηκε (άρα μεταβολή αρνητικού προσήμου).

Οι διαφορές αυτές οφείλουν να ληφθούν υπόψιν στον προσδιορισμό της απόδοσης (efficiency), του συστήματος H<sub>2</sub>.

Η μεθοδολογία του υπολογισμού ακολουθεί την εξής συλλογιστική:

- Η ολική κατανάλωση ενέργειας όπως προέκυψε από τον πίνακα 53 είναι δεδομένη και τοποθετείται πάντοτε ως έχει στον παρονομαστή του κλάσματος της απόδοσης.
- Η ολική παραγωγή ενέργειας προς το κρίριο επίσης λαμβάνεται υπόψιν ως έχει και τοποθετείται στον αριθμητή του κλάσματος της απόδοσης.
- Κατά τις ημέρες όπου η κατανάλωση H<sub>2</sub> προκύπτει μεγαλύτερη της αποθήκευσης, σημαίνει ότι ουσιαστικά η κυψέλη καυσίμου "δανείστηκε" από την ήδη αποθηκευμένη ποσότητα H<sub>2</sub>. Για την επιπλέον αυτή ποσότητα που εκφράζεται με αρνητικό πρόσημο στην στήλη του Net storage exchange πρέπει να ληφθεί υπόψιν η ενέργεια που δαπανήθηκε για την παραγωγή και συμπίεση στην αποθήκη και η επιπλέον αυτή ενέργεια να προστεθεί στην κατανάλωση ενέργειας για την συγκεκριμένη ημέρα.
- Κατά τις ημέρες όπου η αποθήκευση H<sub>2</sub> προκύπτει μεγαλύτερη από την κατανάλωση H<sub>2</sub> τότε η κυψέλη καυσίμου αύξησε την ποσότητα της αποθήκης. Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να γίνει η εικασία ότι η ποσότητα αυτή καταναλώθηκε από την κυψέλη καυσίμου εντός της ίδιας ημέρας προκειμένου να προσδιοριστεί η ηλεκτρική ενέργεια που θα μπορούσε να παραληφθεί.
- Επίσης δεν λαμβάνονται υπόψιν πιθανές απώλειες κατά την κατανάλωση H<sub>2</sub>.

Προκειμένου να εφαρμοστεί πρακτικά η παραπάνω μεθοδολογία πρέπει να υπενθυμιστούν οι βασικές παράμετροι λειτουργίας για την μονάδα ηλεκτρόλυσης και τον συμπιεστή.

- **Average Specific Consumption (Electrolyzer):** 6,880 kWh/Nm<sup>3</sup>
- **Average Specific Consumption (Compressor):** 0,564 kWh/Nm<sup>3</sup>
- **Average Specific Production(Fuel Cell):** 1,658 kWh/Nm<sup>3</sup>
- **Average H<sub>2</sub> volume loss:** 20%

Ως παραδείγματα δίδονται οι υπολογισμοί της απόδοσης του συστήματος για την 1/5/2012 και την 2/5/2012.

#### 1) 1/5/2012

- Η ενέργεια που εξήλθε του συστήματος είναι ίση με 66,045 kWh.
- Η ενέργεια που εισήλθε στο σύστημα ως ηλεκτρική ενέργεια είναι ίση με 211,457 kWh.
- Η επιπλέον ποσότητα H<sub>2</sub> που κατανάλωσε από την αποθήκη η κυψέλη καυσίμου είναι ίση με 36,568 Nm<sup>3</sup>.

Συνεπώς η ολική εισαγόμενη ενέργεια είναι ίση με:

$$E_{in} = \text{Elect.input(kWh)} + \text{Net stor.vol.exchange(Nm}^3\text{)} * [(\text{Sp.cons.(E/L)} + \text{Sp.cons(Comrp.)}]$$

$$E_{in} = 211,457\text{kWh} + 36,568\text{Nm}^3 \times (6,880\text{kWh/Nm}^3 + 0,564 \text{ kWh/Nm}^3) = 483,669\text{kWh}$$

Τελικά η απόδοση του συστήματος είναι ίση με:

$$\text{Efficiency} = E_{out}/E_{in} = 66,045 \text{ kWh}/483,669\text{kWh} = 0,13655 \text{ ή } 13,655\%$$

**2) 2/5/2012**

- Η ενέργεια που εισήλθε στο σύστημα είναι ίση με 197,168kWh.
- Η ενέργεια που εξήλθε της κυψέλης καυσίμου ως τροφοδοσία του κτιρίου είναι ίση με 18,553kWh.
- Η περίσσεια ποσότητας H<sub>2</sub> που απέμεινε στην αποθήκη είναι ίση με 5,832Nm<sup>3</sup>.

Συνεπώς η ολική εξερχόμενη ενέργεια είναι ίση με:

$$E_{out} = E_{I.energy\ to\ build.}(kWh) + Net\ stor.vol.exchange(Nm^3) * (Sp.cons.FC)(kWh/Nm^3)$$

$$E_{out} = 18,553kWh + 5,832Nm^3 * 1,658\ kWh/Nm^3 = 28,222\ kWh$$

Ωστόσο η ειδική απόδοση αφορά την ενέργεια που προκύπτει από την συστοιχία (stack). Πρέπει να λυφθεί υπόψιν η απώλεια ενέργειας της τάξεως του 12% (Μέση τιμή) που προκύπτει κατά την τροφοδοσία του κτιρίου καθώς και την απώλεια ποσότητας H<sub>2</sub> εντός της κυψέλης καυσίμου η οποία για κάθε διάστημα λειτουργίας ανέρχεται σε 20% της ποσότητας του H<sub>2</sub> που απορροφά από την αποθήκη. (Βλ. Χωρίο Κυψέλης καυσίμου).

Συνεπώς η ολική ενέργεια που εξέρχεται είναι ίση με

$$E_{out} = 28,222\ kWh * 0,88 * 0,80 = 24,473kWh$$

Τελικά η απόδοση του συστήματος είναι ίση με:

$$Efficiency = E_{out}/E_{in} = 24,473kWh/197,168kWh = 0,12412\ \text{ή}\ 12,412\%$$

Χρησιμοποιώντας την ίδια προσέγγιση δηλαδή λαμβάνοντας υπόψιν το έλλειμμα ή το περίσσειμα που προκύπτει στην αποθήκη για κάθε ημέρα είναι εφικτός ο προσδιορισμός της απόδοσης του συστήματος H<sub>2</sub>.

**Πίνακας 56:** Απόδοση συστήματος H<sub>2</sub>.

Date	Energy TO the H <sub>2</sub> system	Energy FROM the H <sub>2</sub> system	Efficiency (%)
1/5/2012	483,669	66,045	13,655
2/5/2012	197,168	24,473	12,412
3/5/2012	189,848	20,048	10,560
4/5/2012	183,972	18,803	10,221
5/5/2012	200,809	0,000	0,000
6/5/2012	173,005	0,000	0,000
7/5/2012	175,885	0,000	0,000
8/5/2012	175,819	17,059	9,703
<b>TOTAL</b>	<b>1.477,130</b>	<b>159,947</b>	<b>10,828</b>

Τέλος ως τονιστεί η απόδοση είναι καθαρά ηλεκτρική. Η αστάθεια των μετρήσεων της εκλυόμενης θερμότητας που παρατηρήθηκε κατά το αντίστοιχο κεφάλαιο της μελέτης της κυψέλης καυσίμου, αποτρέπει από τον κατά προσέγγιση υπολογισμό της συνδυασμένης απόδοσης ηλεκτρισμού και θερμότητας λόγω ενδεχόμενων μεγάλων αποκλίσεων που θα καθιστούσαν αναξιόπιστα τα αποτελέσματα.

## 7.7 ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΕ-Η<sub>2</sub>

Το υβριδικό σύστημα ΑΠΕ-Η<sub>2</sub> μελετήθηκε αναλυτικά για το διάστημα 1/5/2012 - 8/5/2012 όπου καταγράφηκε αναλυτικά η λειτουργία του ως προς την κατανάλωση ενέργειας των επιμέρους τμημάτων του, ως προς την δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας υπό μορφήν Η<sub>2</sub>, ως προς την δυνατότητα συνδυασμού των πηγών παραγωγής ενέργειας, εν τέλει την ικανότητα ενεργειακής αυτονομίας ενός τέτοιου συστήματος, υπό δεδομένες πάντοτε συνθήκες.

### 7.7.1 ΕΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ενεργειακή αυτονομία του συστήματος μπορεί να κριθεί για το επίπεδο κάθε ημέρας. Κομβικής σημασίας αποτελεί η αλληλεπίδραση με το συμβατικό δίκτυο ηλεκτρισμού δηλαδή την Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) η οποία εντός της εργασίας μεταφράζεται στην Αγγλική ως "PPC" εκ του Public Power Company.

Η λογική του ισοζυγίου αναφέρεται στην στάθμιση της ολικής παραγόμενης ενέργειας του συστήματος σε σύγκριση με την ολική ενεργειακή κατανάλωση.

Το ισοζύγιο του συστήματος μελετάται σε επίπεδο ημέρας (24ωρή καταγραφή) όπου σε επίπεδο εξίσωσης η λογική είναι η ακόλουθη:

**$E_{produced} - E_{consumed} = E_{exchanged\ with\ PPC}$**  (εξίσωση ισοζυγίου ενεργειας)

Η ενέργεια ανταλλαγής με το δίκτυο της ΔΕΗ προφανώς εάν είναι θετικού προσήμου σημαίνει ότι το σύστημα κατέστη αυτάρκες για τη συγκεκριμένη ημέρα ενώ εάν είναι θετικού προσήμου σημαίνει ότι κατέστη ανεπαρκές στην κάλυψη των αναγκών του σε ενέργεια, με αποτέλεσμα να την εισάγει από το συμβατικό δίκτυο.

### 7.7.2 ΚΑΤΑΝΑΛΩΘΕΙΣΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η καταναλωθείσα ηλεκτρική ενέργεια προκύπτει ως άθροισμα των επί μέρους καταναλώσεων των διαφόρων φορτίων που προκύπτουν. Συνοψίζοντας λοιπόν τα φορτία αυτά είναι:

- Η ενέργεια που καταναλώθηκε από τις εγκατεστημένες συσκευές του κτιρίου (Building consumption).
- Η ενέργεια που καταναλώθηκε από την μονάδα ηλεκτρόλυσης.
- Η ενέργεια που καταναλώθηκε από τον συμπιεστή του Η<sub>2</sub>.
- Η ενέργεια που καταναλώθηκε από την κυψέλη καυσίμου.

### 7.7.3 ΠΑΡΑΧΘΕΙΣΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

- Η ενέργεια που παρήγαγε η διάταξη φωτοβολταϊκών επιφανειών.
- Η ενέργεια που παρήγαγε η διάταξη ανεμογεννητριών.
- Η ενέργεια που παρήγαγε η κυψέλη καυσίμου.

#### 7.7.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ας εξεταστεί αρχικά το ισοζύγιο ενέργειας για την πρώτη ημέρα λειτουργίας (1/5/2012).

Η ολική κατανάλωση προκύπτει όπως στον ακόλουθο πίνακα:

**Πίνακας 57:** Ημερήσια κατανάλωση ενέργειας ανά τύπο φορτίου και συνολικά.

LOAD TYPE	ENERGY CONSUMED (kWh)
BUILDING	193,087
ELECTROLYSER	181,191
COMPRESSOR	11,847
FUEL CELL	18,419
<b>TOTAL</b>	<b>404,544</b>

Η ολική παραγωγή ενέργειας προκύπτει όπως στον ακόλουθο πίνακα:

**Πίνακας 58:** Ημερήσια κατανάλωση ενέργειας ανά τύπο φορτίου και συνολικά.

PRODUCTION SOURCE	ENERGY PRODUCED (kWh)
PHOTOVOLTAICS	242,189
WIND TURBINES	85,822
FUEL CELL	66,045
<b>TOTAL</b>	<b>394,056</b>

Απομένει λοιπόν η σύγκριση των υπολογιζομένων μεγεθών

Τελικά η εξίσωση δίνει:

$$E_{\text{produced}} - E_{\text{consumed}} = 394,056 - 405,544 = -11,488 \text{ (kWh)}$$

Το οποίο σημαίνει ότι για την συγκεκριμένη ημέρα παρουσιάστηκε ενεργειακό έλλειμμα, το οποίο αναμένεται να καλύψει το συμβατικό δίκτυο.

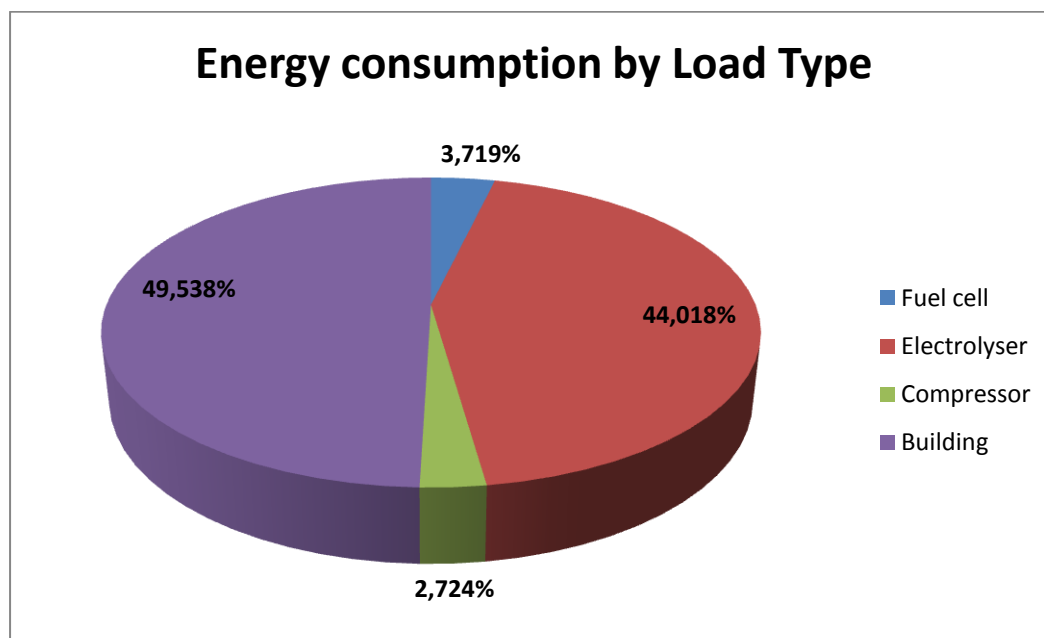
Υπό την ίδια μεθοδολογία υπολογίζεται για κάθε ημέρα το ισοζύγιο ενέργειας.

Συνολικά για την περίοδο μελέτης προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

**Πίνακας 59:** Η ενεργειακή κατανάλωση για κάθε ημέρα, για κάθε φορτίο και ως συνολική ποσοστιαία συμμετοχή.

Date	Energy consumed by FC (kWh)	Energy consumed by Electrolyzer (kWh)	Energy consumed by Compressor (kWh)	Energy consumed by Building (kWh)	Total energy consumed (kWh)
1/5/2012	18,419	181,191	11,847	193,087	405,544
2/5/2012	11,344	174,844	10,980	189,828	386,996
3/5/2012	11,559	148,139	8,823	200,633	369,154
4/5/2012	11,621	153,372	9,473	196,250	370,716
5/5/2012	9,507	179,865	11,437	149,361	350,17
6/5/2012	8,538	155,002	9,465	139,662	312,667
7/5/2012	19,088	147,975	8,822	191,061	366,946
8/5/2012	18,794	148,122	8,903	189,208	365,027
<b>TOTAL</b>	<b>108,87</b>	<b>1288,51</b>	<b>79,750</b>	<b>1.450,090</b>	<b>2927,22</b>
<b>PERCENT(%)</b>	<b>3,719</b>	<b>44,018</b>	<b>2,724</b>	<b>49,538</b>	<b>100</b>

- Η κατανομή της ενεργειακής κατανάλωσης ανά είδος φορτίου αναδεικνύει την μονάδα ηλεκτρόλυσης και την κατανάλωση του κτιρίου ως τα πλέον ενεργοβόρα τμήματα του συστήματος.



**Διάγραμμα 25:** Ενεργειακή κατανάλωση ανά είδος φορτίου.

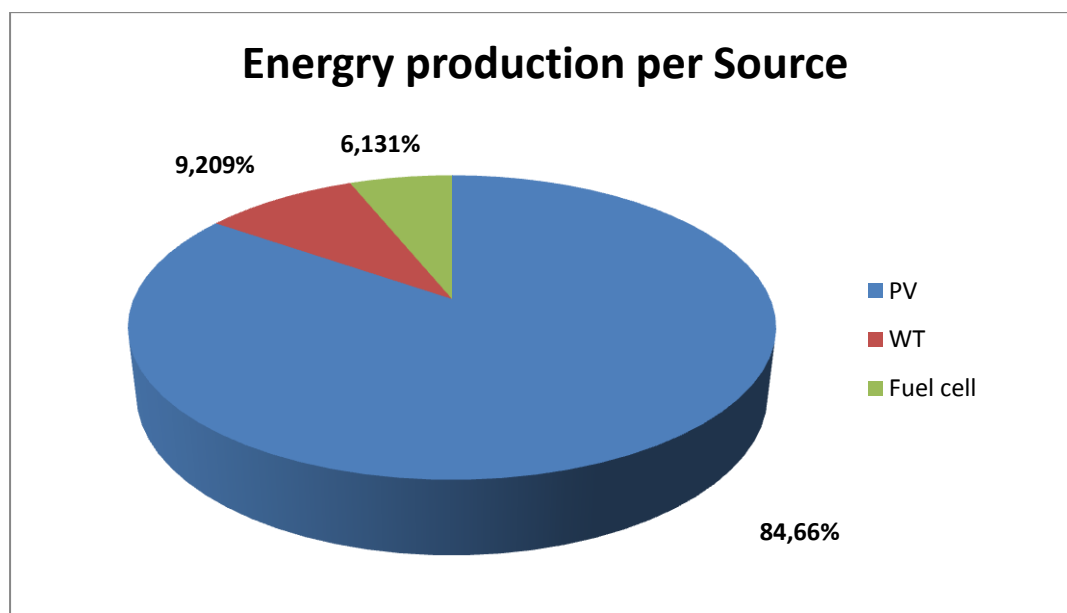


Ομοίως πρέπει να γίνει κατανομή της παραγόμενης από το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας από τις τρεις πηγές, την διάταξη των φωτοβολταϊκών, την διάταξη των ανεμογεννητριών και την κυψέλη καυσίμου.

**Πίνακας 60:** Η ενεργειακή παραγωγή για κάθε ημέρα, για κάθε πηγή και ως συνολική ποσοστιαία συμμετοχή.

Date	Energy delivered to building - PV (kWh)	Energy delivered to building - WT (kWh)	Electrical energy delivered to building - FC (kWh)	Total energy delivered to System (kWh)
1/5/2012	242,189	85,822	66,045	394,056
2/5/2012	244,013	90,537	17,666	352,216
3/5/2012	237,087	6,587	20,048	263,722
4/5/2012	239,012	0,385	18,803	258,200
5/5/2012	247,879	2,594	0,000	250,473
6/5/2012	240,154	9,770	0,000	249,924
7/5/2012	240,032	0,401	0,000	240,433
8/5/2012	198,570	9,386	14,232	222,188
<b>TOTAL</b>	<b>1.888,936</b>	<b>205,482</b>	<b>136,794</b>	<b>2.231,212</b>
<b>PERCENT(%)</b>	<b>84,660</b>	<b>9,209</b>	<b>6,131</b>	<b>100</b>

- Η κατανομή της ολικής ενέργειας που παρήγαγε το σύστημα αναδεικνύει την σαφή υπεροχή της διάταξης φωτοβολταϊκών.



**Διάγραμμα 26:** Συνεισφορά του κάθε ηλεκτροπαραγωγικού τμήματος στην ολική παραγωγή ενέργειας.

Τα ανωτέρω αποτελέσματα αποδίδουν σε απόλυτους αριθμούς αλλά και ως ποσοστά το γενικό προφίλ της κατανάλωσης και παραγωγής ενέργειας στο σύστημα.

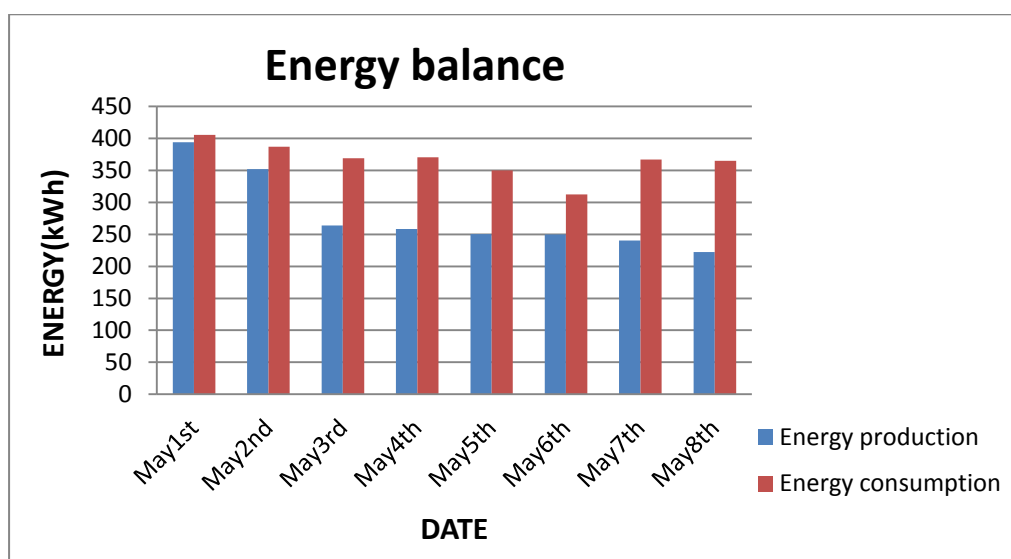
Απομένει η σύγκριση των ημερήσιων τιμών ολικής ενεργειακής κατανάλωσης και ολικής ενεργειακής παραγωγής προκειμένου να εκτιμηθεί ενεργειακή επάρκεια του συστήματος.

Τα αποτελέσματα προκύπτουν λαμβάνοντας υπόψιν τις τελευταίες στήλες των πινάκων 59 και 60.

**Πίνακας 61:** Σύγκριση τιμών κατανάλωσης - παραγωγής ενέργειας για κάθε ημέρα και συνολικά.

Date	Energy produced(kWh)	Energy consumed(kWh)	Energy Difference(kWh)
1/5/2012	394,056	405,544	-10,488
2/5/2012	352,216	386,996	-34,780
3/5/2012	263,722	369,154	-105,432
4/5/2012	258,200	370,716	-112,516
5/5/2012	250,473	350,170	-99,697
6/5/2012	249,924	312,667	-62,743
7/5/2012	240,433	366,946	-126,513
8/5/2012	222,188	365,027	-142,839
<b>TOTAL</b>	<b>2.231,212</b>	<b>2.926,220</b>	<b>-695,008</b>

- Τελικά προκύπτει η ανεπάρκεια του συστήματος προς κάλυψη των ενεργειακών του αναγκών, στηριζόμενο αποκλειστικά στις δικές του παραγωγικές πηγές.
- Το προφίλ παραγωγής - κατανάλωσης του συστήματος παρουσιάζει ανομοιομορφίες. Ειδικότερα, η κατανάλωση ενέργειας παρουσιάζει εικόνα σχετικής σταθερότητας (μικρότερη διασπορά τιμών), ενώ η παραγωγή παρουσιάζει εικόνα αστάθειας (μεγαλύτερη διασπορά). Η ολική παραγωγή, πριμοδοτούμενη από την αυξημένη παραγωγή των ανεμογεννητριών κατά τις πρώτες δύο ημέρες προσεγγίζει αρκετά την ολική κατανάλωση.



**Διάγρ.27:** Ισορροπία παραγωγής- κατανάλωσης για κάθε ημέρα της περιόδου μελέτης

### 7.7.5 ΑΝΤΑΛΛΑΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΤΟ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

Το υβριδικό σύστημα ΑΠΕ-Η<sub>2</sub>, όπως σημειώθηκε κατά την περιγραφή, είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο συμβατικού ηλεκτρισμού (εν προκειμένω με την ΔΕΗ) ανταλλάσσοντας ενέργεια.

- Κατά διαστήματα που η παραγόμενη ενέργεια αποκτά υψηλότερη τιμή από την καταναλισκόμενη ενέργεια, το ενεργειακό πλεόνασμα αποστέλλεται προς το δίκτυο.
- Κατά διαστήματα που η παραγόμενη ενέργεια αποκτά χαμηλότερη τιμή από την καταναλισκόμενη ενέργεια, το ενεργειακό έλλειμμα καλύπτεται από το δίκτυο.

Η ανταλλαγή ενέργειας πραγματοποιείται μέσω σύνδεσης η οποία επιτρέπει την μονοσήμαντη εισροή ή εκροή ενέργειας.

Το σύστημα EMCS παρείχε για τις ανάγκες της εργασίας την μέτρηση της εισρέουσας και εκρέουσας ενέργειας. Η καταγραφή είχε την μορφή αρχείου τύπου Excel με συχνότητα καταγραφής 1 λεπτού.

Η επεξεργασία των μετρήσεων ενέργειας μπορούν να παρουσιαστούν στον ακόλουθο πίνακα:

**Πίνακας 62:** Κλιμάκωση εισροών-εκροών ηλεκτρικής ενέργειας από και προς το δίκτυο (PPC).

Date	Energy received from PPC(kWh)	Energy delivered to PPC(kWh)	Total energy exchange(kWh)
1/5/2012	101,8086	87,375	-14,434
2/5/2012	126,3359	88,0703	-38,266
3/5/2012	144,8164	35,8046	-109,012
4/5/2012	154,1953	38,226	-115,969
5/5/2012	145,0195	41,6013	-103,418
6/5/2012	117,1758	50,402	-66,770
7/5/2012	165,1016	34,976	-130,125
8/5/2012	172,7344	26,328	-146,406
<b>TOTAL</b>	<b>1127,188</b>	<b>402,7891</b>	<b>-724,4</b>

- Οι ευρεθείσες τιμές βρίσκονται πολύ κοντά στις διαφορές παραγωγής-κατανάλωσης του Πίνακα 61. Έτσι προκύπτει το από πού καλύφθηκαν τα ενεργειακά ελλείμματα που παρουσιάστηκαν στον πίνακα 61. Το συμβατικό δίκτυο προσέφερε την επιπλέον ενέργεια προκειμένου να εξασφαλισθεί η συνεχής και αδιάλειπτη λειτουργία των συσκευών του συστήματος.
- Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξαγωγή σημαντικών ποσοτήτων του συστήματος προς το συμβατικό δίκτυο, παρά την συνολικά ελλειμματική εικόνα. Το εύρημα αυτό επιβεβαιώνει τον διαλείποντα χαρακτήρα των ανανεώσιμων πηγών.

### 7.7.6 ΠΡΟΦΙΛ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, το σύστημα έδωσε ενέργεια προς το δίκτυο ενώ έλαβε μεγαλύτερες ποσότητες από το δίκτυο.

Ωστόσο είναι σημαντικό να ακολουθηθεί με ακρίβεια η ροή της ενέργειας εντός του συστήματος .

Η παρακολούθηση της ροής της ενέργειας στο δίκτυο μπορεί να αποδοθεί με την απεικόνιση τριών παραμέτρων:

1. Ολική φόρτιση.
2. Ολική παραγωγή.
3. Ισχύς ανταλλασσόμενου ρεύματος.

Οι τρεις παράμετροι εκφράζονται σε μονάδες ισχύος (kW).

Στην συνέχεια αναλύεται η διαμόρφωση των παραμέτρων για την τελική σύνθεση.

**Ολική φόρτιση:** Προκύπτει ως το άθροισμα των ενδείξεων ισχύος όλων των συσκευών που καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια. Η ένδειξη της ισχύος όπως αναφέρθηκε πραγματοποιείται μέσω του συστήματος EMCS, και έχει συχνότητα καταγραφής 1 λεπτό. Συνεπώς για το δεδομένο λεπτό συναθροίζονται οι τιμές ισχύος του κάθε ενεργοβόρου τμήματος και δίνουν την ολική ισχύ κατανάλωσης του συστήματος για την δεδομένη χρονική στιγμή.

Το ακόλουθο παράδειγμα μπορεί να καταδείξει σαφέστερα την μεθοδολογία υπολογισμού.

Time	Electrolyzer (kW)	Fuel cell (kW)	Building (kW)	Compressor (kW)	Total Load (kW)
12:20:00	$P_{11}$	$P_{12}$	$P_{13}$	$P_{14}$	$P_{11}+P_{12}+P_{13}+P_{14}$
12:21:00	$P_{21}$	$P_{22}$	$P_{23}$	$P_{24}$	$P_{21}+P_{22}+P_{23}+P_{24}$
12:22:00	$P_{31}$	$P_{32}$	$P_{33}$	$P_{34}$	.....
12:23:00	$P_{41}$	$P_{42}$	$P_{43}$	$P_{44}$	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....

**[Σημείωση:**Επισημαίνεται οτι τα φορτία της κυψέλης και του κτιρίου δεν είναι ενιαία όπως στην περίπτωση της μονάδας ηλεκτρόλυσης όπου υπάρχει μόνο μία ένδειξη ισχύος. Στην περίπτωση του Fuel cell η κατανάλωση κατανέμεται σε τρία φορτία (FC, ICI Cabinet, External air cooler) ενώ του κτιρίου σε τέσσερα (Control Room, 2nd Switchboard, Attic Floor,Ground Floor). Τα φορτία αυτά ομαδοποιήθηκαν στον ανωτέρω πίνακα για λόγους εξοικονόμησης χώρου.]

**Ολική παραγωγή:** Προκύπτει ως το άθροισμα των ενδείξεων ισχύος των παραγωγικών πηγών.Δηλαδή για δεδομένη χρονική στιγμή  $t_1$  προκύπτει ολική παραγωγή

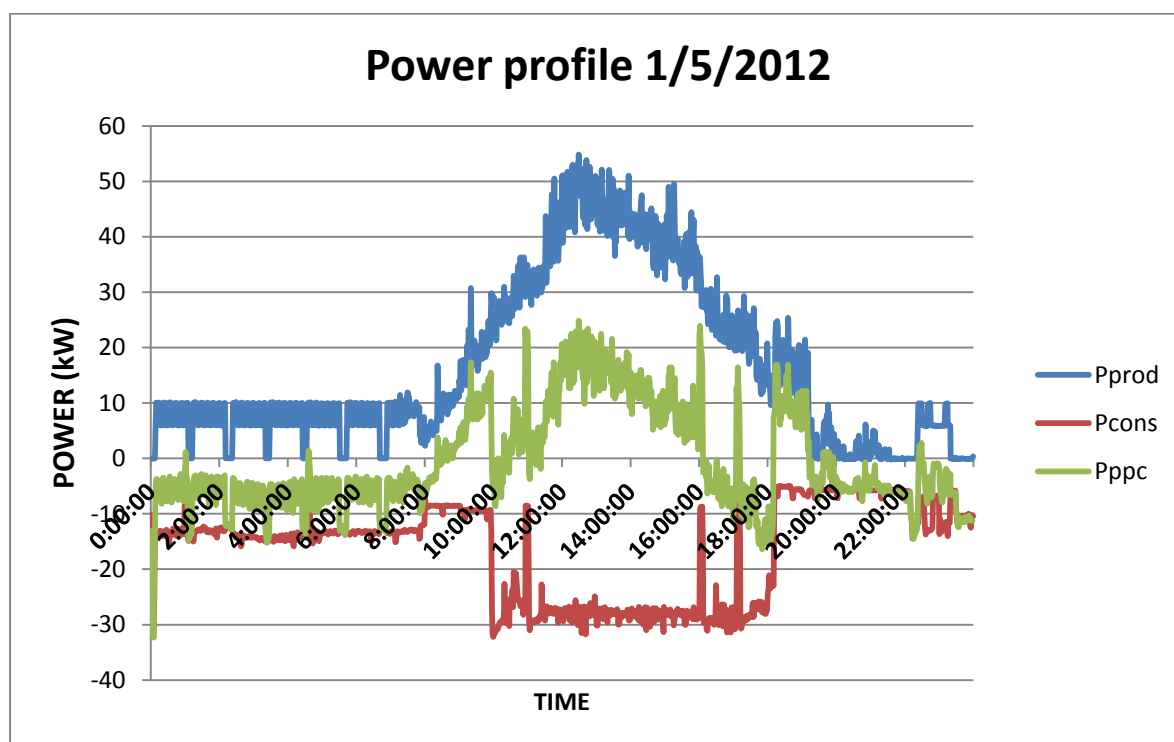
$$P_{totalprod.}(t_1) = P_{photovoltaics}(t_1) + P_{wind\ tubines}(t_1) + P_{fuel\ cell}(t_1)$$

**Ισχύς ανταλλασσόμενου ρεύματος:** Καταγράφεται ανεξάρτητα η ισχύς μέσω του EMCS.

Οι τρεις μεταβλητές που δημιουργήθηκαν όπως παραπάνω μπορούν να παρασταθούν σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Η από κοινού παράθεση των διακυμάνσεων των μεταβλητών **Pprod** (ολική παραγωγή) **Pcons** (ολική κατανάλωση) και **Pppc** (ισχύς δικτύου) σε σχέση με τον χρόνο και σε επίπεδο ημέρας, μπορεί να αποδώσει ικανοποιητικά το προφίλ της ροής ενέργειας εντός του συστήματος.

Τονίζεται ότι η **Pppc** όταν αποκτά θετικές (+) τιμές σημαίνει ότι το σύστημα προσφέρει ενέργεια στο δίκτυο, ενώ όταν αποκτά αρνητικές τιμές (-) σημαίνει ότι το σύστημα λαμβάνει ενέργεια από το δίκτυο.

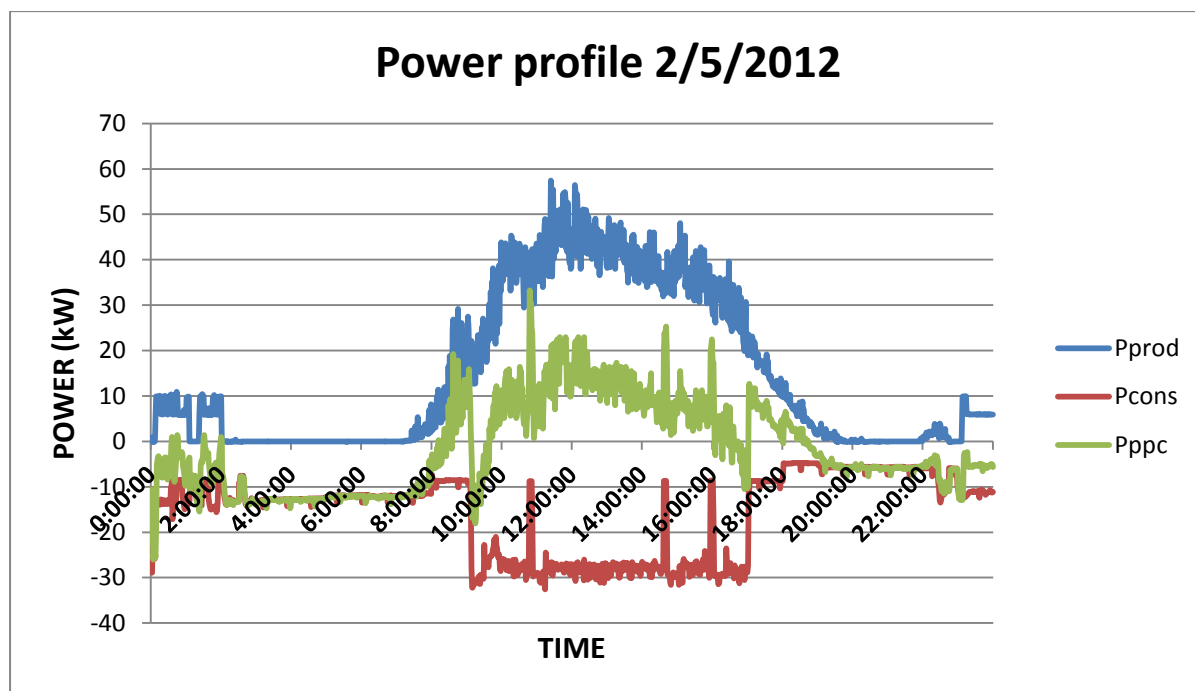


**Διάγραμμα 28:** Προφίλ ροής ενέργειας για την 1/5/2012.

- Η μπλέ γραμμή απεικονίζει την ολική ισχύ παραγωγής. Η κόκκινη γραμμή δείχνει την ολική ισχύ κατανάλωσης, η πράσινη γραμμή δείχνει την ισχύ της κατά περίπτωση εισερχόμενης ή εξερχόμενης ενέργειας. Με απλή επισκόπηση του διαγράμματος φαίνεται η συμπληρωματική δράση του δικτύου, το οποίο είτε συμπληρώνει τα ενεργειακά ελλείματα είτε απορροφά τα ενεργειακά πλεονάσματα. Για την δεδομένη χρονική στιγμή ισχύει ότι  **$P_{produced} - P_{consumed} = P_{exchanged\ with\ PPC}$** .
- Η εικόνα που παρουσιάζεται μπορεί να χωριστεί σε 3 διαστήματα.
  1. Κατά το διάστημα 00:00-8:30 το σύστημα αδυνατεί να καλύψει την υψηλή φόρτιση (Περίπου 15 kW) με αποτέλεσμα να εισάγει ισχύ από το δίκτυο η οποία ανέρχεται μεσοσταθμικά σε 5 kW περίπου. Η εισαγόμενη ισχύς είναι σχετικά χαμηλή λόγω της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου σε ισχύ 5-10 kW και ουσιαστικά δρα συμπληρωματικά αυτής. Παρατηρούνται μικρές

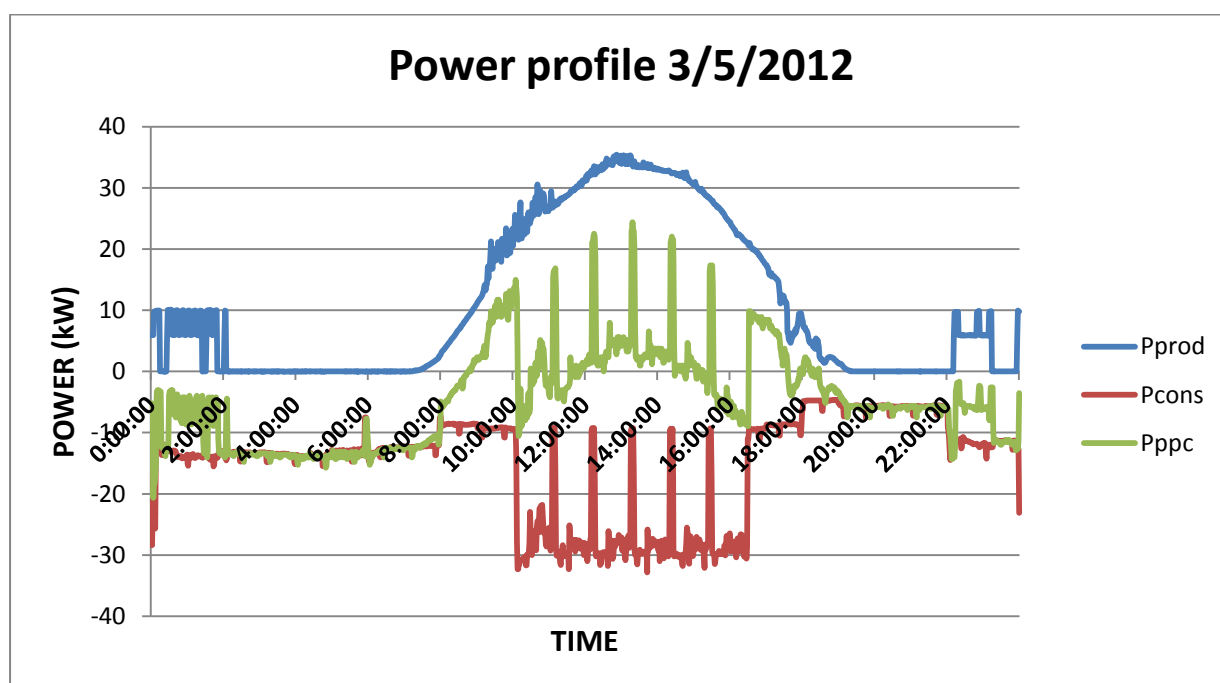
διακυμάνσεις της ισχύος του δικτύου σε τιμές ίσες με την φόρτιση και αντιστοιχούν στα διαστήματα διαλλείμματος της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου. Στα σύντομα αυτά διαστήματα το δίκτυο καλείται να καλύψει εξ ολοκλήρου την ενεργειακή ζήτηση λόγω απουσίας διαθέσιμης ισχύος από την κυψέλη καυσίμου και φυσικά από τις ΑΠΕ.

- Κατά το διάστημα 9:00-16:10 περίπου, η αθροιστική δράση της ισχύος των φωτοβολταϊκών και των ανεμογεννητριών καταφέρνουν να αγγίξουν πολύ υψηλές τιμές ισχύος δίνοντας το έναυσμα για έναρξη της ηλεκτρολυτικής διεργασίας. Παρά την αύξηση της ισχύος ζήτησης (φόρτισης) από την ταυτόχρονη λειτουργία της μονάδας ηλεκτρόλυσης και των λοιπών φορτίων του συστήματος, επιτυγχάνεται ενεργειακό πλεόνασμα για το μεγαλύτερο μέρος του διαστήματος αυτού, καταφέροντας την προσφορά ενέργειας προς το δίκτυο.
- Κατά το διάστημα 19:30-23:59, η ισχύς παραγωγής λόγω των ΑΠΕ φθίνει, κυρίως λόγω της δύσης του ηλίου. Ωστόσο η χαμηλή ισχύς φόρτισης (περίπου 5 kW) συμπληρώνεται εν μέρει από την δράση των ανεμογεννητριών, όσο και από ένα διάστημα λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου. Παρατηρούνται σύντομα διαστήματα όπου η κυψέλη καυσίμου ή οι ανεμογεννήτριες ανυψώνουν την ισχύ σε θετικές τιμές (εξαγωγή ενέργειας). **Γενικά εύκολα διαπιστώνεται η γρήγορη προσαρμογή του συστήματος για την εξασφάλιση της αδιάλειπτης ροής ενέργειας προς το σύστημα (απουσία διακοπών), την κάλυψη των ελλειμμάτων και την εκμετάλλευση των πλεονασμάτων για εξαγωγή ενέργειας.**



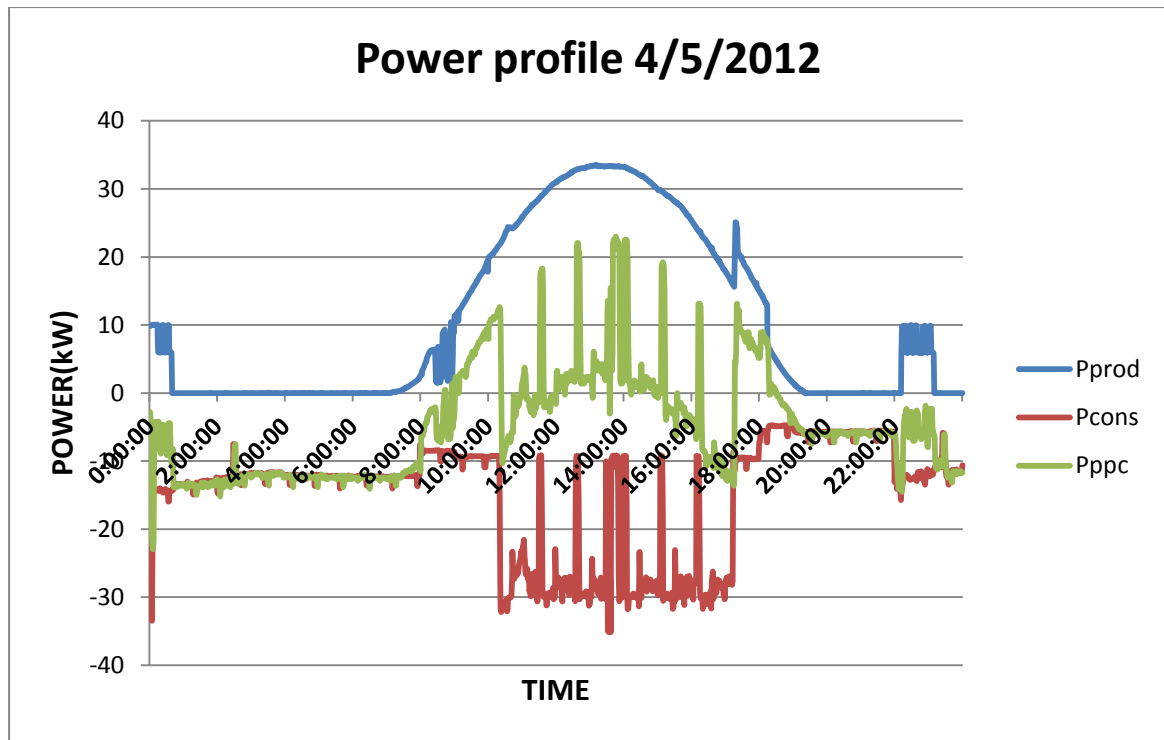
Διάγραμμα 29: Προφίλ ροής ενέργειας για την 2/5/2012.

- Κατά το διάστημα 00:00-02:00 η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου μειώνει κατά πολύ την ενεργειακή απαίτηση εξού και η μειωμένη ισχύς του εισερχόμενου από το δίκτυο ρεύματος. Εν συνεχεία και μέχρι τις 8:20 περίπου η ζήτηση ενέργειας του συστήματος (περίπου 13-15 kW) καλύπτεται απολύτως από το δίκτυο. Αυτό προκύπτει και από την ταύτιση των καμπυλών που φαίνονται στο σχήμα.
- Κατά το διάστημα 8:20-16:30 περίπου η συνδυασμένη παραγωγή ισχύος φωτοβολταϊκών και ανεμογεννητριών δίνουν απρόσκτητη παροχή ενέργειας προς το δίκτυο.
- Τελικά από τις 18:30 και μέχρι το τέλος της ημέρας ακολουθεί διάστημα ενεργειακού ελλείμματος και εισαγωγή ενέργειας από το δίκτυο. Την τελευταία ώρα (23:08-23:59) η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου μετριάζει την ένταση του εισερχόμενου ρεύματος.



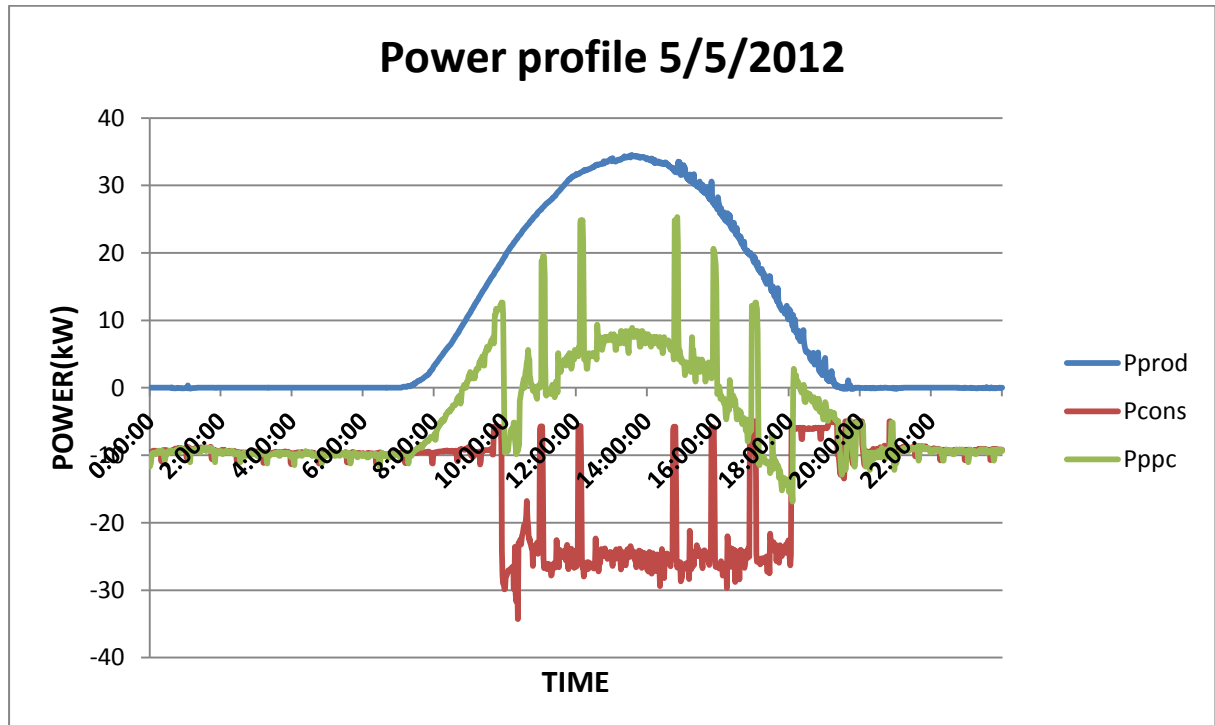
**Διάγραμμα 30:** Προφίλ ροής ενέργειας για την 3/5/2012.

- Η ενεργειακή παραγωγή φαίνεται πολύ πιο μειωμένη σε σχέση με τις δύο προηγούμενες ημέρες και αυτό οφείλεται στην εξαιρετικά μειωμένη παραγωγή των ανεμογεννητριών.
- Ουσιαστικά η παραγωγή εκτός του διαστήματος ηλιοφάνειας στηρίζεται από την λειτουργία της κυψέλης καυσίμου κατά το διάστημα 00:00-01:50 και κατά το διάστημα 22:00-23:59 (εξού και η χαμηλή ισχύς εισερχόμενου ρεύματος).
- Κατά το διάστημα 8:30-16:00 περίπου η παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά στηρίζει την ηλεκτρόλυση και παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια για την πραγματοποίησή της. Παρατηρείται ότι κατά τα σύντομα διαλλείμματα των 5' της μονάδας ηλεκτρόλυσης, η ισχύς του προσφερόμενου στο δίκτυο ρεύματος αποκτά εξαιρετικά υψηλές τιμές (έως και 23 kW περίπου).



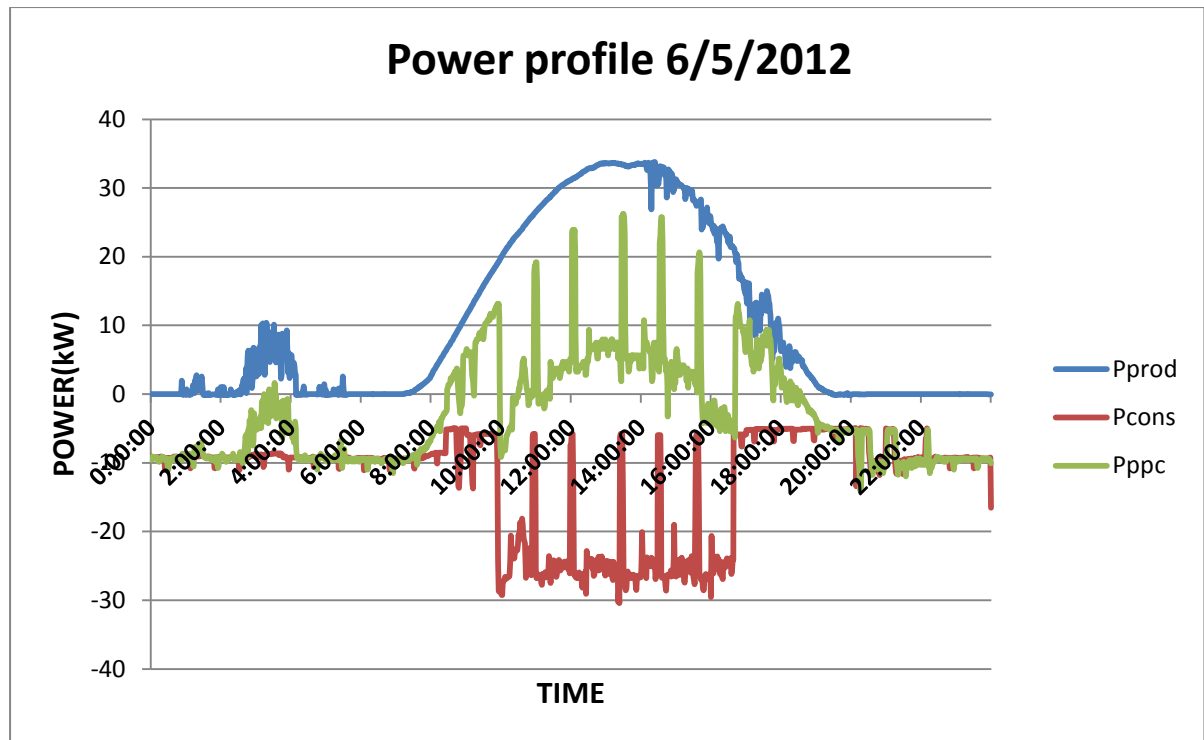
**Διάγραμμα 31:** Προφίλ ροής ενέργειας για την 4/5/2012.

- Η κατάσταση φόρτισης παρουσιάζει παρόμοιο προφίλ με την προηγούμενη ημέρα.

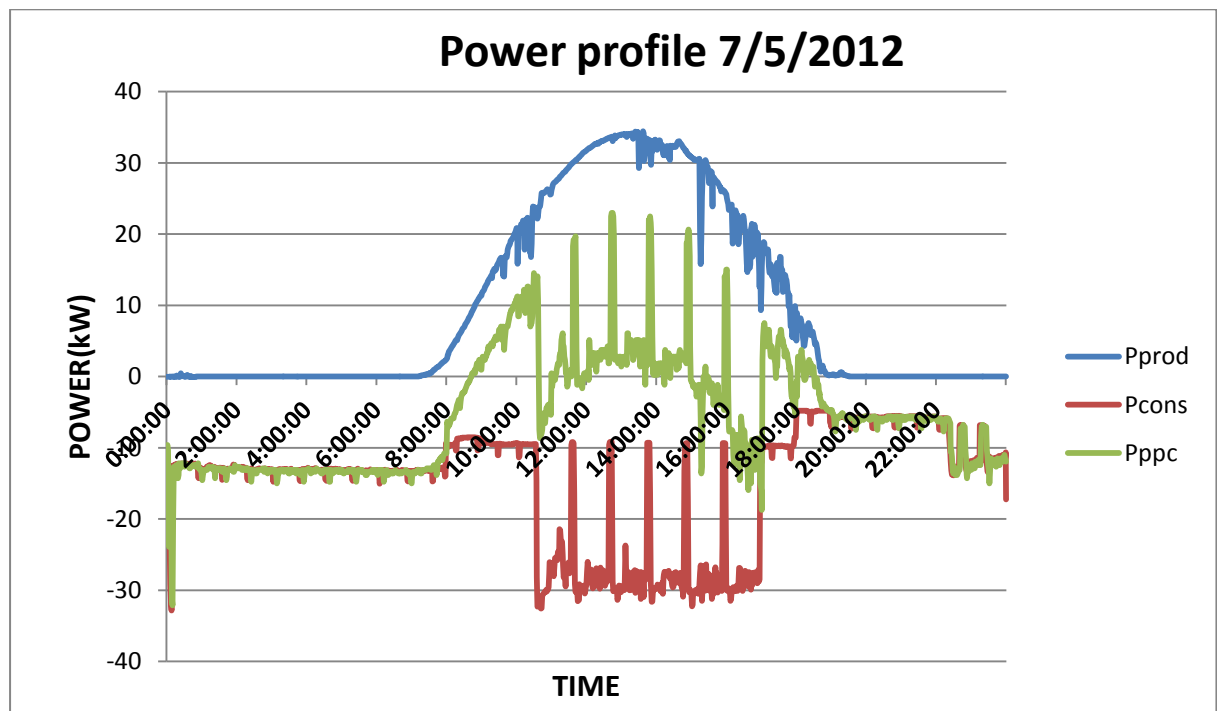


**Διάγραμμα 32:** Προφίλ ροής ενέργειας για την 5/5/2012.

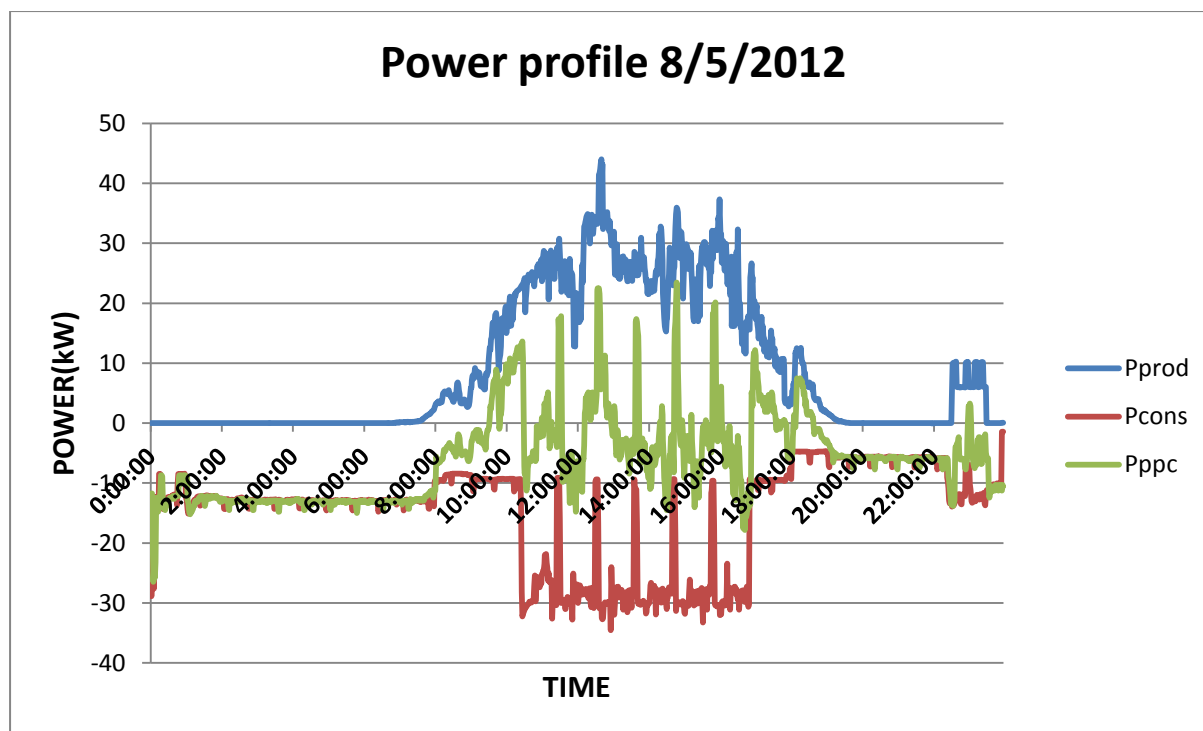




Διάγραμμα 33: Προφίλ ροής ενέργειας για την 6/5/2012.



Διάγραμμα 34: Προφίλ ροής ενέργειας για την 6/5/2012.



**Διάγραμμα 35:** Προφίλ ροής ενέργειας για την 8/5/2012.

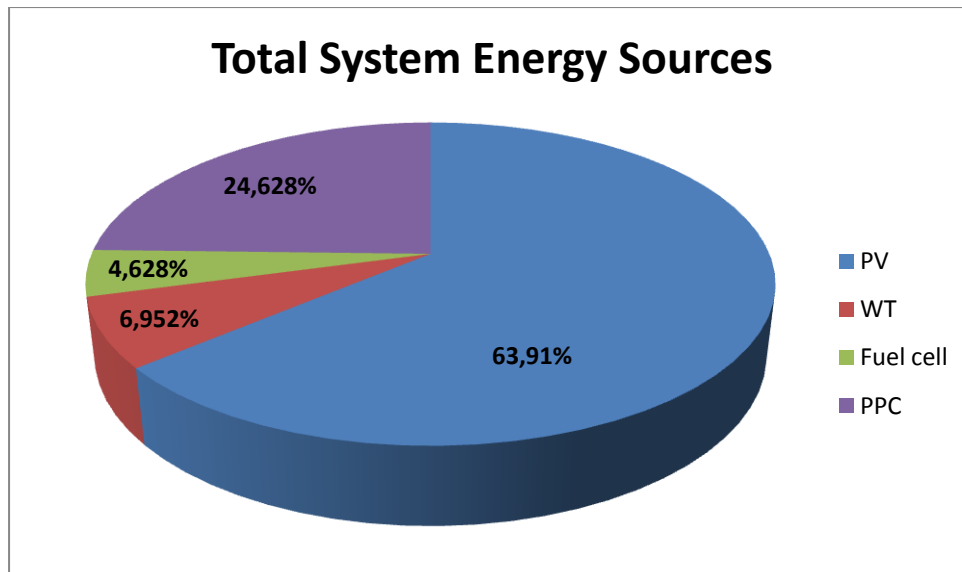
#### 7.7.7 ΟΛΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τελικά η ολική ενέργεια που εισέρευσε στο σύστημα και ανά είδος πηγής προκύπτει όπως στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 63:** Κατανομή πηγών ενέργειας του συστήματος συνολικά.

Date	Energy delivered to building - PV (kWh)	Energy delivered to building - WT (kWh)	Electrical energy delivered to building - FC (kWh)	Energy exchange with PPC (kWh)	Total energy delivered to System (kWh)
1/5/2012	242,189	85,822	66,045	14,434	408,490
2/5/2012	244,013	90,537	17,666	38,266	390,482
3/5/2012	237,087	6,587	20,048	109,012	372,734
4/5/2012	239,012	0,385	18,803	115,969	374,169
5/5/2012	247,879	2,594	0,000	103,418	353,891
6/5/2012	240,154	9,770	0,000	66,770	316,694
7/5/2012	240,032	0,401	0,000	130,125	370,558
8/5/2012	198,570	9,386	14,232	146,406	368,594
<b>TOTAL</b>	<b>1.888,936</b>	<b>205,482</b>	<b>136,794</b>	<b>724,400</b>	<b>2.955,612</b>

Στην διάγραμμα 26 παρουσιάστηκε η κατανομή της ενέργειας ανάλογα με κάθε πηγή ενέργειας του ίδιου του συστήματος. Ωστόσο όπως φάνηκε η ενέργεια αυτή δεν κατέστη ικανή να καλύψει τις ανάγκες του κτιρίου με αποτέλεσμα να χρειαστεί εισαγωγή ενέργειας από το συμβατικό δίκτυο.

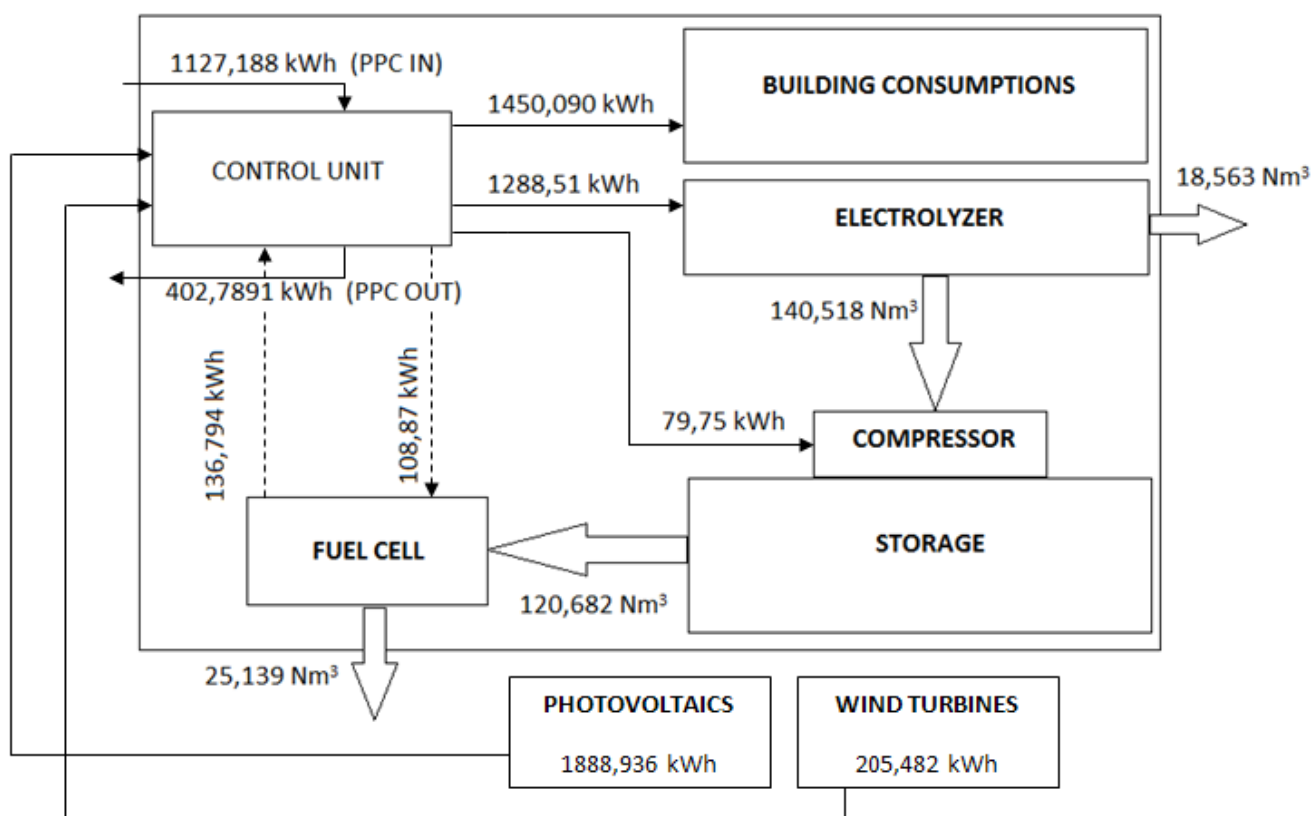


**Διάγραμμα 36:** Τελική κατανομή ενεργειακών συνεισφορών για την περίοδο μελέτης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κεντρική λογική της εργασίας απετέλεσε η διαμόρφωση ισοζυγίου μάζας και ενέργειας του υβριδικού συστήματος ΑΠΕ-Η<sub>2</sub>. Το υβριδικό σύστημα ΑΠΕ- Η<sub>2</sub> μελετήθηκε ενδελεχώς σε όλα τα προηγούμενα εδάφια με τελικό σκοπό τον προσδιορισμό της ενεργειακής του αυτάρκειας, δηλαδή της ικανότητας να παράξει μέσω των ανανεώσιμων πηγών που εκμεταλλεύεται και του συστήματος αποθήκευσης Η<sub>2</sub> που διαθέτει, περισσότερη ενέργεια από όση κατανάλωσε για την συντήρηση των φορτίων που το ίδιο έφερε. Τα φορτία, όπως αναφέρθηκε στο προοίμιο της εργασίας αποτελούν τον τυπικό εξοπλισμό που θα διέθετε ένα κτίριο εμπορικής χρήσης όπως ένα συγκρότημα γραφείων ή ένα συνεδριακό κέντρο.

Σχηματικά η αποτύπωση της ροής ενέργειας και ποσότητας (όγκων) Η<sub>2</sub> προκύπτει όπως στο ακόλουθο σχήμα:



**Σχήμα:** Ολικό ισοζύγιο μάζας ενέργειας για το υβριδικό σύστημα.

Η μελέτη κατά την επιλεγμένη περίοδο λειτουργίας κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος για την δεδομένη πάντα περίοδο θα ήταν ανέφικτη χωρίς την εισαγωγή ποσών ενέργειας από το συμβατικό δίκτυο. Το σύστημα κατά διαστήματα διέθετε ενεργειακά πλεονάσματα συνεισφέροντας στο δίκτυο, εντούτοις συνολικά, για τη συγκεκριμένη περίοδο, το σύστημα απαίτησε εισροή ενέργειας από το δίκτυο. Η συνεισφορά του δικτύου στο τελικό ισοζύγιο ανήλθε (όπως φαίνεται στο σχήμα) στο 1/4 περίπου της ολικής ενέργειας που απαίτησε το σύστημα για την κάλυψη των

αναγκών του. Η αποτυχία επίτευξης επάρκειας για το διάστημα μελέτης είναι συγκυριακή λόγω της πολύ χαμηλής συνεισφοράς της αιολικής ενέργειας (περιορισμένο αιολικό δυναμικό). Συγκεκριμένα διαπιστώθηκε ότι:

- Τα φωτοβολταϊκά παρουσίασαν μειωμένη απόδοση (71%-76%) αφενός λόγω μεγάλης συγκέντρωσης σκόνης που παρατηρείται στην ευρύτερη περιοχή και επικάθεται στην επιφάνεια των στοιχείων, αφετέρου δε λόγω υψηλών θερμοκρασιών οι οποίες μειώνουν την ενεργειακή απόδοση.
- Η συνεισφορά των ανεμογεννητριών ήταν περιορισμένη, συνεισφέροντας κατά τις δύο πρώτες ημέρες μόνο, παρουσιάζοντας χαμηλή απόδοση η οποία άγγιξε το μέγιστο του 80% της ονομαστικής τιμής, κατά σποραδικά διαστήματα. Η παραγόμενη ενέργεια από τις ανεμογεννήτριες σε σύγκριση με τα φωτοβολταϊκές συστοιχίες καταδεικνύουν την εξαιρετικά διαλείπουσα (intermittent) συμπεριφορά του ανέμου έναντι της ηλιακής ενέργειας.
- Η μονάδα ηλεκτρόλυσης παρουσίασε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας από την αναμενόμενη. Η αυξημένη κατανάλωση αποτυπώθηκε στην υπολογιζόμενη τιμή της ειδικής κατανάλωσης η οποία κατόπιν βιβλιογραφικής σύγκρισης προκύπτει μεγαλύτερη από τις συνήθεις τιμές αναφοράς.
- Σημαντική υπήρξε η απώλεια ενέργειας από την απελευθέρωση  $H_2$  τόσο κατά την παραγωγή από την μονάδα ηλεκτρόλυσης όσο και κατά την κατανάλωση εντός της κυψέλης καυσίμου. Η ολική απώλεια ανήλθε σε  $43,702 \text{ Nm}^3$  ή μεταφραζόμενα σε χημική ενέργεια βάσει της ανώτερης θερμογόνου δύναμης, σε  $154,181 \text{ kWh}$  και ως ολικό ποσοστό σε 27% της ολικής παραχθείσας ποσότητας. Οι απώλειες αυτές οφείλονται στα τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού, ο οποίος κατά των έναρξη της διεργασίας απελευθερώνει μεγάλη ποσότητα  $H_2$ .
- Το υβριδικό σύστημα παρουσίασε γενικά σταθερότητα και αξιοπιστία, όσον αφορά στην μεμονωμένη λειτουργία κάθε μονάδας όσο και στη συνολική λειτουργία του. Η ροή της ενέργειας υπήρξε αδειάλειπτη και δεν παρουσιάστηκαν δυσλειτουργίες ή αστοχίες εντός οποιασδήποτε συσκευής ή κυκλώματος.
- Το σύστημα διαθέτει τις απαιτούμενες εφεδρείες προς την εξασφάλιση ενεργειακής αυτονομίας. Η φερεγγυότητα του συστήματος ενθαρρύνει προς την κατεύθυνση εγκατάστασης συστημάτων ανάλογων προδιαγραφών σε περιοχές απομακρυσμένες από το συμβατικό δίκτυο και με υψηλότερη διαθεσιμότητα ΑΠΕ (και ιδίως αιολικού δυναμικού). Κατεξοχήν περιοχές που πληρούν τα παραπάνω κριτήρια απαντώνται στην νησιωτική Ελλάδα, κατά συνέπεια θα μπορούσαν να αποτελέσουν ευρύ πεδίο αντίστοιχων εφαρμογών στο προσεχές μέλλον, και να προσελκύσουν επιστημονικό και επενδυτικό ενδιαφέρον με συνολικό όφελος προς την χώρα.
- Σε κάθε περίπτωση είναι αναγκαία η περαιτέρω και σε βάθος χρόνου μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος ώστε να καταστεί εφικτή η προσαρμογή της

λειτουργίας του εντός διαφορετικών συνθηκών και να υπάρξει εμβάθυνση στις διαφορετικές πτυχές και δυνατότητες της πρωτοποριακής αυτής τεχνολογίας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία συνεισέφερε στην μελέτη ενός πρότυπου συστήματος ΑΠΕ-Η<sub>2</sub>. Η ουσία της μελέτης συνοψίζεται στην διαμόρφωση ισοζυγίου μάζας-ενέργειας. Το ισοζύγιο μάζας και ενέργειας χρησιμοποιήθηκε ως εργαλείο για τον προσδιορισμό της εύρυθμης και συντονισμένης λειτουργίας του συγκεκριμένου συστήματος εισροών-εκροών και στην συνολική αξιολόγηση της λειτουργίας του συστήματος. Με βάση τα δεδομένα αυτά κατέστη δυνατή η πραγματική απόδοση των επιμέρους συστημάτων και συγκρίθηκε με την ονομαστική. Υπολογίστηκαν οι παραγόμενες και καταναλισκόμενες ενέργειες ανά μονάδα του συστήματος και συνολικά και εντοπίστηκε το μοτίβο των απωλειών. Αντίστοιχα με βάση του όγκου του Η<sub>2</sub> που εισέρχεται ή εξέρχεται από το σύστημα, υπολογίστηκαν οι μη αξιοποιήσιμες ποσότητες που απελευθερώθηκαν στο περιβάλλον που κρίθηκαν ιδιαίτερα επιβαρυντικές στην απόδοση του συνολικού συστήματος. Οι υπολογισμοί αυτοί είναι ένα πολύτιμο εργαλείο που μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος και στην εύκολη προσαρμογή του με βάση τις απαιτούμενες συνθήκες της εκάστοτε εφαρμογής.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

1. www.Wikipedia.com
2. www.US Energy Information Administration.com
3. www.International Energy Association.com
4. www.fuelcelltoday.com
5. "STEAM REFORMING OF SUNFLOWER OIL FOR HYDROGEN GAS PRODUCTION", Dupont,V. Energy Resources Research Institute, University of Leeds,2006.
6. "Studies on Ideal and Actual Efficiency of Solar Polymer Electrolyte Fuel Cell", Rishabh Jain, Biswajit Mandal Haldia Institute of Technology, Department of Chemical Engineering.
7. "Hydrogen production" César A. C. Sequeira\*, Diogo M. F. Santos Chemical and Biological Engineering Department, Instituto Superior Técnico, 1049-001 Lisboa, Portugal.
8. "A Review of water electrolysis", Emmanuel Zoulias,Elli Varkaraki,Nikolaos Lymberopoulos,Christodoulos N.Christodoulou and George N. Karagiorgis Centre for Renewable Energy Sources (CRES),Frederick Research Centre (FRC),Cyprus.
- 9."The wind/hydrogen demonstration system at Utsira in Norway:Evaluation of system performance using operational data and updated hydrogen energy system modeling tools" Oystein Ulleberg, Torgeir Nakken, Arnaud Ete,2009.
- 10."RES2H2 Project", IPHE Renewable Hydrogen Report,March 2011.
- 11."Hybrid Systems for Solar Hydrogen: a selection of case-studies" G.Zini,P.Tartarini,*Applied Thermal Engineering (2009)*.
- 12."Βασικές αρχές και μοντελοποίηση ενός PEM FUEL CELL", Διπλωματική εργασία, Μάτσας Μιχαήλ,ΕΜΠ 2011.
- 13."PEM water electrolysis fundamentals", Dimitrios Tsiplakides.
- 14."Introduction of Hydrogen Technologies to Ramea Island" Morel Oprisan IEA Wind – KWEA Joint Workshop,April, 2007.
- 15."Hydrogen Production: Fundamentals and Case Study Summaries" K.W. Harrison, R. Remick, and G.D. Martin *National Renewable Energy Laboratory*, A. Hoskin *Natural Resources Canada*, Conference Paper January 2010.
16. Thomas C., Zalbowitz M.: "Fuel Cells Green Power". Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, 2000.
17. C. Petersdorff, T. Boermans, O. Stobbe, S. Joosen, W. Graus, E. Mikkers and J. Harnisch, 2004. "Mitigation of CO<sub>2</sub> emissions from the building stock". ECOFYS.
18. "Hydrogen fuel: Production, Transport and Storage", Ram.B.Gupta, CRC Press, 2008.

19. Ryan O'Hayre, Suk-Won Cha, Whitney Colella, Fritz B. Prinz: *Fuel Cell Fundamentals*. Wiley, 2006.

20. Parviz Famouri, Randall S. Gemmen:"Electrochemical Circuit Model of A PEM Fuel Cell", Power Engineering Society General Meeting, July 2003.

21. R. Gammon, A. Roy, J. Barton, M. Little, 2006. "Hydrogen and Renewables Integration". Royal Society of Chemistry, 2012.

22. ΠΑΠΑΪΩΑΝΝΟΥ ΑΓΓΕΛΟΣ: "ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ, ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΝΟΜΟΙ-ΚΑΘΑΡΕΣ ΟΥΣΙΕΣ" Εκδόσεις ΚΟΡΑΛΙ, Αθήνα 2007.

23.ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΥ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ: "ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΑ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ" Αθήνα 2000.

### **ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ**

[1] Βικιπαίδεια: Λήμμα "Υδρογόνο".