



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος
School of Chemical and Environmental Engineering



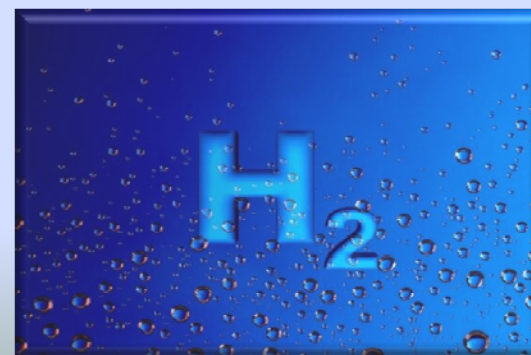
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ:
ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ»
«INTEGRATED HYDROGEN SYSTEMS:
COMPARATIVE EVALUATION AND EXPERIMENTAL PROTOTYPE»

Εκπόνηση: Καγιαμπάκης Ιωάννης - Α.Μ.Φ.: 2019050051
Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γεντεκάκης Ιωάννης

Τριμελής Επιτροπή:

1. Σταματάκης Εμμανουήλ
2. Παναγιωτοπούλου Παρασκευή
3. Γουρνής Δημήτριος



ΧΑΝΙΑ (Ιούνιος 2025)



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

➤ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- ❑ Σκοπός της Εργασίας

➤ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

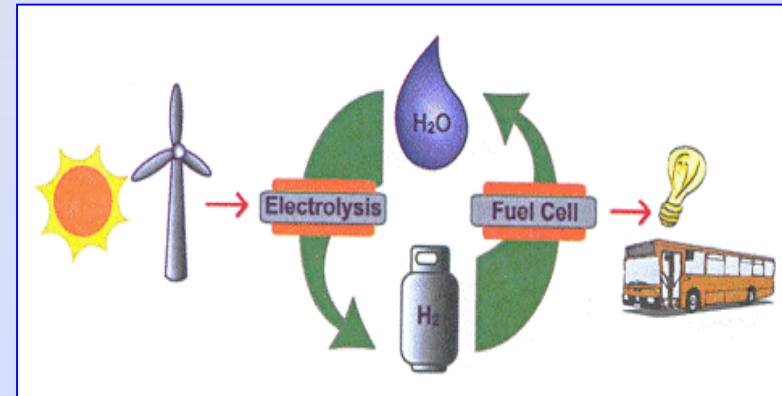
- ❑ Γενικά για το Υδρογόνο (H₂)
- ❑ Εφοδιαστική Αλυσίδα του H₂
 - Παραγωγή
 - Αποθήκευση
 - Κατανάλωση
- ❑ Ολοκληρωμένα Συστήματα H₂

➤ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

(Παραγωγής – Αποθήκευσης - Κατανάλωσης)

➤ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

➤ Συζήτηση - Συμπεράσματα & Μελλοντικές Εργασίες





Σκοπός Εργασίας

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

➤ Εφοδιαστική Αλυσίδα του H₂

- ❑ Βασικές Τεχνολογίες Παραγωγής
- ❑ Διαθέσιμοι μέθοδοι Αποθήκευσης
- ❑ Κύριες Κατηγορίες Κατανάλωσης
 - Μηχανές Εσωτερικής Καύσης
 - Κυψέλες Καυσίμου
 - Άμεση Καύση για θέρμανση
 - Βιομηχανική Χρήση

➤ Συγκριτική Αξιολόγηση των μεθόδων

- ❑ Παραγωγής του H₂
- ❑ Αποθήκευσης του H₂
- ❑ Κατανάλωσης του H₂

➤ Ανάπτυξη Πρότυπου Εργαστηριακού Συστήματος - Πειραματική Μελέτη

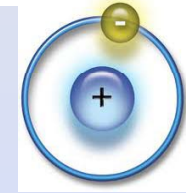
- ❑ Παραγωγή H₂ από Μονάδα Ηλεκτρόλυσης
- ❑ Αποθήκευση Παραγομένου H₂
- ❑ Κατανάλωση H₂ από Συστοιχία Κυψελών Καυσίμου
- ❑ Απορρόφηση της Παραγόμενης Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κυψέλης από Ηλεκτρικό Φορτίο

➤ Αποτελέσματα





Γενικά για το Υδρογόνο (H₂)



ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

- Αμέταλλο Χημικό Στοιχείο με Ατομικό Αριθμό 1
(σε θερμοκρασία 25°C & πίεση 1 atm, είναι ένα Άχρωμο και Άοσμο αέριο.
- **1kgr H₂ έχει ανώτερη θερμογόνο δύναμη 142MJ.** (Αέριο του Κρότου)
Ενώ για την ίδια ποσότητα η θερμογόνος δύναμη για:
 - 1Kgr βενζίνης είναι ~47MJ,**
 - 1Kgr Υγραέριο είναι ~49MJ και**
 - 1Kgr Φυσικό Αέριο είναι ~55MJ**
- Χημική Αντίδραση $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{Θερμότητα}$
Εξώθερμη αντίδραση. Η θερμότητα που εκλύεται είναι 285,83 kJ/mol.



Εφοδιαστική Αλυσίδα H₂

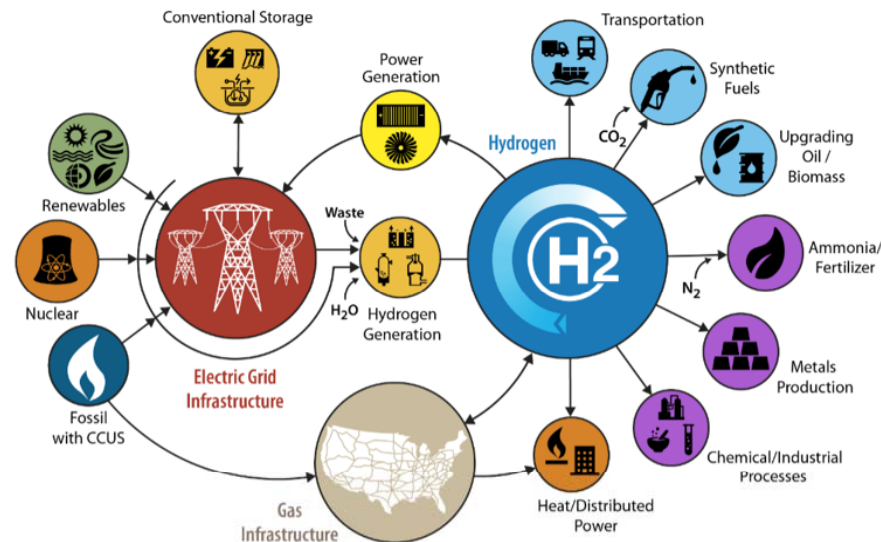
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. Παραγωγή

2. Αποθήκευση

3. Κατανάλωση

Conceptual H₂@scale (hydrogen at scale) energy system



Source: U.S. Department of Energy, *Hydrogen Program Plan*, Figure 3, November 2020
Note: CCUS is carbon capture, utilization, and storage.

Η εφοδιαστική αλυσίδα του υδρογόνου περιλαμβάνει μια πολυδιάστατη προσέγγιση, που ενσωματώνει προηγμένες τεχνολογίες Παραγωγής, Αποθήκευσης, Μεταφοράς και Χρήσης του Υδρογόνου, τις οποίες πρέπει να συντονίσουν διαφορετικοί τομείς.



Εφοδιαστική Αλυσίδα Η2



1Α. Βασικές Τεχνολογίες Παραγωγής

➤ Η2 από Ορυκτά Καύσιμα

❑ A1. Φυσικό Αέριο

- ΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕ ΑΤΜΟ
- ΜΕΡΙΚΗ ΟΞΕΙΔΩΣΗ
- ΑΥΤΟΘΕΡΜΗ ΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗ



❑ A2. Άνθρακα - Λιγνίτη

- ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ/ΛΙΓΝΙΤΗ
- ΠΥΡΟΛΥΣΗ



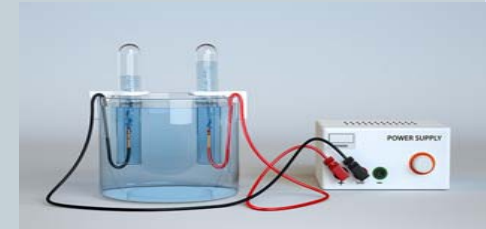


Εφοδιαστική Αλυσίδα H₂



1B. Βασικές Τεχνολογίες Παραγωγής

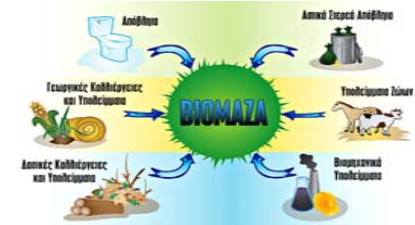
➤ H₂ από Διάσπαση του Νερού (H₂O)



- B1. Καθαρή Ηλεκτρόλυση του νερού
- B2. Αλκαλική Ηλεκτρόλυση του νερού
- B3. Ηλεκτρόλυση με Μεμβράνες Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEM)
- B4. Ηλεκτρόλυση σε υψηλές θερμοκρασίες
- B5. Φωτοηλεκτροκατάλυση
- B6. Θερμοχημικοί Κύκλοι Διάσπασης Νερού



Εφοδιαστική Αλυσίδα Η2

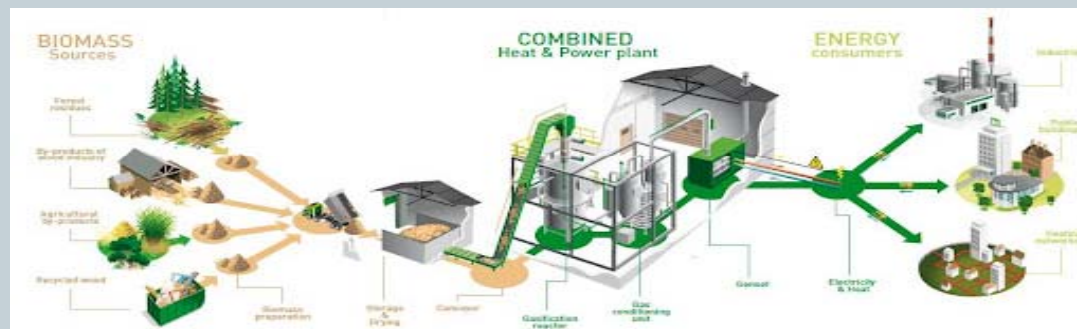


ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1Γ. Βασικές Τεχνολογίες Παραγωγής

➤ Η2 από Βιομάζα

- ❑ Γ1. Ζύμωση Βιομάζας
- ❑ Γ2. Αεροποίηση & Πυρόλυση βιομάζας





Εφοδιαστική Αλυσίδα H₂



ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2. Μέθοδοι Αποθήκευσης H₂

- Φυσική Αποθήκευση H₂
 - ❑ Συμπύεση Υδρογόνου
 - ❑ Υγροποιημένο Υδρογόνο

- Αποθήκευση H₂ με Χημειορόφηση
 - ❑ Υδρίδια Μετάλλων
 - ❑ Μη-μεταλλικά χημικά Υδρίδια

- Αποθήκευση H₂ με Φυσιορόφηση





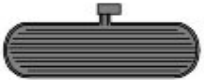

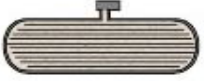



Εφοδιαστική Αλυσίδα H₂



ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2. Μέθοδοι Αποθήκευσης H₂

Storage Technique	Volume	Mass	Pressure	Temperature
Composite cylind.	 max. 33 kg H ₂ ·m ⁻³	13 mass%	800 bar	298 K
Liquid hydrogen		71 kg H ₂ ·m ⁻³	100 mass%	1 bar <i>established</i> 21 K
Metalhydrides		max. 150 kg H ₂ ·m ⁻³	2 mass%	1 bar 298 K
Physisorption		20 kg H ₂ ·m ⁻³	4 mass%	70 bar 65 K
Complex hydrides		150 kg H ₂ ·m ⁻³	18 mass%	1 bar 298 K
Alkalimetal + H ₂ O		>100 kg H ₂ ·m ⁻³	14 mass%	1 bar <i>reversibility ?</i> 298 K



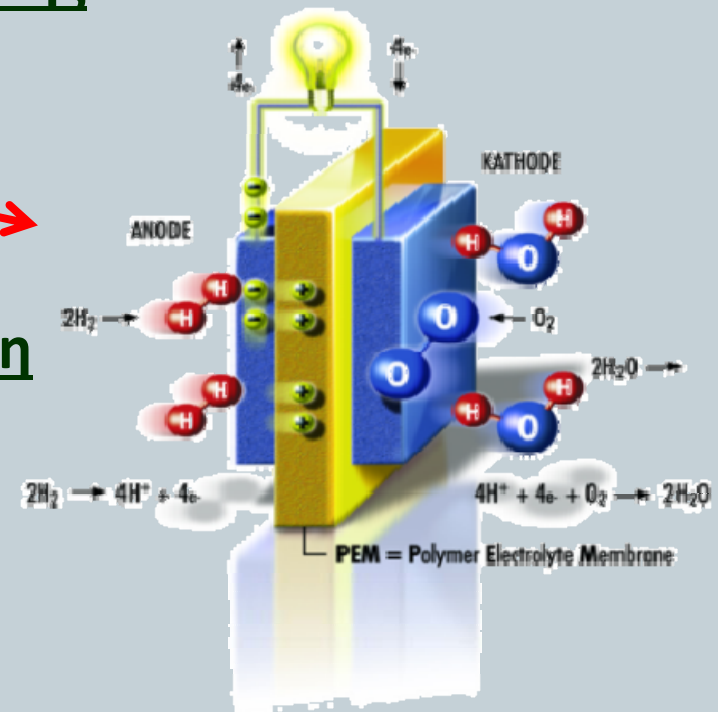
Εφοδιαστική Αλυσίδα H₂



ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3. Κατανάλωση H₂

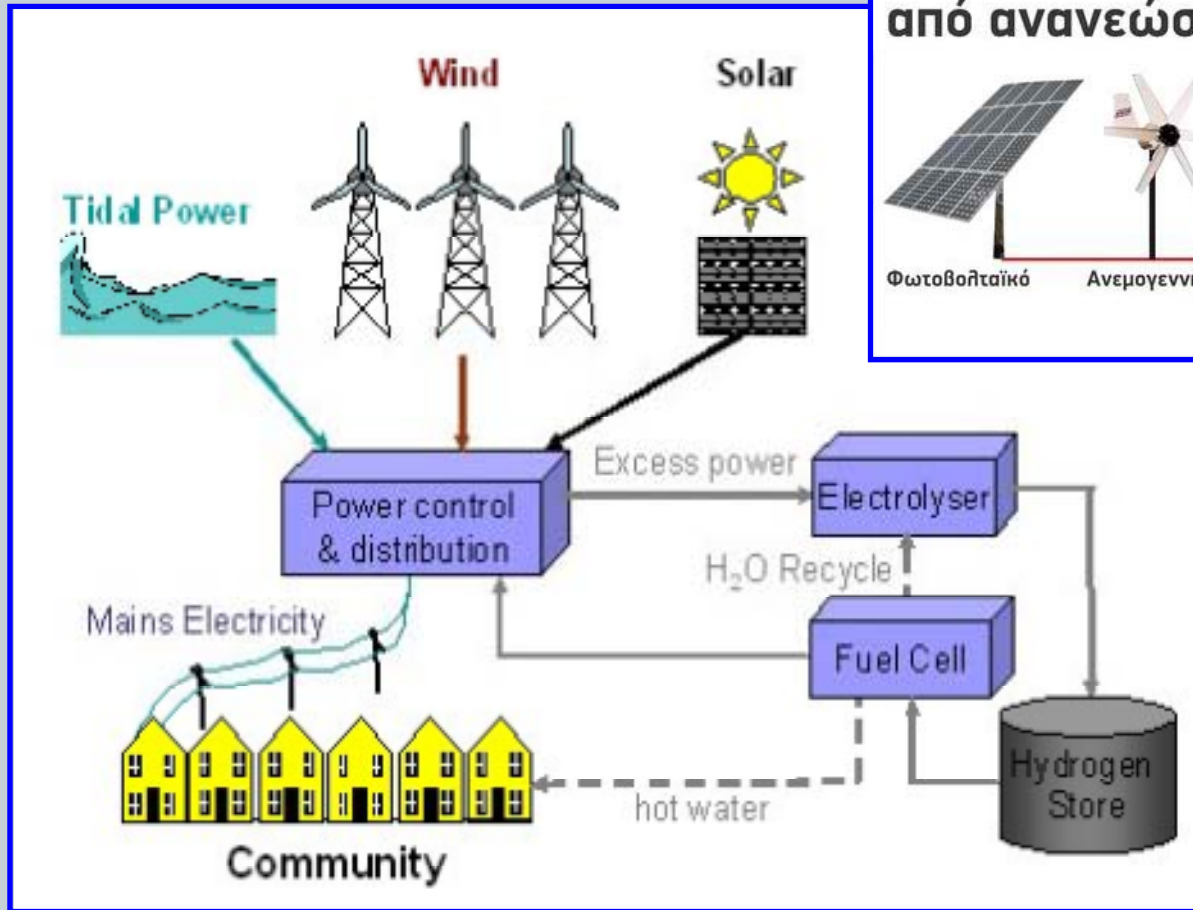
- Μηχανές Εσωτερικής Καύσης
- Κυψέλες Καυσίμου
- Άμεση Καύση για Θέρμανση
- Βιομηχανική Χρήση





Ολοκληρωμένα Συστήματα H₂

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ



Παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας



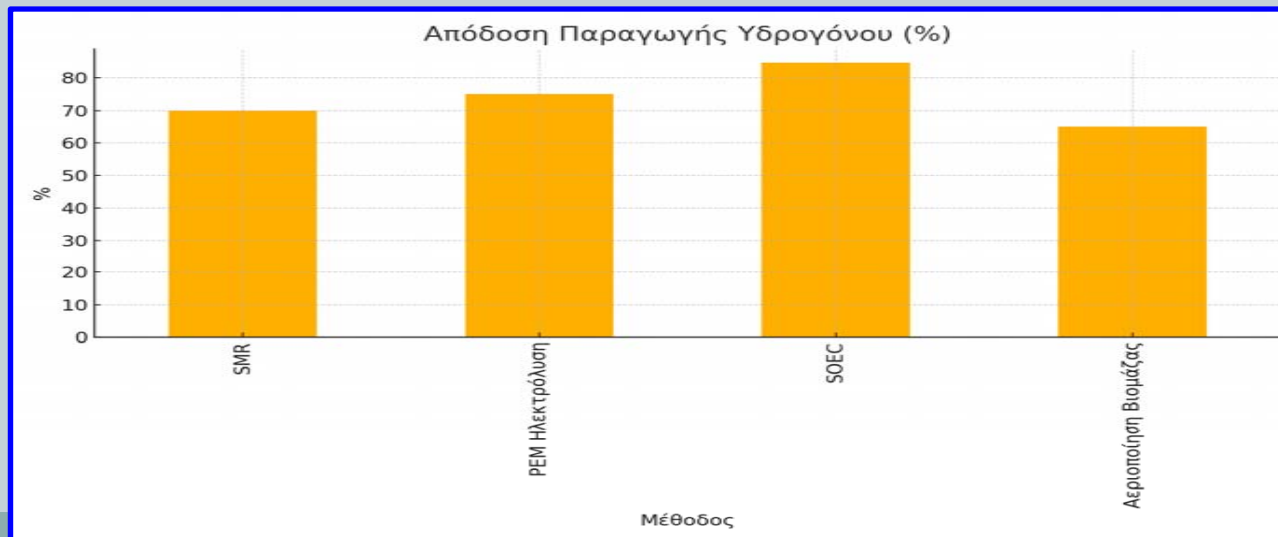


Παραγωγής H₂



ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Μέθοδος	Απόδοση (%)	CO ₂ Εκπομπές	Κόστος(€/kg H ₂)	Ωριμότητα
SMR	65–75	Υψηλές	1.5–2.5	Εμπορική
PEM Ηλεκτρόλυση	65–80	Καθαρές (ΑΠΕ)	3–6	Αναδυόμενη
SOEC	80–90	Καθαρές	~5–8	Πιλοτική
Βιομάζα	60–70	Μέτριες	2.5–4.5	Πειραματική
Φωτοκατάλυση	3–10	Καθαρές	>8	Ερευνητική



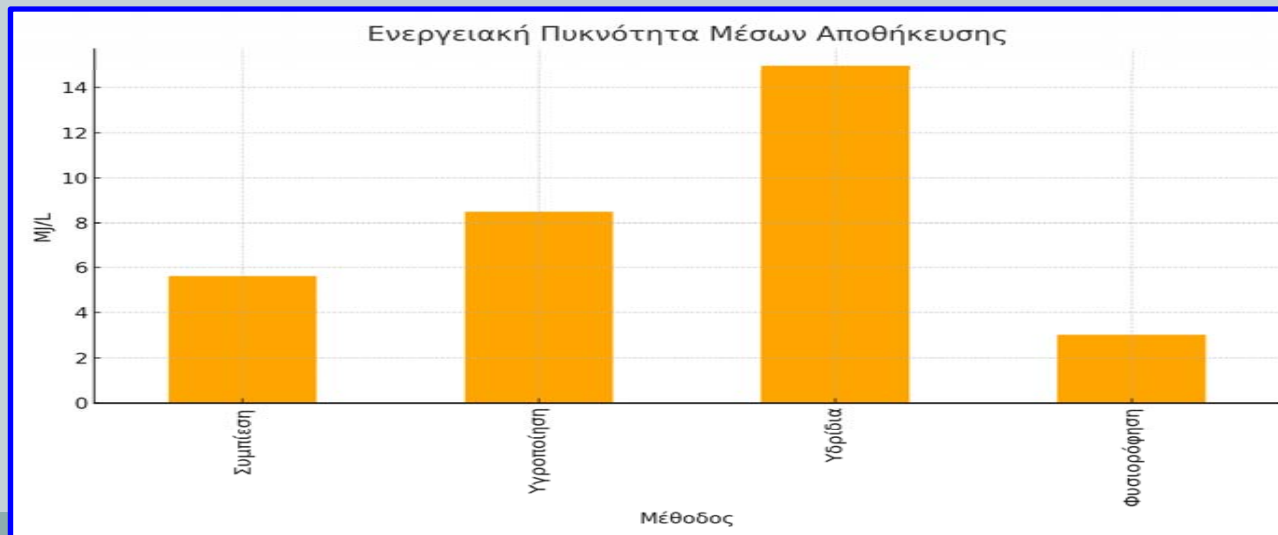


Αποθήκευση H₂



ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Μέθοδος	Πυκνότητα (MJ/L)	Απώλειες (%)	Κόστος (€ ανά kg H ₂)	Ωριμότητα
Συμπιεσμένο (CGH ₂)	4.5–6	10–15	Υψηλό	Εμπορική
Υγροποιημένο (LH ₂)	8.5	30–40	Υψηλό	Εμπορική
Υδρίδια	6–8	5–10	Πολύ Υψηλό	Πειραματική
Φυσιρόφηση (MOFs)	2–4	Χαμηλές	Πολύ Υψηλό	Ερευνητική
LOHCs	5–7	20–25	Μέσο	Αναδυόμενη



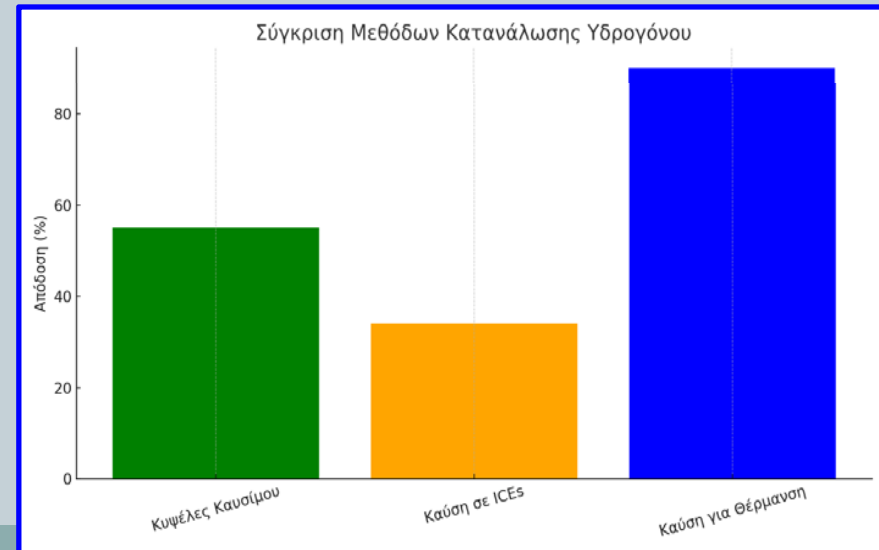
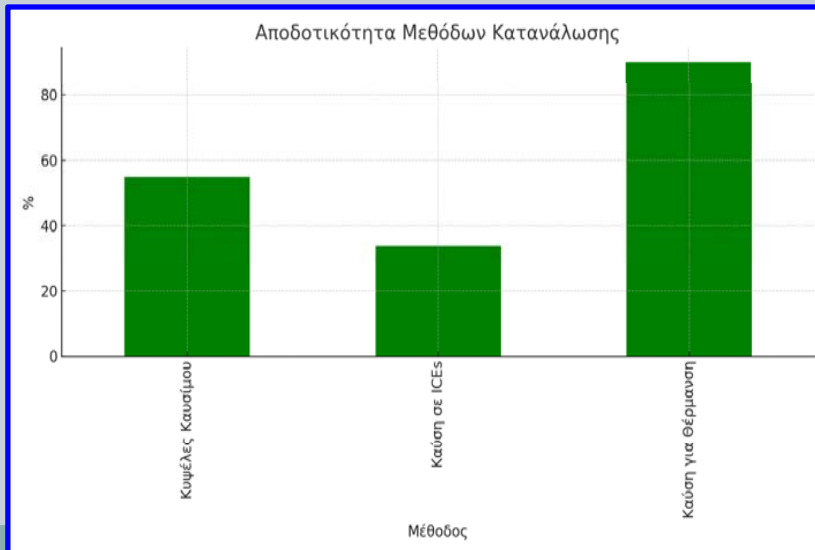


Κατανάλωσης H₂



ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Μέθοδος	Απόδοση (%)	Εκπομπές	Κόστος Υλοποίησης	Εφαρμογές
PEMFC	45–60	Καθαρές (H ₂ O)	Υψηλό	Κινητικότητα
SOFC	50–65 (έως 85 CHP)	Καθαρές	Πολύ Υψηλό	Στατικά Δίκτυα
H ₂ ICE	30–38	NO _x	Μέτριο	Οχήματα, Μηχανές
Άμεση Καύση	85+	NO _x	Μέτριο–Χαμηλό	Βιομηχανία, Θέρμανση
Μέθοδος	Απόδοση (%)	Εκπομπές	Κόστος Υλοποίησης	Εφαρμογές

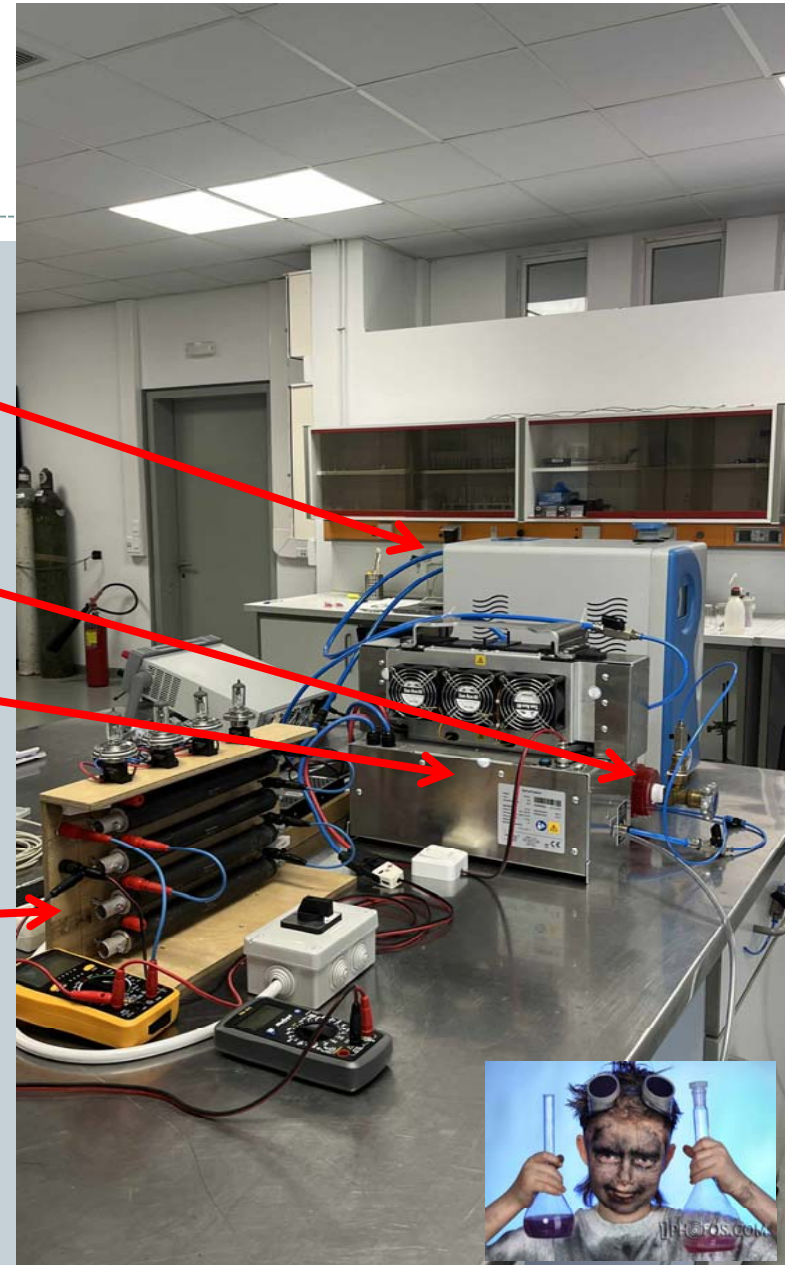
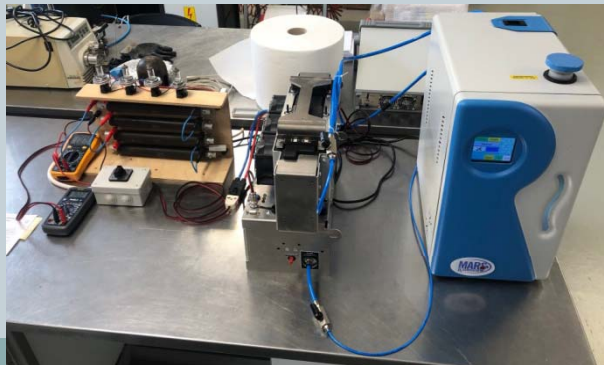




Ανάπτυξη Πρότυπου Εργαστηριακού Συστήματος

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

- ❑ Παραγωγή H₂
από Μονάδα Ηλεκτρόλυσης
- ❑ Αποθήκευση Παραγομένου H₂
σε φιάλη Μεταλουδριδίων
- ❑ Κατανάλωση H₂
από Συστοιχία Κυψελών Καυσίμου
- ❑ Απορρόφηση της Παραγόμενης
Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κυψέλης
από Ηλεκτρικό Φορτίο



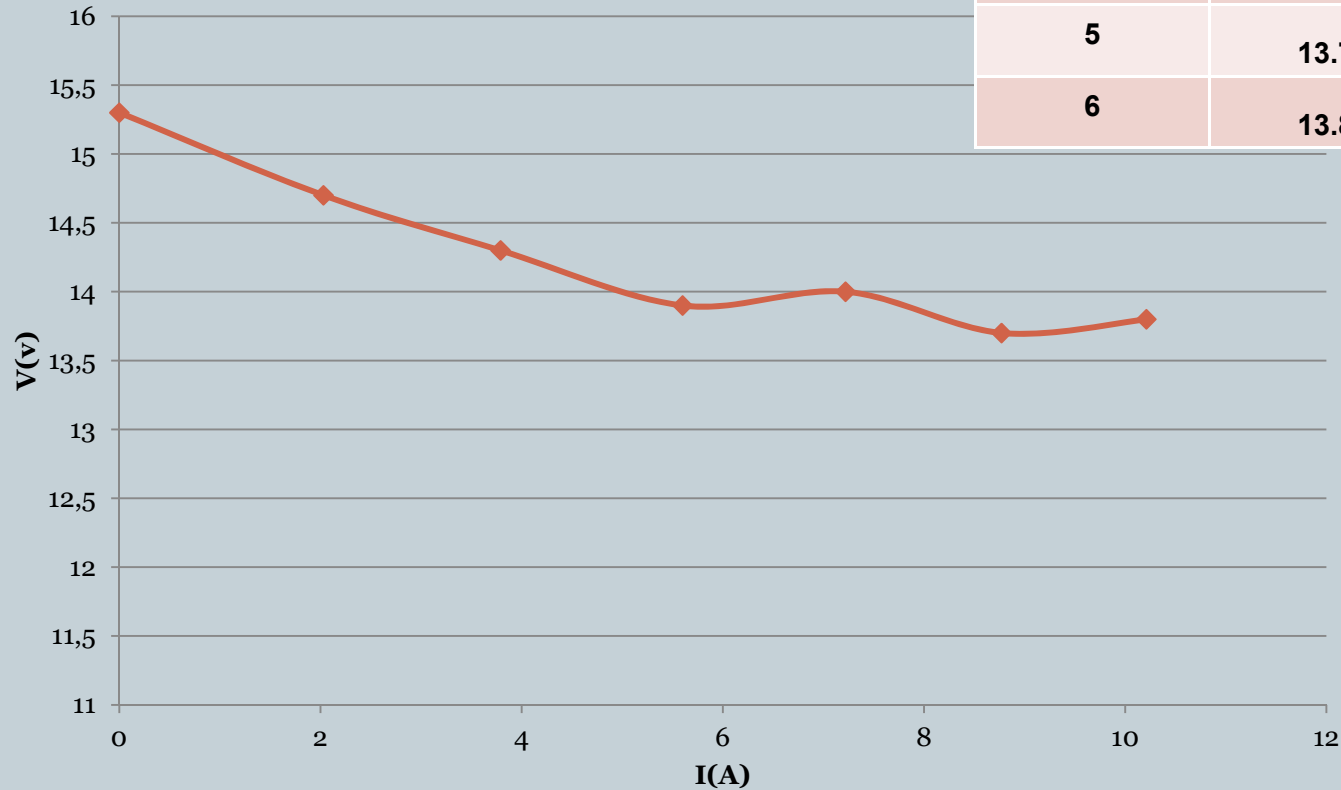


Ανάπτυξη Πρότυπου Εργαστηριακού Συστήματος

Θέση Διακόπτη	V(V)	I(A)
0	15.3	0
1	14.7	2.03
2	14.3	3.79
3	13.9	5.6
4	14.0	7.22
5	13.7	8.77
6	13.8	10.21

➤ Μετρήσεις Ισχύος

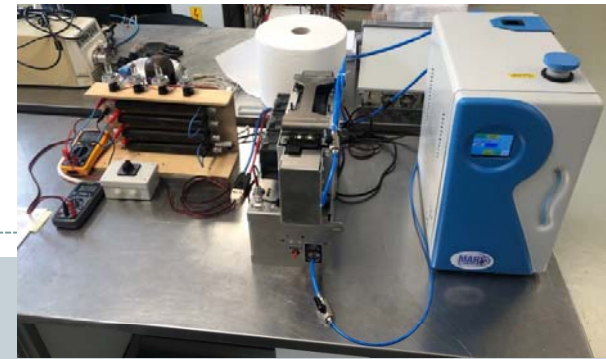
Διάγραμμα V-I



ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ



Ανάπτυξη Πρότυπου Εργαστηριακού Συστήματος



- Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής ανέδειξε τη δυναμική των ολοκληρωμένων συστημάτων υδρογόνου στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης. Μέσω συνδυασμού θεωρητικής ανάλυσης, συγκριτικής αξιολόγησης και πειραματικής επαλήθευσης, διαπιστώθηκε ότι το υδρογόνο μπορεί να λειτουργήσει ως βιώσιμος και πολυδιάστατος ενεργειακός φορέας. Η εφαρμογή καθαρής ηλεκτρόλυσης και κυψέλης καυσίμου προσέφερε ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα που ενισχύουν τη θέση του H_2 ως εργαλείο απανθρακοποίησης κρίσιμων τομέων.
- Οι μετρήσεις έδειξαν συνολική ενεργειακή απόδοση $\sim 57\%$, με σταθερή λειτουργία και υψηλή ασφάλεια. Η πειραματική μονάδα αποτελεί απόδειξη ότι ακόμη και σε μικρή κλίμακα, είναι εφικτή η παραγωγή και αξιοποίηση υδρογόνου με ικανοποιητικούς βαθμούς αποδοτικότητας, αποτελώντας πρότυπο για μελλοντικά αποκεντρωμένα ενεργειακά συστήματα.