



# ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

---

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

---

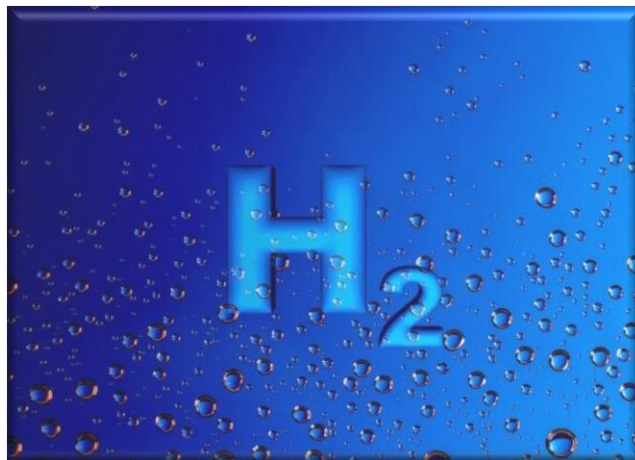
## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ:

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ»

«INTEGRATED HYDROGEN SYSTEMS:

COMPARATIVE EVALUATION AND EXPERIMENTAL PROTOTYPE»



Εκπόνηση: Καγιαμπάκης Ιωάννης

A.M. Φοιτητή: 2019050051

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γεντεκάκης Ιωάννης, Σχολή ΧΗΜΗΠΕΡ,  
Πολυτεχνείο Κρήτης

Συν-επιβλέπων: Δρ. Εμμανουήλ Σταματάκης, ΙΓ/ΙΤΕ





# ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

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

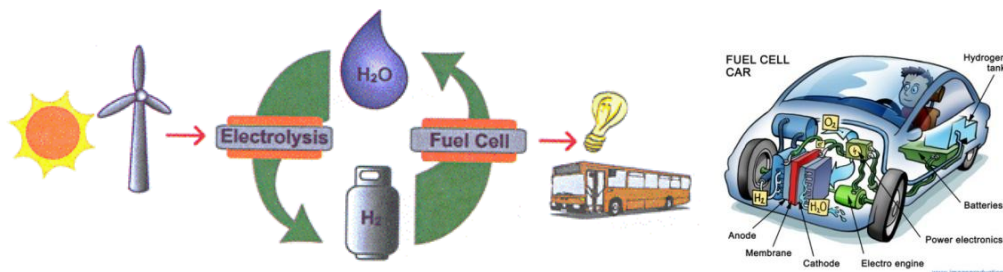
## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ:

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ»

«INTEGRATED HYDROGEN SYSTEMS:

COMPARATIVE EVALUATION AND EXPERIMENTAL PROTOTYPE»



Εκπόνηση: Καγιαμπάκης Ιωάννης

A.M. Φοιτητή: 2019050051

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γεντεκάκης Ιωάννης, Σχολή ΧΗΜΗΠΕΡ,  
Πολυτεχνείο Κρήτης

Συν-επιβλέπων: Δρ. Εμμανουήλ Σταματάκης, ΙΓ/ΙΤΕ

ΧΑΝΙΑ 2025





## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....	ii
Περίληψη.....	v
Abstract .....	vi
I. Εισαγωγή.....	viii
1. Σκοπός Εργασίας .....	1
II. Θεωρητικό Μέρος.....	2
1. Γενικά για το Υδρογόνο .....	3
2. Εφοδιαστική Αλυσίδα του Υδρογόνου.....	6
2.1. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ .....	8
2.1.A.Υδρογόνο από Ορυκτά Καύσιμα.....	9
2.1.B. Υδρογόνο από Διάσπαση του Νερού.....	17
2.1.Γ. Υδρογόνο από Βιομάζα.....	26
2.2. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ & ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ .....	29
2.2.A. Φυσική Αποθήκευση Υδρογόνου.....	32
2.2.B. Αποθήκευση Υδρογόνου με Χημειορόφηση.....	36
2.2.Γ. Αποθήκευση Υδρογόνου με Φυσιορόφηση .....	37
2.3. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ .....	38
2.3.1 Μηχανές Εσωτερικής Καύσης – Hydrogen Internal Combustion Engines (ICE) .....	39
2.3.2 Κυψέλη Καυσίμου Υδρογόνου – Fuel Cells .....	40
2.3.3 Άμεση Καύση για Θέρμανση.....	43
3. Ολοκληρωμένα συστήματα Υδρογόνου .....	44
III. Συγκριτική Αξιολόγηση Συστημάτων Υδρογόνου .....	46
1. Συγκριτική Αξιολόγηση Συστημάτων Παραγωγής H <sub>2</sub> .....	47
2. Συγκριτική Αξιολόγηση Συστημάτων Αποθήκευσης H <sub>2</sub> .....	49
3. Συγκριτική Αξιολόγηση Συστημάτων Κατανάλωσης H <sub>2</sub> .....	51
IV. Πειραματικό Μέρος .....	53
1. Σχεδιασμός και Κατασκευή Πειραματικού Μέρους.....	54
2. Βελτίωση Πειραματικής Διάταξης και Εξοπλισμού .....	55
3. Πειραματικές Μετρήσεις - Αποτελέσματα .....	56
4. Οδηγός Χρήσης Συστήματος Βήμα-Βήμα.....	58
V. Συμπεράσματα & Μελλοντικές Εργασίες.....	60
Βιβλιογραφία.....	62
Παραρτήματα.....	67

Τριμελής Επιτροπή Διπλωματικής Εργασίας:

1. Δρ. Γεντεκάκης Ιωάννης (Χημικός Μηχανικός, PhD)
2. Δρ. Σταματάκης Εμμανουήλ (Χημικός Μηχανικός, PhD)
3. Δρ. Παναγιωτοπούλου Παρασκευή (Χημικός Μηχανικός, PhD)

Αναπληρωματικός:

4. Δρ. Γουρνής Δημήτριος (Χημικός, PhD)

## ***ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ***

Αρχικά θα ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ιωάννη Γεντεκάκη, υπεύθυνο της ανάθεσης του θέματος της Διπλωματικής μου Εργασίας καθώς και τον κύριο Σταματάκη Εμμανουήλ, υπεύθυνο του πειραματικού προτύπου, για την πολύτιμη συνεχή επιστημονική καθοδήγηση και την αμέριστη υποστήριξη σε όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την εξεταστική επιτροπή για τον χρόνο, την προσοχή και τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις στη διπλωματική μου εργασία. Η συμβολή της υπήρξε πολύτιμη στη διαμόρφωση και ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

Καγιαμπάκης Ιωάννης  
Ιούνιος , 2025

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται στα ολοκληρωμένα συστήματα υδρογόνου, εστιάζοντας στην ολοκληρωμένη μελέτη αυτών, καλύπτοντας θεωρητικές, τεχνολογικές και πειραματικές πτυχές.

Πιο συγκεκριμένα, στο θεωρητικό μέρος, παρουσιάζεται το υδρογόνο ως ενεργειακός φορέας, με αναλυτική περιγραφή των μεθόδων παραγωγής (όπως η αναμόρφωση φυσικού αερίου, η ηλεκτρόλυση και η αεριοποίηση βιομάζας), των τεχνικών αποθήκευσης και μεταφοράς (σύνθετη, υγρή μορφή κ.ά.), καθώς και των βασικών τρόπων κατανάλωσης (κινητήρες εσωτερικής καύσης, κυψέλες καυσίμου, θέρμανση).

Ακολουθεί η συγκριτική αξιολόγηση των επιμέρους τεχνολογιών που απαρτίζουν κάθε στάδιο του κύκλου του υδρογόνου, εξετάζοντας τεχνικά και οικονομικά κριτήρια, αλλά και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η ανάλυση αυτή αποσκοπεί στην αναγνώριση των πιο αποδοτικών και βιώσιμων επιλογών για τη μελλοντική ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων.

Το πειραματικό μέρος της εργασίας πραγματοποιήθηκε στο **Ινστιτούτο Γεωενέργειας ΙΤΕ/ΙΓ που στεγάζεται στο campus του Πολυτεχνείου Κρήτης**. Συγκεκριμένα, σχεδιάζεται και υλοποιείται ένα πειραματικό πρωτότυπο συστήματος υδρογόνου, το οποίο περιλαμβάνει τη μονάδα ηλεκτρόλυσης (Mars h13 400D) για την παραγωγή υδρογόνου καθώς και τη κυψέλη καυσίμου (Aircell 500) για την επαναμετατροπή του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια. Το πρωτότυπο αξιολογείται πειραματικά ως προς τη λειτουργικότητα και την ενεργειακή του απόδοση.

Η εργασία ολοκληρώνεται με τη διατύπωση συμπερασμάτων και προτάσεων για μελλοντικές επεκτάσεις, δίνοντας τη φιλοδοξία να προσφέρει πρακτικές και τεκμηριωμένες προσεγγίσεις για την αξιολόγηση και εφαρμογή συστημάτων υδρογόνου, ενισχύοντας τη γνώση γύρω από τη χρήση του ως πράσινου καυσίμου στο πλαίσιο της ενεργειακής απανθρακοποίησης.

**Λέξεις κλειδιά:** Παραγωγή Υδρογόνου, Μονάδα Ηλεκτρόλυσης, Mars h13 400D, Κυψέλη Καυσίμου, Aircell 500, Συγκριτική Αξιολόγηση, Ινστιτούτο Γεωενέργειας ΙΤΕ/ΙΓ, Πολυτεχνείο Κρήτης

## **Abstract**

This dissertation is focused on the integrated hydrogen systems, synthesizing their theoretical, technological, and experimental research.

More specifically, in the theoretical section, hydrogen is positioned as an energy carrier with a thorough detailing of its production techniques (natural gas reforming, electrolysis, and biomass gasification), storage, and transportation methods (composite, liquid, etc.), and the major modes of consumption (internal combustion engines, fuel cells, heating).

Then follows a comparative assessment of the individual technologies belonging to each stage of the hydrogen cycle in relation to the technological and economic parameters alongside its ecological impact. As a result, the most efficient and environmentally friendly solutions will be outlined for the further advancement in the development of such systems.

In the experimental section of the work, carried out at the Geoenergy Institute FORTH/IG housed on the campus of the Technical University of Crete. an experimental prototype of a hydrogen system incorporating an electrolysis unit (Mars h13 400D) and a fuel cell (Aircell 500) is constructed and tested for functionality, energy efficiency, and overall performance.

The work is concluded by formulating conclusions and proposals for future extensions, giving the ambition to offer practical and documented approaches for the evaluation and implementation of hydrogen systems, enhancing knowledge about its use as a green fuel in the context of energy decarbonization.

**Keywords:** Hydrogen Production, Electrolysis System, Mars h13 400D, Fuel Cell, Aircell 500, Comparative Evaluation, Geoenergy Institute Forth/IG, Technical University Of Crete



## I. Εισαγωγή

Στη σύγχρονη εποχή, το σύνολο των ανθρώπινων δραστηριοτήτων είναι συνδεδεμένο με την χρήση ενέργειας. Η εντεινόμενη ανάγκη για μετάβαση σε ένα καθαρότερο, βιώσιμο και αποκεντρωμένο ενεργειακό σύστημα έχει καταστήσει το υδρογόνο έναν από τους σημαντικότερους υποψήφιους ενεργειακούς φορείς του μέλλοντος. Λόγω των μοναδικών του χαρακτηριστικών όπως η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, η δυνατότητα καθαρής καύσης και η ευελιξία στις χρήσεις του, το υδρογόνο δύναται να διαδραματίσει κεντρικό ρόλο στην απανθρακοποίηση τομέων όπως η βιομηχανία, οι μεταφορές και η ηλεκτροπαραγωγή.

Η ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων υδρογόνου, τα οποία περιλαμβάνουν τη διαδικασία παραγωγής, αποθήκευσης, μεταφοράς και τελικής κατανάλωσης του υδρογόνου, αποτελεί απαραίτητο βήμα για την αποτελεσματική ένταξή του στο ενεργειακό μείγμα. Εντούτοις, η πολυπλοκότητα των τεχνολογιών που εμπλέκονται, καθώς και η διαφοροποίησή τους ως προς την αποδοτικότητα, το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθιστούν αναγκαία μια ολοκληρωμένη και συγκριτική αξιολόγηση των διαφόρων επιλογών.



Σχήμα 1: Το υδρογόνο ως βιώσιμη ενεργειακή λύση

## 1. Σκοπός Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην πολυδιάστατη διερεύνηση της λειτουργίας και της αποδοτικότητας τέτοιων συστημάτων, μέσω θεωρητικής ανάλυσης αλλά και πειραματικής προσέγγισης. Αρχικά, παρουσιάζεται η εφοδιαστική αλυσίδα του υδρογόνου, περιλαμβάνοντας τις βασικές τεχνολογίες παραγωγής και τις διαθέσιμες μεθόδους αποθήκευσης και μεταφοράς. Στη συνέχεια, εξετάζονται οι κύριες τεχνολογίες κατανάλωσης του υδρογόνου, όπως οι κυψέλες καυσίμου και οι μηχανές εσωτερικής καύσης.

Μέσω της θεωρητικής διερεύνησης και της συγκριτικής αποτίμησης των μεθόδων παραγωγής, αποθήκευσης και κατανάλωσης του υδρογόνου, καθώς και της ανάπτυξης και πειραματικής μελέτης ενός πρότυπου εργαστηριακού συστήματος, επιχειρείται η τεκμηρίωση της λειτουργικής σκοπιμότητας και της ενεργειακής αποδοτικότητας των εν λόγω τεχνολογιών στο πλαίσιο της πράσινης ενεργειακής μετάβασης.




## II. Θεωρητικό Μέρος

" Το Νερό είναι η Αρχή των Πάντων " κατά το Θαλή το Μιλήσιο



Σχήμα 2: Ολοκληρωμένη προσέγγιση για την ανάπτυξη του οικοσυστήματος H<sub>2</sub>

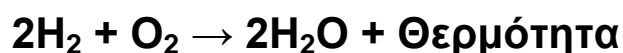
## 1. Γενικά για το Υδρογόνο

Το υδρογόνο (*hydrogen*) είναι το πρώτο στοιχείο που σχηματίστηκε μετά το Big Bang καθώς είναι και το πιο κοινό στοιχείο το οποίο υπάρχει άφθονο στο σύμπαν. Είναι ένα αμέταλλο χημικό στοιχείο με χημικό σύμβολο H και ατομικό αριθμό 1 και σε θερμοκρασία 25°C και υπό πίεση 1 atm, είναι ένα άχρωμο και άοσμο αέριο. Με ατομική μάζα 1,00794(7) amu, κατατάσσεται ως το ελαφρύτερο στοιχείο του περιοδικού πίνακα. Η μονοατομική του μορφή (H<sub>1</sub>) αποτελεί τη συχνότερη χημική σύσταση στο σύμπαν, συμβάλλοντας περίπου στο 75% της συνολικής βαρυονικής μάζας. Τα άστρα και τα υπολείμματα άστρων κύριας ακολουθίας αποτελούνται κυρίως από υδρογόνο σε μορφή πλάσματος. Το επικρατέστερο ισότοπο του υδρογόνου, το 'πρώτιο' (H), περιέχει μόνο ένα πρωτόνιο και κανένα νετρόνιο, στον πυρήνα του. Η συμπαντική δημιουργία του ατομικού υδρογόνου παρουσιάστηκε για πρώτη φορά κατά τη διάρκεια της εποχής ανασυνδυασμού. 

Στη πράξη **1kg H<sub>2</sub> έχει ανώτερη θερμογόνο δύναμη 142MJ**.. Όταν για την ίδια ποσότητα **1Kgr βενζίνης η θερμογόνος δύναμη είναι ~47MJ**, καθώς επίσης η αντίστοιχη θερμογόνος δύναμη του υγραερίου είναι ~49MJ και του **φυσικού αερίου είναι ~55MJ**.

**Γι αυτό το Υδρογόνο H<sub>2</sub> λέγεται αέριο του κρότου.** 


Κατά την αντίδραση του υδρογόνου με το οξυγόνο είτε με τον ατμοσφαιρικό αέρα, [Εξίσωση 1] παράγεται νερό και θερμότητα σύμφωνα με την παρακάτω χημική αντίδραση



[Εξίσωση 1]

Πρόκειται επομένως για μία εξώθερμη αντίδραση. Η θερμότητα που εκλύεται είναι περίπου 285,83 kJ/mol.

Επιπλέον, δημιουργεί εκρηκτικά μείγματα με άλλα στοιχεία όπως το χλώριο. Τα μείγματα υδρογόνου μπορούν να αναφλεγούν με σπινθήρα, με θέρμανση ή με κατάλληλη ακτινοβολία ενώ η θερμοκρασία αυτανάφλεξης του στον αέρα είναι οι 500°C

Μία άλλη χημική ιδιότητα του υδρογόνου είναι ότι όταν βρεθεί υπό υψηλή θερμοκρασία και πίεση (3000-5000°C, 1,5x10<sup>6</sup> atm) συμπεριφέρεται ως μέταλλο. Μπορεί να λειτουργήσει ως ηλεκτρικός αγωγός και πιθανώς να έχει μεγάλη δυνατότητα αντανάκλασης του φωτός. 

Το υδρογόνο βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε πλήθος καθημερινών διεργασιών, κυρίως ως βιομηχανικό αέριο. Λειτουργεί ως βασικό αντιδραστήριο στην παραγωγή ποικίλων χημικών ενώσεων στη χημική και πετροχημική βιομηχανία. Παράλληλα, χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσο σε ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς και σε γεννήτριες. Με την πρόοδο του χρόνου, η αξιοποίησή του διερευνάται εντατικά και στον τομέα της παραγωγής ενέργειας, της θέρμανσης και της κίνησης οχημάτων. Το

υδρογόνο χαρακτηρίζεται ως ένα καύσιμο με ιδιαίτερα χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, καθώς η καύση του αποδίδει αποκλειστικά νερό ως προϊόν.

Το υδρογόνο δεν απαντάται ελεύθερο στο φυσικό περιβάλλον σε μεγάλες συγκεντρώσεις, καθώς συνδέεται με άλλα στοιχεία σχηματίζοντας χημικές ενώσεις. Για να αξιοποιηθεί ως καύσιμο, απαιτείται η παραγωγή και η αποθήκευσή του σε απομονωμένη μορφή. Ως εκ τούτου, κατατάσσεται στους δευτερεύοντες ενεργειακούς φορείς. Η βιομηχανική παραγωγή υδρογόνου μέσω επεξεργασίας ορυκτών καυσίμων μπορεί να αποτελέσει εμπορικά βιώσιμη επιλογή, με σχετικά χαμηλό κόστος, εφόσον πραγματοποιείται σε μεγάλη κλίμακα. Ωστόσο, προκειμένου το υδρογόνο να θεωρείται βιώσιμη ενεργειακή λύση και να εντάσσεται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, είναι απαραίτητο το σύνολο της διαδικασίας παραγωγής του να είναι απαλλαγμένο από εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>).

### Τα “Χρώματα” του Υδρογόνου

Υπάρχει πληθώρα διαθέσιμων τεχνολογιών για την παραγωγή αέριου υδρογόνου, ωστόσο το **ανθρακικό αποτύπωμα** κάθε διεργασίας διαφέρει ουσιαστικά. Η παραγωγή **πράσινου υδρογόνου** αξιοποιεί ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η αιολική, η ηλιακή και η βιομάζα για τη μετατροπή τους σε καθαρό και ανανεώσιμο καύσιμο. Παρά τις τεχνολογικές εξελίξεις, επί του παρόντος μόλις το **0,1% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου** αντιστοιχεί σε πράσινο υδρογόνο.

Η κατηγοριοποίηση της μεθόδου παραγωγής υδρογόνου βασίζεται στην εξέταση των εξής παραμέτρων:


1. **Της πρώτης ύλης** που χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου.
2. **Του ενεργειακού φορέα** που τροφοδοτεί τη διεργασία (π.χ. ηλεκτρισμός από ΑΠΕ ή ορυκτά καύσιμα).
3. **Της διαχείρισης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>)** που ενδέχεται να προκύψουν κατά τη διαδικασία παραγωγής.


Οι κύριες κατηγορίες υδρογόνου διαμορφώνονται ως εξής:

- **Καφέ υδρογόνο:** Παράγεται μέσω της θερμικής διάσπασης αέριων υδρογονανθράκων, με σημαντική έκλυση διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) κατά τη διαδικασία παραγωγής. Συχνά αναφέρεται και ως μαύρο υδρογόνο.
- **Γκρι υδρογόνο:** Προκύπτει από την αναμόρφωση φυσικού αερίου. Επί του παρόντος, αποτελεί τη συνηθέστερη και οικονομικότερη μέθοδο παραγωγής υδρογόνου, αν και αναμένεται αύξηση του κόστους λόγω της ανόδου των τιμών στα δικαιώματα εκπομπών CO<sub>2</sub>. Η παραγωγή ενός τόνου τέφρας συνεπάγεται εκπομπές της τάξης των 9 έως 12 τόνων διοξειδίου του άνθρακα.
- **Μπλε υδρογόνο:** Παράγεται επίσης μέσω αναμόρφωσης φυσικού αερίου, ωστόσο διαφοροποιείται ως προς τη διαχείριση των εκπομπών, καθώς εφαρμόζονται τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS), περιορίζοντας ή εξαλείφοντας την απελευθέρωση CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα. Το

δεσμευμένο διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να αξιοποιηθεί σε εφαρμογές, όπως η σύνθεση συνθετικών καυσίμων.

- **Τυρκουάζ υδρογόνο:** Παράγεται μέσω πυρόλυσης του μεθανίου, διαδικασία κατά την οποία το μεθάνιο διασπάται σε υδρογόνο και στερεό άνθρακα. Η μέθοδος αυτή συνεπάγεται χαμηλές εκπομπές ρύπων, καθώς ο παραγόμενος άνθρακας μπορεί να αποθηκευτεί ή να αξιοποιηθεί σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως στην παραγωγή χάλυβα ή στην κατασκευή μπαταριών, αποτρέποντας την απελευθέρωσή του ως CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα.
- **Πράσινο υδρογόνο:** Παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης νερού με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης αποκλειστικά από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αν και σήμερα παραμένει το πλέον δαπανηρό είδος υδρογόνου, αναμένεται μείωση του κόστους καθώς προοδευτικά μειώνονται οι τιμές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των ηλεκτρολυτών. Επιπλέον, πράσινο υδρογόνο μπορεί να παραχθεί και από βιοαέριο που προέρχεται από ζωικά, γεωργικά ή αστικά απόβλητα.

Η παραγωγή ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), λόγω της στοχαστικής φύσης τους, δεν ταυτίζεται πάντοτε με το προφίλ ζήτησης των καταναλωτών. Υφίστανται περίοδοι όπου η παραγόμενη ενέργεια υπολείπεται της ζητούμενης, αλλά και περίοδοι σημαντικού πλεονάσματος, το οποίο υπό κανονικές συνθήκες παραμένει ανεκμετάλλευτο. Για την ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών και τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης των ενεργειακών συστημάτων, χρησιμοποιούνται επικουρικά συστήματα αποθήκευσης, όπως συστοιχίες μπαταριών. Ωστόσο, το υψηλό κόστος εγκατάστασης και η περιορισμένη δυνατότητα μακροχρόνιας αποθήκευσης καθιστούν τη λύση αυτή μη αποδοτική τόσο σε τεχνικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. 


Βασική προϋπόθεση για την επιτάχυνση της ενεργειακής μετάβασης αποτελεί η ταχεία ανάπτυξη καθαρών τεχνολογιών, η ψηφιοποίηση των ενεργειακών διαδικασιών, καθώς και η αποκέντρωση της παραγωγής ενέργειας μέσω της ενίσχυσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Η πρόοδος στον τομέα του υδρογόνου είναι στενά συνυφασμένη με την παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση. Ειδικότερα, το πράσινο υδρογόνο δύναται να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην επίτευξη της αποανθρακοποίησης σε όλους τους τομείς της οικονομίας. Η αξιοποίηση του υδρογόνου αναμένεται να συμβάλλει τόσο στη βελτίωση του ενεργειακού αποτυπώματος όσο και στη μείωση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, ως ενεργειακός φορέας, το πράσινο υδρογόνο παρουσιάζει υψηλή ευελιξία, καθώς μπορεί να μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις και να αποθηκεύεται αποδοτικά μέσω συμπίεσης ή υγροποίησης, διατηρώντας υψηλή ενεργειακή πυκνότητα. 

## 2. Εφοδιαστική Αλυσίδα του Υδρογόνου

Η εφοδιαστική αλυσίδα αναφέρεται σε ένα σύνολο διαδικασιών που αποσκοπούν στη μεταφορά ενός αγαθού ή μιας υπηρεσίας από το σημείο παραγωγής έως το σημείο παράδοσης στον τελικό καταναλωτή, εξασφαλίζοντας την ακεραιότητα και την ασφάλεια του προϊόντος καθ' όλη τη διαδρομή. Οι βασικοί άξονες της εφοδιαστικής αλυσίδας περιλαμβάνουν:

1. Προμήθεια
2. Παραγωγή
3. Μεταφορά
4. Αποθήκευση
5. Διανομή
6. Εξυπηρέτηση πελατών

Η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας (Supply Chain Management - SCM) αποτελεί ένα σύνθετο αντικείμενο που προϋποθέτει τον συντονισμό και τη συνεργασία ποικίλων παραγόντων, οι οποίοι θα παρουσιαστούν αναλυτικά παρακάτω.

Ο βασικός στόχος της εφοδιαστικής αλυσίδας είναι η συνεχής μείωση των λειτουργικών δαπανών και του χρόνου παράδοσης των προϊόντων, διασφαλίζοντας παράλληλα την ασφαλή μεταφορά τους και την πλήρη ικανοποίηση του τελικού αγοραστή. 

Πιο συγκεκριμένα:

- **Παραγωγή:** Το υδρογόνο παράγεται κυρίως μέσω δύο μεθόδων: της ατμοσφαιρικής αναμόρφωσης του φυσικού αερίου και της ηλεκτρόλυσης του νερού. Η τελευταία μέθοδος θεωρείται πιο βιώσιμη, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια. Η περιβαλλοντική επίπτωση των μεθόδων παραγωγής είναι κρίσιμη, και το υδρογόνο πρέπει να παράγεται με ελάχιστες εκπομπές άνθρακα για να επιτευχθεί πλήρως το περιβαλλοντικό του όφελος.
- **Αποθήκευση και Μεταφορά:** Το υδρογόνο, λόγω της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητάς του, απαιτεί εξειδικευμένη υποδομή για αποθήκευση και μεταφορά. Οι τρέχουσες μέθοδοι περιλαμβάνουν την αποθήκευση του υδρογόνου ως συμπιεσμένο αέριο ή ως υγροποιημένο υδρογόνο σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Η αναφορά τονίζει τη σημασία της ανάπτυξης προηγμένων τεχνολογιών αποθήκευσης και αποδοτικών συστημάτων μεταφοράς, όπως οι αγωγοί και οι κρυογενικοί τράκτορες.
- **Ανάπτυξη Υποδομής:** Η αναφορά επισημαίνει την ανάγκη για ένα ολοκληρωμένο σύστημα υποδομής που να περιλαμβάνει εγκαταστάσεις παραγωγής, συστήματα αποθήκευσης και δίκτυα μεταφοράς. Προτείνεται μια σταδιακή προσέγγιση, ξεκινώντας από τη σημερινή βιομηχανία υδρογόνου

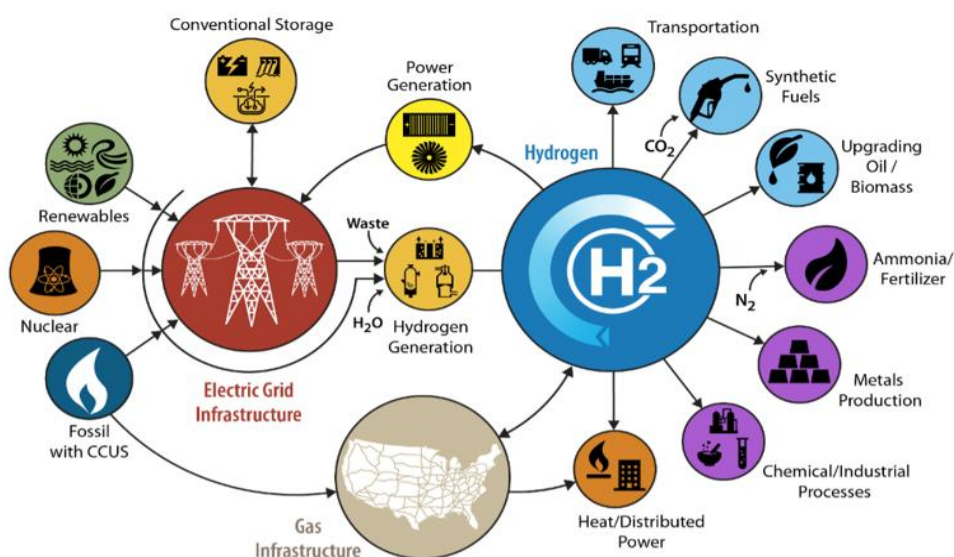


και μεταβαίνοντας σταδιακά σε μια υποδομή που θα περιλαμβάνει ένα μεγαλύτερο ποσοστό υδρογόνου που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

- **Μεταφορά Τεχνολογίας και Συνεργασίες Μεταξύ Βιομηχανίας:** Ένα κρίσιμο στοιχείο της εφοδιαστικής αλυσίδας του υδρογόνου είναι η συνεργασία μεταξύ κυβέρνησης, βιομηχανίας και ακαδημαϊκής κοινότητας. Η αναφορά προτείνει τη δημιουργία μιας βιομηχανικής κοινοπραξίας για το υδρογόνο, ώστε να ενισχυθούν οι συνεργασίες, να εξασφαλιστεί η κατανομή κόστους και να διευκολυνθεί η μεταφορά των αποτελεσμάτων των ερευνών στην εμπορική εφαρμογή. Αυτό θα επιτρέψει την κλιμάκωση των τεχνολογιών υδρογόνου και την εμπορευματοποίηση των προϊόντων και υπηρεσιών που βασίζονται σε αυτό.
- **Ασφάλεια και Κανονιστικές Απαιτήσεις:** Η αναφορά επίσης αναφέρεται στην ασφάλεια, σημειώνοντας ότι το υδρογόνο, αν και είναι ένας καθαρός ενεργειακός φορέας, παρουσιάζει μοναδικές προκλήσεις λόγω της εύφλεκτης φύσης του και των απαιτήσεων χειρισμού. Η ανάπτυξη ολοκληρωμένων πρωτοκόλλων ασφαλείας, συμπεριλαμβανομένης της δημιουργίας επιτροπών ασφαλείας και κανονιστικών πλαισίων, είναι απαραίτητη για την αποφυγή κινδύνων κατά τη μεταφορά, αποθήκευση και χρήση του.

Συνοψίζοντας, 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. Η επιτυχής ανάπτυξη του υδρογόνου ως βιώσιμου ενεργειακού πόρου εξαρτάται από τη συνεχιζόμενη συνεργασία μεταξύ κυβερνητικών φορέων, επιχειρηματικών εταίρων και ακαδημαϊκών ιδρυμάτων. 16

**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.

**Σχήμα 3: Ολοκληρωμένο ενεργειακό σύστημα υδρογόνου**

## 2.1. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Η παραγωγή υδρογόνου αποτελεί ένα από τα θεμελιώδη σημεία για την ανάπτυξη ενός βιώσιμου ενεργειακού συστήματος. Η αναφορά τονίζει ότι το υδρογόνο είναι ένας εξαιρετικά ευέλικτος ενεργειακός φορέας, ο οποίος μπορεί να παραχθεί με διάφορες **Μεθόδους - Τεχνολογίες**, η καθεμία με διαφορετικές περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις.

### ➤ **Μέθοδοι – Τεχνολογίες Παραγωγής Υδρογόνου**

#### A. H<sub>2</sub> από Ορυκτά Καύσιμα

##### **A1. Φυσικό Αέριο**

- Αναμόρφωση με ατμό
- Μερική οξειδωση
- Αυτόθερμη αναμόρφωση

##### **A2. Άνθρακα - Λιγνίτη**

- Αεριοποίηση άνθρακα/λιγνίτη
- Πυρόλυση

#### B. H<sub>2</sub> από τη Διάσπαση του Νερού (H<sub>2</sub>O)

- Καθαρή Ηλεκτρόλυση του νερού
- Αλκαλική Ηλεκτρόλυση του νερού
- Ηλεκτρόλυση με Μεμβράνες Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEM)
- Ηλεκτρόλυση σε υψηλές θερμοκρασίες
- Φωτοηλεκτροκατάλυση
- Θερμοχημικοί Κύκλοι Διάσπασης Νερού

#### Γ. H<sub>2</sub> από τη βιομάζα

- Ζύμωση βιομάζας
- Αεριοποίηση και πυρόλυση βιομάζας

## 2.1.Α.Υδρογόνο από Ορυκτά Καύσιμα

### **A1. Φυσικό Αέριο**

- Αναμόρφωση με ατμό
- Μερική οξείδωση
- Αυτόθερμη αναμόρφωση

### **A2. Άνθρακα - Λιγνίτη**

- Αεριοποίηση άνθρακα/λιγνίτη
- Πυρόλυση



Σχήμα 4: Πύργοι ψύξης θερμοηλεκτρικού σταθμού



## **Α1. Φυσικό Αέριο**

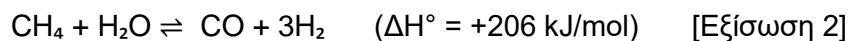


Σχήμα 5: Φυσικό αέριο

- **Αναμόρφωση με Ατμό – Steam Methane Reforming (SMR)**

Η αναμόρφωση με ατμό φυσικού αερίου (SMR) είναι η πιο διαδεδομένη βιομηχανική μέθοδος παραγωγής υδρογόνου (H<sub>2</sub>), καλύπτοντας περίπου το 48% της παγκόσμιας παραγωγής. Πρόκειται για μία ενδόθερμη διεργασία υψηλής θερμοκρασίας, στην οποία το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) αντιδρά με υδρατμούς παρουσία καταλύτη (συνήθως νικέλιο) και παράγει μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και υδρογόνο (H<sub>2</sub>). Η μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως σε διυλιστήρια και βιομηχανίες αμμωνίας λόγω της ωριμότητας και της αποδοτικότητάς της. [7]

**Κύριες αντιδράσεις:**



Η πρώτη αντίδραση [Εξίσωση 2] είναι ενδόθερμη και απαιτεί θερμοκρασίες 700–1100°C, ενώ η δεύτερη [Εξίσωση 3] (αντίδραση μετατόπισης αερίου-νερού) είναι εξώθερμη και επιτρέπει περαιτέρω αύξηση της απόδοσης του H<sub>2</sub>.

Η ενεργειακή απόδοση της μεθόδου φτάνει το 65-75%, με κόστος παραγωγής μεταξύ 1.0–2.5 €/kg H<sub>2</sub>, ανάλογα με την τιμή του φυσικού αερίου και την ύπαρξη ή όχι συστημάτων δέσμευσης CO<sub>2</sub>. Η τεχνολογία SMR αποτελεί τη βάση για το λεγόμενο 'γκρι υδρογόνο'. Όταν συνδυάζεται με δέσμευση CO<sub>2</sub> (CCS), οδηγεί στην παραγωγή του 'μπλε υδρογόνου'. [8]

**Πλεονεκτήματα:**

- Υψηλή απόδοση και βιομηχανική ωριμότητα
- Χαμηλό κόστος σε σχέση με άλλες μεθόδους

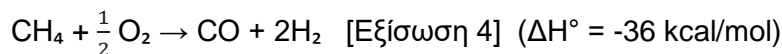
**Μειονεκτήματα:**


- Εκπομπές CO<sub>2</sub> χωρίς τεχνολογία CCS
- Εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα


- **Μερική Οξείδωση – Partial Oxidation (POX)**

Η μέθοδος της Μερικής Οξείδωσης (POX) βασίζεται στην αντίδραση του μεθανίου ή άλλων υδρογονανθράκων με περιορισμένο οξυγόνο, δημιουργώντας ένα αέριο μίγμα (syngas) πλούσιο σε μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και υδρογόνο (H<sub>2</sub>). Είναι εξώθερμη διεργασία, δηλαδή δεν απαιτεί εξωτερική θερμότητα για τη διατήρηση της αντίδρασης. Εφαρμόζεται κυρίως σε βιομηχανίες με υψηλή διαθεσιμότητα οξυγόνου ή σε συστήματα όπου η σταθερότητα της θερμοκρασίας είναι κρίσιμη.

**Βασική αντίδραση:**



Η αντίδραση [Εξίσωση 4] πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες 900–1100°C και πίεση 2–4 MPa. Ο καταλύτης δεν είναι απαραίτητος στη θερμική μορφή της POX, αλλά στην καταλυτική POX (CPOX) χρησιμοποιούνται υλικά όπως νικέλιο ή ευγενή μέταλλα για καλύτερη απόδοση. 

Η POX προσφέρει σημαντικό πλεονέκτημα σταθερής λειτουργίας, μικρότερο μέγεθος αντιδραστήρα και άμεση εκκίνηση. Ωστόσο, η περιεκτικότητα σε υδρογόνο είναι μικρότερη συγκριτικά με τη μέθοδο SMR. Για αύξηση της απόδοσης, το παραγόμενο syngas συχνά υποβάλλεται σε επιπλέον μετατροπή (Water-Gas Shift). 


**Πλεονεκτήματα:**

- Ταχεία εκκίνηση και σταθερή λειτουργία
- Δεν απαιτείται εξωτερική θερμότητα
- Κατάλληλη για κινητές μονάδες

**Μειονεκτήματα:**

- Χαμηλότερη απόδοση σε H<sub>2</sub> σε σύγκριση με SMR
- Χρήση καθαρού οξυγόνου αυξάνει το κόστος
- Υψηλές θερμοκρασίες και εξειδικευμένα υλικά

**Εφαρμογές:**

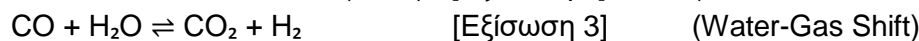
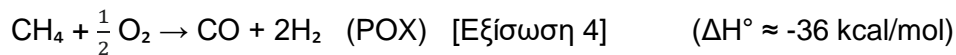
Η POX χρησιμοποιείται σε εφαρμογές υψηλής πυκνότητας ισχύος όπως αεριοστρόβιλοι, μονάδες υδρογόνωσης και κινητές εγκαταστάσεις παραγωγής syngas. Επίσης προτείνεται για συνδυασμό με τεχνολογίες CCS για περιορισμό εκπομπών CO<sub>2</sub>. 

- **Αυτόθερμη Αναμόρφωση – Autothermal Reforming (ATR)**

Η αυτόθερμη αναμόρφωση (Autothermal Reforming - ATR) είναι μια συνδυαστική τεχνολογία παραγωγής υδρογόνου (H<sub>2</sub>), η οποία ενσωματώνει τη θερμική εξώθερμη αντίδραση μερικής οξείδωσης (POX) και την ενδόθερμη αναμόρφωση με ατμό (SMR) σε μία ενιαία διεργασία. Στην ATR, το φυσικό αέριο αναμειγνύεται με υδρατμό και οξυγόνο και αντιδρά σε υψηλές θερμοκρασίες (~900°C) παρουσία καταλύτη, συνήθως βασισμένου σε νικέλιο, 12

Η συνολική θερμοδυναμική ισορροπία εξασφαλίζει σταθερή λειτουργία, χωρίς την ανάγκη εξωτερικής θέρμανσης. Η θερμότητα που παράγεται από την POX υποστηρίζει την ενδόθερμη αντίδραση SMR, επιτυγχάνοντας έτσι 'αυτόθερμη' ισορροπία.

**Βασικές αντιδράσεις:**



Το τελικό συνθετικό αέριο περιέχει:

40–60% υδρογόνο, 10–15% CO, και CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O σε μικρότερα ποσοστά. 13

Η ATR είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για μεγάλης κλίμακας μονάδες και μονάδες παραγωγής H<sub>2</sub> όπου είναι απαραίτητη η σταθερή θερμοκρασία και πίεση. Η απόδοση κυμαίνεται από 60% έως 75% και επιτρέπει ευκολότερη ενσωμάτωση συστημάτων δέσμευσης CO<sub>2</sub> (CCS), γεγονός που ευνοεί την παραγωγή 'μπλε' υδρογόνου. 7

**Πλεονεκτήματα:**

- Σταθερή θερμοκρασιακή λειτουργία χωρίς εξωτερική θέρμανση
- Συνδυαστικά οφέλη από POX και SMR
- Ευκολία ενσωμάτωσης CCS
- Κατάλληλη για μεγάλης κλίμακας μονάδες

**Μειονεκτήματα:**

- Απαιτεί ακριβή έλεγχο αναλογίας CH<sub>4</sub>:O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O
- Πιο σύνθετη διαχείριση από μεμονωμένες μεθόδους
- Υψηλό αρχικό κόστος κατασκευής αντιδραστήρα

**Εφαρμογές:**

Η ATR χρησιμοποιείται σε βιομηχανίες παραγωγής αμμωνίας, διυλιστήρια, και μονάδες παραγωγής H<sub>2</sub> σε μεγάλης κλίμακας πλατφόρμες, ειδικά όταν είναι διαθέσιμη υποδομή για παραγωγή και παροχή καθαρού οξυγόνου. 14

## **A2. Άνθρακα – Λιγνίτη**

- Αεριοποίηση άνθρακα/λιγνίτη
- Πυρόλυση

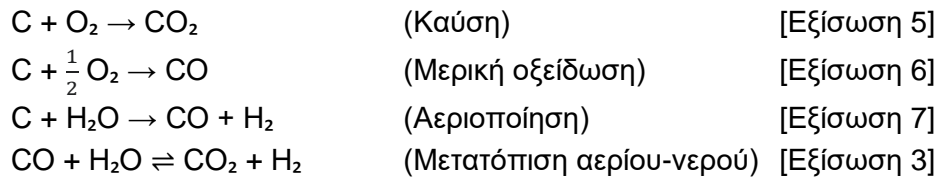


Σχήμα 6: Εξόρυξη λιγνίτη

## • Αεριοποίηση Άνθρακα - Λιγνίτη

Η αεριοποίηση αποτελεί μια θερμοχημική διεργασία μετατροπής στερεών καυσίμων (άνθρακα, λιγνίτη, βιομάζας) σε αέριο καύσιμο (syngas), το οποίο αποτελείται κυρίως από μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), υδρογόνο (H<sub>2</sub>), μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) και αδρανή αέρια. **15**

Η διεργασία πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες 800–1200°C παρουσία περιορισμένου οξυγόνου ή/και ατμού. Βασικές χημικές αντιδράσεις περιλαμβάνουν:



Το παραγόμενο syngas μπορεί να καθαριστεί και να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή υδρογόνου, ηλεκτρισμού, ή ακόμα και συνθετικών καυσίμων μέσω διεργασιών όπως η σύνθεση Fischer-Tropsch. Η τεχνολογία είναι κατάλληλη για περιοχές με άφθονα αποθέματα άνθρακα ή λιγνίτη, αλλά απαιτεί σύνθετες μονάδες καθαρισμού αερίου. **16**

### **Πλεονεκτήματα:**

- Δυνατότητα αξιοποίησης στερεών καυσίμων χαμηλής ποιότητας
- Παραγωγή χρήσιμου αερίου καυσίμου
- Ευελιξία τελικών προϊόντων (H<sub>2</sub>, καύσιμα, ηλεκτρική ενέργεια)

### **Μειονεκτήματα:**

- Υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης
- Πολυπλοκότητα καθαρισμού syngas
- Υψηλό αποτύπωμα άνθρακα χωρίς CCS

Η αεριοποίηση συνδυάζεται σε πολλές περιπτώσεις με τεχνολογίες δέσμευσης CO<sub>2</sub> (CCS) για μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, καθιστώντας την πιο συμβατή με στρατηγικές απανθρακοποίησης. **17**

## • Πυρόλυση

Η πυρόλυση μεθανίου είναι μια θερμική διεργασία κατά την οποία το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) αποσυντίθεται σε υδρογόνο (H<sub>2</sub>) και στερεό άνθρακα (C) σε υψηλές θερμοκρασίες (700–1200°C), χωρίς την παρουσία οξυγόνου. Σε αντίθεση με τις συμβατικές θερμοχημικές μεθόδους παραγωγής H<sub>2</sub> (SMR, POX, ATR), η πυρόλυση δεν παράγει CO<sub>2</sub>, καθιστώντας την μία από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες για «καθαρό» ή «τουρκοϊζ» υδρογόνο. [18]

### **Χημική εξίσωση:**



Η αντίδραση [Εξίσωση 12] είναι ενδόθερμη και απαιτεί συνεχή παροχή θερμότητας. Το παραγόμενο στερεό άνθρακα μπορεί να συλλεχθεί και να αξιοποιηθεί ως πρώτη ύλη στην παραγωγή υλικών (π.χ. καρβίδια, ενεργός άνθρακας) ή ως δομικό υλικό. [19]

Υπάρχουν δύο βασικές παραλλαγές της μεθόδου:

- Θερμική πυρόλυση (χωρίς καταλύτη)
- Καταλυτική πυρόλυση με παρουσία μετάλλων (π.χ. Ni, Fe, Co), που μειώνουν τη θερμοκρασία αντίδρασης και αυξάνουν την απόδοση. [20]

Η τεχνολογία βρίσκεται ακόμα σε στάδιο έρευνας και πιλοτικής εφαρμογής, κυρίως λόγω των προκλήσεων που σχετίζονται με τη διαχείριση του στερεού άνθρακα, την απόθεση άνθρακα στους καταλύτες και τις ενεργειακές απαιτήσεις της διεργασίας.

### **Πλεονεκτήματα:**

- Μηδενικές εκπομπές CO<sub>2</sub>
- Παραγωγή χρήσιμου στερεού άνθρακα ως παραπροϊόν
- Υψηλή καθαρότητα του παραγόμενου H<sub>2</sub>

### **Μειονεκτήματα:**

- Υψηλή ενεργειακή απαίτηση
- Απόθεση στερεού άνθρακα στις επιφάνειες
- Απουσία βιομηχανικής ωριμότητας

### **Εφαρμογές:**

Η πυρόλυση μεθανίου εξετάζεται ως υποψήφια τεχνολογία για συνδυασμό με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ηλεκτρικούς αντιδραστήρες για παραγωγή «πράσινου» H<sub>2</sub> σε μικρές και μεσαίες κλίμακες. [21]



## 2.1.B. Υδρογόνο από Διάσπαση του Νερού

- Καθαρή Ηλεκτρόλυση του νερού
- Αλκαλική ηλεκτρόλυση του νερού
- Ηλεκτρόλυση με Μεμβράνες Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEM)
- Ηλεκτρόλυση σε υψηλές θερμοκρασίες
- Φωτοηλεκτροκατάλυση
- Θερμοχημικοί Κύκλοι Διάσπασης Νερού

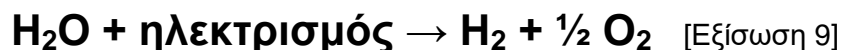


Σχήμα 7: Μόρια υδρογόνου – καθαρή ενεργειακή επιλογή του μέλλοντος



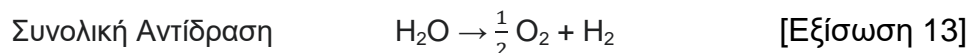
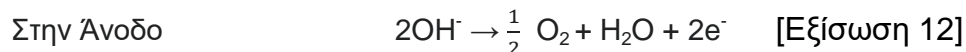
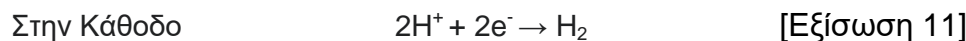
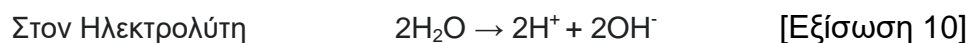
- **Καθαρή Ηλεκτρόλυση του Νερού**

Η παραγωγή πράσινου υδρογόνου βασίζεται σε μία τεχνικά απλή διεργασία. Η ηλεκτρόλυση του νερού ( $\text{H}_2\text{O}$ ) αποτελεί μια σχετικά απλή μέθοδο, κατά την οποία χρησιμοποιείται ηλεκτρικό ρεύμα για τη διάσπαση του μορίου του νερού σε υδρογόνο ( $\text{H}_2$ ) και οξυγόνο ( $\text{O}_2$ ), σύμφωνα με την ακόλουθη χημική αντίδραση: [Εξίσωση 9]



Η διεργασία λαμβάνει χώρα σε ειδικές συσκευές ηλεκτρόλυσης, οι οποίες τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια. Το παραγόμενο υδρογόνο χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό καθαρότητας και μπορεί να αποθηκευτεί άμεσα ή να χρησιμοποιηθεί απευθείας σε κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς να απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία.

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



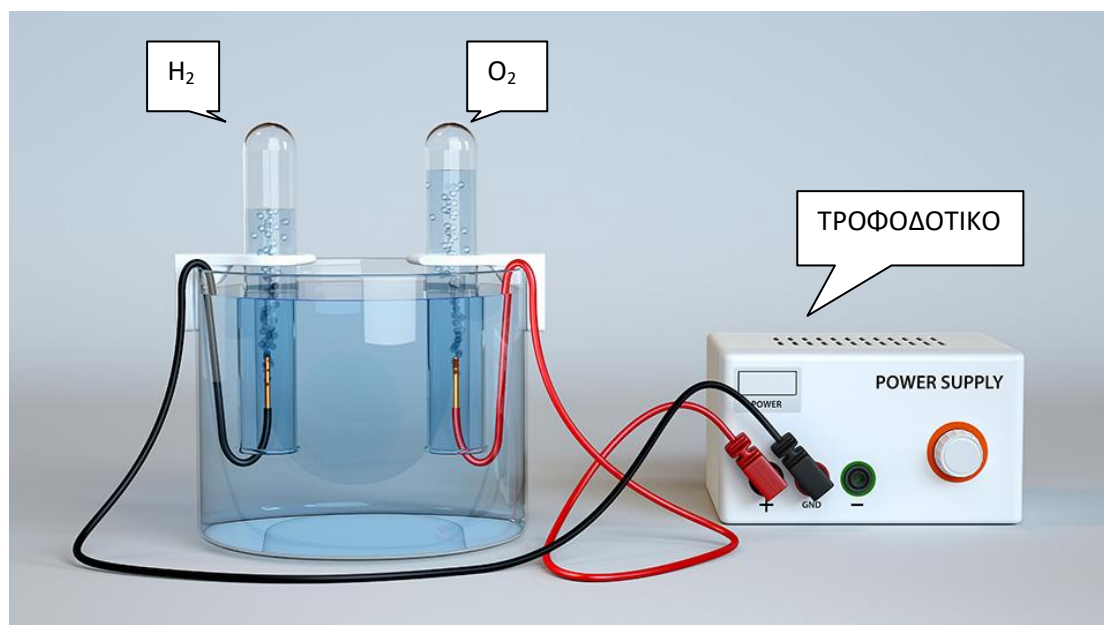
$$\Delta H_f = 285.6 \text{ kJ/mol}$$

όπου  $\Delta H_f$  είναι η ενθαλπία της αντίδρασης.

Η πλειονότητα των υφιστάμενων εγκαταστάσεων ηλεκτρόλυσης νερού αφορά μικρής κλίμακας εφαρμογές, όπου απαιτείται είτε η παραγωγή υδρογόνου είτε οξυγόνου, ή σε περιπτώσεις όπου είναι αναγκαία η επιτόπια παραγωγή υδρογόνου (π.χ. ως χημικό αντιδραστήριο).

Με τη συνεχή ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), οι οποίες προσφέρουν οικονομικά ανταγωνιστική ηλεκτρική ενέργεια, και την αυξανόμενη ερευνητική και βιομηχανική εστίαση στο υδρογόνο ως «καθαρό» καύσιμο, οι εγκαταστάσεις ηλεκτρόλυσης γνωρίζουν ταχύτατη ανάπτυξη και σε μεγαλύτερη κλίμακα. Αυτή η εξέλιξη οδηγεί σε αύξηση της παραγόμενης ποσότητας υδρογόνου, ενώ η χρήση φθηνής ηλεκτρικής ενέργειας μειώνει σημαντικά το κόστος του τελικού προϊόντος. Η παραγωγή και αποθήκευση υδρογόνου δύναται να πραγματοποιείται κατά περιόδους χαμηλής ενεργειακής ζήτησης, όταν το κόστος παραγωγής είναι

μειωμένο, και να αξιοποιείται σε περιόδους υψηλής ζήτησης ή αυξημένου κόστους παραγωγής. 22




Σχήμα 8: Πειραματική διάταξη ηλεκτρόλυσης νερού για παραγωγή υδρογόνου


Αν και μέχρι σήμερα δεν έχουν αναπτυχθεί ηλεκτρολύτες ειδικά σχεδιασμένοι για απευθείας συνεργασία με ανεμογεννήτριες, η ταχεία απόκριση των ηλεκτροχημικών συστημάτων στις διακυμάνσεις της ισχύος τα καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλα για χρήση ως δυναμικά "φορτία" σε τέτοιες εφαρμογές.

Οι βιομηχανικού τύπου ηλεκτρολύτες σχεδιάζονται με σκοπό τη συνεχή λειτουργία, καθώς το υψηλό κεφαλαιουχικό κόστος επένδυσης απαιτεί υψηλούς συντελεστές δυναμικότητας προκειμένου να επιτευχθούν ικανοποιητικοί χρόνοι απόσβεσης. Παρά τη σχεδιάσή τους για σταθερή λειτουργία, κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους υφίστανται πολλαπλές διακοπές ισχύος, που μπορεί να οφείλονται είτε σε τυχαία διακοπή της ηλεκτρικής τροφοδοσίας, είτε σε ενεργοποίηση συστημάτων ασφαλείας, είτε σε προγραμματισμένες παύσεις για σκοπούς συντήρησης.

Οι διακοπές λειτουργίας εμφανίζονται με αυξημένη συχνότητα σε εξειδικευμένες εφαρμογές, όπου οι ηλεκτρολύτες χρησιμοποιούνται για παραγωγή υδρογόνου κατά απαίτηση. Συνεπώς, η ασυνεχής (διακοπτόμενη) λειτουργία του εξοπλισμού δεν αποτελεί νέο φαινόμενο, και η πλειονότητα των εμπορικά διαθέσιμων ηλεκτρολυτών είναι σχεδιασμένη ώστε να μπορεί να ανταποκρίνεται ικανοποιητικά και σε τέτοια λειτουργικά σενάρια. 23

- **Αλκαλική Ηλεκτρόλυση του Νερού – Alkaline Electolysis (AEL)**

Η αλκαλική ηλεκτρόλυση (AEL) είναι η παλαιότερη και πιο καθιερωμένη τεχνολογία ηλεκτρολυτικής παραγωγής υδρογόνου ( $H_2$ ), με ιστορία άνω των 100 ετών. Η τεχνολογία βασίζεται στη διάσπαση του νερού ( $H_2O$ ) σε υδρογόνο και οξυγόνο μέσω εφαρμογής ηλεκτρικού ρεύματος σε αλκαλικό υδατικό διάλυμα, συνήθως  $NaCl$ ,  $KOH$  ή  $NaOH$ . 


Η αντίδραση πραγματοποιείται σε διαχωρισμένα διαμερίσματα ηλεκτρολύτη, όπου η ανόδου και η καθόδου χωρίζονται από πορώδη διαφραγματική μεμβράνη. Η καθοδική αντίδραση παράγει  $H_2$  και η ανοδική  $O_2$ . Η λειτουργία είναι συνεχής και σταθερή, με θερμοκρασίες 60–90°C και πίεση 1–30 bar. 

**Χημικές αντιδράσεις:**

Κάθοδος:  $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$  [Εξίσωση 14]

Άνοδος:  $2OH^- \rightarrow \frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^-$  [Εξίσωση 12]

Συνολική:  $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$  [Εξίσωση 15]


Η AEL προσφέρει υψηλή σταθερότητα, χαμηλό κόστος κεφαλαίου και μεγάλη διάρκεια ζωής εξοπλισμού. Οι τυπικές αποδόσεις κυμαίνονται από 60–70% (LHV) και η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι 4.2–4.5 kWh/Nm<sup>3</sup>  $H_2$ . Παρόλο που είναι λιγότερο αποδοτική από πιο πρόσφατες τεχνολογίες όπως η PEM, η AEL είναι εμπορικά ώριμη και κατάλληλη για μεγάλες εγκαταστάσεις με χαμηλό λειτουργικό κόστος. 

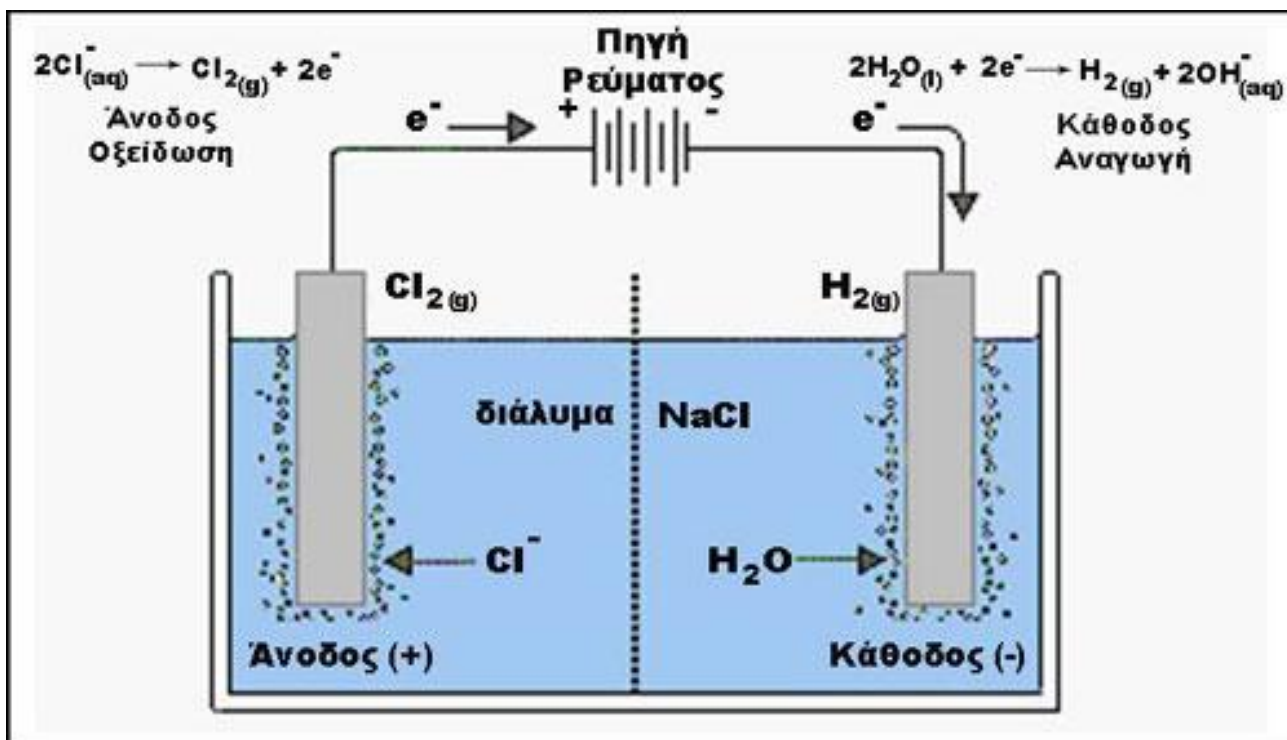
**Πλεονεκτήματα:**

- Χαμηλό κόστος κεφαλαίου και συντήρησης
- Εμπορική ωριμότητα και διαθεσιμότητα εξοπλισμού
- Μεγάλη διάρκεια ζωής (έως και 60.000 ώρες λειτουργίας)

**Μειονεκτήματα:**

- Περιορισμένη δυναμική απόκριση σε μεταβολές φορτίου
- Χρήση διαβρωτικών διαλυμάτων ( $KOH$ )
- Μεγαλύτερες απαιτήσεις συστήματος καθαρισμού αερίων

Η AEL παραμένει η κύρια επιλογή σε εφαρμογές όπου η απαίτηση για χαμηλό κόστος επένδυσης είναι υψηλή, ενώ χρησιμοποιείται και σε έργα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε σταθερό προφίλ (π.χ. υδροηλεκτρικά, γεωθερμία). 



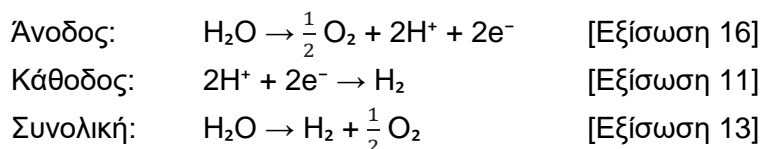
Σχήμα 9: Ηλεκτρόλυση διαλύματος NaCl – παραγωγή υδρογόνου

- **Ηλεκτρόλυση με Μεμβράνες Ανταλλαγής Πρωτονίων – Proton Exchange Membrane (PEM)**

Η ηλεκτρόλυση με μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) είναι μια σύγχρονη τεχνολογία ηλεκτρολυτικής παραγωγής υδρογόνου (H<sub>2</sub>), που προσφέρει υψηλή αποδοτικότητα, δυναμική απόκριση και συμβατότητα με διαλείπουσες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η τεχνολογία βασίζεται στη χρήση στερεάς πολυμερικής μεμβράνης, η οποία επιτρέπει τη διέλευση πρωτονίων από την άνοδο προς την κάθοδο, ενώ διαχωρίζει τα αέρια προϊόντα.

Το νερό διασπάται στην άνοδο, παράγοντας οξυγόνο, πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Τα πρωτόνια μετακινούνται μέσω της μεμβράνης προς την κάθοδο, όπου ενώνονται με τα ηλεκτρόνια για να παραχθεί υδρογόνο. 25

**Χημικές αντιδράσεις:**



Η λειτουργία γίνεται σε θερμοκρασία 50–80°C και πίεση έως και 30 bar, χωρίς την ανάγκη χρήσης διαβρωτικών αλκαλικών διαλυμάτων. Η απόδοση της PEM ηλεκτρόλυσης φτάνει το 70–85% (LHV), ενώ η καθαρότητα του παραγόμενου H<sub>2</sub> είναι εξαιρετικά υψηλή (>99.999%). 23

**Πλεονεκτήματα:**

- Υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα
- Λειτουργία σε υψηλή πίεση χωρίς συμπίεσή
- Συμπαγής και αρθρωτή κατασκευή
- Ιδανική για χρήση με φωτοβολταϊκά ή ανεμογεννήτριες

**Μειονεκτήματα:**

- Χρήση πολύτιμων μετάλλων ως καταλύτες (Pt, Ir)
- Υψηλότερο κόστος εγκατάστασης σε σύγκριση με AEL
- Περιορισμένη εμπορική διάθεση μεγάλων συστημάτων

Η PEM τεχνολογία επιλέγεται σε εφαρμογές που απαιτούν ευέλικτη λειτουργία, γρήγορη απόκριση και αυστηρές προδιαγραφές καθαρότητας αερίου. Αναμένεται αύξηση της διείσδυσής της με την πτώση του κόστους των καταλυτών. 29

- **Ηλεκτρόλυση σε υψηλές θερμοκρασίες – Solid Oxide Electrolysis Cells (SOEC)**

Η ηλεκτρόλυση υψηλής θερμοκρασίας με στερεά οξειδία (Solid Oxide Electrolysis Cells - SOEC) είναι μια προηγμένη τεχνολογία που λειτουργεί σε θερμοκρασίες 600–850°C και χρησιμοποιεί στερεά κεραμικά ηλεκτρολύτες (συνήθως βασισμένους σε ζirkονία) για τη μεταφορά οξυγόνιων ανιόντων ( $O^{2-}$ ) από την κάθοδο προς την άνοδο. **30**

Η υψηλή θερμοκρασία μειώνει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για την ηλεκτρόλυση, καθώς μέρος της απαιτούμενης ενέργειας παρέχεται ως θερμότητα. Αυτό καθιστά τη μέθοδο SOEC ιδιαίτερα αποδοτική όταν συνδυάζεται με πηγές θερμότητας χαμηλού κόστους (π.χ. πυρηνική ή γεωθερμική ενέργεια). **31**

**Χημικές αντιδράσεις (σε μορφή υδρατμών):**

Κάθοδος:  $H_2O(g) + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-}$  [Εξίσωση 17]

Άνοδος:  $O^{2-} \rightarrow \frac{1}{2} O_2 + 2e^-$  [Εξίσωση 18]

Συνολική:  $H_2O(g) \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$  [Εξίσωση 19]

Η απόδοση της SOEC μπορεί να ξεπεράσει το 90% (LHV) σε ιδανικές συνθήκες, καθιστώντας την τη θεωρητικά πιο αποδοτική τεχνολογία ηλεκτρόλυσης. Ωστόσο, η λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες δημιουργεί προκλήσεις όσον αφορά την ανθεκτικότητα των υλικών και την πολυπλοκότητα του συστήματος. **32**

**Πλεονεκτήματα:**


- Πολύ υψηλή απόδοση (έως 90%)
- Δυνατότητα αξιοποίησης απορριπτόμενης θερμότητας
- Κατάλληλη για θερμοχημικά συστήματα


**Μειονεκτήματα:**

- Περιορισμένη διάρκεια ζωής κυψελών λόγω θερμικών καταπονήσεων
- Πολυπλοκότητα ελέγχου θερμοκρασίας
- Υψηλό κόστος υλικών και συστημάτων θέρμανσης

Η SOEC βρίσκεται ακόμα σε στάδιο έρευνας και πιλοτικής εφαρμογής, αλλά παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον για μελλοντική αξιοποίηση σε ολοκληρωμένα ενεργειακά συστήματα power-to-gas και παραγωγής υδρογόνου σε βιομηχανική κλίμακα. **33**

- **Φωτοηλεκτροκατάλυση - Photoelectrochemical Water Splitting (PEC)**

Η φωτοηλεκτροκατάλυση (PEC) αποτελεί μία υποσχόμενη τεχνολογία άμεσης παραγωγής υδρογόνου από ηλιακή ενέργεια, μέσω της διάσπασης του νερού σε υδρογόνο (H<sub>2</sub>) και οξυγόνο (O<sub>2</sub>), με χρήση φωτοηλεκτροδίων και ημιαγωγικών υλικών. Η βασική αρχή της PEC βασίζεται στη δημιουργία ηλεκτρονίων και οπών όταν τα φωτοηλεκτρόδια ακτινοβολούνται με φως κατάλληλης ενέργειας. 

Κατά τη λειτουργία, τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται στην κάθοδο όπου πραγματοποιείται η αναγωγή του νερού σε H<sub>2</sub>, ενώ οι οπές οδηγούν στην οξείδωση του νερού στην άνοδο για παραγωγή O<sub>2</sub>. Το κύτταρο PEC μπορεί να είναι μονοηλεκτρόδιο ή διπλής φωτοκαταλυτικής δράσης (dual photoelectrode), συνήθως βασισμένο σε ημιαγωγούς όπως TiO<sub>2</sub>, α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cu<sub>2</sub>O ή Si. 

**Βασικές αντιδράσεις:**

Άνοδος:  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$  [Εξίσωση 16]

Κάθοδος:  $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$  [Εξίσωση 11]


Συνολική:  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$  [Εξίσωση 13]

**Πλεονεκτήματα:**

- Άμεση μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε χημική (H<sub>2</sub>)
- Απλοποιημένη διάταξη χωρίς ανάγκη εξωτερικού κυκλώματος
- Δυνατότητα ένταξης σε ηλιακά πάρκα

**Μειονεκτήματα:**

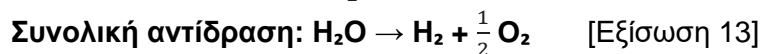
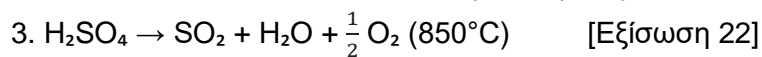
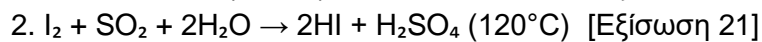
- Χαμηλή απόδοση (<10%) για τα περισσότερα υλικά
- Φωτοδιαβρωσιμότητα και περιορισμένη σταθερότητα ημιαγωγών
- Υψηλό κόστος υλικών και τεχνογνωσίας

Η φωτοηλεκτροκατάλυση βρίσκεται σήμερα σε στάδιο εντατικής έρευνας και ανάπτυξης, με έμφαση στη σύνθεση νέων φωτοκαταλυτών, την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης και τη σταθερότητα της διεργασίας. Υβριδικές λύσεις PEC–PV και ενσωμάτωση με τεχνολογίες αποθήκευσης αναμένεται να ενισχύσουν την πρακτική της εφαρμογή. 

- Θερμοχημικοί Κύκλοι Διάσπασης Νερού (Thermochemical Water Splitting Cycles)

Οι θερμοχημικοί κύκλοι διάσπασης νερού είναι μια κατηγορία τεχνολογιών που χρησιμοποιούν θερμότητα (συνήθως άνω των 800°C) για την παραγωγή υδρογόνου (H<sub>2</sub>) και οξυγόνου (O<sub>2</sub>) από νερό, μέσω πολύπλοκων χημικών αντιδράσεων που δεν απαιτούν την άμεση χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κύκλοι αυτοί περιλαμβάνουν διαδοχικές αντιδράσεις αποσύνθεσης και αναγέννησης χημικών ενώσεων, χωρίς καθαρή κατανάλωσή τους. 37

Ο πιο γνωστός και μελετημένος κύκλος είναι ο κύκλος ιωδίου-θείου (I-S cycle), που αποτελείται από τρία βασικά στάδια:



Η καθαρή απόδοση του κύκλου I-S θεωρητικά ξεπερνά το 40%, ενώ η συνολική θερμοαπαιτούμενη ενέργεια κυμαίνεται μεταξύ 300–400 MJ/kg H<sub>2</sub>. Ο κύκλος μπορεί να λειτουργήσει με θερμότητα από ηλιακούς συγκεντρωτές (CSP) ή από αντιδραστήρες υψηλής θερμοκρασίας (π.χ. Gen IV πυρηνικά). 38

Άλλοι μελετώμενοι κύκλοι περιλαμβάνουν:

- Κύκλος Cu-Cl (χαλκού-χλωρίου), λειτουργία στους 500–550°C
- Κύκλος Zn/ZnO με χρήση οξειδίων μετάλλων
- Hybrid Sulfur Cycle (Westinghouse), που συνδυάζει ηλεκτρόλυση με θερμοχημικά στάδια

**Πλεονεκτήματα:**

- Δυνατότητα παραγωγής υδρογόνου με καθαρή θερμότητα
- Αποφυγή χρήσης ηλεκτρικού ρεύματος
- Υψηλό θεωρητικό δυναμικό αποδοτικότητας

**Μειονεκτήματα:**

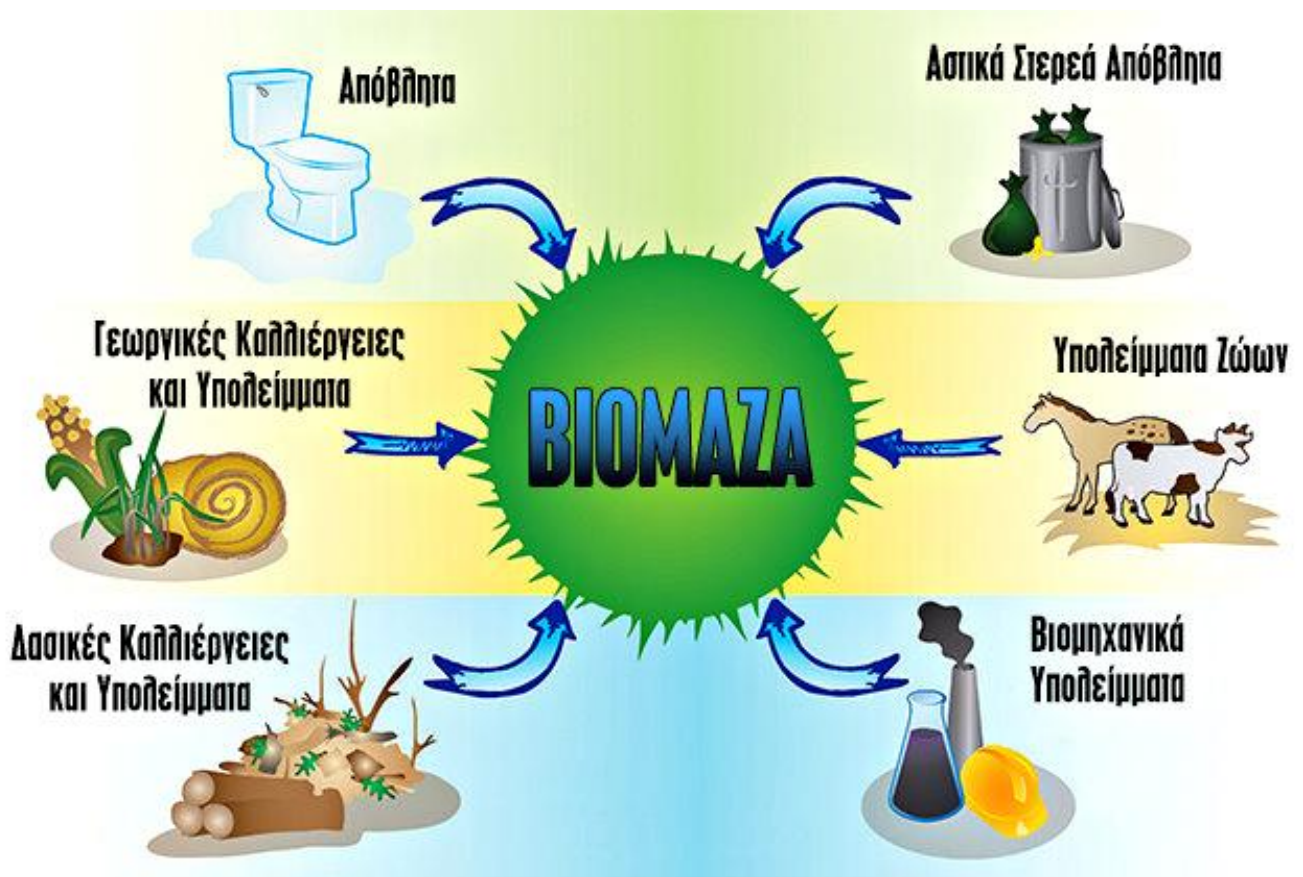
- Πολυπλοκότητα διεργασιών και αντιδραστήρων
- Υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας
- Απαιτήση για υλικά υψηλής αντοχής
- Ακόμα σε πιλοτικό στάδιο

Η ερευνητική κοινότητα επικεντρώνεται στη βελτίωση των αποδόσεων, τη μείωση της ενεργειακής απαίτησης και την ανάπτυξη υλικών που μπορούν να αντέξουν ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας και χημικής διάβρωσης. 39



## 2.1.Γ. Υδρογόνο από Βιομάζα

- Ζύμωση βιομάζας
- Αεριοποίηση και πυρόλυση βιομάζας



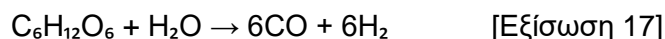
Σχήμα 10: Πηγές πρώτων υλών για παραγωγή βιομάζας

Η παραγωγή υδρογόνου (H<sub>2</sub>) από βιομάζα αποτελεί μια ανανεώσιμη και περιβαλλοντικά φιλική προσέγγιση για την απανθρακοποίηση του ενεργειακού τομέα. Η βιομάζα περιλαμβάνει οργανικά υλικά όπως γεωργικά υπολείμματα, απόβλητα τροφίμων, ξυλεία, καθώς και ενεργειακές καλλιέργειες. Η μετατροπή της σε υδρογόνο μπορεί να γίνει μέσω θερμοχημικών και βιολογικών διεργασιών. [40](#)

#### Κύριες μέθοδοι:

- Θερμοχημική αεριοποίηση
- Πυρόλυση βιομάζας
- Υγρή αναμόρφωση βιοελαίων (bio-oil)
- Βιολογική ζύμωση και φωτολυτική παραγωγή H<sub>2</sub>

Η πιο ώριμη τεχνολογία είναι η αεριοποίηση, όπου η βιομάζα θερμαίνεται παρουσία περιορισμένου οξυγόνου ή/και ατμού για παραγωγή συνθετικού αερίου (syngas), το οποίο εμπεριέχει H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> και CH<sub>4</sub>. Ακολουθείται από μετατόπιση αερίου-νερού (WGS) και καθαρισμό για ανάκτηση H<sub>2</sub> :



Η αποδοτικότητα της αεριοποίησης μπορεί να φτάσει έως 65% ανάλογα με τον τύπο της βιομάζας και τις συνθήκες λειτουργίας. Η χρήση ατμού ευνοεί την παραγωγή H<sub>2</sub> μέσω αύξησης του H/C λόγου στο παραγόμενο syngas. [41](#)

Η πυρόλυση οδηγεί στην παραγωγή βιοελαίων, τα οποία στη συνέχεια υπόκεινται σε υγρή αναμόρφωση (aqueous phase reforming - APR), μία τεχνολογία που λειτουργεί σε ήπιες θερμοκρασίες (200–300°C), επιτρέποντας ενσωμάτωση με χαμηλής ποιότητας βιομάζα. [42](#)

Οι βιολογικές διεργασίες περιλαμβάνουν τη σκοτεινή και φωτο-ζύμωση, με χρήση μικροοργανισμών όπως *Clostridium* sp. ή *Rhodobacter* sp., αλλά προς το παρόν παρουσιάζουν χαμηλές αποδόσεις (<10%) και περιορίζονται σε ερευνητικό επίπεδο. [43](#)

#### Πλεονεκτήματα:

- Χρήση αποβλήτων – μη ανταγωνιστική με τρόφιμα
- Ανανεώσιμη πηγή H<sub>2</sub> με χαμηλό ανθρακικό αποτύπωμα
- Ποικιλία διαθέσιμων πρώτων υλών

#### Μειονεκτήματα:

- Μεταβλητότητα σύστασης πρώτης ύλης
- Ανάγκη για προεπεξεργασία και καθαρισμό syngas
- Τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις σε μεγάλη κλίμακα

Η παραγωγή  $H_2$  από βιομάζα είναι ιδιαίτερα ελκυστική για αγροτικές και αποκεντρωμένες περιοχές, ενώ η ενσωμάτωσή της σε κυκλικές οικονομίες μπορεί να προσφέρει πολλαπλά οφέλη στην ενεργειακή αυτονομία και την περιβαλλοντική διαχείριση. [\[44\]](#)



Σχήμα 11: Σύστημα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού από βιομάζα

## 2.2. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ & ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

### ➤ Μέθοδοι Αποθήκευσης Υδρογόνου



Σχήμα 12: Μονάδες αποθήκευσης  $H_2$

### A. ΦΥΣΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

- Συμπιεσμένο υδρογόνο
- Υγροποιημένο υδρογόνο

### B. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕ ΧΗΜΕΙΟΡΟΦΗΣΗ

- Υδρίδια μετάλλων
- Μη-μεταλλικά χημικά Υδρίδια

### Γ. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕ ΦΥΣΙΟΡΟΦΗΣΗ

### ➤ Μέθοδοι Μεταφοράς Υδρογόνου



Σχήμα 13: Μονάδες μεταφοράς  $H_2$

Η αποθήκευση και μεταφορά του υδρογόνου ( $H_2$ ) αποτελεί κρίσιμη πτυχή στην ανάπτυξη της οικονομίας του υδρογόνου. Η φύση του  $H_2$  ως το ελαφρύτερο μόριο με υψηλή διαπερατότητα και χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα κατ' όγκο δημιουργεί σημαντικές τεχνολογικές και οικονομικές προκλήσεις για την ασφαλή και αποδοτική διαχείρισή του. [45](#)

Οι κύριες στρατηγικές αποθήκευσης και μεταφοράς περιλαμβάνουν:

- Φυσική αποθήκευση (υψηλή πίεση ή υγροποίηση)
- Χημική αποθήκευση (μέσω φορέων όπως αμμωνία, υδρίδια μετάλλων, οργανικές ενώσεις)
- Υλικά αποθήκευσης μέσω φυσιορόφησης (adsorption σε πορώδη υλικά)

### 1. Συμπιεσμένο Υδρογόνο (Compressed $H_2$ ):

Το  $H_2$  αποθηκεύεται σε πιεστικά δοχεία 350–700 bar. Χρησιμοποιείται κυρίως για αυτοκίνητα καυσίμου και φορητές εφαρμογές. Αν και προσφέρει ευελιξία και απλότητα, συνοδεύεται από ενεργειακό κόστος συμπίεσης (~10–15% της ενέργειας του  $H_2$ ) και ανάγκη για υψηλή μηχανική αντοχή δοχείων. [46](#)

### 2. Υγροποιημένο Υδρογόνο (Liquid $H_2$ ):

Το  $H_2$  υγροποιείται σε  $-253^\circ\text{C}$  για πυκνή αποθήκευση. Χρησιμοποιείται σε διαστημικές εφαρμογές και μεταφορές μεγάλης απόστασης. Η υγροποίηση καταναλώνει ~30–40% της ενέργειας του  $H_2$  και απαιτεί κρυογενική υποδομή. [47](#)

### 3. Υδρίδια Μετάλλων (Metal Hydrides):

Πρόκειται για κράματα που απορροφούν  $H_2$  αναστρέψιμα υπό συνθήκες πίεσης/θερμοκρασίας, π.χ.  $MgH_2$ ,  $LaNi_5H_6$ . Παρέχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα κατ' όγκο και ασφάλεια, αλλά συχνά έχουν μεγάλο βάρος και περιορισμένο ρυθμό απορρόφησης/απελευθέρωσης. [48](#)

### 4. Φυσιορόφηση σε Πορώδη Υλικά:

Εξετάζονται υλικά όπως ενεργός άνθρακας, MOFs (metal-organic frameworks) και υλικά νανοτεχνολογίας, που απορροφούν  $H_2$  σε χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλή πίεση. Η έρευνα εστιάζει στην αύξηση της χωρητικότητας και στη σταθερότητα κύκλων φόρτισης. [49](#)

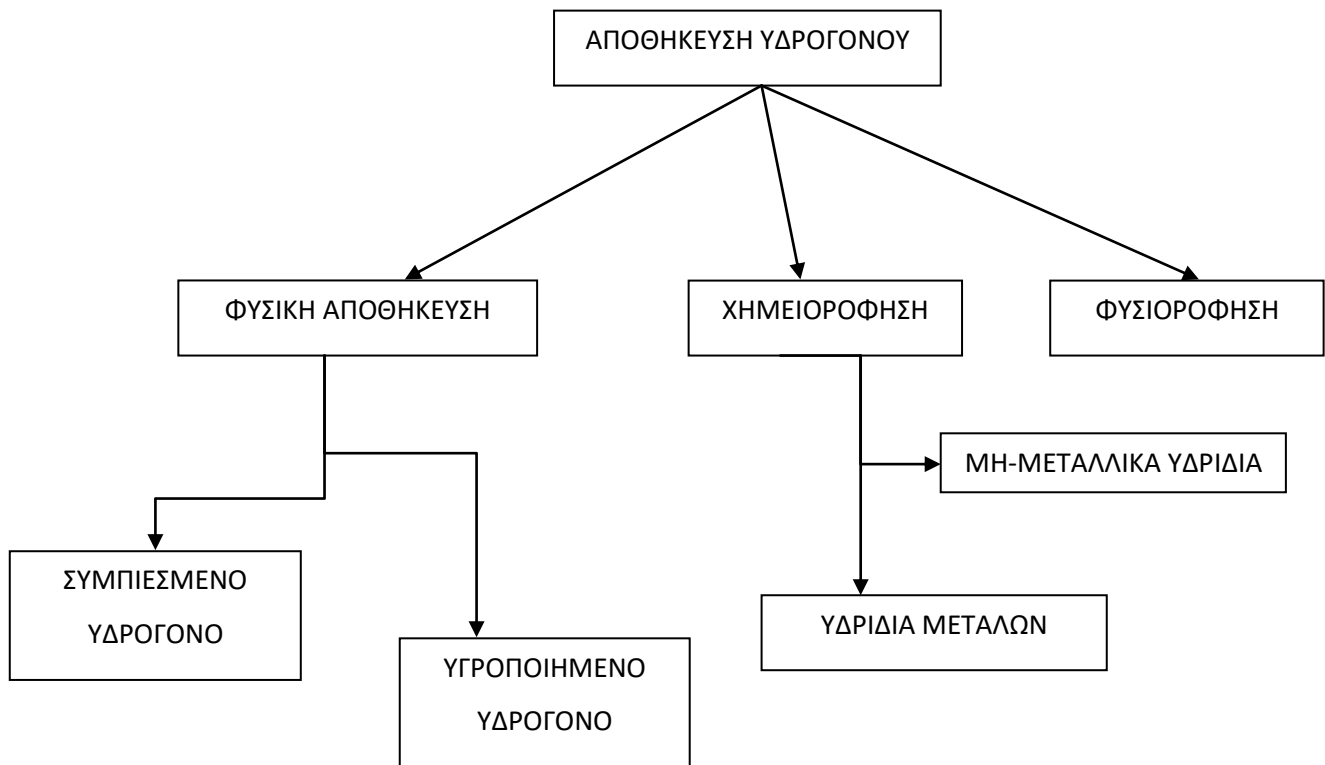
### 5. Χημικοί Φορείς (Liquid Organic Hydrogen Carriers - LOHCs):

Περιλαμβάνουν οργανικές ενώσεις όπως το τολουόλιο που υδρογονώνονται για μεταφορά  $H_2$  και αποϋδρογονώνονται κατά την χρήση. Προσφέρουν ευκολία χρήσης σε υπάρχουσα υποδομή, με κύριο μειονέκτημα την ανάγκη θερμικής ενέργειας για την απελευθέρωση του  $H_2$ . [50](#)

Η μεταφορά του  $H_2$  πραγματοποιείται:

- Με αγωγούς (σε υψηλή πίεση ή μέσω μετατροπής σε αμμωνία)
- Με δεξαμενές υψηλής πίεσης ή υγρού  $H_2$
- Μέσω χημικών φορέων ή σε μορφή LOHC

Η επιλογή μεθόδου εξαρτάται από την εφαρμογή, την απόσταση μεταφοράς, την οικονομία κλίμακας και το ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος. [51](#)



Διάγραμμα 1: Διάγραμμα Αποθήκευσης  $H_2$

## 2.2.A. Φυσική Αποθήκευση Υδρογόνου

Η φυσική αποθήκευση υδρογόνου βασίζεται στη διατήρησή του είτε υπό υψηλή πίεση είτε σε υγρή μορφή. Αποτελεί την πιο άμεση και τεχνολογικά ώριμη στρατηγική αποθήκευσης, ιδίως για εφαρμογές σε μεταφορές και φορητά συστήματα. Οι δύο βασικές μορφές φυσικής αποθήκευσης είναι:

- Συμπιεσμένο Υδρογόνο (Compressed H<sub>2</sub>)
- Υγροποιημένο Υδρογόνο (Liquid H<sub>2</sub>) 47

### **1. Συμπιεσμένο Υδρογόνο (Compressed Hydrogen):**

Το H<sub>2</sub> αποθηκεύεται υπό πίεση 350–700 bar σε κυλινδρικές ή σφαιρικές δεξαμενές. Χρησιμοποιείται κυρίως στα οχήματα κυψελών καυσίμου (FCEVs) και σε σταθμούς ανεφοδιασμού. Η αποθήκευση σε πίεση είναι απλή και δεν απαιτεί ψύξη, όμως παρουσιάζει σχετικά χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα (~5.6 MJ/L) και απαιτεί ανθεκτικά υλικά όπως ανθρακονήματα για αποφυγή διαρροών. 48

Το ενεργειακό κόστος συμπίεσης ανέρχεται σε 10–15% της ενεργειακής περιεκτικότητας του H<sub>2</sub>. Επιπλέον, απαιτείται αυστηρή πιστοποίηση των δοχείων κατά ISO 19881 και DOT. 53

### **2. Υγροποιημένο Υδρογόνο (Liquid Hydrogen):**

Το H<sub>2</sub> υγροποιείται σε θερμοκρασία -253°C υπό ατμοσφαιρική πίεση. Η μέθοδος αυτή αυξάνει σημαντικά την ενεργειακή πυκνότητα (8.5 MJ/L), γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για εφαρμογές μεγάλης εμβέλειας, όπως η αεροδιαστημική βιομηχανία και η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων. 49

Ωστόσο, η υγροποίηση απαιτεί υψηλή κατανάλωση ενέργειας (~30–40% της ενέργειας του H<sub>2</sub>), καθώς και τη χρήση εξειδικευμένων υλικών και κρυογενικών υποδομών για τη διατήρηση της θερμοκρασίας. Οι απώλειες λόγω εξάτμισης (boil-off) είναι επίσης ένας σημαντικός περιορισμός. 54

Πλεονεκτήματα:

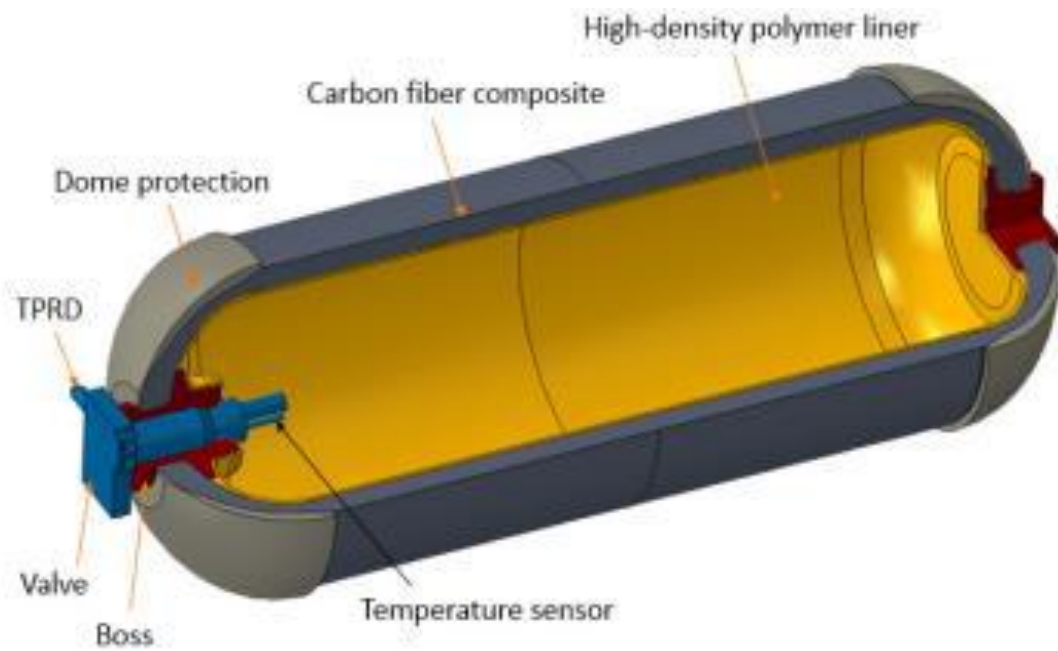
- Τεχνολογική ωριμότητα και εμπορική διαθεσιμότητα
- Σχετικά απλή υποδομή για συμπιεσμένο H<sub>2</sub>
- Υψηλή πυκνότητα ενέργειας σε υγρή μορφή

Μειονεκτήματα:

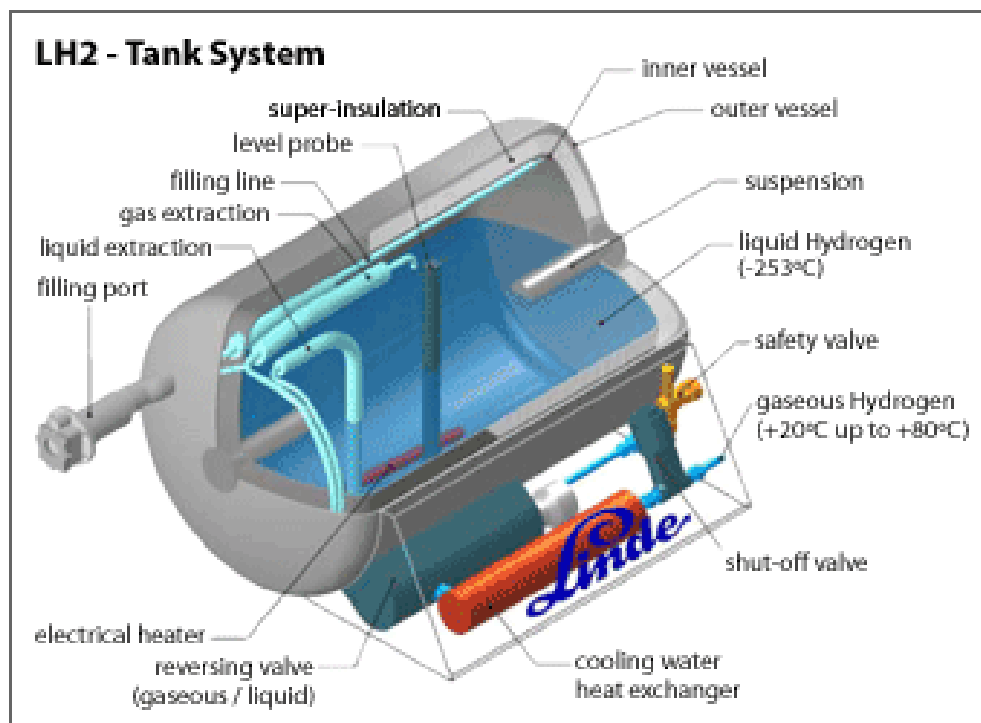
- Υψηλό κόστος συμπίεσης ή υγροποίησης
- Θέματα ασφαλείας λόγω πίεσης/χαμηλής θερμοκρασίας
- Χαμηλή πυκνότητα κατ' όγκο για συμπιεσμένο H<sub>2</sub>

Η φυσική αποθήκευση παραμένει το πρότυπο για κινητές εφαρμογές, ενώ συνεχίζεται η εξέλιξη υλικών για ελαφρύτερες και ασφαλέστερες δεξαμενές. Η υγροποίηση παρουσιάζει προοπτικές για εφοδιασμό υδρογόνου σε διεθνή δίκτυα μέσω λιμένων και μεγάλων σταθμών. 7





Σχήμα 14: Δεξαμενή πίεσης για αποθήκευση υδρογόνου σε οχήματα κατασκευασμένη από σύνθετα υλικά.




Σχήμα 15: Σύστημα δεξαμενής αποθήκευσης υγρού υδρογόνου



## ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Οι συμπιεστές υδρογόνου (Hydrogen Compressors) αποτελούν κρίσιμο στοιχείο σε συστήματα παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής υδρογόνου, καθώς επιτρέπουν τη συμπίκνωση του αερίου σε υψηλές πιέσεις, απαραίτητες για:

- Τροφοδοσία κυψελών καυσίμου
- Πλήρωση δεξαμενών FCEV (Fuel Cell Electric Vehicles)
- Αποθήκευση σε κυλίνδρους ή υποδομές υδρογόνου
- Μεταφορά μέσω σωληνώσεων ή βυτίων. 

### Κατηγορίες Συμπιεστών Υδρογόνου

#### **1. Μηχανικοί Συμπιεστές (Mechanical Compressors)**

Χρησιμοποιούν μηχανική ενέργεια για να μειώσουν τον όγκο του αερίου.

Εμβολοφόροι (Piston Compressors): Πίεση έως ~900 bar, υψηλή απόδοση, χαμηλό κόστος, αλλά απαιτούν λίπανση.

Διαφραγματικοί (Diaphragm Compressors):

Ιδανικοί για υψηλή καθαρότητα, έως 1000 bar, χωρίς επαφή μετάλλου-αερίου.

Κοχλιωτοί (Screw Compressors): Συνεχής ροή, κατάλληλοι για χαμηλές πιέσεις (~30 bar).

#### **2. Ισοθερμικοί & Ισοβαρείς Συμπιεστές**


Υδραυλικοί (Hydraulic Piston Compressors): Υδραυλικά έμβολα, υψηλές πιέσεις, ελάχιστες διαρροές.

Booster Compressors: Έλεγχος πίεσης/ροής, χρήση σε ανεφοδιασμό υδρογόνου.

#### **3. Συμπιεστές Κατάστασης Υλικού (Non-Mechanical Compressors)**

Μεταλλικής Υδριδικής Απορρόφησης (Metal Hydride Compressors):

Χρήση θερμότητας για απορρόφηση/αποδέσμευση.

Εлектроχημικοί (Electrochemical Compressors): Βασισμένοι σε PEM, υψηλή καθαρότητα, έως 1000 bar. 


#### **Τεχνικά Χαρακτηριστικά**

- Πίεση εξόδου: 200–1000 bar
- Καθαρότητα υδρογόνου: >99.999%
- Απόδοση συμπίεσης: 50–80%
- Ρυθμός ροής: 0.1–100 Nm<sup>3</sup>/h
- Κατανάλωση ενέργειας: 2–4 kWh/kg H<sub>2</sub>

#### **Θέματα Ασφάλειας**

- Το υδρογόνο έχει πολύ μικρό μοριακό μέγεθος → αυξημένες πιθανότητες διαρροών
- Εύφλεκτο και εκρηκτικό
- Απαιτείται χρήση ανοξείδωτων κραμάτων, ανιχνευτές διαρροής, καλός εξαερισμός

### **Εφαρμογές**

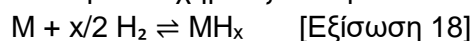
- Πλήρωση FCEV
- Βιομηχανική αποθήκευση
- Δίκτυα μεταφοράς H<sub>2</sub>
- Power-to-Gas (PtG) 

## 2.2.B. Αποθήκευση Υδρογόνου με Χημειορόφηση

Η χημειορόφηση είναι μια μορφή αποθήκευσης υδρογόνου στην οποία το αέριο  $H_2$  απορροφάται σε στερεές ουσίες μέσω χημικών δεσμών. Η διεργασία αυτή είναι διαφορετική από τη φυσιορόφηση (που βασίζεται σε ασθενείς δυνάμεις Van der Waals) και οδηγεί σε ισχυρότερη σύνδεση μεταξύ του  $H_2$  και του υλικού-φορέα. [51] Οι πιο διαδεδομένοι φορείς χημειορόφησης είναι τα μεταλλικά υδρίδια (metal hydrides), όπως:

- $MgH_2$  (υδρίδιο μαγνησίου)
- $LaNi_5H_6$
- $TiFeH_2$
- $NaAlH_4$  (σύνθετα υδρίδια) [49]

Τα υδρίδια σχηματίζονται μέσω αντιστρεπτών αντιδράσεων:



Η απορρόφηση απαιτεί την ύπαρξη κατάλληλων πιέσεων και θερμοκρασιών, ενώ η αποδέσμευση του  $H_2$  πραγματοποιείται με θέρμανση. Για παράδειγμα, το  $MgH_2$  απελευθερώνει  $H_2$  στους  $300\text{--}400^\circ\text{C}$ , ενώ το  $LaNi_5$  στους  $50\text{--}100^\circ\text{C}$ .

### **Πλεονεκτήματα:**

- Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα κατ' όγκο (έως  $150 \text{ kg } H_2/\text{m}^3$ )
- Ασφαλής αποθήκευση χωρίς υψηλή πίεση
- Δυνατότητα αντιστρεψιμότητας σε πολλούς κύκλους

### **Μειονεκτήματα:**

- Υψηλό βάρος υλικών (χαμηλή πυκνότητα κατά μάζα)
- Θερμικές απαιτήσεις για αποδέσμευση  $H_2$
- Μείωση αποδοτικότητας λόγω αποσύνθεσης καταλυτών

Η έρευνα επικεντρώνεται στην ανάπτυξη νέων σύνθετων υδριδίων με χαμηλότερες θερμοκρασίες αποδέσμευσης, βελτιωμένη θερμοδυναμική σταθερότητα και κύκλους ζωής πάνω από 1000 κύκλους. [53]

Η χημειορόφηση ενδείκνυται κυρίως για στατικές εφαρμογές (π.χ. σταθμούς αποθήκευσης, backup συστήματα) λόγω του υψηλού βάρους, αλλά προσφέρει σημαντική ασφάλεια και πυκνότητα κατ' όγκο. [7]

## 2.2.Γ. Αποθήκευση Υδρογόνου με Φυσιορόφηση

Η φυσιορόφηση είναι μια διεργασία αποθήκευσης υδρογόνου όπου τα μόρια  $H_2$  προσκολλώνται στην επιφάνεια στερεών υλικών μέσω ασθενών δυνάμεων Van der Waals, χωρίς τη δημιουργία χημικών δεσμών. Πρόκειται για διαδικασία αναστρέψιμη, που απαιτεί χαμηλές θερμοκρασίες (π.χ. υγρό άζωτο στους  $-196^\circ C$ ) και μέτριες πιέσεις. [51]

Η απόδοση της φυσιορόφησης εξαρτάται κυρίως από την ειδική επιφάνεια και τη δομή των υλικών. Τα υλικά που έχουν μελετηθεί εκτενώς είναι:

- Ενεργός άνθρακας
- MOFs (metal-organic frameworks)
- Zeolites
- Carbon nanotubes και graphene-based υλικά [52]

Η μέγιστη χωρητικότητα σε  $H_2$  (wt%) των υλικών αυτών κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 0.5% και 7% κατά βάρος σε θερμοκρασίες  $\sim 77$  K και πίεση έως 100 bar. Η διαδικασία προσφέρει ασφάλεια, ταχεία κινητική απορρόφησης/εκρόφησης και ευελιξία, αλλά απαιτεί κρυογενική ψύξη, η οποία αυξάνει το ενεργειακό και οικονομικό κόστος. [50]

### **Πλεονεκτήματα:**

- Υψηλή αναστρεψιμότητα και ταχεία απόκριση
- Ασφαλής διαδικασία χωρίς αντιδράσεις
- Ελαφριά υλικά και μικρή πολυπλοκότητα υποδομής

### **Μειονεκτήματα:**

- Απαιτείται πολύ χαμηλή θερμοκρασία (cryogenic)
- Χαμηλή πυκνότητα αποθήκευσης υπό συνθήκες περιβάλλοντος
- Ανάγκη για προηγμένα πορώδη υλικά υψηλού κόστους

Η έρευνα συνεχίζεται για την ανάπτυξη νέων υλικών υψηλής χωρητικότητας σε θερμοκρασίες κοντά στο περιβάλλον. Τα MOFs είναι ιδιαίτερα υποσχόμενα λόγω της ρυθμιζόμενης πορώδους δομής και των δυνατοτήτων λειτουργικής τροποποίησης. [51]

## 2.3. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Η κατανάλωση υδρογόνου ( $H_2$ ) αφορά την τελική χρήση του είτε ως καύσιμο, είτε ως πρώτη ύλη σε βιομηχανικές διεργασίες. Με την προώθηση της πράσινης μετάβασης και των στόχων απανθρακοποίησης, το  $H_2$  αποκτά όλο και μεγαλύτερη σημασία ως καθαρός ενεργειακός φορέας. [\[62\]](#)

**Οι βασικές κατηγορίες κατανάλωσης περιλαμβάνουν:**

- Μηχανές Εσωτερικής Καύσης
- Κυψέλες Καυσίμου (Fuel Cells)
- Άμεση Καύση για Θέρμανση
- Βιομηχανική χρήση (διυλιστήρια, χημική βιομηχανία)

### 1. Μηχανές Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου ( $H_2$ ICEs):

Το  $H_2$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε τροποποιημένες μηχανές εσωτερικής καύσης, όπως σε φορτηγά και τρένα. Η καύση είναι καθαρή, με το κύριο παραπροϊόν να είναι το νερό, αλλά σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να παραχθούν  $NO_x$ . Η απόδοση είναι παρόμοια με τους κινητήρες βενζίνης (~30–38%). [\[62\]](#)

### 2. Κυψέλες Καυσίμου Υδρογόνου (Fuel Cells):

Η πιο αποδοτική και καθαρή χρήση του  $H_2$ . Η ηλεκτροχημική μετατροπή παράγει ηλεκτρισμό με απόδοση 40–60% (ή έως 85% με συμπαραγωγή θερμότητας). Οι κύριοι τύποι είναι οι PEMFCs για οχήματα και οι SOFCs για στατικές εφαρμογές. [\[63\]](#)

### 3. Άμεση Καύση για Θέρμανση:

Το  $H_2$  χρησιμοποιείται απευθείας σε βιομηχανικούς καυστήρες, λέβητες ή φούρνους, αντικαθιστώντας φυσικό αέριο. Προσφέρει θερμότητα χωρίς  $CO_2$ , αλλά απαιτεί ανασχεδιασμό εξοπλισμού λόγω διαφορετικών θερμοφυσικών ιδιοτήτων. [\[6\]](#)

### 4. Βιομηχανική Χρήση:

Το 2022, ~55% της παγκόσμιας ζήτησης  $H_2$  αφορούσε την παραγωγή αμμωνίας ( $NH_3$ ), ~25% διυλιστήρια και 10% παραγωγή μεθανόλης. Η πράσινη παραγωγή  $H_2$  μπορεί να απανθρακοποιήσει αυτές τις διεργασίες. [\[64\]](#)

Οι μελλοντικές εφαρμογές επεκτείνονται σε:

- Αποθήκευση ενέργειας (power-to-gas)
- Ναυτιλία και αερομεταφορές
- Καθαρές βαριές βιομηχανίες (π.χ. χάλυβας, τσιμέντο)

Η κατανάλωση  $H_2$  εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα καθαρής παραγωγής, την ανάπτυξη υποδομών και την πολιτική υποστήριξη. [\[65\]](#)

### 2.3.1 Μηχανές Εσωτερικής Καύσης – Hydrogen Internal Combustion Engines (ICE)

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου (Hydrogen Internal Combustion Engines - H<sub>2</sub> ICEs) αποτελούν μία από τις πρώτες τεχνολογίες αξιοποίησης του H<sub>2</sub> ως καυσίμου, μέσω της καύσης του σε τροποποιημένους θερμικούς κινητήρες. Σε σύγκριση με τις κλασικές βενζινομηχανές, το υδρογόνο παρουσιάζει σημαντικά διαφορετικά θερμοφυσικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη λειτουργία και τον σχεδιασμό του κινητήρα. [62]

Χαρακτηριστικά του H<sub>2</sub> ως καυσίμου:

- Ευρεία περιοχή αναφλεξιμότητας (4–75%)
- Χαμηλή ενέργεια έναυσης (0.02 mJ)
- Πολύ υψηλή ταχύτητα καύσης
- Μηδενικές εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά την καύση

**Η βασική χημική αντίδραση είναι:**



Η θερμοκρασία φλόγας είναι περίπου 2045°C, υψηλότερη από της βενζίνης (~1970°C), γεγονός που συμβάλλει στην παραγωγή NO<sub>x</sub> υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες καύσης. [66]

**Πλεονεκτήματα:**

- Χρήση υπάρχουσας τεχνολογικής βάσης και υποδομών
- Γρήγορη μετάβαση για βαρέα οχήματα και απομακρυσμένες περιοχές
- Μηδενικές CO<sub>2</sub> εκπομπές

**Μειονεκτήματα:**

- Χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση (30–38%) σε σχέση με κυψέλες καυσίμου
- Παραγωγή NO<sub>x</sub> απαιτεί μεθόδους καταστολής (EGR, lean-burn, καταλύτες)
- Μεγάλη κατανάλωση H<sub>2</sub> λόγω χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας

Βιομηχανικές εφαρμογές έχουν υλοποιηθεί σε οχήματα (π.χ. BMW Hydrogen 7), φορτηγά (Toyota, Cummins), πλοία και γεννήτριες. Η τεχνολογία προσφέρει λύσεις μετάβασης όπου οι κυψέλες καυσίμου δεν είναι ώριμες ή οικονομικά βιώσιμες. [67] Στρατηγικά, οι H<sub>2</sub> ICEs μπορούν να συμβάλουν στην απανθρακοποίηση του τομέα των μεταφορών σε συνδυασμό με H<sub>2</sub> από ανανεώσιμες πηγές. [7]

### 2.3.2 Κυψέλη Καυσίμου Υδρογόνου – Fuel Cells

Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου (Fuel Cells) είναι ηλεκτροχημικές διατάξεις που μετατρέπουν την χημική ενέργεια του  $H_2$  σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα, με υψηλή απόδοση και μηδενικές εκπομπές  $CO_2$ , όταν το  $H_2$  προέρχεται από καθαρές πηγές. Το μόνο παραπροϊόν είναι το νερό. [73]

Η βασική αρχή λειτουργίας περιλαμβάνει:

• Οξείδωση του  $H_2$  στην άνοδο:  $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$  [Εξίσωση 19]

• Μείωση του  $O_2$  στην κάθοδο:  $\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$  [Εξίσωση 20]

Συνολική αντίδραση:  $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O + \text{ηλεκτρική ενέργεια}$  [Εξίσωση 21]

Οι κύριοι τύποι κυψελών καυσίμου είναι:

• PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell):

Λειτουργεί σε θερμοκρασίες 60–80°C, ιδανική για οχήματα λόγω ταχείας εκκίνησης και υψηλής πυκνότητας ισχύος.

• SOFC (Solid Oxide Fuel Cell):

Υψηλής θερμοκρασίας (600–1000°C), κατάλληλη για σταθερές εφαρμογές και συμπαραγωγή.

• AFC, PAFC, MCFC:

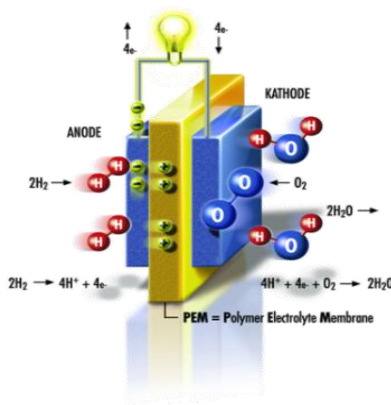
Εξειδικευμένες χρήσεις σε βιομηχανία ή σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. [69]

**Πλεονεκτήματα:**

- Υψηλή απόδοση μετατροπής (40–60% ή >80% με συμπαραγωγή)
- Απουσία θορύβου και κραδασμών
- Μηδενικές εκπομπές και καλή δυναμική απόκριση

**Μειονεκτήματα:**

- Υψηλό κόστος κατασκευής (Pt, κεραμικά υλικά)
- Ευαισθησία σε καθαρότητα καυσίμου (ειδικά PEMFC)
- Περιορισμένη διάρκεια ζωής σε κάποιες τεχνολογίες



Σχήμα 16: Λειτουργία κυψέλης καυσίμου PEM

Η τεχνολογία κυψελών καυσίμου εξελίσσεται ραγδαία και χρησιμοποιείται ήδη σε:

- Οχήματα καυσίμου (π.χ. Toyota Mirai, Hyundai Nexo)
- Φορτηγά, τρένα και ναυτιλία
- Στατικές εφαρμογές ισχύος (data centers, μικροδίκτυα)

Το μέλλον των κυψελών συνδέεται άμεσα με την οικονομική διαθεσιμότητα καθαρού  $H_2$  και την πρόοδο στην ανάπτυξη καταλυτικών υλικών. [74]

Η διεργασία της ηλεκτρόλυσης λαμβάνει χώρα στην ηλεκτρολυτική κυψελίδα η οποία αποτελείται από ένα θετικό (άνοδος) και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος). Τα ηλεκτρόδια βυθίζονται σε απιονισμένο νερό το οποίο καθίσταται περισσότερο αγώγιμο με προσθήκη υδροξειδίου του καλίου (KOH). Η άνοδος κατασκευάζεται συνήθως από νικέλιο και χαλκό και είναι επικαλυμμένη με οξείδια μετάλλων όπως το μαγγάνιο, βολφράμιο και ρουθίνιο. Τα μέταλλα της ανόδου επιτρέπουν την ταχεία μετατροπή του ατομικού οξυγόνου σε μοριακό οξυγόνο στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων.

Η κάθοδος κατασκευάζεται από νικέλιο, επικαλυμμένο με μικρές ποσότητες λευκόχρυσου ως καταλύτη.

Ο καταλύτης επιτρέπει την ταχεία μετατροπή του ατομικού υδρογόνου σε μοριακό υδρογόνο στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου και με αυτόν τον τρόπο αυξάνει το ποσοστό παραγωγής υδρογόνου.

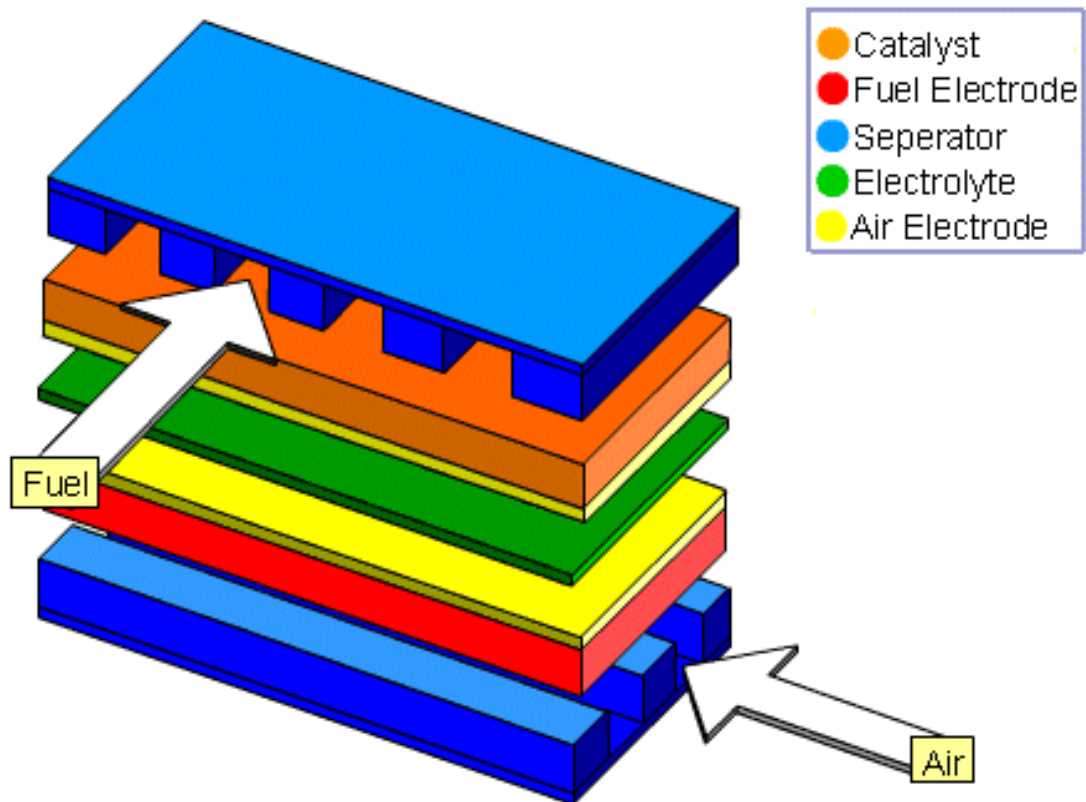
Ο ρυθμός παραγωγής υδρογόνου εξαρτάται από την πυκνότητα του ρεύματος. Όσο υψηλότερη η πυκνότητα ρεύματος, τόσο υψηλότερη η τάση της πηγής ηλεκτρικού ρεύματος που απαιτείται καθώς μειώνεται το μέγεθος του ηλεκτρολυτικού κελιού. [69]

Τα σύγχρονα ηλεκτρολυτικά κελιά είναι αξιόπιστα και έχουν ενεργειακή απόδοση 65-80%, ενώ λειτουργούν σε πυκνότητες ρεύματος περίπου  $2000 A/m^2$ . Το ποσό ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται να αντληθεί από τις ΑΠΕ για την ηλεκτρόλυση μπορεί να μειωθεί με την **προσθήκη θερμότητας στην αντίδραση από τον ίδιο τον ήλιο**.

**Η ελάχιστη τάση που απαιτείται για να διασπαστεί το νερό είναι 1,23V στους 25°C [77]. Σε αυτήν την τάση, απαιτείται θερμότητα για να προχωρήσει η αντίδραση. Όμως, με τάση 1,47V (στους 25°C) δεν απαιτείται επιπλέον χορήγηση θερμότητας.** Η λειτουργία του ηλεκτρολυτικού κελιού σε χαμηλές τάσεις με προσθήκη θερμότητας είναι συμφέρουσα, διότι η θερμότητα είναι συνήθως λιγότερο δαπανηρή από την ηλεκτρική ενέργεια, και μπορεί να διανεμηθεί εκ νέου μέσα στη διαδικασία, ενώ αυξάνεται η αποδοτικότητα των αντιδράσεων της ηλεκτρόλυσης με αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας. Επίσης, για την ηλεκτρολυτική παραγωγή υδρογόνου, οι θερμοδυναμικές απώλειες οφείλονται κυρίως στις αναστρεψιμότητες που συνδέονται με τη παραγωγή θερμότητας από υψηλής ποιότητας καύσιμα, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη διάσπαση του νερού. [70]



## Generic Fuel Cell



Σχήμα 17: Δομή γενικής κυψέλης καυσίμου – βασικά λειτουργικά στρώματα

### 2.3.3 Άμεση Καύση για Θέρμανση

Η άμεση καύση υδρογόνου για θερμικές εφαρμογές αποτελεί μία από τις πιο άμεσες μεθόδους αντικατάστασης ορυκτών καυσίμων (π.χ. φυσικού αερίου) σε βιομηχανικούς καυστήρες, λέβητες και φούρνους. Η καύση του  $H_2$  οδηγεί στη δημιουργία θερμότητας και νερού, χωρίς παραγωγή  $CO_2$ , καθιστώντας την τεχνολογία ελκυστική για την απανθρακοποίηση της θέρμανσης. [71]

#### **Η αντίδραση καύσης:**



Η θερμοκρασία φλόγας του υδρογόνου ( $\sim 2045^\circ C$ ) είναι υψηλότερη από αυτή του μεθανίου, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο σχηματισμό  $NO_x$  λόγω θερμοκρασιακής διάσπασης του αζώτου του αέρα. [61]

Η τεχνολογία εφαρμόζεται σε:

- Βιομηχανικούς φούρνους (χάλυβας, γυαλί, τσιμέντο)
- Λέβητες ατμού και θερμού νερού
- Αεριοστρόβιλους για συμπαραγωγή (CHP)

#### **Πλεονεκτήματα:**

- Άμεση υποκατάσταση συμβατικών καυσίμων χωρίς  $CO_2$
- Υψηλή θερμογόνος δύναμη ανά kg
- Συμβατότητα με υφιστάμενες γραμμές καυσίμου υπό προσαρμογές

#### **Μειονεκτήματα:**

- Παραγωγή  $NO_x$  – ανάγκη για τεχνολογίες χαμηλών  $NO_x$  (π.χ. EGR, staged combustion)
- Διαφορετική πυκνότητα και φλόγα σε σχέση με  $CH_4$  – απαιτείται επανασχεδιασμός καυστήρα
- Κόστος καυσίμου  $H_2$

Η άμεση καύση εξετάζεται ως εναλλακτική ή συμπληρωματική λύση σε τομείς όπου η ηλεκτροδότηση ή οι κυψέλες καυσίμου δεν είναι οικονομικά ή τεχνικά εφικτές, ιδίως σε βαριά βιομηχανία και υφιστάμενα θερμικά δίκτυα.

Ορισμένες χώρες, όπως η Ιαπωνία, η Γερμανία και οι Κάτω Χώρες, διεξάγουν πιλοτικά έργα αντικατάστασης φυσικού αερίου με υδρογόνο σε οικιακές και εμπορικές θερμικές εγκαταστάσεις. [72]

### 3. Ολοκληρωμένα συστήματα Υδρογόνου

Τα ολοκληρωμένα συστήματα υδρογόνου αναφέρονται στην ενιαία διαχείριση όλων των σταδίων της αλυσίδας αξίας του  $H_2$ : παραγωγή, αποθήκευση, μεταφορά και τελική κατανάλωση. Η επιτυχής ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων απαιτεί διατομεακή ενοποίηση με υφιστάμενες ενεργειακές υποδομές, διαλειτουργικότητα και κανονιστικό συντονισμό. 73

#### 1. Ενοποίηση συστημάτων (System Integration):

Ο στόχος είναι η ενσωμάτωση του  $H_2$  σε ευρύτερα συστήματα ενέργειας (ηλεκτρικά, θερμικά, φυσικού αερίου). Π.χ., ηλεκτρόλυση με πλεονάζουσα ανανεώσιμη ενέργεια (sector coupling), χρήση  $H_2$  σε καυστήρες φυσικού αερίου ( $H_2$  blending), ή σε σταθμούς συνδυασμένου κύκλου (CCGTs).

Η τεχνολογική συμβατότητα διασφαλίζεται μέσω προτυποποίησης (ISO, CEN, IEC), συμβατών δικτύων μεταφοράς (π.χ. αναβάθμιση αγωγών), και ανάπτυξης αρθρωτών συστημάτων (modular electrolyzers, fuel cell stacks). 74

#### 2. Συμβατότητα με υπάρχοντα και μελλοντικά ενεργειακά συστήματα:

Η χρήση του  $H_2$  θα πρέπει να είναι συμβατή με:

- Δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας (μέσω power-to-gas)
- Υποδομές φυσικού αερίου (έως 20% ανάμιξη  $H_2$ )
- Συστήματα αποθήκευσης (υδρίδια, LOHCs)
- Μέσα μεταφοράς (FCEVs,  $H_2$  τρένα, πλοία)

Η ευελιξία των εφαρμογών  $H_2$  τον καθιστά κατάλληλο σύνδεσμο μεταξύ τομέων, προσφέροντας δυνατότητες αποκέντρωσης, ενίσχυσης δικτύων και υποστήριξης των ΑΠΕ. 75

#### 3. Ρυθμιστικό και θεσμικό πλαίσιο:

Η ανάπτυξη των  $H_2$  υποδομών και αγορών απαιτεί:

- Κοινά πρότυπα και κανονισμούς ασφαλείας (π.χ. ISO 19880-1)
- Ρυθμιστικά εργαλεία για υποστήριξη επενδύσεων (subsidies, carbon pricing)
- Διακρατικές συμφωνίες μεταφοράς  $H_2$  (π.χ. RePowerEU, EuroAsia Interconnector)
- Πιστοποιητικά προέλευσης «πράσινου» υδρογόνου

Οι στρατηγικές των Ε.Ε., Ιαπωνίας και Κορέας περιλαμβάνουν εθνικά  $H_2$  hubs, δικτυακές πλατφόρμες (Hydrogen Backbone), και περιφερειακούς χάρτες συμβατότητας. 76

#### 4. Προκλήσεις και μελλοντικές τάσεις:

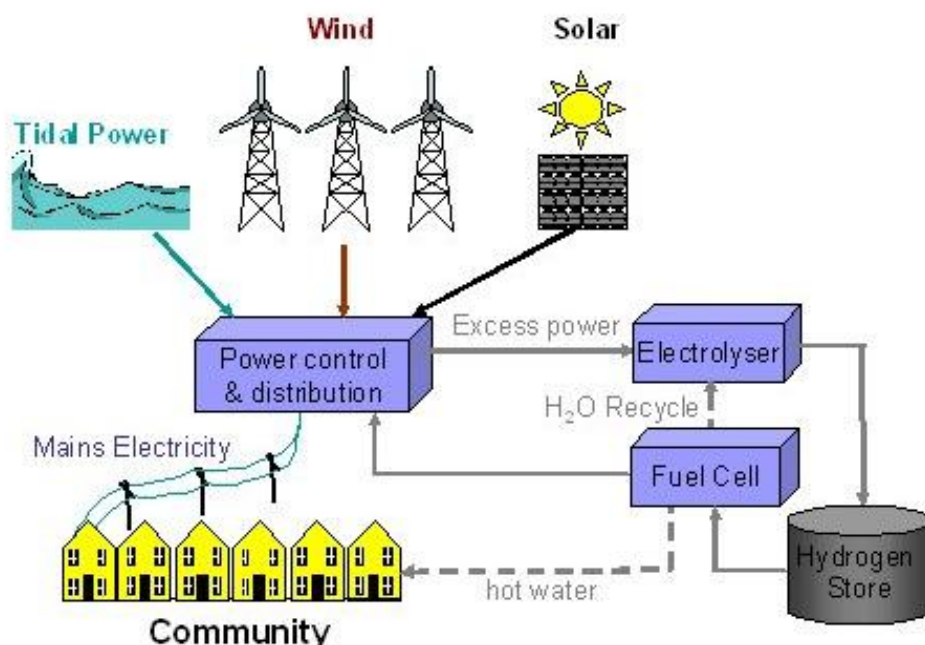
- Εναρμόνιση προτύπων και πιστοποιήσεων
- Διασύνδεση με τεχνολογίες αποθήκευσης (μπαταρίες, συμπιεσμένο  $H_2$ , υγρό  $H_2$ )
- Ψηφιακή παρακολούθηση συστημάτων (smart hydrogen networks)
- Ασφάλεια και διαχείριση κινδύνου (leak detection, emergency planning)

Η επιτυχής ενοποίηση προϋποθέτει συντονισμό τεχνολογίας – πολιτικής – αγοράς, με ολιστική προσέγγιση στον ενεργειακό σχεδιασμό.

Η αναφορά αναγνωρίζει ότι, ενώ η παραγωγή υδρογόνου έχει προχωρήσει σημαντικά, υπάρχουν διάφορες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για να καταστεί το υδρογόνο μια ευρέως διαθέσιμη και οικονομικά αποδοτική πηγή ενέργειας. Αυτές περιλαμβάνουν την ανάγκη για:

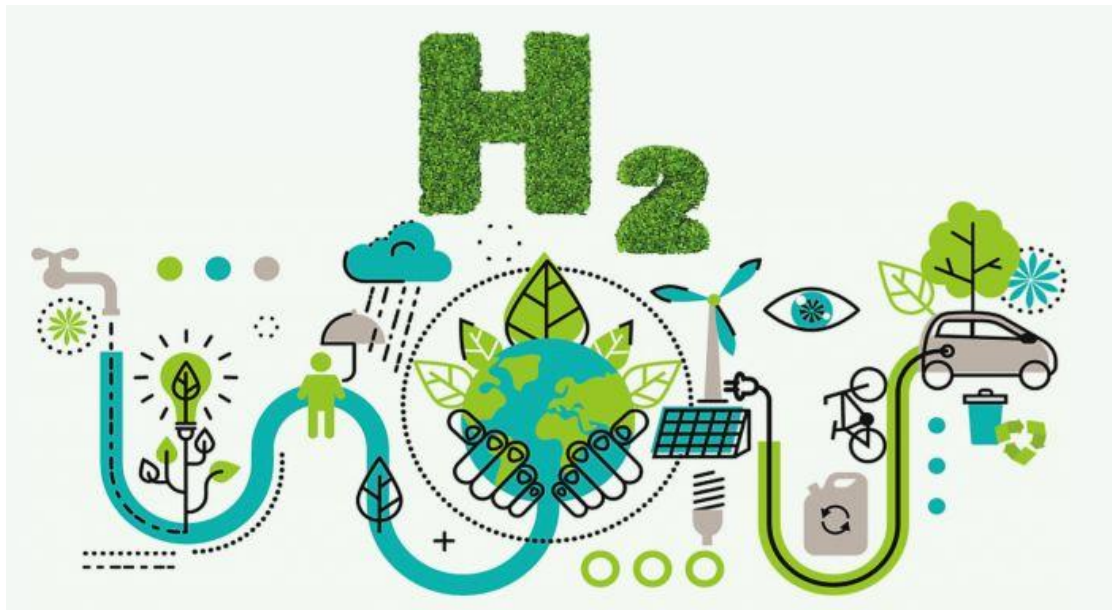
- **Ανάπτυξη πιο αποδοτικών και οικονομικών μεθόδων παραγωγής:** Η μείωση του κόστους παραγωγής υδρογόνου, ειδικά μέσω της ηλεκτρόλυσης και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι κρίσιμη για τη βιωσιμότητα του πράσινου υδρογόνου.
- **Αναβάθμιση της υποδομής αποθήκευσης και μεταφοράς:** Το υδρογόνο απαιτεί εξειδικευμένη υποδομή για αποθήκευση και μεταφορά, γεγονός που συνιστά μια σημαντική πρόκληση για τη μελλοντική ανάπτυξή του.
- **Στρατηγικές για την αύξηση της παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας:** Η ενσωμάτωση της παραγωγής υδρογόνου με την αποδοτική χρήση ανανεώσιμων πηγών είναι θεμελιώδης για τη βιωσιμότητα και τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>.

Η παραγωγή υδρογόνου βρίσκεται σε ένα κρίσιμο σταυροδρόμι. Η αναφορά επισημαίνει ότι, αν και η παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η βελτίωση των τεχνολογιών ηλεκτρόλυσης είναι το μέλλον, η μετάβαση σε καθαρές μεθόδους παραγωγής υδρογόνου απαιτεί σημαντικές επενδύσεις και διαρθρωτικές αλλαγές στον τομέα της ενέργειας και των υποδομών. Εντούτοις, με τη συνεχιζόμενη έρευνα και ανάπτυξη, το υδρογόνο έχει τη δυνατότητα να αποτελέσει έναν από τους βασικούς πυλώνες του ενεργειακού συστήματος του μέλλοντος, προσφέροντας μια καθαρή και βιώσιμη λύση για την παραγωγή ενέργειας. 76



Σχήμα 18: Ολοκληρωμένο ενεργειακό σύστημα με ΑΠΕ και αποθήκευση υδρογόνου για τροφοδοσία κοινότητας

### III. Συγκριτική Αξιολόγηση Συστημάτων Υδρογόνου



Σχήμα 19: Το υδρογόνο ως πράσινος ενεργειακός πυλώνας για ένα βιώσιμο μέλλον

## 1. Συγκριτική Αξιολόγηση Συστημάτων Παραγωγής H<sub>2</sub>

Η μετάβαση σε μια κλιματικά ουδέτερη οικονομία απαιτεί τη συστηματική αξιολόγηση των τεχνολογιών υδρογόνου. Για τον μηχανικό περιβάλλοντος, η αξιολόγηση πρέπει να ενσωματώνει παραμέτρους όπως η απόδοση ενέργειας, το αποτύπωμα άνθρακα, οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι (π.χ. NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, διαρροές H<sub>2</sub>), το κόστος κύκλου ζωής και η δυνατότητα ένταξης σε βιώσιμες αστικές και βιομηχανικές υποδομές.

### ➤ Ατμοαναμόρφωση Φυσικού Αερίου (SMR)

Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία παραγωγής υδρογόνου, με πάνω από 70% παγκόσμια εφαρμογή. Παρουσιάζει υψηλή θερμική απόδοση (65–75%), αλλά συνοδεύεται από σημαντικές εκπομπές CO<sub>2</sub> (~9–12 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>) εκτός αν συνδυαστεί με δέσμευση άνθρακα (CCS). Το κόστος είναι σχετικά χαμηλό (~1.5–2.5 €/kg H<sub>2</sub>), γεγονός που εξηγεί τη βιομηχανική της κυριαρχία. **66 77**

### ➤ Ηλεκτρόλυση Νερού

Η ηλεκτρόλυση αποτελεί μέθοδο χαμηλών εκπομπών όταν τροφοδοτείται από ΑΠΕ. Οι τύποι περιλαμβάνουν Alkaline (AEL), PEM και SOEC. Η απόδοση κυμαίνεται μεταξύ 65–80% για PEM και έως 90% για SOEC υπό υψηλή θερμοκρασία. Το κόστος παραγωγής κυμαίνεται μεταξύ 3–6 €/kg H<sub>2</sub>, με τάση μείωσης λόγω μείωσης κόστους ηλεκτρολυτών. Η τεχνολογία αυτή ενδείκνυται για αποκεντρωμένες ή αυτόνομες μονάδες και μπορεί να ενσωματωθεί άμεσα με Φ/Β και ανεμογεννήτριες. **68 78 79**

### ➤ Θερμοχημική Μετατροπή Βιομάζας

Η αεριοποίηση ή υγροποίηση βιομάζας αποτελεί ανανεώσιμη και κυκλική επιλογή. Παράγει H<sub>2</sub> με αποδόσεις 60–70% και περιορισμένες καθαρές εκπομπές CO<sub>2</sub>, ειδικά όταν λαμβάνεται υπόψη η απορρόφηση διοξειδίου από την καλλιέργεια βιομάζας. Το κόστος κυμαίνεται μεταξύ 2.5–4.5 €/kg H<sub>2</sub>, αλλά εξαρτάται έντονα από τη διαθεσιμότητα πρώτης ύλης. **80 81**

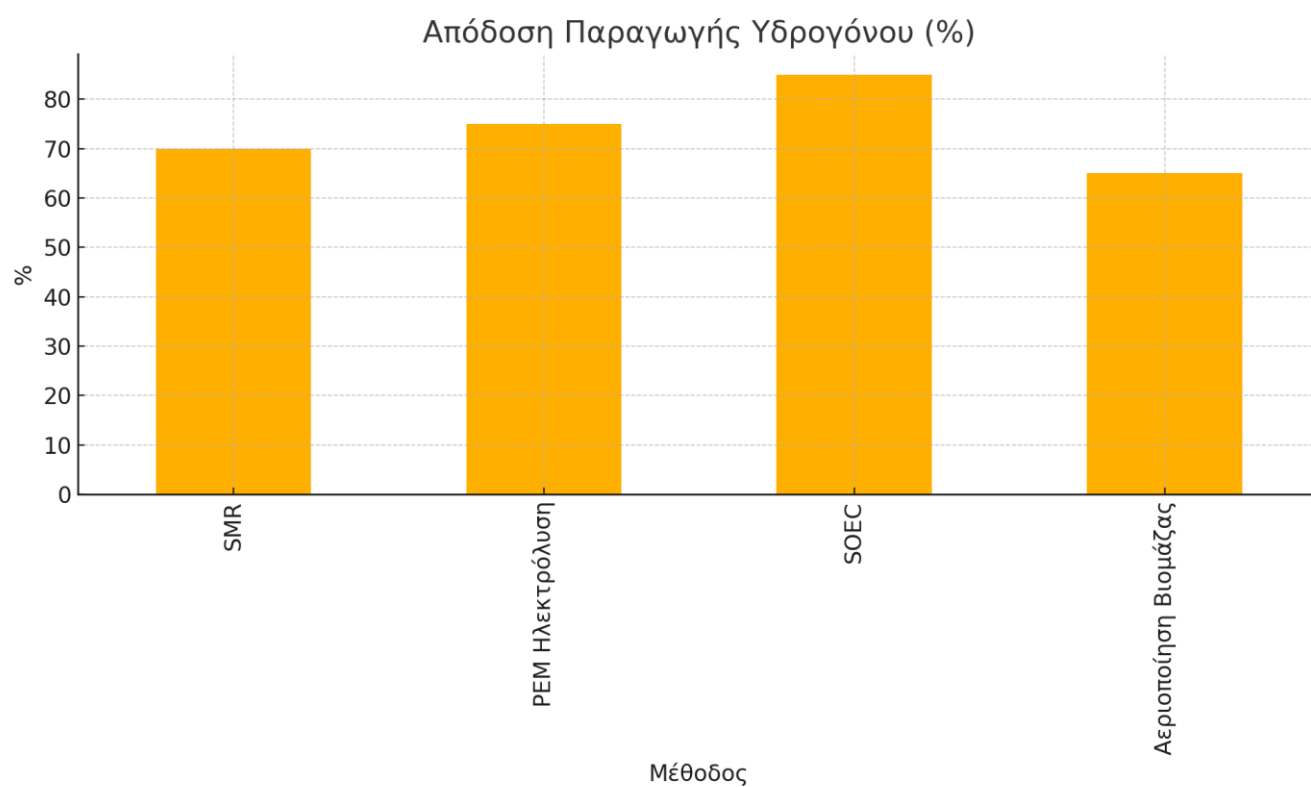
### ➤ Φωτοηλεκτροχημική και Θερμοχημική Ανάλυση

Οι τεχνολογίες αυτές είναι σε ερευνητικό στάδιο, με απόδοση 3–10% για φωτοκατάλυση και υψηλότερη δυναμική για ηλιοθερμική ανάλυση (>30%), αλλά απαιτούν σταθερά υλικά, μεγάλα ύψη επένδυσης και χαμηλό κόστος κλίμακας. **82**

➤ Συγκριτικός Πίνακας

Μέθοδος	Απόδοση (%)	CO <sub>2</sub> Εκπομπές	Κόστος(€/kg H <sub>2</sub> )	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

Πίνακας 1: Συγκριτική Αξιολόγηση Συστημάτων Παραγωγής H<sub>2</sub>



Διάγραμμα 2: Απόδοση Παραγωγής H<sub>2</sub>

## 2. Συγκριτική Αξιολόγηση Συστημάτων Αποθήκευσης H<sub>2</sub>

Η αποθήκευση υδρογόνου είναι κρίσιμη για τη διαχείριση της παραγωγής και της χρήσης του σε βιομηχανική και αποκεντρωμένη κλίμακα. Η επιλογή μεθόδου καθορίζεται από παραμέτρους όπως η ενεργειακή πυκνότητα, η ασφάλεια, οι απώλειες, το κόστος και η ωριμότητα της τεχνολογίας.

### ➤ Συμπιεσμένο Υδρογόνο (CGH<sub>2</sub>)

Αποθήκευση σε υψηλές πιέσεις (200–700 bar) σε δοχεία από κράματα μετάλλων ή σύνθετα υλικά. Η τεχνολογία είναι ώριμη και εφαρμόζεται σε μεταφορές (π.χ. αυτοκίνητα FCEV). Οι απώλειες ενέργειας για συμπίεση φθάνουν το 10–15% της συνολικής ενέργειας. Η ενεργειακή πυκνότητα είναι 4.5–6 MJ/L, και το κόστος των δοχείων υψηλό λόγω υλικών. [50](#)

### ➤ Υγροποιημένο Υδρογόνο (LH<sub>2</sub>)

Η υγροποίηση του H<sub>2</sub> σε θερμοκρασία –253°C αυξάνει την πυκνότητα σε ~8.5 MJ/L, αλλά απαιτεί πολύ υψηλή κατανάλωση ενέργειας για ψύξη (~30–40% της ενέργειας του H<sub>2</sub>). Χρησιμοποιείται σε αεροδιαστημικές εφαρμογές και ως μέσο μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου. Χρειάζονται καλά μονωμένα κρυογενικά δοχεία. [83](#) [84](#)

### ➤ Υδρίδια Μετάλλων

Αποθήκευση H<sub>2</sub> μέσω αντιδράσεων με μέταλλα (π.χ. LaNi<sub>5</sub>, MgH<sub>2</sub>). Η μέθοδος προσφέρει μεγάλη πυκνότητα κατ' όγκο και ασφάλεια, με απορρόφηση σε χαμηλές πιέσεις. Ωστόσο, παρουσιάζει χαμηλή πυκνότητα κατ' όγκο και υψηλό βάρος, περιορίζοντας την κινητικότητα. Η εκφόρτιση απαιτεί θέρμανση. Η ωριμότητα είναι μεσαία και το κόστος ακόμα υψηλό. [49](#)

### ➤ Φυσιόρροφηση σε Πορώδη Υλικά

Χρήση υλικών όπως MOFs, ενεργοποιημένος άνθρακας και νανοσωλήνες άνθρακα για αποθήκευση με Van der Waals δυνάμεις. Χαμηλό βάρος και δυνατότητα λειτουργίας σε θερμοκρασία δωματίου, αλλά απαιτεί χαμηλές θερμοκρασίες για υψηλή απορρόφηση. Η πυκνότητα είναι μέτρια και η τεχνολογία σε ερευνητικό στάδιο. [85](#) [86](#)

### ➤ Υγρές Οργανικές Ενώσεις (LOHCs)

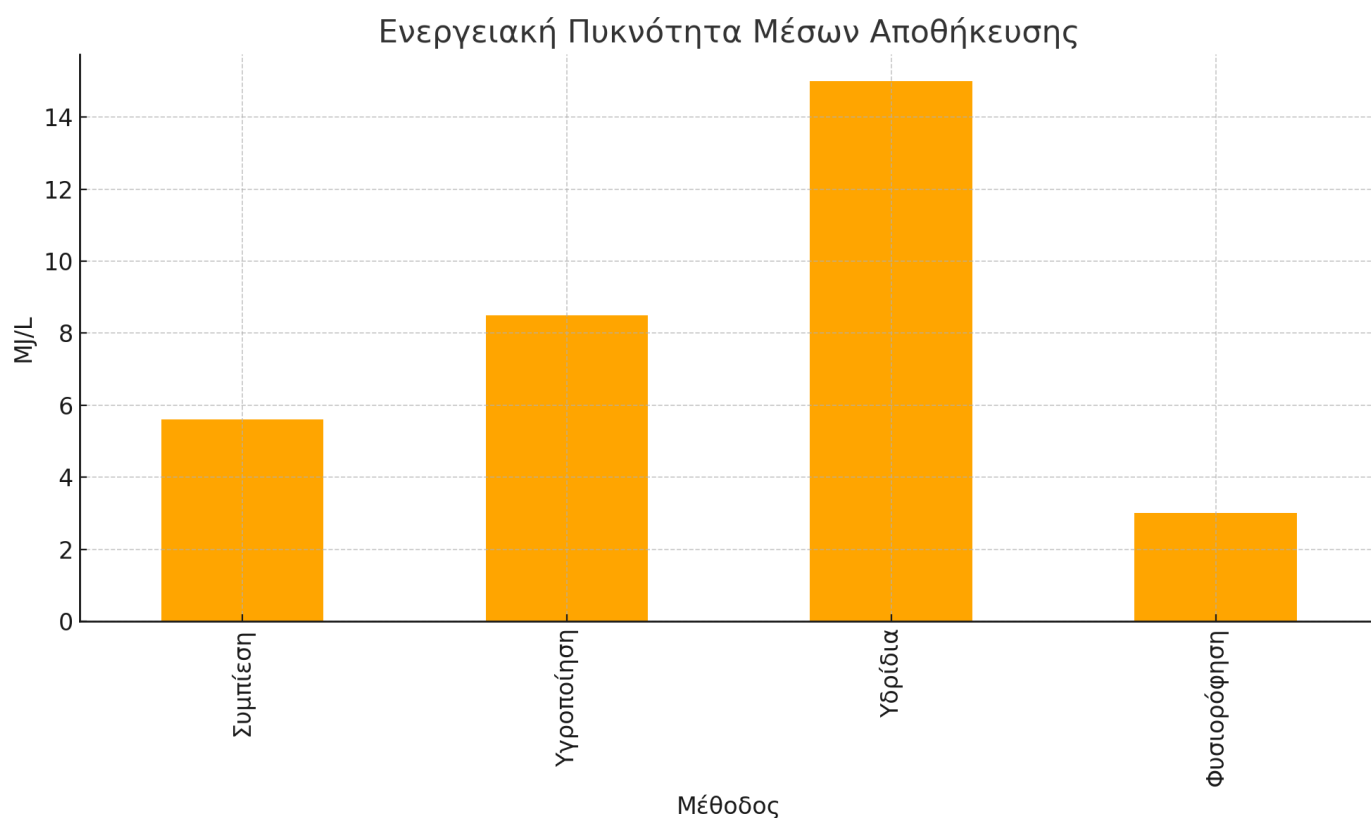
Αναδυόμενη τεχνολογία όπου το υδρογόνο αποθηκεύεται με χημική σύνδεση σε οργανικά υγρά (π.χ. toluene). Πλεονεκτεί στην ευκολία μεταφοράς (υγρή μορφή, σε συμβατικές υποδομές), αλλά απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες για την αποδέσμευση H<sub>2</sub>. Προσφέρεται για στατικές εφαρμογές και μελλοντικά σενάρια μεγάλης κλίμακας. [52](#)



➤ Συγκριτικός Πίνακας

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

Πίνακας 2: Συγκριτική Αξιολόγηση Αποθήκευσης H<sub>2</sub>



Διάγραμμα 3: Ενεργειακή Πυκνότητα Μέσων Αποθήκευσης H<sub>2</sub>

### 3. Συγκριτική Αξιολόγηση Συστημάτων Κατανάλωσης H<sub>2</sub>

Η κατανάλωση υδρογόνου μπορεί να λάβει χώρα σε διαφορετικά τεχνολογικά συστήματα, τα οποία διαφέρουν ως προς την απόδοση, τις εκπομπές, την ωριμότητα και τις πιθανές εφαρμογές. Παρακάτω παρουσιάζεται συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ κυψελών καυσίμου, κινητήρων εσωτερικής καύσης και άμεσης καύσης για θέρμανση.

#### ➤ Κυψέλες Καυσίμου (Fuel Cells)

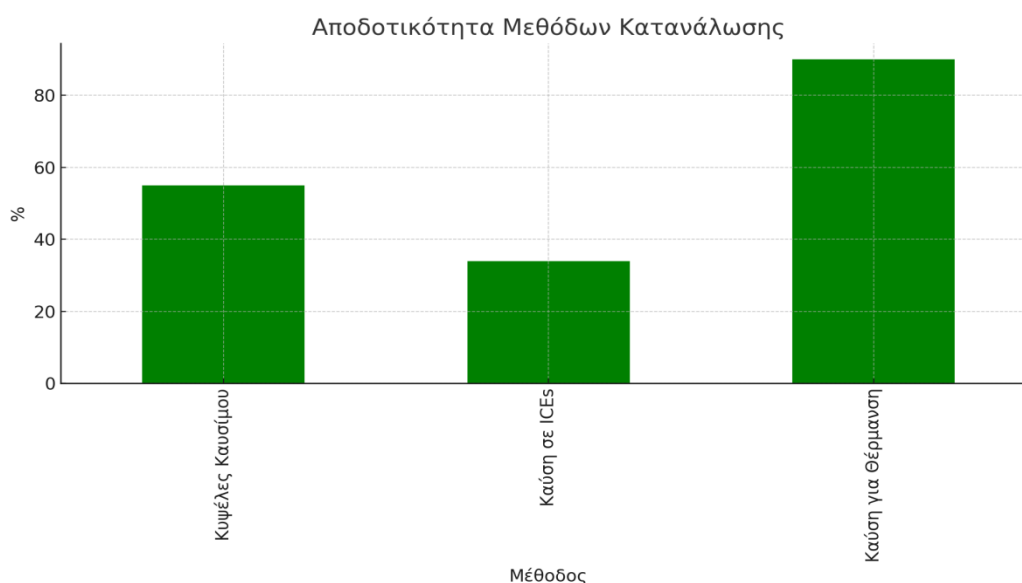
Οι κυψέλες καυσίμου (PEMFC, SOFC, AFC) αποτελούν καθαρή μέθοδο μετατροπής του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι αποδόσεις κυμαίνονται από 40% έως 60%, ενώ σε συστήματα συνδυασμένης παραγωγής (CHP) μπορεί να αγγίξουν το 85%. Παράγονται ελάχιστοι ρύποι και ο μόνος παραπροϊόν είναι το νερό. Οι PEMFC είναι κατάλληλες για μεταφορές, ενώ οι SOFC ευνοούνται για στατικές εφαρμογές. 72 73

#### ➤ Κινητήρες Εσωτερικής Καύσης (H<sub>2</sub> ICEs)

Η καύση H<sub>2</sub> σε συμβατικούς κινητήρες απαιτεί μετατροπές αλλά είναι δυνατή. Οι αποδόσεις κυμαίνονται μεταξύ 30–38%, με σημαντικά μειωμένες εκπομπές CO<sub>2</sub>, αλλά παρουσία NO<sub>x</sub> λόγω υψηλών θερμοκρασιών. Η τεχνολογία προσφέρει πλεονεκτήματα μετάβασης, αξιοποιώντας υπάρχουσα τεχνογνωσία και υποδομές. 72 77

#### ➤ Άμεση Καύση Υδρογόνου για Θέρμανση

Το υδρογόνο μπορεί να καεί άμεσα σε λέβητες ή φούρνους για την παραγωγή θερμότητας. Οι αποδόσεις είναι υψηλές (>85%), αλλά εμφανίζονται εκπομπές NO<sub>x</sub>, οι οποίες πρέπει να αντιμετωπιστούν με βελτιστοποιημένους καυστήρες και ανακυκλοφορία καυσαερίων. Η τεχνολογία είναι κατάλληλη για βιομηχανική θέρμανση και δίκτυα τηλεθέρμανσης. 78 79

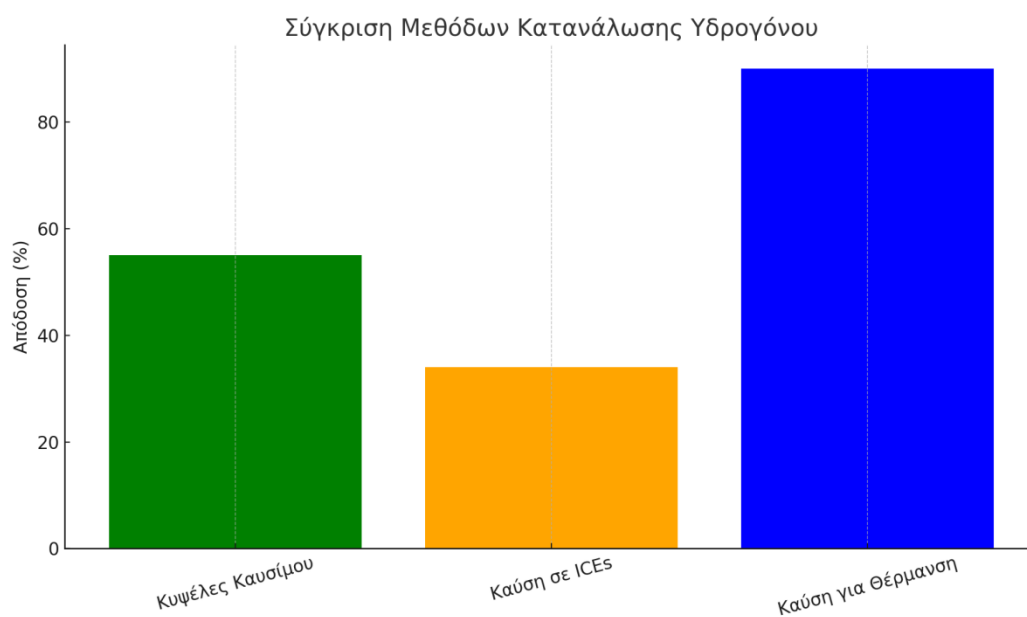


Διάγραμμα 4: Αποδοτικότητα Μεθόδων Κατανάλωσης H<sub>2</sub>

➤ Συγκριτικός Πίνακας

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

Πίνακας 3: Συγκριτική Αξιολόγηση Συστημάτων Κατανάλωσης H<sub>2</sub>



Διάγραμμα 5: Σύγκριση Μεθόδων Κατανάλωσης H<sub>2</sub>

## IV. Πειραματικό Μέρος



Σχήμα 20: Η σημασία της ασφάλειας στα πειράματα και τις ενεργειακές εφαρμογές

## 1. Σχεδιασμός και Κατασκευή Πειραματικού Μέρους

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε πειραματική διάταξη για την παραγωγή και αξιοποίηση υδρογόνου, με σκοπό την αξιολόγηση της αποδοτικότητας ενός ολοκληρωμένου συστήματος ηλεκτρόλυσης, φιάλης υδρογόνου και κυψέλης καυσίμου σε μικρή κλίμακα.

### ➤ **Στόχος της Διάταξης**

Ο στόχος του πειράματος είναι:

- Η παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης καθαρού νερού
- Η κατανάλωση του παραγόμενου  $H_2$  μέσω κυψέλης καυσίμου
- Η μέτρηση της ενεργειακής απόδοσης και η εκτίμηση του συνολικού βαθμού απόδοσης συστήματος

### ➤ **Περιγραφή Διάταξης**

Το σύστημα αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα:

#### Μονάδα Ηλεκτρόλυσης:

- Ισχύς: 250 W
- Παροχή: Καθαρό νερό (conductivity:  $\sim 0.035 \mu S/cm$ )
- Είσοδος: 12V DC
- Παραγωγή  $H_2$  &  $O_2$

#### Κυψέλη Καυσίμου PEM:

- Ισχύς: 650 W
- Είσοδοι:  $H_2$  (από φιάλη και μονάδα),  $O_2$  (περιβάλλοντος)
- Έξοδος: Ηλεκτρική ισχύς (12,6 – 18 Vdc) + θερμότητα

#### Φιάλη υδρογόνου:

- Έξοδος: 2 bar

#### Μέσα μέτρησης:

- Πολύμετρο για τάση/ρεύμα

#### Κατασκευή με Λαμπτήρες:

- 4 λάμπες των 24V

### ➤ **Διάγραμμα Ροής (λειτουργικό σχήμα)**

Νερό → Μονάδα Ηλεκτρόλυσης → Παραγωγή  $H_2$  → Φιάλη → Κυψέλη Καυσίμου → Ηλεκτρική Έξοδος → Κατασκευή με Λαμπτήρες

### ➤ **Πλαίσιο Υλοποίησης**

Η διάταξη κατασκευάστηκε σε επιτραπέζια πλατφόρμα με ασφάλεια για τον χρήστη. Χρησιμοποιήθηκαν αδρανή υλικά και επιβλέφθηκε η σωστή γείωση του συστήματος DC. Όλα τα στοιχεία είχαν δυνατότητα αποσυναρμολόγησης για ευκολία συντήρησης και μελλοντικής αναβάθμισης.

## 2. Βελτίωση Πειραματικής Διάταξης και Εξοπλισμού

Η αρχική πειραματική διάταξη επέτρεψε την ασφαλή και λειτουργική δοκιμή ενός βασικού κυκλώματος παραγωγής και κατανάλωσης υδρογόνου. Ωστόσο, προέκυψαν αρκετά τεχνικά σημεία προς βελτίωση, με στόχο την αύξηση της ακρίβειας των μετρήσεων, την ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος και την ενίσχυση της ασφάλειας και ευχρηστίας.

### ➤ **Βελτιώσεις στη Μονάδα Ηλεκτρόλυσης**

- Αντικατάσταση του απλού τροφοδοτικού με σταθεροποιημένη πηγή DC με δυνατότητα ελέγχου ρεύματος/τάσης και καταγραφής δεδομένων.
- Στεγανοποίηση όλων των σωληνώσεων για αποφυγή διαρροών.

### ➤ **Βελτιώσεις στην Κυψέλη Καυσίμου**

- ΄Ψεκασμα΄ καθαρού οξυγόνου (από την έξοδο της ηλεκτρόλυσης) στην εισαγωγή αέρα της κυψέλης με σκοπό την αύξηση της αποδοτικότητας.

### ➤ **Βελτιώσεις στη Κατασκευή**

- προσθήκη λαμπτήρων αυτοκίνητου με δυνατότητα επιλογής σκάλας μικρής (75W) ή και μεγάλης (75W) για πιο ακριβή μέτρηση.
- Επιλογή άριστης ποιότητας πλαστικών σωληνώσεων και συνδέσμων για το υδρογόνο

### ➤ **Βελτιώσεις στις Μετρήσεις**

- Επαλήθευση αισθητήρων με βαθμονόμηση βάσει πρότυπων εργαλείων μέτρησης.
- Αναμονή 3-4 δευτερολέπτων μεταξύ της αλλαγής φορτίου στη κυψέλη με σκοπό την σταθεροποίηση των τιμών.

### ➤ **Ασφάλεια και Δομική Ενίσχυση**

- Τοποθέτηση βαλβίδας ανακούφισης πίεσης  $H_2$  στο εξαγόμενο αέριο.
- Τοποθέτηση σωλήνων από τη περίσσεια  $H_2$  &  $O_2$  από το εργαστήριο στο περιβάλλον.
- Τοποθέτηση ορθά βαθμολογημένου μανόμετρου για ακριβή και ελεγχόμενη ρύθμιση πίεσης του εξαγόμενου  $H_2$  από τη φιάλη.

Οι παραπάνω βελτιώσεις ενισχύουν τη λειτουργικότητα, την ακρίβεια και την αξιοπιστία της πειραματικής μονάδας, επιτρέποντας συγκριτική ανάλυση μελλοντικών δεδομένων και αξιολόγηση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης.

### 3. Πειραματικές Μετρήσεις - Αποτελέσματα

Η διάταξη αποτελείται από μια κυψέλη καυσίμου τύπου PEM (Proton Exchange Membrane), η οποία τροφοδοτείται με καθαρό υδρογόνο υπό ελεγχόμενη πίεση 2-4 bar. Το υδρογόνο εισέρχεται στην άνοδο, όπου λαμβάνει χώρα η αντίδραση οξείδωσης, ενώ από την κάθοδο λαμβάνεται το τελικό ηλεκτρικό ρεύμα. Το ρεύμα αυτό διοχετεύεται μέσω ηλεκτρικών αγωγών σε μια κατασκευή που περιλαμβάνει σειρά από 4 λαμπτήρες αυτοκινήτου των 24V συνεχούς ρεύματος. Οι λαμπτήρες αυτοί είναι συνδεδεμένοι μέσω βαθμιδωτού διακόπτη (διακόπτης τύπου σκάλα), ο οποίος επιτρέπει την προοδευτική ενεργοποίηση των λαμπτήρων, αναλόγως της επιθυμητής κατανάλωσης. Ο διακόπτης παρέχει τη δυνατότητα μεταβολής του φορτίου στην έξοδο της κυψέλης, καθιστώντας εφικτή την παρακολούθηση των επιδόσεων της κυψέλης καυσίμου υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης.

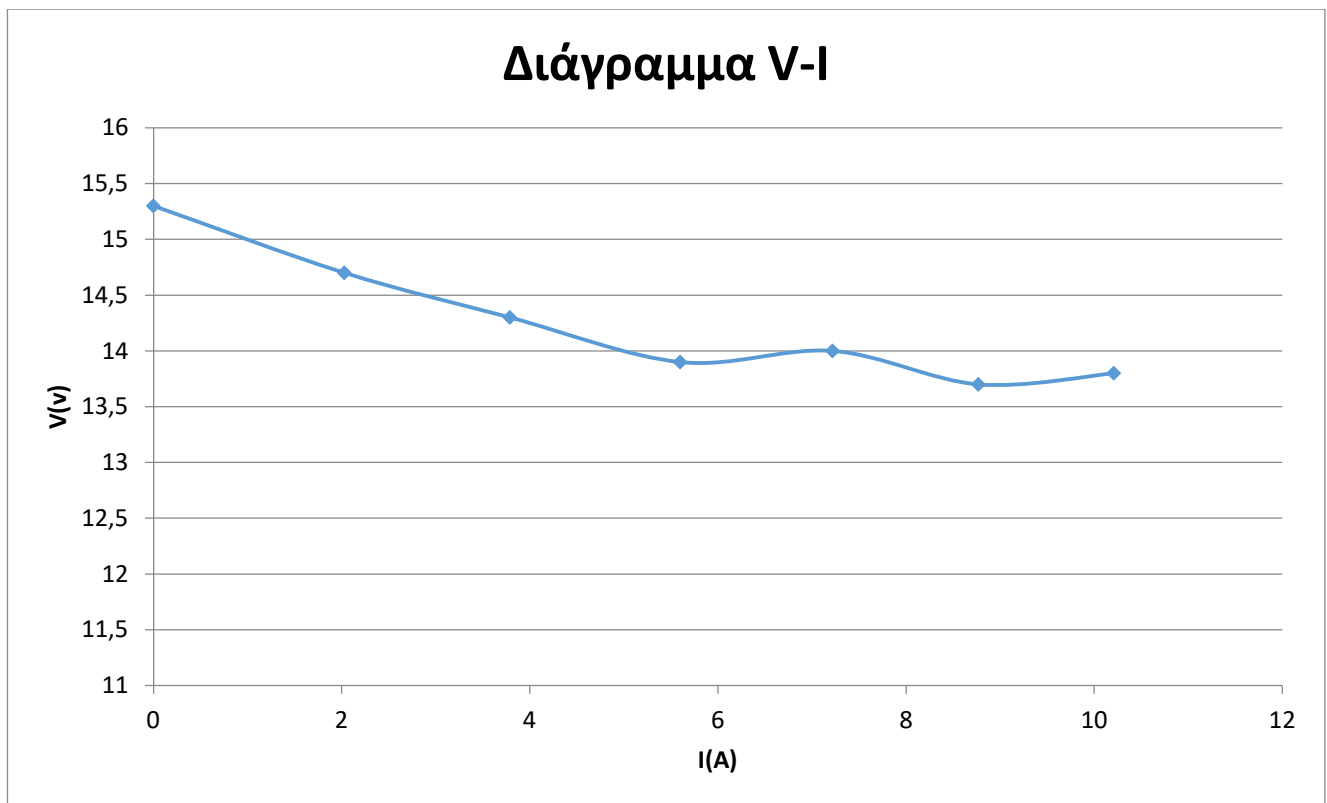
Παράλληλα, ενσωματώθηκαν μετρητικά όργανα (βολτόμετρο και αμπερόμετρο) για την παρακολούθηση της τάσης και της έντασης του ρεύματος σε πραγματικό χρόνο.

**Η διάταξη αυτή παρέχει ένα λειτουργικό και οπτικά επεξηγηματικό μέσο κατανόησης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από υδρογόνο και αναδεικνύει τη δυνατότητα αξιοποίησής του ως καθαρού ενεργειακού φορέα.**

Έπειτα μέσω του βαθμιδωτού διακόπτη και αναλόγως το φορτίο που είχαμε μέσω λαμπτήρων πήραμε τις παρακάτω μετρήσεις:

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

Πίνακας 4: Μετρήσεις Πειραματικής Διαδικασίας



Διάγραμμα 6: Συμπεριφορά Τάσης σε σχέση με Φορτίο

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4 και το αντίστοιχο Διάγραμμα 6 καθώς αυξάνουμε το φορτίο στη κυψέλη, η τάση πέφτει.



## 4. Οδηγός Χρήσης Συστήματος Βήμα-Βήμα

### *ΒΗΜΑ 1: Προετοιμασία και Έλεγχος Ασφαλείας*

- 1.1. Έλεγχος ηλεκτρικών και μηχανικών συνδέσεων (καλώδια, σωληνώσεις, κλειστές βαλβίδες).
  - 1.2. Εξασφάλιση καλού αερισμού του χώρου.
  - 1.3. Επαλήθευση ότι **ΟΛΕΣ** οι βαλβίδες είναι κλειστές.
  - 1.4. Έλεγχος πίεσης και στεγανότητας του κυκλώματος υδρογόνου με σαπουνοδιάλυμα.
  - 1.5. Έλεγχος στάθμης καθαρού νερού (γεμάτο) στη μονάδα ηλεκτρόλυσης με αγωγιμότητα  $<0,2 \mu\text{S/cm}$ .
  - 1.6. Σύνδεση όλων των σωληνώσεων.
- 

### *ΒΗΜΑ 2: Εκκίνηση Ηλεκτρόλυσης (Παραγωγή Υδρογόνου)*

- 2.1. Παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στη μονάδα ηλεκτρόλυσης.
  - 2.2. Ενεργοποίηση ηλεκτρόλυσης, πατώντας παρατεταμένα 2sec το κουμπί START.
  - 2.3. Αναμονή αύξησης πίεσης στη μονάδα ηλεκτρόλυσης στα δοχείο των 2 λίτρων στο εσωτερικό της μονάδας στα 14,5 bar.
  - 2.4. Μείωση πίεσης στα 0 bar μέσω μοχλού από τη πίσω μεριά της ηλεκτρόλυσης.
  - 2.5. Άνοιγμα βαλβίδας ηλεκτρόλυσης
  - 2.6. Σταδιακή αύξηση πίεσης μέσω μοχλού έως ότου φτάσει στα 2 bar, με ταυτόχρονη παρακολούθηση της πίεσης στο εσωτερικό της μονάδας ώστε να μη πέσει κάτω από 13 bar.
  - 2.7. Καθοδήγηση του παραγόμενου υδρογόνου απευθείας προς την κυψέλη καυσίμου.
- 

### *ΒΗΜΑ 3: Φιάλη Υδρογόνου ( Buffer συστήματος)*

- 3.1. Σύνδεση φιάλης με τον σωλήνα παροχής της κυψέλης καυσίμου στη θέση με τον σύνδεσμο T.
  - 3.2. Άνοιγμα παροχής φιάλης ρυθμισμένη στα 2 - 4 bar.
-

#### **ΒΗΜΑ 4: Παροχή Υδρογόνου στην Κυψέλη Καυσίμου**

- 4.1. Άνοιγμα της παροχής υδρογόνου στη κυψέλη καυσίμου.
  - 4.2. Έλεγχος λειτουργίας ανεμιστήρα αέρα ή παροχής οξυγόνου
  - 4.3. Ενεργοποίηση κυψέλης καυσίμου
  - 4.4. Παρακολούθηση τάσης και ρεύματος εξόδου από την κυψέλη μέσω πολυμέτρων.
- 

#### **ΒΗΜΑ 5: Τροφοδοσία Φορτίων**

- 5.1. Σύνδεση της κατασκευής φορτίων (λάμπες) στην έξοδο της κυψέλης καυσίμου.
  - 5.2. Ενεργοποίηση των φορτίων μέσω βαθμιδωτού διακόπτη 6 θέσεων.
  - 5.3. Συνεχής παρακολούθηση:
    - Τάσης εξόδου
    - Ρεύματος
    - Θερμοκρασίας κυψέλης (αν χρειάζεται)
    - Κατανάλωσης υδρογόνου (αν χρειάζεται)
- 

#### **ΒΗΜΑ 6: Τερματισμός και Ασφάλεια**

- 6.1. Απενεργοποίηση φορτίων.
- 6.2. Απενεργοποίηση κυψέλης καυσίμου πατώντας παρατεταμένα 2sec το κουμπί on/off
- 6.3. Κλείσιμο παροχής υδρογόνου προς την κυψέλη.
- 6.4. Αν απαιτείται, απενεργοποίηση ηλεκτρόλυσης, πατώντας παρατεταμένα 2sec το κουμπί STOP
- 6.5. Κλείσιμο ΟΛΩΝ των βαλβίδων.
- 6.6. Εκτόνωση πίεσης των σωλήνων.
- 6.7. Τελικός έλεγχος διαρροών και ασφάλειας.

## V. Συμπεράσματα & Μελλοντικές Εργασίες



Σχήμα 21: Μοριακή απεικόνιση υδρογόνου – το καύσιμο του μέλλοντος

## Συμπεράσματα

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.

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.

## Μελλοντικές Εργασίες

Η επόμενη γενιά ενεργειακών υποδομών απαιτεί προσαρμοστικότητα, καθαρότητα και συστημική ευφυΐα. Ως μηχανικός περιβάλλοντος, η εξέλιξη αυτής της εργασίας μπορεί να στραφεί σε πιο σύνθετες και διασυνδεδεμένες εφαρμογές:

- Ενσωμάτωση αυτόνομου ελεγκτή (PLC ή Raspberry Pi) με real-time παρακολούθηση και έλεγχο λειτουργικών παραμέτρων.
- Προσομοίωση λειτουργίας σε έξυπνα μικροδίκτυα (smart microgrids) με coupling σε ΑΠΕ (Φ/Β ή ανεμογεννήτρια).
- Επέκταση σε εφαρμογές έξυπνης γεωργίας ή νησιωτικών περιοχών χωρίς δίκτυο – παραγωγή  $H_2$  από Φ/Β και χρήση του σε ηλεκτροπαραγωγή ή ψύξη.
- Ανάπτυξη μοντέλου LCA (Life Cycle Assessment) για την ποσοτική εκτίμηση περιβαλλοντικού αποτυπώματος σε σύγκριση με παραδοσιακά καύσιμα.
- Συμβατότητα του συστήματος με μελλοντικές τεχνολογίες αποθήκευσης (π.χ. MOFs, LOHCs) και ενεργειακά πρωτόκολλα ISO/IEC.

Η υιοθέτηση τέτοιων τεχνολογιών ανοίγει τον δρόμο για ενεργειακά αυτόνομα κοινότητες, κυκλική οικονομία και μια νέα εποχή στην περιβαλλοντική μηχανική, όπου η βιωσιμότητα και η καινοτομία συνυπάρχουν με απόλυτη συνέπεια.

## Βιβλιογραφία

- 11** Wikipedia(2024)
- 12** Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (2014)
- 13** Αναστασίου Ν., Δογρανλής Κ. (2021). Διπλωματική εργασία Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Πολυτεχνική Σχολή Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας
- 14** Αρμπουνιώτης Α. (2024). Διπλωματική εργασία ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
- 15** Κουκουλομμάτης Γ.(2022). Διπλωματική εργασία ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
- 16** National Renewable Energy Laboratory, “The Green Hydrogen report”, DOE/GO-10095-179,DE95009213,May1995
- 17** IEA (2021). Global Hydrogen Review.
- 18** Dincer, I. & Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods. IJHE, 40(34), 11094–11111.
- 19** Ahmed, K. & Krumpelt, M. (2001). Hydrogen from hydrocarbon fuels for fuel cells. Int J Hydrogen Energy, 26(4), 291–301.
- 20** Spallina, V. et al. (2016). Techno-economic assessment of POX for H<sub>2</sub> production. Applied Energy, 162, 1154–1168.
- 21** U.S. DOE – Fuel Cell Technologies Office. Hydrogen Production: Partial Oxidation.
- 22** Dagle, R.A. et al. (2020). Autothermal reforming of methane for hydrogen production. Frontiers in Energy Research.
- 23** Spallina, V. et al. (2019). Process design of autothermal reforming for H<sub>2</sub>. Chemical Engineering Journal, 378, 122221.
- 24** US Department of Energy. Hydrogen from Autothermal Reforming.
- 25** Higman, C. & van der Burgt, M. (2008). Gasification. Gulf Professional Publishing.
- 26** U.S. Department of Energy (DOE). Gasification Systems.

- [17] IEA Clean Coal Centre. (2019). Gasification of lignite and low-rank coals.
- [18] Rostrup-Nielsen, J.R. (2005). Production of hydrogen from hydrocarbons without CO<sub>2</sub> emission. *Catalysis Today*, 106(1–4), 293–296.
- [19] IEA. (2021). Low-carbon hydrogen production: Methane pyrolysis. *Global Hydrogen Review*.
- [20] Abánades, A. et al. (2016). Methane pyrolysis for CO<sub>2</sub>-free H<sub>2</sub> production: A review of catalytic materials. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 65, 928–948.
- [21] U.S. DOE. Methane Pyrolysis: Technology Roadmap.  
<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-methane-pyrolysis>
- [22] Wikipedia. (2024).
- [23] APPLEBY, A., CREPY, G., & JACQUELIN, J. (1978). High efficiency water electrolysis in alkaline solution. *International Journal of Hydrogen Energy*, 3(1), 21–37.
- [24] Carmo, M. et al. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *IJHE*, 38(12), 4901–4934.
- [25] IEA. (2022). Electrolyzers: Technology Brief.
- [26] Buttler, A. & Spliethoff, H. (2018). Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2440–2454.
- [27] Hydrogen Europe. (2021). AEL technology fact sheet.
- [28] Millet, P. et al. (2019). PEM water electrolyzers: Overview and perspective. *Int. J. Hydrogen Energy*, 44(25), 12529–12548.
- [29] IRENA. (2020). Green Hydrogen: A Guide to Policy Making. Chapter 3: Electrolyzer Technologies.
- [30] Laguna-Bercero, M.A. (2012). Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 203, 4–16.
- [31] IEA. (2022). High-Temperature Electrolysis Technology Brief.
- [32] Graves, C. et al. (2011). Sustainable hydrocarbon fuels by recycling CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O with renewable or nuclear energy. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 1–23.

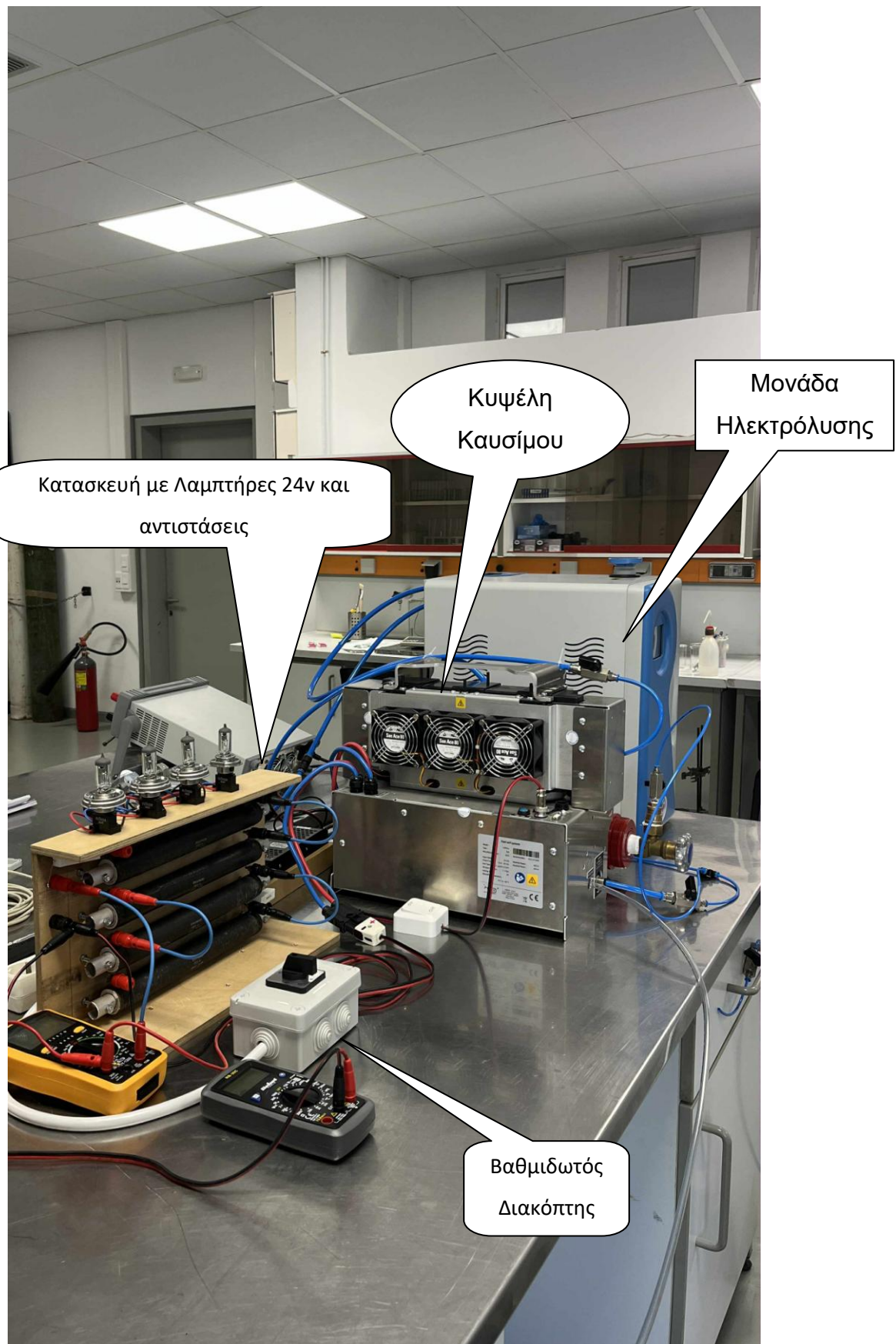
- 33** Sunfire GmbH. (2020). High-temperature electrolysis for efficient hydrogen production.
- 34** Hisatomi, T., Kubota, J. & Domen, K. (2014). Recent advances in semiconductors for photocatalytic and photoelectrochemical water splitting. *Chemical Society Reviews*, 43(22), 7520–7535.
- 35** Sivula, K. & van de Krol, R. (2016). Semiconducting materials for photoelectrochemical energy conversion. *Nature Reviews Materials*, 1, 15010.
- 36** Sharma, R. et al. (2020). A review of photoelectrochemical hydrogen production and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124, 109790.
- 37** Forsberg, C.W. (2008). Hydrogen, Nuclear Energy, and the Advanced High-Temperature Reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 51(1), 190–200.
- 38** Brown, L.C. et al. (2003). High Efficiency Generation of Hydrogen Fuels Using Nuclear Power. General Atomics.
- 39** Wang, Z. et al. (2019). Review of thermochemical water-splitting cycles for hydrogen production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109253.
- 40** Ni, M. et al. (2006). An overview of hydrogen production from biomass. *Fuel Processing Technology*, 87(5), 461–472.
- 41** Basu, P. (2010). Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. Academic Press.
- 42** Davda, R.R. & Dumesic, J.A. (2004). Renewable hydrogen by aqueous-phase reforming of biomass-derived oxygenates. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 8(4), 406–412.
- 43** Kapdan, I.K. & Kargi, F. (2006). Bio-hydrogen production from waste materials. *Enzyme and Microbial Technology*, 38(5), 569–582.
- 44** Levin, D.B. & Chahine, R. (2010). Challenges for renewable hydrogen production from biomass. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(10), 4962–4969.
- 45** Stolten, D. & Grube, T. (Eds.) (2016). Hydrogen Science and Engineering. Wiley-VCH.
- 46** Barthelemy, H. et al. (2017). Hydrogen storage: recent improvements and industrial perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(11), 7254–7262.
- 47** Jain, I.P. et al. (2010). Hydrogen storage in liquid and solid form. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(10), 5133–5144.

- [48] Züttel, A. (2003). Materials for hydrogen storage. *Materials Today*, 6(9), 24–33.
- [49] Schlapbach, L. & Züttel, A. (2001). Hydrogen-storage materials for mobile applications. *Nature*, 414, 353–358.
- [50] Teichmann, D. et al. (2012). A future energy supply based on Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC). *Energy & Environmental Science*, 5, 9044–9054.
- [51] ISO 19881:2018. Gaseous hydrogen — Land vehicle fuel containers.
- [52] DOE Hydrogen Program (2022). Hydrogen Storage.
- [53] Liu, K. et al. (2010). *Hydrogen and Fuel Cells: Emerging Technologies and Applications*. Springer.
- [54] Ewan, B.C.R., Allen, R.W.K. (2005). A figure of merit assessment of the routes to hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(8), 809–819.
- [55] IEA (2023). *Global Hydrogen Review*.
- [56] Sakintuna, B., Lamari-Darkrim, F. & Hirscher, M. (2007). Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review. *Int. J. Hydrogen Energy*, 32(9), 1121–1140.
- [57] Panella, B. et al. (2005). Hydrogen adsorption in different carbon nanostructures. *Carbon*, 43(10), 2209–2214.
- [58] Broom, D.P. et al. (2016). Concepts for improving hydrogen storage in nanoporous materials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(6), 2904–2916.
- [59] Eddaoudi, M. et al. (2002). Modular chemistry: secondary building units as a basis for the design of highly porous and robust metal–organic frameworks. *Accounts of Chemical Research*, 34(4), 319–330.
- [60] Verhelst, S. & Wallner, T. (2009). Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35(6), 490–527.
- [61] O'Hayre, R. et al. (2016). *Fuel Cell Fundamentals* (4th ed.). Wiley.
- [62] IRENA. (2019). *Hydrogen: A renewable energy perspective*.
- [63] Hydrogen Council. (2020). *Path to Hydrogen Competitiveness: A Cost Perspective*.
- [64] Karim, G.A. (2003). Hydrogen as a spark ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(5), 569–577.
- [65] Toyota Motor Corporation (2021). *Hydrogen engine technology overview*.



- [66] Barbir, F. (2005). PEM Fuel Cells: Theory and Practice. Academic Press.
- [67] Κορωναίος, Χ., Ντόμπρος, Α., Ρούμπας, Γ., Μουσιόπουλος, Ν. , (2005). *Ανάλυση Κύκλου ζωής Διεργασιών Παραγωγής Υδρογόνου*. Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας και Περιβαλλοντικής Μηχανικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- [68] Rosen M.A., (1995). “Energy and exergy analyses of electrolytic hydrogen production”, Int. J. Hydrogen Energy. 20:547-553.
- [69] IEA. (2022). Hydrogen in Heat: Sectoral Applications.
- [70] Hydrogen Europe. (2021). Hydrogen for heating applications in buildings and industry.
- [71] IRENA. (2021). Green Hydrogen: A Guide to Policy Making.
- [72] Hydrogen Europe. (2022). Hydrogen System Integration.
- [73] European Commission. (2022). RePowerEU Plan.
- [74] Hydrogen Council. (2021). Hydrogen for Net-Zero: A critical cost perspective.
- [75] Glenk, G. & Reichelstein, S. (2019). Nature Energy.
- [76] IRENA. (2020). Green Hydrogen Cost Reduction.
- [77] Hydrogen Europe. (2021). Hydrogen in power-to-X.
- [78] Caputo, A. et al. (2005). Renewable Energy.
- [79] Milbrandt, A. & Mann, M. (2007). NREL Biohydrogen Report.
- [80] Fujishima, A. & Honda, K. (1972). Nature.
- [81] Züttel, A. (2004). Hydrogen storage methods. Materials Today.
- [82] DOE. (2020). Hydrogen Storage Overview. Department of Energy.
- [83] Broom, D. P. et al. (2016). Hydrogen storage in nanoporous materials.
- [84] Eberle, U. et al. (2012). Chemical and physical hydrogen storage methods.
- [85] DOE. (2021). Hydrogen Fuel and Internal Combustion Engines.
- [86] Bartels, J. R. et al. (2012). Hydrogen for heating. Int J Hydrogen Energy.
- [87] Hydrogen Europe. (2021). Hydrogen in heating applications.

## Παραρτήματα

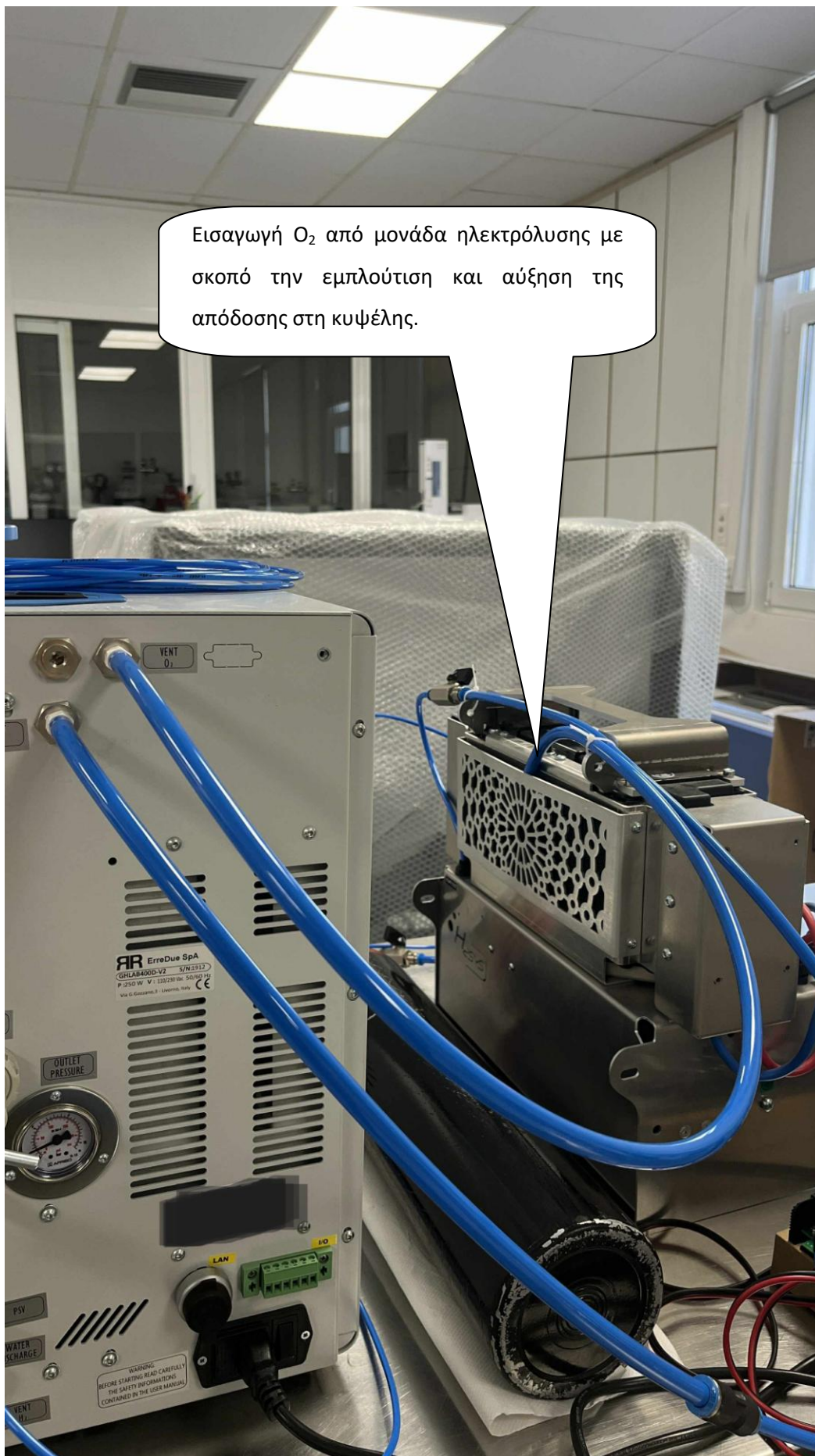




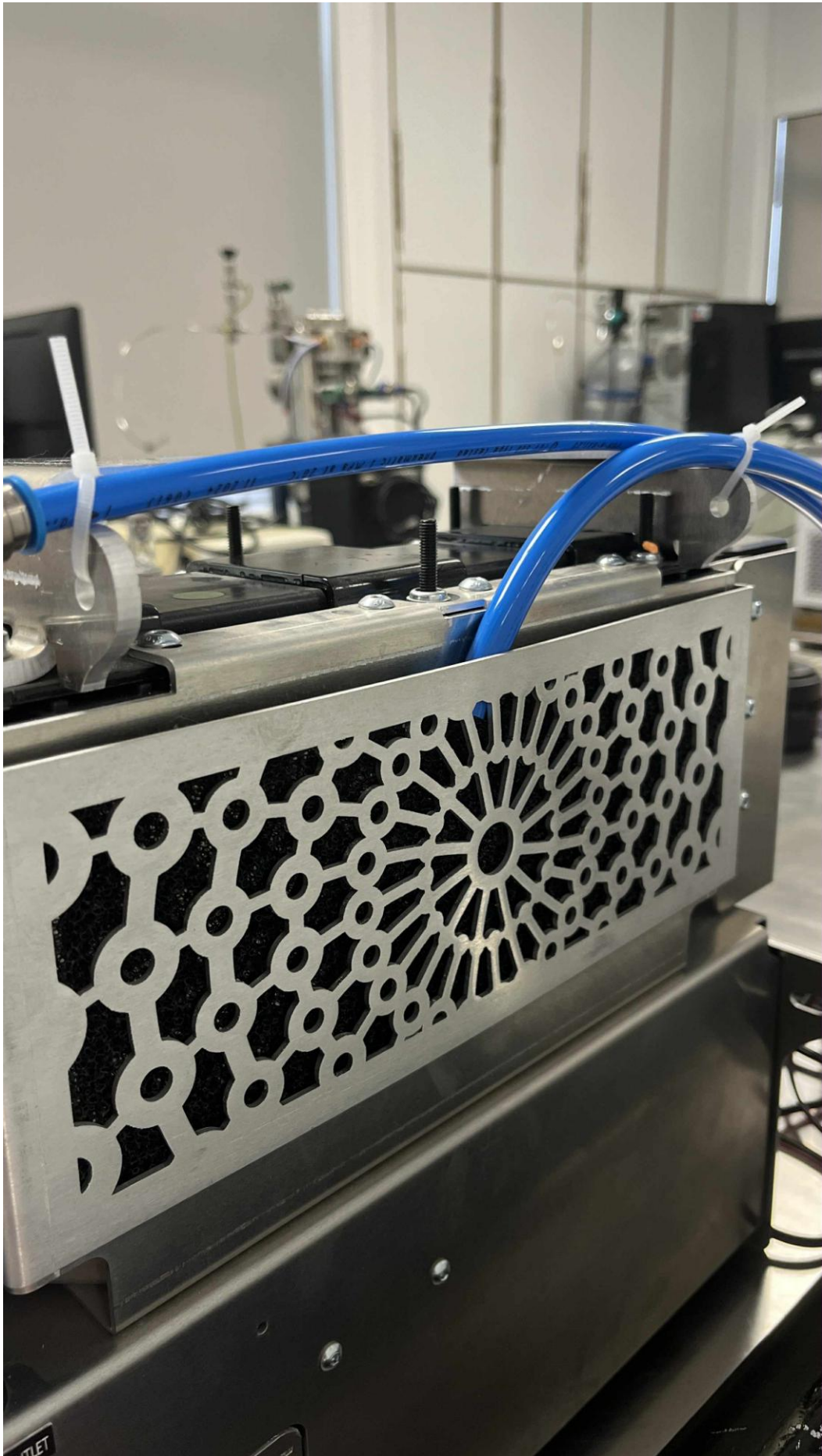


Πίσω Μέρος  
Μονάδας  
Ηλεκτρόλυσης

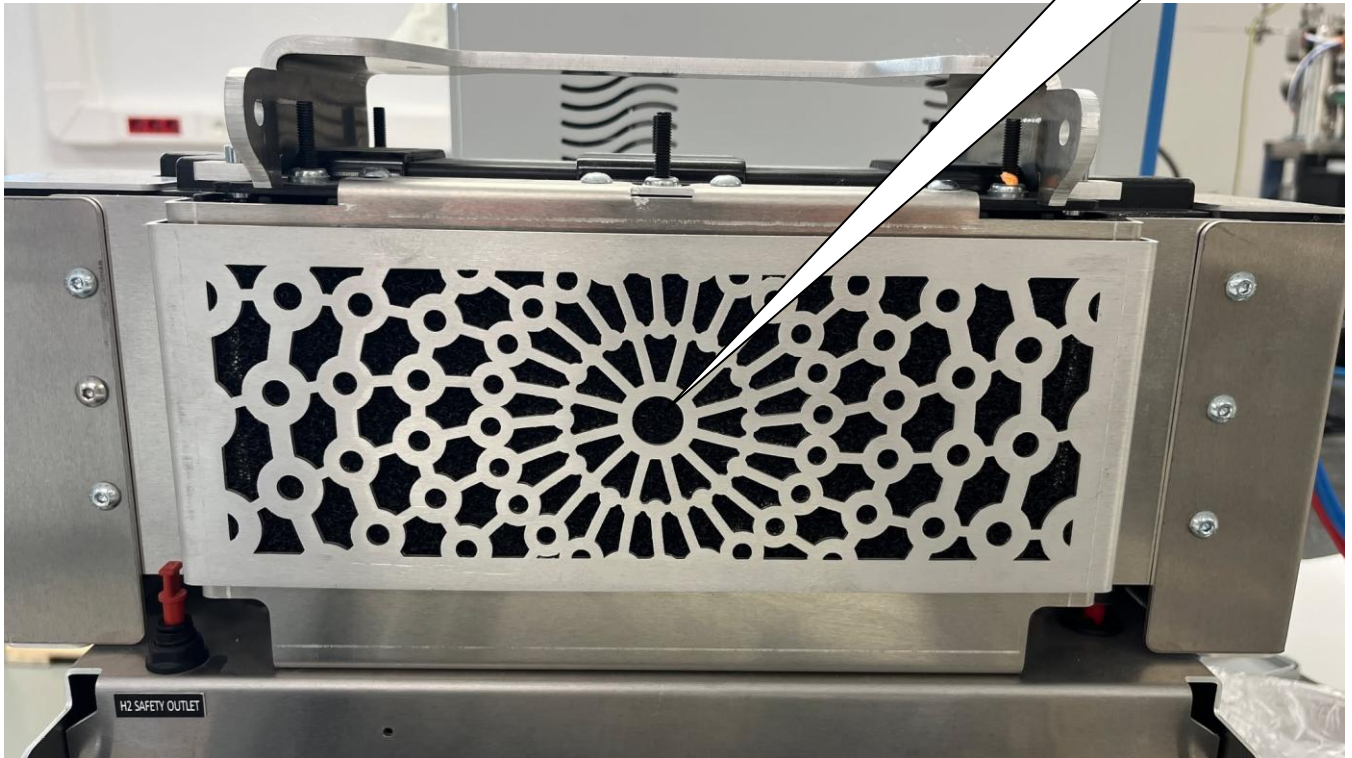




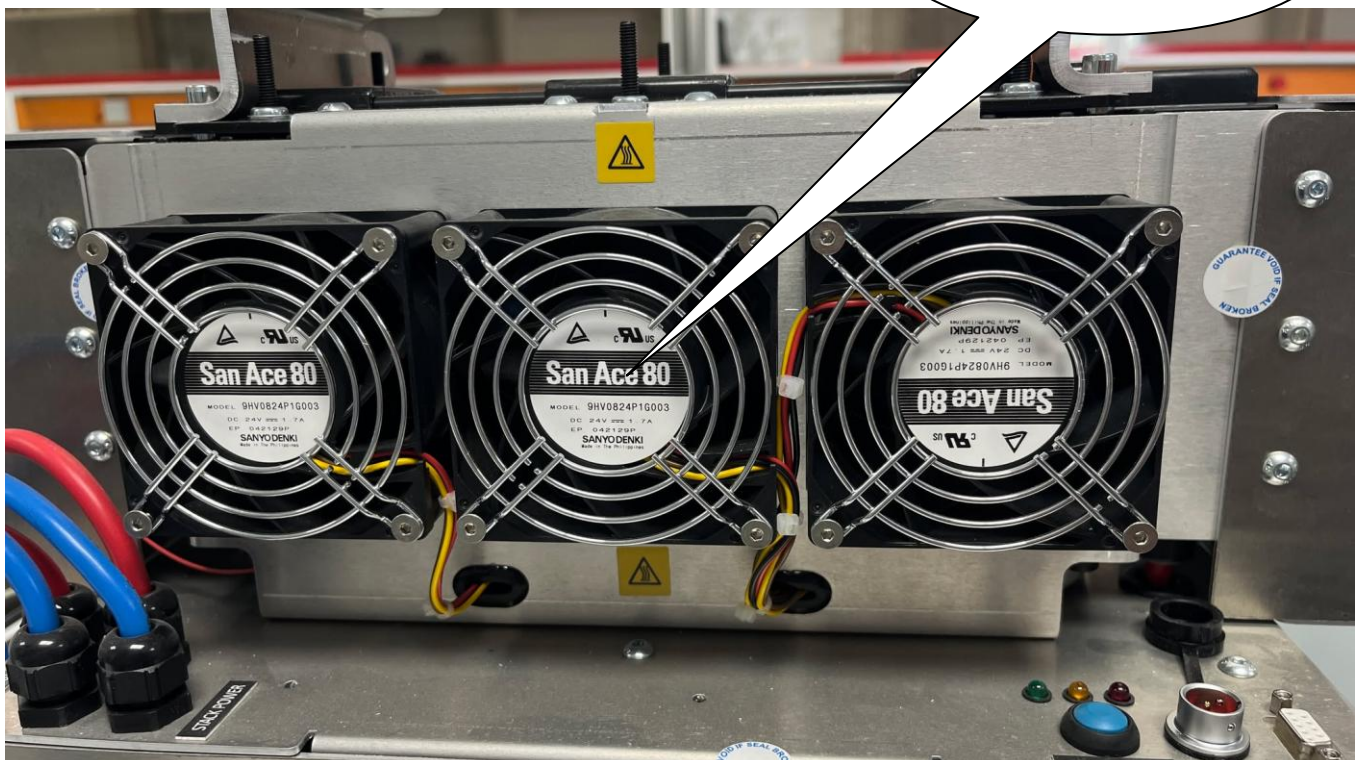




Εισαγωγή Αέρα  
Κυψέλης Καυσίμου



Εξαγωγή Αέρα  
Κυψέλης Καυσίμου

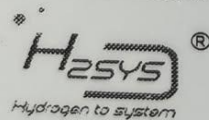




Τεχνικές  
Προδιαγραφές  
Κυψέλης Καυσίμου

### Fuel cell system

Model :	AIRCELL		
Type :	500		
Manufacturing Year :	2022		
		Serial Number :	2022 24 0005
Input Voltage :	24 Vdc	Maximal Power :	600 W
Output Voltage :	12,6 - 18 Vdc	Nominal Power :	650 W
Fuel Type	H2 - grade 3.5 mini		
H2 Input Pressure :	2 - 9 bar	 	
Cooling Type :	Air		
Operating Temperature :	+5°C to +40 °C		



H2SYS – S.A.S  
13 Rue Ernest Thierry Mieg  
90000 – BELFORT - FRANCE  
[www.h2sys.fr](http://www.h2sys.fr)  
Made in France







Τεχνικά Χαρακτηριστικά  
Κυψέλης Καυσίμου

## 6. Technical data

### 6.1. Electrical and gas-related data

#### Electrical data:

Fuel cell voltage range (V)	12.6 - 18	19.6 - 28	39.2 - 56	56 - 80
Nominal current (A)	5-50			
Max current (60s - A)	65			
Nominal power (W)	600	1000	2000	3000
Max. Power (60 sec - W)	750	1200	2400	3400

#### Data relative to gases:

Hydrogen purity	$\geq 3.5$ (99.95 %)		
H <sub>2</sub> temperature* range	+5°C to +35°C		
Air temperature* range	+5°C to +35°C		
H <sub>2</sub> pressure range	4 - 9 barg		
H <sub>2</sub> flow rate (Nl/min)	6	10	20
H <sub>2</sub> nom. consumption	< 66 g/kWh		
Minimal air ventilation (Nl/min)	15	23	47
H <sub>2</sub> volume at AIRCELL® system inlet (l)	3.9x10 <sup>-3</sup>		
H <sub>2</sub> volume at 0.5 bar (l)	0.4056	0.6056	1.1656

\* Larger temperature range on demand. Contact us for details.

#### Hydrogen quality specifications:

Chemical	Nominal	Peak
Total inert gases (99.95% H <sub>2</sub> min.)	< 500 ppm	< 19 000 ppm
Water	< 5 ppm	< 19 000 ppm
Total hydrocarbons	< 2 ppm	< 2 ppm
Oxygen	< 5 ppm	< 5 ppm
Helium	< 300 ppm	< 300 ppm
Nitrogen, Argon	< 200 ppm	< 4000 ppm
Carbon dioxide	< 2 ppm	< 2 ppm
Carbon monoxide	< 0.2 ppm	< 10 ppm
Total sulfur compounds	< 0.004 ppm	< 0.004 ppm

Τεχνικά Χαρακτηριστικά  
Μονάδας Ηλεκτρόλυσης

### Use and Maintenance Manual

#### TECHNICAL DATA

Model	Dimensions W x D x H (mm)	Weight (kg)	Power supply (V)	Power supply Frequency	Power consumption max (W)	Max flow rate (l/min)	Max pressure (bar(g))
MARS 150 N	250 x 460 x 500	23	110/230 VAc	50 / 60 Hz	110	150	10
MARS 150 D	250 x 460 x 500	25	110/230 VAc	50 / 60 Hz	170	150	10
MARS 250 N	250 x 460 x 500	23	110/230 VAc	50 / 60 Hz	140	250	10
MARS 250 D	250 x 460 x 500	25	110/230 VAc	50 / 60 Hz	200	250	10
MARS 500 N	250 x 460 x 500	23	110/230 VAc	50 / 60 Hz	190	400	10
MARS 500 D	250 x 460 x 500	25	110/230 VAc	50 / 60 Hz	250	400	10
MARS 800 D	250 x 460 x 500	26.5	110/230 VAc	50 / 60 Hz	325	600	10
MARS 1000 D	250 x 460 x 500	28	110/230 VAc	50 / 60 Hz	375	800	10
MARS 1200 D	250 x 460 x 500	28	110/230 VAc	50 / 60 Hz	460	1000	10

Features of the Hydrogen produced by MARS generators

**Model D:** Purity >99.99999% (referred to O<sub>2</sub> content) Dew Point <-75°C  
**Model N:** Purity >99.99999% (referred to O<sub>2</sub> content) Dew Point <-40°C

#### TAB. A Environmental conditions

- 1 Temperature (between)
- 2 Relative humidity (between)
- 3 Noise (emission)

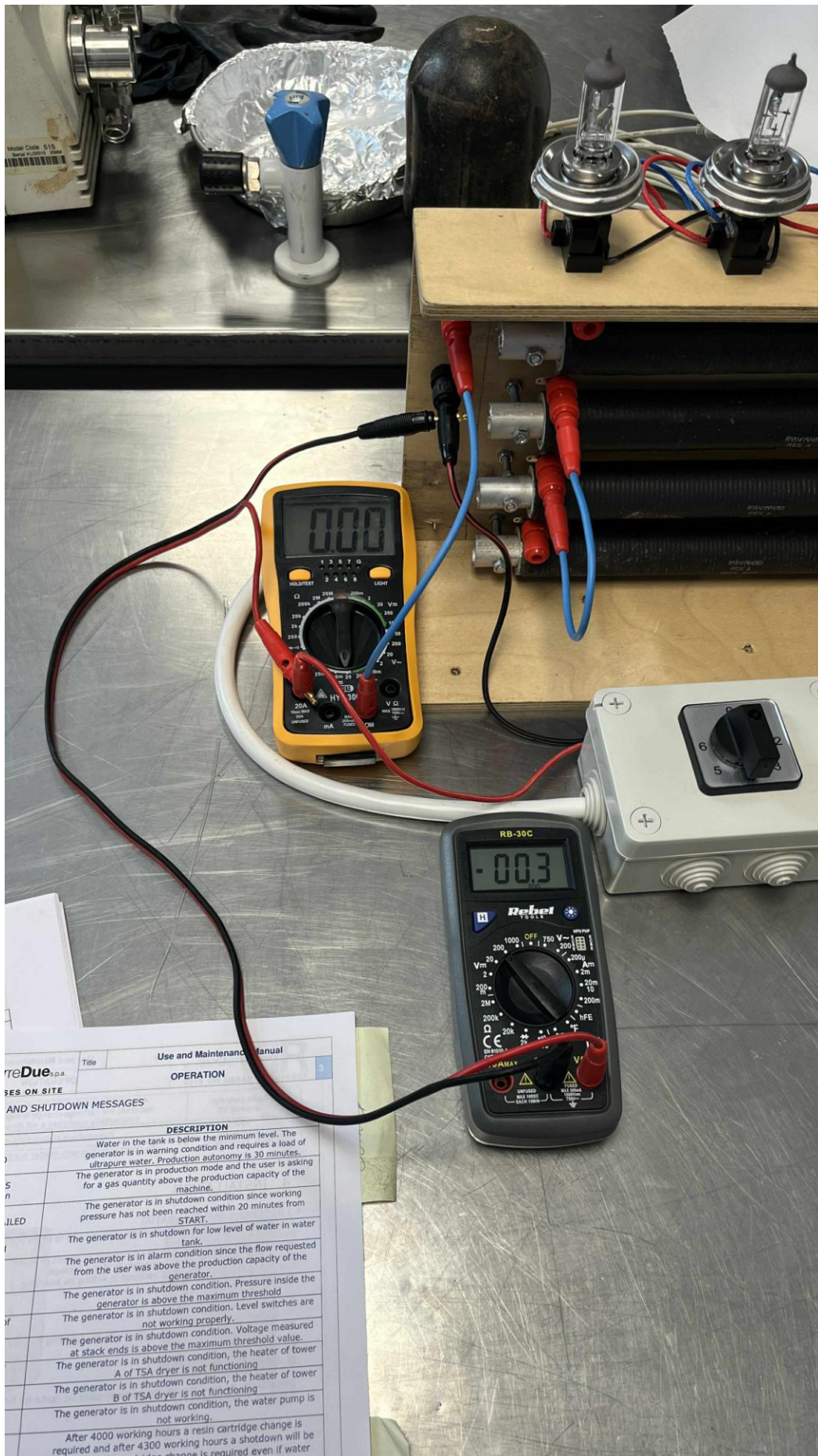
5 ÷ 35°C  
20 ÷ 80%  
< 62dBA

Τεχνικά Χαρακτηριστικά









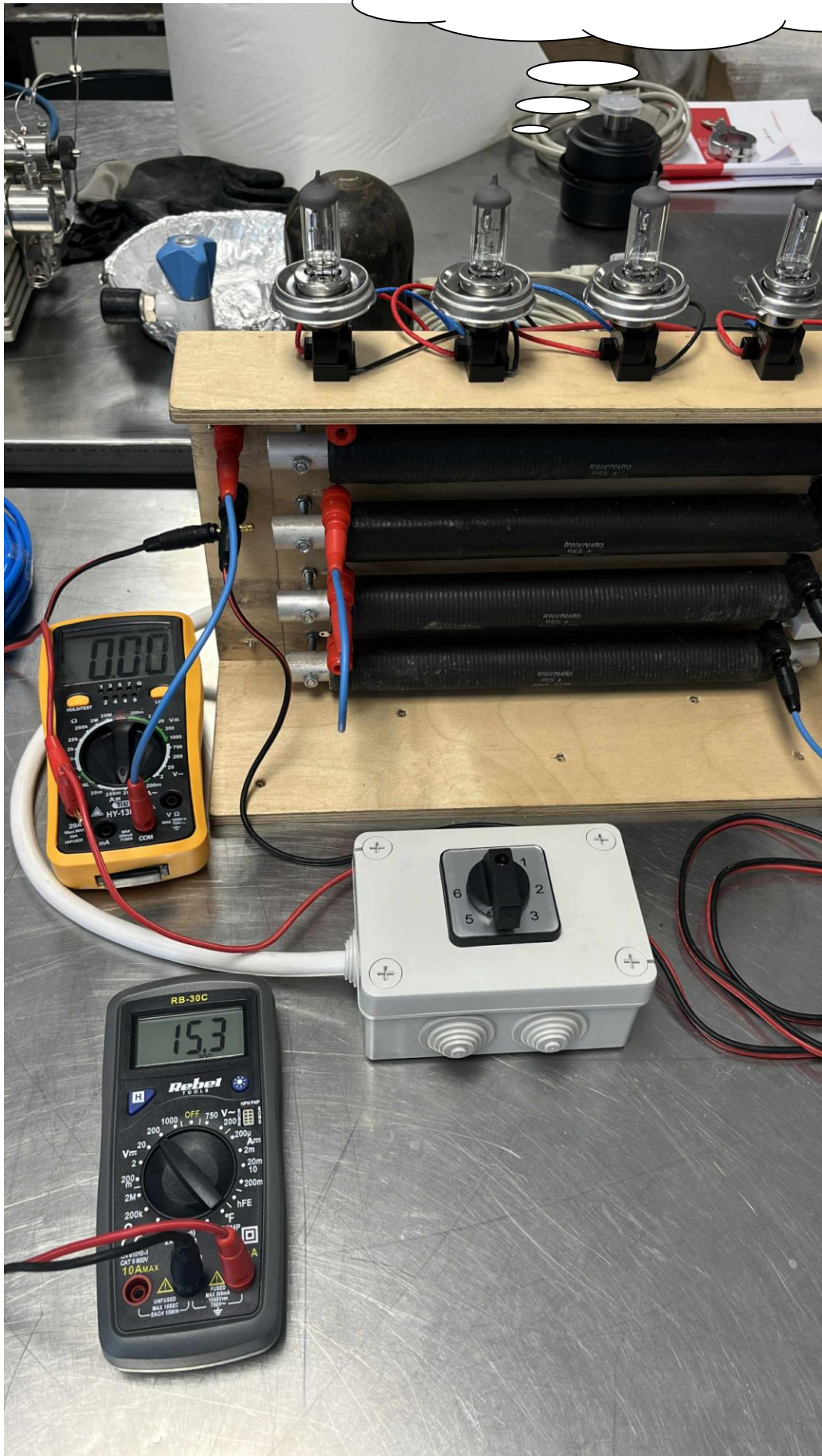






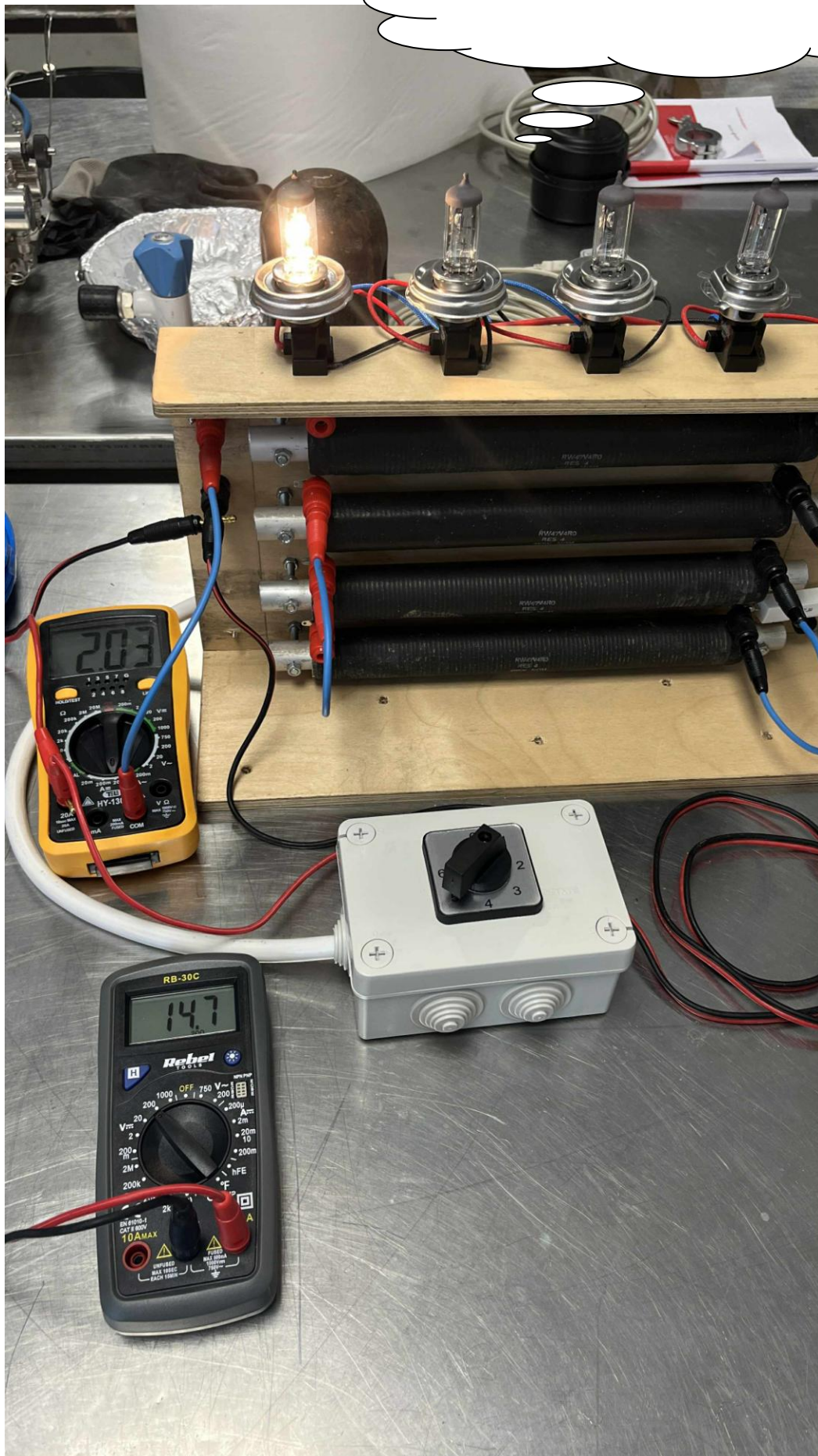


Πειραματική μέτρηση θέσης διακόπτη 0



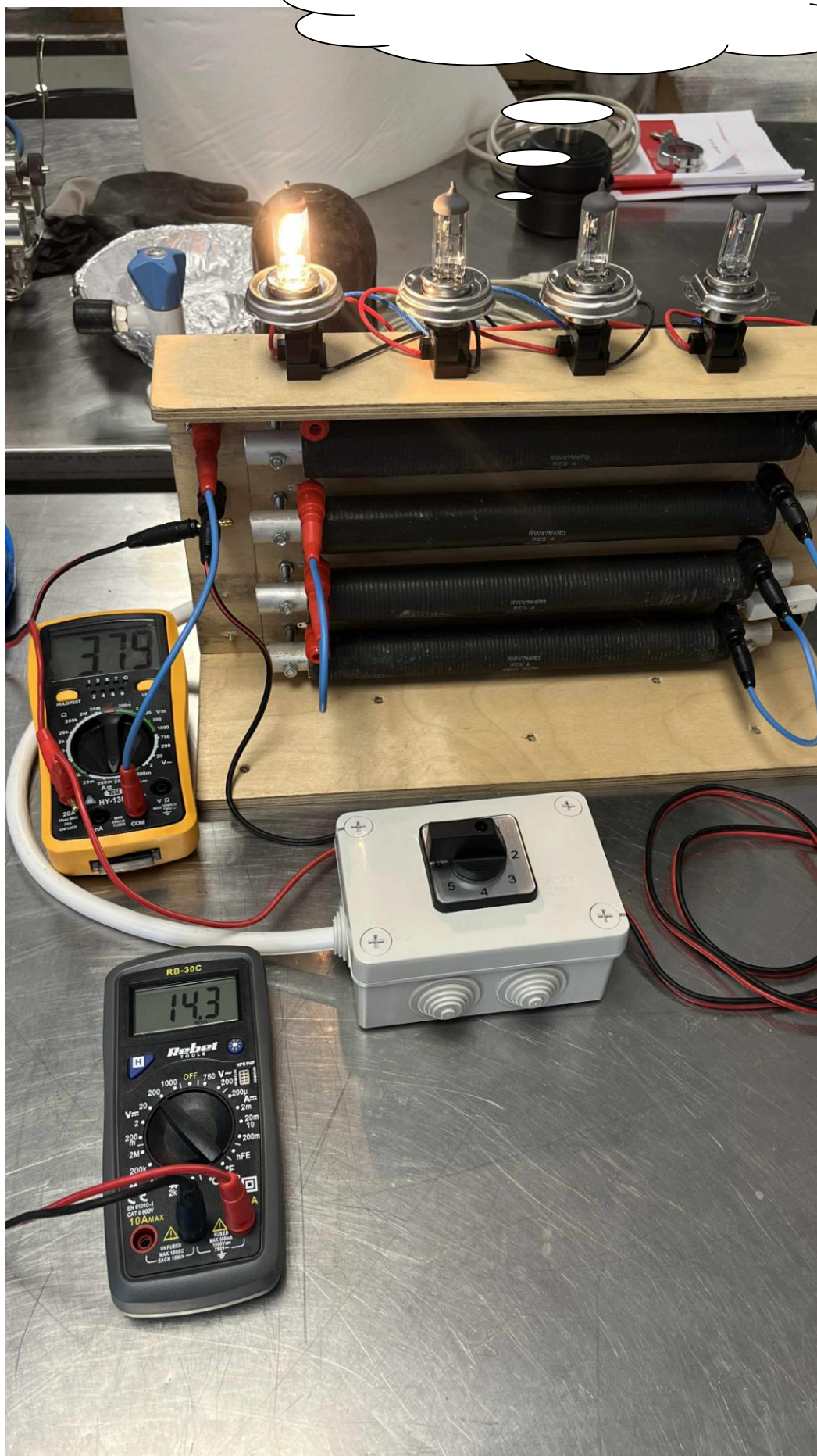


Πειραματική μέτρηση θέσης διακόπτη 1



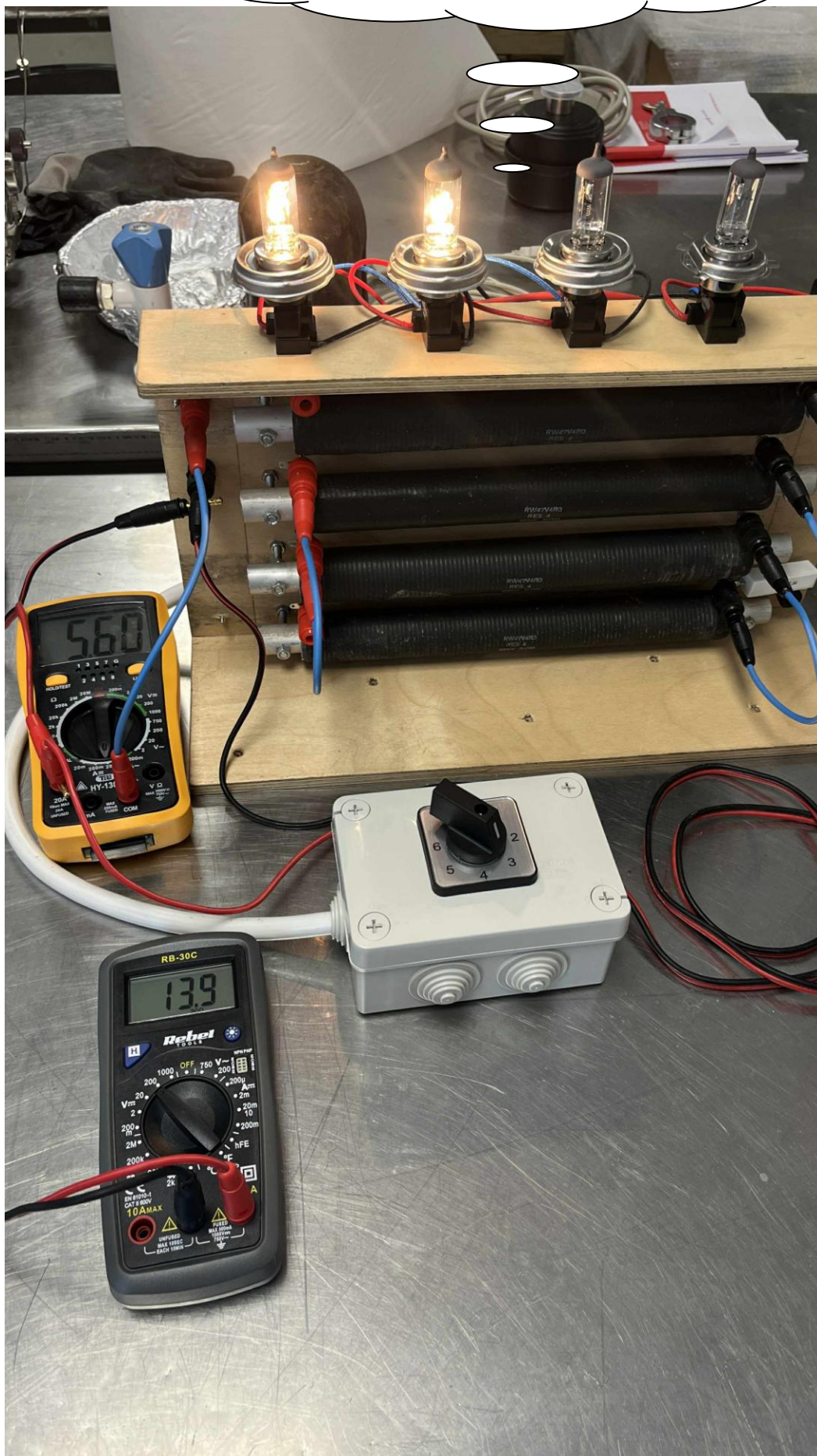


Πειραματική μέτρηση θέσης διακόπτη 2



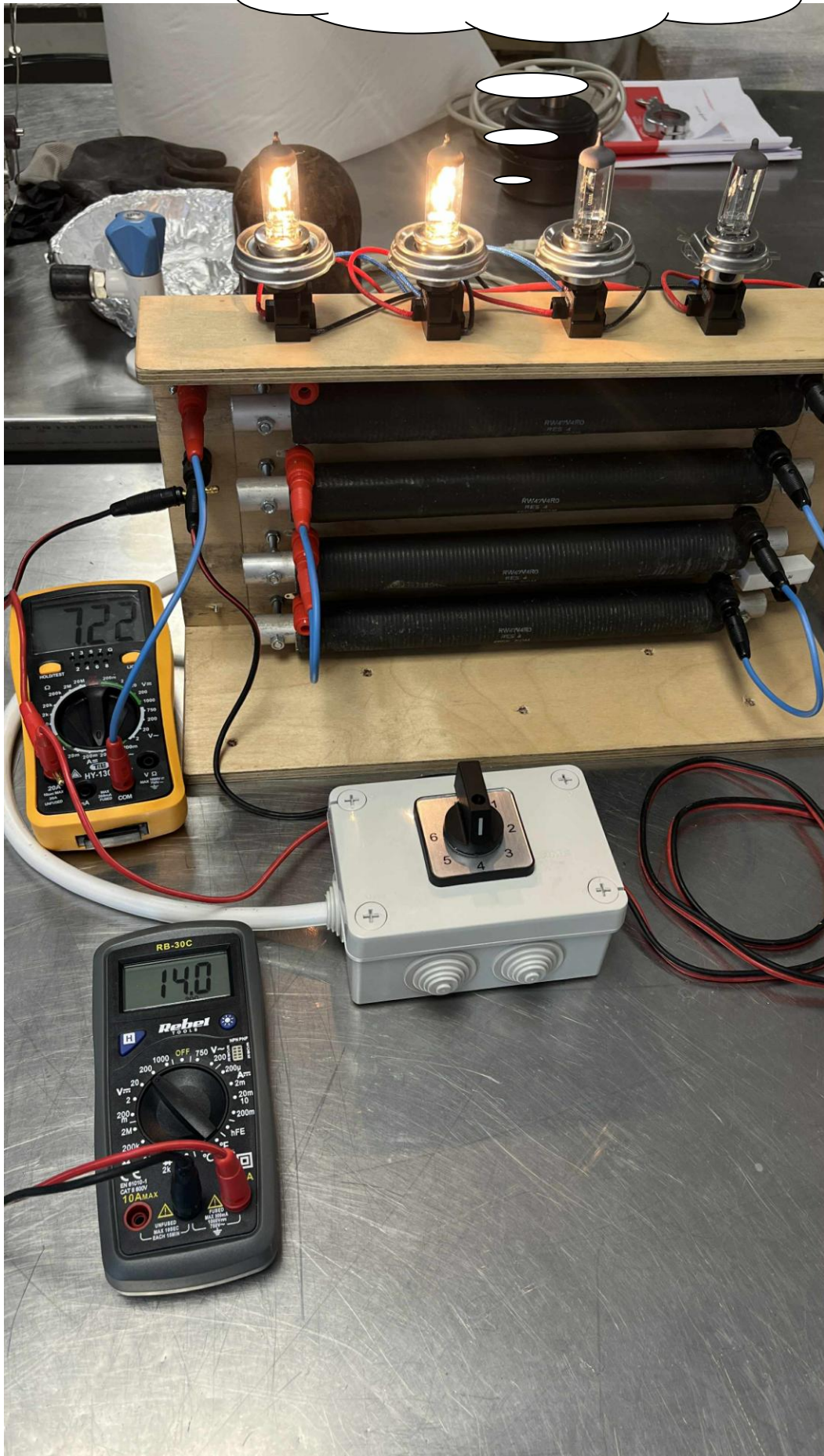


Πειραματική μέτρηση θέσης διακόπτη 3



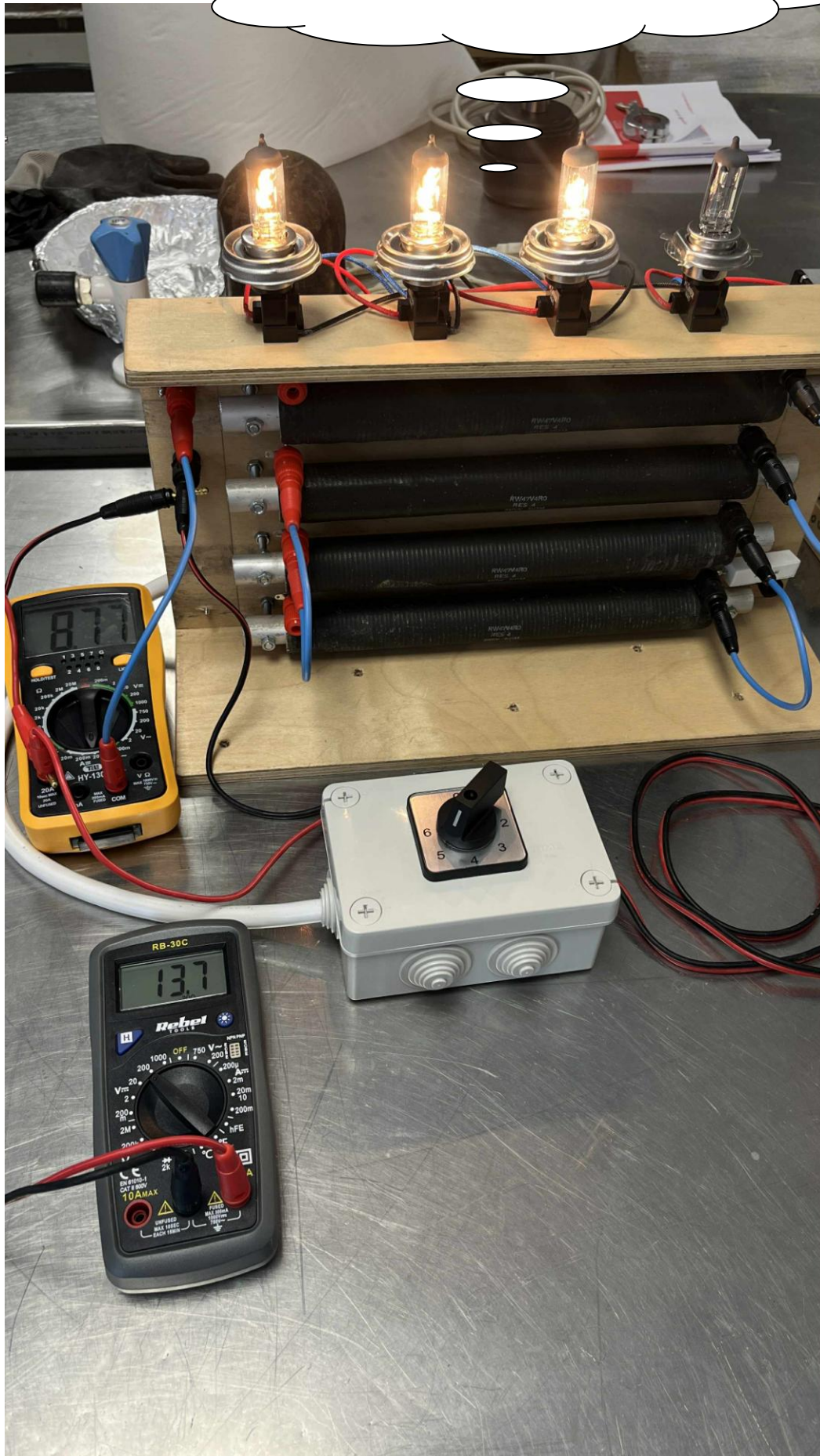


Πειραματική μέτρηση θέσης διακόπτη 4



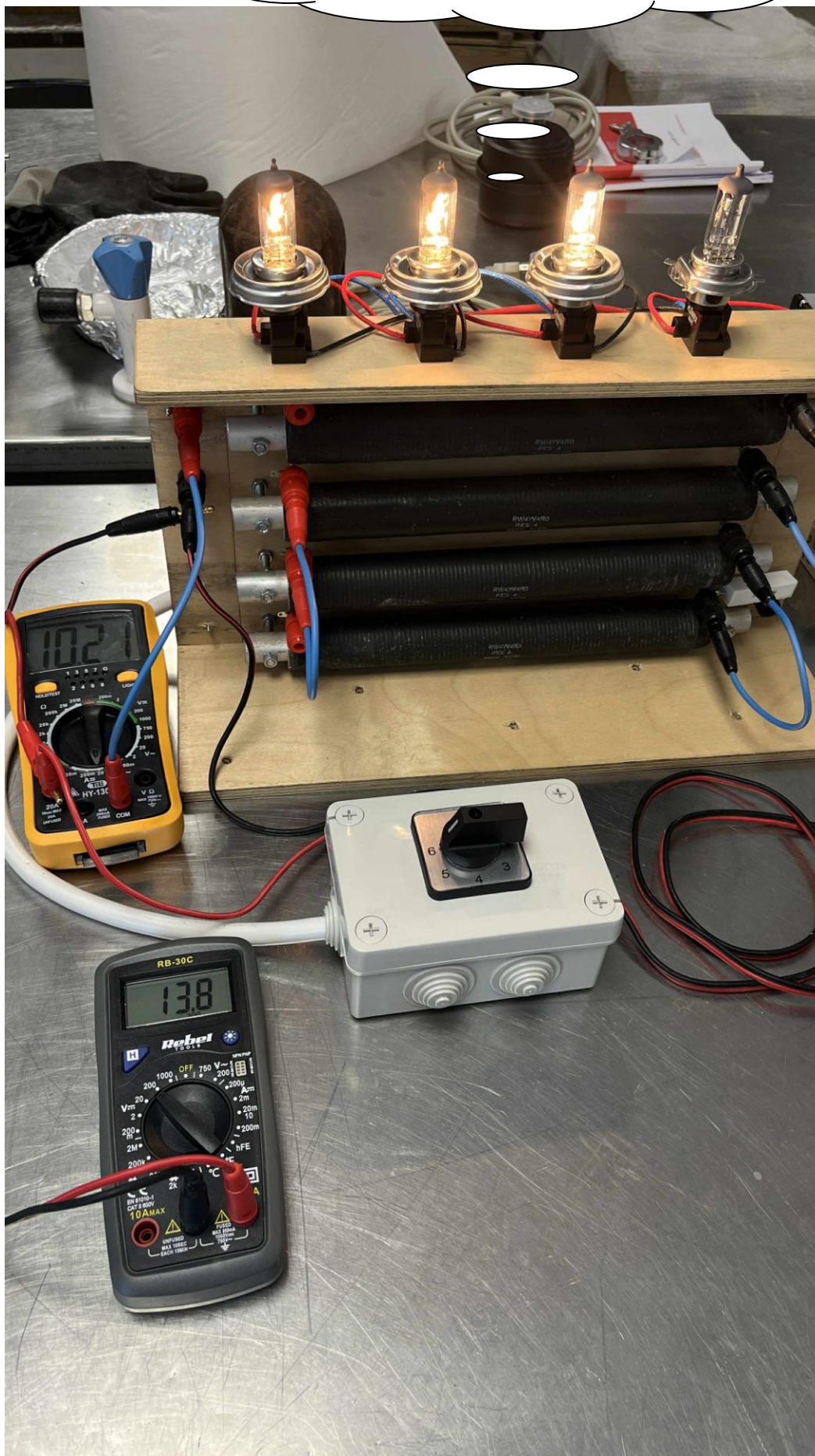


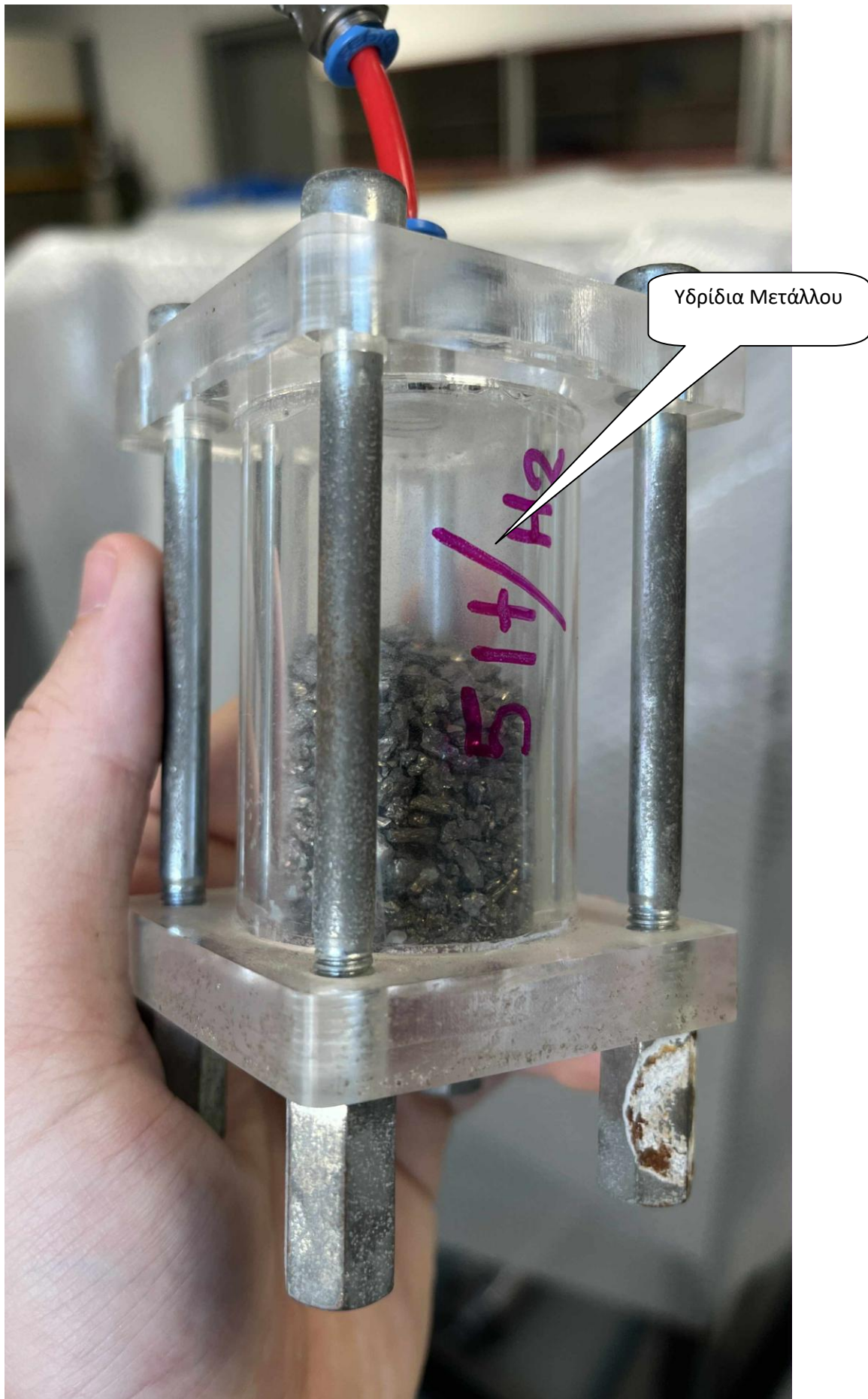
Πειραματική μέτρηση θέσης διακόπτη 5



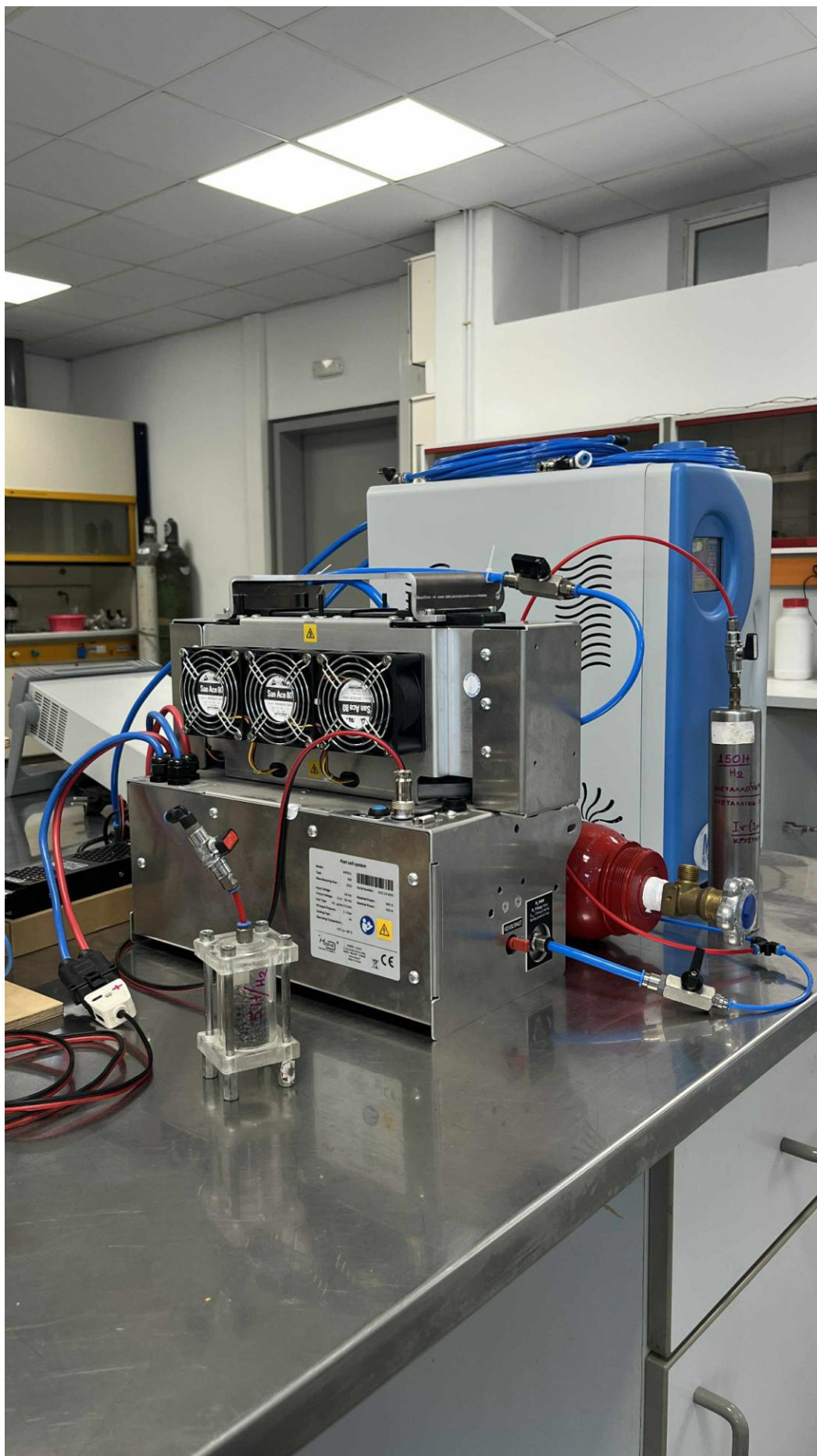


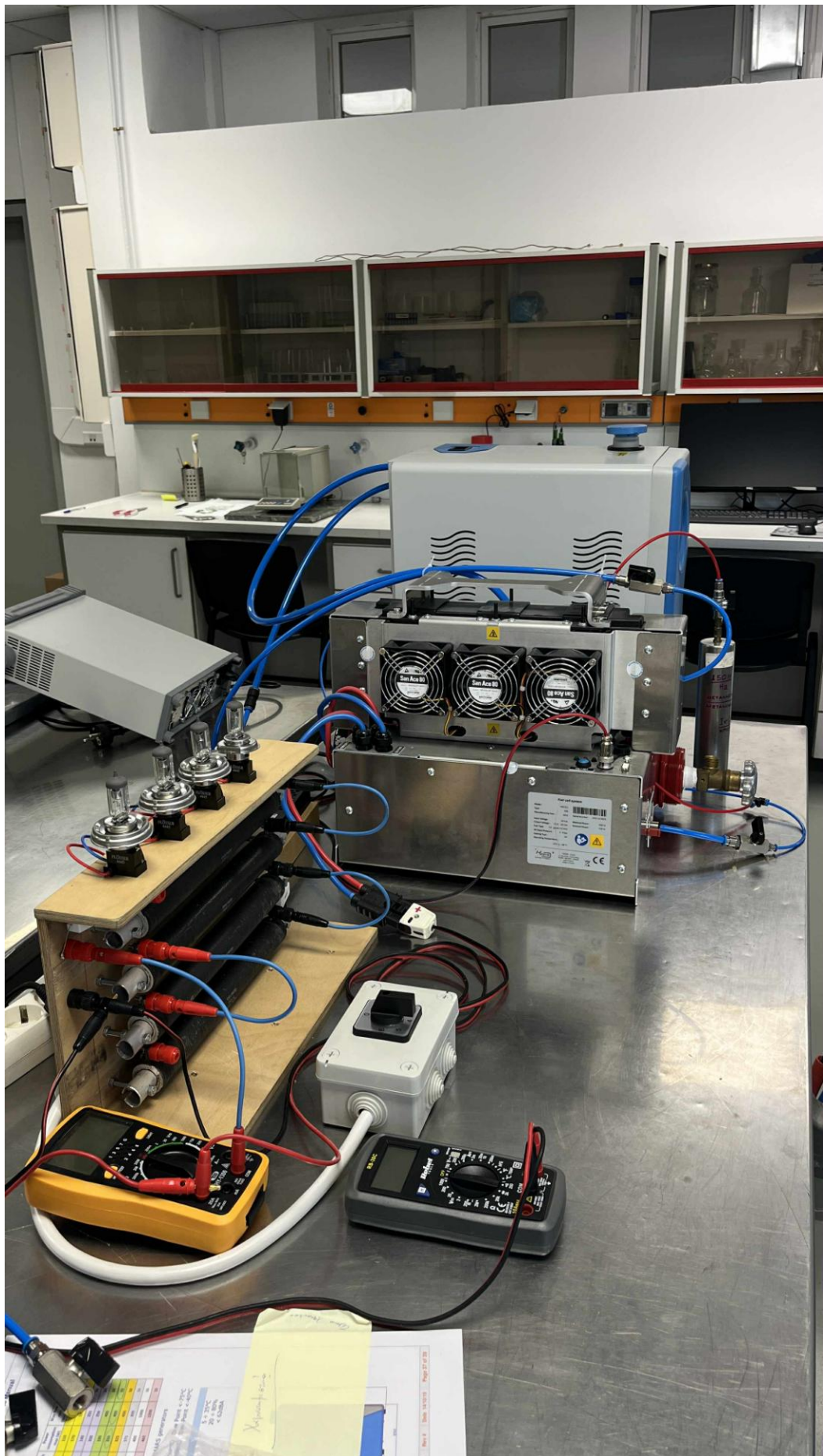
Πειραματική μέτρηση θέσης διακόπτη 6



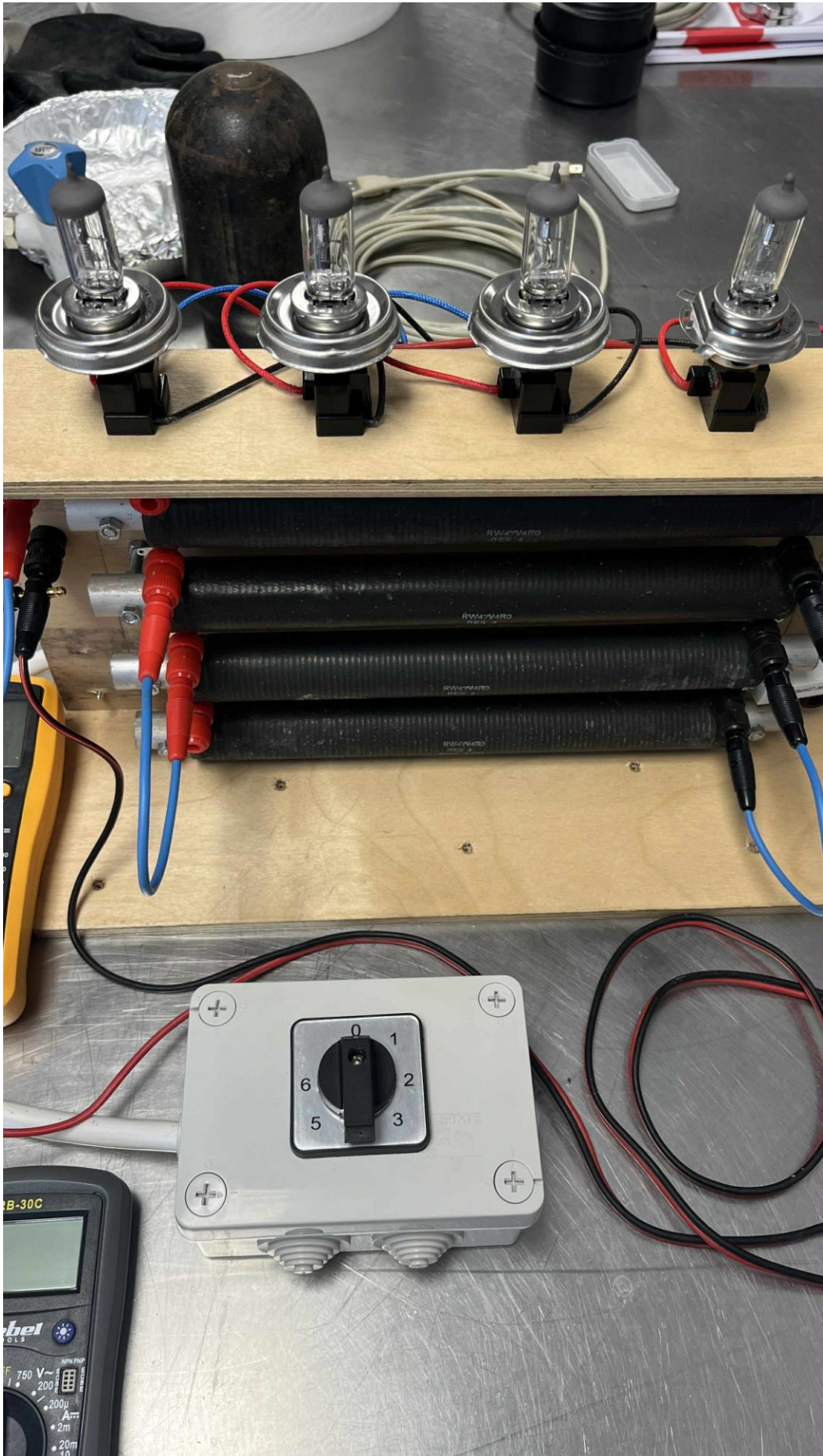








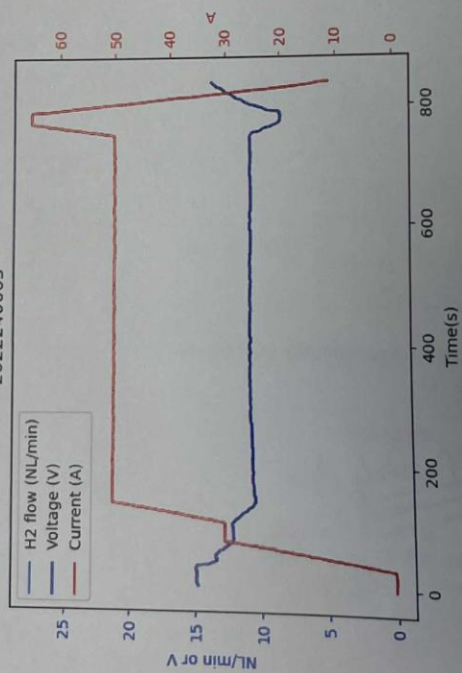




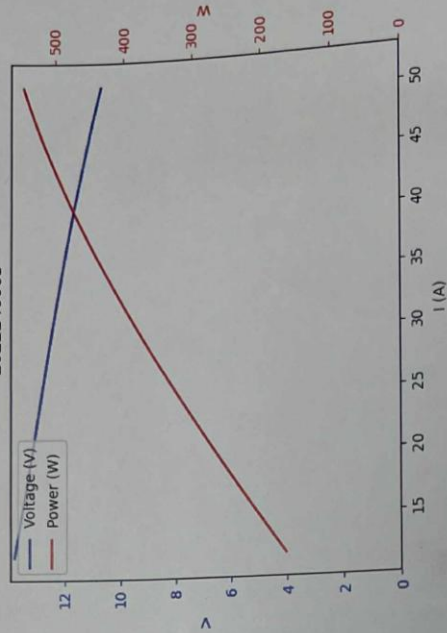


AIRCELL® system has been fully tested and validated in accordance to H2SYS end of fabrication tests.

Reference test  
AIRCELL 500 ACS  
2022240005



Polarization curve  
AIRCELL 500 ACS  
2022240005



January 31, 2022