

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ Η.Μ.Ε & ΠΡΟ.ΠΕ.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ : “ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ
ΜΟΝΑΔΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ, ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗΣ
ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΓΙΣΤΗ
ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ
ΜΟΝΑΔΕΣ”**

Σπουδαστής : ΠΑΠΑΠΑΝΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

Επιβλέπων : ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΖΑΦΕΙΡΑΚΗΣ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2018

UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF MECHANOLOGY
LABORATORY OF S.E.A & ENV.PROTECTION

THESIS

**SUBJECT: “Modeling of an integrated electrolysis,
hydrogen storage and fuel cells configuration for the
maximum exploitation of energy production in RES-based
hybrid installations”**

Student: PAPANOS ALEXANDROS

Supervisor: ZAFIRAKIS DIMITRIS

PIRAEUS 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην προτεινόμενη πτυχιακή εργασία διερευνάται η συνδυασμένη λύση ολοκληρωμένης μονάδας ηλεκτρόλυσης, αποθήκευσης και χρήσης υδρογόνου σε κυψέλες καυσίμου για την μέγιστη αξιοποίηση της ενεργειακής παραγωγής σε υβριδικές μονάδες. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η λειτουργία της μονάδας σε επίπεδο επιμέρους συστημάτων καθώς και σαν σύνολο αυτών. Η εργασία εστιάζει κυρίως στην αποδοτικότητα της μονάδας ενώ ερευνάται και η συμπεριφορά των επί μέρους συστημάτων κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Τέλος τίθενται κάποιες προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση.

Λέξεις κλειδιά: Ηλεκτρόλυση, αποθήκευση, Ενέργεια, Κυψέλες καυσίμου

SUMMARY

The proposed dissertation explores the combined solution of an integrated electrolysis, storage and hydrogen fuel cell unit for the maximum utilization of energy production in hybrid units. More specifically, it examines the operation of the unit at the level of individual systems and as a whole. The study focuses mainly on the efficiency of the unit while the behavior of the individual systems during the experimental process is examined. Finally, some suggestions are made for future investigation.

Key Words: Electrolysis, Storage, Energy, Fuel Cell

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	8
1.1 Στόχοι και δομή της εργασίας	8
2. Τεχνολογία Υδρογόνου.....	8
2.1 Παραγωγή Υδρογόνου	8
2.2.1 Εισαγωγή	8
2.2.2 Αναμόρφωση του φυσικού αερίου με ατμό.....	8
2.2.3 Αεριοποίηση του άνθρακα.....	9
2.2.4 Αεριοποίηση και πυρόλυση της βιομάζας	10
2.2.5 Ηλεκτρόλυση του νερού.....	10
2.2.6 Φωτο-ηλεκτρόλυση.....	10
2.3 Αποθήκευση Υδρογόνου	11
2.3.1 Εισαγωγή	11
2.3.2 Αποθήκευση με συμπίεση	11
2.3.3 Αποθήκευση με υγροποίηση	11
2.3.4 Αποθήκευση σε προηγμένα υλικά.....	11
3. Κυψέλες καυσίμου	12
3.1 Εισαγωγή	12
3.2 Τύποι κυψελών καυσίμου.....	12
3.2.1 Κυψέλες καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης (PEMFCs).....	12
3.2.2 Κυψέλες καυσίμου Μεθανόλης (DMFCs)	12
3.2.3 Αλκαλικές Κυψέλες Καυσίμου (AFCs)	13
3.2.4 Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFCs)	13
3.2.5 Κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFCs).....	14
3.2.6 Κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC)	15
3.2.7 Αντιστρέψιμες κυψέλες καυσίμου.....	15
4. Εφαρμογές Συστημάτων Υδρογόνου	16
4.1 Εισαγωγή	16
4.2 Στατικού τύπου.....	16
4.2.1 Συστήματα κεντρικής παραγωγής μεγάλης κλίμακας	16
4.2.2 Οικιακές Μονάδες.....	16
4.2.3 Μονάδες αδιάλειπτης παροχής ισχύος	17
4.2.4 Φορητές συσκευές	18

4.3 Μεταφορές.....	19
5. Εργαστηριακή προσομοίωση υβριδικού συστήματος.....	21
5.1 Περιγραφή επιμέρους συστημάτων	21
5.1.1 Δεξαμενές μεταλλικών υδριδίων	21
5.1.2 Συσκευή κυψελών καυσίμου	22
5.1.2.1 Μονάδα ελέγχου συστήματος	23
5.1.2.2 Λογισμικό Nexa Training System.....	24
5.1.2.3 Μονάδα προσομοίωσης φορτίου	26
5.1.2.4 Μονάδα συσσωρευτών.....	28
5.1.2.5 Μονάδα Διαχείρισης Ισχύος	29
5.1.2.6 Μονάδα κυψελών καυσίμου	30
5.1.2.7 Μονάδα Παροχής Υδρογόνου	32
5.1.2.8 Μονάδα παροχής ισχύος	33
5.2 Αποτελέσματα και συμπεράσματα πειραματική διαδικασίας.....	33
6. Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση.....	49
6.1 Πρόταση 1η	49
6.2 Πρόταση 2η	49
6.3 Πρόταση 3η	49
6.4 Πρόταση 4η	49
Βιβλιογραφία	50

1. Εισαγωγή

1.1 Στόχοι και δομή της εργασίας

Οι στόχοι της εργασίας είναι

- Εξοικείωση με την τεχνολογία
- Εξέταση της λειτουργίας της μονάδας
- Διερεύνηση παραμέτρων που καθορίζουν την αποδοτικότητα του συστήματος

Η εργασία χωρίζεται στο θεωρητικό κομμάτι (κεφάλαια 2-4) όπου αναλύονται οι υπάρχουσες τεχνολογίες που αφορούν την παραγωγή την αποθήκευση και την χρήση του υδρογόνου ενώ στο επόμενο κομμάτι (κεφάλαια 5-6) αφού παρουσιασθούν οι συσκευές που αποτελούν την μονάδα, παρατίθενται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας.

2. Τεχνολογία Υδρογόνου

2.1 Παραγωγή Υδρογόνου

2.2.1 Εισαγωγή

Με βάση στοιχεία από το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ, η παγκόσμια ετήσια παραγωγική ικανότητα του υδρογόνου προσεγγίζει σήμερα τα 400 δισεκατομμύρια m³. Ο κύριος όγκος της παραγωγής εντοπίζεται στις πετροχημικές βιομηχανίες, μέσω της αναμόρφωσης του φυσικού αερίου. Οι βασικές τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου περιλαμβάνουν:

- Την αναμόρφωση του φυσικού αερίου με ατμό
- Την αεριοποίηση του άνθρακα
- Την αεριοποίηση και πυρόλυση της βιομάζας
- Την ηλεκτρόλυση με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας
- Την φωτο-ηλεκτρόλυση

Η επιλογή της εκάστοτε χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας παραγωγής βασίζεται σε διαφορετικά τεχνοοικονομικά δεδομένα όπως η διαθεσιμότητα των πρώτων υλών, η ωριμότητα της τεχνολογίας, η καταλληλότητα της εφαρμογής, η ζήτηση της αγοράς και το κόστος.

2.2.2 Αναμόρφωση του φυσικού αερίου με ατμό

Η επιλογή του φυσικού αερίου ως πρώτη ύλη για την παραγωγή υδρογόνου θεωρείται ως μια αρκετά ελκυστική λύση καθώς πρόκειται για ένα ευρέως διαδεδομένο στοιχείο το οποίο έχει μεγάλη αναλογία υδρογόνου άνθρακα και παράγει κατά την αναμόρφωσή του μικρά ποσά CO₂. Χρησιμοποιείται κυρίως σε

πετροχημικές βιομηχανίες για παραγωγή σε μεγάλη κλίμακα ενώ τελευταία εφαρμόζονται και σε μικρής κλίμακας αποκεντρωμένους σταθμούς παραγωγής ενέργειας καθώς και σε οικιακά συστήματα. Το μεθάνιο, ως κύριο συστατικό του φυσικού αερίου, μέσω αντιδράσεων που συντελούνται σε θερμοκρασίες από 700 έως 850 °C και πιέσεις από 3 έως 25 bar μετασχηματίζεται σε αέριο σύνθεσης με 12% CO και 88% υδρογόνο. Το CO μπορεί να μετατραπεί περαιτέρω σε υδρογόνο και CO₂ το οποίο μπορεί να συμπιεστεί και να αποθηκευτεί. Επίσης η διεργασία είναι ενδόθερμη και συνήθως η θερμότητα που απαιτείται παρέχεται από την καύση ενός ποσοστού της τροφοδοσίας. Το καθαρό υδρογόνο απορροφάται από μια μονάδα ρόφησης με εναλλαγή πίεσης. Η απόδοση αυτής της τεχνολογίας είναι κυμαίνεται στις μικρές αποκεντρωμένες μονάδες από 65 έως 75% και έως 85% για κεντρικές μονάδες παραγωγής υδρογόνου. (1)

2.2.3 Αεριοποίηση του άνθρακα

Υπάρχουν ποικίλοι τρόποι αεριοποίησης του άνθρακα σε διάφορες αναλογίες άνθρακα, οξυγόνου και ατμού μέσα στον αεριοποιητή. Μέσω των αντιδράσεων που συντελούνται παράγεται ένα αέριο μίγμα το οποίο αποτελείται από υδρογόνο CO, CO₂ και CH₄. Το CO μετατρέπεται περαιτέρω σε υδρογόνο και CO₂ το οποίο μπορεί να συμπιεστεί και να αποθηκευτεί όπως και στην αναμόρφωση του φυσικού αερίου με ατμό. Ομοίως η διεργασία είναι ενδόθερμη και συνήθως η θερμότητα που απαιτείται παρέχεται από την καύση ενός ποσοστού της τροφοδοσίας. Η παραγωγή υδρογόνου από αεριοποίηση του άνθρακα θεωρείται εμπορικά ώριμη ωστόσο είναι πιο πολύπλοκη σε σχέση με την αναμόρφωση φυσικού αερίου με ατμό αλλά και ακριβότερη αυτής λόγω της παρουσίας ατμοποιητή και της ανάγκης σε μεγάλες ποσότητες οξυγόνου.

2.2.3.1 Δέσμευση και αποθήκευση του CO₂

Το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται κατά την παραγωγή υδρογόνου είτε μέσω αναμόρφωσης του φυσικού αερίου είτε μέσω της αεριοποίησης του άνθρακα μπορεί να αξιοποιηθεί -εφόσον συλλεχθεί και αποθηκευθεί- για την μείωση του επιβαρυντικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος της διαδικασίας παραγωγής υδρογόνου από τις παραπάνω τεχνολογίες που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα. Η αποθήκευσή του πραγματοποιείται σε υπόγεια μορφή, ενώ οι διαδικασίες δέσμευσής του, αναλύονται παρακάτω .

Μετά την καύση

Το CO₂, μέσω χημικής προσρόφησης σε διάλυμα αμινών, μπορεί να δεσμευθεί από τα αέρια της καύσης και να αξιοποιηθεί μέσω αναγέννησης με την χρήση θερμότητας. Μειονέκτημα αυτής της πρακτικής είναι η μείωση της απόδοσης της εγκατάστασης και η αύξηση του κόστους.

Πριν την καύση

Το CO₂, μέσω των διεργασιών αεριοποίησης του άνθρακα ή της αναμόρφωσης του φυσικού αερίου κατά την παραγωγή του υδρογόνου, μπορεί να δεσμευθεί πριν την καύση με τον κατάλληλο σχεδιασμό της μονάδας και αποτελεί μια πιο οικονομική προσέγγιση έναντι της προηγούμενης μεθόδου που έπεται της καύσης.

Καύση με οξυγόνο

Στην περίπτωση που η καύση πραγματοποιείται με παρουσία καθαρού οξυγόνου, τότε η απουσία του N₂ στα απαέρια οδηγεί σε σημαντική μείωση της ποσότητας των καυσαερίων. (2)

2.2.4 Αεριοποίηση και πυρόλυση της βιομάζας

Η αεριοποίηση της βιομάζας βασίζεται στις αρχές της αεριοποίησης του άνθρακα όπως περιγράφεται και παραπάνω ωστόσο διαφέρει σε όρους διάθεσης και σύστασης της πρώτης ύλης. Παράγωγα της αεριοποίησης της βιομάζας είναι το υδρογόνο, το CO₂, το CO και το N₂. Η πυρόλυση είναι η θερμική διάσπαση της βιομάζας απουσίας οξυγόνου. Τα παράγωγα της πυρόλυσης της βιομάζας είναι το υδρογόνο, το CO₂, το CO. Για μικρές θερμοκρασίες και μεγάλους χρόνους παραμονής ευνοείται η παραγωγή ενεργοποιημένου άνθρακα. Για μεγάλες θερμοκρασίες και μεγάλους χρόνους παραμονής ευνοείται η παραγωγή του βιοαερίου ενώ για μικρές θερμοκρασίες και μικρούς χρόνους παραμονής ευνοείται η παραγωγή βιοελαίου. Οι διεργασίες αυτές μπορούν να συνδυαστούν, όπου η χρήση ταχείας πυρόλυσης παράγει το βιοέλαιο από το οποίο στη συνέχεια παράγεται υδρογόνο μέσω την αναμόρφωσης με ατμό. (2)

2.2.5 Ηλεκτρόλυση του νερού

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί με την ηλεκτρόλυση του νερού το οποίο διασπάται μέσω μιας ηλεκτροχημικής διεργασίας σε υδρογόνο και οξυγόνο με την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στην συσκευή. Λόγω των μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτεί η διεργασία της ηλεκτρόλυσης τα συστήματα αυτά προορίζονται να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας λόγω της χαμηλού κόστους ενέργειας που παρέχουν αυτές. Αυτό το σενάριο μπορεί να οδηγήσει τόσο σε έναν κύκλο εξαιρετικά χαμηλού κόστους όσο και σε έναν κύκλο εξαιρετικά χαμηλών εκπομπών ρυπογόνων στοιχείων.

2.2.5.1 Αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης

Οι αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη ένα υδατικό διάλυμα KOH και χρησιμοποιούνται ευρέως εμπορικά σε σταθερές εφαρμογές με πιέσεις μέχρι 25bar.

2.2.5.2 Ηλεκτρολυτικές συσκευές πολυμερικής μεμβράνης (PEM)

Οι ηλεκτρολυτικές συσκευές πολυμερικής μεμβράνης (PEM) χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη μια οργανική πολυμερική μεμβράνη όπου τα πρωτόνια που παράγονται στην άνοδο μεταφέρονται στην κάθοδο. Χρησιμοποιούνται τόσο σε σταθερές εφαρμογές όσο και κινητές ενώ λειτουργούν σε πιέσεις της τάξης των εκατοντάδων bar. Πλεονεκτούν έναντι των αλκαλικών συσκευών λόγω του μεγάλου εύρους λειτουργίας τους, την απουσία του KOH ως ηλεκτρολύτη και των μεγάλων πυκνοτήτων ισχύος που παρέχουν. Ωστόσο πρόκειται για μια λιγότερο ώριμη τεχνολογία σε σχέση με τις αλκαλικές συσκευές οπότε και σχετικά πιο ακριβή λύση.

2.2.5.3 Συσκευές ηλεκτρόλυσης στερεού ηλεκτρολύτη (SOEC)

Οι ηλεκτρολυτικές συσκευές στερεού ηλεκτρολύτη χρησιμοποιούν κεραμικούς ηλεκτρολύτες για την ηλεκτρόλυση του ατμού (και όχι του νερού σε αντίθεση με τις PEM) σε θερμοκρασίες μεταξύ 700-1000 °C για την παραγωγή υδρογόνου και οξυγόνου. (1) Θεωρούνται εξαιρετικά αποδοτικές συσκευές λόγω της απευθείας ηλεκτρόλυσης του ατμού που οδηγεί σε αυξημένα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και ηλεκτροχημικών αντιδράσεων, ειδικά αν ο ατμός που παρέχεται παράγεται από περίσσια θερμικής ενέργειας κάποιου άλλου συστήματος.

2.2.6 Φωτο-ηλεκτρόλυση

Η φωτο-ηλεκτρόλυση είναι μια διεργασία η οποία χρησιμοποιεί το φως του ήλιου προκειμένου να διεγείρει τους ημιαγωγούς των φωτο-ηλεκτροχημικών κυψελών (PEC) η οποία μετατρέπει το φως σε χημική ενέργεια και έτσι διασπάει το νερό σε οξυγόνο και υδρογόνο. Βασικό πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι η άμεση παραγωγή ενέργειας σε σχέση με ένα αντίστοιχο σύστημα που χρησιμοποιεί

ξεχωριστά φωτοβολταϊκά και συσκευή ηλεκτρόλυσης. Πρόκειται για μια τεχνολογία που ακόμα βρίσκεται σε φάση εξέλιξης προκειμένου να γίνει εμπορικά ελκυστική, ενώ η έρευνα εστιάζεται κυρίως στο πεδίο της επιστήμης και τεχνολογία των υλικών.

2.3 Αποθήκευση Υδρογόνου

2.3.1 Εισαγωγή

Η αποθήκευση του υδρογόνου αποτελεί ένα από τα κύρια πεδία εξέλιξης της τεχνολογίας του υδρογόνου καθώς η αξιοποίησή του εκτείνεται σε ένα εύρος εφαρμογών με σταθερή, περιοδική ή και ακανόνιστη ζήτηση και κάλυψη ηλεκτρικών/θερμικών φορτίων. Χαρακτηριστικά τέτοια συστήματα αφορούν στατικές εφαρμογές αλλά και κινητές, οι οποίες αντιμετωπίζουν τεχνολογικές προκλήσεις, όπως υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο υδρογόνου ανά μονάδα όγκου για λόγους πρακτικότητας, χαμηλές πιέσεις και θερμοκρασίες λειτουργίας κυρίως για λόγους ασφάλειας, υψηλούς ρυθμούς φόρτισης και αποφόρτισης που αφορά κυρίως τον τομέα των μεταφορών, καθώς και χαμηλό κόστος για λόγους εμπορικής διάθεσης και ανταγωνιστικότητας. Οι τεχνολογίες που υφίστανται αφορούν συστήματα αποθήκευσης με συμπίεση, αποθήκευση με υγροποίηση και αποθήκευση σε προηγμένα υλικά.

2.3.2 Αποθήκευση με συμπίεση

Η αποθήκευση υδρογόνου με συμπίεση αποτελεί μια εμπορικά ώριμη τεχνολογία και στηρίζεται στην λογική ότι για την επαρκή αποθήκευση του σε πεπερασμένο όγκο απαιτείται να αυξηθεί το ήδη χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενό του. Η εν μέρει αδυναμία επίτευξης της παραπάνω διαδικασίας, λόγω περιορισμών σε σύνθετα και ακριβά υλικά αλλά και κανόνες ασφαλείας αποτελούν το κύριο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας. Ωστόσο το γεγονός ότι αποτελεί μια σχετικά απλή και γρήγορη διαδικασία την κάνουν ελκυστική σε σχέση με πιο σύνθετα συστήματα.

2.3.3 Αποθήκευση με υγροποίηση

Η αποθήκευση υδρογόνου με υγροποίηση αποτελεί επίσης μια εμπορικά ώριμη τεχνολογία ενώ στηρίζεται και αυτή στην λογική ότι για την επαρκή αποθήκευση του σε πεπερασμένο όγκο απαιτείται να αυξηθεί το ήδη χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενό του. Αυτό συμβαίνει με την αφαίρεση θερμότητας από το υδρογόνο και την απόρριψη της στο περιβάλλον μέσω ενός συνδυασμού ψυκτικών διεργασιών κρυογονικής, σε ατμοσφαιρικές πιέσεις. Η τεχνολογία αυτή προσφέρει γρήγορη πλήρωση των δεξαμενών στις οποίες αποθηκεύεται το υδρογόνο και μεγαλύτερη ασφάλεια σε σχέση με την μέθοδο της συμπίεσης αφού συμβαίνει σε χαμηλές πιέσεις. Ωστόσο, μειονέκτημα αποτελεί η εκτεταμένη ανάγκη σε ενέργεια προκειμένου να ρευστοποιηθεί το αέριο υδρογόνο, η οποία μπορεί να αποτελεί το 30-40% του ενεργειακού περιεχομένου του αερίου, καθώς και οι θερμικές απώλειες που προκύπτουν από την μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας της κρυογονικής δεξαμενής με το περιβάλλον.

2.3.4 Αποθήκευση σε προηγμένα υλικά

Η αποθήκευση υδρογόνου σε προηγμένα υλικά αποτελεί μια τεχνολογία η οποία διαθέτει εμπορικές εφαρμογές ωστόσο βρίσκεται σε φάση εξέλιξης σε σχέση με τις άλλες δυο τεχνολογίες που προαναφέρθηκαν, προκειμένου να καταστούν οικονομικά ανταγωνιστικές. Διακρίνεται με βάση την διαδικασία αποθήκευσής του σε απορρόφηση και προσρόφηση σε στερεά υλικά. Η απορρόφηση είναι η διεργασία ενσωμάτωσης των ατόμων του υδρογόνου στις ενδόθετες θέσεις του κρυσταλλικού πλέγματος του στερεού υλικού και περιλαμβάνει εφαρμογές όπως ενεργοί άνθρακες, και νάνο-υλικά ενώ η προσρόφηση είναι μια διεργασία που επιτρέπει στα μόρια του υδρογόνου να αποθηκευτούν στην επιφάνεια του στερεού υλικού μέσω των φυσικών και χημικών φαινομένων και εφαρμόζεται σε μεταλλικά

υδρίδια. Κύριο πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής αποτελεί το γεγονός ότι πρόκειται για μια ασφαλή επιλογή συνδυάζοντας χαμηλές πιέσεις και χαμηλές θερμοκρασίες σε σχέση με τις άλλες δυο τεχνολογίες αποθήκευσης ενώ επιτρέπει και την εκμετάλλευση της θερμότητας που εκλύεται κατά την εξώθερμη αντίδραση της αποθήκευσης του υδρογόνου.

3. Κυψέλες καυσίμου

3.1 Εισαγωγή

Οι κυψέλες καυσίμου ταξινομούνται κατά κύριο λόγο από το είδος ηλεκτρολύτη που διαθέτουν. Αυτή η ταξινόμηση καθορίζει το είδος των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στην κυψέλη, το είδος των απαιτούμενων καταλυτών, το εύρος θερμοκρασίας στο οποίο λειτουργεί η κυψέλη, το απαιτούμενο καύσιμο και άλλους παράγοντες. Αυτά τα χαρακτηριστικά, με τη σειρά τους, καθορίζουν τον τύπο κυψέλης που απαιτείται για την εκάστοτε εφαρμογή.

3.2 Τύποι κυψελών καυσίμου

3.2.1 Κυψέλες καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης (PEMFCs)

Οι κυψέλες καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης (PEM) - που ονομάζονται επίσης κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων - παρέχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος και πλεονεκτούν συγκριτικά με τις άλλου τύπου κυψέλες λόγω του χαμηλού βάρους και όγκου τους. Οι κυψέλες καυσίμου PEM χρησιμοποιούν ένα πολυμερές στερεό ως ηλεκτρολύτη και ηλεκτρόδια πορώδους άνθρακα που περιέχουν καταλύτη λευκόχρυσου ή πλατίνας. Για την λειτουργία τους απαιτείται μόνο υδρογόνο, οξυγόνο από τον αέρα και νερό. Τροφοδοτούνται με καθαρό υδρογόνο που παρέχεται από δεξαμενές αποθήκευσης ή αναμορφωτές. Οι κυψέλες καυσίμου PEM λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, περίπου στους 80 °C. Η λειτουργία σε χαμηλή θερμοκρασία τους επιτρέπει να ξεκινούν γρήγορα (μικρότερος χρόνος προθέρμανσης) και οδηγούν σε λιγότερη φθορά στα εξαρτήματα του συστήματος, με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη ανθεκτικότητα. Ωστόσο, απαιτείται ένας καταλύτης ευγενών μετάλλων (συνήθως λευκόχρυσος) για να διαχωρίσει τα ηλεκτρόνια και πρωτόνια του υδρογόνου, αυξάνοντας το κόστος του συστήματος. Επίσης ο καταλύτης λευκόχρυσου είναι εξαιρετικά ευαίσθητος σε διάβρωση λόγω του μονοξειδίου του άνθρακα, καθιστώντας απαραίτητη τη χρήση ενός πρόσθετου αντιδραστήρα για τη μείωση του μονοξειδίου του άνθρακα στο αέριο καύσης εάν το υδρογόνο προέρχεται από καύση υδρογονανθράκων αυξάνοντας επιπρόσθετα το κόστος. Οι κυψέλες καυσίμου PEM χρησιμοποιούνται κυρίως για εφαρμογές μεταφορών και στατικές εφαρμογές. Λόγω του χρόνου γρήγορης εκκίνησης και της ευνοϊκής αναλογίας ισχύος προς το βάρος, οι κυψέλες καυσίμου PEM είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για χρήση σε επιβατικά οχήματα, όπως αυτοκίνητα και λεωφορεία. Τεχνολογική πρόκληση αποτελεί η ανάπτυξη νέων μεθόδων παρασκευής βελτιωμένων μεμβρανών και ηλεκτροδίων με στόχο την περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης και την επακόλουθη μείωση του συνολικού κόστους. Για παράδειγμα, η έρευνα στις PEM κυψέλες επικεντρώνεται στην αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας άνω των 160 °C χρησιμοποιώντας ηλεκτρολύτες PBI (1). Σε αυτές τις θερμοκρασίες η συγκέντρωση του διαβρωτικού CO δεν αποτελεί πρόβλημα, ενώ επίσης επειδή η μεμβράνη PBI απαιτεί χαμηλότερη περιεκτικότητα σε νερό για να λειτουργήσει, βελτιώνεται και η χρήση του νερού στο σύστημα.

3.2.2 Κυψέλες καυσίμου Μεθανόλης (DMFCs)

Οι κυψέλες καυσίμου μεθανόλης (DMFC) τροφοδοτούνται από καθαρή μεθανόλη, η οποία συνήθως αναμιγνύεται με νερό και τροφοδοτείται απευθείας στην άνοδο των κυψελών καυσίμου. Η μεθανόλη έχει

υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από το υδρογόνο-αν και λιγότερο από βενζίνη ή ντίζελ, επομένως συστήματα που χρησιμοποιούν αυτού του τύπου κυψέλες υπερέχουν έναντι των υπολοίπων καθώς μπορούν να αποθηκεύσουν μεγαλύτερες ποσότητες καυσίμου σε μικρότερες δεξαμενές σε ευνοϊκότερες συνθήκες. Η μεθανόλη είναι επίσης ευκολότερη στη μεταφορά και την προμήθεια στο κοινό χρησιμοποιώντας την τρέχουσα υποδομή λόγω της υγρής μορφής της. Οι κυψέλες καυσίμου μεθανόλης (DMFC) χρησιμοποιούνται συχνά για την παροχή ενέργειας σε φορητές εφαρμογές κυψελών καυσίμου, όπως τα κινητά τηλέφωνα ή οι φορητοί υπολογιστές.

3.2.3 Αλκαλικές Κυψέλες Καυσίμου (AFCs)

Οι Αλκαλικές Κυψέλες Καυσίμου (AFCs) ήταν μια από τις πρώτες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου που αναπτύχθηκαν και ήταν ο πρώτος τύπος που χρησιμοποιήθηκε ευρέως στο διαστημικό πρόγραμμα των Η.Π.Α. Αυτές οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν ένα διάλυμα υδροξειδίου του καλίου σε νερό ως ηλεκτρολύτη και μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια ποικιλία μη πολύτιμων μετάλλων ως καταλύτη στην άνοδο και στην κάθοδο. Τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί νέες αλκαλικές κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν πολυμερική μεμβράνη ως ηλεκτρολύτη με την διαφορά με τα PEM να είναι ότι η μεμβράνη αυτή είναι αλκαλική αντί για όξινη. Οι Αλκαλικές Κυψέλες Καυσίμου (AFCs) χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση η οποία οφείλεται στον ρυθμό με τον οποίο πραγματοποιούνται οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις στο εσωτερικό τους. Βασικό μειονέκτημα για αυτόν τον τύπο κυψελών καυσίμου είναι ότι είναι ευαίσθητο σε διάβρωση από διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) λόγω του σχηματισμού ανθρακικών αλάτων. Στην περίπτωση επανακυκλοφορίας, τα αλκαλικά κελιά με τους υγρούς ηλεκτρολύτες μπορούν να λειτουργούν έτσι ώστε η αναγέννηση ηλεκτρολυτών που συμβαίνει κατά την επανακυκλοφορία να συμβάλει στη μείωση των επιδράσεων του σχηματισμού ανθρακικών αλάτων στον ηλεκτρολύτη, αλλά αυτός ο τρόπος λειτουργίας δημιουργεί προβλήματα με ρεύματα διακλάδωσης. Τα συστήματα υγρού ηλεκτρολύτη ωστόσο παρουσιάζουν και άλλα προβλήματα, όπως διαβρεξιμότητα, αυξημένη διάβρωση και δυσκολία χειρισμού πιέσεων. Οι κυψέλες καυσίμου αλκαλικής μεμβράνης (AMFC) αντιμετωπίζουν αυτές τα προβλήματα και επίσης είναι ανθεκτικότερα στην διάβρωση από το CO₂ σε σχέση με τις κυψέλες υγρού-ηλεκτρολύτη. Ωστόσο, ακόμα και αυτή η μικροποσότητα CO₂ επηρεάζει αρνητικά την απόδοση και την ανθεκτικότητα των αλκαλικών κυψελών καθιστώντας τις κυψέλες πολυμερισμένης μεμβράνης πιο αποδοτικές. Η κλίμακα στην οποία εφαρμόζονται κυμαίνεται από W σε kW.

3.2.4 Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFCs)

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFCs) αποτελούν την πρώτη γενιά των σύγχρονων κυψελών καυσίμου και είναι οι πρώτες που χρησιμοποιήθηκαν εμπορικά ενώ πλέον αποτελούν μια ώριμη τεχνολογία. Αυτός ο τύπος κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιείται κυρίως για στατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ χρησιμοποιήθηκε επίσης για την τροφοδοσία μεγάλων οχημάτων, όπως λεωφορεία πόλης. Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) περιέχουν υγρό φωσφορικό οξύ ως ηλεκτρολύτη το οποίο περιέχεται σε μια μήτρα από καρβίδιο του πυριτίου ενώ τα ηλεκτρόδια πορώδους άνθρακα που χρησιμοποιούνται περιέχουν καταλύτη λευκόχρυσου. Η σχετική σταθερότητα του πυκνού διαλύματος είναι υψηλή, επιτρέποντας στις κυψέλες καυσίμου να λειτουργούν σε θερμοκρασίες μέχρι τους 220°C. Τα συμβατικά συστήματα PAFCs λειτουργούν μεταξύ 150 και 220°C, λόγω της αγωγιμότητας του διαλύματος σε χαμηλότερες θερμοκρασίες στις οποίες είναι πιθανή η δηλητηρίαση του ανοδικού ηλεκτροδίου (Pt) λόγω της ύπαρξης του μονοξειδίου του άνθρακα. Μια από τις σημαντικότερες αιτίες υποβάθμισης της απόδοσης των κυψελών καυσίμου PAFCs, είναι η πλημμύριση και ξήρανση των ηλεκτροδίων λόγω της μετακίνησης του H₃PO₄ μεταξύ της μήτρας και των ηλεκτροδίων κατά τη διάρκεια του κύκλου πλήρωσης της κυψέλης καυσίμου. Η χημειορόφηση του μονοξειδίου του άνθρακα επηρεάζει τα ηλεκτρόδια Pt που

δρουν και ως οι καταλύτες των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Τόσο η θερμοκρασία όσο και η συγκέντρωση του CO επιδρούν σημαντικά σε αυτό το φαινόμενο, ενώ τόσο το H₂S όσο και το CO μειώνουν δραματικά την ενεργότητα των χρησιμοποιούμενων καταλυτικών συστημάτων. Ωστόσο είναι πιο ανθεκτικές σε ακαθαρσίες ως παράγωγα της δημιουργίας υδρογόνου σε σχέση με τις κυψέλες πολυμερισμένης μεμβράνης (PEM). Η αύξηση της πίεσης ενισχύει την απόδοση των κυψελών καυσίμου PAFCs, λόγω της χαμηλότερης υπέρτασης συγκέντρωσης στην κάθοδο και κατά συνέπεια της αύξησης του αντιστρεπτού δυναμικού της κυψέλης καυσίμου. Η αύξηση στη θερμοκρασία έχει επίσης ευεργετική επίδραση στην απόδοση επειδή μειώνονται συνολικά οι υπερτάσεις ενώ ταυτόχρονα η κινητική της αναγωγής του οξυγόνου βελτιώνεται. (1) Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) επιτυγχάνουν ηλεκτρική απόδοση σε ένα εύρος μεταξύ 37% και 42% ενώ όταν χρησιμοποιούνται για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας επιτυγχάνουν άνω του 85% απόδοση. Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) είναι επίσης λιγότερο συμφέρουσες από τους άλλους τύπους, εάν συνυπολογιστεί το αυξημένο βάρος και ο όγκος τους, ενώ είναι ιδιαίτερα δαπανηρές αφού απαιτούν αρκετά μεγαλύτερες ποσότητες ακριβού καταλύτη πλατίνας από ό, τι άλλοι τύποι κυψελών καυσίμου. Ένας από τους κυριότερους τομείς, στους οποίους εστιάζεται η έρευνα στα PAFCs αφορά στην επέκταση της ωφέλιμης ζωής τους σε περισσότερες από 40000 h συνεχούς λειτουργίας χωρίς να υποβαθμίζεται η απόδοσή τους. (3)

3.2.5 Κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFCs)

Οι κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFCs) χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές κεντρικής παραγωγής σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με βάση το φυσικό αέριο και τον άνθρακα. Τα MCFC είναι κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας που χρησιμοποιούν ηλεκτρολύτη ο οποίος αποτελείται από ένα μίγμα τηγμένου ανθρακικού αλατος που αιωρείται σε ένα πορώδες, χημικά αδρανές κεραμικό πλέγμα οξειδίου λιθίου-αργιλίου. Λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, περίπου 650 °C, οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν μη πολύτιμα μέταλλα ως καταλύτες στην άνοδο και στην κάθοδο, μειώνοντας το κόστος σε σχέση με τα ακριβά πολύτιμα μέταλλα που χρησιμοποιούνται σε άλλους τύπους κυψελών καυσίμου. Η σύνθεση του ηλεκτρολύτη επιδρά σημαντικά στην απόδοση και την αντοχή των κυψελών καυσίμου (MCFCs), αφού φέρει ευθύνη για το μεγαλύτερο ποσοστό (άνω του 70%) των ωμικών απωλειών στην κυψέλη καυσίμου. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 650 °C αυξάνονται οι απώλειες του ηλεκτρολύτη, λόγω της εξάτμισης του και της έντονης διάβρωσης των υλικών. Το δυναμικό των κυψελών καυσίμου MCFCs ποικίλλει ανάλογα με τη σύσταση των αερίων μιγμάτων τροφοδοσίας. Αυξάνοντας την μετατροπή των αντιδρώντων μειώνεται γενικά η απόδοση της κυψέλης καυσίμου. Τυπικά επιλέγεται ένας παράγοντας χρήσης του καυσίμου της τάξης του 75 έως 85%. (1). Μείωση του κόστους επιτυγχάνεται επίσης λόγω της αυξημένης απόδοσης ειδικά έναντι των κυψελών καυσίμου φωσφορικού οξέος. Οι κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων, σε πλήρη λειτουργία, επιτυγχάνουν απόδοση μέχρι 55%, η οποία μειώνεται σε μικρά φορτία ενώ σε συνδυασμό με έναν στρόβιλο, φτάνουν σε απόδοση 65%, σημαντικά υψηλότερο από το αντίστοιχο 37% -42% των κυψελών καυσίμου φωσφορικού οξέος. Σε περίπτωση που η απορριπτόμενη θερμότητα από τις κυψέλες ανθρακικών αλάτων αξιοποιηθεί τότε η απόδοση του συστήματος μπορεί να ξεπεράσει το 85%. Οι κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων δεν απαιτούν αναμόρφωση του φυσικού αερίου ή βιοαερίου όπως οι αλκαλικές, φωσφορικού οξέος και PEM κυψέλες καυσίμου. Στις υψηλές θερμοκρασίες στις οποίες λειτουργούν οι κυψέλες αυτές, το μεθάνιο και άλλοι ελαφροί υδρογονάνθρακες σε αυτά τα καύσιμα μετατρέπονται σε υδρογόνο εντός της ίδιας της κυψέλης καυσίμου με μια διαδικασία που ονομάζεται εσωτερική αναμόρφωση, παρακάμπτοντας το κόστος της παραγωγής του υδρογόνου. Το κύριο μειονέκτημα της τρέχουσας τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων είναι η ανθεκτικότητα. Οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας των

κυψελών αυτών και ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται, επιταχύνουν τη διάβρωση των υλικών, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής τους. Κύριο πεδίο μελέτης της τεχνολογίας είναι η χρήση υλικών και εξαρτημάτων τα οποία θα είναι ανθεκτικά ώστε να διπλασιάσουν την διάρκεια ζωής των κυψελών από τις 40.000 ώρες που καλύπτουν έως τώρα χωρίς να μειωθεί η απόδοσή τους. (3)

3.2.6 Κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC)

Οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC) λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, έως και 1.000 °C. Χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη μια σκληρή, μη πορώδη κεραμική ένωση. Οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC) είναι ο πιο ανθεκτικός τύπος κυψελών καυσίμου στο θείο. Μια επιπλέον ιδιότητα που έχουν είναι ότι δεν δηλητηριάζονται από το μονοξείδιο του άνθρακα, το οποίο μπορεί ακόμη και να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο. Έτσι οι κυψέλες αυτές μπορούν να χρησιμοποιούν φυσικό αέριο, βιοαέριο και αέρια από άνθρακα ως καύσιμο χωρίς τους περιορισμούς των άλλων τύπων κυψελών ως προς την καθαρότητα του υδρογόνου. Αυτός ο τύπος κυψελών επιτυγχάνει απόδοση περίπου έως 60% ενώ μπορεί να φτάσει το 85% με την εκμετάλλευση της παραγόμενης θερμότητας από τις ίδιες τις κυψέλες. (2) Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επιτυγχάνονται, μπορούν να χρησιμοποιούν καταλύτη από μη πολύτιμα μέταλλα, μειώνοντας έτσι το κόστος. Ομοίως, μπορεί να παρακαμφθεί η χρήση αναμορφωτή στο σύστημα αφού οι κυψέλες αυτές μπορούν να μεταρρυθμίσουν τα καύσιμα εσωτερικά, οπότε και μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα καύσιμα. Ωστόσο απαιτείται, τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα για την εκκίνηση τους, όσο και σημαντική θερμική θωράκιση για τον έλεγχο της παραγόμενης θερμότητας και την προστασία του προσωπικού. Ακριβώς για αυτό τον λόγο, η τεχνολογία αυτή μπορεί να είναι αποδεκτή για εφαρμογές κοινής ωφέλειας αλλά όχι για εφαρμογές μεταφορών. Οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας θέτουν επίσης αυστηρές απαιτήσεις ανθεκτικότητας στα υλικά. Η ανάπτυξη υλικών χαμηλού κόστους με υψηλή αντοχή στις θερμοκρασίες λειτουργίας των κυψελών είναι η βασική τεχνική πρόκληση που αντιμετωπίζει αυτή η τεχνολογία. Επίσης διερευνάται η ανάπτυξη κυψελών καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC) χαμηλής θερμοκρασίας που λειτουργούν στους 700 ° C ή κάτω από τους 700 ° C οι οποίες έχουν λιγότερα προβλήματα ανθεκτικότητας και χαμηλότερο κόστος ωστόσο οι μέχρι τώρα εφαρμογές στερούνται ικανοποιητικής απόδοσης αντίστοιχης με των υψηλών θερμοκρασιών.

3.2.7 Αντιστρέψιμες κυψέλες καυσίμου

Οι αντιστρέψιμες κυψέλες καυσίμου παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από το υδρογόνο όπως και οι άλλοι τύποι κυψελών καυσίμου, ωστόσο έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν την ηλεκτρική ενέργεια που τους παρέχεται από οποιαδήποτε πηγή ώστε να παράξουν υδρογόνο μέσω της διαδικασίας της ηλεκτρόλυσης του νερού. Έχουν κυρίως εφαρμογή σε συστήματα όπου η παραγωγή ενέργειας βασίζεται σε άλλες πηγές ενέργειας όπως οι ανανεώσιμες ώστε όταν υπάρχει έλλειμμα ενέργειας του συστήματος να λειτουργούν ως παραγωγοί ενώ όταν υπάρχει περίσσειμα ενέργειας να λειτουργούν ως αποθηκευτικά μέσα μετατρέποντας το περίσσειμα αυτό σε υδρογόνο. Η τεχνολογία αυτή προσφέρει πλεονεκτήματα όπως υψηλή συνολική απόδοση(60–90%) μεγάλη διάρκεια ζωής, μικρό συντελεστή αποφόρτισης καθώς και σταθερή και αξιόπιστη λειτουργία. Κύρια τεχνολογική πρόκληση των αναστρέψιμων κυψελών καυσίμου είναι η διατήρηση της εύρυθμης λειτουργίας των ηλεκτροδίων μεταξύ των κύκλων εναλλαγής από παραγωγή σε ηλεκτρόλυση. (3)

4. Εφαρμογές Συστημάτων Υδρογόνου

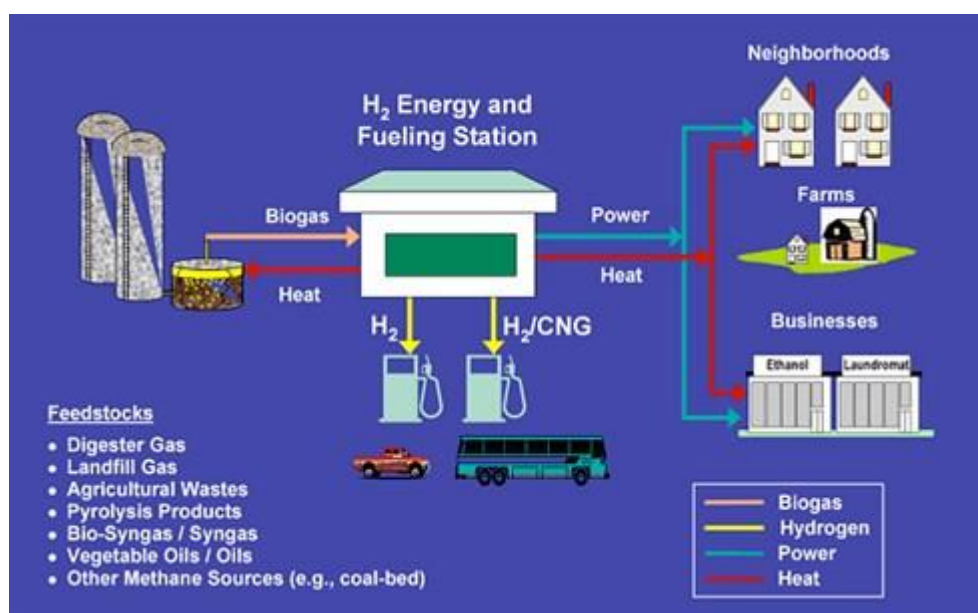
4.1 Εισαγωγή

Οι εφαρμογές των συστημάτων υδρογόνου καθορίζονται ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζονται κατά την οποία διαφοροποιείται τόσο η τεχνολογία όσο και η ισχύς που απαιτείται.

4.2 Στατικού τύπου

4.2.1 Συστήματα κεντρικής παραγωγής μεγάλης κλίμακας

Αυτές οι μονάδες έχουν αναπτυχθεί για να αντικαταστήσουν το δίκτυο σε περιοχές που η ύπαρξη δικτύου είναι ελλιπής ή ακόμα και ανύπαρκτη. Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας εντοπίζονται στο γεγονός ότι προσφέρει μια τεχνολογικά και οικονομικά αποδοτική λύση που τροφοδοτεί με ενέργεια μια αστική-ημιαστική περιοχή, ενώ λόγω του ότι παράγει ελάχιστους ρύπους και θόρυβο καθώς και απαιτεί σχετικά μικρή επιφάνεια εγκατάστασης δύναται να εγκατασταθεί μέσα σε αυτή ελαχιστοποιώντας παράλληλα και τις απώλειες δικτύου λόγω απόστασης. Τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν κυψέλες καύσιμου τύπου SOFC, MCFC, PEMFC και PAFC ενώ η παραγωγή βασίζεται στην αναμόρφωση του φυσικού αερίου. Οι κυρίαρχες εφαρμογές εντοπίζονται στην Αμερική, την Ιαπωνία και την Νότιο Κορέα και η ισχύς κυμαίνεται από 5 έως 63 MW. Πιο συγκεκριμένα, στην Νότιο Κορέα υφίσταται μια τέτοια μονάδα με ισχύ 59.9 MW ενώ βρίσκεται σε εξέλιξη η κατασκευή μιας αντίστοιχης, ισχύος 63.3 MW στο Κονέκτικατ της Αμερικής η οποία υπολογίζεται να τροφοδοτεί με ηλεκτρική ενέργεια 60,000 κατοικίες και αναμένεται να έχει ολοκληρωθεί εντός 2019. (4)

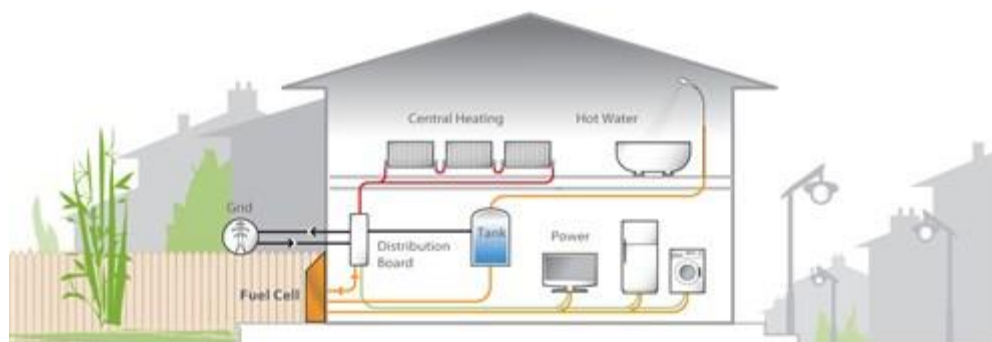


Εικόνα 1. Διάγραμμα ροής συστήματος κεντρικής παραγωγής και διανομής υδρογόνου (5)

4.2.2 Οικιακές Μονάδες

Οι μονάδες αυτές βασίζονται στην συνδυαστική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την λειτουργία των κυψελών καυσίμου και την εκμετάλλευση της σημαντικής ποσότητας θερμότητας που εκλύεται κατά την λειτουργία αυτή (FC micro-CHP) αυξάνοντας τον βαθμό απόδοσης του συστήματος σε επίπεδα 80-95% (6). Η ισχύς τους κυμαίνεται από 300W έως 5kW σε κατοικίες και μικρά εμπορικά κτίρια. Για την συγκεκριμένη κατηγορία συστημάτων υπάρχουν δύο τεχνολογίες κυψελών καυσίμου που εφαρμόζονται και είναι οι κυψέλες καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης (PEM) και κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου

(SOFC). Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται χρησιμοποιείται για να καλύψει τα ηλεκτρικά φορτία της κατοικίας ενώ η θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την θέρμανση νερού. Το σύστημα συμπαραγωγής-κυψελών καυσίμου επιτρέπει την παραγωγή ενέργειας για τις ανάγκες αποκεντρωμένων κατοικιών ενώ θα μπορούσε να εφαρμοστεί και σε αστικές περιοχές στα πλαίσια της εξοικονόμησης ενέργειας λόγω της μη ύπαρξης απωλειών δικτύου ή ακόμα και σαν σύστημα εξισορρόπησης αιχμών ισχύος στο τοπικό δίκτυο (7). Πρόκειται για μια τεχνολογικά ώριμη περίπτωση μικρών συστημάτων συμπαραγωγής καθώς έχει εφαρμοστεί την τελευταία δεκαετία σε πολλές περιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα, η Ιαπωνία -η οποία πρωτοστάτησε σε αυτόν τον τομέα- σταδιακά υιοθέτησε τις μικρές μονάδες συμπαραγωγής ως μία εναλλακτική λύση στην προμήθεια ενέργειας από παραγωγή σε πυρηνικά και θερμοηλεκτρικά εργοστάσια. Χαρακτηριστικά, μέχρι το τέλος του 2012 είχε εγκαταστήσει περισσότερες από 25,000 μονάδες ενώ ως απώτερος σκοπός είναι η εγκατάσταση 5.3 εκατομμυρίων μονάδων μέχρι το 2030 (8). Η τεχνολογία αυτή εφαρμόζεται σε μικρότερη κλίμακα και στην Ευρώπη, κυρίως σε χώρες όπως η Γερμανία, η Δανία, το Ηνωμένο Βασίλειο και η Ολλανδία, με πλέον ενδιαφέρουσα περίπτωση το πιλοτικό πρόγραμμα Ene-field (σε αντιστοιχία με το ιαπωνικό Ene-Farm) το οποίο ξεκίνησε το 2013 και ολοκληρώθηκε τον Οκτώβριο του 2017 έχοντας εγκαταστήσει 1046 μικρο- μονάδες συμπαραγωγής μεταξύ 12 χωρών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Τα αποτελέσματα της μακρο-οικονομικής και της μακρο-περιβαλλοντικής ανάλυσης περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων ,εξοικονόμηση κόστους 1600-2600 €/kW κατά μέσο όρο που αφορά υποδομές και λειτουργικά κόστη του κεντρικού ενεργειακού συστήματος, ενώ 370-1100 kg CO₂ ανά έτος αναμένεται να εξοικονομηθούν στο χρονικό διάστημα 2020-2050 (9).



Εικόνα 2. Οικιακή μονάδα FC-micro CHP (6)

4.2.3 Μονάδες αδιάλειπτης παροχής ισχύος

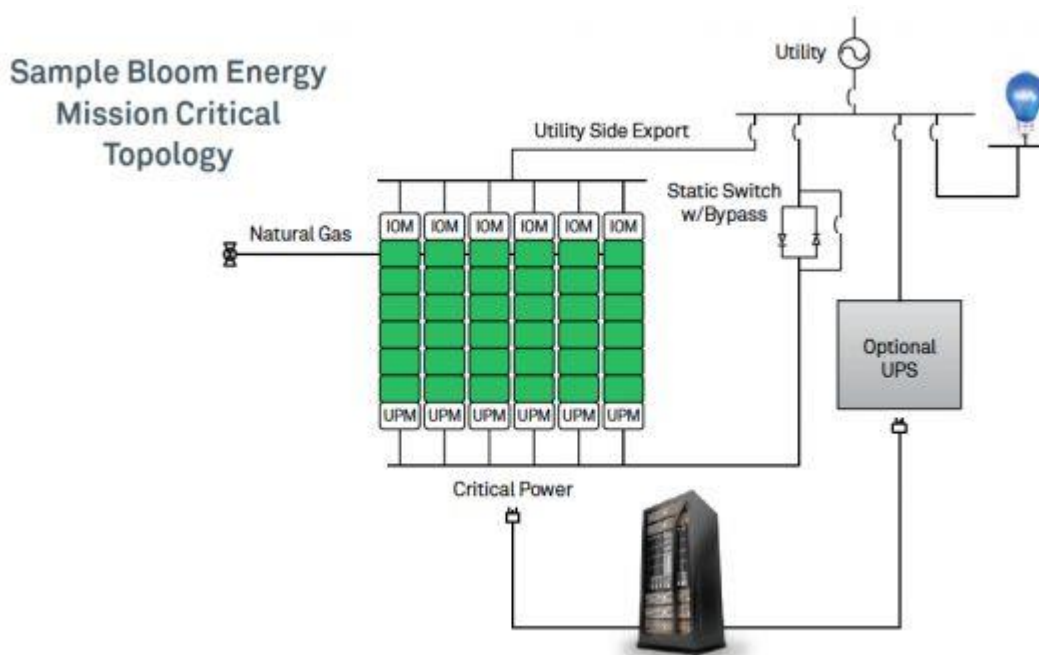
4.2.3.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα αδιάλειπτης παροχής ισχύος εξασφαλίζουν την παροχή ισχύος για εφαρμογές των οποίων η αδιάλειπτη και εύρυθμη λειτουργία κρίνεται ως απαραίτητη. Οι κυψέλες καυσίμου λόγω της αξιοπιστίας τους θεωρούνται μια καλή λύση για τέτοιου τύπου συστήματα. Συγκριτικά πλεονεκτήματα είναι η διαθεσιμότητα του καυσίμου άρα και ισχύος καθώς το δίκτυο φυσικού αερίου είναι πιο αξιόπιστο σε σχέση με το ηλεκτρικό δίκτυο, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και υδρογόνο το οποίο βρίσκεται αποθηκευμένο σε δεξαμενές στον ευρύτερο χώρο των εγκαταστάσεων. Επίσης προσφέρουν οικονομικότερη λειτουργία λόγω της αυξημένης απόδοσης σε σχέση με τις θερμοηλεκτρικές μονάδες που κατά βάση τροφοδοτούν το ηλεκτρικό δίκτυο καθώς και της ελαχιστοποίησης ηλεκτρομηχανικών μερών λόγω της απευθείας σύνδεσης σε συνεχές ρεύμα. Άλλες λύσεις που προσφέρουν παρόμοια πλεονεκτήματα

-όπως οι μπαταρίες- παρουσιάζουν προβλήματα αποφόρτισης οπότε και μειωμένη αξιοπιστία. Γεγονός είναι επίσης και η μειωμένη παραγωγή ρύπων.

4.2.3.2 Αυτόνομα συστήματα παροχής μακράς διάρκειας σε κέντρα δικτύων

Αυτά τα συστήματα βασίζονται στην λειτουργία τους στα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν στην παραπάνω παράγραφο αλλά κυρίως στο γεγονός ότι όλα αυτά συνδυαστικά προσφέρουν μια οικονομικότερη διαχείριση της απαιτούμενης ενέργειας σε ένα τομέα του οποίου οι ανάγκες σε ενέργεια αυξάνονται όλο και περισσότερο λόγω της αυξημένης ανάγκης σε συστήματα πληροφοριών. Σύμφωνα με έρευνα που πραγματοποιήθηκε το σύστημα αυτό μπορεί να είναι έως και 30% οικονομικότερο από τα καθιερωμένα συστήματα, με την απόδοση να ξεπερνάει το 53%. Μειονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι το γεγονός ότι τα κέντρα δικτύων έχουν αρκετά ασταθές προφίλ κατανάλωσης με μεγάλες διακυμάνσεις και μεγάλα φορτία, κάτι που αποτελεί εμπόδιο για την αποτελεσματική κάλυψη της ζήτησης τόσο σε όρους ενέργειας όσο και απόκρισης, λόγω της φύσης της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου οι οποίες είναι σχεδιασμένες για σχετικά σταθερά φορτία. Την λύση σε αυτό προτείνει μια μελέτη η οποία πήρε δεδομένα κατανάλωσης από τα κέντρα δικτύων της Microsoft και ανέπτυξε ένα σύστημα το οποίο ενσωματώνει συστοιχίες μπαταριών και διαχείρισης ενέργειας ώστε να καλύπτουν τις απότομες αιχμές ισχύος. (10). Άλλες εφαρμογές που υφίστανται χρησιμοποιούν το δίκτυο και γεννήτριες με diesel ως εφεδρική και υποστηρικτική λύση. Η εταιρία Bloom Energy διαθέτει στην αγορά ένα σύστημα που παρέχει ενέργεια από κυψέλες καυσίμου τύπου SOFC για κέντρα δεδομένων, η αρχιτεκτονική του οποίου παρακάμπτει τις γεννήτριες και το δίκτυο, το οποίο χρησιμοποιείται ήδη από μεγάλες εταιρίες δεδομένων όπως η eBay, η Apple και άλλες με εγκατεστημένη ισχύς μεγαλύτερη των 150MW (11).



Εικόνα 3. Σκαρίφημα λειτουργίας μονάδας fuel cell για data center (11)

Αντίστοιχες εφαρμογές εντοπίζονται και σε εταιρίες τηλεπικοινωνιών, ξενοδοχειακές μονάδες, Πανεπιστημικά Ιδρύματα και νοσοκομεία.

4.2.4 Φορητές συσκευές

Συσκευές μικρών διαστάσεων που μπορούν να μεταφερθούν επί προσωπικού από έναν άνθρωπο χρησιμοποιούν την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου για την παραγωγή ενέργειας που καταναλώνουν.

Ακριβώς λόγω της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου, οι συσκευές αυτές παρέχουν σημαντικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με αντίστοιχες ηλεκτρικές συσκευές που λειτουργούν με βάση τις μπαταρίες, όπως μεγάλη αυτονομία και δυνατότητα άμεσης αναπλήρωσης της ενέργειας που καταναλώθηκε σε αντίθεση με τις μπαταρίες οι οποίες αποφορτίζονται και χρειάζονται ένα διάστημα προκειμένου να επαναλειτουργήσουν. Τέτοια συστήματα περιλαμβάνουν στρατιωτικές εφαρμογές όπως συστήματα επικοινωνίας, φορητές συσκευές ευρείας χρήσης όπως φακοί, μηχανές ξυρίσματος, μικρές ηλεκτρονικές συσκευές όπως mp3, κάμερες, μεγάλες ηλεκτρονικές συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα, λάπτοπ, εκτυπωτές, ραδιόφωνα και άλλα. Ο κυρίαρχος τύπος κυψελών που χρησιμοποιείται είναι PEMFC και DMFC ενώ το εύρος ισχύος κυμαίνεται από 5W έως 500 kW (6).

4.3 Μεταφορές

4.3.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου εφαρμόζεται στις μεταφορές σε οχήματα κίνησης, στα μέσα μαζικής μεταφοράς όπως λεωφορεία και τρένα, σε αερομεταφορές, σε πλοία και σκάφη και σε οχήματα που χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις αποθηκών. Μπορεί να υφίστανται αυτόνομα ως σύστημα κίνησης του οχήματος ή σε υβριδική διάταξη συνήθως σε συνδυασμό με μπαταρίες, είτε σαν πρωτεύων κινητήρας είτε σε συμπληρωματικό ρόλο. Οι λόγοι που αυτά τα συστήματα αποκτούν ολοένα μεγαλύτερο έδαφος στις μεταφορές είναι η αυξημένη ζήτηση για αποδοτική και περιβαλλοντικά καθαρή μετακίνηση, ειδικότερα στα πλαίσια της απεξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα που αποτελούν την κύρια πηγή ενέργειας στον τομέα αυτό. Η τεχνολογία αυτή προσφέρει αυξημένο βαθμό απόδοσης 40 έως 60 % συγκριτικά με κινητήρες εσωτερικής καύσης που βρίσκονται στο 25% καθώς και αυξημένη αξιοπιστία λόγω της έλλειψης κινούμενων μερών αλλά και αθόρυβη λειτουργία. Όσον αφορά την σύγκρισή τους με αυτόνομα συστήματα που βασίζονται στις μπαταρίες, οι κυψέλες καυσίμου προσφέρουν καλύτερη αυτονομία (έως 700 km έναντι έως 500 km) και μικρό χρόνο φόρτισης (μερικά λεπτά έναντι ωρών). Κύρια παράμετρος υβριδοποίησης των συστημάτων συνδυασμού κυψέλες PEM με μπαταρίες ιόντων-λιθίου ή υπερπυκνωτών είναι η αξιοποιηθούν τα οφέλη που παρέχει η κάθε τεχνολογία όπως η ανάκτηση της κινητικής ενέργειας κατά την πέδηση για την φόρτιση των μπαταριών.

4.3.2 Αυτοκίνηση

Η παραγωγή των οχημάτων που χρησιμοποιούν το υδρογόνο μέσω κυψελών καυσίμου βρίσκεται πλέον στο στάδιο της προώθησης στην αγορά όπου κοινοπραξίες κατασκευαστών, εταιριών υποδομών σε συνεργασία με κυβερνητικά προγράμματα επιδοτήσεων διαθέτουν οχήματα και σταθμούς ανεφοδιασμού. Πιο συγκεκριμένα στο πρόγραμμα [HyFIVE](#), οι εμπλεκόμενοι φορείς διαθέτουν 185 οχήματα κυψελών καυσίμου ανά την Ευρώπη όπως και σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου. Αντίστοιχα το πρόγραμμα [H2ME](#) αποσκοπεί στην εγκατάσταση 29 σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου – κυρίως στην Γερμανία- και στην διάθεση 200 αυτοκινήτων και 125 βαν εκτεταμένης αυτονομίας. Στα πλαίσια του προγράμματος αυτού επίσης, εγκαινιάστηκε ο πρώτος σταθμός ανεφοδιασμού στην Δανία, ενώ βρίσκεται σε εξέλιξη η εγκατάσταση δικτύου σταθμών ανεφοδιασμού που θα παράγουν υδρογόνο μέσω ηλεκτρόλυσης αξιοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ανάμεσα στα κίνητρα που προσφέρονται, οι αυξανόμενοι περιορισμοί στην χρησιμοποίηση των ρυπογόνων κινητήρων εσωτερικής καύσης δημιουργούν την ανάγκη για την αξιοποίηση φιλικών προς το περιβάλλον τεχνολογιών κίνησης όπως το υδρογόνο και οι κυψέλες καυσίμου. Στο άμεσο μέλλον, το 2020 η μείωση του εκπεμπόμενου διοξειδίου του άνθρακα ανά χιλιόμετρο σε επίπεδα κάτω του 95 γραμμαρίων θα μπορούσε να ενθαρρύνει τους κατασκευαστές να στραφούν μαζικά στην τεχνολογία του υδρογόνου.



Εικόνα 4. Αυτοκίνητο με χρήση κυψελών καυσίμου

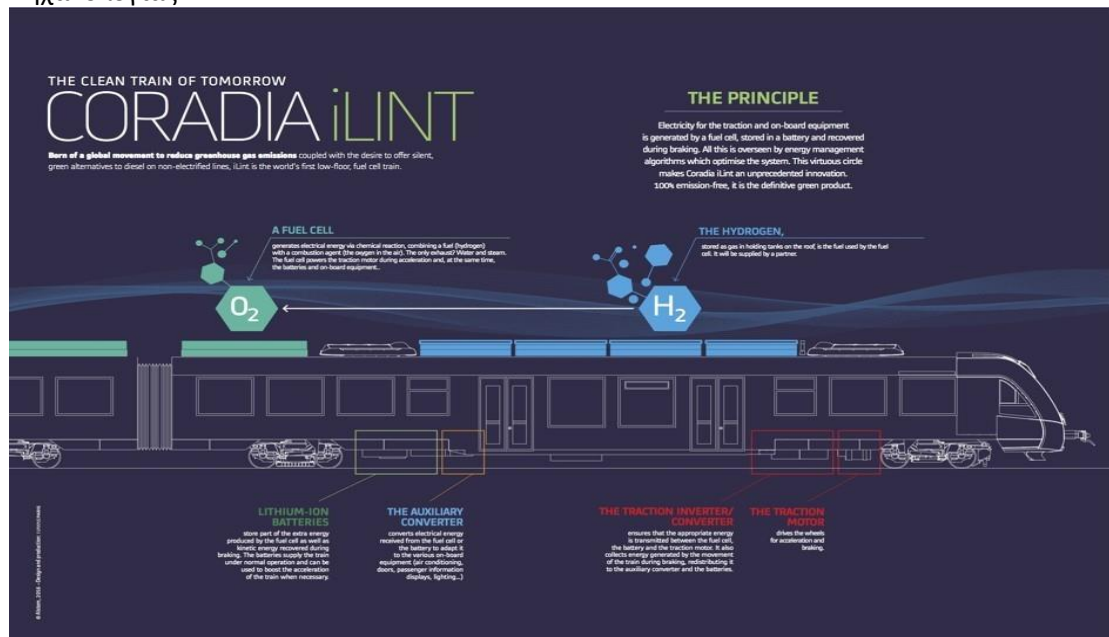
4.3.3 Μέσα μαζικής μεταφοράς

Η αξιοποίηση των λεωφορείων που χρησιμοποιούν το υδρογόνο για την κίνησή τους για τις αστικές μεταφορές γίνεται ολοένα και πιο διαδεδομένη -δεδομένων των συνθηκών και των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η τεχνολογία, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Πόλεις όπως η Κολωνία, το Λονδίνο, το Όσλο και η Ρώμη διαθέτουν στόλους λεωφορείων υδρογόνου χάρη προγραμμάτων επιδοτήσεων όπως [CHIC](#), [High V.LO-City](#), [HyTransit](#) και [3EMOTION](#). Σήμερα, υπάρχουν περισσότερα από 30 λεωφορεία στην Ευρώπη ενώ αναμένεται στα επόμενα χρόνια να ξεπεράσουν τα 90, καθώς επίσης και 20 σταθμοί ανεφοδιασμού των οποίων ο αριθμός αναμένεται να ξεπεράσει τους 50 ως αποτέλεσμα του προγράμματος [FCH JU](#).



Εικόνα 5. Λεωφορείο με χρήση κυψελών καυσίμου

Όσον αφορά τον τομέα των σιδηροδρομικών μεταφορών, η γαλλική κατασκευαστική εταιρία Alstom πρόσφατα το 2017 ανέπτυξε ένα τρένο του οποίου ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί με βάση την ενέργεια που παράγει ένα σύστημα κυψελών καυσίμου και δεξαμενών υδρογόνου ενσωματωμένα σε αυτό. Οι δεξαμενές παρέχουν αρκετό υδρογόνο για να διασφαλίσουν αυτονομία 497 μιλίων με μέγιστη ταχύτητα 87 μίλια την ώρα. Ότι ενέργεια περισσεύει κατά την παραγωγή στις κυψέλες και δεν απορροφάται από τον κινητήρα, αποθηκεύεται σε μπαταρίες ιόντων λιθίου οι οποίες βρίσκονται στο κάτω μέρος του τρένου. Το κόστος της λειτουργίας του ανταγωνίζεται το αντίστοιχο ενός τρένου που χρησιμοποιεί ντίζελ για την κίνησή του αλλά όχι ενός ηλεκτροδοτούμενου. Επομένως στην παρούσα φάση η λογική στην υιοθέτηση τέτοιων συστημάτων σε τρένα απηχεί σε σχετικά μικρά δίκτυα μεταφορών τα οποία δεν είναι ηλεκτροδοτούμενα.



Εικόνα 6. Τρένο με χρήση κυψελών καυσίμου (12)

Στον τομέα των ναυτιλιακών μεταφορών και των ιδιωτικών σκαφών η ισχύς η οποία παράγεται από συστήματα κυψελών καυσίμου με βάση το φυσικό αέριο υπολογίζεται σε 160GW. Ο κύριος σκοπός ενσωμάτωσης της τεχνολογίας αυτής είναι η παροχή καθαρής υποβοηθητικής ισχύος σε πλοία και σκάφη τα οποία βρίσκονται σε λιμάνια όπου οι εκπομπές των παραγώγων καύσης του ντίζελ είναι απαγορευμένες.

Στον τομέα των αερομεταφορών κύριος σκοπός ενσωμάτωσης της τεχνολογίας αυτής είναι και πάλι η παροχή καθαρής υποβοηθητικής ισχύος. Ως φορέας ενέργειας χρησιμοποιείται το προπάνιο σε κυψέλες SOFC για την υποβοήθηση συστημάτων μπαταριών ιόντων-λιθίου. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αεροσκάφος το οποίο θα ενσωματώνει και φωτοβολταϊκά.

Το συμπέρασμα είναι ότι οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν καλύτερα στις μεταφορές όταν χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά για την υποβοήθηση συστημάτων μπαταριών. Το υδρογόνο είναι ένα κατάλληλο καύσιμο για τις PEMFC που χρησιμοποιούνται στους στόλους λεωφορείων. Η μεθανόλη είναι καταλληλότερη για καταναλωτές οι οποίοι χρειάζονται υποβοηθητική ενέργεια για δραστηριότητες αναψυχής. Καύσιμα όπως το φυσικό αέριο και το προπάνιο είναι πιο χρήσιμα σε πλοία και αεροσκάφη (13) (14).

5. Εργαστηριακή προσομοίωση υβριδικού συστήματος

5.1 Περιγραφή επιμέρους συστημάτων

5.1.1 Δεξαμενές μεταλλικών υδριδίων

Τα μεταλλικά δοχεία αποθήκευσης υδριδίου (MHS) από την Heliocentris Academia GmbH επιτρέπουν ασφαλή και συμπαγή αποθήκευση σχετικά μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου σε χαμηλές πιέσεις. Τα δοχεία αποθήκευσης μεταλλικού υδριδίου της Heliocentris μπορούν να αποθηκεύσουν πολλαπλάσια ποσότητα υδρογόνου σε σύγκριση με την αποθήκευση του σε χαμηλή πίεση σε μια δεξαμενή.

Τα δοχεία αποθήκευσης MHS 200 και συμμορφώνονται με την τεχνική 4.3 της οδηγίας για τον υπό πίεση εξοπλισμό, μειώνοντας τα εμπόδια της χρήσης υδρογόνου σε αντίθεση με τις κοινές συσκευές αποθήκευσης της πίεσης.

Τεχνολογία

Οι δεξαμενές μεταλλικών υδριδίων Heliocentris είναι εξοπλισμένες με κράμα μετάλλου χαμηλής θερμοκρασίας AB2 σε βάση το TiMg και προσφέρουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα

- απορροφούν το υδρογόνο στο πλέγμα κράματος μετά την προσρόφηση στην επιφάνεια
- μπορεί να αποθηκεύει υδρογόνο σε μεγάλο όγκο και χαμηλή πυκνότητα βάρους (ιδανική για σταθερές εφαρμογές)
- έχει χαμηλές πιέσεις πλατό σε θερμοκρασία δωματίου
- έχει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα

Το κάνιστρο είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί ως σύστημα παθητικής επιφανειακής ψύξης. Η αγωγή θερμότητας μπορεί να εφαρμοστεί από τον χρήστη με εξαερισμό ή ψύξη με νερό.

Θερμοκρασία δεξαμενών

Οι ονομαστικές παράμετροι του δοχείου καθορίζονται για θερμοκρασία επιφανείας δοχείου 20 °C. Η απόδοση απορρόφησης /εκρόφησης της αποθηκευτικής μονάδας μπορεί να επηρεαστεί από την θερμική επεξεργασία της επιφάνειας του δοχείου με:

- ψύξη της επιφάνειας αποθήκευσης για απορρόφηση (πλήρωση) με νερό ή αέρα με 5 5 20 ° C
- θέρμανση της επιφάνειας αποθήκευσης για συνεχή εκρόφηση με νερό ή αέρα με 20 5 50 ° C
- χρήση του ατμοσφαιρικού αέρα με παθητικό ή ενεργό εξαερισμό

Ενσωμάτωση, Χρήση και Ασφάλεια

Μια ενσωματωμένη γρήγορη ζεύξη επιτρέπει την εύκολη και ασφαλή σύνδεση με μια μεμονωμένη πηγή υδρογόνου. Η αποθηκευτική μονάδα είναι εξοπλισμένη με βαλβίδα εκτόνωσης πίεσης και θερμοκρασίας για την αποφυγή επικίνδυνων συνθηκών.

5.1.2 Συσκευή κυψελών καυσίμου

Συσκευή κυψελών καυσίμου

Η συσκευή Nexa Training System είναι μια πειραματική διάταξη κυψελών καυσίμου ονομαστικής ισχύος 1.2 kW η οποία επιτρέπει την διεξαγωγή πειραμάτων με πλήθος μετρητικών συσκευών ώστε να εξαχθούν τα κατάλληλα συμπεράσματα για την εκάστοτε εφαρμογή μέσω της ηλεκτροχημικής μετατροπής του υδρογόνου σε ηλεκτρική ισχύ στο φορτίο από τις κυψέλες. Αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

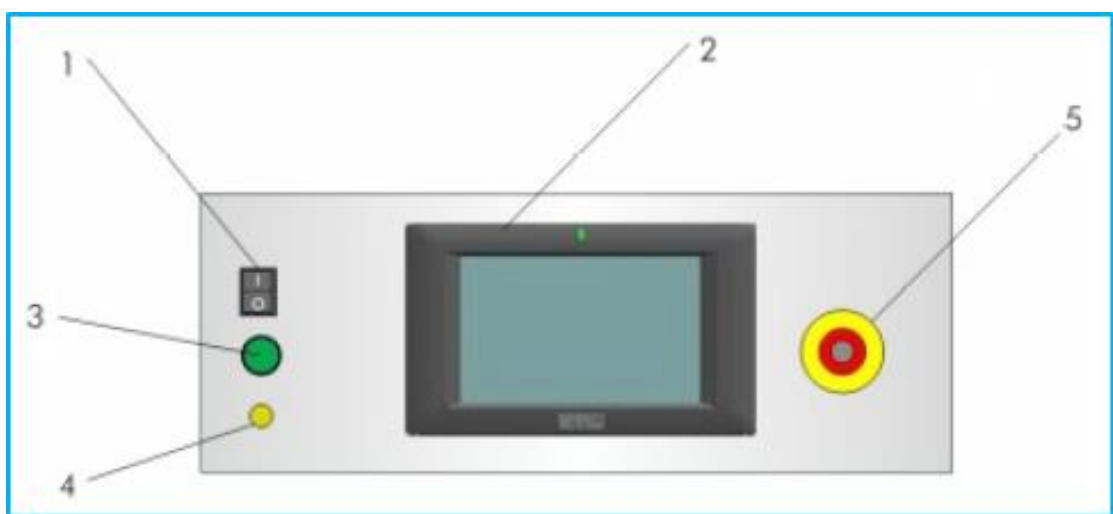
- Μονάδα ελέγχου συστήματος
- Μονάδα προσομοίωσης φορτίου
- Μονάδα Συσσωρευτών
- Μονάδα διαχείρισης Ισχύος

- Μονάδα κυψελών καυσίμου
- Μονάδα παροχής υδρογόνου
- Πρόσθετα εξαρτήματα (μονάδα παροχής ισχύος)

5.1.2.1 Μονάδα ελέγχου συστήματος

Η μονάδα ελέγχου συστήματος περιλαμβάνει την οθόνη αφής του Η/Υ, τον κεντρικό διακόπτη, το κουμπί εκκίνησης και τον διακόπτη ασφαλείας.

Η συσκευή ανοίγει και κλείνει μέσω του κεντρικού διακόπτη (1) και ξεκινά την λειτουργία της με το κουμπί εκκίνησης (5). Η οθόνη αφής του Η/Υ ρυθμίζει την λειτουργία της συσκευής (2) ενώ σε περίπτωση που παρουσιαστεί πρόβλημα, ο διακόπτης ασφαλείας (3) σταματά την λειτουργία της.



Εικόνα 7. Μονάδα ελέγχου συστήματος

Μονάδα προσομοίωσης φορτίου

Η μονάδα αυτή προσομοιώνει το φορτίο της συσκευής και επιτρέπει την ταυτόχρονη μέτρηση του ρεύματος και της τάσης. Η μονάδα λειτουργεί χειροκίνητα χρησιμοποιώντας τους διακόπτες που βρίσκονται στην μπροστινή επιφάνεια της συσκευής ή αυτόματα μέσω του λογισμικού.



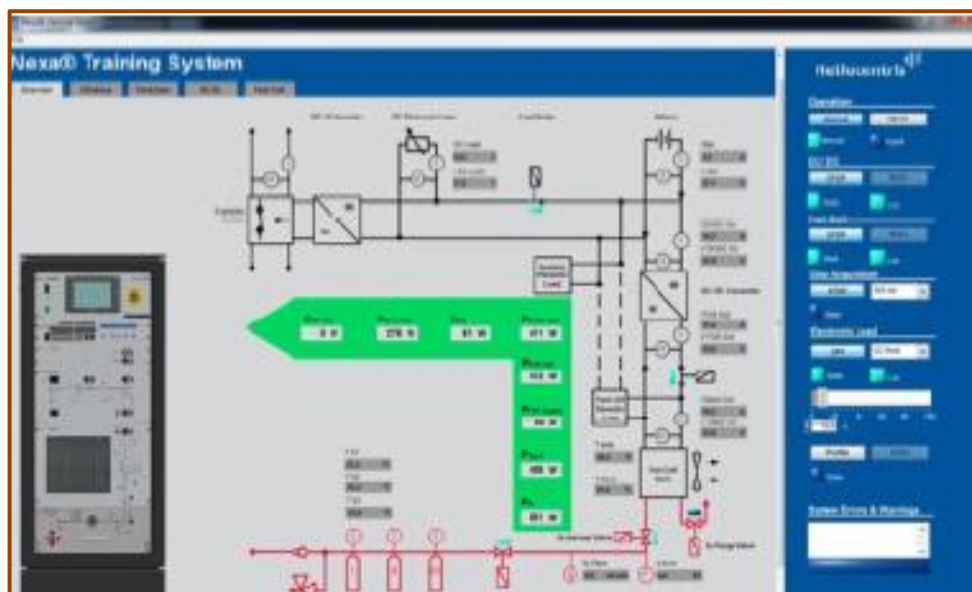
Εικόνα 8. Μονάδα προσομοίωσης φορτίου

1. Οθόνη

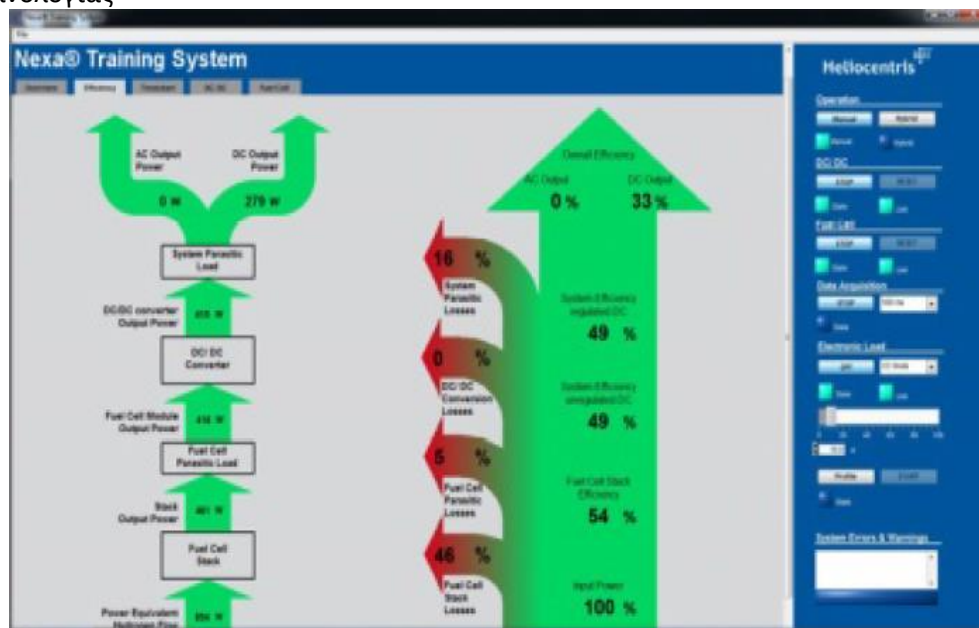
2. Ρύθμιση κωδικοποιητή
3. Επιλογή κωδικοποιητή
4. Κουμπί σύνδεσης/αποσύνδεσης φορτίου
5. Επιλογέας ελέγχου επιπέδου
6. Επιλογέας εναλλαγής λειτουργίας
7. Υποδοχέας DC φορτίου
8. Κεντρικός διακόπτης

5.1.2.2 Λογισμικό Nexa Training System

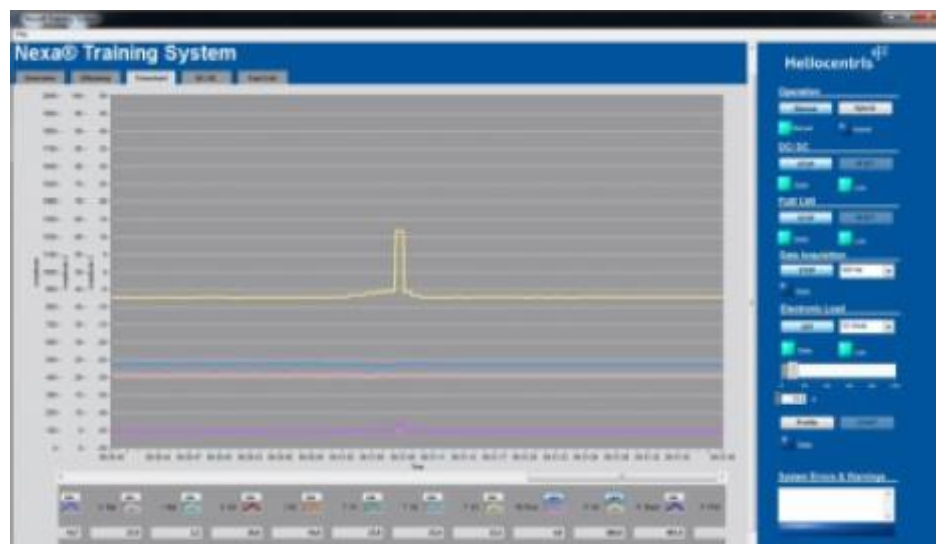
Το λογισμικό αυτό είναι προ-εγκατεστημένο στον Η/Υ και προσφέρει μια πλήρη εικόνα της λειτουργίας των επί μέρη συστημάτων της συσκευής. Κατά την χρήση του λογισμικού μπορούν να παραμετροποιηθούν οι διάφορες λειτουργίες της συσκευής ενώ οι τιμές φορτίου δύναται να προσαρμοσθούν προκειμένου να προκύψουν οι κατάλληλες χαρακτηριστικές καμπύλες. Τα δεδομένα μπορούν να σωθούν σε διάφορα μορμάτ αρχείου για περαιτέρω επεξεργασία. Οι επιφάνειες απεικόνισης παρουσιάζονται παρακάτω.



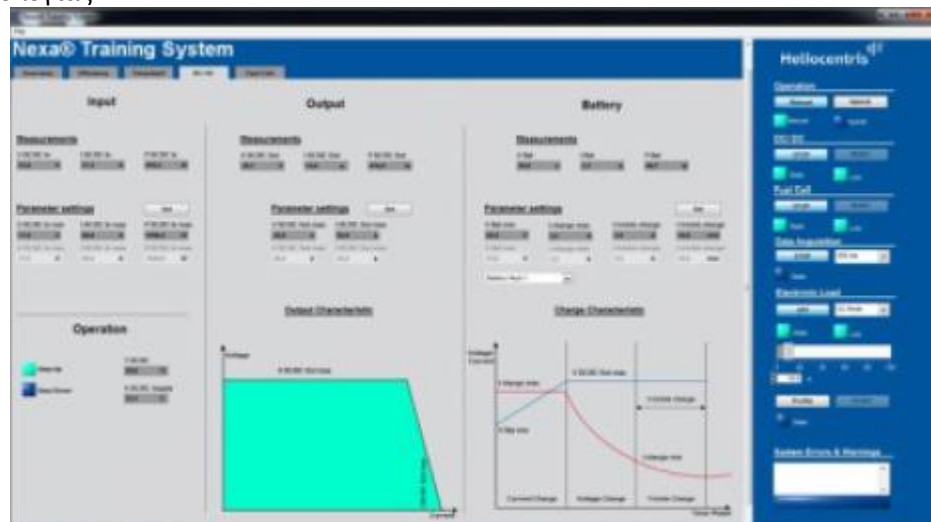
Εικόνα 9. Επισκόπηση συστήματος



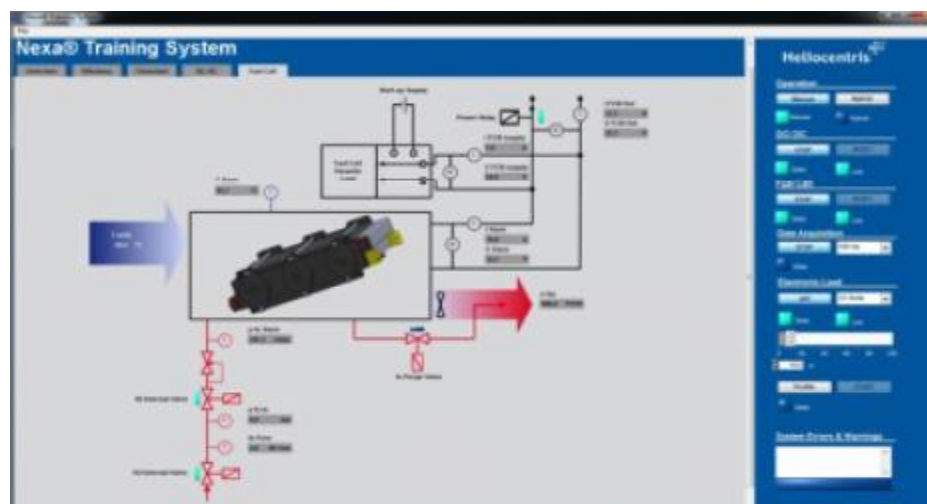
Εικόνα 10. Διάγραμμα ροής ενέργειας



Εικόνα 11. Διάγραμμα παραμέτρων συναρτήσει του χρόνου



Εικόνα 12. Δεδομένα και παραμετροποίηση του DC/DC converter και στάθμη μπαταρίας



Εικόνα 13. Επισκόπηση των επί μέρη συστημάτων της συσκευής

5.1.2.3 Μονάδα προσομοίωσης φορτίου

Οθόνη συσκευής

Στην αριστερή πλευρά της οθόνης της συσκευής παριστάνονται οι τιμές τάσης, ρεύματος και αντιστάσεων. Η ακριβής τιμή που αντιστοιχεί στον τύπο ρεύματος απεικονίζεται με ένα σύμβολο. Στην δεξιά πλευρά της οθόνης παριστάνονται τα σημεία ρύθμισης, τα σφάλματα, και άλλες μετρήσεις.

Κεντρικός διακόπτης

Ο κεντρικός διακόπτης συνδέει και αποσυνδέει το ηλεκτρονικό φορτίο

Επιλογέας εναλλαγής λειτουργίας

Ο επιλογέας εναλλαγής λειτουργίας καθορίζει τον τύπο φορτίου (CC, CV, CP, CR10R, CR400R).

Επιλογέας ελέγχου επιπέδου

Ο επιλογέας ελέγχου επιπέδου καθορίζει τα διάφορα σημεία ρύθμισης για κάθε επίπεδο (A, B, A/B, Battery, Setup).

Κουμπί σύνδεσης/αποσύνδεσης φορτίου

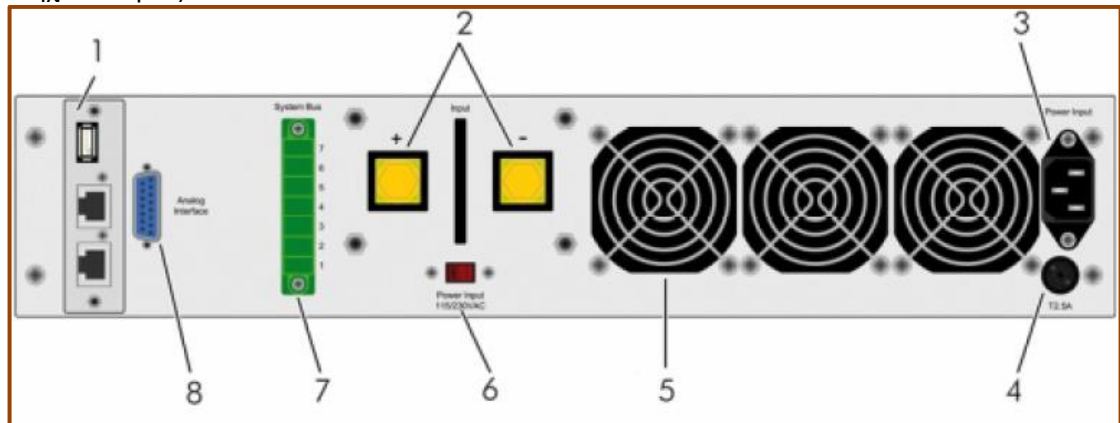
Η αποσύνδεση φορτίου παριστάνεται στην οθόνη με την ένδειξη standby.

Επιλογέας κωδικοποιητή

Με κάθε περιστροφή του επιλογέα αλλάζουν τα στοιχεία παραμετροποίησης στην οθόνη. Στην λειτουργία επιπέδου A/B μπορούν να επιλεχθούν διάφορα τέτοια στοιχεία.

Ρύθμιση κωδικοποιητή

Με κάθε περιστροφή του συγκεκριμένου κουμπιού αλλάζει το σημείο ρύθμισης το οποίο έχει καθοριστεί από τον παραπάνω επιλογέα.

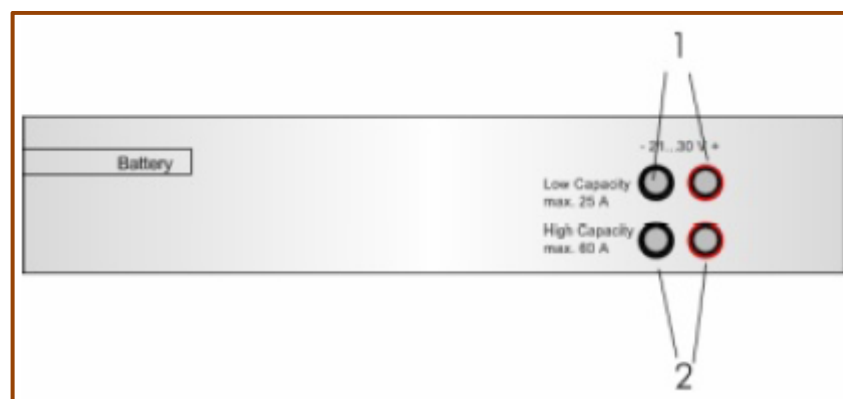


Εικόνα 14. Μονάδα προσομοίωσης φορτίου

1. USB διεπαφή
2. Υποδοχή DC
3. Υποδοχή τροφοδοτικού
4. Ασφάλεια τροφοδοτικού
5. Εξαερισμός
6. Επιλογέας τάσης τροφοδοτικού
7. Τερματικό διαύλου συστήματος
8. Αναλογική διεπαφή

5.1.2.4 Μονάδα συσσωρευτών

Το σύστημα έχει δύο συστοιχίες συσσωρευτών με διαφορετικές χωρητικότητες, ενώ η καθεμία αποτελείται από δυο μπαταρίες μολύβδου. Οι συνδέσεις για την σύνδεση και αποσύνδεση βρίσκονται στην μπροστινή επιφάνεια της μονάδας.

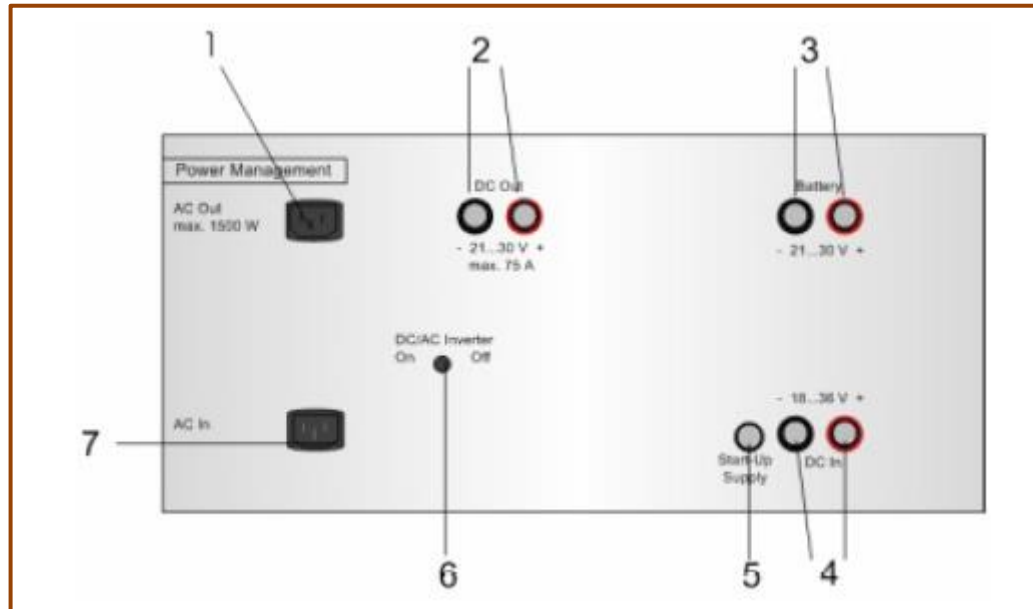


Εικόνα 15. Μονάδα συσσωρευτών

1. Σύνδεση χαμηλής χωρητικότητας
2. Σύνδεση υψηλής χωρητικότητας

5.1.2.5 Μονάδα Διαχείρισης Ισχύος

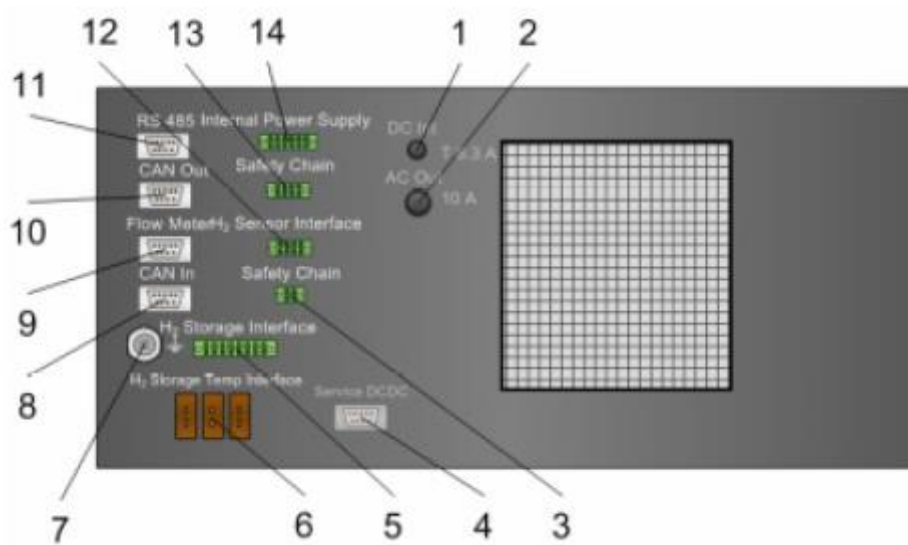
Η μονάδα διαχείρισης ισχύος μετατρέπει την ηλεκτρική ισχύ εξόδου των κυψελών καυσίμου σε 24V συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα, επιβλέπει και φορτίζει τις μπαταρίες και παρέχει τα εσωτερικά φορτία στο σύστημα με την κατάλληλη τάση.



Εικόνα 16. Το Μονάδα Διαχείρισης Ισχύος

1. Έξοδος AC/AC
2. Έξοδος DC/DC (-/+)
3. Σύνδεση μπαταριών
4. Είσοδος DC/DC (-/+)
5. Σύνδεση παροχής ισχύος
6. Εναλλαγή inverter DC/AC
7. Είσοδος AC/AC

Η λειτουργική ακολουθία στην μονάδα διαχείρισης ισχύος απεικονίζεται στην μπροστινή επιφάνεια της μονάδας με μορφή διαγράμματος ροής.

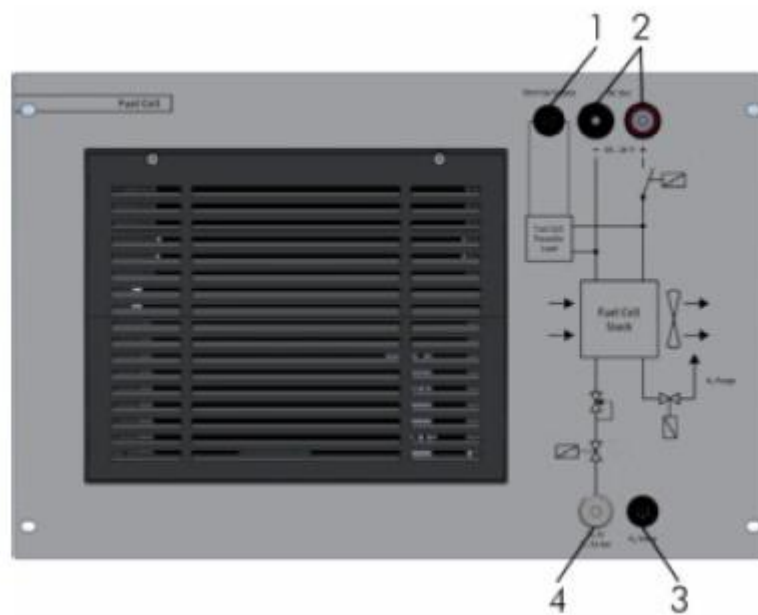


Εικόνα 17. Μονάδα διαχείρισης ισχύος

1. Ασφάλεια εισόδου DC
2. Ασφάλεια εξόδου AC
3. Ασφάλεια Nexa 1200
4. Διεπαφή επιδιορθώσεων
5. Παροχή ισχύος και περιφερειακές ρυθμίσεις της μονάδας παροχής υδρογόνου
6. Αισθητήρες θερμοκρασίας της μονάδας παροχής υδρογόνου
7. Ισοδύναμη σύνδεση
8. CAN bus IN
9. Μεταφορά δεδομένων μετρητή ροής
10. CAN bus OUT
11. Επιπρόσθετα δεδομένα διάμεση RS485
12. Μεταφορά δεδομένων των αισθητήρων υδρογόνου και της παροχής ισχύος
13. Κατεπίγουσα αποσύνδεση
14. Εσωτερική τροφοδοσία του συστήματος ελέγχου

5.1.2.6 Μονάδα κυψελών καυσίμου

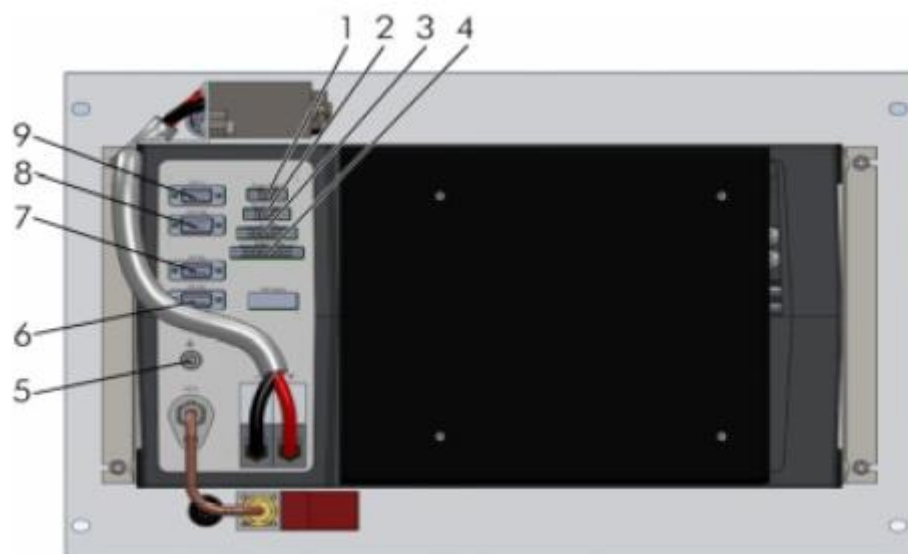
Το κεντρικό στοιχείο της μονάδας κυψελών καυσίμου είναι οι συστοιχία κυψελών καυσίμου Nexa 1200. Αποτελείται από μια αερόψυκτη συστοιχία κυψελών καυσίμου -36 στον αριθμό- ονομαστικής ισχύος εξόδου 1200W, καθώς και τα απαραίτητα περιφερειακά στοιχεία για την αυτόματη λειτουργία και την ασφάλεια των εξαρτημάτων.



Εικόνα 18. Μονάδα κυψελών καυσίμου

1. Εξωτερική παροχή ισχύος
2. Έξοδος DC/DC
3. Ένδειξη ελέγχου βαλβίδας της μονάδας παροχής υδρογόνου
4. Είσοδος Υδρογόνου

Η λειτουργική ακολουθία της μονάδας κυψελών καυσίμου απεικονίζεται στην μπροστινή επιφάνεια της συσκευής.



Εικόνα 19. Μονάδα κυψελών καυσίμου

1. Παροχή ισχύος
2. Απομακρυσμένος έλεγχος
3. Βοηθητική έξοδος
4. Ασφάλειες
5. Ισοδύναμη σύνδεση
6. RS232
7. Service
8. CAN OUT
9. CAN IN

5.1.2.7 Μονάδα Παροχής Υδρογόνου

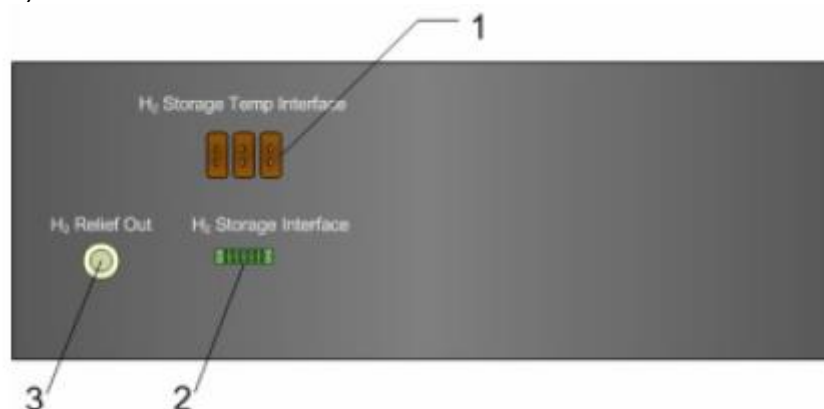
Η μονάδα παροχής υδρογόνου περιλαμβάνει τρεις ξεχωριστές υποδοχές για δεξαμενές μεταλλικών υδριδίων. Για την επιτήρηση των δεξαμενών αυτών υπάρχουν εγκατεστημένοι αισθητήρες υδρογόνου, πίεσης και θερμοκρασίας.



Εικόνα 20. Μονάδα Παροχής Υδρογόνου

1. Έξοδος Υδρογόνου
2. Πάνελ ελέγχου της σωληνοειδούς βαλβίδας
3. Είσοδος υδρογόνου

Εάν υπάρξει πίεση άνω των 16bar ενεργοποιείται η βαλβίδα ανακούφισης.



Εικόνα 21. Μονάδα παροχής υδρογόνου

1. Αισθητήρες θερμοκρασίας των δεξαμενών μεταλλικών υδριδίων
2. Αισθητήρες της μονάδας αποθήκευσης
3. Έξοδος εκτόνωσης

5.1.2.8 Μονάδα παροχής ισχύος

Παρά την ύπαρξη μπαταριών οι οποίες τροφοδοτούν την λειτουργία της συσκευής, προτείνεται να χρησιμοποιείται η μονάδα παροχής ισχύος που τροφοδοτείται από το δίκτυο, ενώ η χρήση των μπαταριών να περιορίζεται όποτε το απαιτούν οι συνθήκες. Η μονάδα παροχής ισχύος περιλαμβάνει έναν αντάπτορα AC με IEC υποδοχή και ένα μαύρο και κόκκινο καλώδιο από το οποίο παροχετεύεται η ισχύς. Αναλόγως την απαιτούμενη λειτουργία, το καλώδιο αυτό συνδέεται στο πίσω (μονάδα διαχείρισης ενέργειας) ή το εμπρός (μονάδα συσσωρευτών) τμήμα της συσκευής.

5.2 Αποτελέσματα και συμπεράσματα πειραματική διαδικασίας

Η πειραματική διαδικασία αποτελείται από δύο επιμέρους στάδια. Το πρώτο αφορά την παραγωγή υδρογόνου μέσω της ηλεκτρολυτικής συσκευής -η οποία προμηθεύεται την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις μπαταρίες- και την αποθήκευση του στις δεξαμενές μεταλλικών υδριδίων. Στο επόμενο στάδιο οι δεξαμενές συνδέονται με την συσκευή κυψελών καυσίμου η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες ενός προκαθορισμένου φορτίου κατανάλωσης.

Πρώτο στάδιο – Ηλεκτρόλυση και αποθήκευση στις δεξαμενές

Το πρώτο στάδιο του πειράματος πραγματοποιήθηκε μέσα σε έξι μέρες, σε συνθήκες περιβάλλοντος και διήρκησε συνολικά τριάντα τρεις ώρες. Η ενέργεια που καταναλώθηκε από τις μπαταρίες είναι 8.53 MWh ενώ η ενέργεια που καταναλώσε η συσκευή ηλεκτρόλυσης είναι 8.13 MWh με την διαφορά τους να αποτελεί την ενέργεια που καταναλώθηκε στην μετατροπή του ρεύματος από συνεχές σε εναλλασσόμενο μέσω inverter με μέση απόδοση 88.96%. Παρήχθησαν και αποθηκεύθηκαν συνολικά 1.59 sm³ υδρογόνου με την απόδοση ηλεκτρόλυσης να κυμαίνεται από 33% έως 64% όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1. Στοιχεία διαδικασίας ηλεκτρόλυσης

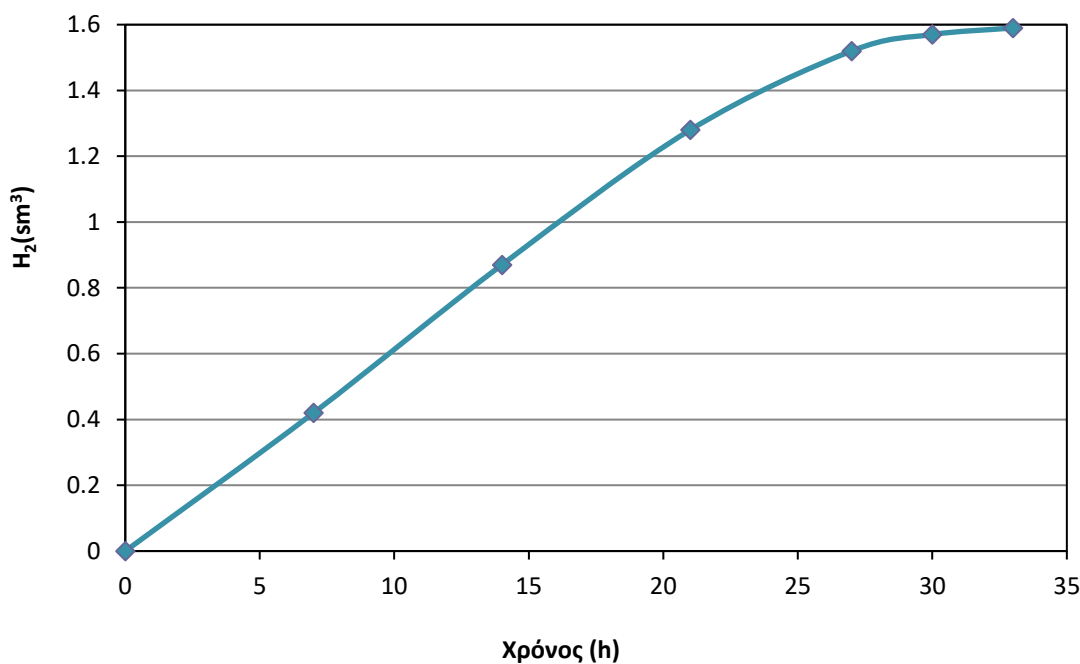
Μέρες	Ώρες	Ενέργεια	Όγκος	Βαθμός απόδοσης
-------	------	----------	-------	-----------------

	λειτουργίας (h)	ηλεκτρόλυσης (kWh)	παραγόμενου H ₂ (sm ³)	ηλεκτρόλυσης (%)
1η μέρα	7	2,128	0,420	59%
2η μέρα	7	2,340	0,450	58%
3η μέρα	7	1,918	0,410	64%
4η μέρα	6	1,266	0,240	57%
5η μέρα	3	0,311	0,052	50%
6η μέρα	3	0,165	0,018	33%
Σύνολο	33	8,128	1,590	53%

Ο βαθμός απόδοσης της ηλεκτρόλυσης προκύπτει ως:

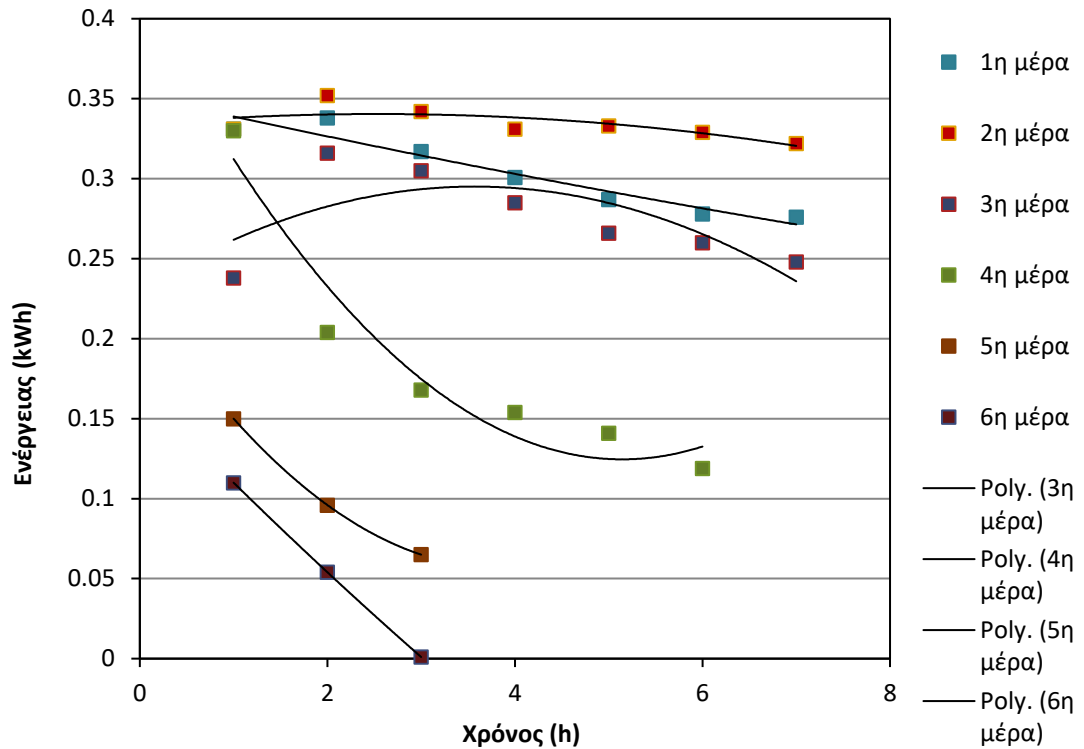
$$\text{Βαθμός απόδοσης ηλεκτρόλυσης} = \frac{\text{Όγκος παραγόμενου H}_2 \cdot \text{Κατώτερη θερμογόνος δύναμη H}_2}{\text{Ενέργεια ηλεκτρόλυσης}}$$

Ο βαθμός απόδοσης - αν θεωρηθεί αντιπροσωπευτικό το διάστημα των τριών πρώτων ημερών στο οποίο κυμαίνεται από 58 έως 64% - κρίνεται ικανοποιητικός προσεγγίζοντας το 67% που ορίζει η βιβλιογραφία (15).



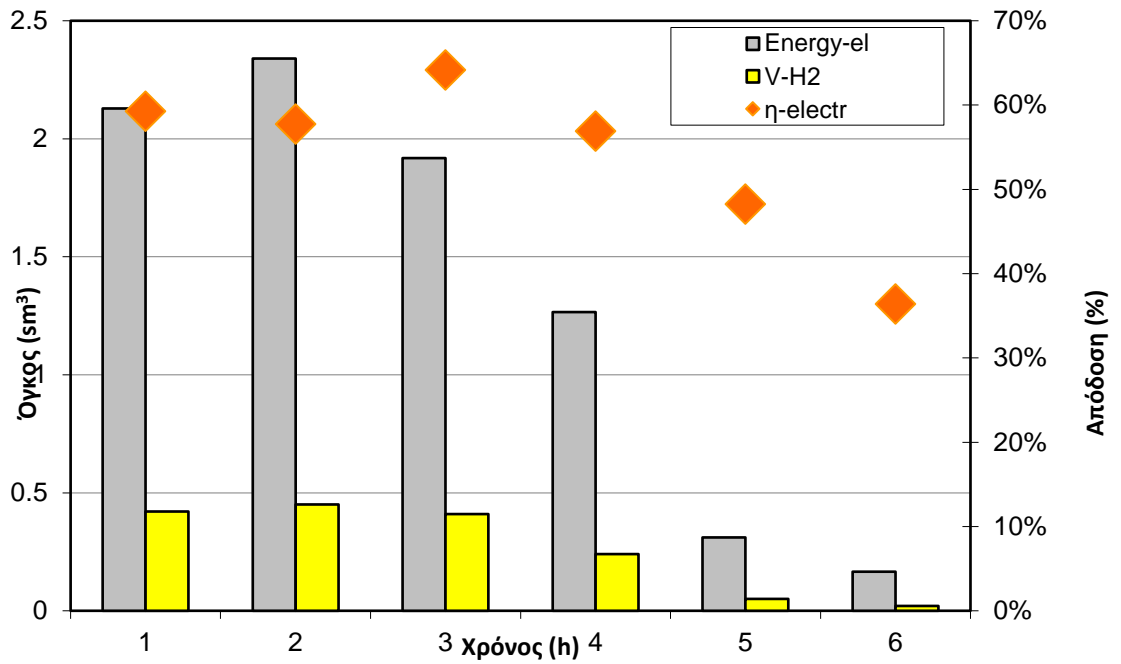
Σχήμα 1. Αθροιστική παραγωγή υδρογόνου στο σύνολο της διάρκειας ηλεκτρόλυσης

Η παραγωγή υδρογόνου αθροιστικά στις έξι μέρες, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, ακολουθεί μια γραμμική μορφή χωρίς να υπάρχουν αδικαιολόγητες εξάρσεις παραγωγής.



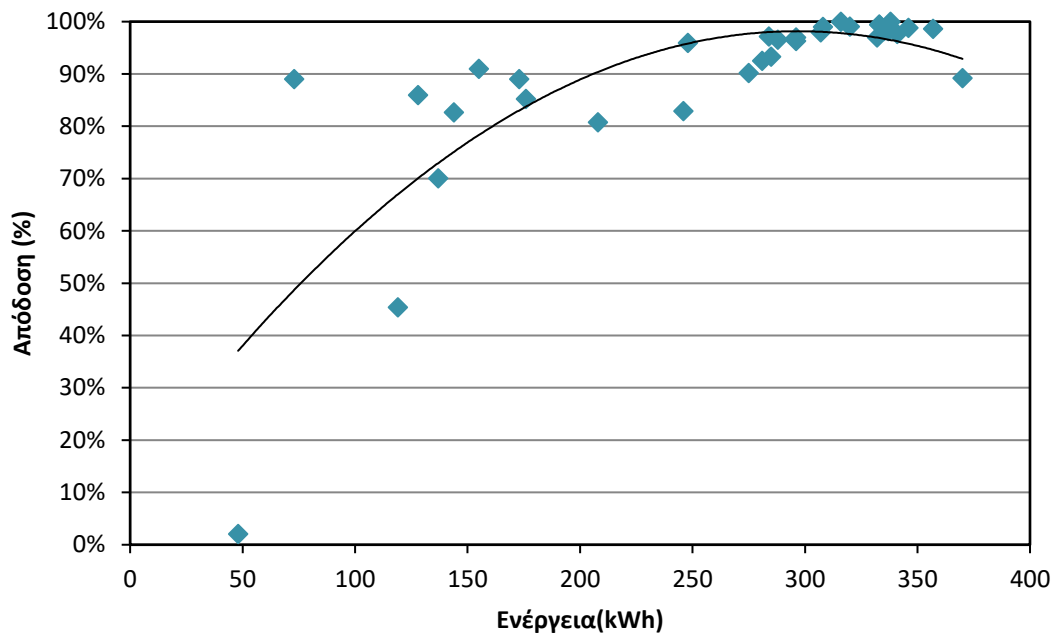
Σχήμα 2. Κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή υδρογόνου-ξεχωριστά για κάθε μέρα

Καθόσον αυξάνονται οι μέρες, παρατηρείται μια πτώση στην ενέργεια που απαιτείται για την ηλεκτρόλυση γεγονός που δικαιολογείται από την μειωμένη παραγωγή υδρογόνου και η οποία αιτιολογείται από την ολοένα αυξανόμενη πλήρωση των δεξαμενών. Εξάιρεση αποτελεί η δεύτερη μέρα χωρίς να υπάρχει κάποια ιδιαίτερη αιτιολογία για αυτό. Μείωση της απαιτούμενης ενέργειας παρατηρείται επίσης και κατά την διάρκεια της ημέρας γεγονός που αποδίδεται στην μείωση της ικανότητας απορρόφησης από τις δεξαμενές λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας τους.



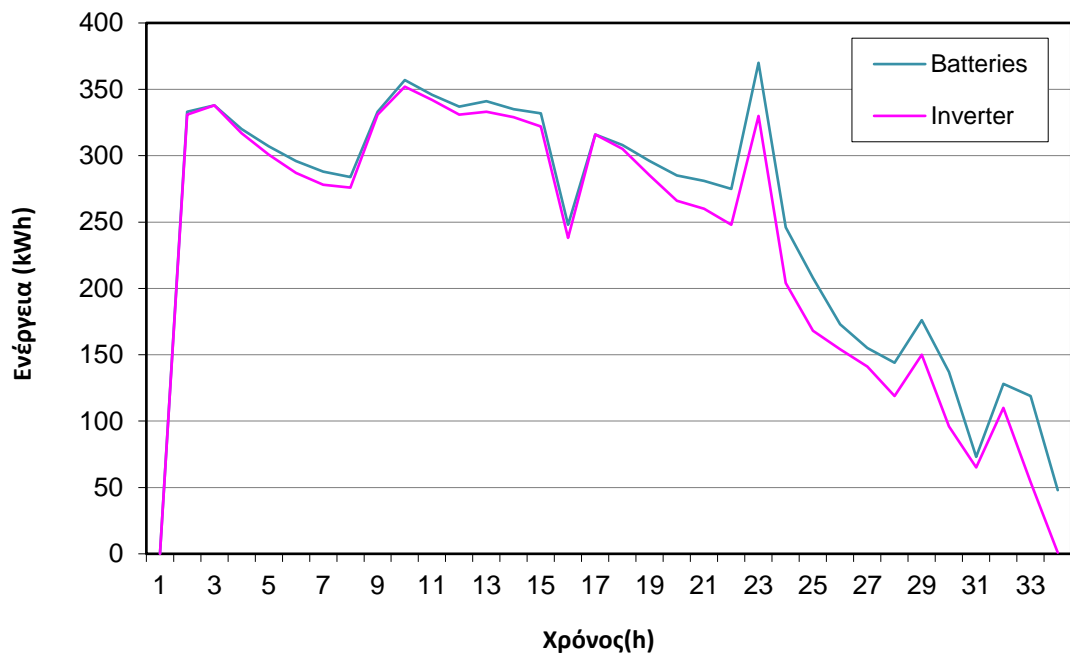
Σχήμα 3. Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας-Παραγωγή υδρογόνου και βαθμοί απόδοσης

Παρακάτω παρατίθεται σχηματικά ο βαθμός απόδοσης του inverter σε σχέση με την ενέργεια που μετατρέπεται καταδεικνύοντας ότι λειτουργεί αποδοτικότερα για μεγαλύτερα φορτία ενέργειας και ισχύος που είναι και το αναμενόμενο.



Σχήμα 4. Βαθμός απόδοσης inverter

Στο σύνολο της διάρκειας του πειράματος οι μπαταρίες ακολουθούν πιστά τις μεταβολές στην ζήτηση ενέργειας όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα ενώ παρατηρείται επίσης κατά το διάστημα των τελευταίων δεκαπέντε ωρών, απώλεια ενέργειας στον inverter μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί στο προηγούμενο διάστημα. Αυτό οφείλεται - σε συνδυασμό και με το σχήμα 4 - στο γεγονός ότι στο τελευταίο διάστημα αντιστοιχούν μικρότερα ποσά ενέργειας/ισχύος για τα οποία ο βαθμός απόδοσης του inverter είναι μειωμένος.

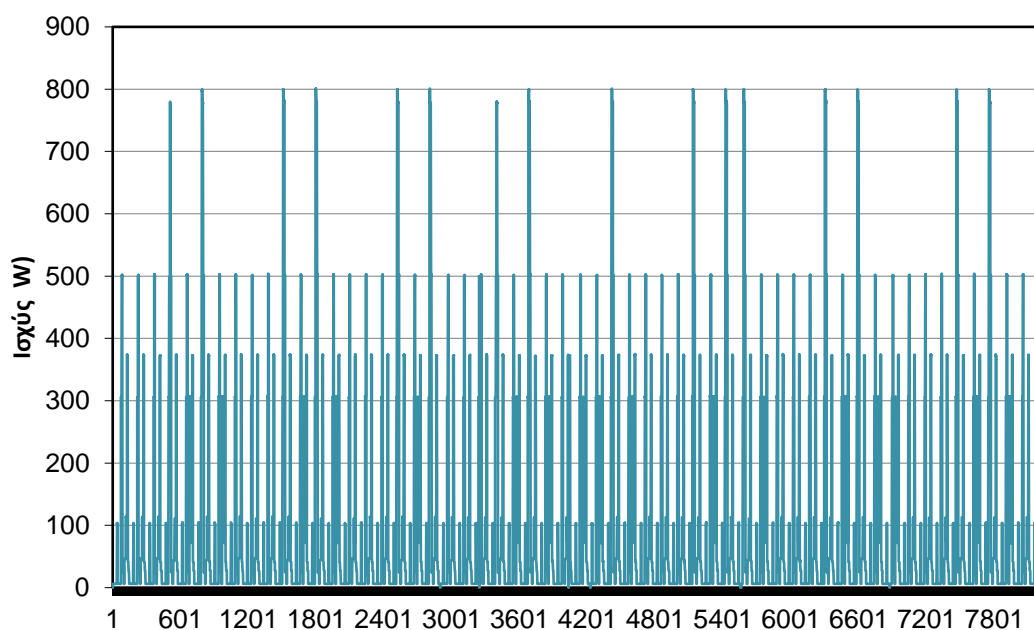


Σχήμα 5. Κατανάλωση μπαταριών έναντι inverter

Δεύτερο στάδιο – Σύνδεση δεξαμενών με την κυψέλη καυσίμου και λειτουργία αυτής

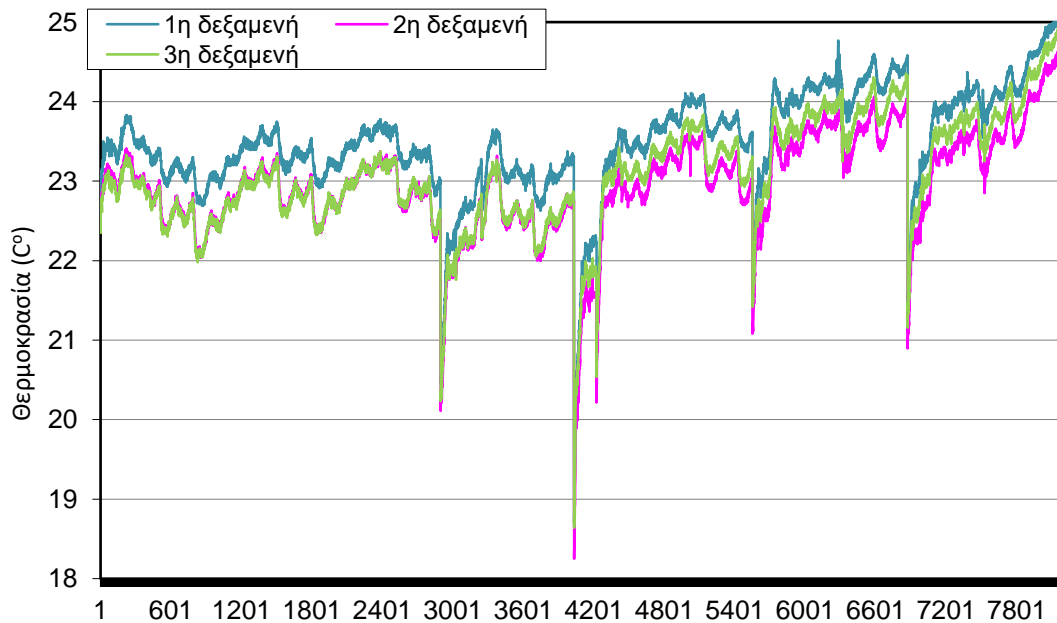
Το δεύτερο στάδιο του πειράματος πραγματοποιήθηκε μέσα σε έξι μέρες, σε συνθήκες περιβάλλοντος και διήρκησε συνολικά είκοσι δυόμιση ώρες. Η ενέργεια που καταναλώθηκε στο φορτίο είναι 2,25 MWh.

Το προφίλ φορτίου το οποίο αποτελεί προκαθορισμένη παράμετρο αποτυπώνεται σχηματικά παρακάτω με τον κύριο όγκο της ζήτησης να περιορίζεται στα 500W ενώ υπάρχουν και κάποιες αιχμές ζήτησης στα 800W.



Σχήμα 6. Προφίλ Φορτίου

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες των δεξαμενών κατά την διάρκεια του πειράματος. Οι μεγάλες βυθίσεις που διακρίνονται, πιστοποιούν την εναλλαγή των ημερών διεξαγωγής.

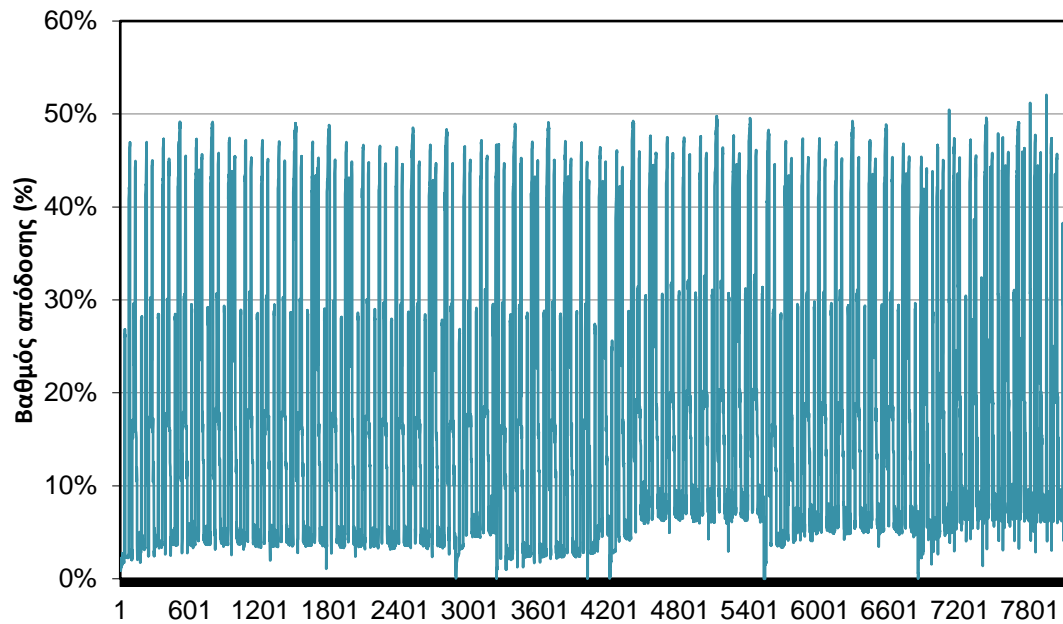


Σχήμα 7. Θερμοκρασίες δεξαμενών αποθήκευσης υδρογόνου

Ο βαθμός απόδοσης της συσκευής θεωρήθηκε ο εξής:

$$\text{βαθμός απόδοσης συσκευής κυψελών καυσίμου} = \frac{\text{Ισχύς στο φορτίο}}{\text{Ισχύς παρεχόμενου υδρογόνου}}$$

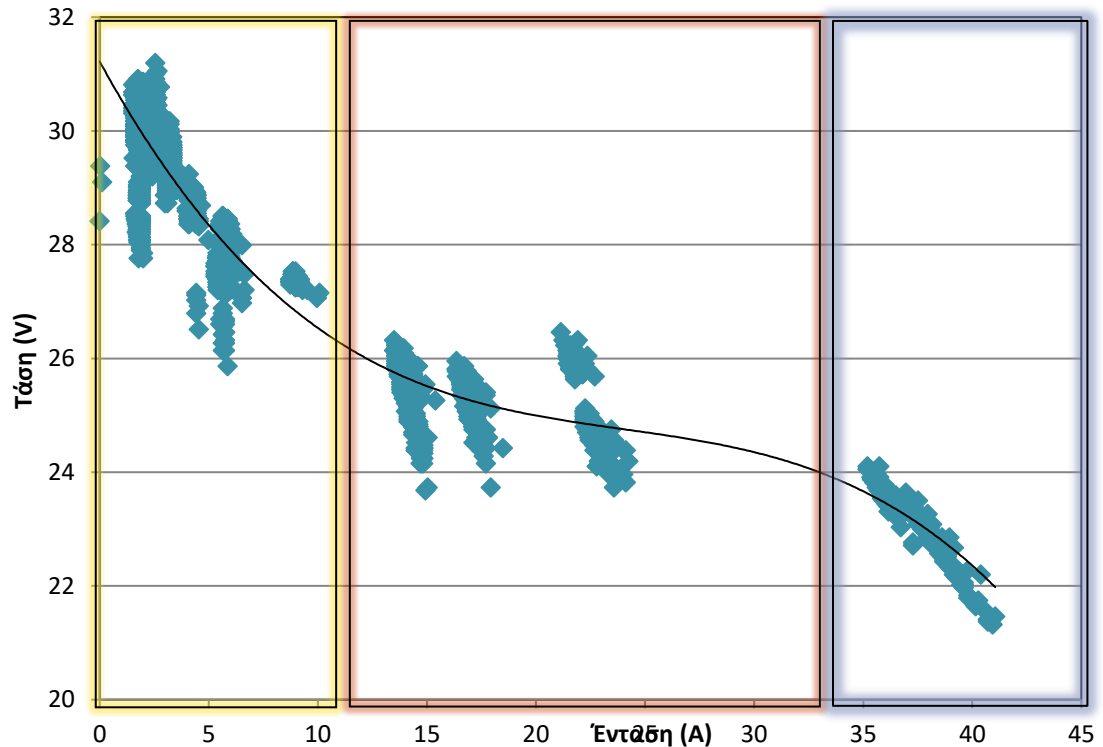
Όπου ως ισχύς παρεχόμενου υδρογόνου υπολογίζεται το γινόμενο της ροής υδρογόνου με την κατώτερη θερμογόνο δύναμη.



Σχήμα 8. Βαθμός απόδοσης συσκευής κυψελών καυσίμου

Όπως φαίνεται και παραπάνω ο βαθμός απόδοσης φτάνει έως και 52% το οποίο βρίσκεται στο εύρος την ονομαστικής λειτουργίας αυτού του τύπου και ισχύος συσκευών όπως αναφέρεται και στην βιβλιογραφία (16).

Ένα πολύ χαρακτηριστικό στοιχείο των κυψελών καυσίμου είναι η καμπύλη πόλωσης και αποτυπώνει την συσχέτιση μεταξύ τάσης και έντασης της συστοιχίας των κυψελών. Από τα δεδομένα λοιπόν προέκυψε η παρακάτω καμπύλη η οποία ταυτίζεται σχηματικά με μια τυπική καμπύλη πόλωσης.

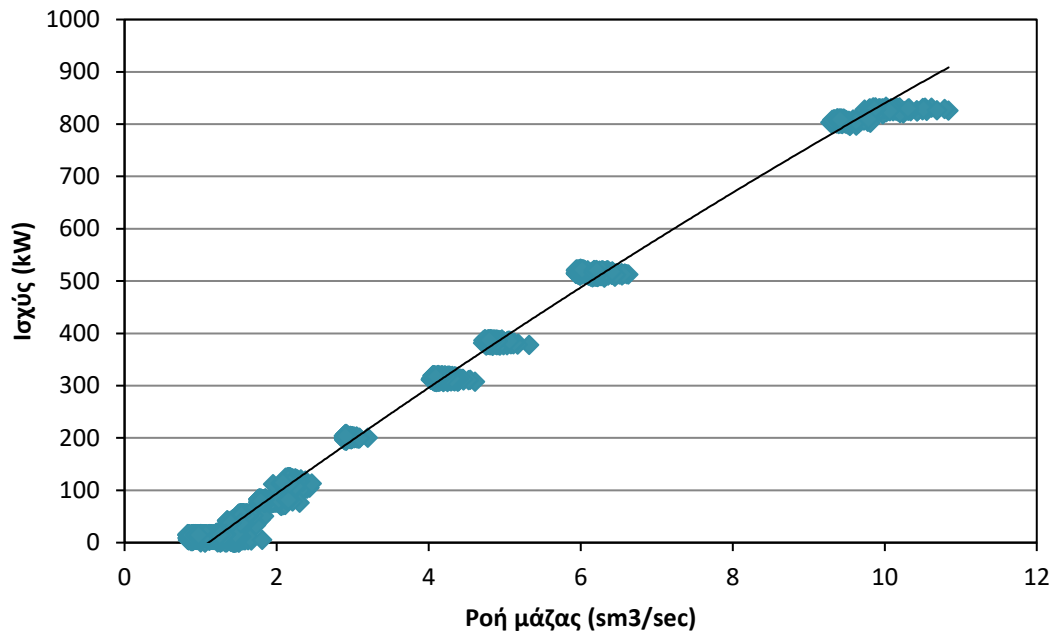


Σχήμα 9. Καμπύλη πόλωσης

Η καμπύλη χωρίζεται σε τρεις διακριτές περιοχές. Στην πρώτη περιοχή η απότομη πτώση τάσης οφείλεται σε απώλειες ενεργοποίησης της ηλεκτροχημικής αντίδρασης στην καταλυτική επιφάνεια οπότε θεωρείται και ένα μέτρο απόδοσης του καταλύτη. Στην δεύτερη περιοχή η πτώση τάσης ομαλοποιείται μεν αλλά συνεχίζει να υφίσταται λόγω ωμικών απωλειών στα διάφορα μέρη των κυψελών. Η τρίτη περιοχή χαρακτηρίζεται από μια επίσης απότομη πτώση τάσης η οποία οφείλεται σε μειωμένα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και ουσιαστικά αφορά την αναλογία στην συγκέντρωση μεταξύ αντιδρώντων και προϊόντων. Πιο συγκεκριμένα, η διάχυση τόσο στην αέρια φάση όσο και στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου δεν επαρκεί για να παρασχεθούν αρκετά ηλεκτρο-ενεργά είδη στην τριεπιφάνεια αέριας φάσης/ηλεκτροδίου/ηλεκτρολύτη.

Ιδιαίτερης σημασίας είναι η συμπεριφορά της συστοιχίας των κυψελών καυσίμου καθώς αποτελεί τον “πυρήνα” της συσκευής.

Παρακάτω φαίνεται η συσχέτιση της ισχύος που αποδίδει η συστοιχία σε σχέση με την ροή του υδρογόνου που εισέρχεται σε αυτή.

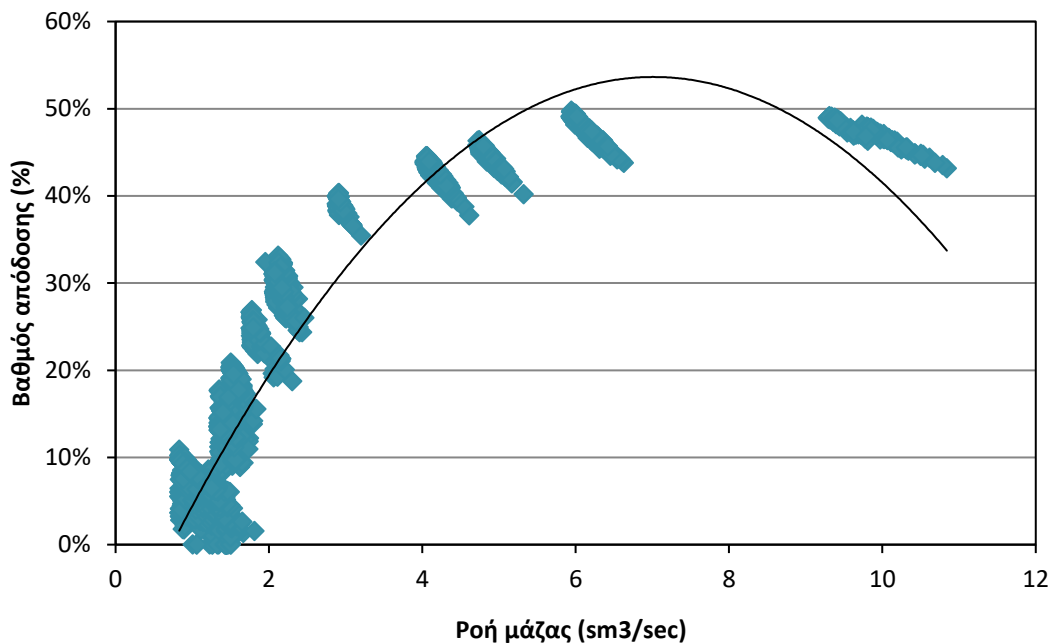


Σχήμα 10. Κατανομή ισχύος συναρτήσει παροχής

Όπως φαίνεται η συσχέτιση είναι γραμμική το οποίο μεταφράζεται σε ομοιόμορφη κατανομή ισχύος σε σχέση με την παροχή υδρογόνου.

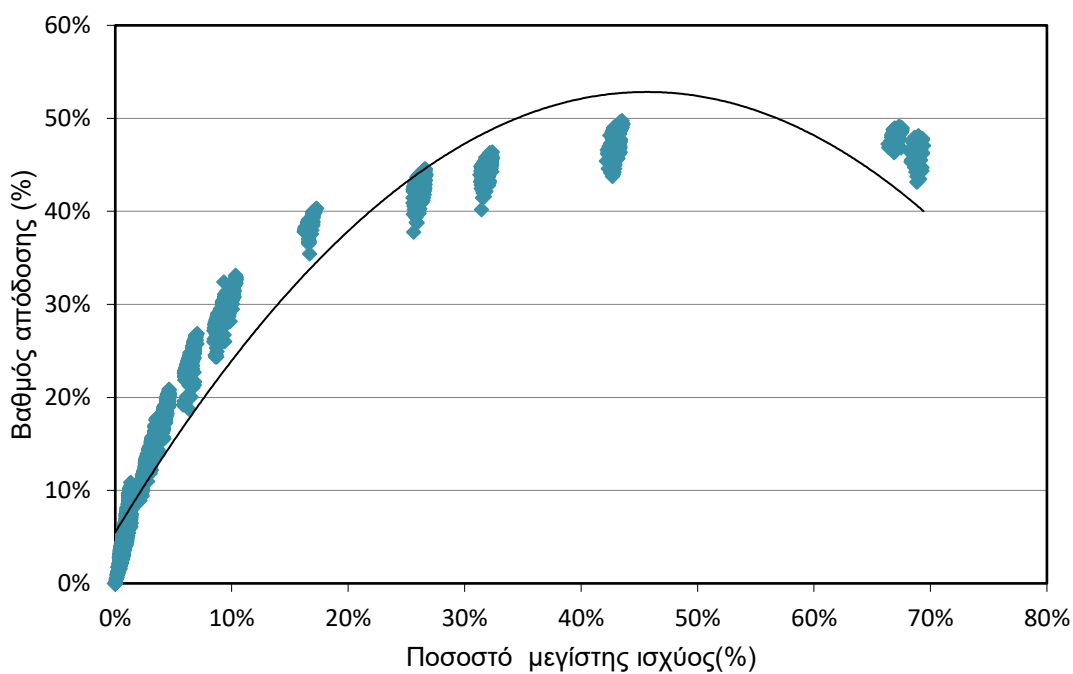
Ορίζεται βαθμός απόδοσης της μετατροπής της ενέργειας του παρεχόμενου υδρογόνου σε ηλεκτρική, από την συστοιχία των κυψελών καυσίμου, ως:

$$\text{βαθμός απόδοσης συστοιχίας} = \frac{\text{Ισχύς στην έξοδο της συστοιχίας}}{\text{Ισχύς παρεχόμενου υδρογόνου}}$$



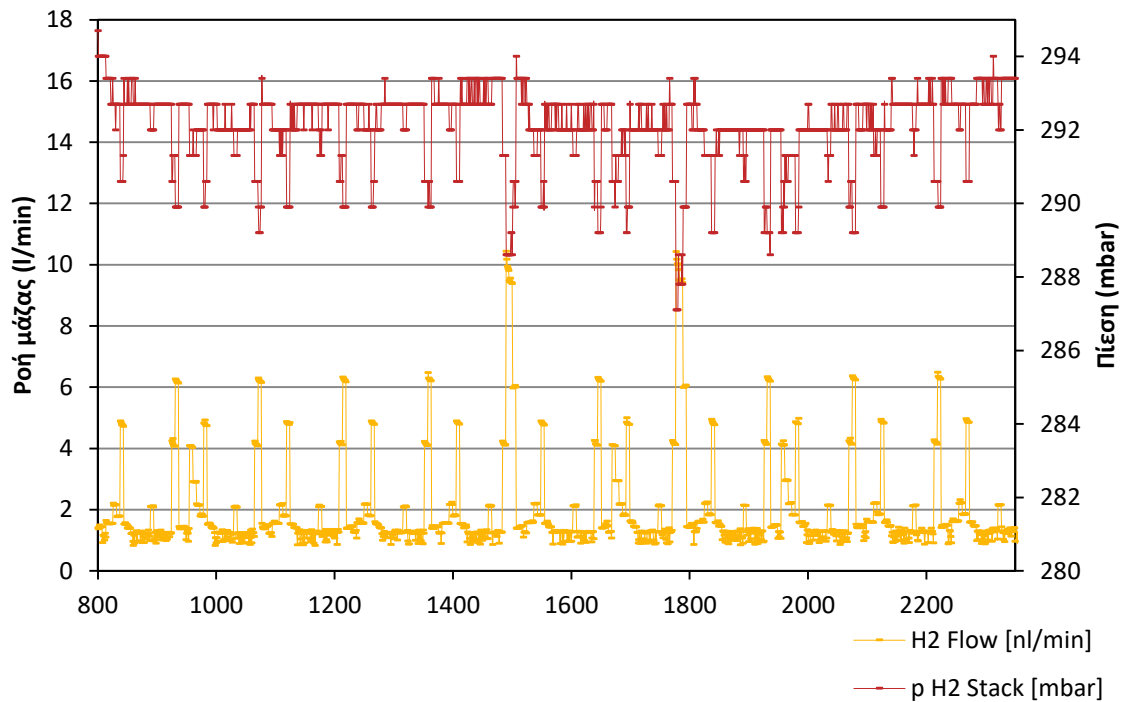
Σχήμα 11. Βαθμός Απόδοσης συναρτήσει παροχής

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα ο βαθμός απόδοσης της συστοιχίας αυξάνεται για μεγαλύτερη παροχή υδρογόνου, ενώ η κλίση της καμπύλης -δηλαδή ο ρυθμός αύξησής του, μειώνεται όσο προσεγγίζει το μέγιστο της ικανότητας του.



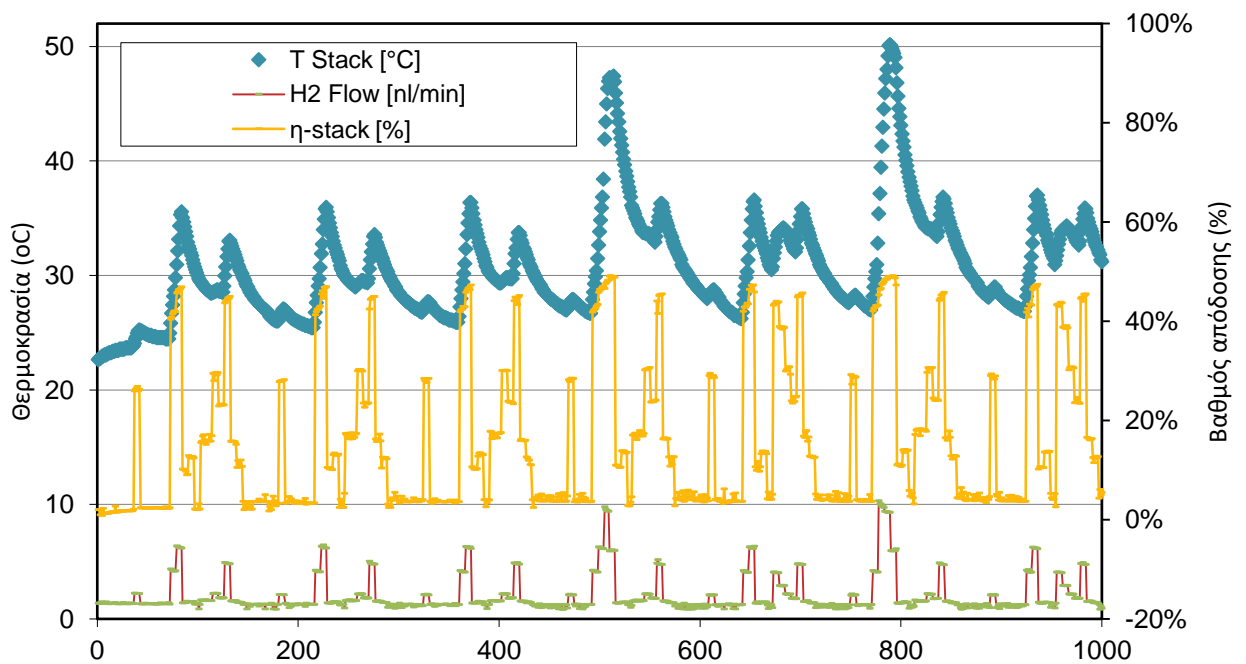
Σχήμα 12. Βαθμός Απόδοσης συναρτήσει ισχύος

Ανάλογη συμπεριφορά του βαθμού απόδοσης της συστοιχίας εντοπίζεται και σε σχέση με το ποσοστό ισχύος, το οποίο είναι και το αναμενόμενο λόγω της γραμμικής συσχέτισης της ισχύος με την παροχή υδρογόνου όπως φαίνεται στο σχήμα 10.



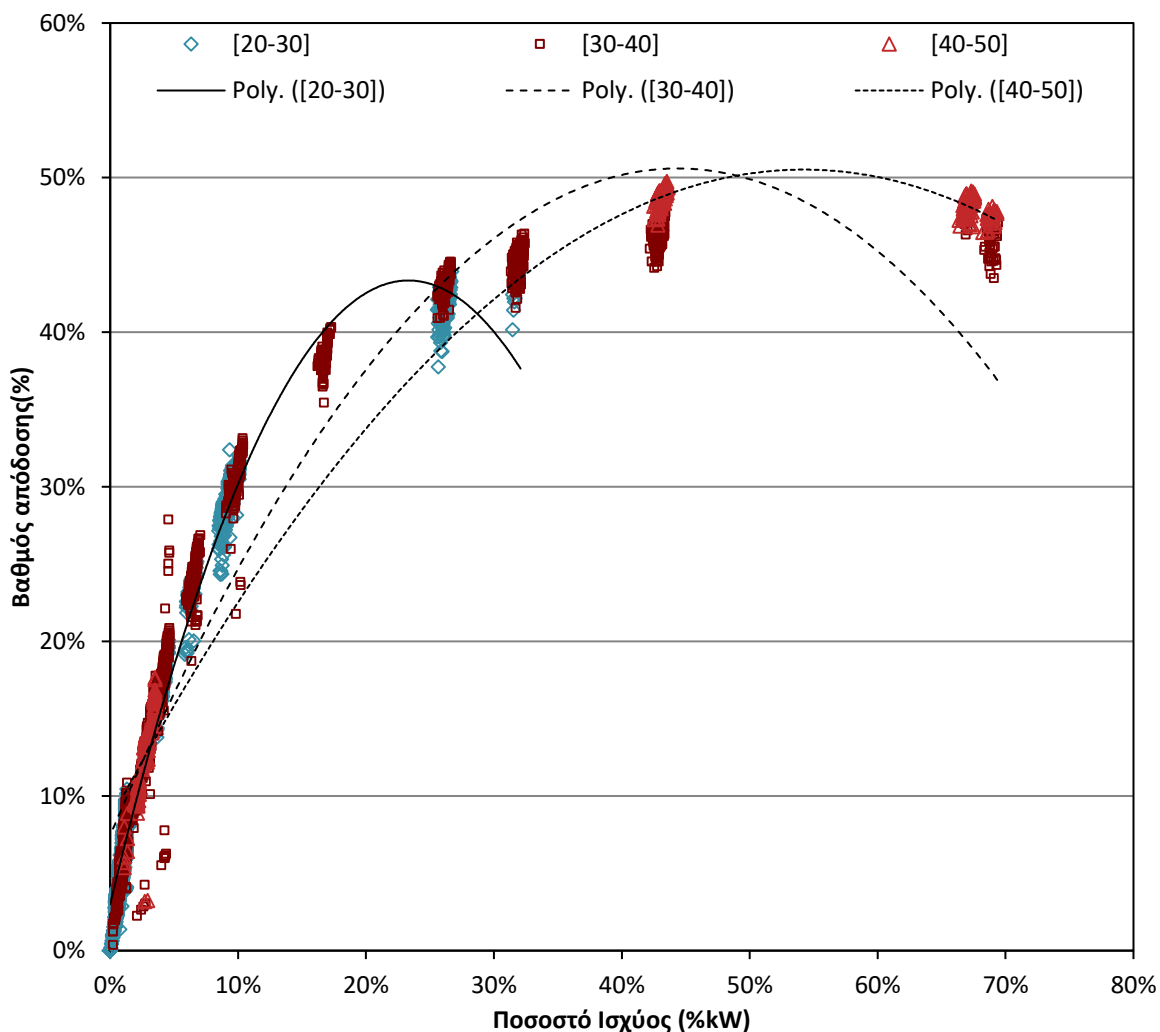
Σχήμα 13. Ροή υδρογόνου-Πίεση συστοιχίας κυψελών καυσίμου

Το παραπάνω σχήμα αναπαριστά για ένα δεδομένο διάστημα την ροή του υδρογόνου και την πίεση της συστοιχίας των κυψελών καυσίμου. Το προφίλ της πίεσης φαίνεται να ακολουθεί την αντίθετη πορεία της ροής του υδρογόνου με τις εξάρσεις ροής να αντιστοιχούν ξεκάθαρα σε βυθίσεις πίεσης.



Σχήμα 14. Θερμοκρασία- Ροή υδρογόνου και βαθμός απόδοσης

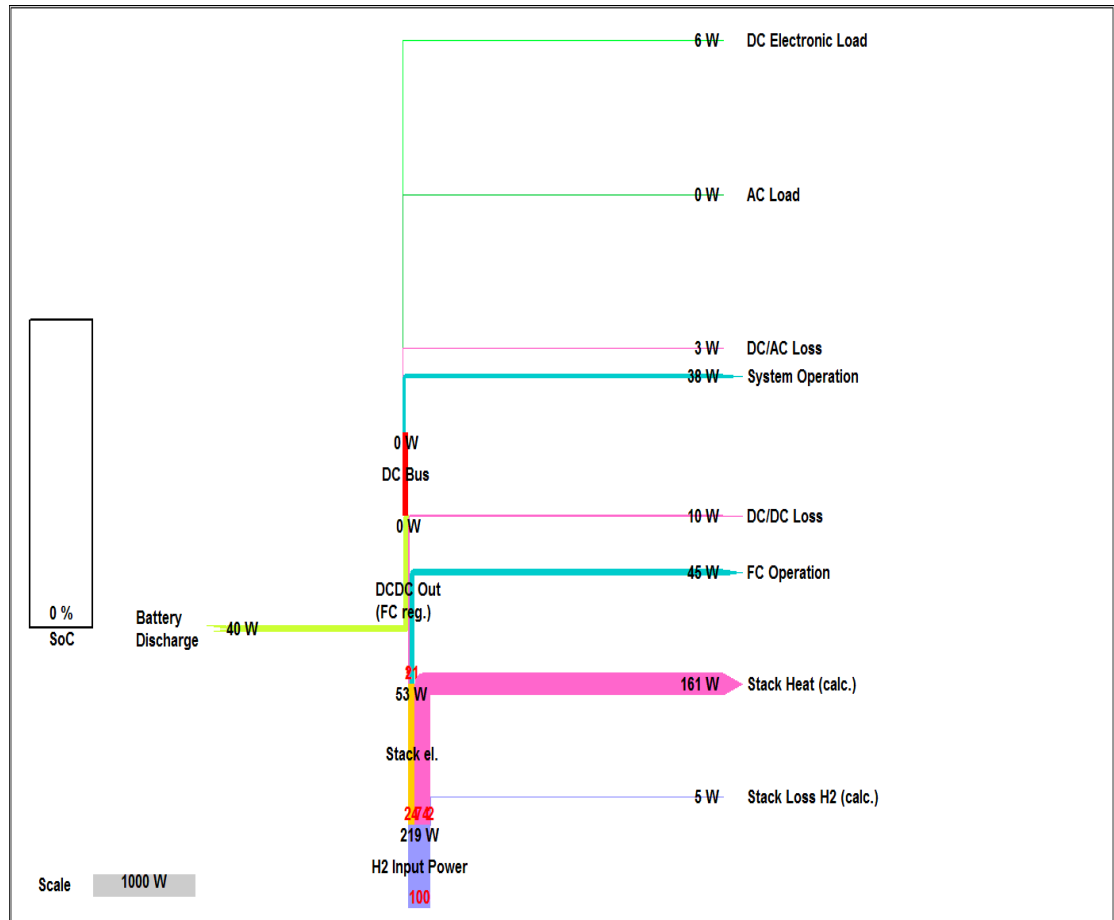
Η θερμοκρασία της συστοιχίας των κυψελών καυσίμου είναι άλλη μια παράμετρος που εξετάστηκε σε σχέση με τον βαθμό απόδοσης και όπως φαίνεται το προφίλ της ακολουθεί εκείνο της απόδοσης με την μόνη διαφορά να εντοπίζεται σε δυο εξάρσεις της θερμοκρασίας σε άνω των 40°C τιμές όπου ο βαθμός απόδοσης φτάνει στην μέγιστη τιμή του χωρίς να αυξάνεται κατά αναλογία της θερμοκρασιακής μεταβολής. Ο βαθμός απόδοσης γενικά αυξάνεται για μεγαλύτερες θερμοκρασίες καθώς οι ρυθμοί αντίδρασης και μεταφοράς μάζας επιταχύνονται ενώ παράλληλα η ιοντική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη αυξάνεται μειώνοντας τις ωμικές απώλειες. Επίσης στο διάγραμμα αναπαριστάται και η ροή υδρογόνου το προφίλ της οποίας ακολουθεί το αντίστοιχο της θερμοκρασίας.



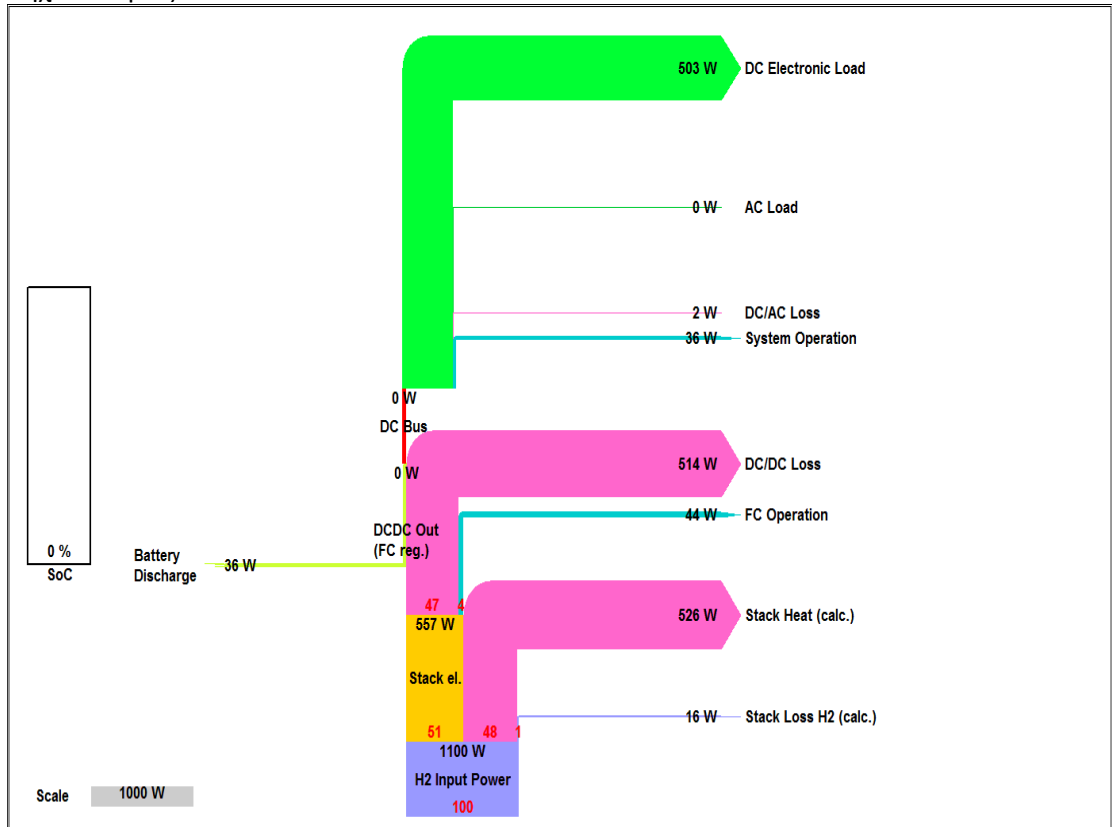
Σχήμα 15. Καμπύλες βαθμού απόδοσης συστοιχίας κυψελών καυσίμου

Στο παραπάνω σχήμα αναπαριστάται η διαφοροποίηση της καμπύλης του βαθμού απόδοσης της συστοιχίας των κυψελών καυσίμου σε συνάρτηση με την ισχύ για διαφορετικά διαστήματα θερμοκρασίας. Όπως φαίνεται στο διάστημα των 20-30 °C για τιμές φορτίου που φτάνουν έως και το 25% του μέγιστου, ο βαθμός απόδοσης είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο στα διαστήματα των 30-40 °C και 40-50 °C. Στο διάστημα των 30-40 °C και για τιμές φορτίου ενδιάμεσα του 25-50% του μέγιστου, ο βαθμός απόδοσης είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο στα διαστήματα 20-30 °C και 40-50 °C. Στο διάστημα 40-50 °C και για τιμές ενδιάμεσα του 50-70% του μέγιστου φορτίου, ο βαθμός απόδοσης είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο στα διαστήματα 20-30 °C και 30-40 °C.

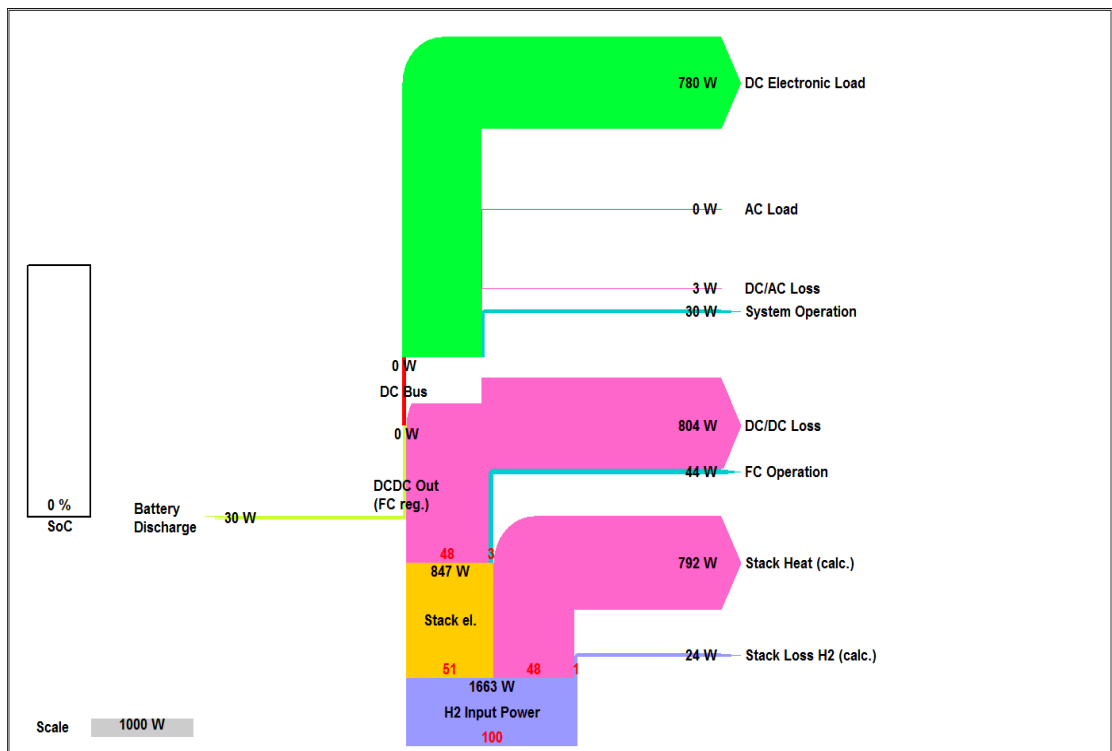
Τα παρακάτω σχήματα έχουν παρθεί από το λογισμικό που υπάρχει στην συσκευή της κυψέλης καυσίμου και κάθε ένα από αυτά αναπαριστά την κατανομή της ισχύος από το στάδιο της εισαγωγής του υδρογόνου μέχρι την κατανάλωση στο φορτίο, για τρεις διαφορετικές τιμές ισχύος.



Σχήμα 16. Κατανομή ισχύος-6W φορτίου



Σχήμα 17. Κατανομή ισχύος-503W στο φορτίο



Σχήμα 18. Κατανομή ισχύος-780W στο φορτίο

Τα κύρια δεδομένα των παραπάνω σχημάτων παρουσιάζονται παρακάτω και με μορφή πίνακα

Πίνακας 2. Πινακοποίηση κατανομής ισχύος βάση λογισμικού

	Χαμηλό φορτίο	Μεσαίο φορτίο	Υψηλό φορτίο
Τύπος Ισχύος (kW)	Ποσοστό ισχύος %	Ποσοστό ισχύος %	Ποσοστό ισχύος %
Υδρογόνου	100	100	100
Απώλειες διαρροής	2	1	1
Θερμική	74	48	48
Ηλεκτρική	24	51	51
Τύπος Ισχύος (kW)	Ποσοστό ισχύος %	Ποσοστό ισχύος %	Ποσοστό ισχύος %
Ηλεκτρική	100	100	100
Λειτουργία κυψελών	87,5	8	6
Φορτίο	12,5	92	94

Αυτό που προκύπτει από τον πίνακα και έχει ενδιαφέρον να σημειωθεί είναι ότι ένα αξιόλογο ποσό της ισχύος του παρεχόμενου υδρογόνου μετατρέπεται σε θερμική ισχύ. Η θερμική ισχύς που παράγεται λοιπόν δύναται να αξιοποιηθεί με ανάκτηση αυτής μέσω συστήματος εναλλάκτη θερμότητας. Πιο συγκεκριμένα στην διάρκεια του πειράματος εκλύθηκαν από την συσκευή περίπου 4,49 MWh θερμικής ενέργειας σε σχέση με τα 2,25 MWh ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώθηκαν στο φορτίο.

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης του κύκλου με αφετηρία την ενέργεια που καταναλώθηκε από τις μπαταρίες και τέλος την ενέργεια που αποδόθηκε στο φορτίο είναι 26%.

6. Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση

6.1 Πρόταση 1η

Ο κύκλος αποθήκευσης και παραγωγής ενέργειας θα μπορούσε να παραμετροποιηθεί με βάση την ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και αποδίδεται κατευθείαν στην συσκευή ηλεκτρόλυσης, προκειμένου να μελετηθεί ένα σενάριο που αποτελεί μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση ενός ολοκληρωμένου συστήματος, δεδομένου ότι σε ένα τέτοιο σύστημα δεν θα παρεμβάλλεται αποθήκευση σε μπαταρίες από την στιγμή που το μέσο αποθήκευσης αποτελούν οι δεξαμενές υδρογόνου.

6.2 Πρόταση 2η

Ο κύκλος αποθήκευσης και παραγωγής ενέργειας θα μπορούσε να παραμετροποιηθεί με βάση την θερμοκρασία των δεξαμενών κατά την αποθήκευση και την αποδέσμευση του υδρογόνου από αυτές καθώς η θερμοκρασία παίζει καταλυτικό ρόλο στην ικανότητα των δυο παραπάνω διεργασιών. Πιο συγκεκριμένα η μείωση της θερμοκρασίας των δεξαμενών επιταχύνει την αποθήκευση υδρογόνου σε αυτές ενώ αντίστοιχα η αύξηση της θερμοκρασίας επιταχύνει την αποδέσμευση του (17).

6.3 Πρόταση 3η

Κατά την αποθήκευση του υδρογόνου απελευθερώνεται ενέργεια από τις δεξαμενές προς το περιβάλλον (εξώθερμη αντίδραση) με την μορφή θερμότητας. Επίσης κατά την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης το σύστημα απαιτεί ένα ποσό θερμότητας προκειμένου να προβεί στην διεργασία, το οποίο καλύπτεται από ηλεκτρικά φορτία. Επομένως θα μπορούσε να εξεταστεί το σενάριο κατά το οποίο το ποσό αυτό, μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας να διοχετευτεί στην συσκευή ηλεκτρόλυσης προκειμένου να υποβοηθήσει την διεργασία και να εξοικονομήσει την ενέργεια που απαιτείται για την ηλεκτρόλυση.

6.4 Πρόταση 4η

Κατά την διεργασία που πραγματοποιείται στις συστοιχίες των κυψέλων καυσίμου- όπως προέκυψε και στην παραπάνω πειραματική διαδικασία- εκλύεται ενέργεια με την μορφή θερμότητας. Επομένως θα μπορούσε να εξεταστεί το σενάριο κατά το οποίο η θερμότητα αυτή θα μπορούσε να αξιοποιηθεί μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας για διάφορους σκοπούς, αναλόγως την εκάστοτε εφαρμογή. Για παράδειγμα, σε μια οικιακή εφαρμογή θα μπορούσε να αποτελεί ένα σύστημα θέρμανσης νερού για οικιακή χρήση.

Βιβλιογραφία

1. **Βουτετάκης Σπυρίδων, etc.** *Υπάρχουσες τεχνολογίες και τελικές χρήσεις του "καυσίμου του μέλλοντος" - H2*. Θεσσαλονίκη : TEE TKM, 2010.
2. **Μαρνέλλος, Γεώργιος.** *Ειδικά Κεφάλαια Παραγωγής Ενέργειας - Ενότητα 5(α): Παραγωγή Υδρογόνου*. s.l. : Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας.
3. energy.gov. [Ηλεκτρονικό] Office of ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY. [Παραπομπή: 16 Μάρτιος 2018.] <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells>.
4. **Ray, Russell.** power-eng. [Ηλεκτρονικό] 15 02 2016. [Παραπομπή: 10 3 2018.] <http://www.power-eng.com/articles/blogs/power-points/2016/02/fuel-cells-to-play-important-role-in-power-generation.html>.
5. **DANBURY, Conn.** fuelcellworks. [Ηλεκτρονικό] 14 Μάρτιος 2012. [Παραπομπή: 12 Μάρτιος 2018.] <https://fuelcellworks.com/archives/2012/03/14/fuelcell-energy-and-air-products-sign-memorandum-of-understanding-to-market-tri-generation-stationary-fuel-cell-power-plants/>.
6. FuelCellToday. *Stationary*. [Ηλεκτρονικό] <http://www.fuelcelltoday.com/applications/stationary>.
7. **Technical University of Denmark.** *Capabilities of fuel cell micro-CHPs in smart grid perspective*. 2015.
8. **Harikishan R. Ellamla, Iain Staffell, Piotr Bujlo, Bruno G. Pollet, Sivakumar Pasupathi.** Current status of fuel cell based combined heat and power systems for residential sector. *ELSEVIER*. 2015.
9. **Prag, Technical University of Denmark – Eva Ravn Nielsen and Carsten Brorson.** *Learning points from demonstration of 1000 fuel cell based micro-CHP units*. 2017.
10. **Yang Li, Di Wang, Saugata Ghose, Jie Liu, Sriram Govindan, Sean James, Eric Peterson, John Siegler, Rachata Ausavarungnirun, and Onur Mutlu.** *SizeCap: Efficiently Handling Power Surges in Fuel Cell Powered Data Centers*. s.l. : Carnegie Mellon University, Microsoft Corporation.
11. BloomEnergy. [Ηλεκτρονικό] <http://www.bloomenergy.com/fuel-cell/mission-critical-data-center/>.
12. [Ηλεκτρονικό] <https://www.citylab.com/transportation/2016/09/germany-hydrogen-passenger-train/501575/>.
13. European Commission. [Ηλεκτρονικό] Monday August 2016. <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/news/hydrogen-drives-europe-towards-emissions-free-transport>.
14. **Pollet, K Kendall and BG.** Hydrogen and Fuel Cells in Transport. *ELSEVIER*. 2012.
15. [Ηλεκτρονικό] <https://energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-hydrogen-production-electrolysis>.
16. [Ηλεκτρονικό] <https://energy.gov/eere/fuelcells/comparison-fuel-cell-technologies>.
17. **ΜΙΧΟΣ, ΦΩΤΙΟΣ Ι.** *ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΝΑΝΟΔΟΜΗΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΔΡΙΔΙΩΝ*. ΠΑΤΡΑ : s.n., 2015.

Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τμήμα Μηχανολογίας

Σπουδαστής:
Παπαπάνος Αλέξανδρος

18. European Commission. [Ηλεκτρονικό] Monday August 2016.

<https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/news/cleaner-urban-transport-hydrogen-buses>.