



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

# ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΚΑΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΠΕ)

ΤΟΥ

**ΜΠΑΣΔΕΚΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ (ΗΝ07708)**

**Επιβλέπων καθηγητής:  
ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΜΟΛΑΣΙΩΤΗΣ**

Κοζάνη, Μάρτιος, 2023





ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

# **HYDROGEN AND RENEWABLE ENERGY SOURCES (RES)**

**BASDEKIS KONSTANTINOS (HN07708)**

**Supervisor Professor:  
VASILEIOS MOLASIOΤIS**

Kozani, March, 2023

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	8
Abstract .....	9
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή .....	10
1.1 Σκοποί της πτυχιακής εργασίας .....	10
Κεφάλαιο 2 - Μεθοδολογία της έρευνας.....	11
2.1 Μέσα διαλογής δεδομένων .....	11
2.2 Λέξεις – Κλειδιά .....	11
Κεφάλαιο 3 – Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....	12
3.1 Πηγές ενέργειας για την παραγωγή υδρογόνου.....	12
3.1.1 Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	13
3.1.2 Εναλλακτικές πηγές ενέργειας.....	13
3.2 Υδρογόνο ως καύσιμο του μέλλοντος.....	16
3.2.1 Χαρακτηριστικά του υδρογόνου .....	16
3.2.2 Χρήσεις του υδρογόνου .....	17
3.3 Τρόποι παραγωγής υδρογόνου .....	19
3.3.1 Θερμόλυση .....	21
3.3.2 Φωτόλυση.....	23
3.3.3 Αεριοποίηση άνθρακα .....	24
3.3.4 Πυρόλυση μεθανίου .....	25
3.3.4.1 Συστήματα αντιδραστήρων πλάσματος.....	26
3.3.4.2 Συστήματα αντιδραστήρων υγρού μετάλλου .....	27
3.3.4.3 Συμβατικά συστήματα αντιδραστήρων αερίου .....	28
3.3.5 Αναμόρφωση μεθανίου με ατμό .....	29
3.3.6 Ηλεκτρόλυση.....	31
3.3.6.1 Αλκαλική ηλεκτρόλυση (AEL) .....	32

3.3.6.2 Ηλεκτρόλυση με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMEL).....	33
3.3.6.3 Ηλεκτρόλυση υψηλής θερμοκρασίας (HTEL) .....	35
3.3.7 Επεξεργασία βιομάζας.....	36
3.3.7.1 Διαδικασία σκοτεινής ζύμωσης παραγωγής υδρογόνου .....	37
3.3.7.2 Διαδικασία φωτοζύμωσης για την παραγωγή υδρογόνου .....	37
3.3.7.3 Διαδικασία βιο-φωτόλυσης για την παραγωγή υδρογόνου .....	38
3.3.7.4 Πυρόλυση βιομάζας.....	38
3.3.7.5 Αεριοποίηση βιομάζας.....	38
3.3.7.6 Παραγωγή Υδρογόνου μέσω Καύσης Βιομάζας.....	39
3.3.7.7 Απόδοση παραγωγής υδρογόνου και περιορισμοί που σχετίζονται με τις διάφορες τεχνικές επεξεργασίας της βιομάζας .....	39
3.4 Μεταφορά και διανομή υδρογόνου .....	42
3.5 Αποθήκευση υδρογόνου .....	46
3.5.1 Συμπιεσμένο αέριο .....	47
3.5.2 Υγροποιημένο υδρογόνο .....	48
3.5.3 Υδρίδιο μετάλλου .....	48
3.5.4 Αμμωνία.....	50
3.5.5 Νανοσωλήνες άνθρακα (CNs).....	51
3.5.6 Υγρός οργανικός φορέας υδρογόνου (LOHC) .....	52
3.5.7 Μεταλλικά-οργανικά υβρίδια (MOF).....	54
3.6 Κυψέλες καυσίμου.....	55
3.6.1 Αρχή λειτουργίας κυψελίδων καυσίμου .....	55
3.6.2 Τύποι κυψελών καυσίμου.....	56
3.6.2.1 Κυψέλη καυσίμου μεθανόλης (DMFC).....	56
3.6.2.2 Κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC).....	56
3.6.2.3 Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC) .....	58

3.6.2.4 Αναστρέψιμη κυψέλη καυσίμου (RFC) .....	58
3.6.2.5 Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC).....	59
3.6.2.6 Κυψέλη καυσίμου υγρού ανθρακικού άλατος (MCFC) .....	60
3.6.2.7 Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) .....	61
3.7 Κύριες προκλήσεις .....	64
Κεφάλαιο 4 – Συμπεράσματα.....	67
Κεφάλαιο 5 – Επίλογος.....	68
Κεφάλαιο 6 - Βιβλιογραφία .....	70
Ακρωνύμια- Αρκτικόλεξα.....	75

### **Κατάλογος εικόνων**

Εικόνα 1. Σχηματική απεικόνιση της κατανομής του παγκόσμιου ενεργειακού εφοδιασμού το 2018. (Ishaq et al., 2021) .....	12
Εικόνα 2. Ογκομετρικές έναντι βαρυμετρικές πυκνότητες ενέργειας κοινών καυσίμων. (Ratnakar et al., 2021).....	17
Εικόνα 3. Επισκόπηση πιθανών οδών παραγωγής υδρογόνου. Τα διακεκομένα κουτιά υποδεικνύουν τεχνολογίες που δεν είναι διαθέσιμες ακόμα σε βιομηχανική κλίμακα. (Ringsgwandl et al., 2022) .....	21
Εικόνα 4. Διαδικασία θερμόλυσης. (Nikolaidis & Poullikkas, 2017) .....	23
Εικόνα 5. Φωτόλυση. (Nikolaidis & Poullikkas, 2017).....	24
Εικόνα 6. Διαδικασίες αποδόμησης μεθανίου. (Timmerberg et al., 2020).....	26
Εικόνα 7. Τεχνοοικονομικοί παράμετροι. (Timmerberg et al., 2020) .....	31
Εικόνα 8. Τεχνοοικονομικοί παράμετροι με ή χωρίς αποθήκευση CO2. (Timmerberg et al., 2020) .....	31
Εικόνα 9. Διάταξη αλκαλικής ηλεκτρόλυσης. (Carmo, 2022).....	33
Εικόνα 10. Διάταξη ηλεκτρόλυσης με μεβράνη ανταλλαγής πρωτονίων. (Carmo, 2022) .....	34
Εικόνα 11. Διάταξη ΗΤΕ. (Hydrogen Production through Electrolysis, n.d.) .....	35
Εικόνα 12. Σύγκριση τεχνολογιών ηλεκτρόλυσης. (Trattner et al., 2021).....	36
Εικόνα 13. Επεξεργασία βιομάζας. (Agyekum et al., 2022) .....	37
Εικόνα 14. Τρόποι μεταφοράς/διανομής υδρογόνου. (Ratnakar et al., 2021) .....	45

Εικόνα 15. Χωρητικότητα διαφόρων συστημάτων αποθήκευσης υδρογόνου. (Abdalla et al., 2018) .....	46
Εικόνα 16. Τύποι δοχείων πίεσης. (Abdalla et al., 2018) .....	47
Εικόνα 17. Απορρόφηση και εκρόφηση υδρογόνου σε υδρίδιο μετάλλου. (Abdalla et al., 2018) .....	49
Εικόνα 18. Απορρόφηση υδρογόνου σε νανοσωλήνες άνθρακα. (Abdalla et al., 2018) .....	52
Εικόνα 19. Τρόπος λειτουργίας LOHC. (Rao & Yoon, 2020) .....	53
Εικόνα 20. Οι 4 κύριοι τρόποι αποθήκευσης υδρογόνου. (Weichenhain 2021).....	54

### **Κατάλογος πινάκων**

Πίνακας 1. Σύγκριση των διεργασιών παραγωγής υδρογόνου. ....	40
Πίνακας 2. Σύγκριση μεθόδων διανομής/μεταφοράς υδρογόνου. (Ratnakar et al., 2021).....	43
Πίνακας 3. Σύγκριση τύπων κυψελών καυσίμου. (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2019) .....	62

## Περίληψη

Το υδρογόνο αποτελεί έναν ενεργειακό φορέα και καύσιμο, που μπορεί να μετατρέψει το τρέχον παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα που εξαρτάται από τα ορυκτά καύσιμα σε μια οικονομία υδρογόνου. Με τον τρόπο αυτό, υιοθετείται ένα καύσιμο το οποίο μπορεί να προσφέρει ενέργεια χωρίς την ταυτόχρονη εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου και είναι φιλικό προς το περιβάλλον. Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση με στόχο να αποτυπωθούν οι μέθοδοι παραγωγής, διανομής/μεταφοράς και αποθήκευσης του υδρογόνου, καθώς και η έννοια των κυψελών καυσίμου. Αν και το πράσινο υδρογόνο, έως και τώρα, δεν αποτελεί μια οικονομικά συμφέρουσα επιλογή καυσίμου σε σχέση με την βενζίνη και το πετρέλαιο, πραγματοποιούνται προσπάθειες ώστε σιγά σιγά να ενταχθεί ως καύσιμο και επισπευστεί η απανθρακοποίηση της τρέχουσας οικονομίας.

*Λέξεις κλειδιά:* Ανανεώσιμη ενέργεια, Παραγωγή υδρογόνου, Ηλεκτρόλυση, Αναμόρφωση μεθανίου με ατμό, Πράσινο υδρογόνο, Χρώματα του υδρογόνου, Αποθήκευση υδρογόνου, Μεταφορά υδρογόνου, Χρήσεις υδρογόνου, Κυψέλες καυσίμου.



## Abstract

Hydrogen is an energy carrier and fuel that can transform the current global energy system dependent on fossil fuels into a hydrogen economy. In this way, a fuel is adopted which can provide energy without the simultaneous emission of greenhouse gases and is environmentally friendly. In this paper, a literature review is carried out with the aim of capturing the methods of production, distribution/transport and storage of hydrogen, as well as the concept of fuel cells. Although green hydrogen is, until now, not an economically viable fuel option compared to gasoline and oil, efforts are underway to slowly mainstream it as a fuel and accelerate the decarbonization of the current economy.

*Keywords:* Renewable energy, Hydrogen production, Electrolysis, Steam methane reforming, Green Hydrogen, Colors of hydrogen, Hydrogen storage, Hydrogen distribution, Hydrogen uses, Fuel cells.

# Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

## 1.1 Σκοποί της πτυχιακής εργασίας

Στην συγκεκριμένη εργασία επιχειρείται βιβλιογραφική ανασκόπηση σύγχρονων επιστημονικών δημοσιεύσεων. Οι κύριοι άξονες γύρω από τους οποίους επικεντρώνεται η παρούσα μελέτη είναι οι παρακάτω:

- Πηγές ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή υδρογόνου
- Χαρακτηριστικά του υδρογόνου και πιθανές χρήσεις του
- Περιγραφή των διάφορων χρωμάτων του υδρογόνου
- Τρόποι παραγωγής υδρογόνου
- Μεταφορά και διανομή υδρογόνου
- Αποθήκευση υδρογόνου
- Κυψέλες καυσίμου

## Κεφάλαιο 2 - Μεθοδολογία της έρευνας

### 2.1 Μέσα διαλογής δεδομένων

Για την ανεύρεση των άρθρων που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη μελέτη, έγινε αναζήτηση στις παρακάτω βάσεις δεδομένων: Researchgate, Elsevier, Science Direct, Pubmed, Google scholar, Google, wiley online library.

### 2.2 Λέξεις – Κλειδιά

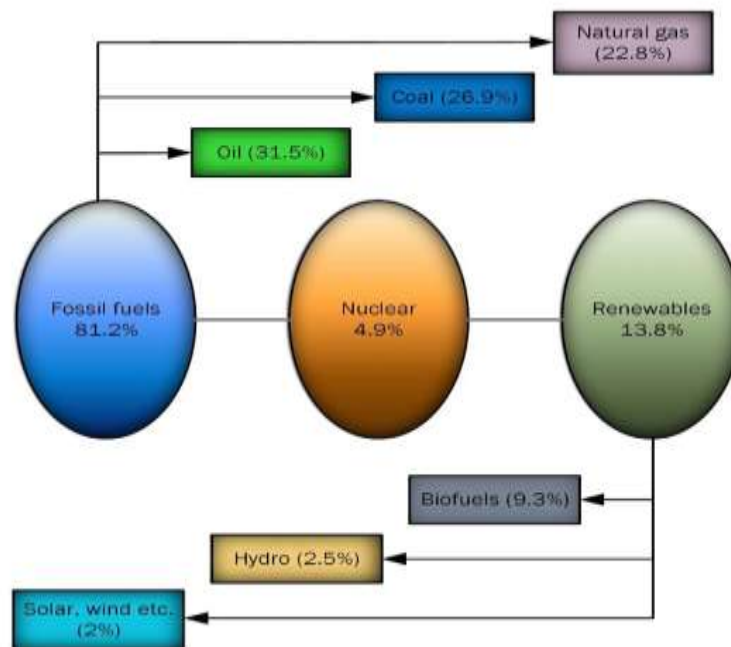
Renewable energy, Hydrogen production, Electrolysis, Steam methane reforming, Green Hydrogen, Colors of hydrogen, Hydrogen storage, Hydrogen distribution, Hydrogen uses, Fuel cells.

## Κεφάλαιο 3 – Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 3.1 Πηγές ενέργειας για την παραγωγή υδρογόνου

Το μέλλον της Οικονομίας του Υδρογόνου εξαρτάται από την διαθεσιμότητα μιας χαμηλού κόστους και φιλικής προς το περιβάλλον πηγής παραγωγής υδρογόνου. Επί του παρόντος, η παραγωγή υδρογόνου γίνεται κυρίως με τη χρήση ορυκτών καυσίμων, όπως είναι το φυσικό αέριο και ο άνθρακας. Ωστόσο, και τα δύο αυτά καύσιμα έχουν περιορισμένη προσφορά και επιπλέον απελευθερώνουν αέρια θερμοκηπίου κατά την παραγωγή υδρογόνου. Επομένως, τόσο για περιβαλλοντικούς όσο και για οικονομικούς λόγους, θα πρέπει να επιδιωχθούν εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Στις επόμενες ενότητες θα αναλυθούν οι συμβατικές αλλά και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μέσω των οποίων είναι δυνατόν να επιτευχθεί η παραγωγή υδρογόνου. (Bartels et al., 2010)

Στην εικόνα 1 παρουσιάζεται η κατανομή του ενεργειακού εφοδιασμού το 2018. Όπως φαίνεται, τα ορυκτά καύσιμα καταλαμβάνουν το 81,2% στον παγκόσμιο εφοδιασμό ενέργειας ακολουθούμενο από το μερίδιο 13,8% των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (9,3% από βιοκαύσιμα, 2,0% από αιολική/ηλιακή κ.λπ. και 2,5% από υδροηλεκτρική ενέργεια) και το 4,9% προέρχεται από την χρήση πυρηνικής ενέργειας. (Ishaq et al., 2021)



Εικόνα 1. Σχηματική απεικόνιση της κατανομής του παγκόσμιου ενεργειακού εφοδιασμού το 2018. (Ishaq et al., 2021)

### 3.1.1 Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Το **φυσικό αέριο** είναι ένα καύσιμο που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο που παράγεται μέσω της αποσύνθεσης των οργανικών υλικών. Επιπλέον, το περισσότερο φυσικό αέριο λαμβάνεται από πηγάδια, αν και μπορεί να παραχθεί από οργανικά απόβλητα με τη χρήση χωνευτών. Το φυσικό αέριο βρίσκεται συνήθως κοντά σε περιοχές με μεγάλο αποθέματα πετρελαίου ή άνθρακα. Οι χώρες με τα μεγαλύτερα αποθέματα είναι η Ρωσία, το Ιράν και το Κατάρ. Οι Ηνωμένες Πολιτείες έχουν ένα σχετικά μικρό απόθεμα και οι περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες έχουν αποθέματα πολύ λιγότερα από 1% του παγκόσμιου συνόλου. (Bartels et al., 2010)

Ο **άνθρακας** είναι ένα ορυκτό καύσιμο που σχηματίστηκε πριν από εκατομμύρια χρόνια από προϊστορική βλάστηση. Αυτή η βλάστηση συσσωρεύτηκε σε βάλτους και τυρφώνες όπου θάφτηκε λόγω της κίνησης του φλοιού της γης και της συσσώρευσης ιζημάτων. Η υψηλή πίεση και η θερμοκρασία στη συνέχεια συνέβαλε στη διάσπαση της βλάστησης, μετατρέποντάς την τελικά σε άνθρακα. Στα τέλη του 2007, οι Ηνωμένες Πολιτείες είχαν τον περισσότερο άνθρακα αποθεματικά στον κόσμο, ακολουθούμενες από τη Ρωσία και την Κίνα. Η χρήση άνθρακα ως πηγή ορυκτών καυσίμων παρουσιάζει μειονεκτήματα, καθώς απελευθερώνει διοξείδιο του άνθρακα και άλλους ρύπους κατά την καύση. Η εξόρυξη άνθρακα προκαλεί τοπογραφικές και οικολογικές αλλαγές. (Bartels et al., 2010)

### 3.1.2 Εναλλακτικές πηγές ενέργειας

Καθώς η προσφορά ορυκτών καυσίμων μειώνεται, πρέπει να αναπτυχθούν εναλλακτικές λύσεις για την παραγωγή υδρογόνου, τόσο για περιβαλλοντικούς όσο και για οικονομικούς λόγους. Είναι γεγονός πως το κόστος παραγωγής υδρογόνου από μονάδες που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα είναι φθηνότερο από τις εναλλακτικές πηγές ενέργειας, όμως το κόστος των συμβατικών καυσίμων αυξάνεται και το κόστος των εναλλακτικών τεχνολογιών ενέργειας τείνει να μειώνεται καθώς ολοένα και νέες τεχνολογίες αναπτύσσονται.

Η **πυρηνική ενέργεια** χρησιμοποιεί ελεγχόμενες πυρηνικές αντιδράσεις για να δημιουργηθεί ενέργεια από άτομα. Τα πυρηνικά καύσιμα μοιάζουν με τα ορυκτά καύσιμα στο ότι είναι σε περιορισμένη ποσότητα, αν και τα διαθέσιμα αποθέματα είναι πολύ μεγαλύτερα και μακροβιότερα από τους ορυκτούς πόρους. Θεωρείται βιώσιμη πηγή ενέργειας και όχι τελείως ανανεώσιμη, καθώς το ουράνιο εξορύσσεται. Παρόλο που η πυρηνική παραγωγή δημιουργεί απόβλητα τα οποία πρέπει να απορριφθούν, δεν εκπέμπονται αέρια του θερμοκηπίου κατά την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας. Τα παγκόσμια

αποδεδειγμένα αποθέματα ουρανού είναι περίπου 3.622.000 τόνοι και η τρέχουσα ετήσια χρήση είναι 65.000 τόνοι. (Bartels et al., 2010)

Η **ηλιακή ενέργεια** από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στη γη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας απευθείας με χρήση φωτοβολταϊκών ή έμμεσα με χρήση ηλιακής θερμότητας σε θερμικό κύκλο θερμότητας. Η ενέργεια που διατίθεται από την ηλιακή ακτινοβολία είναι τεράστια. Συνολικά περίπου  $5.457 \times 10^{18}$  MJ φτάνουν στην επιφάνεια της Γης ετησίως. Το 2005, η συνολική κατανάλωση ενέργειας ολόκληρης της γης, από όλες τις πηγές ενέργειας, ήταν  $4.883 \times 10^{14}$  MJ, που είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μικρότερη από την ηλιακή ενέργεια που χτυπά την γη. Μόνο μια μικρή έκταση γης χρειάζεται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της Γης με την ηλιακή τεχνολογία. Για παράδειγμα, εάν ένα σύστημα ηλιακού συλλέκτη που λειτουργεί με απόδοση μετατροπής σε ηλεκτρική ενέργεια 10%, τότε λιγότερο από το 1% της παγκόσμιας χερσαίας έκτασης θα χρειαζόταν να καλυφθεί από ηλιακούς συλλέκτες ώστε να καλυφθούν όλες οι ενεργειακές ανάγκες για όλες τις ανθρώπινες δραστηριότητες. (Bartels et al., 2010)

Η **αιολική ενέργεια** χρησιμοποιεί τη διαθέσιμη ισχύ που υπάρχει στον άνεμο για να περιστραφεί μια τουρμπίνα και έτσι να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια. Οι ανεμογεννήτριες τυπικά κατασκευάζονται σε μεγάλες ομάδες μεμονωμένων ανεμογεννητριών προκειμένου να σχηματιστεί ένα μεγάλο αιολικό πάρκο. Ο άνεμος είναι μια έμμεση μορφή ηλιακής ενέργειας σε αυτό περίπου

Το 2% της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του κινούμενου αέρα με περίπου το 30% αυτής της ενέργειας να βρίσκεται σε απόσταση 1000 μέτρων από την επιφάνεια της γης. (Bartels et al., 2010)

Η **γεωθερμική ενέργεια** είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που αποθηκεύεται ως θερμότητα στο βάθος της γης. Αυτή η πηγή ενέργειας προέρχεται από εσωτερικά δομικά χαρακτηριστικά της γης. Ένας από τους σημαντικότερους περιορισμούς στη χρήση της γεωθερμικής ενέργειας είναι η προσβασιμότητα σε αυτούς τους θερμικούς πόρους. Ωστόσο, στις προσβάσιμες περιοχές ανά τον κόσμο, όπου είναι δυνατή η γεώτρηση, αυτή η μορφή ενέργειας είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί βιομηχανικά. Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί η γεωθερμική ενέργεια, χρειάζεται ένας φορέας μεταφοράς θερμότητας για τη μεταφορά αυτής της θερμικής ενέργειας από το βαθύτερο στρώμα στην επιφάνεια του εδάφους.

Η χρήση της γεωθερμικής ενέργειας μπορεί να θεωρηθεί ως μία πηγή ενέργειας μηδενικής εκπομπής CO<sub>2</sub>. Σε σύγκριση με την αιολική και την ηλιακή έχει και αυτή τη δυνατότητα να παρέχει ένα διαρκές και

σταθερό φορτίο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Με βάση τα στατιστικά στοιχεία, 82 χώρες επωφελοούνται από την άμεση χρήση της γεωθερμικής ενέργειας και 26 χώρες χρησιμοποιούν αυτήν την ενέργεια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (δηλαδή, το 0,3% της συνολικής παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας παρήχθη από γεωθερμική ενέργεια το 2012). Οι ηγετικές χώρες της παραγωγής γεωθερμικής ενέργειας στον κόσμο είναι οι Ηνωμένες Πολιτείες, οι Φιλιππίνες και ακολουθούν η Ινδονησία, το Μεξικό, η Νέα Ζηλανδία, η Ιταλία, η Ισλανδία, η Κένυα, η Ιαπωνία και η Τουρκία. (Ghazvini et al., 2019)

Η **υδροηλεκτρική ενέργεια** χρησιμοποιεί την μηχανική ενέργεια του νερού των ποταμών και την μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια, μέσω στροβίλων και ηλεκτρογεννητριών. Έχει το πλεονέκτημα ότι είναι ένας καθαρός πόρος που είναι διαρκώς ανανεώσιμος. Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη ανανεώσιμη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η Κίνα είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός υδροηλεκτρικής ενέργειας. Ακολουθούν οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Βραζιλία, ο Καναδάς, η Ινδία και η Ρωσία. Περίπου το 71% του συνόλου της ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές που παράγεται στη Γη προέρχεται από υδροηλεκτρική ενέργεια. (National Geographic, 2022)

Όμως, τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια χρησιμοποιούν μόνο ένα μέρος της υδραυλικής ενέργειας του ποταμού λόγω υδρολογικών και οικονομικών περιορισμών. Είναι δυνατόν να αυξηθεί η απόδοση των υδροηλεκτρικών σταθμών μέσω της μετατροπής του νερού σε υδρογόνο μέσω ηλεκτρόλυσης με χρήση της περίσσειας ενέργειας ή της σπατάλης ενέργειας που δεν έχει χρησιμοποιηθεί ακόμη και στη συνέχεια την μετατροπή του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω αεριοστρόβιλου ή κυψελών καυσίμου. Φαίνεται ότι η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας των υδροηλεκτρικών σταθμών σε υδρογόνο και η αξιοποίησή της μέσω αεριοστρόβιλου είναι τεχνικά και οικονομικά εφικτή. (TARNAY, 1985)

Η **βιομάζα** αποτελείται από βιολογικό υλικό, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί βιομηχανικούς σκοπούς, όπως φυτά, ξύλο ή απόβλητα. Έχει χρησιμοποιηθεί ιστορικά ως καύσιμο θέρμανσης. Υπάρχουν τέσσερις κύριες κατηγορίες πόρων βιομάζας που διαθέτουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη. Η πρώτη κατηγορία είναι η ενεργειακές καλλιέργειες, οι οποίες όπως υπονοεί το όνομα καλλιεργούνται ειδικά για το ενεργειακό τους περιεχόμενο. Τέτοια παραδείγματα είναι το καλαμπόκι, η σόγια, οι λεύκες. Τα αγροτικά απόβλητα είναι η δεύτερη κατηγορία, η οποία περιλαμβάνει φυτικά και ζωικά απόβλητα. Στην Τρίτη κατηγορία ανήκουν τα δασικά απόβλητα από τη συγκομιδή δέντρων και το καθάρισμα της γης, ενώ η τέταρτη κατηγορία είναι βιομηχανικά και αστικά απόβλητα. Η εφαρμογή των αποβλήτων για παραγωγή ενέργειας έχει λάβει πολλή προσοχή λόγω της δυνατότητάς του να γίνει κύρια πηγή για παραγωγή υδρογόνου. Υπολογίζεται ότι  $1,08 \times 10^8$  GJ φυτικών απορριμμάτων βιούλης

παράγεται ετησίως. Αυτός ο πόρος είναι αυτήν τη στιγμή μια ροή αποβλήτων και για την χρήση αυτής της ενέργειας δεν απαιτείται πρόσθετη γεωργική γη. (Bartels et al., 2010)

## 3.2 Υδρογόνο ως καύσιμο του μέλλοντος

### 3.2.1 Χαρακτηριστικά του υδρογόνου

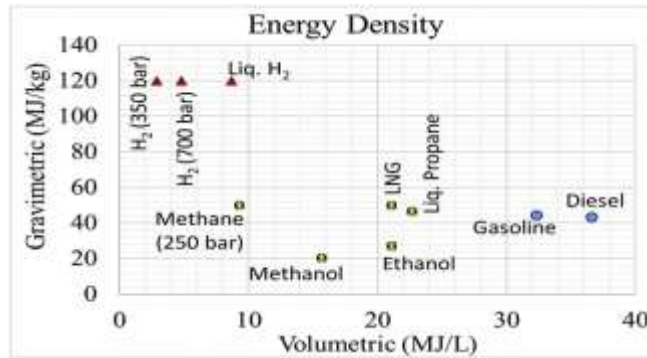
Ο πρώτος λόγος για τον οποίο το υδρογόνο είναι μια δυνητικά ελκυστική επιλογή ως μελλοντικό καύσιμο είναι η αφθονία του στη φύση. Είναι το απλούστερο και πιο άφθονο στοιχείο που υπάρχει. Ολόκληρο το σύμπαν αποτελείται από περισσότερο από 90% υδρογόνο, ενώ ο φλοιός της γης αποτελείται από περίπου 14 % υδρογόνο. Αν και δεν είναι διαθέσιμο σε φυσική αέρια μορφή στη γη (καθώς δεν μπορεί να συγκρατηθεί από τη βαρύτητα της Γης), υπάρχει σε αφθονία σε συνδυασμένες σταθερές μορφές με νερό και υδρογονάνθρακες (οργανικά υλικά) και μπορεί να παραχθεί με διάφορες μεθόδους από αυτές τις πηγές. (Ratnakar et al., 2021)

Εκτός από την ουσιαστικά ατελείωτη παροχή, το υδρογόνο είναι επίσης το καύσιμο με την υψηλότερη βαρυμετρική πυκνότητα ενέργειας μεταξύ των υφιστάμενων υγρών/αερίων καυσίμων όπως φαίνεται στην εικόνα 2. Δηλαδή, το υδρογόνο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα ενέργειας ανά μονάδα μάζας.

Ενώ το υδρογόνο έχει τη μεγαλύτερη βαρυμετρική πυκνότητα ενέργειας (δηλαδή την υψηλότερη τιμή θέρμανσης ανά μονάδα μάζας), έχει τη χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα (ανά μονάδα όγκου) (δηλαδή τη χαμηλότερη τιμή θέρμανσης ανά μονάδα όγκου).

Για παράδειγμα, η ενεργειακή πυκνότητα του υδροποιημένου υδρογόνου (LH2) είναι περίπου 3,7 φορές μικρότερη από της βενζίνης, ενώ η βαρυμετρική πυκνότητα ενέργειας του LH2 είναι περίπου 2,7 φορές μεγαλύτερη από της βενζίνης. Με άλλα λόγια, για να παραχθεί η ίδια ποσότητα ενέργειας, ο απαιτούμενος όγκος της δεξαμενής LH2 είναι 3,7 φορές μεγαλύτερος από τη δεξαμενή βενζίνης. Ωστόσο, λόγω της υψηλότερης βαρυμετρικής πυκνότητας ενέργειας, το LH2 απαιτεί μικρότερο φορτίο αποστολής και μεταφοράς σε σύγκριση με άλλα καύσιμα για τη μεταφορά της ίδιας ποσότητας ενέργειας. (Ratnakar et al., 2021)





Εικόνα 2. Ογκομετρικές έναντι βαρυμετρικές πυκνότητες ενέργειας κοινών καυσίμων. (Ratnakar et al., 2021)

Ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας υδρογόνου είναι ότι αποτελεί ένα δυνητικά χωρίς εκπομπές άνθρακα, καύσιμο και φορέα ενέργειας. Βέβαια, η παραγωγή H<sub>2</sub> μπορεί να μην είναι εντελώς απαλλαγμένη από άνθρακα ανάλογα με τις πρώτες ύλες και τις πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται. Κατά την καύση του παράγεται νερό αντί για CO<sub>2</sub>. Εάν παράγεται από ηλεκτρόλυση νερού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, παράγεται σημαντική ποσότητα οξυγόνου, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε καύση χωρίς ρύπανση (δηλαδή χωρίς παραγωγή NO<sub>x</sub>). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι εάν χρησιμοποιείται αέρας για την καύση υδρογόνου, τότε το άζωτο που υπάρχει στον αέρα μπορεί να σχηματίσει NO<sub>x</sub> λόγω της υψηλής θερμοκρασίας των φλογών, και σε αυτή την περίπτωση, το καύσιμο δεν είναι απαλλαγμένο από ρύπανση. Έτσι, από οικολογική σκοπιά, η τεχνολογία υδρογόνου είναι εξαιρετική επιλογή όσον αφορά την υγεία, την ασφάλεια και το περιβάλλον και μπορεί δυνητικά να απανθρακοποιήσει διάφορους τομείς – όπως η χημική παραγωγή (δύλιση πετρελαίου, παραγωγή αμμωνίας, παραγωγή μεθανόλης), παραγωγή χάλυβα, τσιμέντο βιομηχανίες, μεταφορές, αερομεταφορές, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, προμήθεια οικιακών/εμπορικών καυσίμων – όπου η μείωση των εκπομπών είναι δύσκολη. (Ratnakar et al., 2021)

### 3.2.2 Χρήσεις του υδρογόνου

Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για πολλές εφαρμογές που κυμαίνονται από χερσαίες μεταφορές, αεροπορία και διαστημικά σκάφη, συμπεριλαμβανομένων πυραύλων κ.λπ., ή ως πηγή ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή ως πηγή θέρμανσης σε χημικές/μεταποιητικές βιομηχανίες. (Ratnakar et al., 2021)

Το υδρογόνο έχει χρησιμοποιηθεί σε διαστημικά προγράμματα για περισσότερα από 50 χρόνια, όπου χρησιμοποιείται ως καύσιμο πυραύλων καθώς και ως ψυκτικός παράγοντας σε κινητήρες πυραύλων. Η Εθνική Υπηρεσία Αεροναυτικής και Διαστήματος (NASA) άρχισε να χρησιμοποιεί υγρό υδρογόνο τη δεκαετία του 1950 ως καύσιμο πυραύλων και χρησιμοποίησε κυψέλες καυσίμου υδρογόνου για να τροφοδοτήσει τα ηλεκτρικά συστήματα στα διαστημικά σκάφη. Επιπλέον, θεωρείται κατάλληλος υποψήφιος για εφαρμογές σε υπερηχητικά αεροσκάφη. (U.S. Energy Information Administration, 2021, Ratnakar et al., 2021)

Για χερσαίες μεταφορές, το υδρογόνο μπορεί να μετατραπεί σε χρησιμοποιήσιμη ενέργεια είτε μέσω κυψελών καυσίμου είτε με κινητήρες εσωτερικής καύσης (IC). Ενώ οι κινητήρες εσωτερικής καύσης με βάση το υδρογόνο προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως μειωμένες εκπομπές ρύπων, υψηλότερη απόδοση σε σύγκριση με τους κινητήρες βενζίνης και το πιο σημαντικό, μπορούν να αξιοποιήσουν δυναμικά την τρέχουσα υποδομή, υπάρχουν επίσης ορισμένα μειονεκτήματα όπως οι δυσκολίες αποθήκευσης και παράδοσης, υψηλότερο κόστος και χαμηλότερη συνολική απόδοση λόγω απώλειας καυσίμου στη συνολική αλυσίδα εφοδιασμού. Επίσης, η καύση υδρογόνου σε κινητήρες εσωτερικής καύσης έχει ως αποτέλεσμα εκπομπές οξειδίων του αζώτου.

Μια κυψέλη καυσίμου μπορεί να είναι δύο έως τρεις φορές πιο αποδοτική από έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης που λειτουργεί με βενζίνη. Στην τεχνολογία των κυψελών καυσίμου υδρογόνου, έχουν επιτευχθεί αρκετές εξελίξεις, που έχουν τη δυνατότητα να βελτιώσουν σημαντικά την απόδοση μετατροπής ενέργειας για αυτοκίνητα και εφαρμογές βαρέως τύπου. (Ratnakar et al., 2021) Στις επόμενες ενότητες της εργασίας, θα γίνει αναφορά πιο συγκεκριμένα για τις κυψέλες καυσίμου.

Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου παράγουν ηλεκτρισμό συνδυάζοντας άτομα υδρογόνου και οξυγόνου. Το υδρογόνο αντιδρά με το οξυγόνο σε ένα ηλεκτροχημικό στοιχείο παρόμοιο με αυτό μιας μπαταρίας για να παράγει ηλεκτρισμό, νερό και μικρές ποσότητες θερμότητας. Πολλοί διαφορετικοί τύποι κυψελών καυσίμου είναι διαθέσιμοι για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Οι μικρές κυψέλες καυσίμου μπορούν να τροφοδοτήσουν φορητούς υπολογιστές, ακόμη και κινητά τηλέφωνα, καθώς και στρατιωτικές εφαρμογές. Οι μεγάλες κυψέλες καυσίμου μπορούν να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, να παρέχουν εφεδρική ισχύ σε κτίρια και να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε μέρη που δεν είναι συνδεδεμένα με δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. (Ratnakar et al., 2021) Επίσης, οι κυψέλες καυσίμου είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για θέρμανση οικιακών χώρων αλλά και μεγάλων εργασιακών εγκαταστάσεων. (Staffell et al., 2019)

Το υδρογόνο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε σταθμό παραγωγής ενέργειας. Για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ατμού σε υψηλή θερμοκρασία και υψηλή πίεση, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λειτουργία ενός στροβίλου και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για μια μονάδα παραγωγής ενέργειας. Ομοίως, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί απευθείας ως καύσιμο καύσης χωρίς άνθρακα για την παραγωγή θερμότητας σε ενδόθερμες διεργασίες στη χημική παραγωγή και σε άλλες βιομηχανίες. (Ratnakar et al., 2021) Στις Ηνωμένες Πολιτείες, αρκετοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής έχουν ανακοινώσει ότι τα σχέδια τους είναι να λειτουργήσουν με μείγμα καυσίμου φυσικού αερίου-υδρογόνου σε αεριοστροβίλους καύσης. Ένα παράδειγμα είναι το πρόγραμμα της Long Ridge Energy Generation, στο Οχάιο, με τουρμπίνα καύσης αερίου που θα λειτουργεί με μείγμα 95% φυσικού αερίου και 5% καυσίμου υδρογόνου σε αεριοστροβίλο με σχέδιο να χρησιμοποιήσει τελικά 100% πράσινο υδρογόνο, που παράγεται δηλαδή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. (U.S. Energy Information Administration, 2021)

### 3.3 Τρόποι παραγωγής υδρογόνου

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζονται οι διαφορετικές δυνατότητες παραγωγής υδρογόνου. Στην εικόνα 3 παρουσιάζονται οι διεργασίες, τα προϊόντα, τα υποπροϊόντα και το «χρώμα» του προϊόντος υδρογόνου. Η θεωρία των χρωμάτων του υδρογόνου αντικατοπτρίζει τον βαθμό βιωσιμότητας του παραγόμενου υδρογόνου.

Ενώ το υδρογόνο που παράγεται από ορυκτό φυσικό αέριο είναι τυρκουάζ, μπλε ή γκρι, το υδρογόνο που παράγεται από βιομάζα και το βιοαέριο είναι πράσινο. Υδρογόνο παραγόμενο από τη διαδικασία ηλεκτρόλυσης θεωρείται επίσης πράσινο υδρογόνο όταν η πηγή ενέργειας είναι ανανεώσιμη, ενώ χαρακτηρίζεται ως κίτρινο, όταν χρησιμοποιείται μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας και ροζ όταν παράγεται από πυρηνική ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα το φάσμα των χρωμάτων του υδρογόνου αναλύεται παρακάτω:

**Γκρι υδρογόνο:** Ως γκρι υδρογόνο αναφέρεται το υδρογόνο που παράγεται από την χρήση ορυκτών καυσίμων και συγκεκριμένα μέσω της αναμόρφωσης μεθανίου με ατμό ή με αεριοποίηση άνθρακα. Κατά την διαδικασία αυτήν, τα αέρια παραπροϊόντα που παράγονται αφήνονται ελεύθερα στην ατμόσφαιρα. Το γκρι υδρογόνο αποτελεί μία 100% καταστροφική πρακτική για το περιβάλλον. (IRENA, 2020)

**Μπλε υδρογόνο:** Το μπλε υδρογόνο παράγεται με τον ίδιο τρόπο όπως το γκρι υδρογόνο, όμως τα παραπροϊόντα που παράγονται, όπως είναι το διοξείδιο του άνθρακα, συλλέγονται και δεν αφήνονται

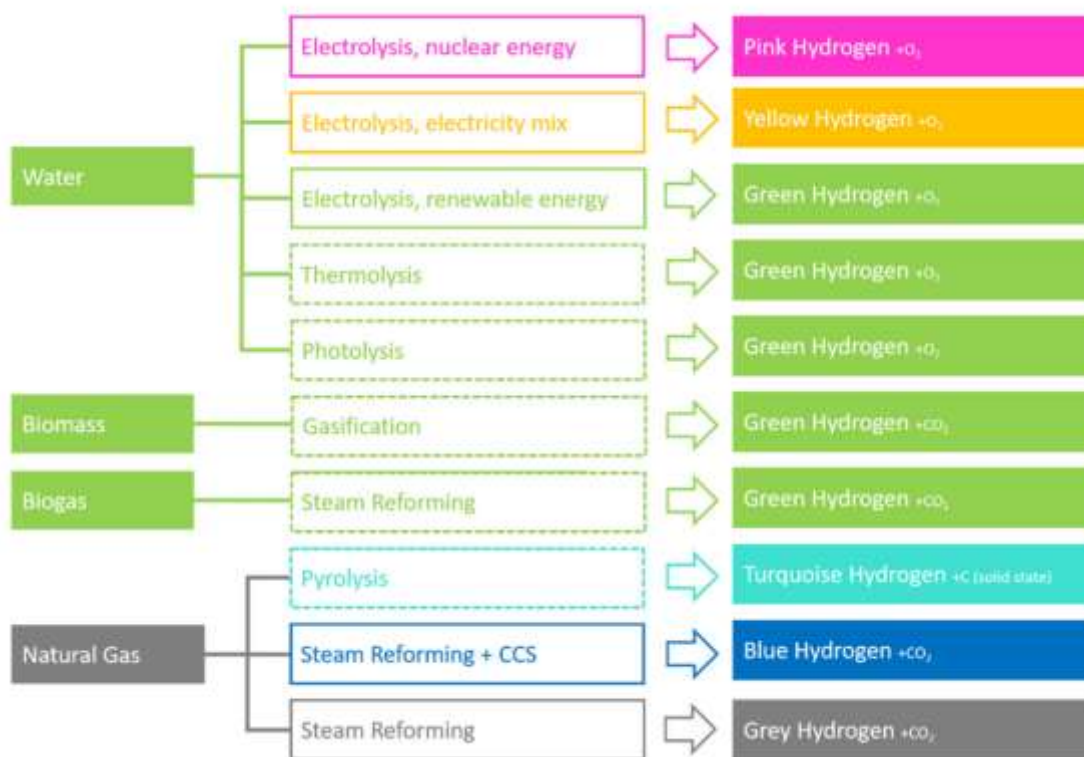
ελεύθερα στην ατμόσφαιρα. Θεωρείται πως το μπλε υδρογόνο είναι μια μεταβατική μορφή υδρογόνου προς το πράσινο καθώς μειώνονται αλλά δεν εκμηδενίζονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και ταυτόχρονα υπάρχουν διαρροές μεθανίου. (IRENA, 2020)

**Τιρκουάζ υδρογόνο:** Το τιρκουάζ υδρογόνο παράγεται μέσω της πυρόλυσης του μεθανίου, όπου πραγματοποιείται η διάσπαση του κατευθείαν σε υδρογόνο και στερεό άνθρακα (carbon black). Με τον τρόπο αυτό δεν παράγονται αέριοι ρύποι. Σε αντίθεση με το αέριο CO<sub>2</sub>, ο χημικά αδρανής στερεός άνθρακας δεν φτάνει στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα να μην λειτουργεί ως αέριο θερμοκηπίου. Αντίθετα, προϊόντα στερεού άνθρακα, μπορούν να πωληθούν ως βαφές για συγκεκριμένες βιομηχανίες, να χρησιμοποιηθεί για κατασκευή ελαστικών ή ως βελτιωτικό εδάφους. Η παραγωγή του τιρκουάζ υδρογόνου βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο. Αυτή η μορφή του υδρογόνου δεν θεωρείται 100% κλιματικά ουδέτερη καθώς είναι δυνατό να υπάρξουν εκπομπές από την περαιτέρω χρήση των προϊόντων. (IRENA, 2020, Ringsgwandl et al., 2022)

**Ροζ υδρογόνο:** Το ροζ υδρογόνο παράγεται μέσω της διαδικασίας της ηλεκτρόλυσης, όμως η ενέργεια που απαιτείται παράγεται από πυρηνική ενέργεια. (Meyer, 2022)

**Κίτρινο υδρογόνο:** Το κίτρινο υδρογόνο παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης, αλλά η απαιτούμενη ενέργεια προέρχεται από μία μίξη ανανεώσιμης ενέργειας και ενέργειας προερχόμενης από ορυκτούς πόρους. (Ringsgwandl et al., 2022)

**Πράσινο υδρογόνο:** Το πράσινο υδρογόνο, σε βιομηχανική κλίμακα, παράγεται μόνο από την ηλεκτρόλυση του νερού που τροφοδοτείται από ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ηλιακή ή αιολική ενέργεια. Η διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο πραγματοποιείται με μηδενική εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα. Αυτή τη στιγμή αποτελεί περίπου το 0,1% της συνολικής παραγωγής υδρογόνου, όμως είναι η πιο πολλά υποσχόμενη επιλογή για το μέλλον. (IRENA, 2020, Grey, blue, green, 2022)



Εικόνα 3. Επισκόπηση πιθανών οδών παραγωγής υδρογόνου. Τα διακεκομένα κουτιά υποδεικνύουν τεχνολογίες που δεν είναι διαθέσιμες ακόμα σε βιομηχανική κλίμακα. (Ringsgwandl et al., 2022)

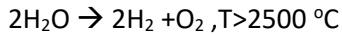
Οι διαφορετικές διαδικασίες παραγωγής και τα αντίστοιχα επίπεδα τεχνολογικής ετοιμότητας (TRL) περιγράφονται αναλυτικότερα παρακάτω.

### 3.3.1 Θερμόλυση

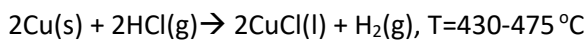
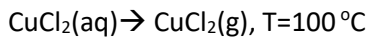
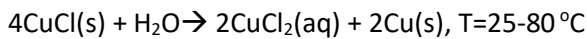
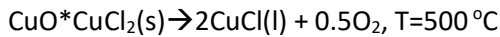
Η θερμόλυση ή θερμοχημική διάσπαση του νερού, είναι μια διαδικασία που πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες περίπου 2500 °C, όπου αρχίζει η θερμική αποσύνθεση του νερού στα συστατικά του, δηλαδή σε υδρογόνο και οξυγόνο. Έτσι, είναι θεωρητικά δυνατό να ληφθεί υδρογόνο απευθείας από υδρατμούς σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Έχουν προταθεί αρκετοί θερμοχημικοί κύκλοι διάσπασης του νερού, ώστε να μειωθεί η απαιτούμενη θερμοκρασία και να βελτιωθεί η συνολική απόδοση. Οι θερμοχημικοί κύκλοι αποτελούνται από μια σειρά χημικών αντιδράσεων σε διαφορετικές θερμοκρασίες και αποτελούν μία από τις πιο πολλά υποσχόμενες διαδικασίες μέσω των οποίων η θερμότητα μετατρέπεται σε χημική ενέργεια υπό τη μορφή υδρογόνου. Δύο παραδείγματα θερμοχημικών κύκλων,

φαίνονται παρακάτω επιτρέποντας τη σύγκριση με την διάσπαση του νερού σε ένα μόνο στάδιο. (Ringsgwandl et al., 2022, Wang et al., 2019, Nikolaidis & Poullikkas, 2017)

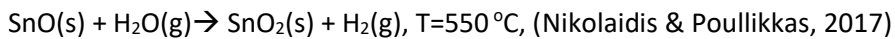
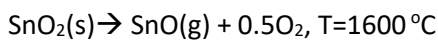
- **Διάσπαση του νερού σε ένα στάδιο**



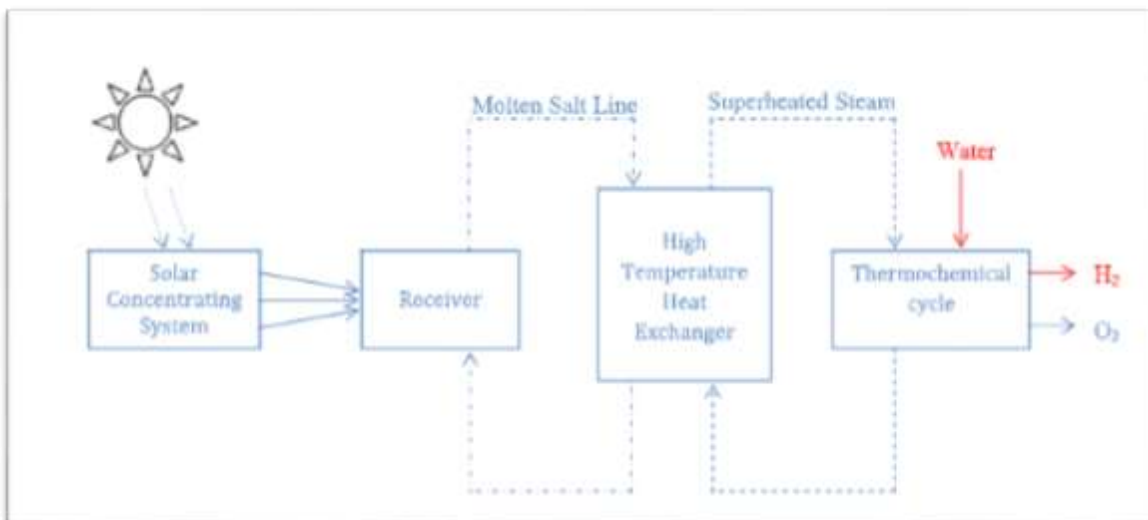
- **Θερμοχημικός κύκλος Cu-Cl (πολλαπλά στάδια διάσπασης)**



- **Θερμοχημικός κύκλος SnO<sub>2</sub>/SnO**



Η παραγωγή υδρογόνου μέσω της θερμόλυσης νερού μπορεί να βασιστεί στην ηλιακή ενέργεια ως πηγή ενέργειας και να περιλαμβάνει τη χρήση ηλιακών συλλεκτών οι οποίοι συλλέγουν απευθείας την ηλιακή ενέργεια για να θερμάνουν το νερό ώστε να ξεκινήσει η διάσπαση του σε H<sub>2</sub> και O<sub>2</sub>. Ωστόσο, υπάρχουν προβλήματα που σχετίζονται με αυτήν την προσέγγιση. Αρχικά, είναι δύσκολη η επίτευξη υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας έναν ηλιακό συλλέκτη. Στην εικόνα 4 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής της θερμοχημικής διαδικασίας διάσπασης του νερού με την βοήθεια της ηλιακής ενέργειας.



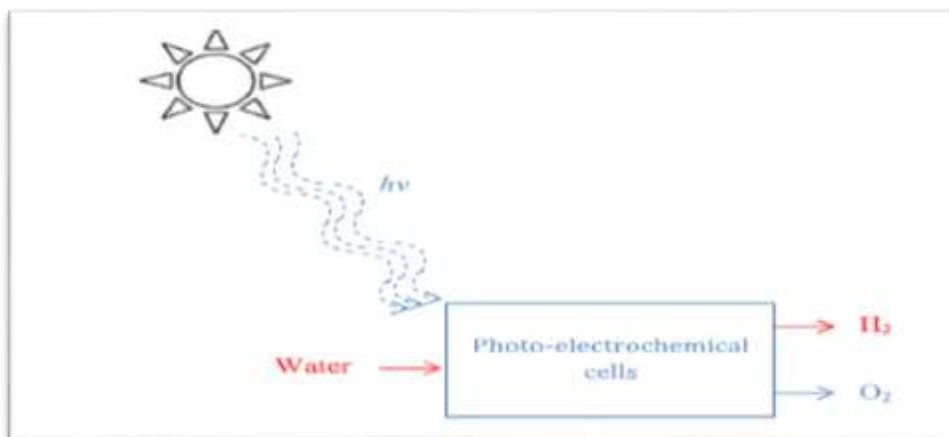
Εικόνα 4. Διαδικασία θερμόλυσης. (Nikolaidis & Poullikkas, 2017)

Σε υψηλή θερμοκρασία είναι δύσκολος ο αποτελεσματικός διαχωρισμός του  $H_2$  και του  $O_2$ . Πρόκληση αποτελεί και η αποφυγή του άμεσου ανασυνδυασμού με οξυγόνο πίσω σε νερό. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, προτάθηκε η χρήση ενός καταλύτη στο νερό, ο οποίος θα μπορούσε να επιτρέψει την διάσπαση του νερού σε πολλαπλά βήματα, ενώ θα μειώνεται σημαντικά η απαιτούμενη θερμοκρασία θέρμανσης. Να επισημανθεί ότι εκτός από την πρωτεύουσα επένδυση για τον απαραίτητο εξοπλισμό, κριτήρια όπως η τοξικότητα των εμπλεκόμενων στοιχείων, η διαθεσιμότητα και το κόστος των χημικών ουσιών, τυχόν προβλήματα διαχωρισμού των υλικών και ο κίνδυνος διάβρωσης, αντικατοπτρίζονται στο κόστος παραγωγής  $H_2$  μέσω της διαδικασίας της θερμόλυσης. Το TRL για τη θερμόλυση είναι επί του παρόντος περίπου 2 έως 5. Θα πρέπει να επισημανθεί πως τα επίπεδα τεχνολογικής ετοιμότητας (TRL) είναι 9 και μόνο στο τελευταίο επίπεδο η χρήση της συγκεκριμένης διαδικασίας είναι η αποδεδειγμένη σε βιομηχανικό επίπεδο. (Ringsgwandl et al., 2022, Wang et al., 2019, Nikolaidis & Poullikkas, 2017)

### 3.3.2 Φωτόλυση

Στη διαδικασία της φωτόλυσης, ως πηγή ενέργειας χρησιμοποιείται το ορατό φως και μαζί με τη βοήθεια ενός φωτοκαταλύτη πραγματοποιείται η άμεση διάσπαση του νερού σε  $H_2$  και  $O_2$ . Το ηλιακό φως απορροφάται μέσω κάποιων ημιαγωγικών υλικών και η διαδικασία διάσπασης του νερού είναι

παρόμοια με την ηλεκτρόλυση. Ένα σχηματικό διάγραμμα της διαδικασίας φωτόλυσης παρουσιάζεται στην εικόνα 5.



Εικόνα 5. Φωτόλυση. (Nikolaidis & Poullikkas, 2017)

Βρέθηκε πως το διοξείδιο του τιτανίου ήταν κατάλληλος ως φωτοκαταλύτης. Αν και διαρκώς γίνονται προσπάθειες σε όλο τον κόσμο για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας καθώς και του τρόπου λειτουργίας του καταλύτη αυτού, εξακολουθεί να μην επιτυγχάνονται σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση. Η φωτόλυση, όπως και η θερμόλυση, βρίσκονται σε χαμηλό TRL (περίπου 3). (Ringsgwandl et al., 2022, Nikolaidis & Poullikkas, 2017)

### 3.3.3 Αεριοποίηση άνθρακα

Η αεριοποίηση άνθρακα είναι ένας άλλος τρόπος για την παραγωγή υδρογόνου. Κατά την διαδικασία αυτή, ο άνθρακας αντιδρά με υδρογόνο ( $H_2$ ), οξυγόνο ( $O_2$ ) και ατμό υπό υψηλή πίεση για να σχηματιστεί το αέριο σύνθεσης, δηλαδή ένα μείγμα μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου. Στη συνέχεια, το μονοξείδιο του άνθρακα αντιδρά περαιτέρω με τον ατμό μέσω της αντίδρασης μετατόπισης ύδατος-αερίου, σχηματίζοντας επιπλέον υδρογόνο και άνθρακα. Μετά από αυτή τη διαδικασία, το καθαρό υδρογόνο διαχωρίζεται από το σύστημα και ο άνθρακας δεσμεύεται και απομονώνεται.

Η τεχνολογία αυτή, θα μπορούσε να γίνει πιο αποτελεσματική και φιλική προς το περιβάλλον εάν συνδυαστεί με τη δέσμευση και την απομόνωση άνθρακα, διασφαλίζοντας έτσι μηδενική



απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα. Ωστόσο, χρειάζεται χρόνος καθώς και οικονομικές επενδύσεις για να γίνει αυτή η μεθοδολογία μία φιλική προς το περιβάλλον τεχνική. (Pareek et al., 2020)

### 3.3.4 Πυρόλυση μεθανίου

Μία ακόμη προσέγγιση για την παραγωγή υδρογόνου είναι μέσω της διαδικασίας της πυρόλυσης, δηλαδή μέσω της αποσύνθεσης του μεθανίου. Αποτελεί μια χημική διεργασία κατά την οποία διασπάται το μεθάνιο, ή γενικά κάποιος υδρογονάνθρακας, στα στοιχειώδη συστατικά του, δηλαδή παράγονται υδρογόνο και στερεός άνθρακας. Η κυρίαρχη αντίδραση είναι ενδόθερμη και περιγράφεται από την εξίσωση 1. Το απαιτούμενο ποσό ενέργειας μπορεί να προέρχεται από διαφορετικές πηγές ενέργειας. (Ringsgwandl et al., 2022) (Timmerberg et al., 2020)

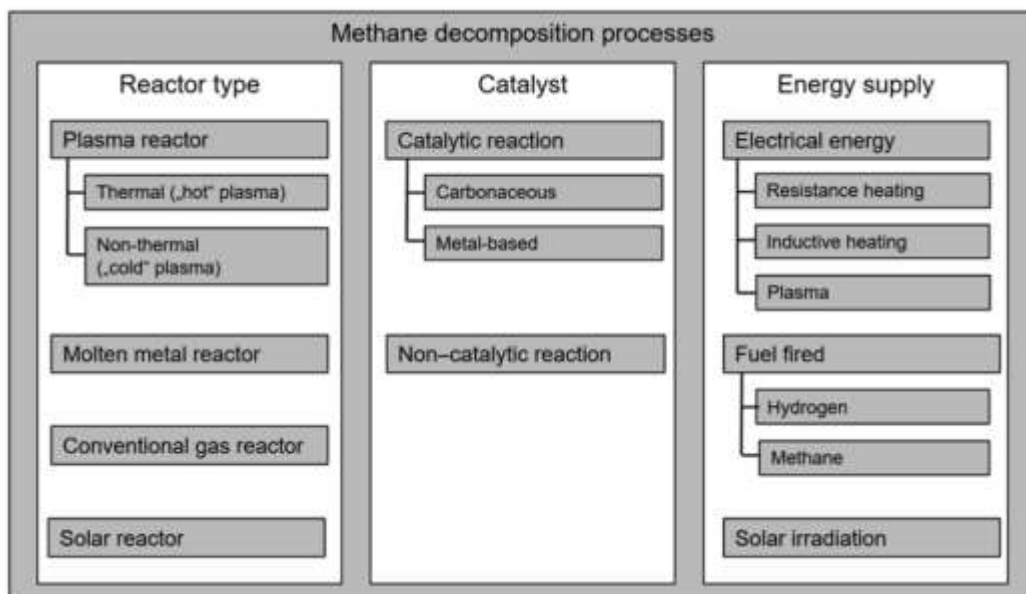
Στην αντίδραση της διάσπασης του μεθανίου, το μεθάνιο εισέρχεται και το υδρογόνο διαφεύγει σε αέρια κατάσταση, ενώ ο παραγόμενος άνθρακας είναι στερεός. Δεν εμπλέκεται καθόλου οξυγόνο σε αυτή τη διαδικασία (δηλαδή δεν παράγεται CO ή CO<sub>2</sub>). Έτσι, δεν απαιτείται επιπλέον διαχωρισμός CO ή CO<sub>2</sub> για την αναβάθμιση της ποιότητας του παραγόμενου αερίου. Επομένως, αυτή η διαδικασία είναι λιγότερο περίπλοκη από π.χ. την «κλασική» διαδικασία αναμόρφωσης μεθανίου ατμού (SMR). Όμως εάν απαιτείται υψηλή καθαρότητα υδρογόνου, είναι απαραίτητο ένα επόμενο στάδιο διαχωρισμού υδρογόνου και μεθανίου. Εάν το επιθυμητό προϊόν είναι μόνο το υδρογόνο χωρίς τον άνθρακα, τότε η θεωρητική απόδοση της διαδικασίας είναι 59% (Εξίσωση (2)). Η υπόλοιπη ενέργεια που περιέχεται αρχικά στο φυσικό αέριο αποθηκεύεται ως άνθρακας. Σε πραγματικές εφαρμογές η απόδοση είναι χαμηλότερη, π.χ. λόγω απωλειών θερμότητας. (Timmerberg et al., 2020)



$$\eta_{theo} = \frac{2HHV(H_2)}{HHV(CH_4) + \Delta H} = 59\% \quad (2)$$

Οι τεχνολογίες πυρόλυσης θα μπορούσαν να επιλεχθούν για πολύ μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις παραγωγής υδρογόνου, της τάξης μεγέθους εκατοντάδων μεγαβάτ. Λόγω της καταλληλότητάς τους για μεγάλης κλίμακας εφαρμογή, η πυρόλυση συνδυάζεται με τη μετατροπή φυσικού αερίου στην [εικόνα 3](#), παράγοντας το λεγόμενο «τιρκουάζ υδρογόνο». Αυτή η παραλλαγή υδρογόνου πρέπει να διακρίνεται από το «γκρίζο υδρογόνο», καθώς ο στερεός άνθρακας που παράγεται δεν φτάνει απευθείας στην

ατμόσφαιρα, σε αντίθεση με το αέριο CO<sub>2</sub> που παράγεται παράλληλα με το γκρι υδρογόνο. Στην εικόνα 6 παρουσιάζονται οι τρεις κατηγορίες αποσύνθεσης μεθανίου, οι οποίες διαφέρουν σε σχέση με τον τύπο του αντιδραστήρα, τον χρησιμοποιούμενο καταλύτη και την πηγή ενέργειας. (Ringsgwandl et al., 2022) (Timmerberg et al., 2020)



Εικόνα 6. Διαδικασίες αποδόμησης μεθανίου. (Timmerberg et al., 2020)

#### 3.3.4.1 Συστήματα αντιδραστήρων πλάσματος

Πλάσμα ονομάζεται ένα αέριο που βρίσκεται σε μια ιονισμένη κατάσταση και περιέχει ελεύθερα ιόντα και ηλεκτρόνια (δηλαδή είναι ηλεκτρικά αγωγίμο). Για την αποσύνθεση μεθανίου εφαρμόζονται δύο τύποι πλάσματος.

1) Στο θερμικό πλάσμα ή «καυτό» πλάσμα, η θερμοκρασία είναι ομογενώς κατανομημένη. Η διαδικασία της χημικής αποσύνθεσης του μεθανίου παρατηρείται σε περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας επιτρέποντάς του να φτάσει σε χημική ισορροπία.

2) Στο μη θερμικό ή «κρύο» πλάσμα, τα ηλεκτρόνια παρουσιάζουν πολύ υψηλότερη θερμοκρασία από τα βαρύτερα είδη όπως τα νετρόνια, δηλαδή τα ηλεκτρόνια μπορούν να φτάνουν σε θερμοκρασίες πολλών 10.000°K ενώ το πλήρες αέριο είναι πολύ πιο κρύο.

Έτσι, με βάση αυτούς τους δύο τύπους πλάσματος, οι εφαρμογές του πλάσματος για την αποσύνθεση του μεθανίου είναι δυνατό να ταξινομηθεί σε ψυχρές (κάτω από 1.000 K) και σε θερμές (>1.000 K) διεργασίες. Οι διεργασίες ψυχρού πλάσματος συνήθως παρουσιάζουν χαμηλότερη αποτελεσματικότητα μετατροπής σε σύγκριση με τις διεργασίες θερμού πλάσματος. Ωστόσο, οι διεργασίες ψυχρού πλάσματος δείχνουν υψηλότερη επιλεκτικότητα σε σύγκριση με τις διεργασίες θερμού πλάσματος. Τα πιθανά παραπροϊόντα της αντίδρασης αποσύνθεσης του μεθανίου περιλαμβάνουν το αιθύνιο, το βενζόλιο και το αιθάνιο. Τα συστήματα πλάσματος πλέον λειτουργούν χωρίς την παρουσία καταλύτη.

Οι διεργασίες πλάσματος παρουσιάζουν ευδιάκριτα πλεονεκτήματα, όπως είναι η χαμηλή αδράνεια και η γρήγορη εκκίνηση του συστήματος. Πιθανότατα, θα μπορούσαν δηλαδή, να συνδυαστούν με παροχή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η αιολική ενέργεια ή η ηλιακή ακτινοβολία.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετές διεργασίες πλάσματος για την αποσύνθεση του μεθανίου. Τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η διαδικασία Kvaerner και η διαδικασία των Μονολιθικών Υλικών (Monolith Materials process), όπου και στα δύο παραδείγματα χρησιμοποιείται θερμό πλάσμα και αποσκοπούν στην παραγωγή μόνο υδρογόνου και στερεού άνθρακα (carbon black). (Timmerberg et al., 2020)

#### *3.3.4.2 Συστήματα αντιδραστήρων υγρού μετάλλου*

Στους αντιδραστήρες αυτούς, το μεθάνιο διασπάται σε υδρογόνο και σε στερεό άνθρακα. Εδώ, το μεθάνιο εγχέεται στον πυθμένα ενός αντιδραστήρα που περιέχει υγρό μέταλλο σε υψηλές θερμοκρασίες και το υδρογόνο διαφεύγει από την κορυφή του αντιδραστήρα. Ο αντιδραστήρας είναι δυνατόν να είναι από ανοξείδωτο ατσάλι ή γυαλί χαλαζία και έχουν γίνει δοκιμές με διαφορετικά υγρά μέταλλα όπως κασσίτερο, μόλυβδο, σίδηρο και χαλκό.

Μέσα από τα πειράματα προκύπτει ότι οι υψηλότερες θερμοκρασίες οδηγούν σε υψηλότερες παραγόμενες ποσότητες υδρογόνου. Επίσης η χρήση ενός καταλυτικά ενεργού κράματος μετάλλων (Ni, Bi), είναι δυνατόν να οδηγήσει σε αυξημένη παραγωγή υδρογόνου.

Η διεργασία αυτή παρουσιάζει δύο σημαντικά οφέλη:

- 1) Τα υγρά μέταλλα επιτρέπουν την αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας.
- 2) Ο στερεός άνθρακας ανεβαίνει στην επιφάνεια του μετάλλου επιτρέποντας την απλή αφαίρεσή του.

Όμως, είναι πιθανό ο παραγόμενος άνθρακας να κολλάει στην επιφάνεια του υγρού μετάλλου και έτσι να απαιτούνται πρόσθετα βήματα καθαρισμού.

Η θέρμανση του μετάλλου και/ή η μεταφορά θερμότητας μπορεί να επιτευχθεί μέσω καύσης φυσικού αερίου ή υδρογόνου, με επαγωγική θέρμανση ή μέσω ηλεκτρικού τόξου. Στην πράξη, η εταιρεία Aegenius ανέπτυξε ένα σύστημα πιλοτικής κλίμακας εφαρμόζοντας αντιδραστήρες υγρού μετάλλου για την αποσύνθεση μεθανίου. (Timmerberg et al., 2020)

\*Να σημειωθεί πως ο στερεός άνθρακας ή carbon black είναι φυσικά και χημικά διαφορετικός από την αιθάλη. Ο μαύρος άνθρακας κατασκευάζεται υπό ελεγχόμενες συνθήκες για εμπορική χρήση κυρίως στις βιομηχανίες καουτσούκ, βαφής και εκτύπωσης. Αντίθετα, οι αιθάλες είναι ανεπιθύμητα υποπροϊόντα από την καύση υλικών με βάση τον άνθρακα. Περισσότερο από το 97% του στερεού άνθρακα αποτελείται από στοιχειακό άνθρακα ενώ η αιθάλη περιέχει λιγότερο από 60% άνθρακα. Επίσης, η αιθάλη περιέχει πολύ μεγαλύτερα ποσοστά τέφρας, από τον στερεό άνθρακα. (Watson and Valberg, 2001).

#### *3.3.4.3 Συμβατικά συστήματα αντιδραστήρων αερίου*

Η αποσύνθεση του μεθανίου είναι δυνατόν να γίνει σε συμβατικούς αντιδραστήρες αερίου, όπως για παράδειγμα είναι οι σωληνοειδείς αντιδραστήρες σταθερής και ρευστοποιημένης κλίνης. Επιπλέον, έχουν αξιολογηθεί διαδικασίες με ή χωρίς την παρουσία καταλυτών, που βασίζονται σε μέταλλα ή σε άνθρακα. Να σημειωθεί πως η χρήση καταλύτη με βάση τον άνθρακα βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο έρευνας και ανάπτυξης.

Το πρόβλημα είναι πως και οι δύο τύποι καταλυτών απενεργοποιούνται όταν ο παραγόμενος στερεός άνθρακας εναποτίθεται στα ενεργά τους μέρη. Ο διαχωρισμός του άνθρακα που εναποτίθεται στην επιφάνεια του καταλύτη και η επανενεργοποίηση του καταλύτη αποτελεί μία δύσκολη διαδικασία.

Ένας τρόπος να πραγματοποιηθεί είναι μέσω της καύσης του άνθρακα από τον καταλύτη. Εναλλακτικά, ο άνθρακας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρόσθετη παραγωγή υδρογόνου μέσω αεριοποίησης με ατμούς από νερό (δηλαδή αντίδραση Boudouard και αντίδραση μετατόπισης ύδατος-αερίου). Ωστόσο, και στις δύο περιπτώσεις το αποτέλεσμα είναι η μετατροπή του στερεού άνθρακα σε CO<sub>2</sub> και ως εκ τούτου έρχονται σε αντίθεση με την ιδέα της μείωσης των εκπομπών CO<sub>2</sub>.

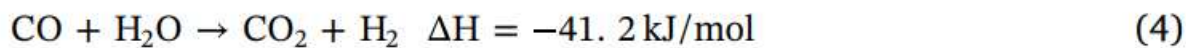
Στην πράξη, τα συμβατικά συστήματα αντιδραστήρων αερίου εφαρμόστηκαν από την εταιρεία πετρελαίου Universal, που ανέπτυξαν τη διαδικασία Hygro χρησιμοποιώντας αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης με καταλύτη Ni στους 1.150 K που ακολουθείται από αναγέννηση καταλύτη με αέρα με αποτέλεσμα να παράγεται μόνο υδρογόνο και καθόλου άνθρακας. (Timmerberg et al., 2020)

### 3.3.5 Αναμόρφωση μεθανίου με ατμό

Η αναμόρφωση μεθανίου με ατμό (TRL 9) είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται, επί του παρόντος, στην παραγωγή υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα, δηλαδή σε βιομηχανικά πλαίσια. Η αναμόρφωση με ατμό χρησιμοποιεί ως πρώτη ύλη μεθάνιο (φυσικό αέριο) το οποίο αποσυντίθεται θερμικά σε CO και H<sub>2</sub>, με την χρήση ζεστού, υπό πίεση ατμού, παρουσία κατάλληλου καταλύτη. (Ringsgwandl et al., 2022)

Στην διαδικασία αυτή εφαρμόζονται τέσσερα βασικά βήματα:

- Οι προσμείξεις όπως οι ενώσεις θείου ή χλωρίου απομακρύνονται.
- Το μεθάνιο αντιδρά με τον υδρατμό παράγοντας μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο (Εξίσωση (3)).
- Η παραγωγή του υδρογόνου αυξάνεται μέσω της αντίδρασης μεταξύ μονοξειδίου του άνθρακα και πρόσθετου υδρατμού που οδηγεί σε παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα και πρόσθετου υδρογόνου (αντίδραση μετατόπισης ύδατος-αερίου, Εξίσωση (4))
- Το ακατέργαστο υδρογόνο καθαρίζεται συνήθως μέσω της διαδικασίας PSA. (Timmerberg et al., 2020)



Η διαδικασία αναμόρφωσης μεθανίου με ατμό (SMR) μπορεί να συνδυαστεί με μια μονάδα δέσμευσης CO<sub>2</sub> με στόχο τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Οι πηγές παραγωγής CO<sub>2</sub> από τη συγκεκριμένη διαδικασία είναι δύο. Αυτές είναι η παραγωγή CO<sub>2</sub> μέσω της χημικής αντίδρασης που πραγματοποιείται και μέσω του ενεργειακού εφοδιασμού. Έτσι, η αφαίρεση

του CO<sub>2</sub> μπορεί να επιτυγχάνεται σε τρεις θέσεις: από το ακατέργαστο υδρογόνο που εισέρχεται στην διαδικασία καθαρισμού PSA, από το ουραίο αέριο που εξέρχεται από την PSA και από τα καυσαέρια που εξέρχονται από τον κλίβανο. Ανάλογα με την τεχνική διαμόρφωση, μπορεί να δεσμευτεί από 54 έως και 90% του παραγόμενου CO<sub>2</sub>.

Ωστόσο, το δεσμευμένο CO<sub>2</sub> θα πρέπει να αποθηκευτεί ώστε να αποφευχθεί η απελευθέρωσή του στην ατμόσφαιρα. Οι παγκόσμιες αποθηκευτικές δυνατότητες εκτιμώνται μεταξύ 8.000 και 55.000 Gt CO<sub>2</sub>. Για σύγκριση, το 2018 περίπου 37 Gt CO<sub>2</sub> εκπέμπονταν σε παγκόσμιο επίπεδο. Όμως, ενδέχεται να αποτελούν περιορισμό οι δυνατότητες αποθήκευσης, στην περίπτωση που δεν υπάρχουν επαρκείς αλυσίδες μεταφοράς. Αγωγοί ή πλοία είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν ως επιλογές για την μεταφορά του παραγόμενου CO<sub>2</sub> προς αποθήκευση. Επιπλέον, το CO<sub>2</sub> μπορεί να αποθηκευτεί σε γεωλογικούς σχηματισμούς όπως υδροφορείς, σε μη εξορυκτικό άνθρακα ή σε εξαντλημένες δεξαμενές πετρελαίου και αερίου. Ωστόσο, καμία τέτοια αλυσίδα μεταφοράς και αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> δεν έχει χρησιμοποιηθεί εμπορικά μέχρι στιγμής. Συγκεκριμένα, οι τεχνολογίες δέσμευσης άνθρακα βρίσκονται σε TRLs 7-8. Το υδρογόνο που προκύπτει από τα σημερινά εργοστάσια μεγάλης κλίμακας κατατάσσεται ως «γκρίζο υδρογόνο». Ωστόσο, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ανανεώσιμο μεθάνιο από βιογενείς πηγές ώστε τελικά να παράγεται «πράσινο υδρογόνο». Ως εκ τούτου, η αναμόρφωση με ατμό αναπαρίσταται δύο φορές στην [εικόνα 3](#). (Ringsgwandl et al., 2022, Timmerberg et al., 2020)

Οι τεχνοοικονομικές παράμετροι διεργασιών σχηματισμού μεθανίου με ατμό (SMR) που εφαρμόζονται σε μεγάλη κλίμακα, φαίνονται στην εικόνα 7. Αν και αυτή η διαδικασία είναι τελευταίας τεχνολογίας, η ζήτηση μεθανίου παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις. Εάν εφαρμόζεται δέσμευση του CO<sub>2</sub>, τότε η μέση κατανάλωση μεθανίου αυξάνεται κατά 5%. Επιπλέον, λόγω της δέσμευσης CO<sub>2</sub>, η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της διεργασίας αυξάνεται, αλλά παραμένει μικρής σημασίας σε σύγκριση με τη ζήτηση για μεθάνιο. Η μέση επένδυση αυξάνεται κατά 16%, ωστόσο το εύρος ζώνης και η αβεβαιότητα αυξάνεται.

Η εικόνα 8, παρουσιάζει τις τεχνοοικονομικές παραμέτρους της αναμόρφωσης μεθανίου με ατμό (SMR) με και χωρίς δέσμευση άνθρακα. Το κόστος της απαραίτητης μεταφοράς και αποθήκευσης CO<sub>2</sub> υπολογίζεται σε 10 €/τόνο CO<sub>2</sub>. (Timmerberg et al., 2020)

Techno-economic parameters of steam methane reforming (SMR) without and with carbon capture technology (CCS).

	Nominal H <sub>2</sub> capacity [kg/day]	CCS technology	Rate of CO <sub>2</sub> captured from total	Electricity consumption [kWh/kg H <sub>2</sub> ]	Methane consumption [MJ/kg H <sub>2</sub> ]	Investment [€/kg/h H <sub>2</sub> ]
SMR (without carbon capture)						
[52]	1,102,032	no	0%	0.2	175.1	8,537
[53]	379,387	no	0%	0.6	215.9	12,583
[54]	503,686	no	0%	0.0	211.0	11,518
[8] <sup>b</sup>	324,202	no	0%	0.4	192.4	9,415
[4]	162,101	no	0%	0.0	203.1	19,213
[7]	n/a	no	0%	0.0	189.0	14,780
[45]	215,856	no	0%	-1.1	175.5	19,007
SMR with carbon capture						
[52]	1,200,000	amine	90%	1.3	185.3	11,164
[53]	379,387	amine	90%	1.1	215.9	14,575
[54]	503,686	amine	90%	0.0	288.7	39,715
[8] <sup>c</sup>	324,202	amine	56%	1.0	177.6	10,712
[45]	215,856	amine	90%	0.0	192.8	33,948

<sup>a</sup> related to flue gas

<sup>b</sup> process produces 37 MJ/kg H<sub>2</sub> of steam

<sup>c</sup> process provides 11 MJ/kg H<sub>2</sub> of steam

Εικόνα 7. Τεχνοοικονομικοί παράμετροι. (Timmerberg et al., 2020)

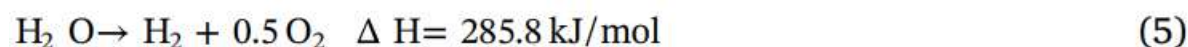
Techno-economic parameters of considered steam methane reforming (SMR) with and without carbon capture derived from literature review (values in brackets indicate bandwidth).

	CO <sub>2</sub> captured from total	Electricity consumption [kWh/kg H <sub>2</sub> ]	Methane demand [MJ/kg H <sub>2</sub> ]	Investment [€/kg/h H <sub>2</sub> ]
SMR (without carbon capture)	0%	0 (-1.1 – 0.6)	185.6 (175.1 – 215.9)	12,583 (8,537–19,213)
SMR with carbon capture	90%	0.9 (0 – 1.3)	194.9 (177.6–288.8)	14,573 (10,712 – 39,715)

Εικόνα 8. Τεχνοοικονομικοί παράμετροι με ή χωρίς αποθήκευση CO<sub>2</sub>. (Timmerberg et al., 2020)

### 3.3.6 Ηλεκτρόλυση

Η ηλεκτρόλυση είναι μία ηλεκτροχημική διαδικασία, κατά την οποία το νερό χωρίζεται στα συστατικά του, δηλαδή σε υδρογόνο και οξυγόνο, με την προσθήκη ηλεκτρικής ενέργειας. Η αντίδραση που πραγματοποιείται φαίνεται στην εξίσωση 5. Η διαδικασία αυτή, δεν οδηγεί σε άμεσες εκπομπές CO<sub>2</sub>. Έτσι, αυτή η επιλογή αντιπροσωπεύει μια εναλλακτική οδό παραγωγής υδρογόνου με δυνητικά χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

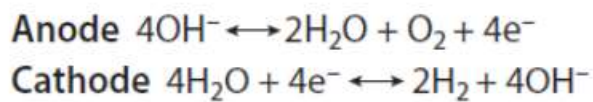


Μέχρι στιγμής, δύο κύριες τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης εφαρμόζονται στην πράξη, η αλκαλική ηλεκτρόλυση (AEL) (TRL 8-9) και η ηλεκτρόλυση με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMEL) (TRL 8-9).

Υπάρχει ακόμα μία τεχνολογία η οποία βρίσκεται σε στάδιο ανάπτυξης και ονομάζεται ηλεκτρόλυση υψηλής θερμοκρασίας (HTEL) (TRL 5). (Ringsgwandl et al., 2022, Timmerberg et al., 2020)

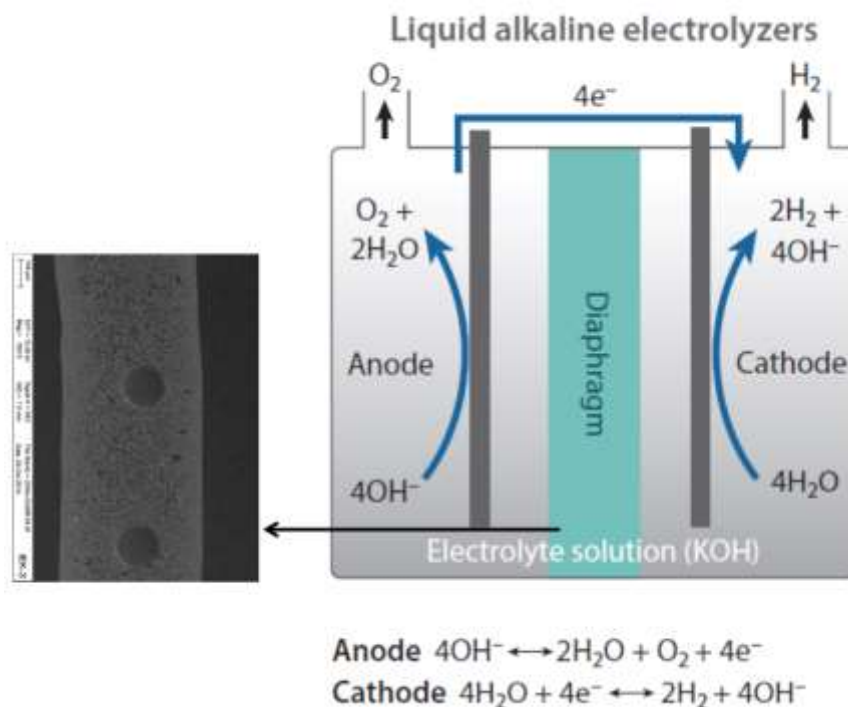
### 3.3.6.1 Αλκαλική ηλεκτρόλυση (AEL)

Η αλκαλική ηλεκτρόλυση είναι η παλαιότερη και πιο διαδεδομένη τεχνολογία ηλεκτρόλυσης. Ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται ένα υδατικό διάλυμα καυστικού καλίου (ΚΟΗ). Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι συνήθως από 60 έως και 95 °C. Κατά τη διαδικασία αυτή, ιόντα υδροξυλίου κατευθύνονται μέσω του διαφράγματος από την κάθοδο στην άνοδο:



Η απόδοση της AEL είναι δυνατόν να φθάσει έως και 65%. Τα ηλεκτρόδια είναι συνήθως κατασκευασμένα από νικέλιο, λόγω της αντοχής του στη διάβρωση σε τέτοιο περιβάλλον ηλεκτρολύτη. Αποτελεί πλεονέκτημα το γεγονός ότι δεν απαιτείται η χρήση ακριβών κραμάτων, ή ειδικών μετάλλων. Η ίδια η κυψέλη της ηλεκτρόλυσης έχει χαμηλό κόστος επένδυσης και μεγάλη διάρκεια ζωής. Μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι η διαβρωτική φύση του υγρού καταλύτη. Έτσι φθείρονται τμήματα της εγκατάστασης και αποτελεί θέμα ασφάλειας. Επίσης, η επιθυμητή καθαρότητα του παραγόμενου υδρογόνου είναι πιθανόν να μην επιτευχθεί. (Carmona, 2022, Trattner et al., 2021)





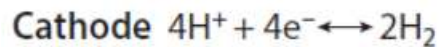
*Εικόνα 9. Διάταξη αλκαλικής ηλεκτρόλυσης. (Carro, 2022)*

Υπάρχει ακόμα ένα υποείδος αλκαλικής ηλεκτρόλυσης, η ηλεκτρόλυση με μεμβράνη ανταλλαγής ανιόντων (AEMEL). Σε αντίθεση με την PEMEL και την AEL, η ηλεκτρόλυση με μεμβράνη ανταλλαγής ανιόντων, έχει μια αλκαλική μεμβράνη ως ηλεκτρολύτη. Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι ότι χρησιμοποιούνται καταλύτες χαμηλού κόστους, οι οποίοι μειώνουν σημαντικά το κόστος του συστήματος. Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημα της AEMEL είναι η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με την PEMEL και η μικρή διάρκεια ζωής. (Trattner et al., 2021)

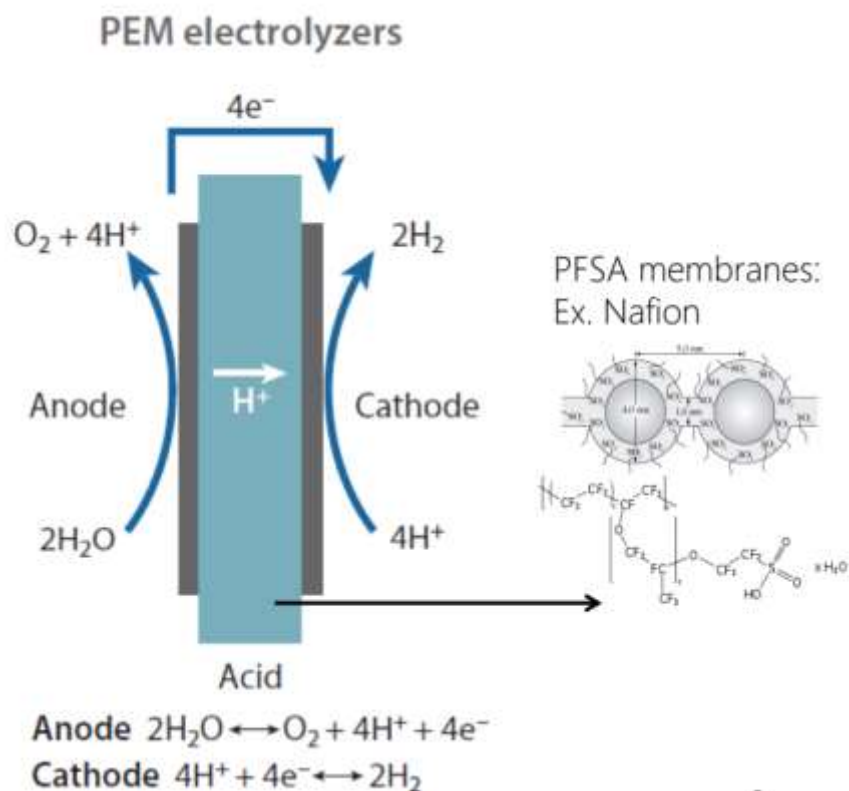
### *3.3.6.2 Ηλεκτρόλυση με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMEL)*

Η ηλεκτρόλυση με μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMEL) είναι μία από τις πιο δημοφιλείς τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης στο πλαίσιο της απανθρακοποίησης του ενεργειακού συστήματος. Ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται μια μεμβράνη πολυμερούς σουλφονικού οξέος και η ηλεκτρόλυση λαμβάνει χώρα σε όξινες συνθήκες. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας κυμαίνονται μεταξύ 50–80 °C. Η απόδοση της PEMEL φθάνει έως και 65% περίπου.

Στην όξινη ηλεκτρόλυση η μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων επιτρέπει στα πρωτόνια να κατευθύνονται από την άνοδο στην κάθοδο:



Η PEMEL πλεονεκτεί έναντι της AEL λόγω του μικρού μεγέθους της διάταξης. Επίσης χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά δυναμική και γρήγορη απόκριση. Επιπλέον, η PEMEL προσφέρει υψηλές ενεργειακή πυκνότητα και απόδοση. Έτσι, η PEMEL έχει υψηλότερο ρυθμό παραγωγής υδρογόνου ανά κυψέλη. Παρόλα αυτά, η PEMEL χρειάζεται δαπανηρούς και σπάνιους καταλύτες μετάλλων όπως η πλατίνα και το ιρίδιο. Έτσι, το κόστος των μεμβρανών είναι μεγάλο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η ηλεκτρόλυση με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων να παρουσιάζει σημαντικά υψηλότερα κόστη επένδυσης σε σύγκριση με τα συστήματα που χρησιμοποιούν την αλκαλική ηλεκτρόλυση. (Carmo, 2022, Trattner et al., 2021)

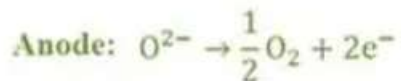


Εικόνα 10. Διάταξη ηλεκτρόλυσης με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων. (Carmo, 2022)

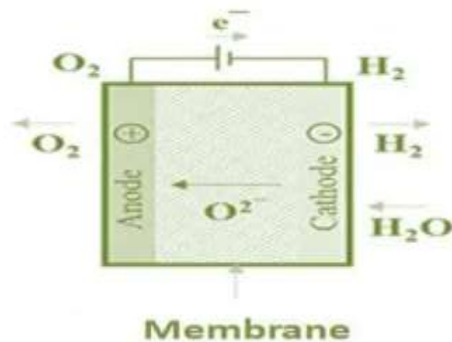
### 3.3.6.3 Ηλεκτρόλυση υψηλής θερμοκρασίας (HTEL)

Η ηλεκτρόλυση υψηλής θερμοκρασίας (HTEL) χαρακτηρίζεται η διαδικασία ηλεκτρόλυσης του νερού σε ιδιαίτερα υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας της τάξης των 700–1000 °C. Ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται ζιρκόνιο σταθεροποιημένο με οξειδίου του υτρίου (YSZ).

Συνδυάζει νερό στην κάθοδο με ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα για να παράγει υδρογόνο και αρνητικά φορτισμένα ιόντα οξυγόνου. Στη συνέχεια μεταφέρει ιόντα οξυγόνου μέσω της στερεής κεραμικής μεμβράνης για μια αντίδραση στην άνοδο για την παραγωγή αερίου οξυγόνου και τη δημιουργία ηλεκτρονίων για το εξωτερικό κύκλωμα.

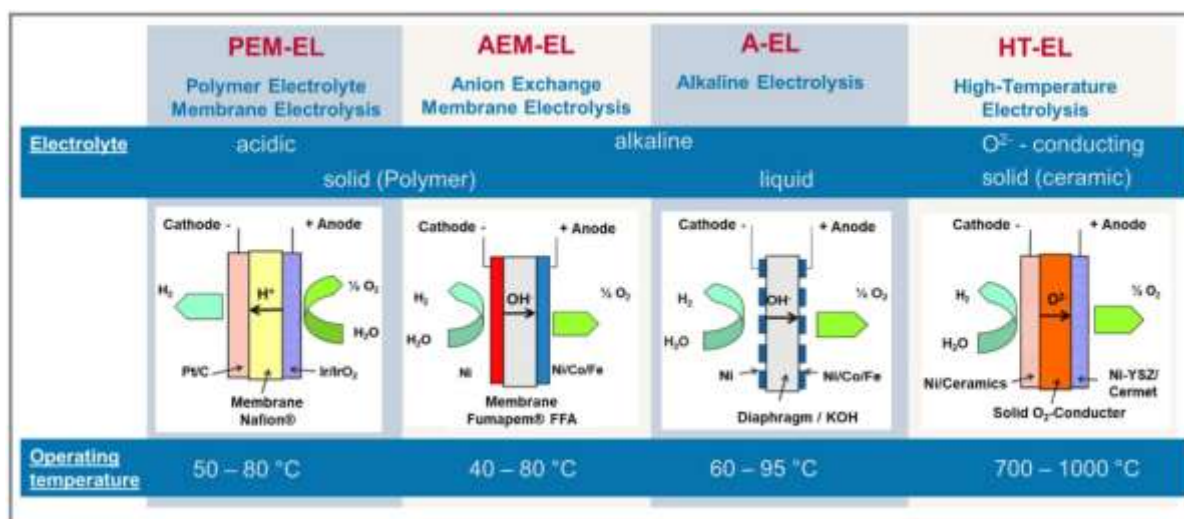


Μειονέκτημα αποτελεί η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας, έως και 1000 °C, στην οποία δεν αντέχουν υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως, όπως τα κεραμικά. Επιπλέον, οι χρόνοι προθέρμανσης είναι μεγάλοι και έτσι η HTEL δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε λειτουργία συχνής έναρξης-διακοπής. Παρόλα αυτά, η απόδοση της διαδικασίας αυτής είναι δυνατόν να φθάσει έως και 82% περίπου. Σε αυτό συμβάλλουν η χαμηλή ενέργεια ενεργοποίησης που απαιτείται και η χαμηλή τάση κυψέλης. Όμως, η τεχνολογία αυτή βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης και υπάρχει ανάγκη για περισσότερη έρευνα. (Trattner et al., 2021, *Hydrogen Production through Electrolysis*, n.d.)



Εικόνα 11. Διάταξη HTE. (*Hydrogen Production through Electrolysis*, n.d.)

Παρακάτω παρατίθεται η εικόνα 12, στην οποία πραγματοποιείται μία σύγκριση των τεχνολογιών ηλεκτρόλυσης που αναπτύχθηκαν παραπάνω.

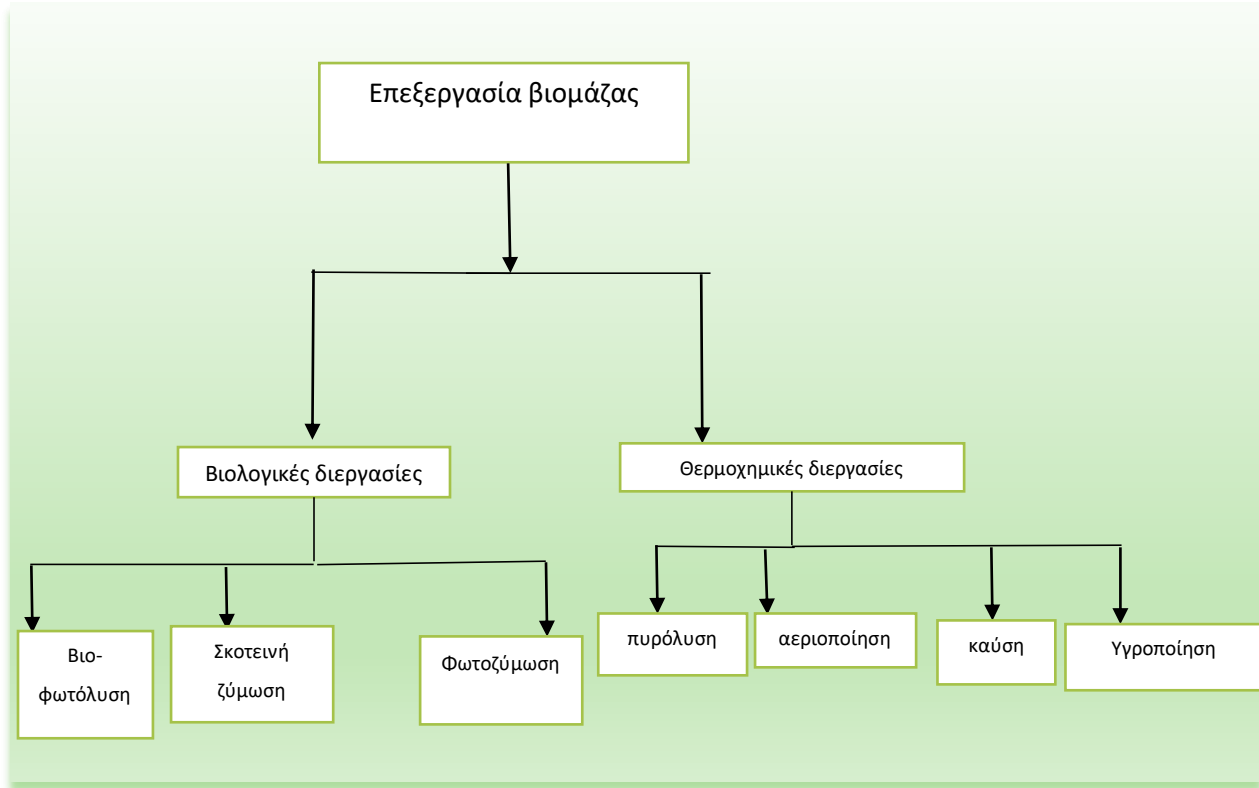


Εικόνα 12. Σύγκριση τεχνολογιών ηλεκτρόλυσης. (Trattner et al., 2021)

Βέβαια, το χρώμα του παραγόμενου υδρογόνου εξαρτάται από την πηγή ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται. Έτσι, το ροζ υδρογόνο μπορεί να παραχθεί με χρήση πυρηνικής ενέργειας, το κίτρινο υδρογόνο με τη χρήση του δημόσιου μίγματος ηλεκτρισμού και το πράσινο υδρογόνο με τη χρήση ανανεώσιμης ενέργειας. Αυτό απεικονίζεται στην [εικόνα 3](#), σε παραπάνω ενότητα. (Ringsgwandl et al., 2022, Timmerberg et al., 2020)

### 3.3.7 Επεξεργασία βιομάζας

Η βιομάζα θεωρείται μία πιο υποσχόμενη πηγή, σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα, όσον αφορά την παραγωγή υδρογόνου λόγω των μεγάλων αποθεμάτων και της εύκολης οξείδωσης. Οι βιολογικοί και θερμοχημικοί μηχανισμοί είναι οι δύο προσεγγίσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα. (Agyekum et al., 2022)



Εικόνα 13. Επεξεργασία βιομάζας. (Agyekum et al., 2022)

### 3.3.7.1 Διαδικασία σκοτεινής ζύμωσης παραγωγής υδρογόνου

Η σκοτεινή ζύμωση (DF) θεωρείται ως η πιο πολλά υποσχόμενη τεχνική για την παραγωγή βιοϋδρογόνου μέσω της μετατροπής της βιομάζας. Η παραγωγή υδρογόνου μπορεί να γίνει από αναερόβια βακτήρια, τα οποία αναπτύσσονται σε πλούσιο από υδατάνθρακες υπόστρωμα. Ο αναερόβιος μεταβολισμός του πυροσταφυλικού, το οποίο σχηματίζεται λόγω του καταβολισμού διαφόρων υποστρωμάτων, ευθύνεται για το μεγαλύτερο μέρος της μικροβιακής παραγωγής υδρογόνου. (Agyekum et al., 2022)

### 3.3.7.2 Διαδικασία φωτοζύμωσης για την παραγωγής υδρογόνου

Η φωτοζύμωση θεωρείται ως μία από τις πιθανές οδούς για την παραγωγή βιοϋδρογόνου. Τα ανοξυγονικά φωτοσυνθετικά βακτήρια, ειδικά τα πορφυρά μη θειικά βακτήρια, συμμετέχουν σε αυτή τη διαδικασία, καθώς είναι ικανά να ανάγουν ιόντα  $H^+$  σε αέριο  $H_2$ , με τη βοήθεια του ηλιακού φωτός και της ταυτόχρονης οξειδωσης των οργανικών ενώσεων που χρησιμοποιούνται ως υπόστρωμα. (Agyekum et al., 2022)

### *3.3.7.3 Διαδικασία βιο-φωτόλυσης για την παραγωγή υδρογόνου*

Αυτή είναι μια βιολογική διαδικασία, κατά την οποία φύκη παράγουν, από νερό, αέριο υδρογόνο. Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα με την βοήθεια της ηλιακής ακτινοβολίας, ώστε τελικά να παράγεται  $H_2$  και  $O_2$ . Ένα είδος φυκών που κάνουν βίο-φωτόλυση είναι τα μικροφύκη *chlamydomonas reinhardtii*. Τα μόρια του νερού διασπώνται από τα φύκη και σχηματίζεται οξυγόνο και ιόντα υδρογόνου. Το  $H_2$  παράγεται μέσω της μετατροπής των παραγόμενων ιόντων υδρογόνου από το ένζυμο υδρογονάση. Αυτό το ένζυμο είναι εξαιρετικά ευαίσθητο στο οξυγόνο και ως εκ τούτου, η περιεκτικότητα σε οξυγόνο πρέπει να διατηρείται κάτω από το 0,1%, που αποτελεί και το μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας. (Agyekum et al., 2022)

### *3.3.7.4 Πυρόλυση βιομάζας*

Η πυρόλυση είναι μια άλλη πολλά υποσχόμενη τεχνική για την παραγωγή υδρογόνου. Σε αυτή την τεχνική, η θέρμανση και η αεριοποίηση της πρώτης οργανικής ύλης συμβαίνει σε ένα εύρος θερμοκρασιών 500–900 °C σε πίεση 0,1–0,5 MPa. Η διαδικασία συμβαίνει απουσία αέρα και οξυγόνου και κατά συνέπεια μπορεί να αποκλειστεί ο σχηματισμός διοξειδίων. Η απουσία αέρα ή νερού σημαίνει ότι δεν θα υπάρξει σχηματισμός οξειδίων του άνθρακα ( $CO_2$  και  $CO$ ) για να απαιτηθούν δευτερεύοντες αντιδραστήρες. Ως αποτέλεσμα, αυτή η διαδικασία παραγωγής υδρογόνου συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών. Ωστόσο, στην περίπτωση παρουσίας νερού ή αέρα (δηλαδή, τα υλικά δεν έχουν στεγνώσει), θα υπάρξει σημαντική εκπομπή  $CO_x$ . Μερικά από τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι το καθαρό υποπροϊόν του άνθρακα, η ευελιξία στο καύσιμο, η μείωση των εκπομπών  $CO_x$  και η συγκριτική απλότητά του. (Agyekum et al., 2022)

### *3.3.7.5 Αεριοποίηση βιομάζας*

Η αεριοποίηση βιομάζας αναγνωρίζεται ως ο πιο οικονομικός και αποδοτικός τρόπος για την παραγωγή υδρογόνου. Κατά την διαδικασία αυτή, η βιομάζα τροφοδοτείται με θερμότητα, ατμό και οξυγόνο με ελεγχόμενο τρόπο και μετατρέπεται σε υδρογόνο καθώς και σε άλλα προϊόντα όπως  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $CO$ , πίσσα, ελαφριούς υδρογονάνθρακες, τέφρα, μικρές μολυσματικές ουσίες και κάρβουνο. Η διαδικασία αεριοποίησης βιομάζας εκτελείται σε θερμοκρασίες 700 -1200°C χωρίς καύση.

Μία από τις κύριες προκλήσεις στην παραγωγή υδρογόνου με χρήση αεριοποίησης βιομάζας είναι η μείωση του επενδυτικού κόστους για το εργοστάσιο καθώς και για την πρώτη ύλη βιομάζας. Μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για την συγκεκριμένη διαδικασία είναι η ιδέα της αεριοποίησης διπλής ρευστοποιημένης κλίνης (DFB) από το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο της Βιέννης. Το TRL για το DFB είναι είναι 5. (Ringsgwandl et al., 2022, Agyekum et al., 2022)

#### *3.3.7.6 Παραγωγή Υδρογόνου μέσω Καύσης Βιομάζας*

Η καύση είναι βασικά η καύση οποιασδήποτε μορφής καυσίμου για την απελευθέρωση ενέργειας με τη μορφή θερμότητας παρουσία αέρα. Σε αυτόν τον μηχανισμό, η βιομάζα καίγεται σε κλίβανο ή λέβητα απευθείας με την παρουσία περίσσειας αέρα, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ατμού. Ο ατμός που προκύπτει χρησιμοποιείται για την κίνηση στροβίλων, συμπιεστών ή αντλιών. Η βιομάζα έχει πλεονεκτήματα ως πρώτη ύλη καύσης, λόγω της υψηλής αντιδραστικότητας του προκύπτοντος άνθρακα και του καυσίμου, καθώς και της υψηλής πτητικότητας του καυσίμου. Η καύση βιομάζας συνήθως δεν είναι ιδανική για την παραγωγή υδρογόνου λόγω του σχηματισμού CO<sub>2</sub>. Επίσης εκπέμπονται και άλλα αέρια, όπως είναι τα NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO<sub>x</sub> και CH<sub>4</sub>, τα οποία εξαρτώνται όλα από τη σύνθεση και την πηγή της βιομάζας. Επίσης, υπάρχει υψηλό κόστος που σχετίζεται με την επεξεργασία αυτών των αερίων, το οποίο αυξάνει το συνολικό κόστος της διαδικασίας. (Agyekum et al., 2022)

#### *3.3.7.7 Απόδοση παραγωγής υδρογόνου και περιορισμοί που σχετίζονται με τις διάφορες τεχνικές επεξεργασίας της βιομάζας*

Οι διάφορες τεχνικές επεξεργασίας της βιομάζας που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες παρουσιάζουν ορισμένους περιορισμούς που είναι δυνατόν να εμποδίσουν τη χρήση τους για την παραγωγή υδρογόνου.

➤ Βιολογικές διεργασίες:

Φωτοζύμωση: αυτός ο μηχανισμός έχει χαμηλή απόδοση παραγωγής H<sub>2</sub>. Επίσης απαιτείται ο έλεγχος των βακτηρίων. Επιπλέον, απαιτεί μεγάλη επιφάνεια και έχει μεγάλη ζήτηση ενέργειας. Η απόδοση H<sub>2</sub> εκτιμάται ότι είναι περίπου 9–49 g/kg πρώτης ύλης.

Σκοτεινή ζύμωση: αυτή η διαδικασία απαιτεί προεπεξεργασία. Επιπλέον, έχει μεγάλο αριθμό παραπροϊόντων, ενώ η απόδοση του H<sub>2</sub> είναι χαμηλή, η οποία εκτιμάται ότι είναι περίπου 4–44 g/kg πρώτης ύλης.

➤ Θερμοχημικές διεργασίες:

Πυρόλυση βιομάζας: υπάρχουν εκπομπές CO<sub>2</sub>, σχηματίζεται άνθρακας και πίσσα. Το κόστος του αντιδραστήρα είναι επίσης υψηλό. Η απόδοση H<sub>2</sub> εκτιμάται ότι είναι περίπου 25–65 g/kg πρώτης ύλης.

Αεριοποίηση βιομάζας: οι περιορισμοί που συνδέονται με αυτή τη διαδικασία είναι η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας, ο σχηματισμός άνθρακα και πίσσας, ο ακριβός αντιδραστήρας και οι εκπομπές CO<sub>2</sub>. Η απόδοση H<sub>2</sub> εκτιμάται ότι είναι περίπου 40–190 g/kg πρώτης ύλης. (Agyekum et al., 2022)

Πίνακας 1. Σύγκριση των διεργασιών παραγωγής υδρογόνου.

Διεργασία	Επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας (TLR)	Αποτελεσματικότητα (%)	Κόστος υδρογόνου (\$/kg)	Πηγή
Αναμόρφωση μεθανίου με ατμό (SMR)	9	70-85	2.08	(“Uncovering the True Cost of Hydrogen Production Routes Using Life Cycle Monetisation,” 2021, Abdalla et al., 2018, Nikolaidis & Poullikkas, 2017)
Αναμόρφωση μεθανίου με ατμό με δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα (SMR +CCS)	7-8	Δεν βρέθηκαν δεδομένα	2.27	(“Uncovering the True Cost of Hydrogen Production Routes Using Life Cycle Monetisation,” 2021, Nikolaidis & Poullikkas, 2017)
Αεριοποίηση άνθρακα (CG)	9	60	1.34	(“Uncovering the True Cost of Hydrogen Production Routes Using Life Cycle Monetisation,” 2021, Pareek et al., 2020,



					Nikolaidis & Poulikkas, 2017)	
Αεριοποίηση άνθρακα με δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα (CG + CCS)	6-7	Δεν βρέθηκαν δεδομένα	1.63		("Uncovering the True Cost of Hydrogen Production Routes Using Life Cycle Monetisation," 2021, Nikolaidis & Poulikkas, 2017)	
Πυρόλυση μεθανίου	3-5	59	1.59-1.70		("Uncovering the True Cost of Hydrogen Production Routes Using Life Cycle Monetisation," 2021, Timmerberg et al., 2020, Nikolaidis & Poulikkas, 2017)	
Ηλεκτρόλυση	9	27	Από ηλιακή ενέργεια 5.10-23.27	Από αιολική ενέργεια 5.89-6.03	Από πυρηνική ενέργεια 4.15-7.00	("Uncovering the True Cost of Hydrogen Production Routes Using Life Cycle Monetisation," 2021, Pareek et al., 2020, Nikolaidis & Poulikkas, 2017)
Αεριοποίηση βιομάζας (BG)	5-6	35-50	1.77-2.05		("Uncovering the True Cost of Hydrogen Production Routes Using Life Cycle Monetisation," 2021, Hosseini & Wahid, 2016, Nikolaidis & Poulikkas, 2017)	
Αεριοποίηση βιομάζας με δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα (BG + CCS)	3-5	Δεν βρέθηκαν δεδομένα			("Uncovering the True Cost of Hydrogen Production Routes Using Life Cycle Monetisation," 2021)	
Πυρόλυση βιομάζας	Δεν βρέθηκαν δεδομένα	35-50	1.25-2.20		(Abdalla et al., 2018, Nikolaidis & Poulikkas, 2017)	
Βιο-φωτόλυση (έμμεση-άμεση)	Πρώιμη έρευνα και ανάπτυξη	10	1.42-2.13		(Nikolaidis & Poulikkas, 2017)	

Σκοτεινή ζύμωση		60-80	2.57		(Nikolaidis & Poullikkas, 2017)
Φωτοζύμωση		0.1	2.83		(Nikolaidis & Poullikkas, 2017)
Θερμόλυση νερού	2-5	20-45	Από πυρηνική ενέργεια 2.17-2.63	Από ηλιακή ενέργεια 7.98-8.40	(Ringsgwandl et al., 2022, Nikolaidis & Poullikkas, 2017)
Φωτόλυση νερού	3	0.06	10.36		(Ringsgwandl et al., 2022, Nikolaidis & Poullikkas, 2017)

### 3.4 Μεταφορά και διανομή υδρογόνου

Για μια ολιστική αξιολόγηση της οικονομίας του υδρογόνου, πρέπει να ληφθεί υπόψη το δίκτυο παραγωγής και διανομής υδρογόνου μακροοικονομικής κλίμακας που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Για ορισμένα έθνη μπορεί να είναι επιθυμητό ένα δίκτυο παραγωγής και διανομής υδρογόνου μεγάλης κλίμακας. Για άλλους μπορεί να είναι επιθυμητή μια εγκατάσταση μικρής κλίμακας ή ένας συνδυασμός εγκαταστάσεων μεγάλης, μικρής και μεσαίας κλίμακας που διανέμονται σε όλη τη χώρα. Σε εθνικό επίπεδο, συχνά η επιλογή για ένα δίκτυο παραγωγής και διανομής υδρογόνου μεγάλης κλίμακας είναι η προτιμώμενη επιλογή για ένα δίκτυο διανομής υδρογόνου. Η παραγωγή τεράστιων ποσοτήτων υδρογόνου σε μία μονάδα συνοδεύεται από εξαιρετικά μειωμένες χρηματικές επενδύσεις κεφαλαίου ανά μονάδα παραγόμενου καυσίμου. Οι αξιολογήσεις δείχνουν αξιοσημείωτες μειώσεις του κόστους κεφαλαίου καθώς αυξάνεται η παραγωγική ικανότητα. Αυτό ευνοεί ένα μεγάλης κλίμακας εθνικό δίκτυο παραγωγής και διανομής υδρογόνου, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η εγκατάσταση παραγωγής υδρογόνου, τόσο χαμηλότερο είναι το μοναδιαίο κόστος ανά ποσότητα παραγόμενου υδρογόνου. (Tashie-Lewis & Nnabuiife, 2021)

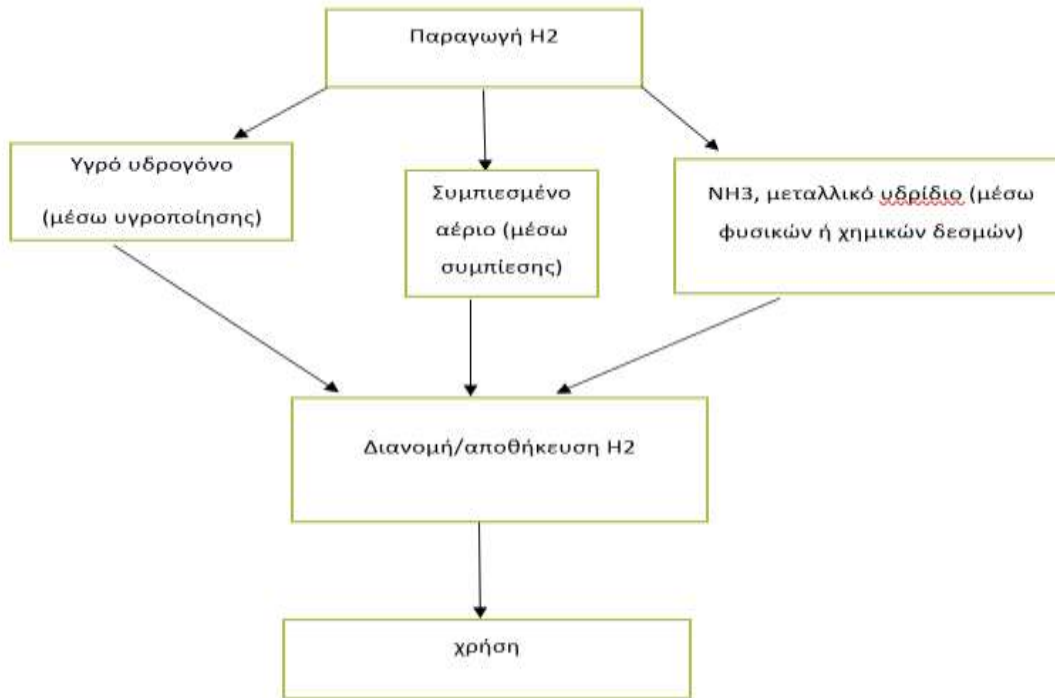
Οι εγκαταστάσεις παραγωγής υδρογόνου μεγάλης κλίμακας θα πρέπει να συνοδεύονται από την ασφαλή, αξιόπιστη και οικονομικά αποδοτική μεταφορά και παράδοση καυσίμου. Οι μέθοδοι μεταφοράς του υδρογόνου είναι μέσω αγωγών, ως συμπιεσμένο αέριο με φορτηγά, ως υγρό σε βυτιοφόρα με κρυογονικές δεξαμενές ή με πλοίο. Στον πίνακα 2, φαίνεται η σύγκριση των μεθόδων διανομής του υδρογόνου. (Tashie-Lewis & Nnabuiife, 2021, Ratnakar et al., 2021)

Πίνακας 2. Σύγκριση μεθόδων διανομής/μεταφοράς υδρογόνου. (Ratnakar et al., 2021)

	<b>Αγωγοί</b>	<b>Συμπιεσμένο αέριο με φορτηγά</b>	<b>Υγρό H<sub>2</sub> σε βυτιοφόρα με κρυογονικές δεξαμενές</b>	<b>Υγρό H<sub>2</sub> με πλοίο</b>
<b>Κόστος επένδυσης</b>	200.000\$- 1.000.000\$ /km ανάλογα με το έδαφος.	\$300.000+ /φορτηγό	\$300.00- \$400.000/φορτηγό	465.000.000 \$- 620.000.000 \$ για κάθε φορτίο LH <sub>2</sub>
<b>Καταλληλότητα</b>	Για μικρές, μεσαίες και μεγάλες αποστάσεις, πολύ μεγάλες ποσότητες αέριου H <sub>2</sub> .	Για μικρές αποστάσεις	Για μικρές και μεσαίες αποστάσεις, μεγάλους όγκους υγρού H <sub>2</sub> .	Για μεγάλες αποστάσεις και μεγάλες ποσότητες.
<b>Απόδοση</b>	>99,2% /100 km	94% /100 km	9% /100 km (απόδοση υγροποίησης~75%)	0,3% απώλειες εξάτμισης/ημέρα
<b>Πλεονεκτήματα</b>	Πολύ μεγάλες ποσότητες μεταφέρονται σε οποιαδήποτε απόσταση, με υψηλή απόδοση, χαμηλό κόστος λειτουργίας και	Δυνατότητα ανάπτυξης σε μικρή κλίμακα.	Μεγαλύτεροι όγκοι από την μεταφορά αέριου H <sub>2</sub> .	Διεθνείς μεταφορές μαζικών ποσοτήτων για μεγάλες αποστάσεις.

	δυνατότητες αποθήκευσης.			
<b>Μειονεκτήματα</b>	Υψηλό κόστος επένδυσης.	Παράδοση μόνο σε μικρή κλίμακα, ενεργειακή αναποτελεσματικότητα	Απώλειες καυσίμου λόγω εξάτμισης	Οι απώλειες λόγω εξάτμισης είναι υψηλότερες από αυτές με οδική μεταφορά.
<b>Συνολικό κόστος μεταφοράς (\$* kg<sup>-1</sup>*100km<sup>-1</sup>)</b>	\$0.10-\$1.00	\$0.50-\$2.00	\$0.30-\$0.50	\$1.80-\$2.00

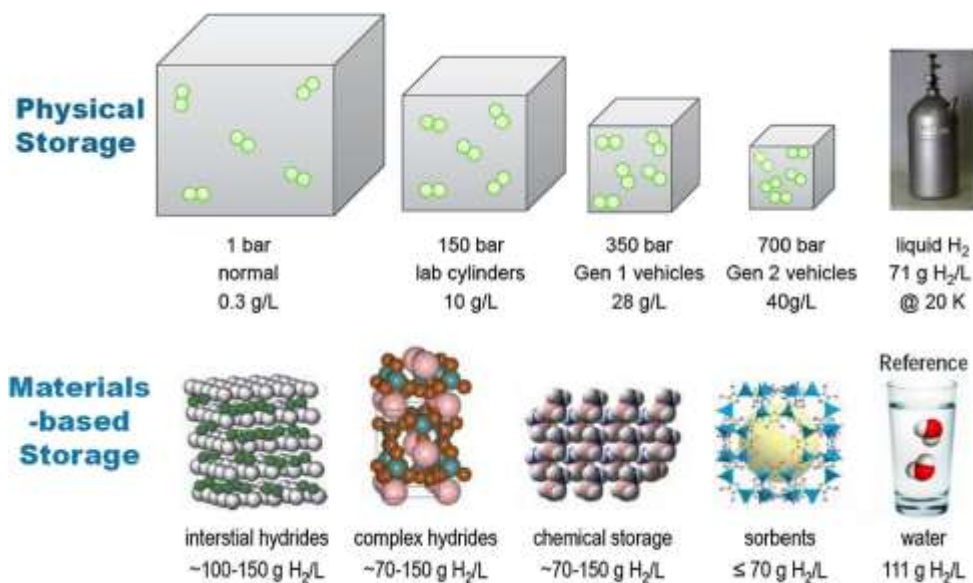
Επιπλέον, οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος παράδοσης (US\$/kg) και θα πρέπει να αξιολογηθούν από ένα έθνος, είναι το μέγεθος της εγκατάστασης και η απόσταση που πρέπει να διανυθεί. (Tashie-Lewis & Nnabuife, 2021, *Ratnakar et al., 2021*)



Εικόνα 14. Τρόποι μεταφοράς/διανομής υδρογόνου. (Ratnakar et al., 2021)

### 3.5 Αποθήκευση υδρογόνου

Η πολιτική χρήσης του υδρογόνου στη βιομηχανία μεγάλης κλίμακας απαιτεί καλή συσκευασία, αποθήκευση και μεταφορά από τον τόπο παραγωγής προς τον τόπο χρήσης. Ως εκ τούτου, πρέπει να γίνει έρευνα για να διασφαλιστεί ότι το υλικό για την αποθήκευση  $H_2$  είναι ασφαλές, αξιόπιστο και οικονομικά αποδοτικό.



Εικόνα 15. Χωρητικότητα διαφόρων συστημάτων αποθήκευσης υδρογόνου. (Abdalla et al., 2018)

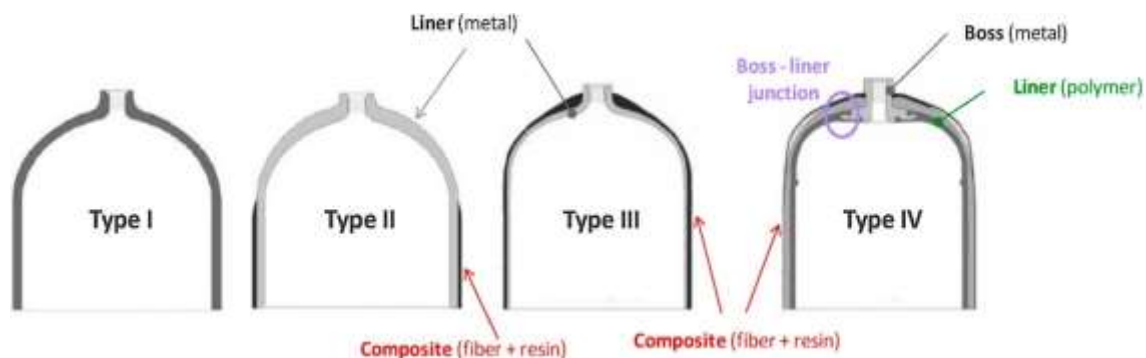
Είναι γνωστό πως η αποθήκευση του υδρογόνου αποτελεί ένα δύσκολο θέμα. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται δεν θα πρέπει να έχουν ισχυρή ή οποιαδήποτε αλληλεπίδραση με το υδρογόνο. Ένα από τα πιο σημαντικά κριτήρια για την αποθήκευση υδρογόνου είναι η αναστρεψιμότητα της πρόσληψης και της απελευθέρωσης. Έτσι, το κριτήριο αναστρεψιμότητας αποκλείει όλες τις ομοιοπολικές ενώσεις υδρογόνου-άνθρακα, επειδή το  $H_2$  απελευθερώνεται μόνο εάν θερμανθεί σε υψηλές θερμοκρασίες άνω των  $800^{\circ}C$ , διαφορετικά ο άνθρακας οξειδώνεται. (Abdalla et al., 2018)

Στις επόμενες ενότητες αναλύονται οι κυριότερες μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου.

### 3.5.1 Συμπιεσμένο αέριο

Η κοινή μέθοδος αποθήκευσης H<sub>2</sub> είναι με τη συμπίεση του αερίου υδρογόνου σε φιάλες αερίου υψηλής πίεσης, με μέγιστη πίεση λειτουργίας 20 MPa. Το συμπιεσμένο υδρογόνο είναι μια εξαιρετικά αποδοτική μεθοδολογία για την αποθήκευση υδρογόνου.

Επί του παρόντος, το συμπιεσμένο υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σε 4 διαφορετικούς τύπους δοχείων πίεσης που παρουσιάζονται στην εικόνα 16. Το μεταλλικό δοχείο πίεσης τύπου I χρησιμοποιείται κυρίως για βιομηχανικές εφαρμογές με πίεση 20–30 MPa. Αυτός ο τύπος έχει περιορισμό στην αποδοτικότητα αποθήκευσης. Στον τύπο II, το κυλινδρικό τμήμα του δοχείου είναι τυλιγμένο με σύνθετη ρητίνη ινών. Ο τύπος III και ο τύπος IV είναι ένα δοχείο πίεσης με βάση πλήρως συνθετικά υλικά, τα οποία είναι κατασκευασμένα είτε από πλαστικό είτε από ίνες άνθρακα. Τα δοχεία πίεσης Τύπου III και Τύπου IV χαρακτηρίζονται από μηχανική αντίσταση, συνήθως μεγαλύτερη από 5%, και διαφέρουν στην επένδυση. Αν η επένδυση είναι μεταλλική, το δοχείο πίεσης είναι τύπου III, ενώ για το δοχείο πίεσης τύπου IV, η επένδυση είναι κυρίως από πολυμερές. Τα ιδανικά χαρακτηριστικά υλικού για δοχεία υψηλής πίεσης είναι: (I) Υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, (II) Χαμηλή πυκνότητα και (III) να μην αντιδρά με το υδρογόνο ή να του επιτρέπει να διαχέεται. (Abdalla et al., 2018)



Εικόνα 16. Τύποι δοχείων πίεσης. (Abdalla et al., 2018)

### 3.5.2 Υγροποιημένο υδρογόνο

Μια άλλη συμβατική τεχνική αποθήκευσης του  $H_2$  είναι η υγροποίηση του υδρογόνου στους  $-253^\circ C$ . Αυτή η διαδικασία είναι χρονοβόρα και η απώλεια ενέργειας υπολογίζεται σε 40% σε αντίθεση με την ενέργεια που χάνεται για την συμπίεση του υδρογόνου, περίπου 10%. Τα πλεονεκτήματα του υγροποιημένου υδρογόνου (κρυογονικό υδρογόνο) είναι η υψηλή πυκνότητα υγρού και η απόδοση αποθήκευσης.

Για να επιτευχθεί θερμοκρασία  $-253^\circ C$ , τα δοχεία πρέπει να είναι αποτελεσματικά μονωμένα, κάτι που επιτυγχάνεται με ένα εξωτερικό προστατευτικό περίβλημα και ένα εσωτερικό δοχείο πίεσης. Η θερμική αγωγιμότητα μεταξύ του εσωτερικού δοχείου και του προστατευτικού δοχείου μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με την εφαρμογή περλίτη ή την περιτύλιξή του με στρώματα μεμβράνης αλουμινίου.

Μια άλλη τεχνική αποθήκευσης  $H_2$  είναι η χρήση μιας μεθόδου αποθήκευσης κρυο-συμπίεσης, όπου συνδυάζονται οι ιδιότητες του συμπιεσμένου αέριου υδρογόνου και των συστημάτων κρυογονικού υδρογόνου. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση του ρυθμού βρασμού του υδρογόνου και ταυτόχρονα για τη διατήρηση υψηλής ενεργειακής πυκνότητας.

Αυτές οι τεχνολογίες αποθήκευσης  $H_2$  παρουσιάζουν αρκετούς περιορισμούς. Αρχικά, το υδρογόνο πρέπει να αποθηκεύεται σε ένα μεγάλο δοχείο πίεσης λόγω της χαμηλής πυκνότητάς του. Επιπλέον, το κόστος των υπό πίεση και των κρυογονικών δεξαμενών είναι μεγάλο καθώς το δοχείο απαιτεί σύνθετο υλικό όπως ανθρακονήματα που αποτελούν το 75% του κόστους του δοχείου και το κόστος παραγωγής του υδρογόνου είναι υψηλό ως αποτέλεσμα της ενέργειας που καταναλώνεται για τη συμπίεση και την υγροποίηση του υδρογόνου. Τέλος, υπάρχει ανησυχία και για την ασφάλεια του δοχείου, εάν αυτή χρησιμοποιείται σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. (Abdalla et al., 2018)

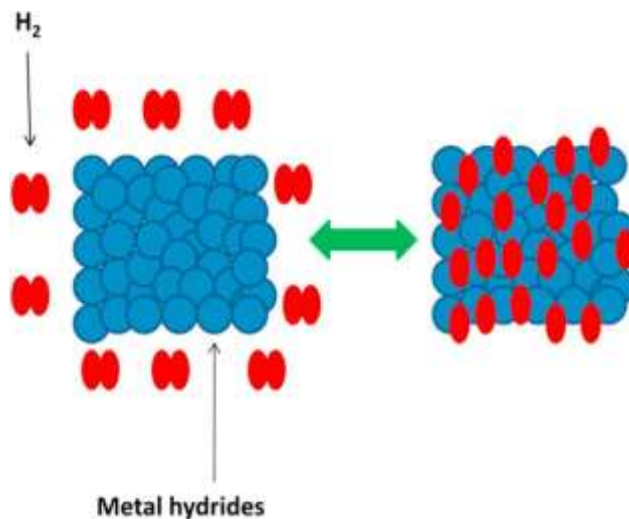
### 3.5.3 Υδρίδιο μετάλλου

Τα υδρίδια μετάλλου έχουν κερδίσει μεγάλη προσοχή ως πολλά υποσχόμενα υλικά αποθήκευσης  $H_2$  λόγω της ικανότητάς τους να απορροφούν και να εκροφούν υδρογόνο, είτε σε θερμοκρασία δωματίου είτε μέσω θέρμανσης της δεξαμενής. Επιπλέον, η ικανότητα αποθήκευσης του υδριδίου μετάλλου βρέθηκε περίπου 5-7 φορές μεγαλύτερη από αυτή του συμπιεσμένου αερίου, όταν τα μεταλλικά υδρίδια υπόκεινται σε θέρμανση σε θερμοκρασία  $2500^\circ C$  και άνω. Λόγω της ισχυρής αλληλεπίδρασης μεταξύ του υδριδίου μετάλλου και του υδρογόνου, απαιτείται θερμοκρασία  $120-200^\circ C$  για την εκρόφηση του



υδρογόνου. Επιπλέον, οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά για τα υδρίδια μετάλλων ως δοχείο αποθήκευσης αναφέρονται ως εξής:

- Μεγάλη μάζα πυκνότητας υδρογόνου
- Υψηλός όγκος αποθήκευσης υδρογόνου (σε σύγκριση με συμπιεσμένο υδρογόνο και υγρό υδρογόνο)
- Υψηλή ασφάλεια (άριστη ασφάλεια)
- Υψηλή καθαρότητα υδρογόνου
- Καλή απόδοση αναστρέψιμου κύκλου
- Χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης (Abdalla et al., 2018)



Εικόνα 17. Απορρόφηση και εκρόφηση υδρογόνου σε υδρίδιο μετάλλου. (Abdalla et al., 2018)

Υπάρχουν δύο κατηγορίες υδριδίων μετάλλων. Αυτά είναι το υδρίδιο ελαφριού μετάλλου και το σύνθετο υδρίδιο μετάλλου. **Το μεταλλικό υδρίδιο**, αποτελείται από δύο διαφορετικά στοιχεία, το Α-στοιχείο και το Β-στοιχείο. Το στοιχείο Α σχηματίζει ένα σταθερό υδρίδιο, ενώ το στοιχείο Β σχηματίζει ασταθή υδρίδια και συχνά αποτελείται από μέταλλο μετάπτωσης. Για το στοιχείο Β, συνήθως χρησιμοποιείται νικέλιο καθώς παρουσιάζει εξαιρετική καταλυτική ιδιότητα για διάσταση υδρογόνου.

Πρόσφατα έχει κερδίσει μεγάλο ενδιαφέρον το μεταλλικό υδρίδιο που παράγεται από ελαφριά μέταλλα (όπως Na, Li και Be) και μαγνήσιο (Mg). Επιπλέον, το Mg και τα κράματά του έτυχαν μεγαλύτερης προσοχής λόγω της υψηλής ικανότητας αποθήκευσης H<sub>2</sub> κατά βάρος και εκτός από φθηνό υλικό, τα

υδρίδια τους έχουν επίσης εξαιρετική ποιότητα για λειτουργικές ιδιότητες που είναι ανθεκτικότητα στη θερμότητα, απορρόφηση κραδασμών, αναστρεψιμότητα και ανακυκλωσιμότητα.

**Το σύνθετο υδρίδιο μετάλλου** είναι ένας άλλος τύπος υδριδίου ελαφριού μετάλλου και συνήθως σχηματίζεται από τα σύμπλοκα των στοιχείων της Ομάδας I, II και III. Αυτές οι ομάδες είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες για την υψηλή χωρητικότητα για αποθήκευση  $H_2$ . Το υδρογόνο εκροφάται μέσω της διαδοχικής αποσύνθεσης των υδριδίων. Ένα τέτοιο υδρίδιο είναι το αλανικό νάτριο,  $NaAlH_4$ ,

Ωστόσο, υπάρχουν σοβαρές προκλήσεις με τη χρήση υδριδίων. Τα υδρίδια αντιδρούν βίαια με υγρό αέρα και μπορεί να προκαλέσουν ερεθισμό του δέρματος ή των ματιών. Επίσης, απορροφώνται ακαθαρσίες κατά τη διάρκεια της πρόσληψης  $H_2$  στις δεξαμενές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διάρκειας ζωής της δεξαμενής. Επιπλέον, η ύπαρξη αέρα και  $O_2$ ,  $MgH_2$  απαιτεί υψηλή θερμοκρασία για να εκροφήσει το  $H_2$ . Για τα σύνθετα υδρίδια, είναι δύσκολος ο ασφαλής χειρισμός του υδριδίου, καθώς μπορεί να αποσυντεθεί για να σχηματίσει στοιχεία υψηλής σταθερότητας. (Abdalla et al., 2018)

#### 3.5.4 Αμμωνία

Η αμμωνία ( $NH_3$ ) είναι χημική ουσία που συντίθεται κανονικά από το φυσικό αέριο και κυρίως χρησιμοποιείται ως χημική πρώτη ύλη, π.χ. στην παραγωγή λιπασμάτων. Ωστόσο, μπορεί να χρησιμεύσει ως μέσο αποθήκευσης καθαρού υδρογόνου, αφού μπορεί να αποθηκεύσει 17 φορές περισσότερο υδρογόνο από το συμπιεσμένο αέριο. (Weichenhain 2021)

Ο παραδοσιακός, φθηνός τρόπος παραγωγής αμμωνίας είναι μέσω της αφαίρεσης του υδρογόνου από το φυσικό αέριο χρησιμοποιώντας ατμό (παράγοντας  $CO_2$  ως υποπροϊόν) και στη συνέχεια συνδυασμού του υδρογόνου που παράχθηκε με άζωτο από τον αέρα σε υψηλή πίεση και θερμοκρασίες εκατοντάδων βαθμών Κελσίου. (Jones, 2022, Weichenhain 2021) Η μέθοδος λέγεται Haber-Bosch και είναι η κύρια βιομηχανική διαδικασία για την παραγωγή αμμωνίας σήμερα. Όμως, παρουσιάζει υψηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Η αμμωνία θα πρέπει να παραχθεί με βιώσιμο τρόπο, ώστε να αποκτά νόημα η αποθήκευση του πράσινου υδρογόνου. Η πιο ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία για βιώσιμη παραγωγή υδρογόνου που χρησιμοποιείται για τη σύνθεση αμμωνίας είναι η ηλεκτρόλυση του νερού σε συνδυασμό με τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια. (Ghavam et al., 2021)

Εφόσον παραχθεί, η υγρή αμμωνία μπορεί στη συνέχεια να μεταφερθεί σε ψυκτικές δεξαμενές. Μόλις φτάσει στον προορισμό της, η αμμωνία διασπάται στα συστατικά της, άζωτο και υδρογόνο, μέσω μια διαδικασίας ενδόθερμης πυρόλυσης. Το αέριο μίγμα που προκύπτει, στη συνέχεια καθαρίζεται, και το άζωτο απομακρύνεται και απελευθερώνεται ξανά στην ατμόσφαιρα. Η αμμωνία ήδη αποτελεί μέσο αποθήκευσης του υδρογόνου. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, παράγεται επιτόπου στον τόπο όπου χρησιμοποιείται περαιτέρω. (Weichenhain 2021)

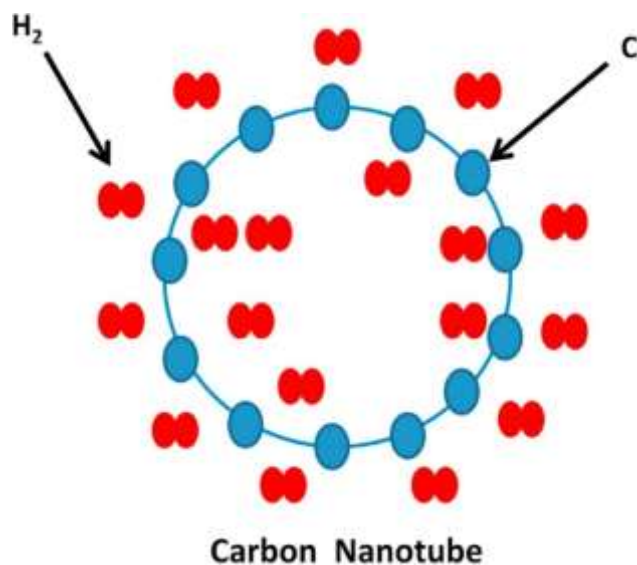
**Πλεονεκτήματα:** Η σύνθεση αμμωνίας είναι μια καθιερωμένη διαδικασία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση πράσινου υδρογόνου, αντικαθιστώντας το γκρι υδρογόνο για το οποίο ήδη χρησιμοποιείται. Αυτό σημαίνει ότι οι συμβατικές μονάδες παραγωγής αμμωνίας θα μπορούσαν ενδεχομένως να μετασκευαστούν για να παράγουν «καθαρή» αμμωνία.

Εξαιτίας της ευρείας χρήσης της αμμωνίας ως χημική πρώτη ύλη, η υποδομή αποθήκευσης, η μεταφορά και ο χειρισμός της είναι ήδη σε ώριμο στάδιο. Επιπροσθέτως, η υγρή αμμωνία μπορεί να αποθηκεύσει περισσότερο υδρογόνο κατ' όγκο από τους περισσότερους μεταφορείς που αναφέρονται. (Weichenhain 2021)

**Μειονεκτήματα:** Η αμμωνία είναι ένα τοξικό υγρό και αποτελεί πρόδρομο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης καθώς σχηματίζει αερολύματα στην ατμόσφαιρα. Μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ανθρώπινη υγεία καθώς και την ποιότητα του εδάφους και του νερού εάν απελευθερωθεί. Λόγω των ανησυχιών για την ασφάλεια, είναι αμφίβολο εάν οι αρχές θα επιτρέψουν τη μεταφορά και την χρήση αμμωνίας σε κατοικημένες περιοχές. Έτσι, η τοξικότητάς της μπορεί τελικά να περιορίσει την εφαρμογή της. (Weichenhain 2021)

### 3.5.5 Νανοσωλήνες άνθρακα (CNS)

Οι νανοσωλήνες άνθρακα είναι γνωστοί ως προσροφητικά υλικά για αέρια. Έχουν την ικανότητα να παίρνουν την μορφή πολύ λεπτής σκόνης, με εξαιρετικά πορώδη δομή και να παρουσιάζουν ιδιαίτερες αλληλεπιδράσεις μεταξύ ατόμων άνθρακα και των αντίστοιχων μορίων αερίου. Μπορούν να ταξινομηθούν ως νανοσωλήνες μονού τοιχώματος (SWNT) ή νανοσωλήνες πολλαπλών τοιχωμάτων (MWNT). (Abdalla et al., 2018)



Εικόνα 18. Απορρόφηση υδρογόνου σε νανοσωλήνες άνθρακα. (Abdalla et al., 2018)

Η ικανότητα αποθήκευσης υδρογόνου των νανοσωλήνων άνθρακα βρέθηκε έως και 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή του συμπιεσμένου αερίου.

Μελετήθηκαν νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων με προσμίξεις αλκαλίων, όπως για παράδειγμα Li και K, και συγκεκριμένα η ικανότητά τους να αποθηκεύουν υδρογόνο.

Τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι MWNT με προσμίξεις λιθίου παρουσίασαν αποθηκευτική ικανότητα υδρογόνου 20 φορές μεγαλύτερη από αυτή του συμπιεσμένου αερίου, σε συνθήκες 1 atm στους 200–400°C, και οι MWNT με προσμίξεις καλίου 14 φορές μεγαλύτερη από αυτή του συμπιεσμένου αερίου, σε θερμοκρασία δωματίου. Παρόλα αυτά, οι MWNT με προσμίξεις λιθίου είναι χημικά σταθεροί, ενώ οι MWNT με πρόσμιξη K είναι χημικά ασταθείς. (Abdalla et al., 2018)

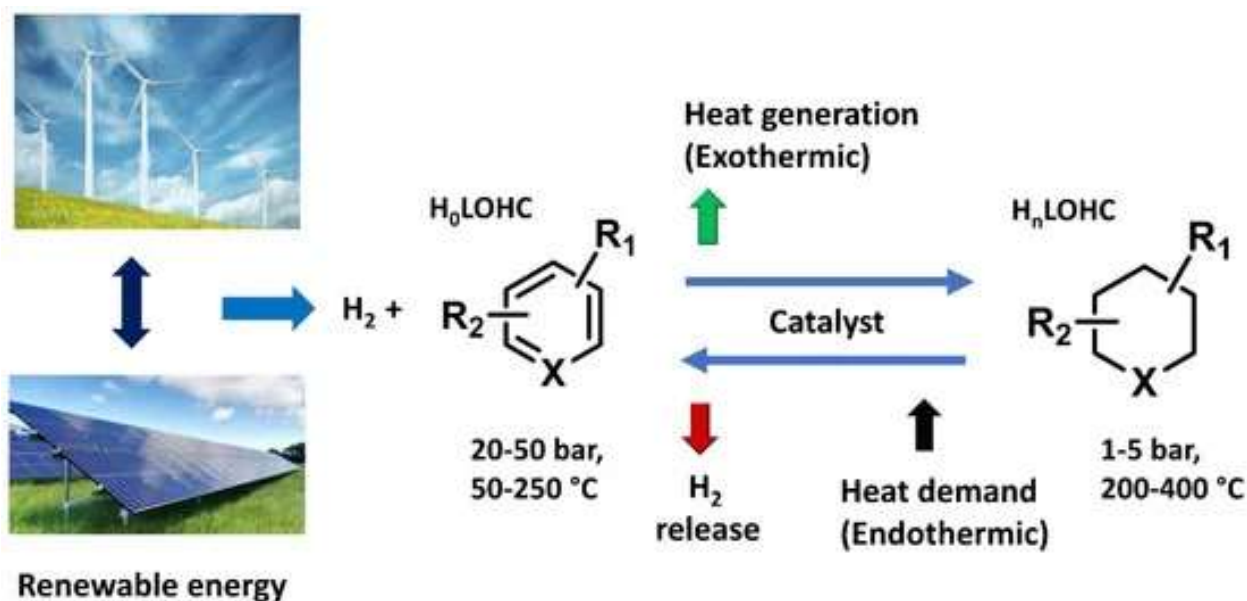
### 3.5.6 Υγρός οργανικός φορέας υδρογόνου (LOHC)

Τα LOHC είναι οργανικές ενώσεις που υπάρχουν ως υγρά ή στερεά χαμηλού σημείου τήξεως στο περιβάλλον. Τα συστήματα LOHC είναι δυνητικά ασφαλή και σχετικά φθηνά υλικά αποθήκευσης. (Rao & Yoon, 2020)

Παραδείγματα ενώσεων που έχουν μελετηθεί ως υγροί, οργανικοί φορείς για την αποθήκευση υδρογόνου, αποτελούν τα κυκλοαλκάνια, όπως το κυκλοεξάνιο, το μεθυλοκυκλοεξάνιο και η δεκαλίνη. Τα κυκλοαλκάνια παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα έναντι άλλων LOHC λόγω των υψηλότερων

σημείων βρασμού τους, και έτσι μπορούν να παραμείνουν σε υγρή κατάσταση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και λόγω της σχετικά υψηλότερης χωρητικότητας  $H_2$  (6-8 φορές μεγαλύτερη από αυτή του συμπιεσμένου αερίου). Επίσης, για παραγωγή μεγάλης κλίμακας και παράδοση σε μεγάλες αποστάσεις, τα κυκλοαλκάνια είναι η καλύτερη επιλογή λόγω φθηνότερων τιμών, υψηλής καθαρότητας του παραγόμενου υδρογόνου και αφθονίας. Ένας άλλος πολλά υποσχόμενος φορέας είναι το μυρμηκικό οξύ. (Abdalla et al., 2018)

Η έννοια της αποθήκευσης του υδρογόνου σε ένα LOHC τυπικά βασίζεται στην αναστρέψιμη υδρογόνωση και αφυδρογόνωση των διπλών δεσμών του άνθρακα. Κατά την διαδικασία υδρογόνωσης οι διπλοί δεσμοί ανοίγουν και οι άνθρακες ενώνονται με υδρογόνο έως ότου η ένωση γίνει κορεσμένη. Αυτή η διαδικασία είναι εξώθερμη και συνήθως λαμβάνει χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Αντίθετα, κατά την ενδόθερμη διαδικασία της αφυδρογόνωσης, το υδρογόνο απελευθερώνεται ξανά στην καθαρή του μορφή. Η αφυδρογόνωση πραγματοποιείται σε ατμοσφαιρική πίεση, και σε αυξημένες θερμοκρασίες. (Niermann et al., 2019)



Εικόνα 19. Τρόπος λειτουργίας LOHC. (Rao & Yoon, 2020)

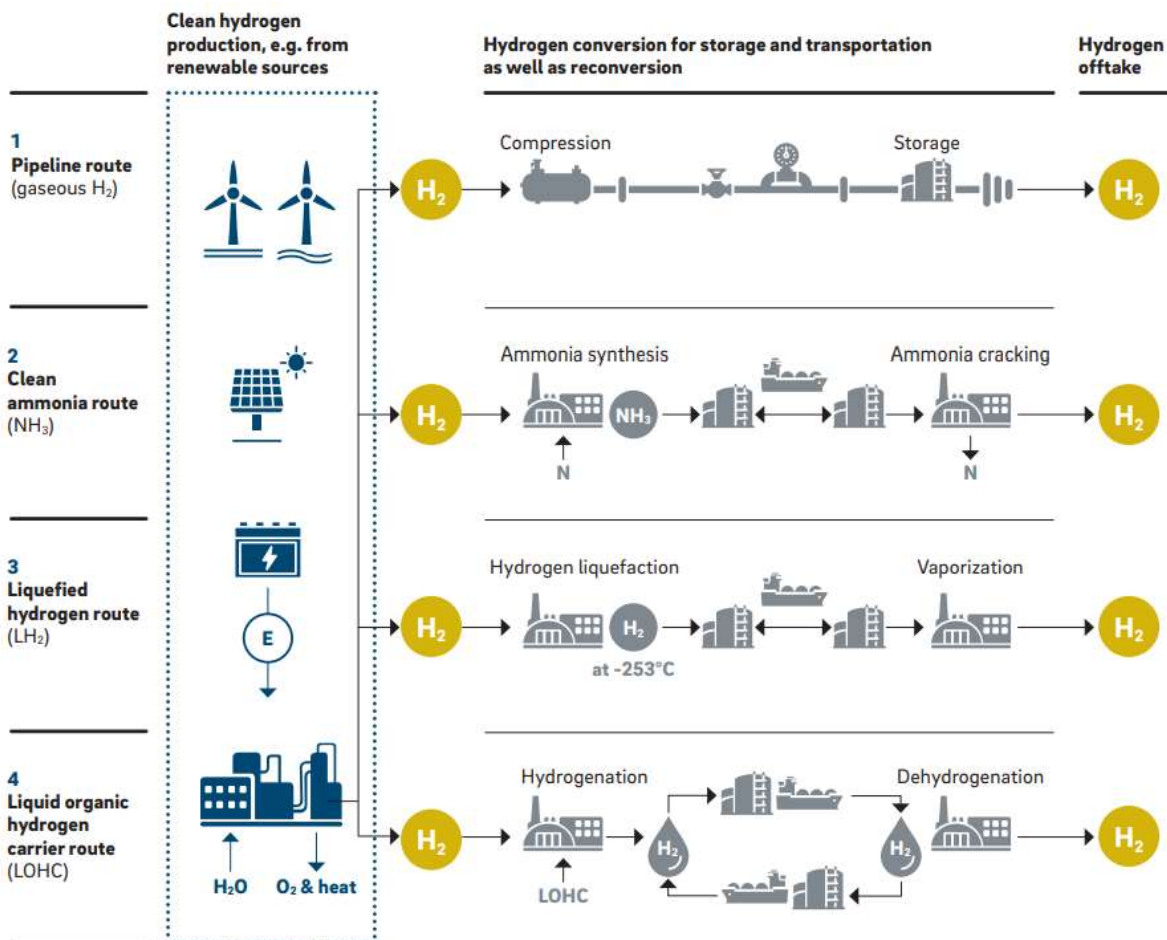
Παρουσιάζουν πλεονεκτήματα όπως η εύκολη και καθαρή αποθήκευση ενέργειας χωρίς διαρροές, η συμβατότητα με τις υπάρχουσες υποδομές μεταφοράς και ανεφοδιασμού, καθώς και η λειτουργία υπό συνθήκες περιβάλλοντος (πίεση ή θερμοκρασία). Μέχρι σήμερα, έχουν αναπτυχθεί αρκετές αποτελεσματικές ενώσεις LOHC. (Rao & Yoon, 2020)

### 3.5.7 Μεταλλικά-οργανικά υβρίδια (MOF)

Τα MOF είναι μια πολλά υποσχόμενη κατηγορία κρυσταλλικών υλικών που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση υδρογόνου. Είναι υβρίδια που σχηματίζονται από μεταλλικές ομάδες μαζί με οργανικούς συνδέτες. (Hirscher & Panella, 2007)

Παρουσιάζουν εξαιρετικά πορώδη δομή, υψηλότερη ειδική επιφάνεια σε σύγκριση με άλλους τύπους υλικών και μεγαλύτερη ικανότητα πρόσληψης  $H_2$ . Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζουν έως 13 φορές πειραματικά και 16 φορές θεωρητικά μεγαλύτερη ικανότητα αποθήκευσης από αυτή του συμπιεσμένου αερίου, σε χαμηλή θερμοκρασία, των 77K. (Abdalla et al., 2018)

Στην εικόνα 20, παρουσιάζονται οι 4 κύριοι τρόποι αποθήκευσης υδρογόνου και τα μονοπάτια που πρέπει να ακολουθηθούν για τη μεταφορά υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα. (Weichenhain 2021)



Εικόνα 20. Οι 4 κύριοι τρόποι αποθήκευσης υδρογόνου. (Weichenhain 2021)

### 3.6 Κυψέλες καυσίμου

Μια κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιεί τη χημική ενέργεια του υδρογόνου ή άλλων καυσίμων για την καθαρή και αποτελεσματική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Εάν το υδρογόνο είναι το καύσιμο, τα μόνα προϊόντα είναι η ηλεκτρική ενέργεια, το νερό και η θερμότητα. Οι κυψέλες καυσίμου είναι μοναδικές όσον αφορά την ποικιλία των πιθανών εφαρμογών τους. Μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα ευρύ φάσμα καυσίμων και πρώτων υλών και μπορούν να παρέχουν ισχύ για συστήματα τόσο μεγάλα όσο ένας σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κοινής ωφέλειας και τόσο μικρή όσο ένας φορητός υπολογιστής. (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2019)

#### 3.6.1 Αρχή λειτουργίας κυψελίδων καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν όπως οι μπαταρίες, αλλά δεν εξαντλούνται ούτε χρειάζονται επαναφόρτιση. Παράγουν ηλεκτρισμό και θερμότητα εφόσον παρέχεται καύσιμο. Μια κυψέλη καυσίμου αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια - ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο (ή άνοδο) και ένα θετικό ηλεκτρόδιο (ή κάθοδο) - τοποθετημένα γύρω από έναν ηλεκτρολύτη. Ένα καύσιμο, όπως το υδρογόνο, τροφοδοτείται στην άνοδο και ο αέρας τροφοδοτείται στην κάθοδο. Σε μια κυψέλη καυσίμου υδρογόνου, ένας καταλύτης στην άνοδο διαχωρίζει τα μόρια υδρογόνου σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια, τα οποία ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές προς την κάθοδο. Τα ηλεκτρόνια διέρχονται από ένα εξωτερικό κύκλωμα, δημιουργώντας μια ροή ηλεκτρισμού. Τα πρωτόνια μεταναστεύουν μέσω του ηλεκτρολύτη στην κάθοδο, όπου ενώνονται με το οξυγόνο και τα ηλεκτρόνια για να παράγουν νερό και θερμότητα. (Tashie-Lewis & Nnabuiife, 2021, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2019)

Η στήλη κυψελών καυσίμου (fuel cell stack) είναι πολλές μεμονωμένες κυψέλες συνδυασμένες σε σειρά, ώστε να παρέχεται η απαιτούμενη τάση για μια δεδομένη εφαρμογή. (Tashie-Lewis & Nnabuiife, 2021)

Οι κυψέλες καυσίμου έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες που βασίζονται στην καύση που χρησιμοποιούνται επί του παρόντος σε πολλούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και οχήματα. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να λειτουργούν με υψηλότερες αποδόσεις από τους κινητήρες εσωτερικής καύσης και μπορούν να μετατρέψουν τη χημική ενέργεια του καυσίμου απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια με αποδόσεις ικανές να ξεπερνούν το 60%. Οι κυψέλες καυσίμου έχουν χαμηλότερες ή μηδενικές εκπομπές ρύπων σε σύγκριση με τους κινητήρες εσωτερικής

καύσης. Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου εκπέμπουν μόνο νερό χωρίς καθόλου εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Επίσης, είναι αθόρυβες κατά τη λειτουργία τους. (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2019)

### 3.6.2 Τύποι κυψελών καυσίμου

#### 3.6.2.1 Κυψέλη καυσίμου μεθανόλης (DMFC)

Οι περισσότερες κυψέλες καυσίμου τροφοδοτούνται από υδρογόνο, το οποίο μπορεί να τροφοδοτηθεί απευθείας στο σύστημα κυψελών καυσίμου ή μπορεί να δημιουργηθεί μέσα στο σύστημα κυψελών καυσίμου με αναμόρφωση καυσίμων πλούσιων σε υδρογόνο όπως μεθανόλη, αιθανόλη και καύσιμα υδρογονάνθρακα. Οι κυψέλες καυσίμου μεθανόλης (DMFC), ωστόσο, τροφοδοτούνται από καθαρή μεθανόλη, η οποία συνήθως αναμιγνύεται με νερό και τροφοδοτείται απευθείας στην άνοδο της κυψέλης καυσίμου.

Οι κυψέλες καυσίμου DMFC δεν έχουν πολλά από τα προβλήματα αποθήκευσης καυσίμων, επειδή η μεθανόλη έχει υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από το υδρογόνο—αν και μικρότερη από τη βενζίνη ή το καύσιμο ντίζελ. Η μεθανόλη είναι επίσης πιο εύκολη στη μεταφορά και την παροχή στο κοινό χρησιμοποιώντας την τρέχουσα υποδομή μας, επειδή είναι υγρό, όπως η βενζίνη. Μπορεί να αποθηκευτεί σε συνθήκες περιβάλλοντος. Βέβαια, το υδρογόνο προτιμάται λόγω της υψηλής βαρυμετρικής του ενέργειας. Ωστόσο, οι κυψέλες DMFC χαρακτηρίζονται από μικρή ευφλεκτότητα και είναι ασφαλείς στη χρήση. Οι κυψέλες DMFC μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή ενέργειας σε φορητές εφαρμογές κυψελών καυσίμου, όπως κινητά τηλέφωνα ή φορητούς υπολογιστές. Οι κυψέλες DMFC θεωρούνται φιλικές προς το περιβάλλον, γιατί δεν προάγουν τον σχηματισμό κάποιου τοξικού παραπροϊόντος. Ωστόσο, δεν θεωρούνται απαλλαγμένες από εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, καθώς κατά τη λειτουργία τους παράγεται διοξείδιο του άνθρακα. (Guangui & Chala, 2020, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2019)

#### 3.6.2.2 Κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)

Οι κυψέλες PEM παρέχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος και προσφέρουν τα πλεονεκτήματα του χαμηλού βάρους και όγκου σε σύγκριση με άλλες κυψέλες καυσίμου. Οι κυψέλες καυσίμου PEM χρησιμοποιούν ένα στερεό πολυμερές ως ηλεκτρολύτη και πορώδη ηλεκτρόδια άνθρακα που περιέχουν καταλύτη



πλατίνα ή κράμα πλατίνας. Χρειάζονται μόνο υδρογόνο, οξυγόνο από τον αέρα και νερό για να λειτουργήσουν. Τυπικά, τροφοδοτούνται με καθαρό υδρογόνο που παρέχεται από δεξαμενές αποθήκευσης ή αναμορφωτές. (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2019)

Επίσης, χαρακτηρίζονται από μικρό αποτύπωμα, γρήγορη εκκίνηση και απενεργοποίηση και αθόρυβη λειτουργία. Λειτουργούν σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία, στους 40°C-80°C, γεγονός που τους επιτρέπει να ξεκινούν γρήγορα και έχει ως αποτέλεσμα λιγότερη φθορά στα εξαρτήματα του συστήματος μαζί με καλύτερη ανθεκτικότητα. Επειδή, η θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι αρκετά χαμηλή, είναι πιο κατάλληλες για χρήση σε οχήματα και κατοικίες. (Guangui & Chala, 2020, Tashie-Lewis & Nnabuiife, 2021)

Οι κυψέλες PEMFC είναι η κυρίαρχη τεχνολογία για οικιακή χρήση. Η ηλεκτρική τους απόδοση είναι χαμηλότερη από άλλες κυψέλες καυσίμου (~35%), αλλά έχουν υψηλότερη θερμική απόδοση (55%). (Staffell et al., 2019)

Ένας άλλος τύπος κυψελών PEM είναι οι κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων υψηλής θερμοκρασίας (HT-PEMFCs). Λειτουργούν σε θερμοκρασίες 80 °C με 240 °C. Αποτελούν μία πολλά υποσχόμενη ενεργειακή συσκευή με τα πλεονεκτήματα της γρήγορης κινητικής αντίδρασης (υψηλή ενεργειακή απόδοση), της υψηλής ανοχής σε ακαθαρσίες καυσίμου/αέρα, του απλού σχεδιασμού πλακών και την καλύτερη διαχείριση θερμότητας και νερού. (Haider et al., 2021)

Η Advent Technologies Holdings, μια εταιρεία ανάπτυξης κυψελών καυσίμου PEM υψηλής θερμοκρασίας υψηλής απόδοσης, και η Hyundai Motor Company υπέγραψαν συμφωνία αξιολόγησης τεχνολογίας, πωλήσεων και ανάπτυξης. Η Advent και η Hyundai στοχεύουν να προσφέρουν λύσεις πράσινης ενέργειας στις τρέχουσες εφαρμογές υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, χρησιμοποιώντας τεχνολογία κυψελών καυσίμου. (HT-PEM Fuel Cell Company Advent Technologies, Hyundai Enter Technology Assessment, Sales & Development Agreement, 2022)

Η GP Joule σχεδιάζει να ολοκληρώσει την κυκλοφορία συνολικά 5.000 οχημάτων με κινητήρα H<sub>2</sub> μέχρι τα τέλη του 2027. Συγκεκριμένα, στοχεύει να τοποθετήσει στην γερμανική αγορά 5.000 ηλεκτρικά φορτηγά στην κατηγορία των 40 τόνων, με πελάτες κυρίως ναυτιλιακές εταιρείες. Τα οχήματα H<sub>2</sub> θα έχουν αυτονομία περίπου 400 χιλιομέτρων ανά γεμάτη δεξαμενή. Έτσι, η εταιρεία αναμένει ότι η ευρεία χρήση αυτών των οχημάτων σε ολόκληρη τη Γερμανία θα απαιτήσει περίπου 150 σταθμούς ανεφοδιασμού καυσίμων, ξεκινώντας από το Schleswig-Holstein, όπου θα κυκλοφορήσουν τα πρώτα οχήματα. Τα πρώτα φορτηγά θα κυκλοφορήσουν το δεύτερο εξάμηνο του 2023, τα επόμενα 500 το 2024 και μετά άλλα 1.000 κάθε χρόνο, έως το 2027. (Kilgore, 2023)

### 3.6.2.3 Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC)

Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC) ήταν μία από τις πρώτες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου που αναπτύχθηκαν και ήταν ο πρώτος τύπος που χρησιμοποιήθηκε ευρέως στο διαστημικό πρόγραμμα των ΗΠΑ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και νερού επί του διαστημικού σκάφους. Σε αυτές τις κυψέλες χρησιμοποιείται ένα διάλυμα υδροξειδίου του καλίου στο νερό ως ηλεκτρολύτης και μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια ποικιλία από μη πολύτιμα μέταλλα ως καταλύτη στην άνοδο και την κάθοδο. Έχουν επίσης επιδείξει απόδοση άνω του 60% σε διαστημικές εφαρμογές. Η υψηλή απόδοση των AFC οφείλεται στον ρυθμό με τον οποίο λαμβάνουν χώρα ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2019) Η απόδοση αυξάνεται λόγω του αλκαλικού περιβάλλοντος γιατί βελτιώνει τη ροή του οξυγόνου. Το αρχικό κόστος για την παραγωγή του συστήματος AFC είναι φθηνότερο σε σύγκριση με τα άλλα συστήματα, καθώς τα στοιχεία και τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται είναι κατασκευασμένα από υλικά χαμηλού κόστους. (Guangui & Chala, 2020) Μια βασική πρόκληση για αυτόν τον τύπο κυψελών καυσίμου είναι ότι ακόμη και η μικρή ποσότητα CO<sub>2</sub> στον αέρα μπορεί να επηρεάσει δραματικά την απόδοση και την ανθεκτικότητά τους λόγω του σχηματισμού ανθρακικών αλάτων. Τα συστήματα υγρών ηλεκτρολυτών υποφέρουν επίσης από πρόσθετες ανησυχίες, όπως η διαβρεξιμότητα, η αυξημένη διάβρωση και οι δυσκολίες χειρισμού διαφορετικών πιέσεων. (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2019)

Τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί νέες κυψέλες AFC, οι AMFC, που χρησιμοποιούν μια μεμβράνη από πολυμερές ως ηλεκτρολύτη. Αυτές οι κυψέλες καυσίμου σχετίζονται στενά με τις συμβατικές κυψέλες καυσίμου PEM, εκτός από το ότι χρησιμοποιούν μια αλκαλική μεμβράνη αντί για μια όξινη μεμβράνη. Αντιμετωπίζουν τις ανησυχίες των κυψελών AFC και έχουν χαμηλότερη ευαισθησία στο CO<sub>2</sub> από ότι οι AFC. Ωστόσο, το CO<sub>2</sub> εξακολουθεί να επηρεάζει την απόδοση και η απόδοση και η ανθεκτικότητα των AMFC εξακολουθούν να υστερούν σε σχέση με τα PEMFC. Τα AMFC εξετάζονται για εφαρμογές στην κλίμακα W έως kW. (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2019)

### 3.6.2.4 Αναστρέψιμη κυψέλη καυσίμου (RFC)

Οι αναστρέψιμες κυψέλες καυσίμου αποτελούν μία σχετικά νέα τεχνολογία κυψέλης καυσίμου. (Guangui & Chala, 2020) Παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από υδρογόνο και οξυγόνο και ως υποπροϊόντα παράγουν θερμότητα και νερό, όπως και άλλες κυψέλες καυσίμου. Ωστόσο, τα αναστρέψιμα συστήματα κυψελών καυσίμου μπορούν επίσης να χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια από ηλιακή ενέργεια, αιολική

ενέργεια ή άλλες πηγές για να χωρίσουν το νερό σε οξυγόνο και υδρογόνο μέσω της διαδικασίας της ηλεκτρόλυσης. Οι αναστρέψιμες κυψέλες καυσίμου μπορούν να παρέχουν ισχύ όταν χρειάζεται, αλλά σε περιόδους υψηλής παραγωγής ισχύος από άλλες τεχνολογίες (όπως όταν οι ισχυροί άνεμοι οδηγούν σε υπερβολική διαθέσιμη αιολική ενέργεια), οι αναστρέψιμες κυψέλες καυσίμου μπορούν να αποθηκεύσουν την περίσσεια ενέργειας με τη μορφή υδρογόνου. (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2019)

#### *3.6.2.5 Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)*

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFCs) χρησιμοποιούν υγρό φωσφορικό οξύ ως ηλεκτρολύτη και πορώδη ηλεκτρόδια άνθρακα που περιέχουν καταλύτη πλατίνας. Μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα ευρύ φάσμα ατμοσφαιρικών συνθηκών και σε θερμοκρασίες τόσο χαμηλές όσο  $-32^{\circ}\text{C}$  και υψηλές έως  $80^{\circ}\text{C}$ . Έχουν διάρκεια ζωής έως και 40.000 ώρες. (Guangui & Chala, 2020) Οι κυψέλες PAFC θεωρούνται η «πρώτη γενιά» σύγχρονων κυψελών καυσίμου. Είναι ένας από τους πιο ώριμους τύπους κυψελών και ο πρώτος που χρησιμοποιείται στο εμπόριο. Αυτός ο τύπος κυψελών καυσίμου έχει χρησιμοποιηθεί και για την τροφοδοσία μεγάλων οχημάτων όπως τα αστικά λεωφορεία. (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2019)

Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θέρμανση κτηρίων. Έχουν χαμηλότερη ηλεκτρική απόδοση από τις κυψέλες MCFC αλλά υψηλότερη θερμική και συνολική απόδοση. (Staffell et al., 2019)

Οι κυψέλες PAFC είναι πιο ανεκτικές σε μη καθαρά ορυκτά καύσιμα που έχουν μετατραπεί σε υδρογόνο από ότι οι μεμβράνες PEM. Μπορούν να λειτουργήσουν χρησιμοποιώντας αέρα και όχι καθαρό οξυγόνο. Οι κυψέλες PAFC έχουν απόδοση μεγαλύτερη από 85% όταν χρησιμοποιούνται για τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, αλλά είναι λιγότερο αποδοτικές στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μόνο (37%-42%). Η απόδοσή τους είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής που βασίζονται στην καύση, οι οποίοι συνήθως λειτουργούν με απόδοση περίπου 33%. Επίσης, είναι λιγότερο ισχυρές από άλλες κυψέλες καυσίμου και έχουν μεγαλύτερο κόστος λόγω του καταλύτη πλατίνας. (Guangui & Chala, 2020, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2019)

### 3.6.2.6 Κυψέλη καυσίμου υγρού ανθρακικού άλατος (MCFC)

Κυψέλες καυσίμου υγρού ανθρακικού άλατος (MCFC) αναπτύσσονται για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που λειτουργούν με φυσικό αέριο και άνθρακα για ηλεκτρικές, βιομηχανικές και στρατιωτικές εφαρμογές. Οι MCFC είναι κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας που χρησιμοποιούν έναν ηλεκτρολύτη που αποτελείται από ένα μείγμα τηγμένου ανθρακικού άλατος που αιωρείται σε μια πορώδη, χημικά αδρανή κεραμική μήτρα οξειδίου του αργιλίου λιθίου. Επειδή λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες 450–650°C, μη πολύτιμα μέταλλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καταλύτες στην άνοδο και την κάθοδο, μειώνοντας το κόστος.

Οι κυψέλες καυσίμου υγρού ανθρακικού άλατος, όταν συνδυάζονται με έναν στρόβιλο, μπορούν να φτάσουν αποδόσεις που πλησιάζουν το 65%, σημαντικά υψηλότερες από τις αποδόσεις 37%-42% μιας μονάδας κυψελών καυσίμου φωσφορικού οξέος. Όταν η απορριπτόμενη θερμότητα δεσμεύεται και χρησιμοποιείται, η συνολική απόδοση καυσίμου μπορεί να είναι πάνω από 85%. (Guangui & Chala, 2020, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy 2019)

Οι κυψέλες MCFC μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θέρμανση. Έχουν υψηλή ηλεκτρική απόδοση (>50%) με αντίστοιχα χαμηλότερη παραγωγή θερμότητας. (Staffell et al., 2019)

Σε αντίθεση με τις αλκαλικές κυψέλες καυσίμου, τις κυψέλες φωσφορικού οξέος και τις PEM, οι MCFC δεν απαιτούν εξωτερικό αναμορφωτή για τη μετατροπή καυσίμων όπως το φυσικό αέριο και το βιοαέριο σε υδρογόνο. Στις υψηλές θερμοκρασίες στις οποίες λειτουργούν οι MCFC, το μεθάνιο και άλλοι ελαφριοί υδρογονάνθρακες σε αυτά τα καύσιμα μετατρέπονται σε υδρογόνο μέσα στην ίδια την κυψέλη καυσίμου με μια διαδικασία που ονομάζεται εσωτερική αναμόρφωση, η οποία επίσης μειώνει το κόστος. Επιπλέον, δεν είναι ευάλωτες στο μονοξείδιο του άνθρακα και στο διοξείδιο του άνθρακα, καθιστώντας τις πιο ελκυστικές επιλογές, όταν ως καύσιμα χρησιμοποιούνται αέρια που παράγονται από άνθρακα.

Το κύριο μειονέκτημα της τρέχουσας τεχνολογίας MCFC είναι η ανθεκτικότητα. Οι υψηλές θερμοκρασίες στις οποίες λειτουργούν αυτές οι κυψέλες και ο διαβρωτικός ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται επιταχύνουν τη διάσπαση και τη διάβρωση των συστατικών, μειώνοντας τη ζωή των κυψελών. (Guangui & Chala, 2020, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2019)

### 3.6.2.7 Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)

Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFCs) χρησιμοποιούν μια σκληρή, μη πορώδη κεραμική ένωση ως ηλεκτρολύτη. Τα SOFC είναι περίπου 60% αποδοτικά στη μετατροπή του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε εφαρμογές που έχουν σχεδιαστεί για τη σύλληψη και τη χρήση της απορριπτόμενης θερμότητας του συστήματος (συμπαραγωγή), η συνολική απόδοση χρήσης καυσίμου θα μπορούσε να ξεπεράσει το 85%.

Τα SOFC λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, έως και 1.000°C. Η λειτουργία σε υψηλή θερμοκρασία αφαιρεί την ανάγκη για καταλύτη πολύτιμων μετάλλων, μειώνοντας έτσι το κόστος. Επιτρέπει επίσης στα SOFC να αναμορφώνουν τα καύσιμα εσωτερικά, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση μιας ποικιλίας καυσίμων και μειώνει το κόστος που σχετίζεται με την προσθήκη ενός αναμορφωτή στο σύστημα.

Τα SOFC είναι επίσης ο πιο ανθεκτικός τύπος κυψελών καυσίμου στο θείο. Μπορούν να ανεχθούν αρκετές τάξεις μεγέθους περισσότερο θείο από ό, τι άλλοι τύποι. Επιπλέον, δεν επηρεάζονται από το μονοξείδιο του άνθρακα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμη και ως καύσιμο. Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει στα SOFC να χρησιμοποιούν φυσικό αέριο, βιοαέριο και αέρια που παράγονται από άνθρακα. Η λειτουργία σε υψηλή θερμοκρασία έχει και μειονεκτήματα. Έχει ως αποτέλεσμα μια αργή εκκίνηση και απαιτεί σημαντική θερμική θωράκιση για τη διατήρηση της θερμότητας και την προστασία του προσωπικού, η οποία μπορεί να είναι αποδεκτή για εφαρμογές κοινής ωφέλειας αλλά όχι για μεταφορά. Οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας θέτουν επίσης αυστηρές απαιτήσεις ανθεκτικότητας στα υλικά. Τα συστήματα SOFC είναι γνωστά ως σύστημα υψηλής απόδοσης με χαμηλό λόγο περιβαλλοντικής ρύπανσης μεταξύ άλλων κυψελών καυσίμου. Θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής μεγάλης κλίμακας που θα μπορούσαν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια για να προμηθεύσουν το δίκτυο ή τα εργοστάσια. (Guangui & Chala, 2020, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2019)

Περίπου το 7% των συστημάτων θέρμανσης της Ιαπωνίας είναι SOFC, τα οποία τείνουν να λειτουργούν συνεχώς καθώς οι χρόνοι εκκίνησης και διακοπής λειτουργίας μπορεί να υπερβούν τις 12 ώρες. Έχουν υψηλότερη ηλεκτρική απόδοση (~40–60%), μεγαλύτερη ευελιξία καυσίμου, μειωμένες απαιτήσεις καθαρότητας, μειωμένο κόστος καταλύτη σε σχέση με τις PEMFCs, λόγω υψηλότερων θερμοκρασιών λειτουργίας και υψηλότερη θερμότητα που είναι πιο κατάλληλη για υπάρχοντα κτίρια με μικρότερα θερμαντικά σώματα. (Staffell et al., 2019)

Η βασική τεχνική πρόκληση που αντιμετωπίζει αυτή η τεχνολογία είναι η ανάπτυξη υλικών χαμηλού κόστους με υψηλή ανθεκτικότητα σε θερμοκρασίες λειτουργίας κυψέλης. Πραγματοποιείται διερεύνηση για την δυνατότητα ανάπτυξης SOFC χαμηλότερης θερμοκρασίας που λειτουργούν σε ή κάτω από τους 700°C, που έχουν λιγότερα προβλήματα ανθεκτικότητας και κοστίζουν λιγότερο. Ωστόσο, τα SOFC χαμηλότερης θερμοκρασίας δεν έχουν ακόμη ταιριάξει με την απόδοση των συστημάτων υψηλότερης θερμοκρασίας. (Guangul & Chala, 2020, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2019) Στη συνέχεια ακολουθεί ο πίνακας 3, όπου συγκρίνονται οι διάφοροι τύποι κυψελών.

Πίνακας 3. Σύγκριση τύπων κυψελών καυσίμου. (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2019)

Τύπος κυψέλης καυσίμου	Ηλεκτρολύτης	Θερμοκρασία λειτουργίας	Απόδοση σε ηλεκτρισμό	Εφαρμογές	Πλεονεκτήματα	Προκλήσεις
<b>PEM</b>	Υπερφθοροσουλφονικό οξύ	~80°C	60% και 40% για αναμορφωμένο καύσιμο	Εφεδρική ισχύς Φορητό ρεύμα Κατανεμημένη παραγωγή Μεταφορά-οχήματα	Στερεός ηλεκτρολύτης (μειώνει τη διάβρωση και τα προβλήματα διαχείρισης ηλεκτρολυτών) Χαμηλή θερμοκρασία Γρήγορη εκκίνηση	Ακριβοί καταλύτες Ευαίσθητο σε ακάθαρτο καύσιμο
<b>AFC</b>	KOH(aq) εμποτισμένο σε πορώδη μήτρα ή μεμβράνη αλκαλικού πολυμερούς	<100°C	60%	Στρατός Διάστημα Εφεδρική ισχύς Μεταφορές	Χαμηλό κόστος υλικών Χαμηλή θερμοκρασία Γρήγορη εκκίνηση	Ευαίσθητο στο CO <sub>2</sub> του καυσίμου και του αέρα Διαχείριση ηλεκτρολυτών (υδατική) Αγωγιμότητα ηλεκτρολυτών (πολυμερές)

<b>PAFC</b>	Φωσφορικό οξύ εμποτισμένο σε πορώδη μήτρα ή εμποτισμένο σε πολυμερή μεμβράνη	150°–200°C	40%	Κατανεμημένη παραγωγή	Κατάλληλο για CHP Αυξημένη ανοχή σε ακάθαρτο καύσιμο	Ακριβοί καταλύτες Μεγάλος χρόνος εκκίνησης  Ευαισθησία στο θείο
<b>MCFC</b>	Τηγμένα ανθρακικά άλατα λιθίου, νατρίου και/ή καλίου, εμποτισμένα σε πορώδη μήτρα	600°–700°C	50%	Χρήση ηλεκτρικής ενέργειας Κατανεμημένη παραγωγή	Υψηλής απόδοση Ευελιξία καυσίμου Στερεός ηλεκτρολύτης Κατάλληλο για CHP	Διάβρωση Μεγάλος χρόνος εκκίνησης Χαμηλή πυκνότητα ισχύος
<b>SOFC</b>	Ζιρκόνιο σταθεροποιημένο με Ύτριο	500°–1,000°C	60%	Βοηθητική ισχύς Χρήση ηλεκτρικής ενέργειας Κατανεμημένη παραγωγή	Υψηλής απόδοση Ευελιξία καυσίμου Στερεός ηλεκτρολύτης Κατάλληλο για CHP	Διάβρωση Μεγάλος χρόνος εκκίνησης Περιορισμένος αριθμός τερματισμών λειτουργίας

### 3.7 Κύριες προκλήσεις

#### **Απώλεια καυσίμου λόγω της εξάτμισης του υδρογόνου**

Λόγω του εξαιρετικά χαμηλού κανονικού σημείου βρασμού του υδρογόνου (δηλ. 20,4 K), η θερμοκρασία της εσωτερικής δεξαμενής αποθήκευσης πρέπει να διατηρείται στους 20 K ή χαμηλότερα ενώ η εξωτερική θερμοκρασία είναι κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος (~300 K) τόσο στην ξηρά όσο και υπεράκτιες εφαρμογές, που οδηγούν σε διαφορές θερμοκρασίας περίπου 280 K. Λόγω αυτής της σημαντικής θερμοκρασιακής διαφοράς, η ροή θερμότητας μπορεί να είναι σημαντική ακόμη και με καλή ασφάλιση της δεξαμενής.

Η σχετική απώλεια καυσίμου μπορεί να είναι χαμηλότερη σε μεγαλύτερες δεξαμενές λόγω της χαμηλής επιφάνειας ανά μονάδα όγκου για εισροή θερμότητας στην δεξαμενή. Αν και η σχετική απώλεια λόγω εξάτμισης μπορεί να είναι μειωμένη κάτω από 0,01% για αυξημένα μεγέθη δεξαμενών (με χωρητικότητα περίπου 20.000 m<sup>3</sup> ή μεγαλύτερη), το απόλυτο ποσό απώλειας καυσίμου είναι πολύ υψηλότερο για μεγαλύτερες δεξαμενές. Αυτό όχι μόνο οδηγεί σε μείωση των αποθεμάτων του καυσίμου (και κερδοφορίας) αλλά αποτελεί και απειλή για την ασφάλεια καθώς το υδρογόνο που εξατμίζεται είναι σε αέρια μορφή και μπορεί να ζεσταθεί γρήγορα εάν εκτεθεί στο περιβάλλον. Τέτοιες απειλές περιλαμβάνουν την ευφλεκτότητα και άλλα θέματα όπως την ευθραυστότητα υλικών συγκόλλησης/βαλβίδων και υγροποίηση του ατμοσφαιρικού αέρα στις σωληνώσεις/εξαρτήματα εξαερισμού.

Μία λύση αποτελεί η χρήση του εξατμιζόμενου υδρογόνου είτε ως ψυκτικό μέσο είτε ως καύσιμο. Για παράδειγμα, το υδρογόνο που διαφεύγει βρίσκεται ακόμα σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (20-30 K), το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την ψύξη των εξωτερικών μερών της δεξαμενής για να μειώσει τις διαφορές θερμοκρασίας και το ποσοστό του υδρογόνου που εξατμίζεται.

Από την άλλη το υδρογόνο που διαφεύγει θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο (είτε σε απευθείας καύση ή σε κυψέλες καυσίμου) για την παραγωγή ενέργειας είτε για την προώθηση του πλοίο/μεταφορέα σε περίπτωση μεταφοράς ή για τη λειτουργία της εγκατάστασης στην οποία είναι αποθηκευμένο.

Επίσης, μια άλλη επιλογή είναι η χρήση μονωτικού υλικού για την ελάττωση των διαρροών υδρογόνου. Τέτοια υλικά είναι: Υλικά αεροτζέλ, αφροί κλειστής κυψέλης, πολυστρωματική μόνωση, σκόνη περλίτη, (Ratnakar et al., 2021)



## **Ευφλεκτότητα**

Λόγω του μικρού μοριακού του μεγέθους, όταν το υδρογόνο είναι υγρό διαρρέει, εξατμίζεται και διαχέεται πολύ γρήγορα. Κάτι τέτοιο αυξάνει το μέγεθος του εύφλεκτου νέφους. Το υδρογόνο παρουσιάζει σταθερή φλόγα και ταυτόχρονα πολύ χαμηλή ενέργεια ενεργοποίησης για καύση στον αέρα. Έτσι, καίγεται πολύ εύκολα απλά με την ύπαρξη κάποιας πηγής ανάφλεξης. (Ratnakar et al., 2021)

## **Μόλυνση**

Το ρεύμα υγρού υδρογόνου είναι στους 20 K. Το οξυγόνο υγροποιείται στους 90 K και μετατρέπεται σε στερεό στους 55 K. Ομοίως, το άζωτο υγροποιείται στους 77 K και στερεοποιείται στους 63 K και ο αέρας υγροποιείται στους 79 K και παγώνει στους 58 K. Έτσι, σε περίπτωση που το ρεύμα του υδρογόνου μολυνθεί με αέρα ή οξυγόνο, είναι δυνατόν να στερεοποιηθούν και ανάλογα με την ποσότητα της μόλυνσης, μπορεί να εξατμιστεί κάποια κρίσιμη ποσότητα το υγρό υδρογόνο, λόγω της θερμότητας που του παρέχουν, οδηγώντας σε διαρροή. (Ratnakar et al., 2021)

## **Άλλες προκλήσεις**

Πολλές προκλήσεις αντιμετωπίζει και η μετάβαση της αλυσίδας εφοδιασμού υδρογόνου στην παγκόσμια ενέργεια. Οι πιο σημαντικές από αυτές είναι το υψηλότερο κόστος και η έλλειψη υποδομών. Επί του παρόντος, το υδρογόνο παράγεται κυρίως από φυσικό αέριο και άνθρακα, γεγονός που οδηγεί σε σημαντικές εκπομπές CO<sub>2</sub>. Επίσης, η παραγωγή υδρογόνου με χαμηλές εκπομπές άνθρακα είναι δαπανηρή λόγω του μεγάλου κόστους και της διαθεσιμότητας ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. (Ratnakar et al., 2021) Συγκεκριμένα, για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου το 2019 δαπανήθηκαν δύο έως τρεις φορές περισσότερα χρήματα από ότι για την παραγωγή γκρι υδρογόνου. Επιπλέον, υιοθετώντας το πράσινο υδρογόνο για χρήση από τους πολίτες μπορεί να είναι πολύ κοστοβόρο. Οχήματα που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου και δεξαμενές υδρογόνου κοστίζουν τουλάχιστον 1,5 έως 2 φορές περισσότερο από τα αντίστοιχα με ορυκτά καύσιμα. (IRENA 2020)

Η παραγωγή οχημάτων με υδρογόνο είναι περιορισμένη επειδή οι σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου δεν είναι εύκολα προσβάσιμοι. Επιπλέον, και οι εταιρείες δεν θα κατασκευάσουν σταθμούς ανεφοδιασμού εάν δεν έχουν πελάτες με οχήματα με καύσιμα υδρογόνου. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, υπάρχουν περίπου 48 σταθμοί ανεφοδιασμού οχημάτων υδρογόνου και σχεδόν όλοι βρίσκονται στην Καλιφόρνια. Το Πρόγραμμα Καθαρών Μεταφορών της Πολιτείας της Καλιφόρνια προσπαθεί να προωθήσει την καταναλωτική αγορά για οχήματα κυψελών καυσίμου μηδενικών εκπομπών. (U.S. Energy Information Administration, 2021)

Στην Ευρώπη μέχρι σήμερα υπάρχουν συνολικά 136 σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου (*EU: Hydrogen Fuel Stations 2021*, n.d.), με τους 93 να βρίσκονται στην Γερμανία. (*H2.LIVE: Hydrogen Stations in Germany & Europe*, n.d.)

Επιπλέον, η υποδομή για την αλυσίδα εφοδιασμού υδρογόνου αναπτύσσεται πολύ αργά και είναι ένας από τους περιοριστικούς παράγοντες που εμποδίζουν την υιοθέτηση του υδρογόνου ως καύσιμο με μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. (Ratnakar et al., 2021) Πιο συγκεκριμένα, το υδρογόνο παράγεται κοντά στο σημείο που χρησιμοποιείται, με περιορισμένη αποκλειστική υποδομή μεταφορών. Μέχρι το 2016, υπήρχαν μόνο περίπου 5000 χιλιόμετρα αγωγών μεταφοράς υδρογόνου σε όλο τον κόσμο. Ενώ, για το φυσικό αέριο υπήρχαν περισσότερα από 3 εκατομμύρια χιλιόμετρα αγωγών. Μέχρι το 2020, είχαν καταγραφεί μόνο 470 σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου, παγκοσμίως. (IRENA 2020)

Επιπλέον, το πράσινο υδρογόνο επιφέρει σημαντικές ενεργειακές απώλειες σε κάθε στάδιο από την παραγωγή έως την χρήση. Περίπου το 30-35% της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης χάνεται. Χρησιμοποιώντας υδρογόνο στις κυψέλες καυσίμου μπορεί να οδηγήσει σε επιπλέον απώλεια ενέργεια 40–50%. Η συνολική απώλεια ενέργειας θα εξαρτηθεί από την τελική χρήση του υδρογόνου. (IRENA 2020)

Τέλος, ένα ακόμα πρόβλημα αποτελεί η εγκατάσταση μονάδων παραγωγής υδρογόνου σε περιοχές με υδατική καταπόνηση. Συγκεκριμένα, τον Μάιο του 2022, ο Terry Kallis, ιδιοκτήτης του επενδυτικού σχήματος Kallis Energy Investments, ακύρωσε την ανέγερση μονάδας πράσινου υδρογόνου στη Νότια Αυστραλία. Το ανυπέρβλητο πρόβλημα ήταν έλλειψη νερού. (Currie, 2022)

## Κεφάλαιο 4 – Συμπεράσματα

Το υδρογόνο μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο μαζί με την ηλεκτρική ενέργεια στην οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα, με την ευελιξία να παρέχει υπηρεσίες θερμότητας, μεταφοράς και ηλεκτρισμού.

Το υδρογόνο και οι κυψέλες καυσίμου δεν είναι συνώνυμα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό ή χωριστά. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να λειτουργούν με φυσικό αέριο, το οποίο αποφεύγει την καύση και συνεπώς το 90% των ατμοσφαιρικών ρύπων. Το υδρογόνο μπορεί να καεί σε κινητήρες και λέβητες χωρίς άμεσες εκπομπές CO<sub>2</sub> και σχεδόν μηδενικές εκπομπές NO<sub>x</sub>. Όταν χρησιμοποιούνται μαζί, οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου έχουν μηδενικές εκπομπές στο σημείο χρήσης, με τις συνολικές εκπομπές να εξαρτώνται από τη μέθοδο παραγωγής του υδρογόνου.

Εταιρείες αυτοκινήτων όπως η Hyundai επενδύουν χρηματικά κεφάλαια, με στόχο την μαζική παραγωγή των πρώτων οχημάτων που λειτουργούν με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου. Επίσης, οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούνται ήδη για θέρμανση σπιτιών αλλά και εργασιακών χώρων.

Τα πολυάριθμα μονοπάτια παραγωγής, διανομής και κατανάλωσης υδρογόνου παρουσιάζουν πολύπλοκες αντισταθμίσεις μεταξύ κόστους, εκπομπών, επεκτασιμότητας και απαιτήσεων για καθαρότητα. Αλλά, εξακολουθεί να παρέχει μια πληθώρα επιλογών που μπορούν να αξιοποιηθούν ανάλογα με τις τοπικές ανάγκες.

## Κεφάλαιο 5 – Επίλογος

Ένα εναλλακτικό καύσιμο θα πρέπει να είναι τεχνικά εφικτό, οικονομικά βιώσιμο, να μετατρέπεται εύκολα σε άλλη μορφή ενέργειας όταν καίγεται, να είναι ασφαλές στη χρήση και δυνητικά ακίνδυνο για το περιβάλλον. Το υδρογόνο μπορεί να είναι το καύσιμο του μέλλοντος λόγω των εγγενών χαρακτηριστικών του, καθώς είναι το πιο άφθονο στοιχείο στη γη, έχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και δεν εκπέμπει επιβλαβή αέρια κατά την καύση του. Αν και το υδρογόνο δεν υπάρχει ελεύθερο στη φύση, μπορεί να παραχθεί από διάφορες πηγές όπως μέσω της αναμόρφωσης φυσικού αερίου, της αεριοποίησης του άνθρακα και της βιομάζας και μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά ευνοούν την ανάγκη της ευρείας υιοθέτησης της τεχνολογίας του υδρογόνου στο εγγύς μέλλον. Όμως, υπάρχουν ορισμένες άλλες πτυχές, όπως το υψηλότερο εύρος ευφλεκτότητας στον αέρα, το πολύ χαμηλό σημείο βρασμού και η ενέργεια ανάφλεξης, η έλλειψη υποδομών, η ακρίβεια παραγωγής πράσινου υδρογόνου, φέρνουν μεγάλες προκλήσεις για την ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας και την χρήση του ως καύσιμο στις τρέχουσες συνθήκες.

Το αέριο υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε παραδοσιακούς βενζινοκίνητους κινητήρες εσωτερικής καύσης με ελάχιστες μετατροπές. Ωστόσο, η χρήση των κυψελών PEMFC σε οχήματα, παρέχει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα. Με την καύση του αερίου υδρογόνου με οξυγόνο παράγεται νερό και ατμός. Ακόμη και η παραγωγή αερίου υδρογόνου μπορεί να γίνει χωρίς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η τρέχουσα τιμή του πράσινου υδρογόνου είναι περίπου 3 - 6.55 \$ ανά κιλό. Το γκρι υδρογόνο κοστίζει περίπου 1.80 \$/κιλό και το κόστος του μπλε υδρογόνου είναι περίπου 2.40 \$/κιλό. (DiChristopher, 2021) Ενώ, η μέση τιμή της βενζίνης και του πετρελαίου ανά τον κόσμο είναι περίπου 1.29 \$ ανά λίτρο και 1.35 \$ ανά λίτρο, αντίστοιχα. (*Diesel Prices around the World, 01-Apr-2019 | GlobalPetrolPrices.com, 2019, Gasoline Prices around the World, 20-May-2019 | GlobalPetrolPrices.com, 2019*)

Επίσης, η αποθήκευση και η μεταφορά του υδρογόνου αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα, καθώς η επένδυση σε νέες υποδομές είναι πολύ δαπανηρή. Θα πρέπει να εξεταστεί σε ποιον βαθμό μπορούν οι ήδη υπάρχουσες υποδομές που χρησιμοποιούνται σήμερα για την μεταφορά του φυσικού αερίου να χρησιμοποιηθούν για το υδρογόνο.

Για να γίνει το υδρογόνο αποδεκτό ως εναλλακτικό καύσιμο θα πρέπει να γίνει πρώτα οικονομικά εφικτό και ταυτόχρονα να παράγει ασήμαντα ποσά έως και καθόλου αέρια του θερμοκηπίου από την παραγωγή μέχρι και την τελική του χρήση. Για να πραγματοποιηθεί κάτι τέτοιο θα πρέπει να παράγεται και να

χρησιμοποιείται πράσινο υδρογόνο ή έστω συνδυασμός από κάποια άλλη τάξη χρώματος, που να μην είναι καθαρά γκρι. Δηλαδή, αν η παραγωγή υδρογόνου γίνεται με χρήση ορυκτών καυσίμων ταυτόχρονα παράγονται αέρια του θερμοκηπίου. Επίσης, ακόμα και κατά την ηλεκτρόλυση για να είναι πλήρως βιώσιμη μέθοδος παραγωγής υδρογόνου θα πρέπει η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται να παράγεται από ανανεώσιμες πηγές όπως ηλιακή, αιολική και υδροηλεκτρική ενέργεια. Έτσι, ο στόχος είναι η μείωση των εκπομπών επιβλαβών αερίων κατά τη διάρκεια όλης της παραγωγικής διαδικασίας και της τελικής χρήσης.

## Κεφάλαιο 6 - Βιβλιογραφία

1. Ringsgwandl, L. M., Schaffert, J., Brücken, N., Albus, R., & Görner, K. (2022). Current Legislative Framework for Green Hydrogen Production by Electrolysis Plants in Germany. *Energies*, 15(5), 1786.
2. IRENA (2020), Green Hydrogen: A guide to policy making, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi
3. Meyer, D. (2022, June 8). *Hydrogen production: exploring the various methods and climate impact*. 3Degrees. <https://3degreesinc.com/resources/hydrogen-production-exploring-various-methods-climate-impact/>
4. *Grey, blue, green – the many colours of hydrogen explained*. (2022, May 20). World Economic Forum. <https://www.weforum.org/agenda/2021/07/clean-energy-green-hydrogen/>
5. Timmerberg, S., Kaltschmitt, M., & Finkbeiner, M. (2020). Hydrogen and hydrogen-derived fuels through methane decomposition of natural gas – GHG emissions and costs. *Energy Conversion and Management: X*, 7, 100043. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100043>
6. Watson, A. Y., & Valberg, P. A. (2001). Carbon black and soot: two different substances. *AIHAJ : a journal for the science of occupational and environmental health and safety*, 62(2), 218–228. <https://doi.org/10.1080/15298660108984625>
7. Carmo, M. (2022, January). *Introduction to Liquid Alkaline Electrolysis* [Review of *Introduction to Liquid Alkaline Electrolysis*]. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/2-Intro-Liquid%20Alkaline%20Workshop.pdf>
8. Trattner, A., Höglinger, M., Macherhammer, M., & Sartory, M. (2021). Renewable Hydrogen: Modular Concepts from Production over Storage to the Consumer. *Chemie Ingenieur Technik*, 93(4), 706–716. <https://doi.org/10.1002/cite.202000197>
9. *Hydrogen production through electrolysis*. (n.d.). H2 Bulletin. <https://www.h2bulletin.com/knowledge/hydrogen-production-through-electrolysis/>
10. Bartels, J. R., Pate, M. B., & Olson, N. K. (2010). An economic survey of hydrogen production from conventional and alternative energy sources. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(16), 8371–8384. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.035>
11. Ishaq, H., Dincer, I., & Crawford, C. (2021). A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.149>

12. TARNAY, D. (1985). Hydrogen production at hydro-power plants. *International Journal of Hydrogen Energy*, 10(9), 577–584. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(85\)90032-1](https://doi.org/10.1016/0360-3199(85)90032-1)
13. National Geographic. (2022). *Hydroelectric Energy | National Geographic Society*. Education.nationalgeographic.org. <https://education.nationalgeographic.org/resource/hydroelectric-energy>
14. Ghazvini, M., Sadeghzadeh, M., Ahmadi, M. H., Moosavi, S., & Pourfayaz, F. (2019). Geothermal energy use in hydrogen production: A review. *International Journal of Energy Research*. <https://doi.org/10.1002/er.4778>
15. Agyekum, E. B., Nutakor, C., Agwa, A. M., & Kamel, S. (2022). A Critical Review of Renewable Hydrogen Production Methods: Factors Affecting Their Scale-Up and Its Role in Future Energy Generation. *Membranes*, 12(2), 173. <https://doi.org/10.3390/membranes12020173>
16. Pareek, A., Dom, R., Gupta, J., Chandran, J., Adepu, V., & Borse, P. H. (2020). Insights into renewable hydrogen energy: Recent advances and prospects. *Materials Science for Energy Technologies*, 3, 319–327. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.12.002>
17. Wang, M., Wang, G., Sun, Z., Zhang, Y., & Xu, D. (2019). Review of renewable energy-based hydrogen production processes for sustainable energy innovation. *Global Energy Interconnection*, 2(5), 436–443. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2019.11.019>
18. Uncovering the true cost of hydrogen production routes using life cycle monetisation. (2021). *Applied Energy*, 281, 115958. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115958>
19. Abdalla, A. M., Hossain, S., Nisfindy, O. B., Azad, A. T., Dawood, M., & Azad, A. K. (2018). Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review. *Energy Conversion and Management*, 165, 602–627. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.088>
20. Hosseini, S. E., & Wahid, M. A. (2016). Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 850–866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.112>
21. Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 597–611. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>
22. Rao, P. C., & Yoon, M. (2020). Potential Liquid-Organic Hydrogen Carrier (LOHC) Systems: A Review on Recent Progress. *Energies*, 13(22), 6040. <https://doi.org/10.3390/en13226040>

23. Niermann, M., Beckendorff, A., Kaltschmitt, M., & Bonhoff, K. (2019). Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) – Assessment based on chemical and economic properties. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(13), 6631–6654. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.199>
24. Hirscher, M., & Panella, B. (2007). Hydrogen storage in metal–organic frameworks. *Scripta Materialia*, 56(10), 809–812. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.01.005>
25. Ratnakar, R. R., Gupta, N., Zhang, K., van Doorne, C., Fesmire, J., Dindoruk, B., & Balakotaiah, V. (2021). Hydrogen supply chain and challenges in large-scale LH2 storage and transportation. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.025>
26. Currie, A. (2022, October 5). Breakingviews - Green hydrogen revolution risks dying of thirst. *Reuters*. <https://www.reuters.com/breakingviews/green-hydrogen-revolution-risks-dying-thirst-2022-10-05/>
27. Weichenhain, U. (2021). *Hydrogen transportation / The key to unlocking the clean hydrogen economy* [Review of *Hydrogen transportation / The key to unlocking the clean hydrogen economy*]. <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Transporting-the-fuel-of-the-future.html>
28. Tashie-Lewis, B. C., & Nnabuife, S. G. (2021). Hydrogen Production, Distribution, Storage and Power Conversion in a Hydrogen Economy - A Technology Review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 8, 100172. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.100172>
29. Ghavam, S., Vahdati, M., Wilson, I. A. G., & Styring, P. (2021). Sustainable Ammonia Production Processes. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.580808>
30. Jones, N. (2022, January 20). *From Fertilizer to Fuel: Can “Green” Ammonia Be a Climate Fix?* [Review of *From Fertilizer to Fuel: Can “Green” Ammonia Be a Climate Fix?*]. *Yale Environment* 360.
31. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. (2019). *Fuel Cells*. Energy.gov. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>
32. Guangul, F. M., & Chala, G. T. (2020). A Comparative Study between the Seven Types of Fuel Cells. *Applied Science and Engineering Progress*, 13(3). <https://doi.org/10.14416/j.asep.2020.04.007>
33. Haider, R., Wen, Y., Ma, Z.-F., Wilkinson, D. P., Zhang, L., Yuan, X., Song, S., & Zhang, J. (2021). High temperature proton exchange membrane fuel cells: progress in advanced materials and key technologies. *Chemical Society Reviews*, 50(2), 1138–1187. <https://doi.org/10.1039/d0cs00296h>



34. *HT-PEM fuel cell company Advent Technologies, Hyundai enter technology assessment, sales & development agreement.* (2022, April 7). Green Car Congress. Retrieved October 19, 2022, from <https://www.greencarcongress.com/2022/04/20220407-advent.html>
35. Staffell, I., Scamman, D., Velazquez Abad, A., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., Shah, N., & Ward, K. R. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 12(2), 463–491. <https://doi.org/10.1039/c8ee01157e>
36. U.S. Energy Information Administration. (2021, January 7). *Use of hydrogen - U.S. Energy Information Administration (EIA)*. Eia.gov. <https://www.eia.gov/energyexplained/hydrogen/use-of-hydrogen.php>
37. *Diesel prices around the world, 01-Apr-2019 | GlobalPetrolPrices.com.* (2019). GlobalPetrolPrices.com. [https://www.globalpetrolprices.com/diesel\\_prices/](https://www.globalpetrolprices.com/diesel_prices/)
38. *Gasoline prices around the world, 20-May-2019 | GlobalPetrolPrices.com.* (2019). GlobalPetrolPrices.com. [https://www.globalpetrolprices.com/gasoline\\_prices/](https://www.globalpetrolprices.com/gasoline_prices/)
39. DiChristopher, T. (2021, March 5). *Experts explain why green hydrogen costs have fallen and will keep falling.* Wwww.spglobal.com. <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/experts-explain-why-green-hydrogen-costs-have-fallen-and-will-keep-falling-63037203>
40. EU: hydrogen fuel stations 2021. (n.d.). Statista. <https://www.statista.com/statistics/859095/eu-hydrogen-number-of-fueling-stations/>
41. H2.LIVE: Hydrogen Stations in Germany & Europe. (n.d.). H2.LIVE. <https://h2.live/en/>
42. Kilgore, E. (2023, January 6). *First of 5K hydrogen trucks will be on German roads.* Wwww.hydrogenfuelnews.com.[https://www.hydrogenfuelnews.com/hydrogen-trucks-gp-joule/8556764/?utm\\_content=cmp-true](https://www.hydrogenfuelnews.com/hydrogen-trucks-gp-joule/8556764/?utm_content=cmp-true)



## Ακρωνύμια- Αρκτικόλεξα

CO<sub>2</sub>: carbon dioxide

DFB: dual fluidized bed gasification

TRLs (1-9): technology readiness levels (1-9)

SMR: Steam methane reforming

PSA: pressure swing absorption

AEL: Alkaline electrolysis

AEMEL: Anion exchange membrane electrolysis

PEM: proton exchange membrane

PEMEL: Polymer electrolyte membrane electrolysis

HTEL: High-temperature electrolysis

CNs: carbon nanoparticles

MWNT: multi-walled nanotubes

SWNT: single-walled nanotubes

LOHC: Liquid organic hydrogen carrier

MOF: Metal-organic frameworks MOF

LH<sub>2</sub>: liquid hydrogen

DMFC: Direct Methanol Fuel Cell

AFC: Alkaline Fuel Cell

RFC: Reversible Fuel Cell

PAFC: Phosphoric acid fuel cells

MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell

HT-PEMFC: High temperature proton exchange membrane fuel cell

SOFC: Solid oxide fuel cell

CHP: Combined heat and power