



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**Τεχνο-οικονομική και Περιβαλλοντική Αποτίμηση της Χρήσης Πράσινου  
Υδρογόνου (H<sub>2</sub>) στην Αυτοκινητοβιομηχανία**

**Παναγιωτάς Τσαμπίκος**

**Επιβλέπων: Καθηγητής Κονσολάκης Μιχαήλ**



**TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE**  
**SCHOOL OF PRODUCTION ENGINEERING & MANAGEMENT**

**Techno-economic and Environmental Assessment of the Use of Green  
Hydrogen (H<sub>2</sub>) in the Automotive Industry**

**Panagiotas Tsampikos**

**Supervisor: Prof. Konsolakis Michalis**

*Chania, July 2023*

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους στάθηκαν αρωγοί κατά τη διάρκεια όλων των φοιτητικών μου χρόνων αλλά και της διπλωματικής μου εργασίας.

Πρώτα και κύρια, ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κονσολάκη Μιχαήλ, που καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας με καθοδήγησε και μου προσέφερε χρήσιμες συμβουλές, δίνοντας μου την ευκαιρία να μελετήσω ένα ενδιαφέρον αντικείμενο με τη βοήθεια και τις γνώσεις του.

Τέλος, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου αλλά και στους φίλους μου, για την βοήθεια, την υποστήριξη, και την εμπιστοσύνη τους σε όλο το διάστημα των σπουδών μου.

*Παναγιωτάς Τσαμπίκος*

*Χανιά, Ιούλιος 2023*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την τεχνο-οικονομική και περιβαλλοντική ανάλυση της χρήσης πράσινου υδρογόνου στην αυτοκινητοβιομηχανία. Το πράσινο υδρογόνο αποτελεί πλέον μια υποσχόμενη εναλλακτική πηγή καυσίμου που πρόκειται να περιορίσει ή ακόμη και να αντικαταστήσει τα συμβατικά καύσιμα, και κατά συνέπεια να εξαλείψει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Έτσι αναμένεται να επιτευχθεί μείωση του αντίκτυπου της αυτοκινητοβιομηχανίας στο πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής.

Η περιβαλλοντική ανάλυση εστιάζει στα οικολογικά πλεονεκτήματα που αποφέρει η χρήση του πράσινου υδρογόνου, όπως ο εκμηδενισμός των εκπομπών CO<sub>2</sub> και άλλων επιβλαβών αερίων. Επιπλέον, αναλύεται η διαδικασία παραγωγής πράσινου υδρογόνου με τη συμβολή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και έπειτα αναφέρονται τα αποτελέσματα της επίδρασης του πράσινου υδρογόνου στην ποιότητα του αέρα, στην μείωση της ηχορύπανσης και στην αειφορία της αυτοκινητοβιομηχανίας.

Η τεχνο-οικονομική ανάλυση εστιάζει στην αξιολόγηση της βιωσιμότητας της τεχνολογίας του πράσινου υδρογόνου στην αυτοκινητοβιομηχανία. Αναλύονται οι παραγωγικές δυνατότητες και οι απαραίτητες υποδομές αποθήκευσης και διανομής του πράσινου υδρογόνου υπό ορισμένες συνθήκες. Επιπλέον, εκτιμάται ο ανταγωνισμός της τεχνολογίας πράσινου υδρογόνου σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα και άλλες εναλλακτικές επιλογές.

Μέσω της τεχνο-οικονομικής και περιβαλλοντικής ανάλυσης, η εργασία παρέχει μια γενική εικόνα των προοπτικών αλλά και των ιδιαίτερων προκλήσεων που καλούνται να διαχειριστούν οι αρμόδιοι φορείς ώστε να αξιοποιηθεί η τεχνολογία του πράσινου υδρογόνου κατά τον βέλτιστο τρόπο στην αυτοκινητοβιομηχανία, προωθώντας έτσι τη μετάβαση σε πιο αειφόρες και καθαρές ενεργειακές λύσεις.

## ABSTRACT

This thesis deals with the techno-economic and environmental analysis of the use of green hydrogen in the automotive industry. Green hydrogen is now a promising alternative fuel source that is going to limit or even replace conventional fuels, and consequently eliminate greenhouse gas emissions.

The environmental analysis focuses on the ecological advantages of using green hydrogen, such as the elimination of CO<sub>2</sub> emissions and other harmful gases. In addition, the process of green hydrogen production with the contribution of renewable energy sources is analyzed, and then the results of the effect of green hydrogen on air quality, noise pollution reduction and aerodynamics of the automotive industry are reported.

The techno-economic analysis focuses on assessing the viability of green hydrogen technology in the automotive industry. The production alternatives and the necessary infrastructures for the storage and distribution of green hydrogen under certain conditions are analyzed. In addition, the competition of green hydrogen technology against conventional fuels and other alternatives is assessed.

Through techno-economic and environmental analysis, the present diploma thesis provides an overview of the prospects and challenges faced by relevant sectors to successfully exploit the use of green hydrogen technology in the automotive industry, thus promoting the transition to more sustainable and clean energy solutions.

## **ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ**

- **ΑΠΕ: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας**
- **E&A: Έρευνα και Ανάπτυξη**
- **PEM: Proton Exchange Membrane**
- **AWE: Alkaline Water Electrolysis**
- **SOEC: Solid Oxide Electrolyzer Cell**
- **TRL: Technology Readiness Level**
- **CNG: Compressed Natural Gas**
- **EV: Electric Vehicle**
- **FC : Fuel Cell**
- **FCEV: Fuel Cell Electric Vehicles**
- **HICEV: Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicle**
- **HEV: Hybrid Electric Vehicles**
- **HDPE: High-Density Poly Ethylene**
- **CAGR: Compound Annual Growth Rate**
- **FCH JU: Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking**

## Πίνακας Περιεχομένων

### Περιεχόμενα

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	3
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	4
<b>ABSTRACT</b> .....	5
<b>ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ</b> .....	6
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	9
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ</b> .....	11
1.1 Η προσφορά και οι ιδιαιτερότητες της παγκόσμιας αυτοκινητοβιομηχανίας .....	11
1.2 Τι επικρατεί στους τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας και των μεταφορών .....	13
1.3 Μετάβαση της αυτοκινητοβιομηχανίας προς πιο πράσινες τεχνολογίες .....	14
1.4 Παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα και μετάβαση στο πράσινο υδρογόνο .....	16
1.5 Πληροφορίες και προοπτικές για το υδρογόνο .....	19
1.6 Στόχοι και πολιτικές για το υδρογόνο .....	20
<b>Κεφάλαιο 2 - Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΠΡΑΣΙΝΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ</b> .....	23
2.1 Το υδρογόνο ως ένας υποσχόμενος φορέας ενέργειας .....	23
2.2 Επισκόπηση της παρούσας υποδομής για το πράσινο υδρογόνο .....	26
2.3 Παραγωγή πράσινου υδρογόνου με ηλεκτρόλυση .....	28
2.3.1 Αλκαλική Ηλεκτρόλυση Νερού (AWE) .....	32
2.3.1 Μembrάνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) .....	35
2.3.1 Κυψέλες ηλεκτρόλυσης στερεού οξειδίου υψηλής θερμοκρασίας (SOEC) .....	38
2.4 Σύγκριση των μεθόδων ηλεκτρόλυσης ως προς το κόστος, την καθαρότητα παραγόμενου υδρογόνου και την ευελιξία κλίμακας .....	42
2.5 Ανάδειξη του οφέλους στροφής στο πράσινο υδρογόνο και μεταβατικές λύσεις .....	43
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΟΧΗΜΑΤΑ ΠΡΑΣΙΝΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ</b> .....	45
3.1 Χαρακτηριστικά οχημάτων πράσινου υδρογόνου .....	45
3.2 Τύποι οχημάτων πράσινου υδρογόνου της αυτοκινητοβιομηχανίας .....	47
3.3 Σύγκριση αυτοκινήτων υδρογόνου με συμβατικά και ηλεκτρικά .....	49
3.3.1 Κύρια πλεονεκτήματα των οχημάτων κυψελών καυσίμου υδρογόνου συγκριτικά με τα συμβατικά οχήματα .....	49
3.3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά και σύγκριση οχημάτων κυψελών καυσίμου υδρογόνου με ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας .....	51
3.4 Κυψέλες καυσίμου .....	53

3.4.1 Κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC).....	53
3.4.2 Κυψέλες στερεού οξειδίου υψηλής θερμοκρασίας (SOFCs) .....	55
3.5 Ποιες οι κύριες διαφορές μεταξύ κυψελών καυσίμου – μπαταριών;.....	57
3.6 Συμπέρασμα.....	59
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΝΟΜΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ</b> .....	60
4.1 Δυνατότητες αποθήκευσης υδρογόνου.....	60
4.2 Μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου .....	61
4.2.1 Αποθήκευση συμπιεσμένου H <sub>2</sub> .....	62
4.2.2 Αποθήκευση υγρού υδρογόνου .....	64
4.2.3 Κρυο-συμπιεσμένη αποθήκευση H <sub>2</sub> .....	65
4.2.4 Αποθήκευση με βάση το υλικό .....	66
4.3 Διανομή υδρογόνου.....	69
4.3.1 Τροφοδοσία της κοινωνίας με υδρογόνο .....	69
4.4 Συμπέρασμα.....	70
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΠΡΑΣΙΝΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ</b> .....	71
5.1 Η βιωσιμότητα πράσινου υδρογόνου .....	71
5.2 Η οικονομία του υδρογόνου στην Ευρώπη .....	72
5.3 Η οικονομία του υδρογόνου παγκοσμίως .....	75
5.4 Οι δυνατότητες στην διανομή και η διαφοροποίηση στο κόστος.....	78
<b>Συμπεράσματα</b> .....	79
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	81



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συνεχής ελάττωση των ενεργειακών αποθεμάτων από συμβατικές πηγές καθώς και η υποβάθμιση ποιότητας του περιβάλλοντος αποτελούν δύο από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα τα τελευταία χρόνια. Ειδικότερα, στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας αλλά και σε αυτόν των μεταφορών, η δραστηριότητα έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία έτη, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας. Παράλληλα, η χρήση των ορυκτών καυσίμων που αποσκοπεί στην κάλυψη των ενεργειακών αυτών απαιτήσεων, έχει προκαλέσει ιδιαίτερα προβλήματα στο περιβάλλον αφού έχει ως αποτέλεσμα την έκλυση αερίων και συνεπώς συμβάλει στην όξυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Μακροπρόθεσμα, τα γεγονότα αυτά πρόκειται να οδηγήσουν σε δυσνόητες μεταβολές τόσο στις υπάρχουσες ισορροπίες των οικοσυστημάτων σε παγκοσμίως, όσο και σε ανατροπές των κοινωνικών δομών παγκοσμίως. Για τους παραπάνω λόγους λοιπόν, καθίσταται απαραίτητη η εύρεση εναλλακτικών, αποτελεσματικότερων και ιδιαίτερα φιλικών προς το περιβάλλον μεθόδων παραγωγής ενέργειας, αλλά και ο πιο συνετός τρόπος διαχείρισης των υπαρχόντων αποθεμάτων. Αναγκαία είναι επίσης η εύρεση αποδεκτών και βιώσιμων λύσεων στην όλο και αυξανόμενη ρύπανση του περιβάλλοντος, ιδιαίτερα στις σημερινές συνθήκες έντονης οικονομικής και περιβαλλοντικής κρίσης.

Ένα από τα βασικότερα θεμέλια της ανάπτυξης αλλά και της εξέλιξης της κοινωνίας καθίσταται η ενέργεια. Η τεχνολογική πρόοδος, η αύξηση του ανθρώπινου πληθυσμού αλλά και η άνοδος στο προσδόκιμο όριο ζωής, οφείλονται στην ανακάλυψη και τη χρήση νέων πηγών ενέργειας. Ο όρος της εξέλιξης βασίζεται ιστορικά στην μετάβαση από το ξύλο στον άνθρακα (βιομηχανική επανάσταση) αλλά και στην μετάβαση από τον άνθρακα στο πετρέλαιο. Ιδίως η τελευταία, βασισμένη σε υγρά πλέον καύσιμα έναντι των στερεών που χρησιμοποιούνταν έως τότε, συνέβαλε στη ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη στον βιομηχανικό και υγειονομικό τομέα. Η ενέργεια που καταναλώνεται παγκοσμίως από περίπου 7.5 δισεκατομμύρια ανθρώπους, αντιστοιχεί σε 556.63 Exajoules (Ej), δηλαδή 16 Terawatts (TW). Βάση των δεδομένων αυτών, αναμένεται στα επόμενα 50 έτη τα περίπου 9 δισεκατομμύρια

ανθρώπων να καταναλώνουν ενέργεια που θα αγγίζει την τιμή των 30 TW. Ωστόσο, το 87% της πρωτογενούς ενέργειας που αξιοποιεί η κοινωνία για να εξυπηρετήσει τις ανάγκες της, βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα, πράγμα που προκαλεί ανησυχία καθώς τα αποθέματα τους βρίσκονται σε πεπερασμένες ποσότητες και συνεπώς δεν θα ανταπεξέλθουν στην αύξηση αυτή. Πιο συγκεκριμένα, για ρυθμούς κατανάλωσης όπως αυτοί που καταγράφονται τα τελευταία 5 χρόνια, τα αποθέματα του άνθρακα εκτιμώνται να υπάρχουν για ακόμη περίπου 133 έτη.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τη συμβολή του υδρογόνου στην απαιτούμενη εξοικονόμηση ενέργειας στο τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας. Τα παρακάτω κεφάλαια αναφέρονται στον κύκλο ζωής του πράσινου υδρογόνου και σε ορισμένα τεχνο-οικονομικά ζητήματα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

### 1.1 Η προσφορά και οι ιδιαιτερότητες της παγκόσμιας αυτοκινητοβιομηχανίας

Ο τομέας της αυτοκινητοβιομηχανίας αποτελεί έναν ιδιαίτερο παράγοντα στον παγκόσμιο βιομηχανικό κλάδο. Πρόκειται για μια κινητήρια δύναμη με διασυνοριακό χαρακτήρα, η οποία συμβάλει στην ανάπτυξη των χωρών που δραστηριοποιείται, ενώ αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους επενδυτές στον τομέα της έρευνας και της ανάπτυξης. Σχετικά με τον τομέα της συνολικής απασχόλησης στην Ευρωπαϊκή Ένωση, το ποσοστό των εργαζομένων, που δραστηριοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία, ανέρχεται σε 6,1%. Πρόκειται για φορείς που εμπλέκονται στο σχεδιασμό, την κατασκευή, τη διανομή και την πώληση αυτοκινήτων και συναφών προϊόντων (design, logistics, πωλήσεις κ.ά), και καλύπτουν περίπου 13,8 εκατομμύρια θέσεις εργασίας στην ΕΕ, ενώ στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής πρόκειται για περίπου 2,174,600 θέσεις[1].

Σχετικά με την αγορά του κλάδου αυτού, κρίνεται υπό ανάπτυξη, καθώς από 2,86 τρισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ που κοστολογήθηκε το 2021, πρόκειται να ανέλθει σε 2.95 τρισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ στο τέλος του 2022[2]. Μάλιστα έπεται διάρκεια τόσο στην ανάπτυξη όσο και στην εξέλιξη του κλάδου, καθώς έως το 2030, και μάλιστα υπό τις ιδιαιτερότητες της αγοράς λόγω της μεταβατικής περιόδου στην ηλεκτροκίνηση, αναμένεται η παγκόσμια αυτοκινητοβιομηχανία να αυξηθεί σε σχεδόν 9 τρισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ έως το 2030 είναι το σύνθετο ετήσιο ποσοστό αύξησης μιας ποσότητας. Αυτό οφείλεται κυρίως στην Κίνα, καθώς η ίδια αντιπροσωπεύει ποσοστό μεγαλύτερο από 33% της ετήσιας παγκόσμιας παραγωγής οχημάτων[3].

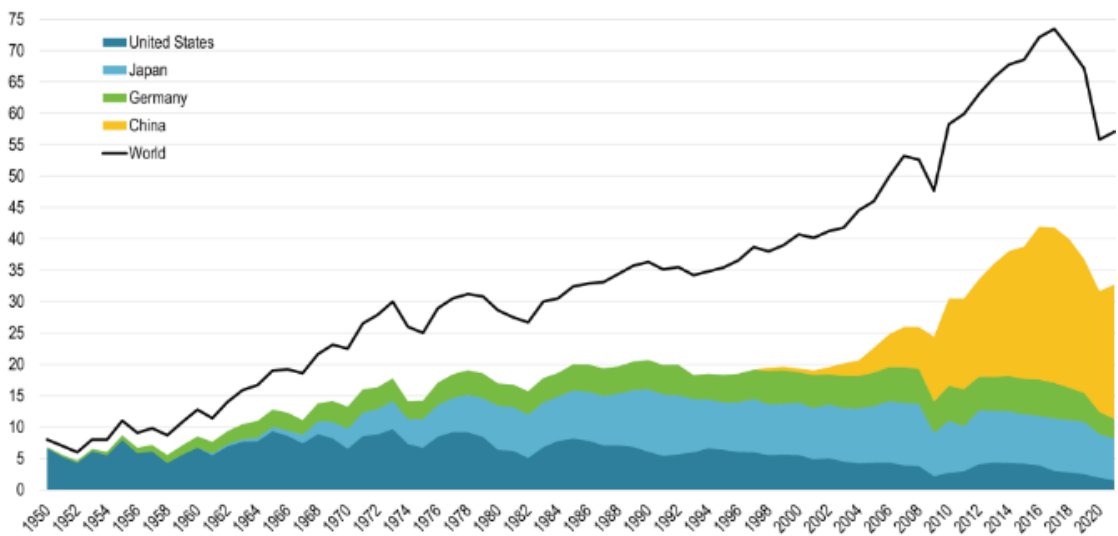


Figure 1 Κύριες Χώρες Παραγωγής Αυτοκινήτων 1950-2022[4]

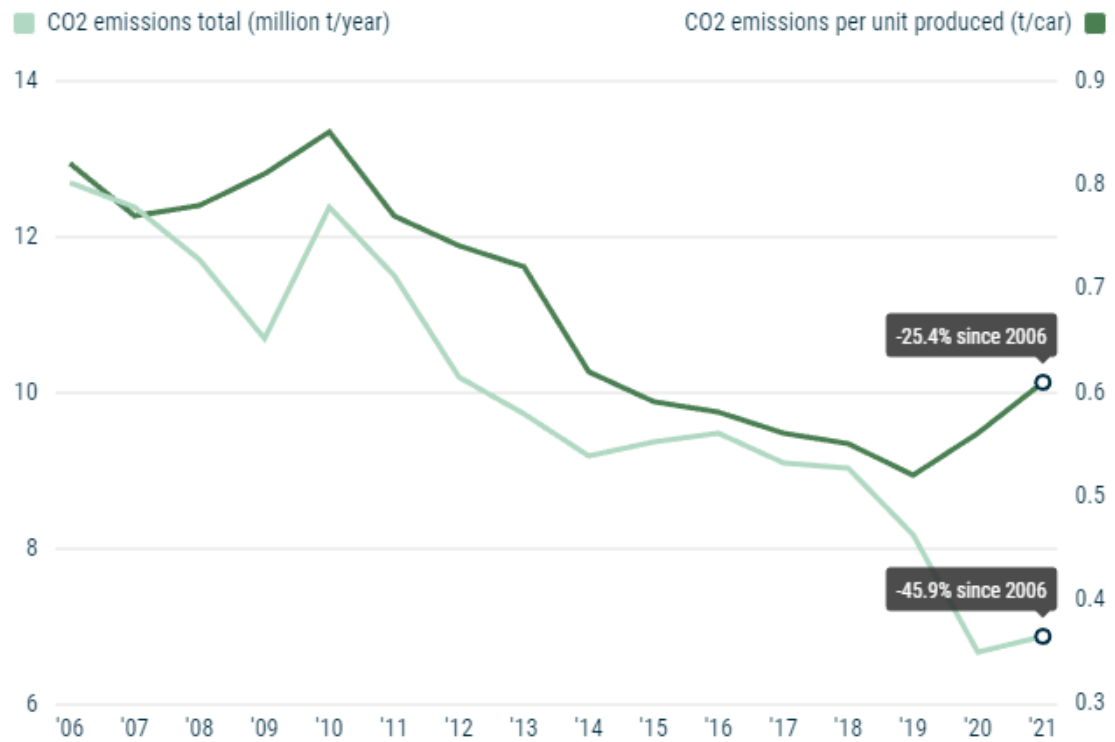


Figure 2 Μείωση των εκπομπών CO2 στον τομέα παραγωγής της ευρωπαϊκής αυτοκινητοβιομηχανίας  
το διάστημα 2006-2021 [5]

## 1.2 Τι επικρατεί στους τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας και των μεταφορών

Στους τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας και των μεταφορών, επικρατεί μια στροφή προς καθαρότερες και πιο βιώσιμες πηγές ενέργειας. Η μετάβαση στα ηλεκτρικά οχήματα (EV) έχει αποκτήσει σημαντική δυναμική, με τις αυτοκινητοβιομηχανίες να επενδύουν σε μεγάλο βαθμό σε φιλικότερες προς το περιβάλλον τεχνολογίες. Οι παγκόσμιες κυβερνήσεις εφαρμόζουν αυστηρότερους κανονισμούς για τις εκπομπές ρύπων, προσφέροντας κίνητρα για την προτίμηση ηλεκτρικών οχημάτων και εναλλακτικών καυσίμων όπως είναι το υδρογόνο. Επιπλέον, οι εξελίξεις στον τομέα των μπαταριών, την υποδομή φόρτισης και στην αυτονομία, συνέβαλαν σημαντικά στην ανάπτυξη της βιωσιμότητας και στην ελκυστικότητα της ηλεκτροκίνησης. Παράλληλα με την άνοδο των ηλεκτρικών οχημάτων, δίνεται αυξανόμενη έμφαση στην ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις μεταφορές, γεγονός που αντιστοιχεί στην ανάπτυξη σταθμών φόρτισης με ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές, καθώς και οχημάτων που λειτουργούν με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου.



Figure 3 Μέγεθος αγοράς μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων 2021-2030 [6]

Συνεπώς, οι τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας και των μεταφορών στρέφονται προς καθαρότερες, πιο πράσινες λύσεις για ένα βιώσιμο μέλλον. Επί του παρόντος, τα ορυκτά καύσιμα κυριαρχούν στον τομέα των μεταφορών, αντιπροσωπεύοντας το 96% της ενεργειακής ζήτησης, με τα προϊόντα πετρελαίου να αποτελούν το 92% αυτής της ζήτησης. Αυτό αντιπροσωπεύει 2890 Mtoe και περίπου το 20% της παγκόσμιας

ζήτησης πρωτογενούς ενέργειας. Συγκεκριμένα, τα επιβατικά οχήματα αντιπροσώπευαν το 46% της ενεργειακής ζήτησης, που ισοδυναμεί με 1323 Mtoe το 2018[7]. Με τη συνεχή αύξηση των μεταφορών και της κατανάλωσης καυσίμου, ο κλάδος διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη μετάβαση σε καθαρότερη ενέργεια και στη μείωση των εκπομπών. Ως εκ τούτου, είναι εμφανής η άμεση ανάγκη για μια νέα ενεργειακή λύση στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας. Το υδρογόνο πρόκειται να διαδραματίσει ζωτικό ρόλο στην εξάλειψη των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ιδιαίτερα στους τομείς των μεταφορών και της αυτοκινητοβιομηχανίας. Ωστόσο, η υπέρβαση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα στην παραγωγή υδρογόνου και η αντιμετώπιση παραγόντων όπως το κόστος, η προσφορά και η ασφάλεια αποτελούν βασικές προκλήσεις για να γίνει μια βιώσιμη εναλλακτική λύση στα υπάρχοντα καύσιμα.

### 1.3 Μετάβαση της αυτοκινητοβιομηχανίας προς πιο πράσινες τεχνολογίες.

Η αυτοκινητοβιομηχανία βρίσκεται υπό μια σημαντική μετάβαση προς τεχνολογίες που πρόκειται να μειώσουν ή ακόμη και να εξαλείψουν το πρόβλημα που σχετίζεται με τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, και της αντιμετώπισης των προκλήσεων της κλιματικής αλλαγής κατά επέκταση. Αυτή η μετάβαση βασίζεται στη λήψη διάφορων πρωτοβουλιών, συμπεριλαμβανομένης της στροφής στην υιοθέτηση τεχνολογιών όπως τα ηλεκτρικά οχήματα που τροφοδοτούνται από μπαταρίες ή κυψέλες καυσίμου, την ανάπτυξη υβριδικών οχημάτων που συνδυάζουν κινητήρες εσωτερικής καύσης με ηλεκτρικούς κινητήρες, καθώς και την εισαγωγή οχημάτων κυψελών καυσίμου υδρογόνου.



Figure 4 Η μετάβαση της αυτοκινητοβιομηχανίας σε οχήματα μηδενικών εκπομπών ρύπων [8]

Η μεγαλύτερη πρόκληση της ηλεκτροκίνησης βρίσκεται στον τομέα των μπαταριών. Ωστόσο έχει σημειωθεί αξιοσημείωτη τεχνολογική πρόοδος, έχοντας θετικό αντίκτυπο σε τομείς όπως είναι αυτός της αυτονομίας αλλά και της απόδοσης των ηλεκτρικών οχημάτων. Τέτοιου είδους εξελίξεις, αναδεικνύουν ακόμη περισσότερο τα οφέλη της ηλεκτροκίνησης και κατά συνέπεια κάνουν την κατηγορία αυτή ακόμη πιο ελκυστική ως προς τον καταναλωτή. Επιπρόσθετα, για την επίτευξη της ομαλής μετάβασης στην τεχνολογία της ηλεκτροκίνησης, υπάρχουν διαθέσιμα τα υβριδικά οχήματα που συνδυάζουν τον κινητήρα εσωτερικής καύσης με έναν ηλεκτροκινητήρα, επιτυγχάνοντας μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών. Εκτός από τα εναλλακτικά συστήματα πρόωσης που χρησιμοποιεί η αυτοκινητοβιομηχανία, υιοθετεί επίσης την ενσωμάτωση βιώσιμων υλικών και διαδικασιών κατασκευής αποσκοπώντας στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του οχήματος[9]. Επιπλέον, η ενσωμάτωση αυτόνομων τεχνολογιών βελτιστοποιεί την κατανάλωση καυσίμου και βελτιώνει τη συνολική απόδοση κατά τη διάρκεια της μεταφοράς. Συλλογικά, αυτές οι προσπάθειες σηματοδοτούν τη δέσμευση της βιομηχανίας για υιοθέτηση πιο πράσινων τεχνολογιών, με στόχο τη δημιουργία βιώσιμων και φιλικών συνθηκών προς το περιβάλλον. Καθώς λοιπόν οι κυβερνήσεις, οι καταναλωτές και τα ενδιαφερόμενα μέρη του κλάδου δίνουν προτεραιότητα στη βιωσιμότητα, ο ρυθμός αυτής της μετάβασης αναμένεται να επιταχυνθεί σημαντικά, διαμορφώνοντας το μέλλον της αυτοκινητοβιομηχανίας.

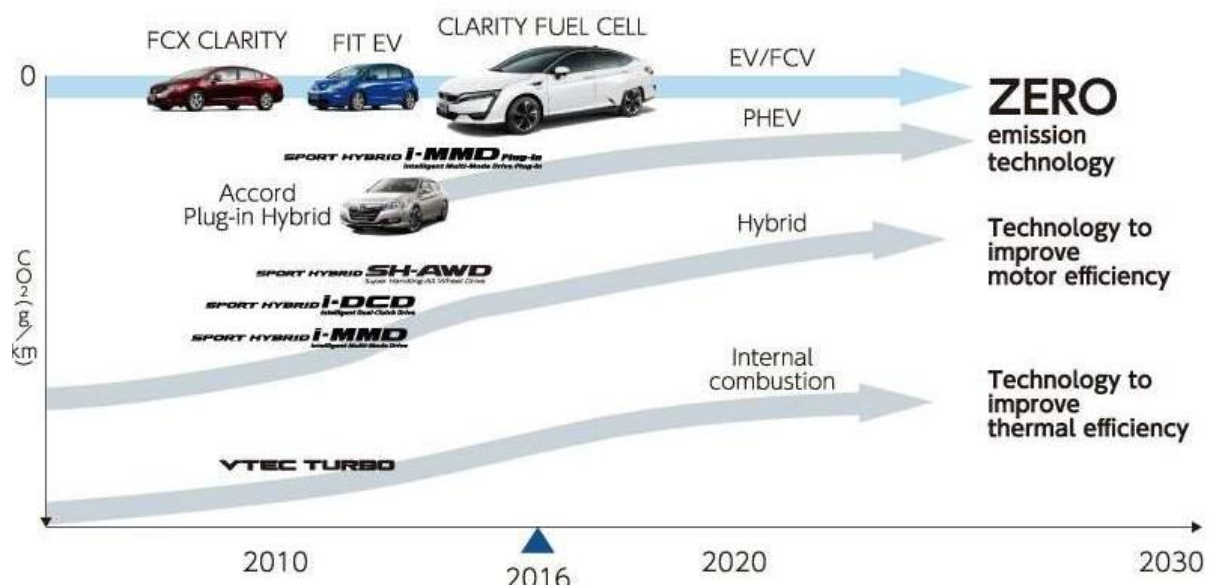


Figure 4 Όραμα αυτοκινητοβιομηχανίας για την επόμενη γενιά καθαρών αυτοκινήτων [10]

#### 1.4 Παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα και μετάβαση στο πράσινο υδρογόνο

Το παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα είναι ένας πολύπλοκος συνδυασμός πηγών ενέργειας που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης στον κόσμο και επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες όπως ο πληθυσμός, η οικονομική ανάπτυξη, οι βιομηχανικές δραστηριότητες και οι τεχνολογικές εξελίξεις. Η πλειονότητα της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας βασίζεται κατά κύριο λόγο στα ορυκτά καύσιμα, συμπεριλαμβανομένου του άνθρακα, του πετρελαίου και του φυσικού αερίου. Αυτές οι πηγές ενέργειας εξακολουθούν να διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην τροφοδοσία των αυτοκινητοβιομηχανιών, των μεταφορών καθώς και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Αναφορικά με το παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα, η καύση των ορυκτών καυσίμων που αποσκοπεί στη παραγωγή ενέργειας, αντικατοπτρίζεται από τα 3/4 των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στον πλανήτη, αγνοώντας μάλιστα τις επιπτώσεις του φαινομένου αυτού. Ιδιαίτερως σημαντική λοιπόν, κρίνεται η μετάβαση σε ένα ανανεωμένο ενεργειακό μείγμα όπου οι πηγές ενέργειας χαμηλών εκπομπών άνθρακα θα κυριαρχούν και μάλιστα όσο το δυνατόν συντομότερα. Σχετικά με την ενέργεια που καταναλώνεται παγκοσμίως από περίπου 7.5 δισεκατομμύρια ανθρώπους, αντιστοιχεί



σε 556.63 Exajoules (Ej), δηλαδή 16 Terawatts (TW). Βάση των δεδομένων αυτών, αναμένεται στα επόμενα 50 έτη τα περίπου 9 δισεκατομμύρια ανθρώπων να καταναλώνουν ενέργεια που θα αγγίζει την τιμή των 30 TW[11]. Ωστόσο, περίπου το 88% της πρωτογενούς ενέργειας που αξιοποιεί η κοινωνία για να εξυπηρετήσει τις ανάγκες της, βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα, πράγμα που προκαλεί ανησυχία καθώς τα αποθέματα τους βρίσκονται σε πεπερασμένες ποσότητες και συνεπώς δεν θα ανταπεξέλθουν στην αύξηση αυτή. Πιο συγκεκριμένα, για ρυθμούς κατανάλωσης όπως αυτοί που καταγράφονται τα τελευταία 5 χρόνια, τα αποθέματα του άνθρακα εκτιμώνται να υπάρχουν για ακόμη περίπου 133 έτη[12].

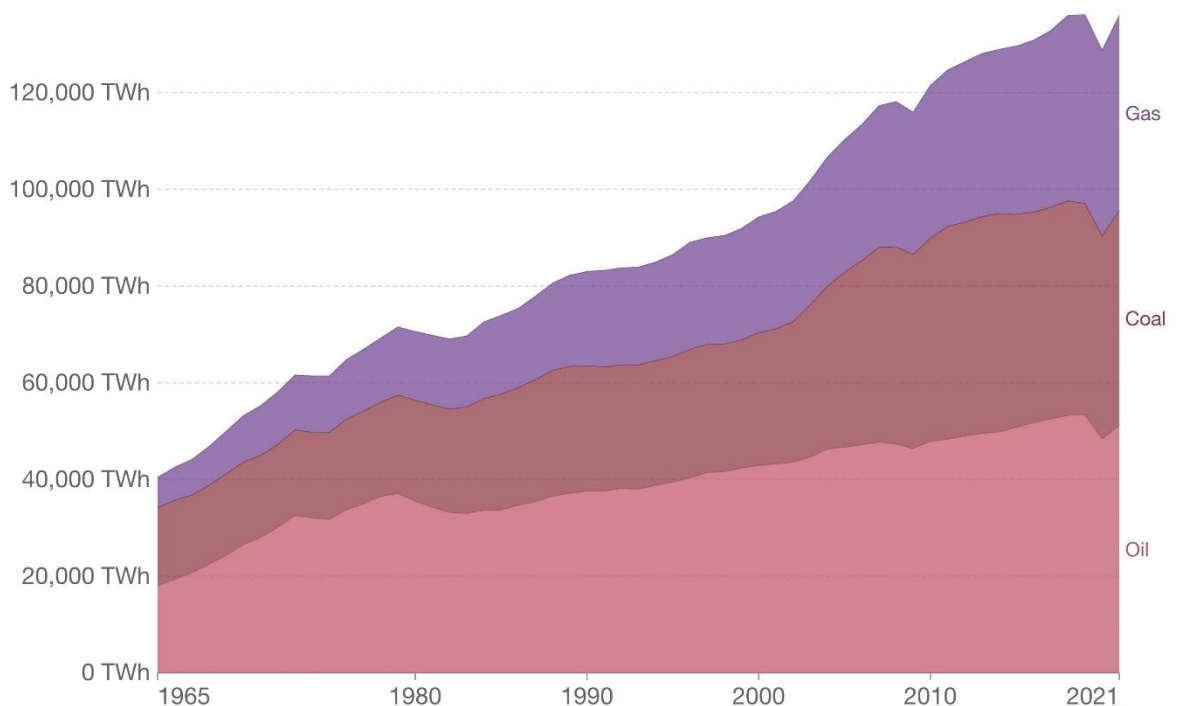


Figure 5 Κατανάλωση ορυκτών καυσίμων ανά τύπο καυσίμου [12]

Ωστόσο, πλέον δίνεται υψηλή βαρύτητα στη διαφοροποίηση του ενεργειακού μείγματος και κατά συνέπεια στη μείωση της εκμετάλλευσης ορυκτών πόρων, λόγω των ανησυχιών για την όξυνση της κλιματικής αλλαγής καθώς και της ανάγκης για βιώσιμη ανάπτυξη. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική, η υδροηλεκτρική και η γεωθερμία, έχουν σημειώσει σημαντική ανάπτυξη και καταλαμβάνουν όλο και περισσότερο μέρος στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα.

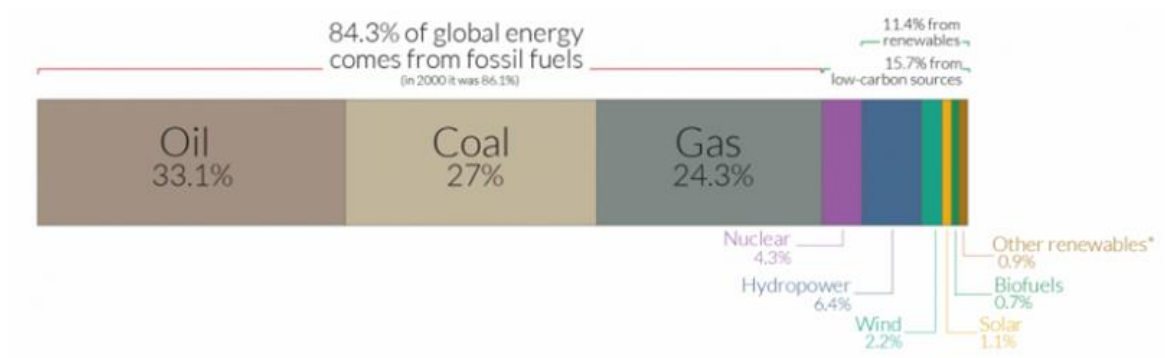


Figure 6 Παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά πηγή [13]

Το πράσινο υδρογόνο αποτελεί ιδιαίτερο παράγοντα στην ενεργειακή μετάβαση καθώς τόσο οι ιδιότητες όσο και οι απαιτήσεις του για τη διάσπαση και την χρήση του ως καύσιμο έχουν έντονο πράσινο χαρακτήρα. Σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής υδρογόνου που βασίζονται στα ορυκτά καύσιμα, η πράσινη παραγωγή υδρογόνου παράγει μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ενώ η ευελιξία του στους τομείς της αποθήκευσης και της μεταφοράς το καθιστά ακόμη πιο ελκυστική ενεργειακή λύση. Ωστόσο, η ευρεία διάδοση της τεχνολογίας του υδρογόνου αντιμετωπίζει αρκετές προκλήσεις καθώς η τρέχουσα παραγωγή πράσινου υδρογόνου είναι περιορισμένη και η κλιμάκωση της παραγωγής για την κάλυψη των παγκόσμιων ενεργειακών απαιτήσεων απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Συνεπώς, απαιτείται περαιτέρω έρευνα, τεχνολογικές εξελίξεις και υποστηρικτικές πολιτικές για να ξεπεραστούν οι προκλήσεις και να διακριθεί το πλήρες δυναμικό του πράσινου υδρογόνου στην παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση.

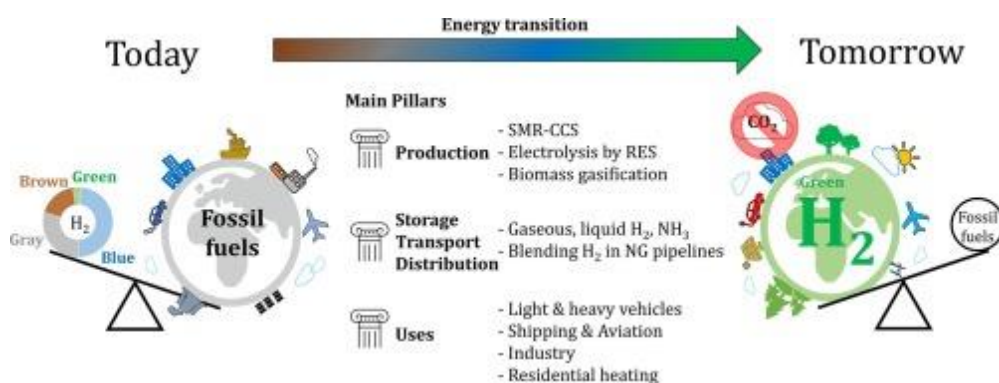


Figure 7 Μετάβαση στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα [14]

## 1.5 Πληροφορίες και προοπτικές για το υδρογόνο

Το υδρογόνο είναι ο πιο άφθονος πόρος στη Γη, αλλά σπάνιες είναι οι περιπτώσεις που εμφανίζεται σαν καθαρή μορφή ύλης. Συνεπώς, για να χρησιμοποιηθεί καθαρό υδρογόνο χρειάζεται αρχικά να εξαχθεί από την ένωση που βρίσκεται. Εφόσον επιτευχθεί αυτό, πρόκειται πλέον για παραγωγή μιας ισχυρής αλλά και καθαρής πηγής ενέργειας. Το υδρογόνο που υφίσταται δεσμευμένο στο νερό καθώς και σε διάφορες άλλες οργανικές ενώσεις αντικατοπτρίζει περισσότερο από το 70% της γήινης επιφάνειας. Πρόκειται για ένα άοσμο, άχρωμο και άγευστο χημικό στοιχείο σε κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος, το οποίο είτε ως πρώτη ύλη σε βιομηχανικές δραστηριότητες είτε ως καύσιμο, θα είναι ικανό να καλύψει το μεγαλύτερο μέρος των δραστηριοτήτων της κοινωνίας. Λόγω της ελαφρότητας του το υδρογόνο, δεν αποτελεί περισσότερο από το 1% της συνολικής μάζας της γης. Παρόλο που όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί αλλά και τα ορυκτά περιέχουν ενώσεις του σε πολύ μεγάλο βαθμό, σπάνιες είναι οι φορές που συναντάται σε καθαρή αέρια μορφή. Ωστόσο, στη μορφή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες καυσίμου για την τροφοδοσία κινητήρων στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας. Αναφορικά με τη μάζα του, το αέριο υδρογόνο είναι αρκετά ελαφρύτερο από τον αέρα και πιο συγκεκριμένα, στους 0°C το υδρογόνο έχει πυκνότητα 0.0899 kg/m<sup>3</sup>, δηλαδή περίπου δέκα φορές μικρότερη από τη πυκνότητα του αέρα. Αυτός είναι και ο λόγος που πρέπει αρχικά να συμπιεστεί σε έως και 700Atm για να επιτευχθεί επαρκής πυκνότητα καυσίμου για την τροφοδοσία του οχήματος, ενώ ως καύσιμο είναι ιδιαίτερος εύφλεκτο και εκρηκτικό, κάτι που κρίνει απαραίτητη τη χρήση μιας εξαιρετικά ισχυρής δεξαμενής για την αποθήκευσή του. Γίνεται αντιληπτό λοιπόν πως το υδρογόνο είναι μια δευτερεύουσα πηγή ενέργειας και συνεπώς απαιτείται μια συμφέρουσα διαδικασία εξόρυξης του από μια κύρια πηγή ενέργειας[15].



Figure 8 Διάγραμμα ροής ενέργειας υδρογόνου [16]

Το αποτύπωμα του άνθρακα για το καύσιμο αυτό, καθορίζεται από τον τρόπο παραγωγής του, και συνεπώς, η ιδανική λύση στο περιβαλλοντικό πρόβλημα, δίνεται στη περίπτωση που η παραγωγή βασίζεται εξ ολοκλήρου σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, το προϊόν της οποίας ονομάζεται πράσινο υδρογόνο. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τη συνεχή εξέλιξη στους τομείς που υστερεί έναντι των ορυκτών (υποδομές, αποθήκευση, μεταφορά, κόστος παραγωγής), πρόκειται να αναδείξει το υδρογόνο ως μια ελπιδοφόρα λύση στην απανθρακοποίηση κρίσιμων τομέων στο πρόβλημα της έκλυσης αέριων ρύπων, όπως είναι αυτοί των μέσων μεταφοράς και των βιομηχανικών διαδικασιών. Επιπρόσθετα, η ποικιλομορφία που διαθέτει τόσο στις πηγές παραγωγής (μεθάνιο, βενζίνη, βιομάζα, άνθρακας ή νερό) όσο και στον τρόπο αποθήκευσης (αέρια ή υγρή φάση), με οδική αλλά και θαλάσσια μεταφορά μέσω αγωγών, σε συνδυασμό με την αφθονία του ως στοιχείο, είναι οι κύριοι λόγοι που καθιστούν το υδρογόνο μια αρκετά σημαντική και ελπιδοφόρα λύση στον τομέα της ενέργειας[17].

## 1.6 Στόχοι και πολιτικές για το υδρογόνο

Η Διακυβερνητική Επιτροπή, αναφορικά με το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, ανακοίνωσε την σοβαρότητα της μείωσης της υπερθέρμανση του πλανήτη

από +2°C έστω σε +1,5°C[18]. Αυτό προφανώς απαιτεί ενέργειες, οι οποίες αφορούν την μείωση της ζήτησης πρωτογενούς ενέργειας και κατά συνέπεια την περεταίρω καύση ορυκτών καυσίμων. Πιο συγκεκριμένα, το 2018, η συνολική τιμή της ζήτησης ανήλθε στα 14.282 Mtoe ισοδύναμου πετρελαίου, εκ των οποίων το 81% του ποσού αυτού αφορούσε ενέργεια που προήλθε αποκλειστικά από ορυκτά καύσιμα. Η λύση στο πρόβλημα αυτό, κρίνεται εφικτή εφόσον η νέα ενεργειακή πηγή χαρακτηρίζεται από αφθονία, ο κύκλος ζωής της δεν επιφέρει υποβάθμιση του περιβάλλοντος, κρίνεται ασφαλής κατά τη χρήση και κατά τον ανεφοδιασμό, μπορεί να αποθηκευτεί και να μεταφερθεί, και είναι οικονομικά βιώσιμη[19].

Ο καθορισμός σαφών στόχων και η εφαρμογή υποστηρικτικών πολιτικών είναι ουσιαστικής σημασίας για την προώθηση της υιοθέτησης του πράσινου υδρογόνου στην αυτοκινητοβιομηχανία. Οι στόχοι αποσκοπούν στην ταχύτερη εξέλιξη της βιωσιμότητας της αυτοκινητοβιομηχανίας που θα χαρακτηρίζεται από σχεδόν μηδενικές εκπομπές άνθρακα, ενώ οι πολιτικές παρέχουν το απαραίτητο πλαίσιο και τα κίνητρα για τη διευκόλυνση της ανάπτυξης της πράσινης τεχνολογίας υδρογόνου. Οι κυβερνήσεις μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην παροχή κινήτρων εφαρμόζοντας ευνοϊκές πολιτικές όπως οικονομικά κίνητρα, επιχορηγήσεις, φορολογικές εκπτώσεις και επιδοτήσεις, με σκοπό την ενθάρρυνση της ανάπτυξης τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παγκοσμίως βελτιώνοντας παράλληλα την ενεργειακή τους απόδοση. Η μετάβαση σε ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό μέλλον περιλαμβάνει μια πολύπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ των περιφερειακών ενεργειακών πόρων, των πλαισίων πολιτικής, της τεχνολογικής καινοτομίας και της παγκόσμιας συνεργασίας για την αντιμετώπιση των προκλήσεων της ενεργειακής ασφάλειας, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας. Είναι γνωστό πλέον, πως η Ευρώπη έχει έρθει αντιμέτωπη με συνεχόμενες προκλήσεις που αφορούν την διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση για ενέργεια[17].

Ένα από τα κυριότερα θέματα που καλείται να επιλύσει τα επόμενα χρόνια η ΕΕ, αφορά την κλιματική αλλαγή και ειδικότερα την έκλυση αερίων του θερμοκηπίου. Για τον λόγο αυτό, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ενέκρινε μια σειρά νομοθετικών προτάσεων που στοχεύουν στην απαλλαγή από τις επιβλαβείς εκπομπές στους τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας αλλά και των μεταφορών. Με τον τρόπο αυτό, επιδιώκει την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και συνεπώς την εξέλιξη

τεχνολογιών με χαμηλό αντίκτυπο άνθρακα, όπως είναι το υδρογόνο. Παράλληλα, η ΕΕ στοχεύει στη διασφάλιση της ασφαλούς τροφοδοσίας με ενέργεια για όλες τις ανάγκες των πολιτών στην Ευρώπη. Όσον αφορά τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, ορίζουν στρατηγική σχετικά με το υδρογόνο, μέσω της οποίας επιδιώκουν παράγουν 1,4 εκατομμύρια τόνους πράσινου υδρογόνου ετησίως έως το 2031 και 15 εκατομμύρια τόνους έως το 2050[20], ενώ παράλληλα, η Ιαπωνία προχώρησε σε επέκταση της αγοράς υδρογόνου, από 2.000.000 τόνους/έτος σε 3.000.000 τόνους/έτος έως το 2030 και 12.000.000 τόνους/έτος έως το 2040, ενώ γνωστοποίησε ότι θα επενδύσει 3,4 δισεκατομμύρια δολάρια για να επιταχύνει την έρευνα, την ανάπτυξη και την προώθηση της χρήσης υδρογόνου τα επόμενα 10 χρόνια[21].

Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας επισήμανε πως η ανάπτυξη των ΑΠΕ κρίνεται ιδιάζουσας σημασίας ώστε η εκμετάλλευση ενέργειας να χαρακτηρίζεται από μηδενικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου σε παγκόσμια κλίμακα.

Η ανθρωπότητα λοιπόν καλείται να στραφεί στην καθαρή ενέργεια, και συνεπώς σε τεχνολογίες που στηρίζονται σε ΑΠΕ. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για τις εξής γενικές εναλλακτικές λύσεις στις πηγές ενέργειας: αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική και πυρηνική ενέργεια, ενώ ο τρόπος με τον οποίον θα εισαχθεί στην αγορά η καθαρή ενέργεια, βασίζεται κατά κύριο λόγο σε τρεις πυλώνες:

1. ανταγωνιστικότητα στις τιμές πώλησης,
2. ασφάλεια κατά τη διαδικασία του εφοδιασμού,
3. βιωσιμότητα και αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής

Κάθε τέτοιου είδους νέα τεχνολογία όπως του υδρογόνου και των κυψελών καυσίμου στη προκειμένη περίπτωση, χρειάζεται την ομαλή ένταξη της στη κοινωνία. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή λοιπόν μέσω ορισμένων κινήσεων πρόκειται να εξασφαλίσει στους πολίτες μια φιλική και οικονομικά συμφέρουσα πηγή ενέργειας προστατεύοντας παράλληλα το περιβάλλον. Αυτό θα επιτευχθεί μέσω της ανάπτυξης της τεχνολογίας αυτής σε επίπεδο ικανό ώστε να σταθεί οικονομικά βιώσιμη αλλά και ανταγωνιστική. Συνεπώς, οι πολίτες της Ευρωπαϊκής Ένωσης θα πρέπει να ενημερωθούν για τη τεχνολογία αυτή, καθώς και τα ιδιαίτερα προτερήματά της. Η μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> και κατά συνέπεια η ελάττωση του αντίκτυπου του στον περιβαλλοντικό τομέα, είναι

αρκετά για την αποδοχή και να την υποστήριξη της, εφόσον κριθεί οικονομικά ανταγωνιστική.

Ως κρίσιμο έτος χαρακτηρίζεται αυτό του 2050, καθώς αναμένεται να εκπληρωθούν ορισμένοι στόχοι εδραιώνοντας έτσι την οικονομία υδρογόνου. Αυτή θα βασίζεται κατά κύριο λόγο σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και θα το υδρογόνο θα βρίσκει εφαρμογές ως καύσιμο στα οχήματα αλλά και σε σταθερές εγκαταστάσεις. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, είναι απαραίτητη προσθήκη του περιβαλλοντικού κόστους στην οικονομική εξίσωση μεταξύ του υδρογόνου, της βενζίνης και των ορυκτών καυσίμων. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό πως η τεχνολογία του υδρογόνου πρόκειται να γίνει αρκετά ελκυστική μέσω της θέσπισης κατάλληλων μέτρων που θα αποσκοπούν στη προστασία του περιβάλλοντος. Αν δεν συμβεί αυτό, θα αφεθεί αργά ή γρήγορα στον κύριο νόμο της αγοράς που αφορά τα οικονομικά οφέλη, είτε μεσοπρόθεσμα είτε βραχυπρόθεσμα. Εντούτοις, η πολιτική υποστήριξη και τα κίνητρα από τις κυβερνήσεις πρόκειται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στον μετριασμό αυτών των προκλήσεων και στην προώθηση της ανάπτυξης μιας ολοκληρωμένης και ανταγωνιστικής πράσινης υποδομής υδρογόνου. Έτσι, η αυτοκινητοβιομηχανία έχει τη δυνατότητα να σημάνει την έναρξη για την ευρεία υιοθέτηση οικολογικών οχημάτων υδρογόνου και να συμβάλει σε έναν οικολογικά καθαρότερο και πιο βιώσιμο τομέα μεταφορών[22].

## **Κεφάλαιο 2 - Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΠΡΑΣΙΝΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ**

### **2.1 Το υδρογόνο ως ένας υποσχόμενος φορέας ενέργειας**

Η παγκόσμια παραγωγή υπολογίζεται 75 MtH<sub>2</sub>/έτος ως καθαρό υδρογόνο και επιπλέον 45 MtH<sub>2</sub>/έτος ως μέρος ενός μείγματος αερίων, εξυπηρετώντας κυρίως βιομηχανικούς σκοπούς όπως οι κυψέλες καυσίμου, η κατασκευή λιπασμάτων, η διύλιση πετρελαίου και η χημική βιομηχανία. Διάφορες μέθοδοι, ανανεώσιμες και μη, χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υδρογόνου, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης ορυκτών καυσίμων, της αναμόρφωσης μεθανίου με ατμό, της αναμόρφωσης πετρελαίου/νάφθας, της αεριοποίησης άνθρακα, της βιομάζας, των βιολογικών πηγών και της ηλεκτρόλυσης νερού[23]. Το υδρογόνο συγκεντρώνει την προσοχή ως

«καθαρό» ή «πράσινο» καύσιμο λόγω του μοναδικού του χαρακτηριστικού ότι παράγει μόνο υδρατμούς όταν καίγεται ή χρησιμοποιείται σε κυψέλες καυσίμου, αποφεύγοντας έτσι τυχόν εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Σε αέρια μορφή έχει πυκνότητα 0,0899 g/l (14.4 φορές μικρότερη από την πυκνότητα του αέρα), υψηλή ικανότητα διάχυσης (3,8 φορές υψηλότερη από το μεθάνιο), και βράζει στους  $-257.77^{\circ}$ . Επιπρόσθετα, αποτελεί ευέλικτο φορέα ενέργειας καθώς έχει τη δυνατότητα να προκύπτει από διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, ενώ διαθέτει σχεδόν τριπλάσια ενεργειακή πυκνότητα (140 MJ/kg) από ότι τα τυπικά ορυκτά καύσιμα (50 MJ/kg)[24].

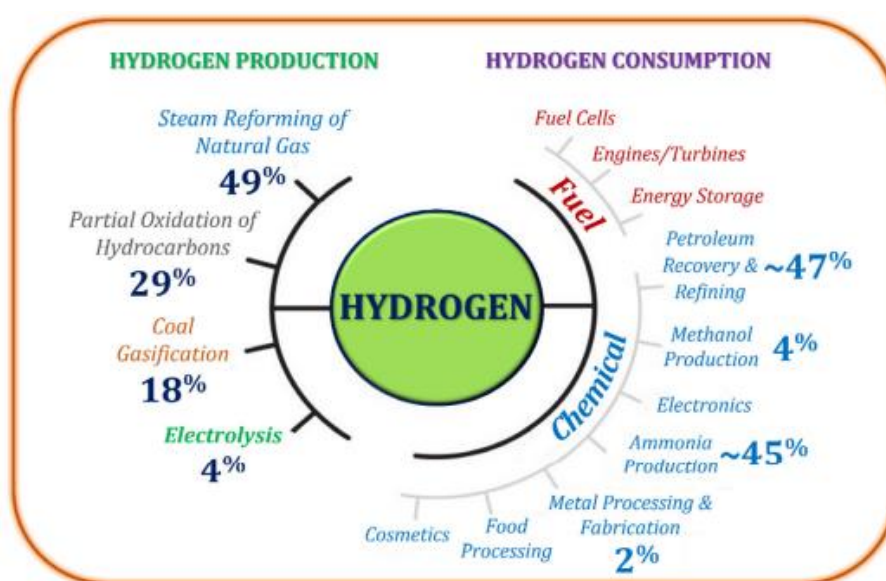


Figure 9 Το κατά προσέγγιση ποσοστό τεχνικών και εφαρμογών παραγωγής υδρογόνου [25]

Επί του παρόντος, τα μη ανανεώσιμα ορυκτά καύσιμα, ειδικά η αναμόρφωση με ατμό μεθανίου, αντιπροσωπεύουν τη συντριπτική πλειοψηφία της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου. Δυστυχώς, αυτή η μέθοδος έχει ως αποτέλεσμα υδρογόνο χαμηλότερης καθαρότητας και υψηλότερη συγκέντρωση επιβλαβών αερίων θερμοκηπίου. Η έννοια του «πράσινου υδρογόνου» έχει μεγάλη απήχηση, αλλά η εξέλιξη του εξαρτάται ακόμη από την εύρεση λύσεων που πρόκειται να μειώσουν το κόστος που σχετίζεται με τις διαδικασίες κατασκευής, μεταφοράς και αποθήκευσης. Από την άλλη, αν και ευρέως διαθέσιμο, το υδρογόνο είναι ακριβό, γεγονός που οφείλεται σε διαδικασίες όπως αυτή της διάσπασής του από την χημική του ένωση, της μεταφοράς και της αποθήκευσής του. Αυτές οι προκλήσεις οφείλονται στους ανταγωνιστές του υδρογόνου στην αγορά του καυσίμου, καθώς όσον αφορά το



πετρέλαιο και την βενζίνη, μπορούν να μεταφερθούν αρκετά πιο οικονομικά μέσω αγωγών και μέσω φορτηγών αντίστοιχα[25].

Για παράδειγμα, η ηλεκτρόλυση, η διαδικασία που χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου, συνάντησε εμπόδια που προέρχονται από την αναποτελεσματικότητα και τα ακριβά υλικά ηλεκτρολυτών. Ωστόσο, η συνεχής έρευνα και η ανάπτυξη στη τεχνολογία του υδρογόνου για τη χρήση οικονομικότερων υλικών, αποδεικνύεται και μέσω της ανακάλυψης στον τομέα των ηλεκτρολυτών που είναι ζωτικής σημασίας ώστε να καταστεί οικονομικά ανταγωνιστική λύση σχετικά με τις συμβατικές πηγές ενέργειας, και πρόκειται για τον ηλεκτρολύτη Hysata. Διακρίνεται επειδή λειτουργεί με εντυπωσιακή απόδοση συστήματος 95%, που ισοδυναμεί με 41,5 kWh/kg ξεπερνώντας την τυπική απόδοση 75% ή 52,5 kWh/kg, που παρουσιάζουν άλλες διαθέσιμες επιλογές, ενώ σχετικά με την αποδοτικότητα, ο ηλεκτρολύτης αυτός επιτυγχάνει απόδοση 39,4 κιλοβατώρες (HHV) ενέργειας ανά κιλό υδρογόνου[26].

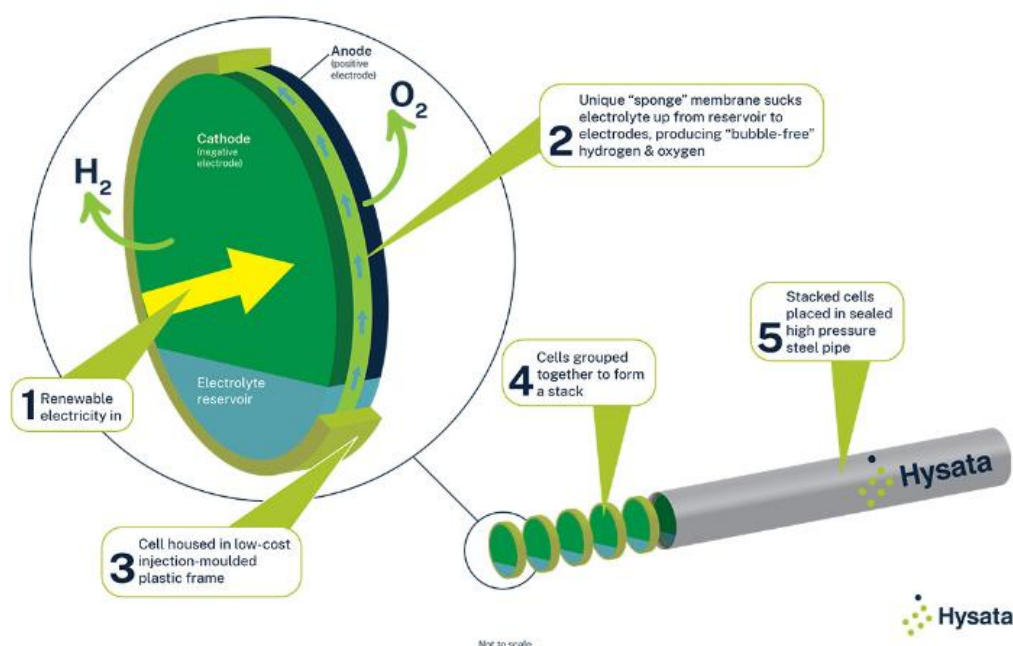


Figure 10 Γραφική ανάλυση της πρωτοποριακής τεχνολογίας ηλεκτρολύτη της Hysata [26]

Επί του παρόντος λοιπόν, η αυτοκινητοβιομηχανία δίνει μεγάλη προσοχή στην τεχνολογία υδρογόνου ως εναλλακτική λύση στα συμβατικά οχήματα που κινούνται με ορυκτά καύσιμα. Οι δυνατότητες του υδρογόνου χαρακτηρίζονται υπέρ-αρκετές ώστε να ξεκινήσει μια ολοκληρωτική διαφοροποίηση της ενέργειας που χρησιμοποιείται

στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας αλλά και των μεταφορών, μειώνοντας παράλληλα την εξάρτηση από περιβαλλοντικά επιβλαβή καύσιμα.

## 2.2 Επισκόπηση της παρούσας υποδομής για το πράσινο υδρογόνο

Όπως γίνεται αντιληπτό, η επιτυχής ενσωμάτωση των οχημάτων πράσινου υδρογόνου στην αυτοκινητοβιομηχανία βασίζεται κατά κύριο λόγο στην ανάπτυξη μιας ισχυρής υποδομής που να επιτρέπει την υποστήριξη της παραγωγής, της αποθήκευσης αλλά και της διανομής του υδρογόνου. Επιπλέον, αξιοσημείωτο είναι πως για την έναρξη της ομαλής μετάβασης σε οχήματα πράσινου υδρογόνου, αναγκαία είναι η ορθή κατασκευή ενός εκτεταμένου δικτύου ανεφοδιασμού όπου η διανομή του πράσινου υδρογόνου σε σταθμούς ανεφοδιασμού ή άλλους τελικούς χρήστες, θα ορίζεται από ειδικούς αγωγούς ή σχετική υποδομή μεταφοράς. Ένας κύριος λόγος λοιπόν που η τεχνολογία του πράσινου υδρογόνου δυσκολεύεται να ενταχθεί στην αγορά, είναι η έλλειψη σχετικών σταθμών ανεφοδιασμού. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο κόστος (περίπου 1.3 εκατομμύρια δολάρια) που χρειάζεται η ολοκλήρωση μιας πράσινης υποδομής υδρογόνου, και συνεπώς κρίνονται αναγκαίες σημαντικές επενδύσεις εφόσον δεν προκύψει κάποια ιδιαίτερη μείωση στην κοστολόγηση ενός τέτοιου έργου. Πιο συγκεκριμένα, ο αριθμός των σταθμών υδρογόνου βρίσκεται κοντά στις 1000 μονάδες, με την Κίνα να αντιπροσωπεύει περίπου το 1/4 του συνολικού αριθμού, ενώ οι ΗΠΑ κατέχουν λιγότερους από 100 σταθμούς υδρογόνου. Μετά την Κίνα, ακολουθεί η Ιαπωνία και η Κορέα, ενώ στην ανάπτυξη αυτή σκοπεύουν και άλλες χώρες της Ασίας όπως η Αυστραλία, η Νέα Ζηλανδία, η Ινδία κ.ά. Όσον αφορά την Ευρώπη, η μόνη χώρα που πλησιάζει τους 100 σταθμούς υδρογόνου είναι η Γερμανία, με ακόλουθους την Γαλλία, το Ηνωμένο Βασίλειο, τη Σλοβενία, την Ολλανδία, την Ελβετία και την Ισπανία[27].

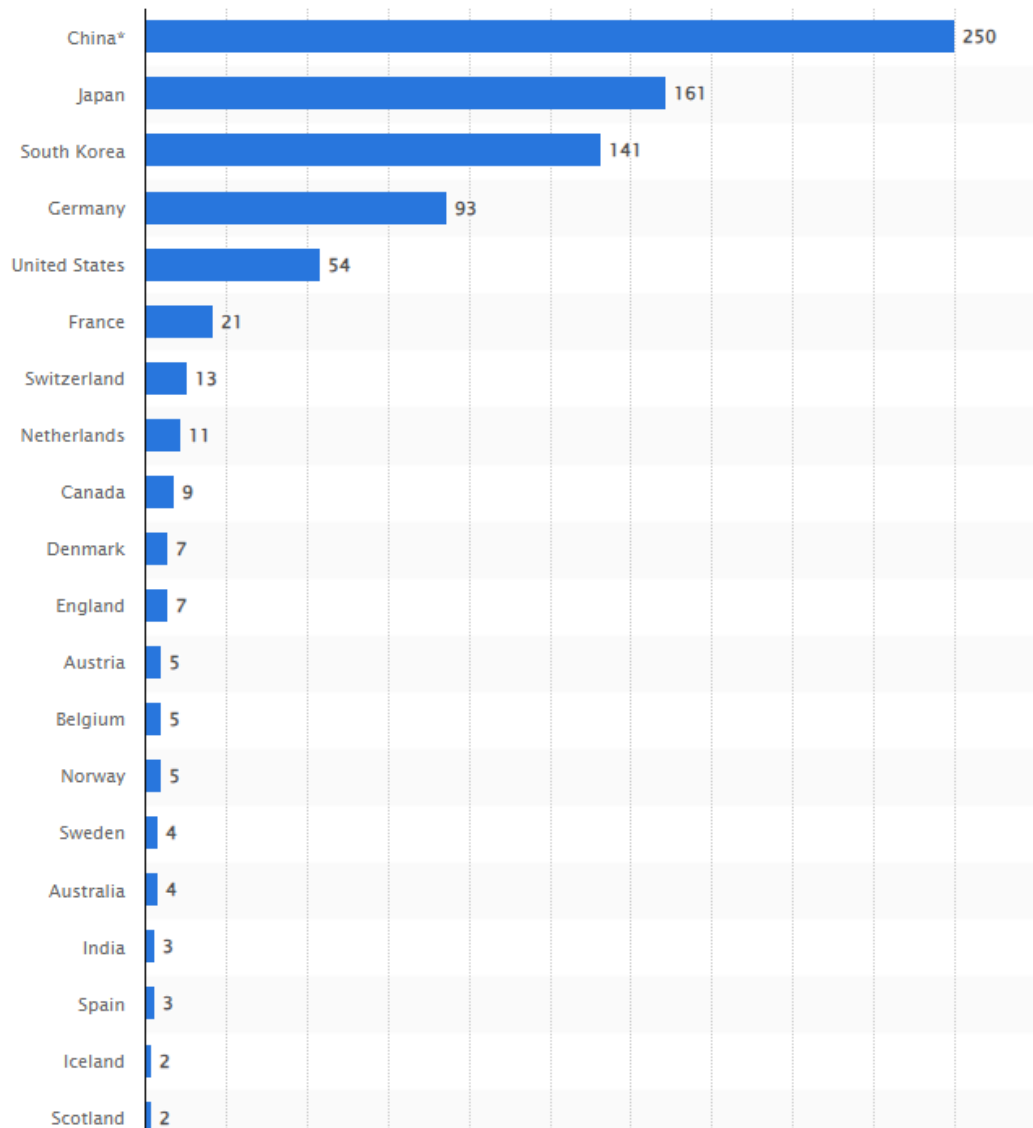


Figure 11 Αριθμός σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου για οδικά οχήματα παγκοσμίως από το 2022, ανά χώρα [28]

Όσον αφορά την αποθήκευση, το υδρογόνο έχει σχετικά υψηλή ενεργειακή πυκνότητα συγκριτικά με τα συμβατικά καύσιμα, και συνεπώς οδηγεί στη χρήση ιδιαίτερα αποδοτικών συστημάτων αποθήκευσης. Αυτό οφείλεται στο ότι η αποθήκευση συμπιεσμένου υδρογόνου περιλαμβάνει την πίεση του αερίου υδρογόνου και την αποθήκευσή του σε δεξαμενές υψηλής πίεσης, ενώ η αποθήκευση υγροποιημένου υδρογόνου απαιτεί ψύξη του υδρογόνου σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες για να επιτευχθεί υγρή κατάσταση ( $-253^{\circ}\text{C}$  ή  $-423^{\circ}\text{F}$ ). Και οι δύο μέθοδοι έχουν πλεονεκτήματα και προκλήσεις όσον αφορά τη χωρητικότητα αποθήκευσης, την ασφάλεια και τις απαιτήσεις υποδομής[29].

### 2.3 Παραγωγή πράσινου υδρογόνου με ηλεκτρόλυση

Όσον αφορά τους τρόπους παραγωγής ή εξαγωγής του υδρογόνου, αυτοί ποικίλουν. Πιο συγκεκριμένα, η παραγωγή υδρογόνου βασίζεται είτε στην εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων είτε των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ο άνθρακας, το φυσικό αέριο, η βιομάζα και η πυρηνική ενέργεια αποτελούν πηγές υδρογόνου αλλά δεν θεωρούνται ιδανικές λόγω της έκλυσης μεγάλων ποσοτήτων αερίων του θερμοκηπίου ( $\text{CO}_2$ ) στο περιβάλλον. Αντιθέτως, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή, η αιολική, η γεωθερμική και η υδροηλεκτρική ενέργεια καθίστανται ως οι πιο βιώσιμες λύσεις στο τομέα της ενέργειας. Οι τρέχουσες διεργασίες παραγωγής υδρογόνου είναι σε μεγάλο βαθμό θερμοχημικές διεργασίες που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, όπως αεριοποίηση άνθρακα, αναμόρφωση υδρογονανθράκων, αναμόρφωση πλάσματος και πυρόλυση υδρογονανθράκων. Αντίθετα, η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στην παραγωγή υδρογόνου που δεν έχει ως αποτέλεσμα επιβλαβείς συνέπειες προς το περιβάλλον και πιο συγκεκριμένα στη διάσπαση του νερού με ηλεκτρόλυση. Η παγκόσμια ζήτηση για καθαρό υδρογόνο για διύλιση, αμμωνία και άλλες χρήσεις αυξάνεται με περίπου 95 εκατομμύρια τόνους υδρογόνου ( $\text{Mt H}_2$ ) που παράγονται σήμερα, το 76% αυτού του υδρογόνου προέρχεται από φυσικό αέριο ενώ το μεγαλύτερο μέρος του υπολειπόμενου υδρογόνου παράγεται από άνθρακα (περίπου 22%)[30].

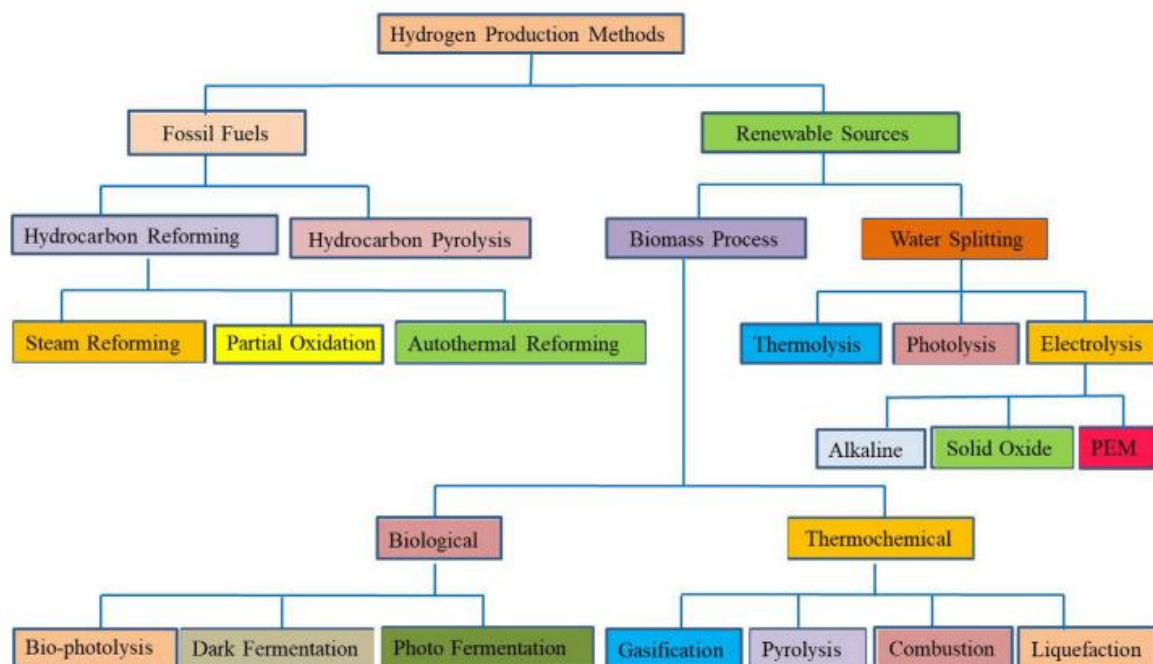


Figure 12 Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου [31]

Η παραγωγή υδρογόνου είναι μια πολύπλοκη διαδικασία και απαιτούνται εγκαταστάσεις με πολλά εξαρτήματα εκ των οποίων τα περισσότερα βρίσκονται σε υψηλό επίπεδο τεχνικής. Ονομαστικά, οι μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου είναι :

- Αεριοποίηση άνθρακα – βιομάζα
- Αναμόρφωση φυσικού αερίου
- Ηλεκτρόλυση νερού
- Θερμο-χημική διεργασία
- Φωτοηλεκτρόλυση
- Βιοφωτόλυση και φωτοζύμωση
- Πυρόλυση φυσικού αερίου, βαρέων καυσίμων πετρελαίου ή βιομάζας

Από τις παραπάνω μεθόδους παραγωγής η αεριοποίηση άνθρακα και η αναμόρφωση φυσικού αερίου είναι ήδη ανεπτυγμένες σήμερα, ωστόσο δεν αποτελούν λύσεις στο πρόβλημα της παραγωγής ρύπων και συνεπώς δε θα αναλυθούν. Η τεχνολογία που έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή καθαρού υδρογόνου είναι η ηλεκτρόλυση.

Η ηλεκτρόλυση λοιπόν, είναι μια ευρέως αναγνωρισμένη μέθοδος στον τομέα της παραγωγής πράσινου υδρογόνου, όπου η διάσπαση των μορίων του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο επιτυγχάνεται με τη συμβολή ηλεκτρικού ρεύματος. Η μεγαλύτερη μονάδα ηλεκτρόλυσης (135 MW/30.000 Nm<sup>3</sup>/h) έχει αναπτυχθεί για τη βιομηχανία λιπασμάτων. Ωστόσο, παγκοσμίως μόνο το 4% του υδρογόνου (65 εκατομμύρια τόνοι) μπορεί να παραχθεί από ηλεκτρόλυση νερού. Η ιδιαιτερότητα της μεθόδου αυτής, αφορά τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ τριών μεθόδων ηλεκτρόλυσης:

- ηλεκτρόλυση με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM),
- αλκαλική ηλεκτρόλυση νερού (AWE) και
- κυψέλες ηλεκτρόλυσης στερεού οξειδίου (SOEC).

Όπως γίνεται αντιληπτό, ο ιδανικός τρόπος παραγωγής υδρογόνου χαρακτηρίζεται από σχεδόν μηδενικές εκπομπές επιβλαβών αερίων για την ατμόσφαιρα όσον αφορά τον κύκλο ζωής σε συνδυασμό με προσιτό κόστος σχετικά με την ολοκλήρωση της διεργασίας. Η ουδετερότητα στον τομέα των ρύπων, βασίζεται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, από όπου αντλείται το απαραίτητο ηλεκτρικό ρεύμα. Ο κύριος λόγος που η ηλεκτρόλυση τα τελευταία χρόνια αποτελεί σημαντική λύση στο πρόβλημα παραγωγής H<sub>2</sub>, οφείλεται στο επίπεδο ετοιμότητας υψηλής τεχνολογίας (TRL) των συστημάτων ηλεκτρόλυσης, και ιδίως της αλκαλικής ηλεκτρόλυσης νερού (AWE) λόγω του χαμηλότερου κόστους συγκριτικά με τη μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM), που δεν χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερη ανάπτυξη, και τη Κυψέλη Ηλεκτρόλυσης Στερεού Οξειδίου (SOEC) που βρίσκεται υπό εργαστηριακή επεξεργασία[31].

Ειδικότερα, κατά την ηλεκτρόλυση, η ημιαντίδραση αναγωγής λαμβάνει χώρα στην κάθοδο εκεί όπου τα ηλεκτρόνια καταλήγουν στο ανάλογο ηλεκτρόδιο, ερχόμενα από την αρχική τους θέση στο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα, πολώνοντας το έτσι αρνητικά. Αντιθέτως, η ημιαντίδραση της οξειδωσης διεξάγεται στην άλλη πλευρά, όπου ονομάζεται άνοδος και σε αντίθεση με την κάθοδο, τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται εκεί, αποχωρούν με προορισμό το εξωτερικό κύκλωμα μετατρέποντας έτσι το φορτίο της σε θετικά πολωμένο. Ως αποτέλεσμα, το υδρογόνο παράγεται στην κάθοδο και το οξυγόνο στην άνοδο.

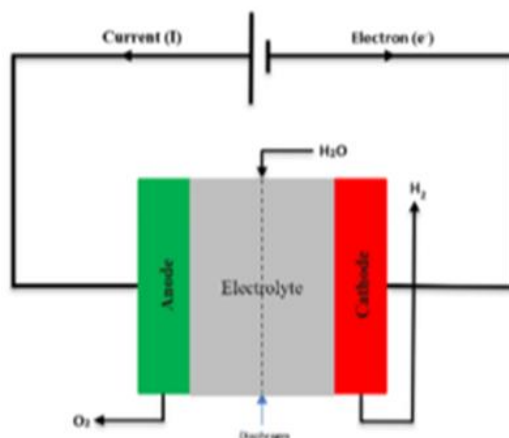
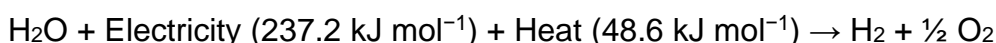
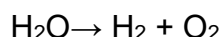


Figure 13 Γενική αρχή ενός ηλεκτρολύτη [32]

Η συνολική αντίδραση της ηλεκτροχημικής διάσπασης του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο με την παροχή ηλεκτρικής (και θερμικής) ενέργειας δίνεται από:



Για την επίτευξη της διάσπασης του νερού, είναι απαραίτητη η πρόσδοση ενός ποσού ενέργειας και πιο συγκεκριμένα δίνεται από τη τιμή της μεταβολής την ενθαλπίας της αντίδρασης ( $\Delta H$ ). Εξίσου κρίσιμη είναι και η ενέργεια που πρέπει να λάβουν τα ηλεκτρόδια, με τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας, και σαν ελάχιστη τιμή αυτής, λογίζεται η διακύμανση ελεύθερης ενέργειας Gibbs ( $\Delta G$ ). Στην προκειμένη περίπτωση, η σημαντικότητα τους διακρίνεται στη διαφορά των δύο αυτών ποσών, κάτι που ορίζεται από τη θερμική ενέργεια. Αυτή με τη σειρά της ισούται με το γινόμενο της θερμοκρασίας της διεργασίας ( $T$ ) και της μεταβολής της εντροπίας ( $\Delta S$ ) (αντιστρεπτή μεταβολή). Διαφοροποίηση στη μεταβολή της εντροπίας διακρίνεται μόνο εφόσον υπάρξει διαφοροποίηση του όγκου ή/και της θερμοκρασίας.

Τα θερμοδυναμικά αυτά μεγέθη μπορούν να εκφραστούν ως:

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

Η  $\Delta S$  (εντροπία) τροφοδοτείται από ηλεκτρική ενέργεια, όπως συμβαίνει με τους περισσότερους βιομηχανικούς ηλεκτρολύτες ενώ η ελάχιστη τάση για την επίτευξη της ηλεκτρόλυσης του νερού αναφέρεται ως θερμοουδέτερη τάση  $U_{tn}$ , αφού για την

διάσπαση των δεσμών του μορίου του νερού απαιτείται απορρόφηση ενέργειας από εξωτερική πηγή. Επίσης, η συνολική ενέργεια που απαιτείται ισούται με τη μεταβολή της ενθαλπίας  $\Delta H$ , καθώς στη περίπτωση διεξαγωγής μιας ηλεκτρόλυσης υπό ιδανικές συνθήκες, οι τιμές των τάσεων  $U_{tn}$  και  $U_{\Delta H}$ , εξισώνονται. Σε αυτήν την περίπτωση, το  $U_{\Delta H}$  και το  $U_{tn}$  μπορούν να υπολογιστούν από την ακόλουθη έκφραση

$$U_{\Delta H} = U_{tn} = \frac{\Delta H}{z.F}$$

όπου  $z$  είναι ο αριθμός των φορτίων που μεταφέρονται ανά μόριο υδρογόνου ( $z=2$ ) και  $F$  είναι η σταθερά Faraday ( $96.500 \text{ C mol}^{-1}$ ).

Ωστόσο, κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας ηλεκτρόλυσης υπό πραγματικές συνθήκες, ισχύει ότι  $U_{tn} > U_{\Delta H}$ , γεγονός που οφείλεται στην επιπλέον κατανάλωση ενέργειας για την αντιμετώπιση ορισμένων παραγόντων όπως είναι οι υδρατμοί που εμπλέκονται στα ρεύματα υδρογόνου και οξυγόνου, τα χαρακτηριστικά του νερού τροφοδοσίας (χαμηλότερη θερμοκρασία αλλά και πίεση από τη θεωρητικά ιδανική) και το γεγονός ότι η διαδικασία δεν είναι στην πραγματικότητα αδιαβατική, αφού παρατηρούνται απώλειες θερμότητας λόγω μεταφοράς και ακτινοβολίας.

Για να πραγματοποιηθεί μια διαδικασία ηλεκτρόλυσης σε τυπικές συνθήκες περιβάλλοντος (θερμοκρασία  $298,15 \text{ K}$  και πίεση  $1 \text{ atm}$ ), το απαιτούμενο ηλεκτρικό έργο (ενέργεια Gibbs) ισούται με  $237,22 \text{ kJ/mol}$ , ενώ η απαιτούμενη ενθαλπία είναι  $\Delta H^\circ = 285,84 \text{ kJ/mol}$ [32].

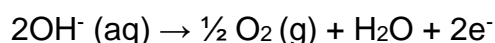
### 2.3.1 Αλκαλική Ηλεκτρόλυση Νερού (AWE)

Η αλκαλική ηλεκτρόλυση νερού (AWE) αναγνωρίζεται ως καθιερωμένη τεχνολογία στον τομέα παραγωγής πράσινου υδρογόνου. Για την διευκόλυνση της μεταφοράς των ιόντων, χρησιμοποιείται ένας αλκαλικός ηλεκτρολύτης που τις περισσότερες φορές είναι το υδατικό διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH) ή το υδροξειδίου του νατρίου (NaOH). Οι σχετικές συσκευές κρίνονται αξιόπιστες και με διάρκεια ζωής περίπου 10 έτη, ενώ μερικά χαρακτηριστικά της μεθόδου είναι τα εξής:



1. Στυλ μεμβράνης/διαφράγματος→ NiO
2. Υλικό διπολικής πλάκας/διαχωριστή→ Ανοξειδωτο ατσάλι
3. Καταλυτικό υλικό στην άνοδο→ Ni/Co/Fe
4. Καταλυτικό υλικό στην κάθοδο→ Ni/C-Pt
5. Υλικό ανόδου→ PTL Ti/Ni/ζιρκόνιο
6. Υλικό καθόδου→ PTL Πλέγμα από ανοξειδωτο χάλυβα

Όσον αφορά τη διεξαγωγή της διεργασίας, το αέριο υδρογόνο απελευθερώνεται από την κάθοδο όπου το νερό ανάγεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ανιόντων υδροξειδίου που μέσω του πορώδους διαφράγματος καταλήγουν στην άνοδο του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργεί η εξωτερική πηγή ενέργειας. Τα ανιόντα αυτά με τη σειρά τους, βρισκόμενα στην άνοδο, συνδυάζονται εκ νέου και οδηγούν στη δημιουργία αέριου οξυγόνου, το οποίο στη συνέχεια καταλήγει στον συλλέκτη αερίου απελευθερώνοντας παράλληλα ηλεκτρόνια κλείνοντας έτσι το ηλεκτρικό κύκλωμα. Οι αντιδράσεις που συμβαίνουν στην κάθοδο και την άνοδο αντίστοιχα είναι οι εξής:



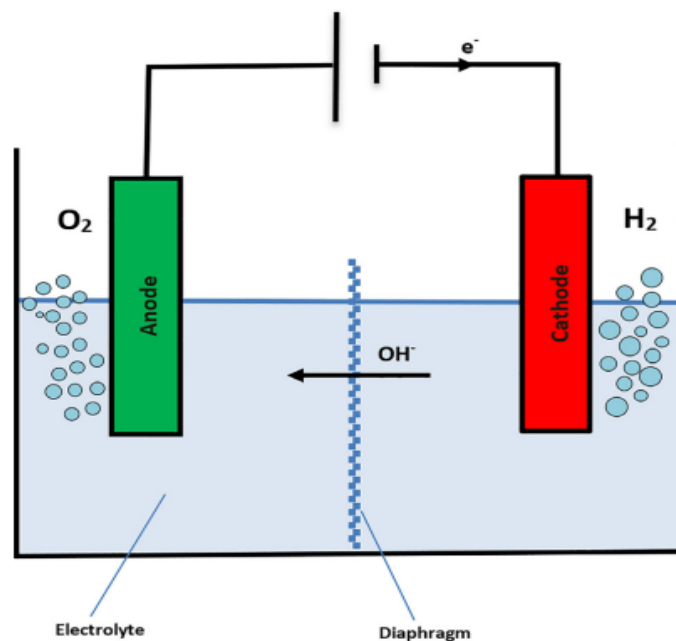


Figure 14 Διάγραμμα λειτουργίας Αλκαλικού Ηλεκτρολύτη Νερού (AWE) [32]

Η αλκαλική ηλεκτρόλυση λειτουργεί σε θερμοκρασίες 30–80°C, ενώ σχετικά με τους ηλεκτρολύτες, χαρακτηρίζονται από υψηλή συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου μεταξύ 25% και 30%, και τιμές pH μεταξύ του πεδίου 13 και 14. Δύο από τα βασικά συστατικά της διαδικασίας ηλεκτρόλυσης αλκαλικού νερού, είναι ένας διαχωριστής μεμβράνης που συνήθως είναι κατασκευασμένος από αμίαντο, και τα ηλεκτρόδια ανοξείδωτου χάλυβα υπό την επικάλυψη νικελίου. Πρόκειται για ένα πορώδες διάφραγμα πάχους μεταξύ 0,05-0,5mm που συμβάλει τόσο στον διαχωρισμό των παραγόμενων αερίων από τα αντίστοιχα ηλεκτρόδια τους όσο και στην αποφυγή της περαιτέρω ανάμειξης τους. Η διαφορά της αλκαλικής ηλεκτρόλυσης σχετικά με άλλες τεχνολογίες κρίνεται ως προς τη μεγαλύτερη ωριμότητα και εμπορική εμβέλεια. Επί του παρόντος, οι αλκαλικές μονάδες ηλεκτρόλυσης επιτυγχάνουν σε χωρητικότητα το μέγεθος MW[33], [34].

### ➤ Πλεονεκτήματα μεθόδου AWE

Ορισμένα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής, εκτός του επιπέδου ωριμότητας σαν προηγμένη τεχνολογία και της διαθεσιμότητάς της στην αγορά, η AWE χαρακτηρίζεται από ικανοποιητική καθαρότητα, η ενεργειακή της απόδοση είναι 70-80% προϊόντος υδρογόνου, αλλά και ικανότητα να λειτουργεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος με παράλληλα χαμηλό κεφαλαιουχικό κόστος που εκτιμάται στα 458-916 €/ kW.

### ➤ Μειονεκτήματα μεθόδου AWE

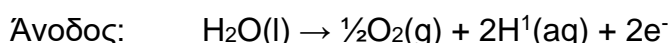
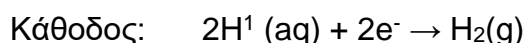
Ωστόσο, η τεχνολογία αυτή χαρακτηρίζεται από περιορισμένη πυκνότητα ρεύματος (μικρότερη από 0,45 A/cm<sup>2</sup>). Επιπρόσθετα, ο διαβρωτικός χαρακτήρας που παρουσιάζει ο ηλεκτρολύτης KOH στο CO<sub>2</sub> που υπάρχει στο περιβάλλον, οδηγεί στο σχηματισμό του άλατος K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, κάτι που έχει αρνητικό αντίκτυπο στη παραγωγή του υδρογόνου καθώς μειώνει την απόδοση του ηλεκτρολύτη, αλλά μειώνει και την καθαρότητα των παραγόμενων αερίων. Προς το παρόν, τα υλικά των ηλεκτροδίων όπως η πλατίνα είναι ιδιαίτερος κοστοβόρος, ενώ οι αλκαλικοί ηλεκτρολύτες χαρακτηρίζονται από αργή εκκίνηση λειτουργίας και απόκριση στο φορτίο. Η πίεση λειτουργίας είναι χαμηλή (3-30bar), ενώ ο μεγάλος χρόνος εκκίνησης καθιστά δύσκολη την προσαρμογή των αλκαλικών ηλεκτρολυτών σε μεταβλητές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ιδιαίτερα την ηλιακή και την αιολική ενέργεια.

#### 2.3.1 Μembrάνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM)

Πρόκειται για τον πρώτο ηλεκτρολύτη νερού που συσχετίζει την αγωγιμότητα των πρωτονίων με μια πολυμερή μεμβράνη ως ηλεκτρολύτη. Αναπτύχθηκε το 1966 με σκοπό την αντιμετώπιση των μειονεκτημάτων της AWE και το 1978 όταν τα κατάλληλα υλικά πολυμερών ηλεκτρολυτών έγιναν διαθέσιμα στην αγορά, άρχισε το εμπόρευμα ηλεκτρολυτών νερού του συγκεκριμένου τύπου. Ονομάζεται και πολυμερής ηλεκτρολυτική μεμβράνη και βασίζεται στη τεχνολογία κυψελών καυσίμου με χρήση μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC).

Η ιδιαιτερότητα της συγκριτικά με την AWE βρίσκεται στον ηλεκτρολύτη, όπου ο αμίαντος που χρησιμοποιεί η (AWE) αντικαθίσταται από μια μεμβράνη στερεού πολυμερούς ηλεκτρολύτη που επιτρέπει στα πρωτόνια να διοχετεύονται σε αυτήν. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για μια αγωγή μεμβράνη πρωτονίων πάχους 50-250μm που προσφέρει χαμηλότερη διαπερατότητα αερίων, υψηλή αγωγιμότητα πρωτονίων ( $0,1 \pm 0,02 \text{ S cm}^{-1}$ ), καθώς και λειτουργίες υψηλής πίεσης. Επιπλέον, η ηλεκτρόλυση νερού PEM χαρακτηρίζεται από πλεονεκτήματα όπως συμπαγής σχεδιασμός, υψηλή πυκνότητα ρεύματος (πάνω από  $2 \text{ Acm}^2$ ), υψηλή απόδοση, γρήγορη απόκριση, μικρό αποτύπωμα, λειτουργία σε χαμηλές θερμοκρασίες ( $20\text{--}80^\circ\text{C}$ ) και παράγει απόλυτα καθαρό υδρογόνο και οξυγόνο ως υποπροϊόν[35]–[37].

Στην ηλεκτρόλυση νερού PEM, το νερό διασπάται ηλεκτροχημικά σε υδρογόνο και οξυγόνο στα επιμέρους ηλεκτρόδια, δηλαδή το υδρογόνο στην κάθοδο και το οξυγόνο στην άνοδο. Σε αυτή τη μέθοδο, το νερό αντλείται στην άνοδο όπου διασπάται σε οξυγόνο ( $\text{O}_2$ ), πρωτόνια ( $\text{H}^+$ ) και ηλεκτρόνια ( $\text{e}^-$ ). Αυτά τα πρωτόνια μεταφέρονται στην πλευρά της καθόδου μέσω μιας μεμβράνης αγωγιμότητας πρωτονίων, ενώ τα ηλεκτρόνια με τη σειρά τους εξέρχονται από την άνοδο μέσω του εξωτερικού κυκλώματος, το οποίο παρέχει την κινητήρια δύναμη (τάση κυψέλης) για την αντίδραση. Στην πλευρά της καθόδου, τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια ανασυνδυάζονται για να παράγουν το υδρογόνο. Οι μερικές αντιδράσεις της διαδικασίας είναι οι εξής:



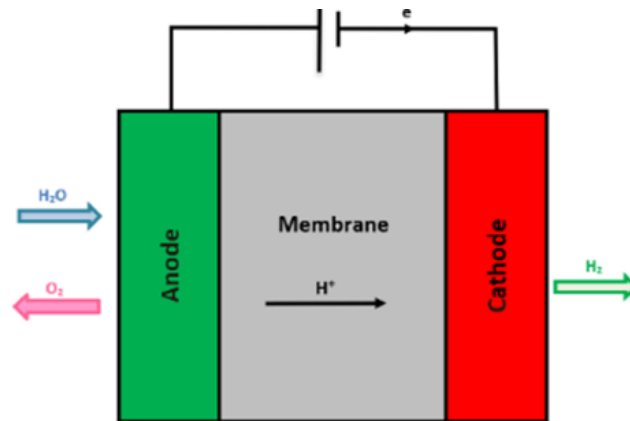


Figure 15 Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρόλυσης νερού PEM [32]

Οι ηλεκτροκαταλύτες τελευταίας τεχνολογίας για την ηλεκτρόλυση PEM βρίσκονται βασισμένοι σε ενεργά ευγενή μέταλλα όπως ο λευκόχρυσος (Pt) και το παλλάδιο (Pd) για την αντίδραση έκλυσης υδρογόνου στην κάθοδο και το διοξείδιο του ιριδίου ( $\text{IrO}_2$ ) ή το διοξείδιο του ρουθηνίου ( $\text{RuO}_2$ ) για την αντίδραση έκλυσης οξυγόνου στην άνοδο, γεγονός που καθιστά τον συγκεκριμένο τύπο ηλεκτρόλυσης ακριβότερο από την μέθοδο AWE. Επομένως, μία από τις κύριες προκλήσεις στην ηλεκτρόλυση νερού PEM είναι η μείωση του κόστους παραγωγής και η διατήρηση της υψηλής απόδοσης. Έκτοτε, έχουν γίνει σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες για τη βελτίωση των κυττάρων ηλεκτρόλυσης νερού PEM, και ως αποτέλεσμα, αυτή η τεχνολογία πλησιάζει τις εμπορικές αγορές[38].

#### ➤ Πλεονεκτήματα μεθόδου PEM

- Υψηλότερη απόδοση (80-90%) (δεν υπάρχουν διαβρωτικοί ηλεκτρολύτες και διαρροές)
- Συμπαγής σχεδιασμός (αυξημένες πυκνότητες ρεύματος)
- Υψηλή πίεση εξόδου
- Λειτουργία με μεταβατικά φορτία ισχύος
- Δεν υπάρχει μεταφορά οξέος
- Ελάχιστη απαίτηση ισχύος ανά μονάδα παραγόμενου αερίου
- Ευελιξία στην κλίμακα παραγωγής

### ➤ Μειονεκτήματα μεθόδου PEM

- Ακριβή μέθοδος
- Σχετικά νέα τεχνολογία
- Όξινο περιβάλλον
- Η ανοχή των διαστάσεων των στοιχείων κυψέλης είναι πιο απαιτητική

Η τεχνολογία PEM επιτρέπει υψηλή ευελιξία φορτίου και μπορεί να παρέχει υπηρεσίες εξισορρόπησης δικτύου, ενώ οι ηλεκτρολύτες της PEM επιτυγχάνουν λόγω της στερεάς δομής της μεμβράνης πολύ υψηλές πυκνότητες ρεύματος (έως 10 A/cm<sup>2</sup>) κάτι που έχει ως αποτέλεσμα το μειωμένο λειτουργικό κόστος, ενώ η καθαρότητα υδρογόνου (έως 99,9999%), αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την ασφαλή αποθήκευση και την άμεση χρήση σε κυψέλη καυσίμου. Τέλος, η γρήγορη απόκριση που χαρακτηρίζει την τεχνολογία PEM την καθιστά καταλληλότερη σχετικά με τη μεταβλητή φύση των πηγών ηλιακής και αιολικής ενέργειας[39], [40].

#### 2.3.1 Κυψέλες ηλεκτρόλυσης στερεού οξειδίου υψηλής θερμοκρασίας (SOEC)

Πρόκειται για μια κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου που χαρακτηρίζεται από αναγεννητική λειτουργία αποσκοπώντας στην ηλεκτρόλυση του νερού, με τη βοήθεια ενός στερεού οξειδωτικού ή κεραμικού ηλεκτρολύτη ως προς την παραγωγή των αερίων υδρογόνου και οξυγόνου. Επιτυγχάνει τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική, με παράλληλη παραγωγή εξαιρετικά καθαρού υδρογόνου υψηλής απόδοσης. Οι ηλεκτρολύτες τεχνολογίας SOEC είναι πολύ αποδοτικοί όσον αφορά τις διεργασίες παραγωγής υδρογόνου και συνοδεύονται από χαμηλό κόστος ενώ χρησιμοποιούν κεραμικό υλικό ως ηλεκτρολύτη. Αυτή η πολλά υποσχόμενη τεχνολογία επιτρέπει επίσης την συνηλεκτρόλυση CO<sub>2</sub> και ατμού με μια συγκεκριμένη μορφή SOEC. Επίσης, σε αντίθεση με τις αλκαλικές και τις μεθόδους PEM, τα συστήματα SOEC πραγματοποιούνται με αρκετά υψηλότερες τιμές πίεσης και θερμοκρασίας του εύρους από 500°C έως 850°C αξιοποιώντας το νερό με τη μορφή

ατμού. Η κυψέλη ηλεκτρόλυσης στερεού οξειδίου βρίσκεται κατάσταση ανάπτυξης και συνεπώς δεν έχει ακόμη εμπορευματοποιηθεί[41].

Λόγω της αυξανόμενης ζήτησης και της χαμηλής χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας της τεχνολογίας ηλεκτρόλυσης νερού σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνολογίες, παρατηρήθηκε πρόσφατα αυξανόμενο ενδιαφέρον για μονάδες ηλεκτρόλυσης τύπου SOEC. Επιπλέον, η απαιτούμενη θερμότητα για τη λειτουργία της SOEC μπορεί να παρέχεται από εξωτερικές ανανεώσιμες πηγές, όπως τα βιομηχανικά απόβλητα θερμότητας, η αιολική και η ηλιακή ενέργεια. Επιπλέον, ως μέθοδος χαρακτηρίζεται ιδανική για περιπτώσεις που απαιτείται υδρογόνο χωρίς τυχόν παρουσία ακαθαρσιών, ενώ η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας της μεθόδου επιτρέπει την εκμετάλλευση της θερμότητας που παράγεται ως παραπροϊόν από άλλες βιομηχανικές διεργασίες[38].

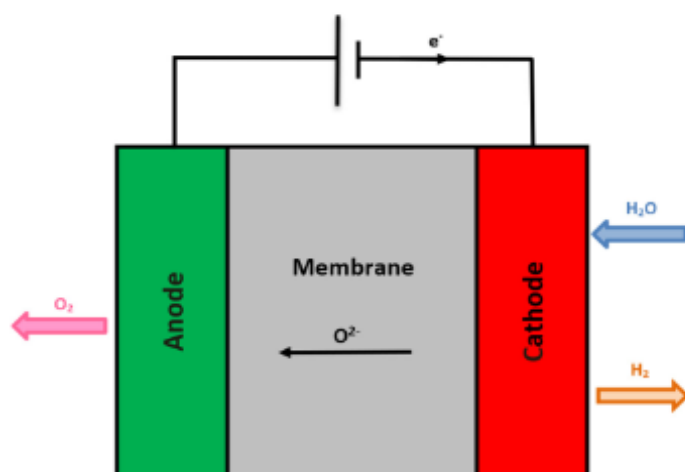
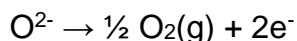
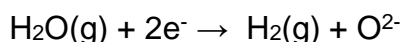


Figure 16 Διάγραμμα λειτουργίας μιας κυψέλης ηλεκτρόλυσης στερεού οξειδίου (SOEC) [32]

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, τόσο ατμός όσο και ανακυκλωμένο υδρογόνο καταφθάνουν στην κάθοδο, εκεί όπου το νερό μειώνεται για την παραγωγή υδρογόνου. Ανιόντα οξειδίου που σχηματίζονται στην κάθοδο ρέουν κατά μήκος του στερεού ηλεκτρολύτη στην άνοδο, όπου ανασυνδυάζονται για τον σχηματισμό οξυγόνου και στη συνέχεια κλείνουν το κύκλωμα με τα απελευθερωμένα ηλεκτρόνια. Αυτές οι αντιδράσεις συμβαίνουν όταν τα ηλεκτρόδια έρχονται σε επαφή με μια φάση αερίου ή ατμού, η οποία έρχεται σε σαφή αντίθεση με τα φαινόμενα που παρατηρούνται σε αλκαλικούς ή PEM ηλεκτρολύτες. Αυτό καθιστά δύσκολη τη μεγιστοποίηση της επικοινωνίας μεταξύ των ηλεκτροδίων και των αέριων χημικών

ειδών. Ακολουθούν οι μερικές αντιδράσεις της διαδικασίας της καθόδου και της ανόδου αντίστοιχα:



Σε συνδυασμό με τη μειωμένη κατανάλωση ενέργειας, η τεχνολογία SOEC προσφέρει και άλλα πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένου του γεγονότος ότι σε υψηλές θερμοκρασίες, οι κινητικοί και θερμοδυναμικοί περιορισμοί που σχετίζονται με την ηλεκτροχημική αντίδραση και τη μεταφορά αντιδρώντος/προϊόντος είναι ελάχιστοι και οι αποδόσεις κοντά στο 100% μπορούν να επιτευχθούν με πυκνότητα ρεύματος περίπου 1 A/cm<sup>2</sup>. Ωστόσο, οι ηλεκτρολύτες στερεού οξειδίου παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα, όπως ζητήματα ασφάλειας, αστάθεια και αποκόλληση ηλεκτροδίων. Η κύρια πρόκληση είναι η ισχυρή υποβάθμιση του υλικού που οφείλεται σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Έτσι, καταβάλλονται προσπάθειες από πολλούς ερευνητές για τη σταθεροποίηση των σημερινών υλικών, τη μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας και την ανάπτυξη εναλλακτικών υλικών που θα επιτρέψουν την εμπορευματοποίηση αυτών των τύπων ηλεκτρολυτών[42].

➤ **Πλεονεκτήματα μεθόδου SOEC**

- Υψηλότερη απόδοση (90–100%)
- Μη ευγενείς ηλεκτροκαταλύτες
- Υψηλή πίεση εργασίας

➤ **Μειονεκτήματα μεθόδου SOEC**

- Εργαστηριακό στάδιο
- Σχεδιασμός μεγάλου συστήματος
- Χαμηλή αντοχή

*Πίνακας 1 Σύγκριση των κύριων τεχνολογιών ηλεκτρόλυσης νερού [37], [40], [43]*



	AWE	PEM	SOE
Ηλεκτρολύτης/διάφραγμα	KOH ή NaOH (υγρή μορφή) / αμίαντος, ZrO <sub>2</sub> , NiO	PFSA, Nafion, Fumapem, Flemion, Aciplex	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – ZrO <sub>2</sub> Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – ZrO <sub>2</sub> MgO – ZrO <sub>2</sub> CaO – ZrO <sub>2</sub>
Εύρος θερμοκρασίας °C	60-90	50-90	800-1000
Εύρος πίεσης (bar)	2-10	15-30	<30
Φορέας φόρτισης	OH-	H+	O <sub>2</sub> -
Καταλύτης καθόδου	αφρός νικελίου/Ni- ανοξειδωτο ατσάλι	Πλατίνα	Ni-YSZ Ni-GDC
Καταλύτης ανόδου	Ni <sub>2</sub> CoO <sub>4</sub> , La-Sr- CoO <sub>3</sub> , Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Ir/Ru oxide	(La,Sr)MnO <sub>3</sub> , (La,Sr)(Co,Fe)O <sub>3</sub>
Τάση κυψέλης (V)	1.8-2.4	1.8-2.2	0.7-1.5
Συμβατική πυκνότητα ρεύματος (A/cm <sup>2</sup> )	0.2-0.4	0.6-0.2	0.3-1
Αποτελεσματικότητα(%)	60-80	80	>90
Χωρητικότητα H <sub>2</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	<760	<40	<40
Καθαρότητα υδρογόνου (%)	>99.8	99.999	99.9
Διάρκεια ζωής στοίβας (h)	<90000	<20000	<40000
Διάρκεια ζωής συστήματος (έτη)	20-30	10-20	-
Κατανάλωση ενέργειας του συστήματος (kWh/Nm <sup>3</sup> )	4.5-7	4.5-7.5	>3.7
Ετοιμότητα	Ωριμη	Εμπορική	Εργαστηριακή

## 2.4 Σύγκριση των μεθόδων ηλεκτρόλυσης ως προς το κόστος, την καθαρότητα παραγόμενου υδρογόνου και την ευελιξία κλίμακας

### ➤ Κόστος

Μεταξύ των μεθόδων ηλεκτρόλυσης, η φθηνότερη για παραγωγή υδρογόνου θεωρείται επί του παρόντος η αλκαλική ηλεκτρόλυση. Αυτό συμβαίνει διότι χρησιμοποιεί έναν αλκαλικό ηλεκτρολύτη, που συνήθως πρόκειται για το υδροξείδιο του καλίου (KOH), και λειτουργεί σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες. Οι αλκαλικοί ηλεκτρολύτες είναι γνωστοί για την απλότητα και την αντοχή τους, γεγονός που συμβάλλει στο χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου τους, ενώ σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης, έχουν υψηλότερη ηλεκτρική απόδοση. Είναι μια ώριμη τεχνολογία που είναι εμπορικά διαθέσιμη εδώ και αρκετές δεκαετίες, καθιστώντας την πιο οικονομική σε σύγκριση με άλλες μεθόδους ηλεκτρόλυσης.

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος παραγωγής υδρογόνου μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με παράγοντες όπως η κλίμακα του συστήματος ηλεκτρόλυσης, οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας και η διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ωστόσο, καθώς η έρευνα και η ανάπτυξη συνεχίζονται στον τομέα της ηλεκτρόλυσης, το κόστος αυτών των εναλλακτικών μεθόδων μπορεί να μειωθεί, και ίσως υπάρξει ανακατάταξη στο οικονομικό πλαίσιο.

### ➤ Καθαρότητα υδρογόνου

Με βάση την καθαρότητα του παραγόμενου υδρογόνου μεταξύ των μεθόδων ηλεκτρόλυσης, επικρατεί η ηλεκτρόλυση PEM. Η ηλεκτρόλυση PEM λειτουργεί σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (20-80°C), ενώ χαρακτηρίζεται από αρκετά υψηλή απόδοση, γρήγορους χρόνους απόκρισης και ικανότητα λειτουργίας σε μεταβαλλόμενα φορτία. Κυρίως τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρολύτη της μεθόδου αυτής, είναι αυτά που κάνουν τη διαφορά έναντι της AWE και επί της ουσίας προσφέρουν το καθαρότερο παραγόμενο υδρογόνο.

Και οι δύο μέθοδοι συνεπώς έχουν τα πλεονεκτήματά τους και οι τεχνολογικές εξελίξεις συνεχίζονται με σκοπό τη βελτίωση της αποδοτικότητας και του κόστους. Η

επιλογή της πιο οικονομικής μεθόδου εξαρτάται από την κάθε περίπτωση και τις συγκεκριμένες συνθήκες παραγωγής.

### ➤ **Ευελιξία κλίμακας**

Η ηλεκτρόλυση PEM είναι η μέθοδος που χαρακτηρίζεται από τη μεγαλύτερη ευελιξία κλίμακας. Αυτό οφείλεται στο ότι λειτουργεί αποδοτικά τόσο σε μικρούς χώρους, υπό μικρές τιμές ισχύος, αποδίδοντας ικανοποιητική παραγωγή υδρογόνου σε μικρή κλίμακα, ενώ επιτρέπει τη γρήγορη ανταπόκριση στις πιθανές αλλαγές φορτίου και συνεπώς προσφέρει τη δυνατότητα προσαρμογής της παραγωγής υδρογόνου ανάλογα με τις ανάγκες που θα προκύψουν. Αυτή η ευελιξία κλίμακας καθιστά την τεχνολογία PEM ιδανική για διάφορες εφαρμογές, από μικρής κλίμακας παραγωγή υδρογόνου για αυτοκίνητα μέχρι μεγάλης κλίμακας παραγωγή για βιομηχανικές εφαρμογές.

## **2.5 Ανάδειξη του οφέλους στροφής στο πράσινο υδρογόνο και μεταβατικές λύσεις**

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα παραπάνω, καθίσταται απαραίτητη η εύρεση εναλλακτικών, αποτελεσματικότερων και ιδιαίτερα φιλικών προς το περιβάλλον μεθόδων παραγωγής ενέργειας, σε συνδυασμό βέβαια με έναν πιο συνετό τρόπο διαχείρισης των υπαρχόντων αποθεμάτων. Μια τέτοια σημαντική λύση, και ιδίως στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, αποτελεί το πράσινο υδρογόνο. Ο χαρακτηρισμός “πράσινο” οφείλεται στο γεγονός ότι η παραγωγή του βασίζεται εξ ολοκλήρου σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αποδίδοντας έτσι μια περιβαλλοντικά φιλικότερη λύση στο τομέα παραγωγής ενέργειας, συγκριτικά με τα ορυκτά καύσιμα. Εφόσον λοιπόν αποδειχτεί οικονομικά βιώσιμο καύσιμο, θα αποτελέσει έναν ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα στην άμβλυνση του προβλήματος της διαρκώς αυξανόμενης ρύπανσης του περιβάλλοντος, ιδιαίτερα στις σημερινές συνθήκες της έντονης οικονομικής και περιβαλλοντικής κρίσης.

Οι διακρίσεις των τεχνολογιών που αφορούν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τα ηλεκτρικά μέσα μεταφοράς τα τελευταία έτη, απέδειξαν ότι μέσω του κατάλληλου συνδυασμού της πολιτικής και της τεχνολογικής καινοτομίας, αποτελούν ύψιστη δύναμη στη μετάβαση σε παγκόσμιες βιομηχανίες καθαρής ενέργειας. Το πράσινο

υδρογόνο αποτελεί ισχυρό μέσο για την απαλλαγή από τομείς όπως οι βιομηχανίες που χαρακτηρίζονται από υψηλό αποτύπωμα άνθρακα, οι μεταφορές που σχετίζονται με το εμπόριο (συνήθως πρόκειται για τεράστιες αποστάσεις), και τέλος η ναυτιλία και η αεροπορία[15].

Το υδρογόνο, μπορεί να συμβάλει στον ενεργειακό τομέα με διάφορες μορφές, όπως το «γκρι», το «μπλε», και το «πράσινο». Οι διαφορές τους αφορούν εξ ολοκλήρου τον τρόπο παραγωγής, ενώ ως κοινό χαρακτηριστικό, έχουν την εκπομπή νερού όταν καίγονται. Ωστόσο, σε πολλές μεθόδους παραγωγής, η δημιουργία του επιφέρει το σχηματισμό ενώσεων άνθρακα. Επιπρόσθετα, υπάρχουν ορισμένοι συνδυασμοί των παραπάνω ειδών, και έτσι προκύπτουν μερικές ακόμη μορφές όπως το ροζ, το κίτρινο ή το τικουάζ, κάποιες από τις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μεταβατικές λύσεις στην προσπάθεια της απανθρακοποίησης. Όπως γίνεται αντιληπτό, ως ιδανική μορφή, κρίνεται αυτή του πράσινου υδρογόνου, καθώς χαρακτηρίζεται από τη μοναδικότητα της μηδενικής παραγωγής αέριων ρύπων, χωρίς όμως να κρίνεται άμεσα εφικτή η μετάβαση στη τεχνολογία αυτή, καθώς προέχει η επιπλέον ανάπτυξη της άντλησης ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές[44].

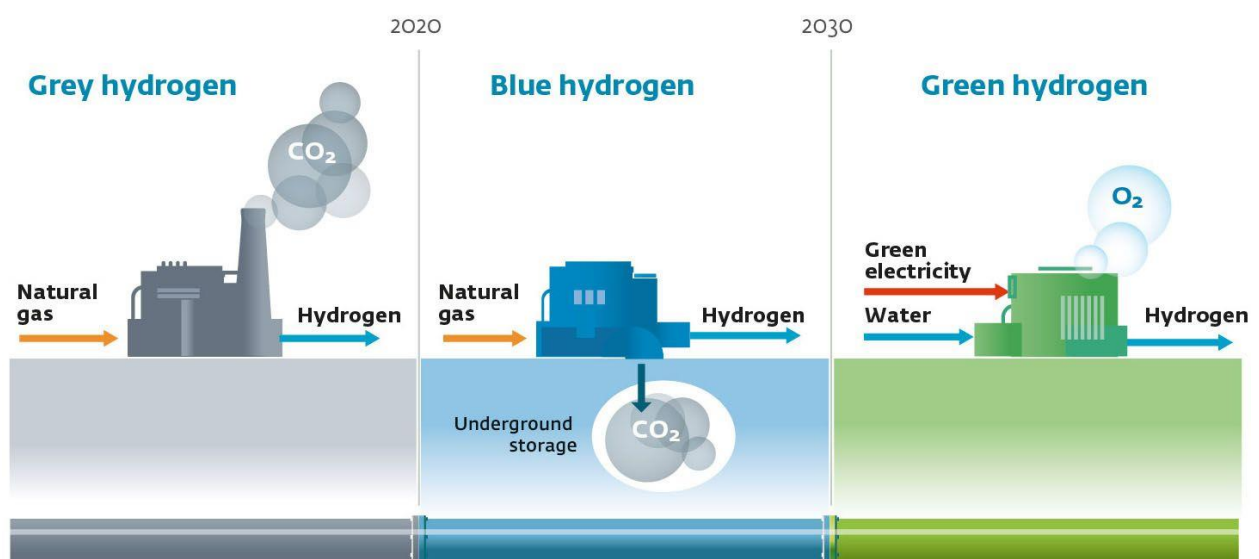


Figure 17 Οι 3 βασικές μορφές του υδρογόνου ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής του [45]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΟΧΗΜΑΤΑ ΠΡΑΣΙΝΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

### 3.1 Χαρακτηριστικά οχημάτων πράσινου υδρογόνου

Η ιδιαιτερότητα της τεχνολογίας υδρογόνου στο τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας εμφανίζεται στο μέρος του κινητήρα, ο οποίος λειτουργεί με κυψέλες καυσίμου. Ειδικότερα, πρόκειται για έναν ηλεκτροκινητήρα ο οποίος αντλεί ενέργεια μέσω της χημικής αντίδρασης που πραγματοποιείται στην κυψέλη καυσίμου μεταξύ υδρογόνου ( $H_2$ ) και οξυγόνου ( $O_2$ ). Το υδρογόνο βρίσκεται αποθηκευμένο σε μια δεξαμενή με παχύ τοίχωμα (ντεπόζιτο), η οποία συνήθως είναι τοποθετημένη κάτω από το πίσω μέρος του αμαξώματος. Κατά την τροφοδοσία της κυψέλης με καύσιμο, το υδρογόνο αναμιγνύεται με αέρα, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τη διεξαγωγή της προαναφερθείσας χημικής αντίδρασης εντός της κυψέλης, και συνεπώς την απελευθέρωση ηλεκτρονίων από το υδρογόνο, ενώ τα εναπομείναντα πρωτόνια υδρογόνου συνδυάζονται με το εναπομείναν οξυγόνο εντός της κυψέλης προς σχηματισμό νερού ως υποπροϊόν. Παράλληλα, τα ηλεκτρόνια παράγουν ηλεκτρική ενέργεια φορτίζοντας μια μπαταρία που χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του ηλεκτρικού συστήματος κίνησης. Ο ανεφοδιασμός του οχήματος επιτυγχάνεται με τρόπο παρόμοιο με την πλήρωση βενζίνης ή ντίζελ στο βενζινάδικο[46].

# HYDROGEN CAR

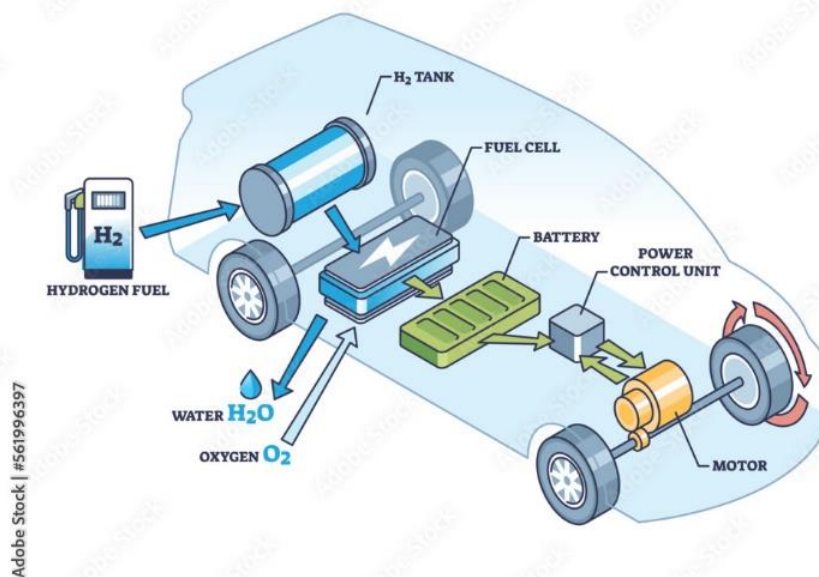


Figure 18 Βασικά χαρακτηριστικά αυτοκινήτου υδρογόνου [47]

Ουσιαστικά λοιπόν, δεν απαιτείται η χρήση κινητήρων εσωτερικής καύσης για να λειτουργήσει ένα όχημα υδρογόνου, ωστόσο ένα τέτοιο όχημα βασίζεται σε ένα ντεπόζιτο για την αποθήκευση του υδρογόνου, την κυψέλη καυσίμου, μια μπαταρία για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας, έναν αντιστροφέα (inverter) για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας και το ηλεκτρικό μοτέρ.

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά που έχει να διαχειριστεί ο οδηγός, ως παράδειγμα λήφθηκε το BMW iX5 SUV που παρουσιάστηκε το 2021 και είναι βασισμένο στο πρωτότυπο iNext Hydrogen. Είναι εξοπλισμένο με ηλεκτρικό κινητήρα, μπαταρία και στοίβα κυψελών καυσίμου, με το ηλεκτρικό σύστημα κυψελών καυσίμου να προσφέρει ισχύ 374 ίππων, ενώ το κόστος του σε περίπτωση δημόσιας πώλησης, θα πλησιάσει τα 145.000\$ (περίπου 10.000\$ ακριβότερο από τα αντίστοιχα BEV's της εταιρίας). Σύμφωνα με τη BMW, έχει τελική ταχύτητα 189.9km/h και χρειάζεται λιγότερο από επτά δευτερόλεπτα για να επιταχύνει από το μηδέν στα 100km/h. Η εκτιμώμενη αυτονομία οδήγησης υπολογίζεται στα 310 μίλια, ενώ σύμφωνα με την BMW, το iX5 Hydrogen πέτυχε την πλήρη αυτονομία οδήγησης ακόμη και κατά τη διάρκεια δοκιμών σε κρύο καιρό στους μείον 20 βαθμούς. Ο χρόνος ανεφοδιασμού συνήθως είναι 3-5 λεπτά, ενώ αναφορικά με την ενεργειακή απόδοση των

παραδοσιακών κινητήρων εσωτερικής καύσης (ICE) που είναι περίπου 30-40% λόγω της θερμότητας και της τριβής, τα FCEV's έχουν υψηλή ενεργειακή απόδοση που κυμαίνεται από 40% έως 60% και το μόνο υποπροϊόν που παράγουν είναι νερό[48], [49].

Γενικότερα, τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία χαρακτηρίζονται από τυπική αυτονομία οδήγησης μικρότερη από 400 km ανά φόρτιση, ενώ ο χρόνος επαναφόρτισης εξαρτάται από το μέγεθος της μπαταρίας και τον τύπο του φορτιστή που χρησιμοποιείται, για παράδειγμα ένα τυπικό ηλεκτρικό αυτοκίνητο (εξοπλισμένο με μπαταρία 60 kWh) χρειάζεται λιγότερο από 8 ώρες για να φορτιστεί από άδειο σε γεμάτο με σημείο φόρτισης 7 kW, ωστόσο διεξάγεται διαρκής έρευνα για βελτίωση της ταχύτητας φόρτισης από κατασκευαστές όπως η Tesla. Τα υβριδικά οχήματα με κινητήρα βενζίνης θεωρούνται μεταβατικά μοντέλα, καθώς εξακολουθούν να καταναλώνουν ορυκτά καύσιμα και εκπέμπουν ρύπους καυσαερίων. Επομένως, η αγορά ενός FCEV παρουσιάζει ελκυστικές και ευρείες προοπτικές[50].

### 3.2 Τύποι οχημάτων πράσινου υδρογόνου της αυτοκινητοβιομηχανίας

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι οχημάτων υδρογόνου διαθέσιμοι στην αγορά της αυτοκινητοβιομηχανίας, των οποίων η κατηγοριοποίηση γίνεται με βάση τις παρακάτω διαφοροποιήσεις στο μέρος του κινητήρα[51]–[53]:

- Ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλες καυσίμου (FCEV)

Τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούν ένα σύστημα πρόωσης παρόμοιο με αυτό των ηλεκτρικών οχημάτων, όπου η ενέργεια που αποθηκεύεται ως υδρογόνο μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω των κυψελών καυσίμου για να τροφοδοτήσει έναν ηλεκτροκινητήρα. Το υδρογόνο που αποθηκεύεται σε δεξαμενές υψηλής πίεσης συνδυάζεται με το οξυγόνο από τον αέρα για να δημιουργήσει μια χημική αντίδραση που παράγει ηλεκτρισμό και νερό ως υποπροϊόν. Τα FCEV's έχουν μηδενικές εκπομπές καυσαερίων και η ενεργειακή τους απόδοση είναι υψηλότερη από τα συμβατικά οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης.

- Οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου (HICEV)

Τα οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου χρησιμοποιούν υδρογόνο ως πηγή καυσίμου σε έναν τροποποιημένο κινητήρα εσωτερικής καύσης.

Αντί για βενζίνη, εγχέεται υδρογόνο στον κινητήρα, όπου καίγεται με οξυγόνο για να παράγει ισχύ. Οι πρωταρχικές εκπομπές από τα HICEV's είναι υδρατμοί και ελάχιστα οξείδια του αζώτου, καθιστώντας τα μια καθαρότερη εναλλακτική λύση στα βενζινοκίνητα οχήματα.

➤ Οχήματα με κινητήρας εσωτερικής καύσης υδρογόνου (H2-ICE)

Πρόκειται για οχήματα που λειτουργούν με καύση υδρογόνου και αέρα σε έναν ICE ανάφλεξης με σπινθήρα. Τα χαρακτηριστικά καύσης κρίνονται αρκετά ικανοποιητικά, αφού μπορεί να βασιστεί σε πολύ υψηλή απόδοση με χαμηλή παράλληλα εκπομπή ρύπων[54], [55]. Δομικά, το ICE του είναι σχεδόν πανομοιότυπο με ένα CNG, ενώ η διαφοροποίηση εντοπίζεται στην δυσκολία του τομέα αποθήκευσης του καυσίμου στο όχημα.

• Υβριδικά οχήματα υδρογόνου (HEV)

Τα οχήματα αυτά συνδυάζουν τις τεχνολογίες των FCEV's και των ηλεκτρικών οχημάτων. Τα HEV's διαθέτουν σύστημα κυψελών καυσίμου υδρογόνου και μπαταρία που μπορεί να επαναφορτιστεί από εξωτερική πηγή ενέργειας. Αυτό το διπλό σύστημα επιτρέπει στο όχημα να λειτουργεί με υδρογόνο όταν η φόρτιση των μπαταριών εξαντλείται ή απαιτείται μεγαλύτερη ενέργεια για την κίνηση του οχήματος προσφέροντας έτσι τα πλεονεκτήματα της καθαρής εκπομπής των οχημάτων με ηλεκτροκίνηση σε συνδυασμό με την μεγαλύτερη αυτονομία των οχημάτων υδρογόνου. Επιπλέον, προσφέρουν ευελιξία, μεγαλύτερη αυτονομία και μείωση της εξάρτησης από την χρονοβόρα επαναφόρτιση των μπαταριών. Ο βαθμός υβριδοποίησης (ήπιος, πλήρης, plug-in) καθορίζει επίσης το μέγεθος της μπαταρίας και την αναλογία της ισχύος του ηλεκτρικού συστήματος προς αυτή του θερμικού συστήματος.

Πίνακας 2. Κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του υδρογόνου [56], [57]

	FCEV	HEV H2-ICE	PHHV
--	------	------------	------



Κατανάλωση H <sub>2</sub> (kg/100km)	0.76	1.68	1.27
Βάρος (kg)	1.800	1.380	1.550
Διάρκεια ζωής (Km)	190.000	300.000	300.000
Θερμική ισχύς κινητήρα(kW)	-	80	58.4
Ισχύς ηλεκτρικού κινητήρα (kW)	80	-	48.6
Εμβέλεια οδήγησης (km)	600	300	400
Πίεση αποθήκευσης (bar)	700	700	700
Όγκος δεξαμενής (kg)	120	120	120
Υδρογόνο (kg)	5	5	5

Τα οχήματα υδρογόνου προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως:

- I. Μηδενικές ή μειωμένες εκπομπές καυσαερίων: Τα οχήματα υδρογόνου δεν παράγουν επιβλαβείς εκπομπές, παρά μόνο υδρατμούς και θερμότητα, μειώνοντας σημαντικά τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις.
- II. Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα: Το υδρογόνο έχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τα παραδοσιακά καύσιμα, παρέχοντας εκτεταμένη εμβέλεια οδήγησης και μικρότερους χρόνους ανεφοδιασμού.
- III. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας: Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή ή η αιολική ενέργεια, καθιστώντας το μια βιώσιμη επιλογή καυσίμου.

### 3.3 Σύγκριση αυτοκινήτων υδρογόνου με συμβατικά και ηλεκτρικά

#### 3.3.1 Κύρια πλεονεκτήματα των οχημάτων κυψελών καυσίμου υδρογόνου συγκριτικά με τα συμβατικά οχήματα

- Γρήγοροι χρόνοι ανεφοδιασμού
- Μεγαλύτερη αυτονομία οδήγησης σε σύγκριση με τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα
- Μικρότερο βάρος λόγω των μικρότερων μπαταριών
- Καθαρή καύση, καθώς η καύση του με οξυγόνο έχει ως προϊόντα μόνο νερό και θερμότητα, ενώ όταν καεί με ατμοσφαιρικό αέρα (περίπου 68% άζωτο), έχει ως αποτέλεσμα τη παραγωγή αμελητέων ποσοτήτων οξειδίων του αζώτου.
- Δεν υπάρχει επιβλαβής αντίκτυπος της χρήσης του στο περιβάλλον.
- Συμβολή στη μείωση του ρυθμού κατανάλωσης των ορυκτών καυσίμων.
- Ποικιλομορφία στους τρόπους παραγωγής, και επομένως μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη αποκεντροποιημένων συστημάτων παραγωγής ενέργειας.

Όσον αφορά τα μειονεκτήματα χρήσης του υδρογόνου, τα περισσότερα έχουν να κάνουν με την ελλιπή σημερινή υποδομή.

- Περιορισμένη υποδομή ανεφοδιασμού
- Υψηλό κόστος οχήματος
- Περιορισμένη διαθεσιμότητα οχημάτων
- Η αποθήκευση του. Δεδομένου του ότι το υδρογόνο είναι πολύ ελαφρύ, η συμπίεση μεγάλης ποσότητας σε μικρού μεγέθους δεξαμενή είναι δύσκολη λόγω των υψηλών πιέσεων που χρειάζονται για να επιτευχθεί η υγροποίηση
- Η έλλειψη οργανωμένου δικτύου διανομής του
- Τα συστήματα κυψελών καυσίμου δεν είναι ακόμη τόσο ανθεκτικά όσο οι κινητήρες εσωτερικής καύσης, ειδικά σε ορισμένες περιοχές θερμοκρασίας και υγρασίας.
- Η τιμή του είναι σχετικά υψηλή σε σύγκριση με αυτή της βενζίνης ή του πετρελαίου

- Αν και στις περισσότερες των περιπτώσεων το υδρογόνο θεωρείται περισσότερο ασφαλές από οποιοδήποτε άλλο καύσιμο, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες μπορεί να γίνει εξαιρετικά επικίνδυνο.

### 3.3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά και σύγκριση οχημάτων κυψελών καυσίμου υδρογόνου με ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας

Και τα δύο αποτελούν μια μορφή ηλεκτροκίνησης, με την κύρια διαφοροποίηση να εντοπίζεται στο μέρος του κινητήρα. Πιο συγκεκριμένα, ένα αυτοκίνητο υδρογόνου, είναι εφοδιασμένο με κατάλληλες δεξαμενές, τις ενεργειακές κυψέλες, οι οποίες μαζί με αγωγούς συμβάλουν στη τροφοδοσία του κινητήρα με υδρογόνο, έχοντας ως αποτέλεσμα την κίνηση του αμαξίου. Συνήθως, οι ενεργειακές κυψέλες βρίσκονται εγκατεστημένες στο εμπρός μέρος του αμαξώματος, όπως και ο κινητήρας, ενώ στο πίσω μέρος είναι αποθηκευμένο το υδρογόνο. Τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου ή FCEV (Fuel Cell Electric Vehicles), χρησιμοποιούν ως τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τον συνδυασμό υδρογόνου-οξυγόνου, αποσκοπώντας στη τροφοδοσία του ηλεκτροκινητήρα. Αναφορικά με τον ανεφοδιασμό, πραγματοποιείται σε ένα πρατήριο καυσίμου, όπως και σήμερα, μέσω μιας δεξαμενής υδρογόνου, με μέγιστο χρόνο ανεφοδιασμού κοντά στα πέντε λεπτά. Συνεπώς, αποφεύγεται η φόρτιση καθώς δεν χρειάζεται η αποθήκευση ποσού ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά η παραγωγή της κατόπιν της ανάλογης ζήτησης.

Τα ηλεκτρικά οχήματα είναι επίσης φθηνότερα από τα αυτοκίνητα που κινούνται με υδρογόνο, ενώ το κόστος επαναφόρτισης είναι επίσης μικρότερο σε περιόδους εκτός αιχμής του δικτύου, καθιστώντας τα ηλεκτρικά οχήματα μια καλή μακροπρόθεσμη επένδυση. Τόσο η αυτονομία όσο και ο χρόνος ανεφοδιασμού, διαδραματίζουν σημαντικό παράγοντα στην επιλογή ενός αυτοκινήτου, και αυτό γίνεται εμφανές από το γεγονός ότι το 78% των στελεχών της αυτοκινητοβιομηχανίας θεωρεί ότι τα FCEV's θα αποτελέσουν σημαντική ανακάλυψη στο τομέα της ηλεκτροκίνησης. Ωστόσο, όσον αφορά τα FCEV's, κρίνεται απαραίτητο να ενταχθούν στην αγορά με μια προσιτή τιμή, που θα τα καθιστά ανταγωνιστικά με τα αντίστοιχα του ηλεκτρικού τομέα[58].

Πίνακας 3. Αυτονομία και κόστος BEV μοντέλων [59]

Μοντέλα	Tesla Model S	Tesla Model 3	Chevy Bolt	Kia Niro EV	Nissan Leaf
Αυτονομία (miles)	405	272	259	239	226
Κόστος (\$) (MSRP)	104.990	46.990	26.595	24.690	27.800

Πίνακας 4. Αυτονομία και κόστος FCEV μοντέλων [59]

Μοντέλα	Toyota Mirai	Honda Clarity	Hyundai Nexo
Αυτονομία (miles)	312	360	380
Κόστος (\$) (MSRP)	49.500	33.500	59.435

Ενδεχομένως το μεγαλύτερο μειονέκτημα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι η αυτονομία σε σύγκριση με τον χρόνο που χρειάζεται για την επαναφόρτιση. Αυτό εξαρτάται από την μπαταρία και τον τύπο του σταθμού φόρτισης που χρησιμοποιείται, αλλά γενικά η αυτονομία και οι χρόνοι ανεφοδιασμού κάνουν την οδήγηση μεγάλων αποστάσεων σε ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο πιο δύσκολη συγκριτικά με το υδρογόνο ή τους παραδοσιακούς κινητήρες εσωτερικής καύσης. Σχετικά με τους σταθμούς φόρτισης υψηλής ισχύος, επιτρέπουν ταχύτερη επαναφόρτιση αλλά το πιθανότερο είναι να υπάρξει συνέπεια στην τιμή του ανεφοδιασμού. Για παράδειγμα, στη Γερμανία, όπου οι σταθμοί φόρτισης χρεώνουν ανά κιλοβατώρα, οι σταθμοί φόρτισης υψηλής ισχύος είναι ακριβότεροι κατά περίπου 10€/kwh (συνήθως 0,30€/kwh), αλλά μπορεί να είναι έως και 0,90€/kwh ώρα σε ορισμένα δίκτυα μη συνεργατών. Ειδικότερα, το κόστος επαναφόρτισης στη Γαλλία ανέρχεται σε 2,25€ για μια διαδρομή 100 χιλιομέτρων (με βάση κατά μέσο όρο 15 kWh ανά 100 χιλιόμετρα) ενώ η ίδια απόσταση θα κόστιζε 3€ στο Ηνωμένο Βασίλειο[60].

Το κόστος ανεφοδιασμού ενός αυτοκινήτου με υδρογόνο είναι τετραπλάσιο από αυτό της επαναφόρτισης ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου στις Ηνωμένες Πολιτείες. Ωστόσο, φαίνεται ότι θα αλλάξει και αυτό, καθώς το κόστος των κυψελών καυσίμου υδρογόνου έχει ήδη μειωθεί κατά περισσότερο από 80% τα τελευταία χρόνια.

Όσον αφορά την ασφάλεια, το Toyota Mirai, για παράδειγμα, διαθέτει δύο δεξαμενές συμπιεσμένου υδρογόνου με πυκνότητα αποθήκευσης 5,7wt% και

χωρητικότητα/βάρος  $60 \text{ dm}^3/42,8 \text{ kg}$ [51], ενώ εφαρμόζει ειδικό σχέδιο για την αποφυγή της διαρροής υδρογόνου σε περίπτωση σύγκρουσης. Αυτό αφορά ένα επιπλέον ρεζερβουάρ καυσίμου έξω από την καμπίνα, στο οποίο θα αποθηκευτεί το υδρογόνο, και σε πιθανή περίπτωση διαρροής του αερίου θα εξαερωθεί ακίνδυνα στην ατμόσφαιρα. Επειδή το υδρογόνο είναι ελαφρύτερο από τον αέρα, διαχέεται απευθείας στο διάστημα με ταχύτητα 20 μίλια/ώρα, καθιστώντας το ασφαλές, εκτός εάν επιτρέπεται να συσσωρεύεται σε κλειστούς χώρους σε μεγάλες ποσότητες.

### 3.4 Κυψέλες καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου έχουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από άλλες ενεργειακές συσκευές που τις καθιστούν κατάλληλες για εφαρμογές οχημάτων μεγάλης εμβέλειας και αυτά τα πλεονεκτήματα έχουν ως εκ τούτου ωθήσει την έρευνα και την ανάπτυξη οχημάτων που κινούνται με FC. Οι κυψέλες καυσίμου είναι σημαντικά μέρη της τεχνολογίας κίνησης με καύσιμο υδρογόνο και λειτουργούν ως μετατροπείς ενέργειας που μετατρέπουν το υδρογόνο και το οξυγόνο σε νερό, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα. Οι κυψέλες καυσίμου περιλαμβάνουν τρεις βασικούς τύπους[61], [62]:

- τις κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη πολυμερούς ηλεκτρολύτη ή κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (Proton-Exchange Membrane Fuel Cells - PEMFCs),
- τις κυψέλες αλκαλικής μεμβράνης (Alkaline Fuel Cells - AFCs) και
- τις κυψέλες στερεού οξειδίου υψηλής θερμοκρασίας (Solid Oxide Fuel Cells - SOFCs),

Παρακάτω θα αναφερθούν ορισμένα χαρακτηριστικά των τύπων PEMFC και SOFC καθώς είναι αυτοί που πρωταγωνιστούν στον τομέα των κυψελών καυσίμου υδρογόνου.

#### 3.4.1 Κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)

Η κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων χρησιμοποιεί μια μεμβράνη με βάση το νερό, όξινο πολυμερή ως ηλεκτρολύτη, και τα ηλεκτρόδια είναι βασισμένα σε πλατίνα. Η θερμοκρασία λειτουργίας τους βρίσκεται σε χαμηλές

θερμοκρασίες (<100°C) και χρησιμοποιούνται ευρέως στα οχήματα υδρογόνου λόγω των υψηλών τους επιδόσεων, της υψηλής ενεργειακής απόδοσης και της γρήγορης απόκρισής τους. Το καύσιμο υδρογόνο υποβάλλεται σε επεξεργασία στο μέρος της ανόδου, όπου τα ηλεκτρόνια διαχωρίζονται από τα πρωτόνια με τη συμβολή ενός καταλύτη που είναι βασισμένος στην πλατίνα.

Αυτές οι κυψέλες χρησιμοποιούν μια μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων για να μεταφέρουν τα πρωτόνια από το ηλεκτρόδιο της ανόδου προς το αντίστοιχο της καθόδου, ενώ τα ηλεκτρόνια οδεύουν σε εξωτερικό κύκλωμα όπου παράγουν ηλεκτρισμό. Στην κάθοδο, ανασυνδυάζονται τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια με εισαγόμενο οξυγόνο από τον αέρα προς τη παραγωγή νερού, που εξέρχεται και ως το μοναδικό απόβλητο[63].

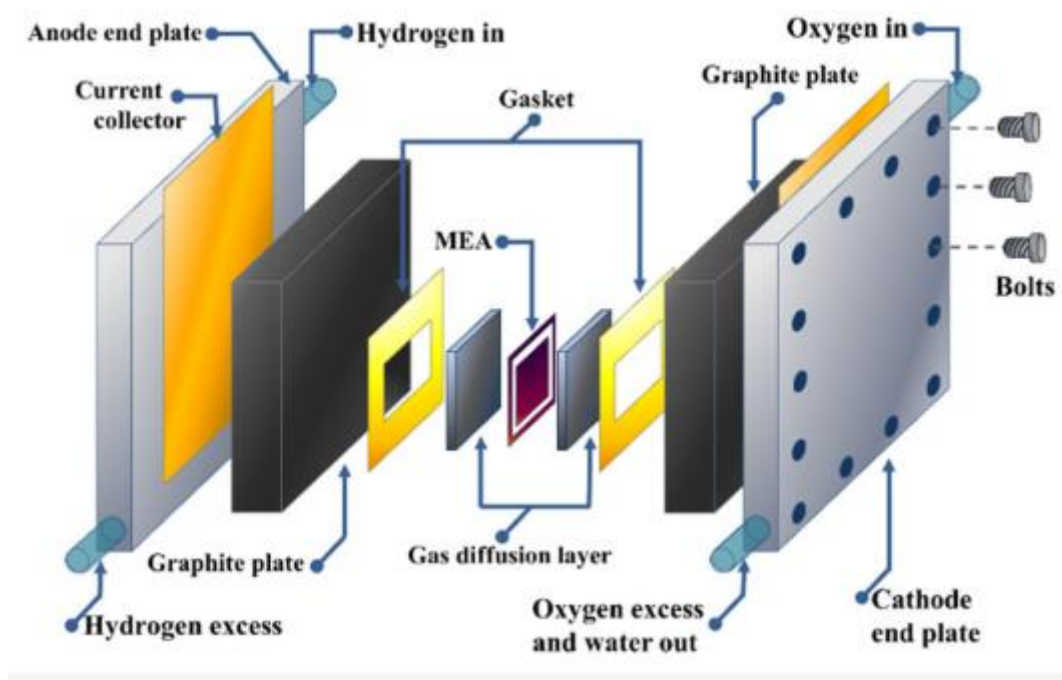


Figure 19. Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τα στοιχεία ενός μόνο PEMFC [64]

Ο υποστηριζόμενος από άνθρακα καταλύτης πλατίνας (Pt/C), με τη μορφή σωματιδίων Pt υψηλής διασποράς με μέγεθος 2-6 nm που υποστηρίζονται σε σωματίδια άνθρακα με μέγεθος 15-50 nm, είναι ο πιο κοινός εμπορικός καταλύτης σε PEMFC. Στην πράξη, το PEM πρέπει να παρέχει υψηλή αγωγιμότητα πρωτονίων, επαρκή φράγμα κατά της ανάμειξης, καθώς και χημικά και μηχανική σταθερότητα στο

περιβάλλον FC. Η πιο γνωστή εμπορική μεμβράνη είναι η Nafion και αυτό διότι είναι αποτελεσματική ως προς τη μεταφορά πρωτονίων ενώ παράλληλα αποτρέπει τη μεταφορά ηλεκτρονίων.

### 3.4.2 Κυψέλες στερεού οξειδίου υψηλής θερμοκρασίας (SOFCs)

Οι κυψέλες SOFCs είναι σχεδιασμένες για λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες και αποτελούνται από τρία βασικά μέρη: μια πορώδη άνοδο, μια πορώδη κάθοδο και ένα πυκνό στρώμα ηλεκτρολύτη. Ο ηλεκτρολύτης πρέπει να έχει αυτό το χαρακτηριστικό ώστε να επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός του αέρα και το καυσίμου, ενώ θα πρέπει να έχει υψηλή ιοντική αγωγιμότητα ώστε να επιτραπεί στα ιόντα οξυγόνου να μεταφέρονται επιτυχώς και να λειτουργεί παράλληλα ως ηλεκτρικό προστατευτικό. Λόγω των αργών χρόνων εκκίνησης που τις χαρακτηρίζουν όμως, πρόκειται να καλύψουν τις ανάγκες βοηθητικών μονάδων ισχύος του οχήματος (κυρίως φορτηγά). Υπάρχουν διάφορα είδη SOFC, ανάλογα με την θερμοκρασία που λειτουργούν:

- SOFC υψηλής θερμοκρασίας (H-SOFCs): 850°C - 1000°C
- SOFC ενδιάμεσης θερμοκρασίας (IT-SOFCs): 650°C - 850°C
- SOFC χαμηλής θερμοκρασίας (LT-SOFCs) κάτω από 650°C

Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας τους, τα SOFC έχουν ορισμένους περιορισμούς, όπως υψηλό κόστος συντήρησης και μείωση της αντοχής των στοιχείων με το χρόνο. Κάθε στοιχείο κυψέλης εκτίθεται σε υψηλή θερμοκρασία, οδηγώντας σε προβλήματα διεπαφής, τα οποία κατά συνέπεια υποβαθμίζουν την απόδοση της κυψέλης. Όσον αφορά τους ηλεκτρολύτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν προς το παρόν, είναι το ζιρκόνιο σταθεροποιημένο με ύττρια (YSZ), ζιρκόνιο σταθεροποιημένο με σκάντια (ScSZ), ζιρκόνιο σταθεροποιημένο με μαγνήσιο (MgSZ) και ζιρκόνιο σταθεροποιημένο με ασβέστιο (CaSZ), προσφέρουν διαφορετικές ιδιότητες, και συνεπώς η επιλογή του ηλεκτρολύτη γίνεται με βάση τα ζητούμενα χαρακτηριστικά [65], [66].

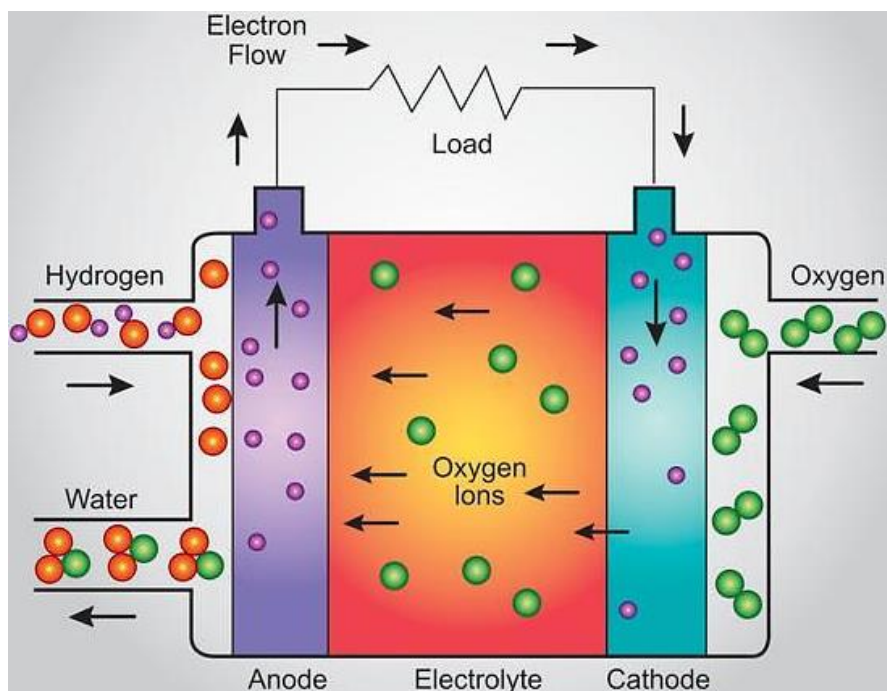


Figure 20 Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου [67]

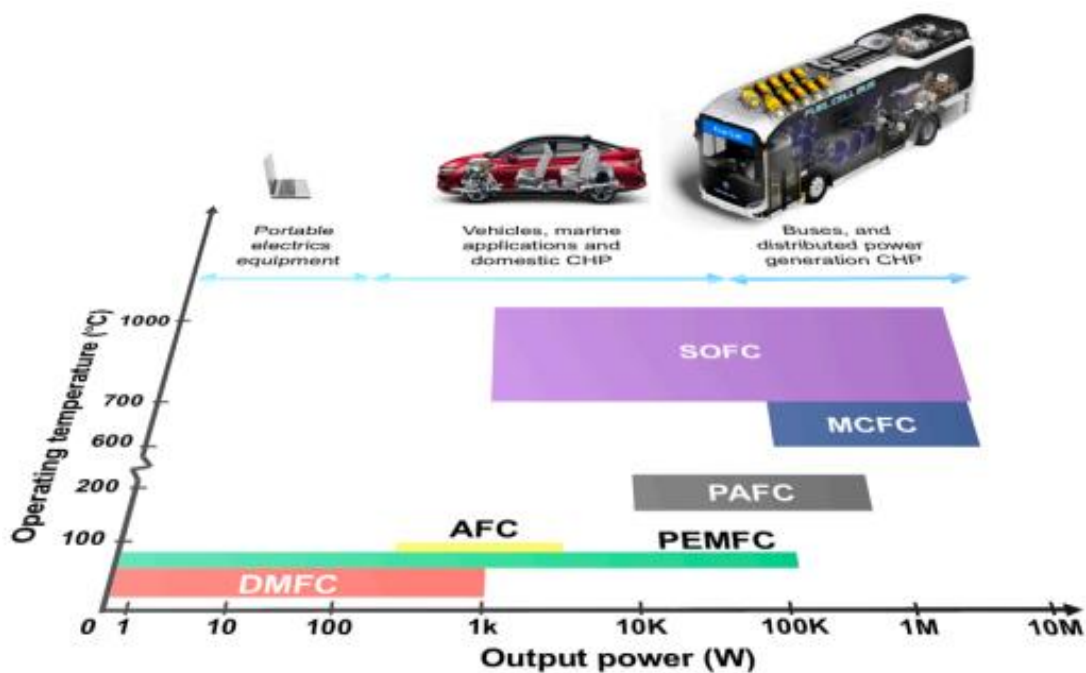


Figure 21 Εύρος θερμοκρασίας και ισχύος λειτουργίας διαφορετικών τύπων FC [65]

Οι κυψέλες καυσίμου προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας. Καταναλώνουν καθαρό υδρογόνο και παράγουν μόνο νερό και θερμότητα ως απόβλητα. Είναι αποδοτικές, έχουν υψηλή απόδοση, μικρή εκπομπή θερμότητας και παράγουν ελάχιστες εκπομπές ρύπων. Επιπλέον,



μπορούν να λειτουργήσουν σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και παρέχουν σταθερή ισχύ και απόδοση. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμα προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν, όπως η μείωση του κόστους και η αύξηση της διάρκειας ζωής.

Πίνακας 5. Χαρακτηριστικά των τύπων κυψελών καυσίμου[52], [61], [68]

Τύπος	PEMFC	SOFC
Ηλεκτρολύτης	Συνθετικό πολυμερές (nafion)	Ζιρκόνια σταθεροποιημένη με Ύττρια
Καύσιμο	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> etc.
Αποδοτικότητα(%)	40-60	~60
Εύρος θερμοκρασίας (°C)	<100	500-1000
Ισχύς στοιβάς(kw)	~1-250	<1-3000
Πλεονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> <li>Χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας</li> <li>Γρήγορη εκκίνηση</li> <li>Λιγότερη διάβρωση και προβλήματα ηλεκτρολυτών</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Συνδυασμός θερμότητας και ισχύος</li> <li>Υψηλότερη απόδοση</li> <li>Ευελιξία καυσίμου</li> <li>Υβριδικός αεριοστρόβιλος</li> </ul>
Μειονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ακριβός καταλύτης.</li> <li>Ευαίσθητο σε ακαθαρσίες καυσίμου</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας</li> <li>Υψηλή διάβρωση</li> <li>Κακή αντοχή</li> <li>Αργή εκκίνηση</li> </ul>

### 3.5 Ποιες οι κύριες διαφορές μεταξύ κυψελών καυσίμου – μπαταριών;

Στον τομέα των μπαταριών, η έλλειψη πόρων οδηγεί σε αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων. Επί του παρόντος, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αποτελούν περίπου το 70% των μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων και το 90% των μπαταριών αποθήκευσης δικτύου. Και οι δύο τεχνολογίες, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω χημικών αντιδράσεων, και πιο συγκεκριμένα οι μπαταρίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας αποθηκευμένη ενέργεια, ενώ οι κυψέλες καυσίμου το επιτυγχάνουν με τη καύση υδρογόνου. Ωστόσο, οι μπαταρίες οφείλουν τη παραγωγή τους σε υλικά όπως το λίθιο, το νικέλιο και το κοβάλτιο, κάθε ένα εκ των οποίων κρίνεται σε έλλειψη λόγω των περιορισμένου αριθμού ορυκτών πόρων. Και οι δύο τεχνολογίες εμφανίζουν απώλειες κατά τη μετατροπή της μορφής ενέργειας, ωστόσο μπορούν να επαναχρησιμοποιήσουν τη χαμένη λόγω θερμότητας ενέργεια, για παροχή θερμότητας στη καμπίνα του οχήματος, επιτυγχάνοντας παράλληλα την μείωση της αποστράγγισης της μπαταρίας. Όσον αφορά την αγορά, αναπτύσσεται με ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 13,1%, που προβλέπεται να αναπτυχθεί και να φτάσει τα 135 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2031. Η αγορά κυψελών καυσίμου αναπτύσσεται επίσης γρήγορα, εκτιμάται ότι θα αυξάνεται κατά 36% ετησίως και θα φτάσει τα 29 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2028. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως σε κρίο καιρό, οι κυψέλες καυσίμου είναι σχεδόν εξίσου αποδοτικές με τις μπαταρίες, και αυτό οφείλεται στο ότι οι μπαταρίες των EV's χρησιμοποιούν έως και το 40% της ηλεκτρικής ενέργειας για θέρμανση.

**Πίνακας 6. Σύγκριση κυψέλης καυσίμου με μπαταρία [69]**

Συσκευή	Ενεργειακή πυκνότητα	Χρόνος ζωής	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Κυψέλη καυσίμου (FC)	Πολύ υψηλή	20-25 έτη	<ul style="list-style-type: none"> <li>Υψηλή απόδοση</li> <li>Αρθρωτό και συμπαγές</li> <li>Ομαλή απόδοση ισχύος</li> <li>Γρήγορη αναπλήρωση H<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Υψηλό κόστος</li> <li>Αργή κρύα εκκίνηση</li> <li>Κίνδυνοι λόγω του εύφλεκτου H<sub>2</sub></li> <li>Υψηλή τιμή H<sub>2</sub></li> </ul>

			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Φιλική προς το περιβάλλον</li> </ul>	
Μπαταρία	Υψηλή	4-6 έτη	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Φορητή και επαναφορτιζόμενη</li> <li>• Χαμηλό κόστος</li> <li>• Ωριμη τεχνολογία</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αργή επαναφόρτιση</li> <li>• Μικρή διάρκεια ζωής</li> <li>• Ρύπανση από την προετοιμασία και την ανακύκλωση μπαταριών</li> <li>• Εύφλεκτος υγρός ηλεκτρολύτης</li> </ul>

### 3.6 Συμπέρασμα

Τα οχήματα υδρογόνου είναι πιο ακριβά από τα ηλεκτρικά οχήματα, χωρίς επιλογές προϋπολογισμού στην αγορά επί του παρόντος, η τιμή για ένα νέο όχημα υδρογόνου είναι συγκρίσιμη με εκείνη ενός ηλεκτρικού οχήματος κορυφαίας ποιότητας. Επιπλέον, το κόστος ανεφοδιασμού είναι επίσης υψηλότερο, περίπου 50-75£ για ένα γεμάτο ρεζερβουάρ. Το αρχικό κόστος μειώνεται ελαφρώς από το κόστος φόρτισης, καθώς είναι περίπου 35£ για την πλήρη επαναφόρτιση μιας μπαταρίας 100kWh σε φορτιστή δρόμου στο Ηνωμένο Βασίλειο και περίπου 12£ εάν επαναφορτίζεται στο σπίτι.

Ορισμένες αυτοκινητοβιομηχανίες που επενδύουν στην παραγωγή αυτοκινήτων υδρογόνου, όπως η Toyota, έχουν αυξήσει τις παραγωγικές τους δυνατότητες, ώστε να επιτύχουν ανάλογη μείωση του κόστους παραγωγής. Είναι γεγονός πως η πραγματική πρόκληση σχετικά με τις κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, είναι η έλλειψη υποδομής. Συνεπώς, αύξηση των σταθμών ανεφοδιασμού για τα FCEVS, πρόκειται να οδηγήσει σε αύξηση της παραγωγής τους, και συνεπώς στη μείωση του κόστους παραγωγής. Αντίθετα, στα BEVS, η αύξηση εμβέλειας απαιτεί μεγαλύτερη μπαταρία, αλλά με προσθήκη μεγαλύτερης μπαταρίας, πρόκειται να

αυξηθεί το βάρος του αυτοκινήτου, κάτι που πέραν ενός ορισμένου σημείου, το πρόσθετο βάρος θα αντισταθμίζει το επιπλέον εύρος. Τέλος, για να μπορέσει το υδρογόνο να καταστεί βιώσιμο καύσιμο, θα πρέπει να υποστεί μείωση του κόστους του από 3-5€/kg σε 1-2€/kg.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΝΟΜΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

### 4.1 Δυνατότητες αποθήκευσης υδρογόνου

Διαδικασίες όπως η αποθήκευση, και η παράδοση αναφορικά με τον τομέα της τεχνολογίας του υδρογόνου, αποτελούν βασικά μέρη της οικονομίας του υδρογόνου στην αυτοκινητοβιομηχανία. Γενικότερα, η αποθήκευση του υδρογόνου είναι εφικτή τόσο υπό την αέρια μορφή υπό πίεση, όσο και υπό υγρή φάση, ειδικά όταν πρόκειται για μεγάλης κλίμακας χρήση του υδρογόνου. Στην καθαρή του μορφή, το υδρογόνο έχει χαμηλή ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα και υψηλή βαρυμετρική ενεργειακή πυκνότητα, κάτι που έχει αντίκτυπο και στον τρόπο αποθήκευσης-μεταφοράς του. Αναφορικά με τις μεθόδους αποθήκευσης, απαρτίζονται από τη φυσική αποθήκευση  $H_2$  ως συμπιεσμένο αέριο, τη φυσική αποθήκευση ως κρυογονικό υγρό υδρογόνο και τις μεθόδους αποθήκευσης σε στερεά μορφή. Επί του παρόντος, επικρατούν οι πρώτες δύο κατηγορίες αποθήκευσης, ενώ η τελευταία βρίσκεται υπό εξέλιξη και πιθανότατα θα χρησιμοποιηθεί περισσότερο μελλοντικά.

Το υδρογόνο μπορεί να συμπιεστεί σε κατάλληλες δομές και να αποθηκευτεί με τη μορφή αερίου σε κυλίνδρους, δοχεία, υπόγειες κοιλότητες. Στα πρώτα στάδια εφαρμογής για την μεταφορά του καυσίμου, η οικονομικά βέλτιστη λύση, ήταν η χρήση του υγροποιημένου υδρογόνου και των ανάλογων δικτύων υδρογόνου, όπως και του φυσικού αερίου. Ωστόσο, ο τύπος αποθήκευσης του υδρογόνου αλλάζει ανάλογα με την ποσότητα του προς αποθήκευση υδρογόνου και τον χρόνο που πρόκειται αυτό να μείνει αποθηκευμένο. Για να αντιμετωπιστούν οι τρέχουσες και οι πιθανές μελλοντικές

απαιτήσεις της αγοράς ενέργειας υδρογόνου, η ύπαρξη μιας ισχυρής και αξιόπιστης λύσης αποθήκευσης για κάθε εφαρμογή είναι ζωτικής σημασίας[70].

## 4.2 Μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης υδρογόνου κατηγοριοποιούνται σε δύο κύριες ομάδες: φυσικής και υλικής βάσης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η πρώτη ομάδα περιέχει την αποθήκευση υδρογόνου ως συμπιεσμένο αέριο, ψυχρό/κρυο-συμπιεσμένο και υγρό υδρογόνο, ενώ η δεύτερη ομάδα αποτελείται από την αποθήκευση η οποία στηρίζεται στα υλικά και έχει δύο ουσιαστικές υποομάδες χημική ρόφηση και φυσική ρόφηση/φυσική απορρόφηση.

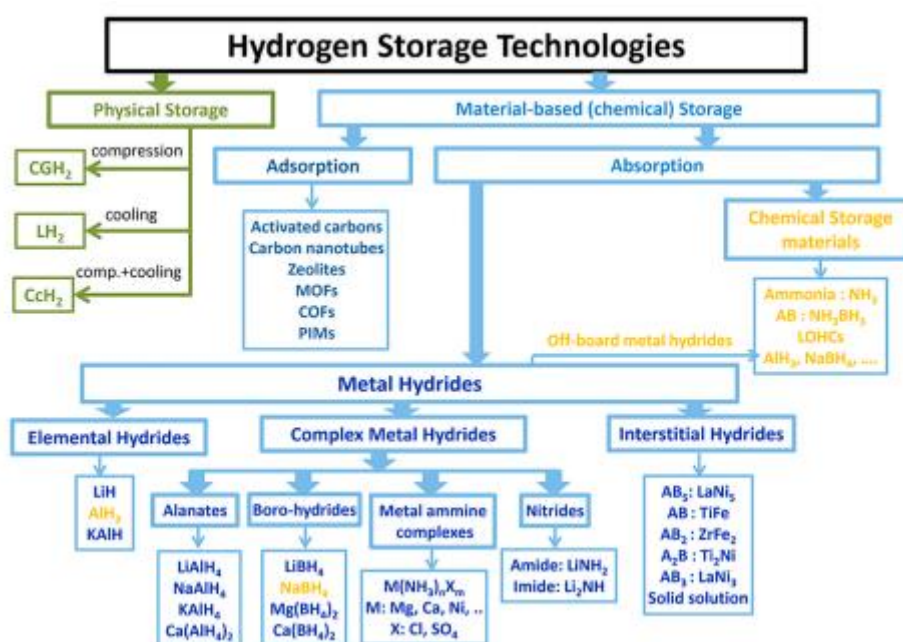


Figure 22 Τεχνολογίες αποθήκευσης υδρογόνου [71]

Οι εφαρμογές αποθήκευσης υδρογόνου μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες: σταθερές και κινητές εφαρμογές. Οι μέθοδοι σταθερής αποθήκευσης προορίζονται κυρίως για επιτόπια αποθήκευση είτε στο σημείο παραγωγής είτε στη χρήση, και για σταθερή παραγωγή ενέργειας. Οι κινητές εφαρμογές αφορούν είτε την μεταφορά του αποθηκευμένου υδρογόνου σε σημείο αποθήκευσης ή χρήσης, είτε την χρήση υδρογόνου σε ένα όχημα. Η μεταφορά υδρογόνου ως συμπιεσμένο αέριο με ρυμουλκούμενο προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα όταν πρόκειται για μικρή ποσότητα σε μικρές αποστάσεις έως (200km). Το συμπιεσμένο υδρογόνο μπορεί να

μεταφερθεί με κυλίνδρους ή συσσωρευμένους σωλήνες σε τρέιλερ φορτηγών με πιέσεις μεταξύ 200 και 500bar, όπου για τη κατάσταση των 200bar, η χωρητικότητα του τρέιλερ μπορεί να φτάσει τα 420kg H<sub>2</sub>, ενώ με τη συμβολή σύνθετων υλικών, μπορεί να φτάσει τα 666kg H<sub>2</sub>. Το νέο τρέιλερ τύπου Jumbo μπορούσε να μεταφέρει 1100 κιλά συμπιεσμένου υδρογόνου στα 500bar. Το υγρό υδρογόνο είναι πιο αποτελεσματικό για μεγαλύτερους όγκους ή μεγαλύτερες αποστάσεις, ενώ η μεταφορά του μέσω σωληνώσεων κοστίζει 2\$/GJ, που συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους μεταφοράς, πρόκειται για λιγότερο από το ένα δέκατο, που κυμαίνονται γύρω στα 20–40\$/GJ. Επιπρόσθετα, οι σωληνώσεις υδρογόνου έχουν το δυνατότητα αξιοποίησης των ήδη υπάρχοντων δικτύων φυσικού αερίου, σε συνδυασμό με τους συμπιεστές τους υπό μικρές τροποποιήσεις[71], [72].

#### 4.2.1 Αποθήκευση συμπιεσμένου H<sub>2</sub>

Στη μέθοδο αυτή, το υδρογόνο απαιτείται να συμπιεστεί στα 700bar ώστε να καλυφθεί η αναγκαία ογκομετρική χωρητικότητα και να αποθηκευτεί σε κατάλληλες δεξαμενές. Λόγω της χαμηλής πυκνότητας του υδρογόνου, απαιτείται χαμηλή θερμοκρασία ή υψηλή πίεση για την αποθήκευση. Καθώς η πίεση αυξάνεται από 1 bar σε 700 bar, η πυκνότητα του υδρογόνου αυξάνεται από 0,1 g/L σε 40 g/L και κατά συνέπεια η ογκομετρική πυκνότητα ενέργειας αυξάνεται από 0,0033kWh/L σε 1,32kWh/L αντίστοιχα. Τόσο η βαρυμετρική όσο και η ογκομετρική πυκνότητα αποθήκευσης υδρογόνου αυξάνονται αυξάνοντας την πίεση του υδρογόνου. Ωστόσο, προκύπτουν ζητήματα ασφάλειας. Τα δοχεία πίεσης χωρίζονται σε πέντε τύπους ανάλογα με τα εξαρτήματά τους. Υπάρχουν τέσσερις τύποι δοχείων πίεσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι οποίοι διαφοροποιούνται ως προς το υλικό κατασκευής, το κόστος, και τα φυσικά μεγέθη τους[73], [74]:

1. Ο πρώτος αναφέρεται σε πλήρως μεταλλικά δοχεία πίεσης, είναι ο πιο συμβατικός, ο λιγότερο ακριβός και επίσης ο βαρύτερος με περίπου 3lb/L. Συνήθως κατασκευάζονται από αλουμίνιο ή χάλυβα και μπορούν να περιέχουν πιέσεις έως και 30MPa.

2. Ο τύπος II αφορά χαλύβδινο δοχείο πίεσης με επικάλυψη από σύνθετες ίνες γυαλιού. Ο χάλυβας και το σύνθετο υλικό μοιράζονται περίπου το ίδιο δομικό φορτίο. Ως κατασκευή είναι ακριβότερη κατά 50% από ότι τον τύπο I, ωστόσο υπερέρχει στον τομέα του βάρους κατά 30-40%(ελαφρύτερη κατασκευή), ενώ προσφέρει τη μέγιστη δυνατή ανοχή πίεσης.
3. Αναφορικά με τον τύπο III, πρόκειται για πλήρη σύνθετο περιτύλιγμα με μεταλλική επένδυση. Η σύνθετη δομή βασίζεται σε ανθρακόνημα, ενώ η επένδυση (αλουμίνιο) εξυπηρετεί σκοπούς σφράγισης. Σε αυτόν τον τύπο δοχείου πίεσης η μεταλλική επένδυση μοιράζεται περίπου το 5% του μηχανικού φορτίου. Αυτός ο τύπος δοχείου πίεσης έχει αποδειχθεί αξιόπιστος για πίεση λειτουργίας 45 MPa, ωστόσο δεν θεωρείται αξιόπιστος για πιέσεις που πλησιάζουν τα 70 MPa. Ο τύπος III παρέχει βάρος 0,75-1lb/L, που είναι περίπου το μισό του τύπου II, αλλά το κόστος τους θα ήταν διπλάσιο από το κόστος του τύπου II.

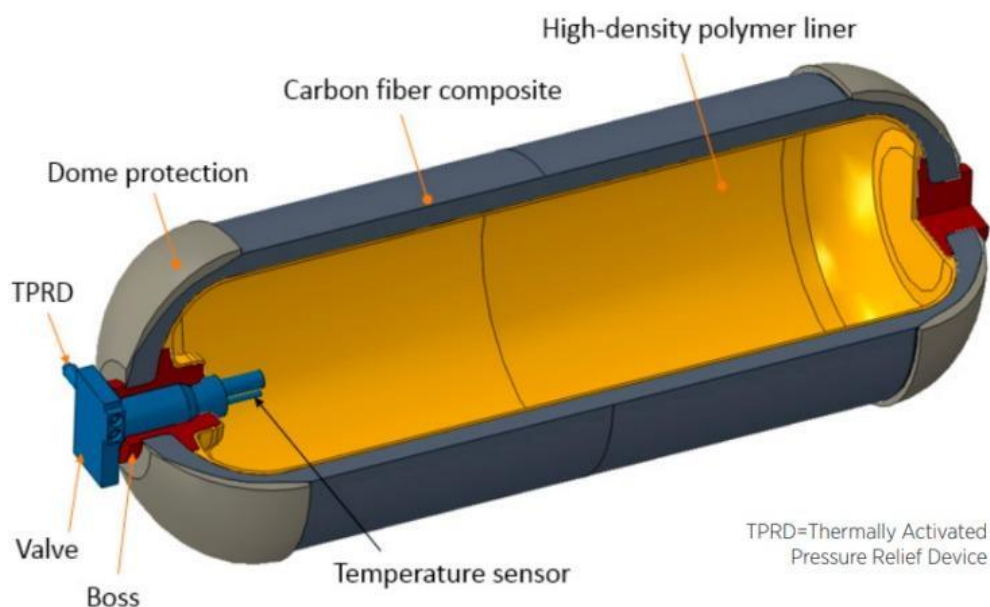


Figure 23 Σύνθετο υπερτυλιγμένο δοχείο πίεσης υδρογόνου [74]

4. Τύπος IV: Συνήθως πρόκειται για ένα πλήρως σύνθετο πολυμερές όπως το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, το HDPE, που είναι ένα από τα πιο ευέλικτα πλαστικά υλικά, και χρησιμοποιείται ως επένδυση. Τα σύνθετα υλικά από ανθρακονήματα ή άνθρακα-γυαλί χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του δομικού φορτίου. Αυτός ο τύπος δοχείου πίεσης

είναι ο ελαφρύτερος και πάλι η τιμή είναι σχετικά πολύ υψηλή. Τα δοχεία πίεσης του τύπου αυτού μπορούν να αντέξουν πιέσεις έως και 100 MPa.

Οι στόχοι που έχουν τεθεί σχετικά με τις βαρυμετρικές και ογκομετρικές πυκνότητες οχημάτων για το 2020, ήταν 4,5wt% κατά βάρος και 0,030kg-H<sub>2</sub>/L. Πλησιέστερος τύπος δοχείου στον στόχο αυτόν κρίθηκε ο τύπος IV με 4,2wt% κατά βάρος και 0,024kg-H<sub>2</sub>/L στα 700bar. Αυτή η μέθοδος λοιπόν, εξυπηρετεί κυρίως περιπτώσεις που αφορούν μεγάλη ποσότητα υδρογόνου καθώς δεν εμφανίζουν διαρροές ακόμη και υπό υψηλή πίεση, και παρέχουν την δυνατότητα αποθήκευσης σε υπόγειες αποθήκες ή σε κατάλληλες γεωλογικές δομές[75].

#### 4.2.2 Αποθήκευση υγρού υδρογόνου

Η υγροποίηση του υδρογόνου γίνεται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (-252.87°C) και συνεπώς η κύρια πρόκληση της μεθόδου είναι η διατήρηση του υδρογόνου σε τόσο χαμηλή θερμοκρασία. Τα κύρια πλεονεκτήματα του υγροποιημένου υδρογόνου σε σχέση με άλλες μεθόδους είναι η υψηλή πυκνότητα στην υγρή μορφή και η υψηλή απόδοση αποθήκευσης. Ως μέσο αποθήκευσης απαιτεί ειδικά μονωμένα δοχεία που να καλύπτουν τις θερμοκρασιακές ανάγκες, καθώς αν δεν επιτευχθεί η διαδικασία ψύξης, μια ποσότητα H<sub>2</sub> θα εξατμιστεί και συνεπώς θα μειωθεί.

Για παράδειγμα, η θεωρητική ογκομετρική χωρητικότητα του υδρογόνου αυξάνεται από 24 ή 40 g/L (για συμπιεσμένο H<sub>2</sub> στα 350 ή 700bar στους 300K) σε 70g/L (για υγρό H<sub>2</sub> σε 1 atm και 20K). Όσον αφορά την ρευστοποίηση, χαρακτηρίζεται ιδιαίτερα χρονοβόρα και ενεργοβόρα, ενώ έως και 40% του ενεργειακού περιεχομένου μπορεί να χαθεί κατά την ολοκλήρωση της διαδικασίας. Αντίθετα, στην περίπτωση αποθήκευσης συμπιεσμένου υδρογόνου υπάρχει απώλεια ενέργειας περίπου 10%. Έτσι, αυτή η μέθοδος αποθήκευσης χρησιμοποιείται συχνότερα για αποθήκευση και παράδοση μεσαίας έως μεγάλης κλίμακας όπως π.χ ένα δεξαμενόπλοιο μπορεί να μεταφέρει 5.000kg υδρογόνου, που είναι περίπου πέντε φορές μεγαλύτερη από τη χωρητικότητα των σωλήνων αερίου συμπιεσμένου υδρογόνου. Επομένως, το LH<sub>2</sub> περιορίζεται σε άλλου είδους εφαρμογές που απαιτούν υψηλές ογκομετρικές και βαρυμετρικές πυκνότητες αποθήκευσης ενέργειας ανεξάρτητα από την υψηλή κατανάλωση ενέργειας.[74], [76].



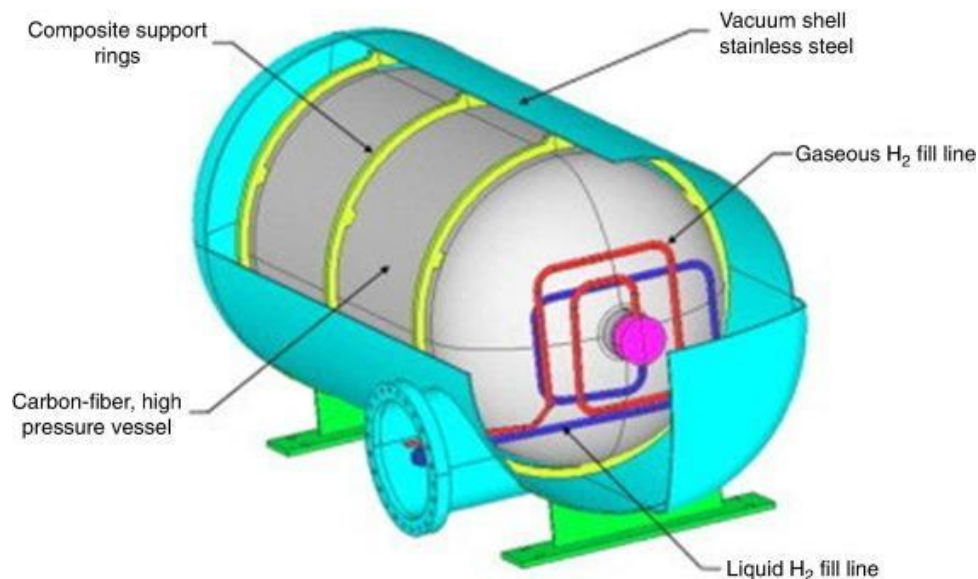


Figure 24 Το εσωτερικό δοχείο είναι ένα δοχείο πίεσης με επένδυση από αλουμίνιο, τυλιγμένο με ανθρακονήματα που χρησιμοποιείται συνήθως για την αποθήκευση συμπιεσμένων αερίων [76]

#### 4.2.3 Κρυο-συμπιεσμένη αποθήκευση $H_2$

Το κρύο-συμπιεσμένο υδρογόνο είναι ένα εξαιρετικά κρίσιμο κρυογενικό αέριο, ωστόσο πρόκειται για συμπίεση του αερίου υδρογόνου στους  $-253^{\circ}\text{C}$  περίπου. Σε αυτήν τη μέθοδο, το υδρογόνο υπόκειται σε συμπίεση υψηλής πίεσης (300bar), και ψύχεται σε χαμηλά θερμοκρασιακά επίπεδα για την επίτευξη υψηλότερης πυκνότητας. Κύρια προσδοκία μέσω των διεργασιών αυτών, είναι η αποθήκευση μεγάλης ποσότητας  $H_2$  σε μικρότερο σχετικά με τις άλλες τεχνολογίες χώρο. Η πυκνότητα του υδρογόνου σε υψηλή πίεση (700bar) και θερμοκρασία δωματίου είναι σχετικά χαμηλή ( $39,1\text{kg/m}^3$ ) ενώ του υγρού υδρογόνου όταν βρίσκεται υπό συνθήκες θερμοκρασίας 20K και σε σχετική χαμηλή πίεση 4bar, ανέρχεται στα  $71\text{kg/m}^3$ [77]. Ωστόσο, το αέριο υδρογόνο άνω των 150bar μπορεί να έχει υψηλότερη πυκνότητα από το υγρό υδρογόνο εφόσον αποθηκευτεί σε θερμοκρασία κοντά στη θερμοκρασία υγροποίησης. Έτσι, τόσο η θερμοκρασία όσο και η πίεση για την αποθήκευση υδρογόνου θα μπορούσαν να βελτιστοποιηθούν προκειμένου να επιτευχθεί υψηλή απόδοση αποθήκευσης. Η αποθήκευση υγρού υδρογόνου σε μονωμένα δοχεία πίεσης λοιπόν, ξεπερνά πολλές από τις αδυναμίες των δεξαμενών συμπιεσμένου αερίου ή υγρού  $H_2$  και μπορεί ακόμη και να ανοίξει νέες δυνατότητες σε σύγκριση με τις κρυογονικές δεξαμενές  $H_2$ . Επίσης, αποδεικνύεται αρκετά ενδιαφέρον όσον αφορά την αποθήκευση και το επίπεδο ασφάλειας στο πλαίσιο των αυτοκινήτων. Ωστόσο, οι

κύριες προκλήσεις εξακολουθούν να είναι η διαθεσιμότητα και το κόστος της υποδομής[73].

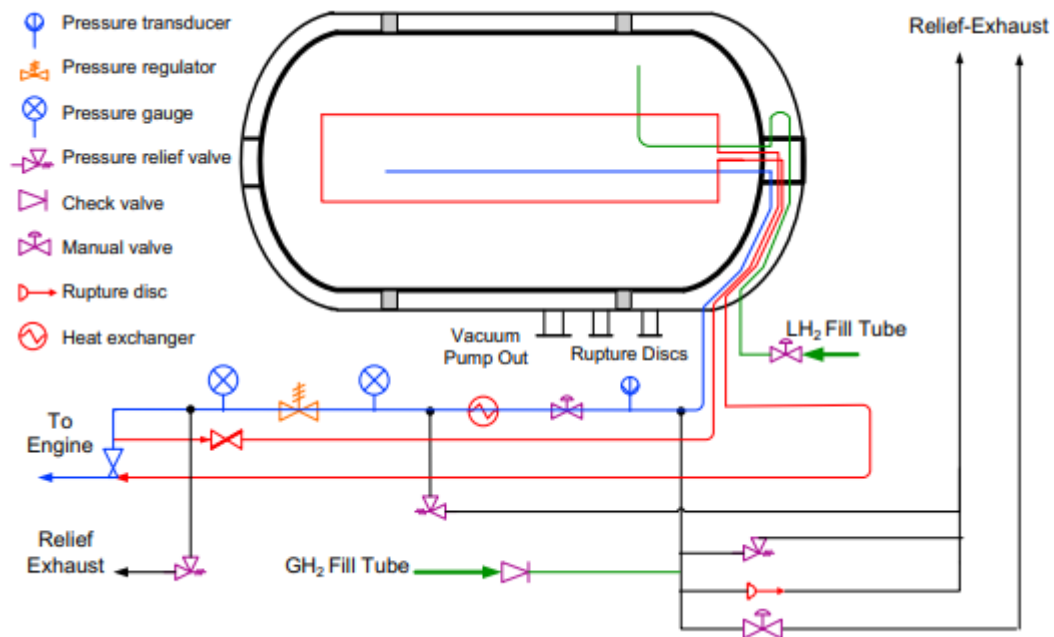


Figure 25 Σύστημα δεξαμενής αποθήκευσης κρυοσυμπιεσμένου H<sub>2</sub> [73]

#### 4.2.4 Αποθήκευση με βάση το υλικό

Στη μέθοδο αυτή, τα μόρια υδρογόνου χωρίζονται σε άτομα και ενσωματώνονται με τη χημική δομή του υλικού. Όταν απαιτηθεί η απελευθέρωση του υδρογόνου, η χημική αντίδραση αντιστρέφεται και το υδρογόνο απελευθερώνεται. Η αποτελεσματικότητα των υλικών αποθήκευσης υδρογόνου κρίνεται με βάση ορισμένα χαρακτηριστικά όπως ταχεία κινητική, καλή αντιστρεψιμότητα, προσιτή τιμή και υψηλές δυνατότητες αποθήκευσης σε λογικές θερμοκρασίες και πιέσεις λειτουργίας[79]. Μεταξύ όλων, τα υδρίδια μετάλλων (πχ MgH<sub>2</sub>) είναι ίσως η πιο διάσημη ομάδα υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για χημική ρόφηση. Αξιοσημείωτη επιλογή χημικού φορέα, αποτελούν τα συστήματα αποθήκευσης υγρών οργανικών φορέων υδρογόνου (LOHCs), σύμφωνα με τα οποία το υδρογόνο αποθηκεύεται σε υγρή μορφή εν μέσω χημικών δεσμών με μόρια που δεν διαθέτουν υδρογόνο και έπειτα απελευθερώνεται περνώντας από μια καταλυτική αντίδραση που

οδηγεί στην απελευθέρωση του υδρογόνου. Αυτά τα συστήματα αποθήκευσης αποτελούν ελκυστική επιλογή καθώς [79]–[81]:

- I. προσφέρουν τη δυνατότητα διαχείρισης σε συνθήκες περιβάλλοντος,
- II. όλες οι διαδικασίες αποθήκευσης και απελευθέρωσης αερίων δεν εμπεριέχουν αποτύπωμα άνθρακα
- III. το φέρον υγρό δεν καταναλώνεται και συνεπώς μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί
- IV. ως φορείς δεν είναι τοξικοί ή διαβρωτικοί και η πίεση αποθήκευσης είναι χαμηλή.

Σε σύγκριση με τη φυσική αποθήκευση, η αποθήκευση με βάση το υλικό προβλέπεται να έχει υψηλότερη χωρητικότητα αποθήκευσης υδρογόνου σε θερμοκρασία δωματίου καθώς και ασφαλέστερη λόγω της χαμηλότερης πίεσης αποθήκευσης υδρογόνου και του βραδύτερου ρυθμού απελευθέρωσης υδρογόνου[82]. Ωστόσο, η μείωση του κόστους, του βάρους και της θερμοκρασίας λειτουργίας, και ο έλεγχος του σχηματισμού ανεπιθύμητων αερίων κατά την εκρόφηση είναι οι κύριες εναπομένουσες προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα υλικά χημικής προσρόφησης, χωρίς αυτό όμως να την προσδιορίζει ως μη βιώσιμη λύση[83].

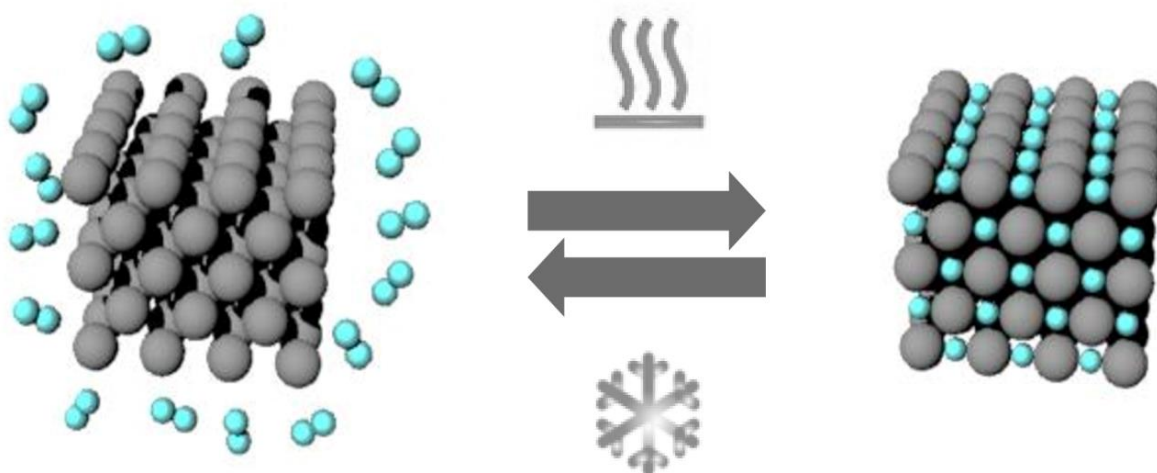


Figure 26 Ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου αποθήκευσης με βάση το υλικό

Πίνακας 7 Σύγκριση μεθόδων αποθήκευσης [71]

Μέθοδος αποθήκευσης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Συμπιεσμένο αέριο	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Καθιερωμένη τεχνολογία, ειδικά σε σχετικά μικρή κλίμακα</li> <li>• Η μέθοδος αποθήκευσης υδρογόνου υπό πίεση έχει τη δυνατότητα γρήγορης πλήρωσης και εκφόρτισης</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Χαμηλή-μέτρια συμπίεση(15% απώλειες)</li> <li>• Παρέχει υδρογόνο υψηλής πίεσης</li> <li>• Ασφάλεια (διαρροή)</li> <li>• Χαμηλή πυκνότητα υδρογόνου, άρα απαιτείται χαμηλή θερμοκρασία ή υψηλή πίεση για αποθήκευση</li> </ul>
Υγρό υδρογόνο	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Καλή συμπίεση</li> <li>• Χαμηλή πίεση</li> <li>• Το σύστημα αποθήκευσης υγρού υδρογόνου χαμηλής πίεσης έχει χαμηλό κόστος</li> <li>• Η μέθοδος αποθήκευσης υγρών είναι μια αξιόπιστη μέθοδος καθώς απαιτεί χαμηλότερη πίεση από το συμπιεσμένο αέριο</li> <li>• Τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του υγροποιημένου υδρογόνου σε σχέση με άλλες μεθόδους είναι η</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 30% απώλειες ενέργειας</li> <li>• Έξοδος σε ημέρες</li> <li>• Απαιτεί ειδικά συστήματα ψύξης</li> </ul>

	υψηλή πυκνότητα υγρού και η υψηλή απόδοση αποθήκευσης	
Στερεά μορφή	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Δυνατότητα υψηλής πυκνότητας υδρογόνου σε μέτριες θερμοκρασίες και πιέσεις</li> <li>• Μεγάλες ποσότητες υδρογόνου μπορούν να αποθηκευτούν σε μικρό όγκο</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Βάρος και όγκος του αποθηκευτικού υλικού</li> </ul>

#### 4.3 Διανομή υδρογόνου

Σε οποιαδήποτε μελλοντική οικονομία βασισμένη στο υδρογόνο, βασικοί οικονομικοί καθοριστικοί παράγοντες θα είναι το κόστος και η ασφάλεια του συστήματος διανομής καυσίμου από τον τόπο κατασκευής του υδρογόνου μέχρι τον τελικό χρήστη. Αυτό ισχύει για κάθε καύσιμο, αλλά το υδρογόνο παρουσιάζει μοναδικές προκλήσεις λόγω της υψηλής διαχύσεώς του, της εξαιρετικά χαμηλής πυκνότητάς του ως αέριο και υγρό και του υψηλού εύρους αναφλεξιμότητας σε σχέση με τους υδρογονάνθρακες και τις αλκοόλες χαμηλού μοριακού βάρους. Αυτές οι μοναδικές ιδιότητες παρουσιάζουν ειδικά εμπόδια κόστους και ασφάλειας σε κάθε βήμα της διανομής, από την κατασκευή έως, τελικά, την ενσωματωμένη αποθήκευση οχημάτων. Επίσης κρίσιμη είναι η μορφή του υδρογόνου που αποστέλλεται και αποθηκεύεται. Το υδρογόνο μπορεί να μεταφερθεί ως αέριο υπό πίεση ή ως κρυογονικό υγρό[84].

##### 4.3.1 Τροφοδοσία της κοινωνίας με υδρογόνο

Σήμερα, το υδρογόνο μεταφέρεται από το σημείο παραγωγής στο σημείο χρήσης είτε μέσω της χρήσης αγωγών είτε μέσω ειδικών βυτιοφόρων φορτηγών για

μεταφορά κρυογονικών υγρών είτε με τη συμβολή ρυμουλκούμενων αερίων σωλήνων. Οι αγωγοί αναπτύσσονται σε περιοχές με σημαντική ζήτηση (εκατοντάδες τόνους ημερησίως) που πρόκειται η εγκατάσταση να παραμείνει σταθερή για αρκετές δεκαετίες. Αντίθετα, εγκαταστάσεις υγροποίησης, ειδικά δεξαμενόπλοια και ρυμουλκούμενα σωλήνων αναπτύσσονται σε περιοχές όπου χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη κλίμακα ζήτησης ή αναδυόμενη.

Η γραμμή μεταφοράς υδρογόνου μέσω αγωγών αναμένεται να είναι πιο κοστοβόρα σχετικά με την αντίστοιχη του φυσικού αερίου λόγω της ανάγκης για σωλήνες τουλάχιστον 50% μεγαλύτερης διαμέτρου για την επίτευξη του ισοδύναμου ρυθμού μετάδοσης ενέργειας και λόγω της πιθανότητας ότι ο χάλυβας και οι βαλβίδες είναι πιο δαπανηροί. Επιπρόσθετα καθίσταται αναγκαία η επένδυση με μεταλλικές συνδέσεις στεγανοποίησης για αγωγούς υδρογόνου προκειμένου να αποφευχθεί η μακροχρόνια ευθραυστότητα και οι πιθανότητες διαρροής. Ορισμένες από τις υποδομές είναι ήδη σε ισχύ επειδή το υδρογόνο έχει χρησιμοποιηθεί από καιρό σε βιομηχανικές εφαρμογές, αλλά η ευρεία αύξηση της ζήτησης υδρογόνου θα απαιτήσει έρευνα και ανάπτυξη στην επέκταση της αλυσίδας εφοδιασμού[84][30].

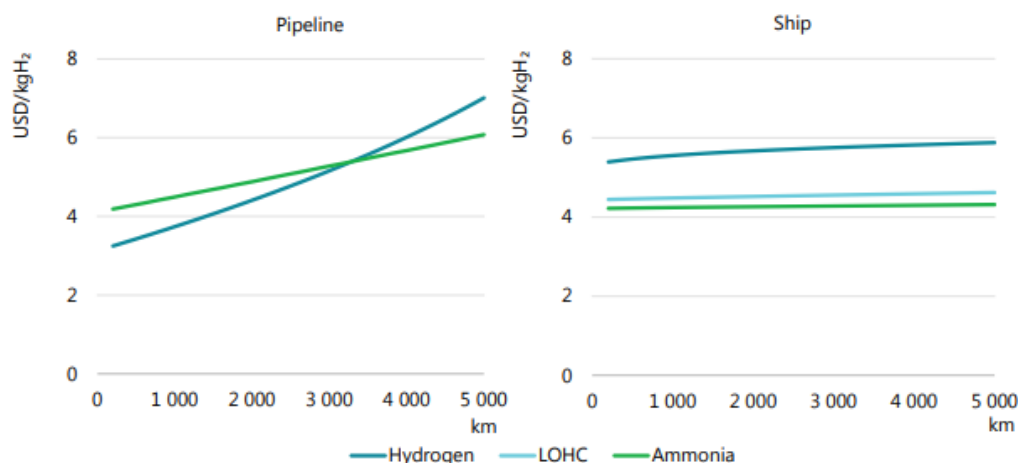


Figure 27 Πλήρες κόστος παράδοσης υδρογόνου στον βιομηχανικό τομέα με αγωγό ή με πλοίο το 2030 για διαφορετικές αποστάσεις μετάδοσης[84]

#### 4.4 Συμπέρασμα

Σύμφωνα με σχετική ανάλυση και έρευνα, το πιο αποτελεσματικό μέσο για την παραγωγή υδρογόνου μακροπρόθεσμα είναι μέσω κεντρικών εγκαταστάσεων μεγάλης κλίμακας που χρησιμοποιούν δίκτυα διανομής αγωγών. Αξιοσημείωτο είναι

το γεγονός πως το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί σήμερα με κόστος που κυμαίνεται από 1,22\$ έως 1,03\$/kg H<sub>2</sub> από φυσικό αέριο και από άνθρακα από 1,03\$ έως 0,96\$/kg H<sub>2</sub> με και χωρίς δέσμευση άνθρακα. Αντίστοιχα, η αποστολή και η διανομή με αγωγό αντικατοπτρίζουν ένα εκτιμώμενο κόστος 0,96\$/kg H<sub>2</sub>, που ουσιαστικά ισούται με το κόστος παραγωγής. Ακόμη και με πιθανές μελλοντικές βελτιώσεις στη ναυτιλία και τη διανομή, αυτό το κόστος είναι πολύ μεγαλύτερο από το σημερινό κόστος διανομής και διανομής βενζίνης, στα 0,19\$/γαλλ. Αυτή η ανάλυση καταδεικνύει την πραγματικότητα της μεταφοράς αερίου H<sub>2</sub> έναντι της πολύ πιο αποτελεσματικής αποστολής ενός υγρού.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΠΡΑΣΙΝΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

### 5.1 Η βιωσιμότητα πράσινου υδρογόνου

Κατά τις επόμενες δεκαετίες, όλο και περισσότερες χώρες θέτουν στόχους που σχετίζονται με την εξάλειψη των επιβλαβών αερίων του θερμοκηπίου με κρίσιμο έτος το 2050. Αυτό πρόκειται να επιτευχθεί με την προτίμηση ενεργειακών λύσεων όπως το πράσινο υδρογόνο. Προς το παρόν, περίπου το 95% της τρέχουσας παραγωγής εξακολουθεί να βασίζεται σε μεθόδους που αντιστοιχούν σε υψηλή εκπομπή άνθρακα, μιας και η παραγωγή πράσινου υδρογόνου πέρα από αυτές τις αρχικές αναπτύξεις απαιτεί επιπλέον τεχνολογικές ανακαλύψεις. Ωστόσο αναμένεται άνοδος στην παγκόσμια ζήτηση υδρογόνου σχετικά με τον τομέα των καυσίμων, με περίπου 2,5% ετησίως (70Mt παράχθηκαν το 2019), ενώ έχουν ήδη κατασκευαστεί εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας για ηλεκτρόλυση νερού που αποσκοπούν στην παραγωγή υδρογόνου με χαμηλή ή μηδενική περιεκτικότητα άνθρακα.

Για να καθοριστεί η παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης νερού μια οικονομικά βιώσιμη λύση, απαιτούνται αρχικά υψηλές κρατικές επιδοτήσεις και προγράμματα που θα οδηγήσουν σε περαιτέρω έρευνα και προσπάθεια για τη μείωση του κόστους παραγωγής, και κατά συνέπεια τον ανταγωνισμό με τις άλλες μεθόδους που συμπεριλαμβάνουν τον άνθρακα. Αναφορικά με την τιμή που στοχεύει το Υπουργείο

Ενέργειας των ΗΠΑ για το άμεσο μέλλον, ανέρχεται σε 2\$/kg στο εργοστάσιο και 7\$/kg στην αντλία, σε σχέση με την παρούσα τιμή παραγόμενου υδρογόνου που αφορά το εργοστάσιο και υπολογίζεται στα 6,08\$/kg[84].

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η επένδυση για την έρευνα και την ανάπτυξη της τεχνολογίας του πράσινου υδρογόνου πρόκειται να μειώσει σημαντικά το συνολικό κόστος με τη πάροδο του χρόνου, και αυτό φαίνεται και από τα παρακάτω διαγράμματα που αφορούν τις τεχνολογίες παραγωγής πράσινου υδρογόνου.

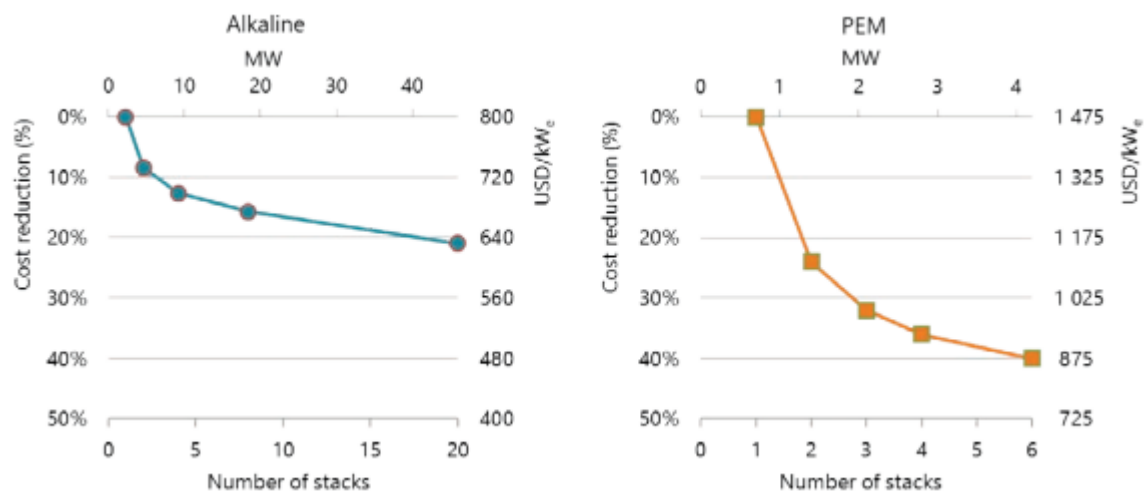


Figure 28 Μείωση του ηλεκτρολύτη CAPEX από τη χρήση συστημάτων πολλαπλών στοιβών [84]

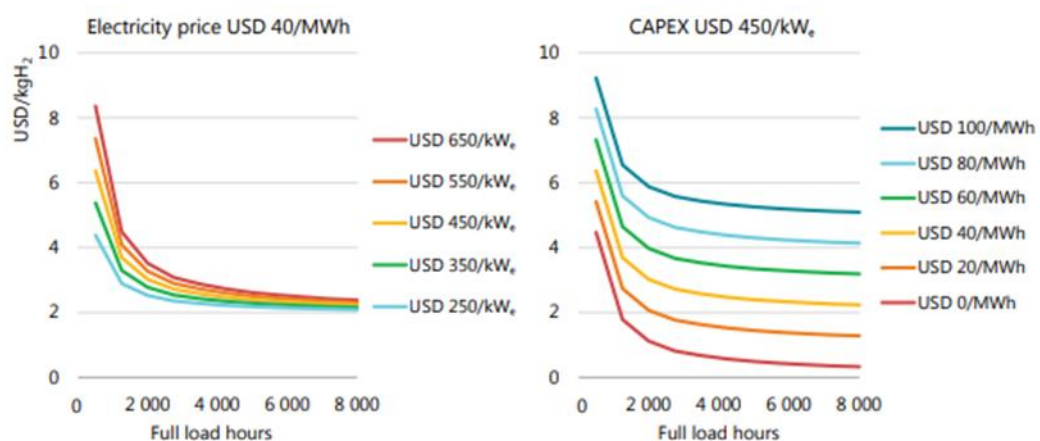


Figure 29 Μελλοντικό κόστος παραγωγής υδρογόνου ανά ώρα λειτουργίας για διαφορετικό κόστος επένδυσης ηλεκτρολύτη και κόστος ηλεκτρικής ενέργειας [84]

## 5.2 Η οικονομία του υδρογόνου στην Ευρώπη



Το 2019, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (ΕC) παρουσίασε την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, η οποία αποτελεί το στρατηγικό πλαίσιο που θα οδηγήσει σε επίτευξη μηδενικών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου έως το 2050. Η ουδετερότητα του άνθρακα σύμφωνα με την επιτροπή, πρόκειται να επέλθει με την εκμετάλλευση του καθαρού υδρογόνου. Χρονολογικά, η Πράσινη Συμφωνία αφορά δύο φάσεις, εκ των οποίων η πρώτη ολοκληρώνεται το 2030, ενώ η δεύτερη αναφέρεται στο διάστημα 2030-2050. Αρχικός στόχος είναι η απελευθέρωση των περίπου 9,7 Mt υδρογόνου που εκμεταλλεύεται ετησίως η Ευρωπαϊκή Ένωση με βάση τον άνθρακα. Ωστόσο, στην Ευρώπη παρόλο που το 56% των έργων ηλεκτρόλυσης κρίνονται επιτυχημένα ως προς τον αρχικό σχεδιασμό, η αδυναμία της στην υποστήριξη τέτοιου είδους έργων μετέπειτα, είτε λόγω ανάπτυξης είτε λόγω μη ωφέλιμης νομοθεσίας σε σχέση με τις ΗΠΑ, πρόκειται να της στερήσει την διάκριση που προσφέρει το σημαντικό αυτό ποσοστό[60].

Σύμφωνα λοιπόν με την στρατηγική για την ανάπτυξη της τεχνολογίας του υδρογόνου, θα πρέπει μεταξύ 2020 και 2024 να υλοποιηθούν εγκαταστάσεις ηλεκτρόλυσης μεγέθους τουλάχιστον 6GW που θα βασίζονται σε ΑΠΕ, κάτι που αντιστοιχεί σε παραγωγή 0.8Mt καθαρού υδρογόνου ανά έτος. Στο τέλος της πρώτης φάσης, τα 6GW εκτιμάται ότι θα ανέλθουν σε 40GW, ενώ λαμβάνοντας υπόψιν το φιλόδοξο σενάριο της Ευρώπης, η ζήτηση του υδρογόνου σε ΕΕ και Ηνωμένο Βασίλειο θα είναι 665TWh ή 16.9Mt.

Κατά τη δεύτερη φάση, η ζήτηση καθαρού υδρογόνου αναμένεται να αυξηθεί, ενώ έως το 2050, σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οδικό Χάρτη του Υδρογόνου φαίνεται πως το υδρογόνο θα μπορούσε να παρέχει έως και το 24% της συνολικής ενεργειακής ζήτησης που αντιστοιχεί σε ~2251TWh ενέργειας στην ΕΕ και ΗΒ. Ανά τομέα αυτό σημαίνει, 675 TWh στις μεταφορές, 579TWh στη θέρμανση και ηλεκτρική ενέργεια για κτίρια, 391 TWh στην υπάρχουσα βιομηχανική πρώτη ύλη, 257 TWh στη νέα βιομηχανική πρώτη ύλη, 237 TWh στη βιομηχανία ενέργειας και 112 TWh στην ισχύ[85].

Το 2021 η παγκόσμια παραγωγή υδρογόνου ήταν 120 Mt, , εκ του οποίου τα 2/3 αφορούσαν καθαρό υδρογόνο ενώ το υπολειπόμενο αφορούσε μείγμα αερίων, και συγκριτικά με την παγκόσμια χρήση τελικής ενέργειας, αφορούσε το 4% αυτής. Το

κόστος παραγωγής πράσινου υδρογόνου το 2020 μειώθηκε στα 6.00\$ (5,09€)/kg, ενώ έως το 2030 η τιμή του εκτιμάται στα 2,50\$ (2,12€). Η επίτευξη αυτής της εκτίμησης, κρίνεται κυρίως από τον ηλεκτρολύτη (CAPEX), το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας και παραμέτρους όπως ο συντελεστής χρήσης και το μέγεθος της κλίμακας. Το κόστος των ηλεκτρολύσεων προβλέπεται να μειωθεί στο μισό έως το 2050, από 840 \$ ανά κιλοβάτ το 2019, ενώ το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές θα συνεχίσει να μειώνεται επίσης [86].

Παράλληλα, η Κοινή Επιχείρηση Κυψελών Καυσίμου και Υδρογόνου (FCH JU) χρηματοδοτεί ένα πρωτοποριακό έργο ηλεκτρόλυσης μεγέθους 20 MW και η E&A έχει οδηγήσει σε αξιοσημείωτα τεχνολογικά επιτεύγματα και μείωση κόστους. Επιπρόσθετα, ένα ενεργειακό πάρκο 30 MW σχεδιάζεται για ηλεκτρόλυση, ενώ βασίζεται στην τροφοδοσία του από κοντινό αιολικό πάρκο κοντά σε μια τοποθεσία χημικής βιομηχανίας στη Γερμανία από τις εταιρείες VNG, Uniper, Terrawatt και DBI. Αξίζει να σημειωθεί πως το έργο θα ολοκληρωθεί παρόλο που η αναμενόμενη τιμή του ήταν 153 εκατομμύρια δολάρια, λόγω αυξήσεων των τιμών τους τελευταίους μήνες, η τιμή του κόστους ανήλθε στα 262 εκατομμύρια δολάρια[87].

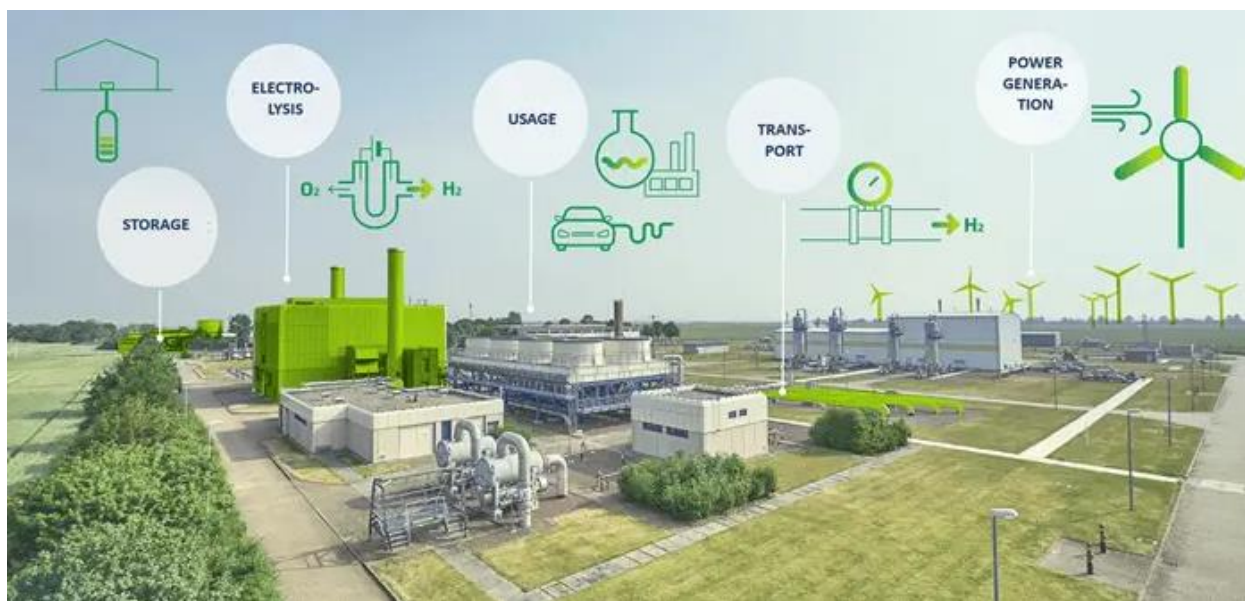


Figure 30 Το έργο του Energy Park Bad Lauchstädt, που θα παράγει πράσινο υδρογόνο χρησιμοποιώντας ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια από κοντινό αιολικό πάρκο [88]

Παρά τις προκλήσεις λοιπόν, η ζήτηση του υδρογόνου κρίνεται ανοδική στην Ευρώπη, καθώς η συνολική κατανάλωση υδρογόνου στην Ευρώπη αναμένεται να αυξηθεί κατά 60% έως το 2030, ενώ με έτος αναφοράς το 2023, η ζήτηση πρόκειται

να τριπλασιαστεί έως το 2040. Σύμφωνα με την Aurora Energy Research and Financial Consulting, η εκτίμηση της προσφοράς αλλά και της ζήτησης σχετικά με τις ερχόμενες δεκαετίες σε συνδυασμό με την δημιουργία ενός εκτεταμένου δικτύου αγωγών μεταφοράς, πρόκειται να οδηγήσουν στην ανάπτυξη μιας χονδρικής αγοράς υδρογόνου[89]. Η μέση τιμή χονδρικής του υδρογόνου με χαμηλές εκπομπές άνθρακα αναμένεται να μειωθούν από 7 €/kgH<sub>2</sub> το 2025 σε 2,8 €/kgH<sub>2</sub> το 2050. Σύμφωνα με τον Οδικό Χάρτη για το Υδρογόνο, η ζήτηση υδρογόνου από την Ευρωπαϊκή Ένωση και το Ηνωμένο Βασίλειο αναμένεται να φτάσει τα 16,9 Mt μέχρι το 2030[84].

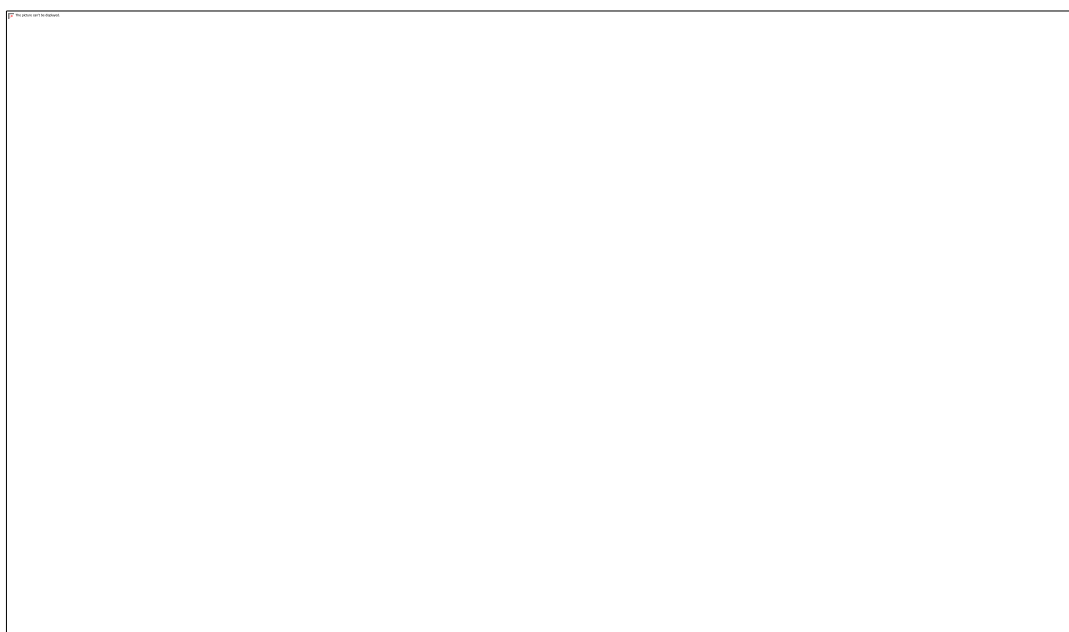


Figure 31 Οικονομία υδρογόνου [90]

### 5.3 Η οικονομία του υδρογόνου παγκοσμίως

Κατόπιν αιτήματος της κυβέρνησης της Ιαπωνίας υπό την προεδρία της G20, ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας συνέταξε μια έκθεση η οποία κρίνεται ως ορόσημο, προκειμένου να γίνει ανάλυση της τρέχουσας κατάστασης για το υδρογόνο και να προσφέρει καθοδήγηση για τη μελλοντική του ανάπτυξη. Διαπιστώθηκε λοιπόν ότι το καθαρό υδρογόνο έχει επί του παρόντος μια άνευ προηγουμένου πολιτική και επιχειρηματική δυναμική, με τον αριθμό των πολιτικών και των έργων που το αφορούν παγκοσμίως να επεκτείνεται με ταχείς ρυθμούς. Συμπεραίνεται ότι τώρα είναι η ώρα να κλιμακωθούν οι τεχνολογίες και να μειωθεί το κόστος για να επιτραπεί η ευρεία χρήση του υδρογόνου. Οι ρεαλιστικές και εφαρμόσιμες συστάσεις προς τις

κυβερνήσεις και τη βιομηχανία που παρέχονται θα καταστήσουν δυνατή την πλήρη αξιοποίηση αυτής της αυξανόμενης δυναμικής.

Το μέγεθος της παγκόσμιας αγοράς πράσινου υδρογόνου αποτιμήθηκε σε 3,2 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ το 2021 και αναμένεται να επεκταθεί με σύνθετο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης (CAGR) 39,5% από το 2022 έως το 2030. Η παρουσία ευνοϊκών κυβερνητικών πολιτικών που ωθούν προς την οικονομία του υδρογόνου μαζί με τις αυξανόμενες περιβαλλοντικές ανησυχίες σχετικά με την αύξηση των εκπομπών άνθρακα από τη χρήση ορυκτών καυσίμων αναμένεται να οδηγήσουν τη ζήτηση για την οικονομία υδρογόνου. Αυτή η τάση αναμένεται να προσφέρει ένα δυνητικό τοπίο ανάπτυξης για τον κλάδο[91].

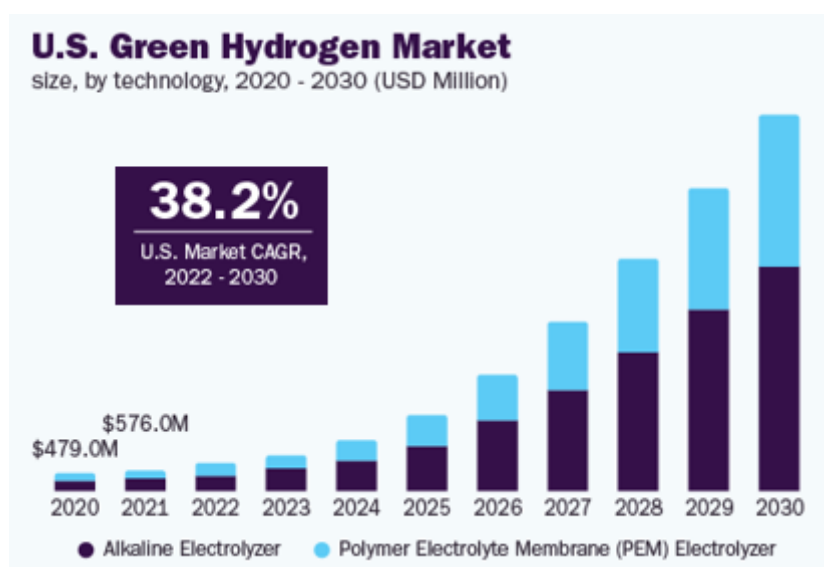


Figure 32 Μέγεθος αγοράς πράσινου υδρογόνου στις ΗΠΑ ανά τύπο ηλεκτρόλυσης [91]

Μερικά από τα παραδείγματα που αποδεικνύουν το μέγεθος που αναμένεται να αποκτήσει η οικονομία του υδρογόνου αναφέρονται παρακάτω[91]–[95]:

- Οι ΗΠΑ είναι μεταξύ των πρώτων που υιοθέτησαν λύσεις καθαρής ενέργειας στον κόσμο για τομείς όπως η παραγωγή ενέργειας και οι μεταφορές. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην αυξημένη σημασία που δίνεται στις λύσεις καθαρής ενέργειας σύμφωνα με τον ενεργειακό νόμο που εισήγαγε η κυβέρνηση των ΗΠΑ.
- Οι προβλέψεις του οδικού χάρτη για την οικονομία υδρογόνου των ΗΠΑ προβλέπουν πως το υδρογόνο από πηγές χαμηλών εκπομπών

άνθρακα θα μπορούσε να καλύψει περίπου το 14% των ενεργειακών αναγκών της χώρας μέχρι το 2050.

- Τον Οκτώβριο του 2019, η Air Liquide ανακοίνωσε ότι θα επενδύσει 150 εκατομμύρια δολάρια σε μια μονάδα παραγωγής ανανεώσιμων πηγών υγρού υδρογόνου στη Νεβάδα που θα παράγει 30 τόνους ημερησίως, ή αρκετά για την προμήθεια 40.000 οχημάτων κυψελών καυσίμου, όταν ξεκινήσει να λειτουργεί το 2022.
- Η Γερμανία έχει ένα συγκριτικά υψηλότερο μερίδιο εγκατάστασης πράσινου υδρογόνου σε όλο τον κόσμο λόγω της παρουσίας υποστηρικτικών πολιτικών και κανονισμών για το πράσινο υδρογόνο σε συνδυασμό με κονδύλια που διατίθενται για έργα έρευνας και επίδειξης στη χώρα. Για παράδειγμα, τον Ιούλιο του 2019, η κυβέρνηση ενέκρινε 11 έργα πράσινου υδρογόνου σε κλίμακα επίδειξης στη χώρα. Επιπλέον, η χώρα αναμένεται να ηγηθεί της αγοράς στην προβλεπόμενη περίοδο λόγω της παρουσίας μεγάλου αριθμού έργων που βρίσκεται υπό υλοποίηση.
- Η Ευρώπη αντιπροσώπευε σημαντικό μερίδιο εσόδων της τάξης του 50% το 2021 λόγω των τεράστιων επενδύσεων που πραγματοποιήθηκαν από τις ευρωπαϊκές οικονομίες, με στόχο την ενεργειακή μετάβαση σε μια καθαρή οικονομία βασισμένη στο υδρογόνο τα επόμενα χρόνια.
- Η βόρεια Αμερική αναμένεται να επιτύχει ένα σημαντικό CAGR κατά την περίοδο πρόβλεψης, με τις ΗΠΑ και τον Καναδά να ενισχύουν σταδιακά την πράσινη βιομηχανία υδρογόνου λόγω της εφαρμογής πολιτικών καθαρής ενέργειας στις Ηνωμένες Πολιτείες, ενώ η Καλιφόρνια κατέχει το μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς με ανάπτυξη που βασίζεται σε επιθετικούς στόχους αφαίρεσης του άνθρακα, όπως η σταδιακή κατάργηση των δημόσιων λεωφορείων που κινούνται με φυσικό αέριο ή ντίζελ έως το 2040.
- Στον Καναδά, η Air Liquide κατασκευάζει έναν ηλεκτρολύτη PEM μεγάλης κλίμακας με χωρητικότητα 20 MW, που θα παράγει πράσινο υδρογόνο με τη χρήση υδροηλεκτρικής ενέργειας. Αυτού του είδους η

ανάπτυξη μαζί με έργα υπό αγωγό στον Καναδά θα βοηθήσει σημαντικά την ανάπτυξη της πράσινης βιομηχανίας υδρογόνου στη χώρα στο άμεσο μέλλον.

- Η Toshiba στην Ιαπωνία κατασκευάζει μια πράσινη μονάδα υδρογόνου με χωρητικότητα ηλεκτρολύτη 10 MW, που θα χρησιμοποιηθεί για την παροχή υδρογόνου για εφαρμογές μεταφοράς.
- Ένα έργο πράσινου υδρογόνου που παράγει 1 εκατομμύριο τόνους H<sub>2</sub> ετησίως με χρήση ηλεκτρολυτών 52,5 kWh/kg, θα απαιτούσε 14 GW αιολικής και ηλιακής ενέργειας. Με την τεχνολογία της εταιρείας Hysata, οι το ίδιο έργο θα χρειαζόνταν μόνο 11 GW ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, δηλαδή πρόκειται για εξοικονόμηση κόστους περίπου 3 δισεκατομμυρίων δολαρίων (υποθέτοντας ένα μέσο κόστος κεφαλαίου για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας 1 εκατομμύριο δολάρια ανά MW).
- Ο τομέας των μεταφορών αντιπροσώπευε το μεγαλύτερο μερίδιο εσόδων 40,61% το 2021. Στις μεταφορές, το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες καυσίμου ή κινητήρες εσωτερικής καύσης. Λόγω της ενεργειακής του απόδοσης, μια κυψέλη καυσίμου υδρογόνου είναι δύο έως τρεις φορές πιο αποδοτική από έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης που τροφοδοτείται από βενζίνη.
- Το 2020, μεγάλες ευρωπαϊκές αυτοκινητοβιομηχανίες όπως η CNH, η Daimler, η DAF, η Ford, η MAN, η Scania και η Volvo ανακοίνωσαν σχέδια αλλαγής καυσίμου του στόλου των φορτηγών τους σε υδρογόνο έως το 2040. Επίσης, η Airbus σχεδιάζει αεροσκάφη με υδρογόνο και σχεδιάζει να λειτουργήσει εμπορικά πτήσεις έως το 2035.

#### 5.4 Οι δυνατότητες στην διανομή και η διαφοροποίηση στο κόστος

Η πιο οικονομικά βιώσιμη μέθοδος για τη μεταφορά μεγάλων όγκων σε μεγάλες αποστάσεις κρίνεται η μέθοδος των αγωγών. Τον Σεπτέμβριο του 2020, οι γερμανικοί

φορείς εκμετάλλευσης αγωγών Nowega και Siemens Energy εξέδωσαν μελέτη σχετικά με τις πρακτικές πτυχές της μετατροπής αγωγών φυσικού αερίου για μελλοντική μεταφορά υδρογόνου[96]. Ωστόσο, το υδρογόνο μπορεί να μεταφερθεί μέσω φορτηγών και πλοίων. Ο τρόπος μεταφοράς που επιλέγεται εξαρτάται από την εφαρμογή που επιλέγει ο τελικός χρήστης καθώς και η βέλτιστη απόσταση που πρόκειται να διανύσει το φορτίο. Η συμπίεση, η υγροποίηση ή η ενσωμάτωση του υδρογόνου σε μεγαλύτερα μόρια είναι πιθανές επιλογές για να καθοριστεί η μεταφορά και συνεπώς κάθε επιλογή έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Επί του παρόντος, η φθηνότερη επιλογή διαφέρει ανάλογα με τη γεωγραφία, την απόσταση, την κλίμακα και την απαιτούμενη τελική χρήση. Οι αγωγοί είναι πιθανό να είναι η πιο οικονομική μακροπρόθεσμη επιλογή για τοπική διανομή υδρογόνου εάν υπάρχει αρκετά μεγάλη, διαρκής και τοπική ζήτηση. Ωστόσο, η διανομή σήμερα βασίζεται συνήθως σε φορτηγά που μεταφέρουν υδρογόνο είτε ως αέριο είτε ως υγρό, και αυτός είναι πιθανό να παραμείνει ο κύριος μηχανισμός διανομής την επόμενη δεκαετία[91].

## Συμπεράσματα

Η χρήση λοιπόν του πράσινου υδρογόνου στην αυτοκινητοβιομηχανία έχει πολύ υψηλή δυναμική ώστε να μειώσει σημαντικά ή ακόμη και να εξαλείψει τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Η μετάβαση σε αυτήν την καθαρή εναλλακτική καυσίμου μπορεί να βοηθήσει την Ευρωπαϊκή Ένωση να πετύχει τους φιλόδοξους στόχους της για τη μείωση των εκπομπών GHG έως το 2050. Παρά τις πολλά υποσχόμενες προοπτικές, η οικονομική βιωσιμότητα της χρήσης του υδρογόνου ως καύσιμο, απαιτεί περαιτέρω ανάπτυξη. Τα υψηλά κόστη παραγωγής και αποθήκευσης, σε συνδυασμό με την έλλειψη υποδομών, αποτελούν προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν το συντομότερο προκειμένου να κριθεί εφικτή η ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας. απαιτεί σταθερή πολιτική υποστήριξη και κατάλληλα ρυθμιστικά πλαίσια. Οι κυβερνήσεις και τα κράτη πρέπει να εφαρμόσουν κίνητρα και να προσφέρουν ενισχύσεις που θα οδηγήσουν στην εξέλιξη της τεχνολογίας. Αυτό θα επιτευχθεί μέσω επιχειρηματικής σταθερότητας και προσφοράς βοηθητικών ρυθμιστικών πλαισίων στον τομέα των επενδύσεων που σχετίζονται με την έρευνα και

την ανάπτυξη. Η αυτοκινητοβιομηχανία ως τομέας πρόκειται να γνωρίσει μεγάλες ευκαιρίες με την ενσωμάτωση του πράσινου υδρογόνου στον κλάδο, καθώς ως νέα τεχνολογία μπορεί να συμβάλει στη δημιουργία νέων προϊόντων και υπηρεσιών, και συνεπώς θα οδηγήσει στην αύξηση της ανταγωνιστικότητας των επιχειρήσεων. Οι προοπτικές του μελλοντικού ενεργειακού μείγματος με βάση τη χρήση πράσινου υδρογόνου κρίνονται ελπιδοφόρες, καθώς η τεχνολογία αυτή αναμένεται να συμβάλει σημαντικά στη μετάβαση σε ένα πιο βιώσιμο και καθαρό ενεργειακό μέλλον. Εφόσον λοιπόν υπάρξει πλήρης εκμετάλλευση των ευκαιριών που θα παρουσιαστούν στο άμεσο μέλλον, το υδρογόνο με χαμηλές εκπομπές άνθρακα, ως μεταβατική λύση, πρόκειται να διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στους μακροπρόθεσμους στόχους για την επίτευξη ενός καθαρού, ασφαλούς και οικονομικά αποδοτικού παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] “36 Important US Automotive Industry Statistics [2022]: Facts, Trends, And Projections – Zippia.” <https://www.zippia.com/advice/automotive-industry-statistics/> (accessed Nov. 02, 2022).
- [2] “Automotive industry.” [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/automotive-industry\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/automotive-industry_en) (accessed Nov. 02, 2022).
- [3] “Automotive industry worldwide - statistics & facts | Statista.” <https://www.statista.com/topics/1487/automotive-industry/#dossierKeyfigures> (accessed Nov. 02, 2022).
- [4] “Automobile Production, Selected Countries, 1950-2022 | The Geography of Transport Systems.” <https://transportgeography.org/contents/chapter1/the-setting-of-global-transportation-systems/automobile-production-world/> (accessed Jul. 16, 2023).
- [5] “CO2 emissions from car production in the EU - ACEA - European Automobile Manufacturers’ Association.” <https://www.acea.auto/figure/co2-emissions-from-car-production-in-eu/> (accessed Jul. 16, 2023).
- [6] “Electric Vehicle Battery Market Size to Hit USD 276.40 Bn by 2030.” <https://www.precedenceresearch.com/electric-vehicle-battery-market> (accessed Jul. 16, 2023).
- [7] bp, “Statistical Review of World Energy 2022.”
- [8] “SIMI | Zero Emissions.” <https://www.simi.ie/en/environment/drive-greener/transition-to-zero-emissions> (accessed Jul. 16, 2023).
- [9] Y. Liao, Ç. Tozluoğlu, F. Sprei, S. Yeh, and S. Dhamal, “Impacts of charging behavior on BEV charging infrastructure needs and energy use,” 2023, doi: 10.1016/j.trd.2023.103645.
- [10] “Will hydrogen (Fuel Cell) vehicles be the future? - WeblogBahamas.com.” [https://www.weblogbahamas.com/blog\\_bahamas/2019/06/will-hydrogen-fuel-cell-vehicles-be-the-future.html](https://www.weblogbahamas.com/blog_bahamas/2019/06/will-hydrogen-fuel-cell-vehicles-be-the-future.html) (accessed Jul. 16, 2023).
- [11] F. Degen and M. Schütte, “NC-ND license Life cycle assessment of the energy consumption and GHG emissions of state-of-the-art automotive battery cell production,” *J. Clean. Prod.*, vol. 330, p. 129798, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129798.
- [12] “When will fossil fuels run out?” <https://group.met.com/en/mind-the-fyouture/mindthefyouture/when-will-fossil-fuels-run-out> (accessed Jul. 16, 2023).
- [13] “Energy mix - Our World in Data.” <https://ourworldindata.org/energy-mix> (accessed Jul. 16, 2023).
- [14] F. Qureshi, M. Yusuf, A. A. Pasha, and H. W. Khan, “Sustainable and energy efficient hydrogen production via glycerol reforming techniques: A review,” 2022, doi:

10.1016/j.ijhydene.2022.04.010.

- [15] H. Council, "Hydrogen Scaling Up: A sustainable pathway for the global energy transition," Nov. 2017, Accessed: Nov. 22, 2021. [Online]. Available: <https://www.h2knowledgecentre.com/content/policypaper1201>.
- [16] "Premium Vector | Hydrogen energy isometric flowchart with gas station car wind mill atom engine on blue background 3d vector illustration." [https://www.freepik.com/premium-vector/hydrogen-energy-isometric-flowchart-with-gas-station-car-wind-mill-atom-engine-blue-background-3d-vector-illustration\\_26762037.htm](https://www.freepik.com/premium-vector/hydrogen-energy-isometric-flowchart-with-gas-station-car-wind-mill-atom-engine-blue-background-3d-vector-illustration_26762037.htm) (accessed Jul. 16, 2023).
- [17] T. Capurso, M. Stefanizzi, M. Torresi, and S. M. Camporeale, "Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition," *Energy Convers. Manag.*, vol. 251, p. 114898, 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114898.
- [18] S. Boehm *et al.*, "Closing the Emissions Gap: A Climate Action Roadmap for Limiting Warming to 1.5 Degrees C." 2022, Accessed: Jul. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.wri.org/insights/climate-action-progress-1-5-degrees-c>.
- [19] "World Energy Outlook 2018 – Analysis - IEA." <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018> (accessed Jul. 16, 2023).
- [20] "UAE targets 15 million tonnes of green hydrogen production by 2050 as it approves national H2 strategy | Hydrogen news and intelligence." <https://www.hydrogeninsight.com/policy/uae-targets-15-million-tonnes-of-green-hydrogen-production-by-2050-as-it-approves-national-h2-strategy/2-1-1480383> (accessed Jul. 16, 2023).
- [21] "Japan Hydrogen Basic Strategy | White & Case LLP." <https://www.whitecase.com/insight-alert/japan-hydrogen-basic-strategy> (accessed Jul. 16, 2023).
- [22] "Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor." <https://www.irena.org/Digital-Report/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation> (accessed Jul. 16, 2023).
- [23] D. Gielen, D. Saygin, E. Taibi, and J. P. Birat, "Renewables-based decarbonization and relocation of iron and steel making: A case study," *J. Ind. Ecol.*, vol. 24, no. 5, pp. 1113–1125, Oct. 2020, doi: 10.1111/JIEC.12997.
- [24] H. L. Yip *et al.*, "A Review of Hydrogen Direct Injection for Internal Combustion Engines: Towards Carbon-Free Combustion," *Appl. Sci.* 2019, Vol. 9, Page 4842, vol. 9, no. 22, p. 4842, Nov. 2019, doi: 10.3390/APP9224842.
- [25] Q. Hassan, A. Z. Sameen, H. M. Salman, and M. Jaszczur, "A Roadmap with Strategic Policy toward Green Hydrogen Production: The Case of Iraq," *Sustain.* 2023, Vol. 15, Page 5258, vol. 15, no. 6, p. 5258, Mar. 2023, doi: 10.3390/SU15065258.
- [26] "2022: Breakthrough opens door to low-cost green hydrogen - University of Wollongong – UOW." <https://www.uow.edu.au/media/2022/breakthrough-opens-door-to-low-cost-green-hydrogen.php> (accessed Jul. 16, 2023).
- [27] "Hydrogen Infrastructure - an overview | ScienceDirect Topics." <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hydrogen-infrastructure> (accessed Jul. 16, 2023).
- [28] "Number of hydrogen fuel stations by country 2022 | Statista."

- <https://www.statista.com/statistics/1026719/number-of-hydrogen-fuel-stations-by-country/> (accessed Jul. 16, 2023).
- [29] "Hydrogen Storage | Department of Energy."  
<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage> (accessed Nov. 30, 2021).
  - [30] H. Dagdougui, R. Sacile, C. Bersani, and A. Ouammi, "Hydrogen Production and Current Technologies," *Hydrog. Infrastruct. Energy Appl.*, pp. 7–21, 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-812036-1.00002-0.
  - [31] S. S. Kumar and V. Himabindu, "Hydrogen production by PEM water electrolysis-A review," 2019, doi: 10.1016/j.mset.2019.03.002.
  - [32] S. Sebbahi, N. Nabil, A. Alaoui-Belghiti, S. Laasri, S. Rachidi, and A. Hajjaji, "Assessment of the three most developed water electrolysis technologies: Alkaline Water Electrolysis, Proton Exchange Membrane and Solid-Oxide Electrolysis Selection and peer-review under responsibility of the scientific committee of the 4th International Conference on Advanced Materials for Photonics, Sensing and Energy Conversion Energy Applications," 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.264.
  - [33] K. Zeng and D. Zhang, "Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 36, pp. 307–326, 2009, doi: 10.1016/j.pecs.2009.11.002.
  - [34] D. Burnat *et al.*, "Composite membranes for alkaline electrolysis based on polysulfone and mineral fillers," 2015, doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.04.066.
  - [35] A. H. A. Rahim, A. S. Tijani, S. K. Kamarudin, and S. Hanapi, "An overview of polymer electrolyte membrane electrolyzer for hydrogen production: Modeling and mass transport," 2016, doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.01.012.
  - [36] P. Nikolaidis and A. Poullikkas, "A comparative overview of hydrogen production processes," 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.044.
  - [37] H. Ju, S. Badwal, and S. Giddey, "A comprehensive review of carbon and hydrocarbon assisted water electrolysis for hydrogen production," 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.09.125.
  - [38] W. Xu and K. Scott, "The effects of ionomer content on PEM water electrolyser membrane electrode assembly performance," 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.08.055.
  - [39] J. Chi and H. Yu, "Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production," *Chinese J. Catal.*, vol. 39, pp. 390–394, 2018, doi: 10.1016/S1872-2067(17)62949-8.
  - [40] S. A. Grigoriev, V. N. Fateev, D. G. Bessarabov, and P. Millet, "Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology," 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.03.109.
  - [41] M. Liang, B. Yu, M. Wen, J. Chen, J. Xu, and Y. Zhai, "Preparation of LSM-YSZ composite powder for anode of solid oxide electrolysis cell and its activation mechanism," *J. Power Sources*, vol. 190, pp. 341–345, 2009, doi: 10.1016/j.jpowsour.2008.12.132.
  - [42] A. Buttler and H. Spliethoff, "Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review," 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.09.003.
  - [43] J. Chi and H. Yu, "Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production,"

- Chinese J. Catal.*, vol. 39, no. 3, pp. 390–394, Mar. 2018, doi: 10.1016/S1872-2067(17)62949-8.
- [44] “The hydrogen colour spectrum | National Grid Group.” <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum> (accessed Jul. 16, 2023).
  - [45] “Types of hydrogen fuel - Energy Education.” [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Types\\_of\\_hydrogen\\_fuel](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Types_of_hydrogen_fuel) (accessed Jul. 16, 2023).
  - [46] “Hydrogen Fuel Cell Electric Cars | DriveClean.” <https://driveclean.ca.gov/hydrogen-fuel-cell> (accessed Jul. 16, 2023).
  - [47] “Hydrogen Car As Vehicle with Renewable H2 Power Source Outline Diagram Stock Vector - Illustration of green, water: 266635761.” <https://www.dreamstime.com/hydrogen-car-as-vehicle-renewable-h-power-source-outline-diagram-labeled-educational-technical-principle-drawing-motor-image266635761> (accessed Jul. 16, 2023).
  - [48] “Hydrogen fuel cell cars: what you need to know | BMW.com.” <https://www.bmw.com/en/innovation/how-hydrogen-fuel-cell-cars-work.html> (accessed Jul. 16, 2023).
  - [49] “Step inside the new BMW iX5 Hydrogen | BMW | Discover BMW.” <https://discover.bmw.co.uk/article/step-inside-the-new-bmw-ix5-hydrogen> (accessed Jul. 16, 2023).
  - [50] H. Jafari, S. Safarzadeh, and E. Azad-Farsani, “Effects of governmental policies on energy-efficiency improvement of hydrogen fuel cell cars: A game-theoretic approach,” 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.124394.
  - [51] A. Szatek, I. Pielecha, and W. Cieslik, “Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) Energy Flow Analysis in Real Driving Conditions (RDC),” *Energies* 2021, Vol. 14, Page 5018, vol. 14, no. 16, p. 5018, Aug. 2021, doi: 10.3390/EN14165018.
  - [52] H. Shekhar Das, C. Wei Tan, and A. Yatim, “Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies,” 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.056.
  - [53] H. Seyin and T. Arat, “Alternative fuelled hybrid electric vehicle (AF-HEV) with hydrogen enriched internal combustion engine,” 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.12.219.
  - [54] S. Verhelst and T. Wallner, “Hydrogen-fueled internal combustion engines,” 2009, doi: 10.1016/j.pecs.2009.08.001.
  - [55] H. L. Yip *et al.*, “A Review of Hydrogen Direct Injection for Internal Combustion Engines: Towards Carbon-Free Combustion,” *Appl. Sci.* 2019, Vol. 9, Page 4842, vol. 9, no. 22, p. 4842, Nov. 2019, doi: 10.3390/APP9224842.
  - [56] N. Zamel and X. Li, “Life cycle analysis of vehicles powered by a fuel cell and by internal combustion engine for Canada,” *J. Power Sources*, vol. 155, pp. 297–310, 2006, doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.04.024.
  - [57] N. Zamel and X. Li, “Life cycle comparison of fuel cell vehicles and internal combustion engine vehicles for Canada and the United States,” *J. Power Sources*, vol. 162, pp. 1241–1253, 2006, doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.08.007.
  - [58] D. Candelaresi, A. Valente, D. Iribarren, J. Dufour, and G. Spazzafumo, “Comparative life cycle

- assessment of hydrogen-fuelled passenger cars,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 72, pp. 35961–35973, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2021.01.034.
- [59] “US Electric Car Prices: Cheapest To Most Expensive.” <https://insideevs.com/news/565883/electric-car-prices-us/> (accessed Jul. 16, 2023).
- [60] G. Kakoulaki, I. Kougias, N. Taylor, F. Dolci, J. Moya, and A. Jäger-Waldau, “Green hydrogen in Europe-A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 228, p. 113649, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113649.
- [61] K. Don Baik and S. Ho Yang, “Improving open-cathode polymer electrolyte membrane fuel cell performance using multi-hole separators,” 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.01.040.
- [62] Z. Pan, Y. Bi, and A. □ Liang, “A cost-effective and chemically stable electrode binder for alkaline-acid direct ethylene glycol fuel cells,” 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114060.
- [63] J. Zhao and X. Li, “A review of polymer electrolyte membrane fuel cell durability for vehicular applications: Degradation modes and experimental techniques,” 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.112022.
- [64] “Schematic diagram showing the components of a single PEMFC: bipolar... | Download Scientific Diagram.” [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-showing-the-components-of-a-single-PEMFC-bipolar-plates-gaskets-gas\\_fig2\\_354549784](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-showing-the-components-of-a-single-PEMFC-bipolar-plates-gaskets-gas_fig2_354549784) (accessed Jul. 16, 2023).
- [65] Y. Luo *et al.*, “Development and application of fuel cells in the automobile industry,” *J. Energy Storage*, vol. 42, p. 103124, 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.103124.
- [66] J. Rechberger, A. Kaupert, J. Hagerskans, and L. Blum, “ScienceDirect Demonstration of the first European SOFC APU on a heavy duty truck,” *Transp. Res. Procedia*, vol. 14, pp. 3676–3685, 2016, doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.442.
- [67] “New solid oxide fuel cell system wins state approval in S. Korea.” <https://www.ajudaily.com/view/20200525125600611> (accessed Jul. 16, 2023).
- [68] M. D. Fernandes *et al.*, “Solid oxide fuel cell technology paths: National innovation system contributions from Japan and the United States,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 127, p. 109879, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109879.
- [69] M. İnci, M. Büyük, H. Demir, and G. İlbey, “A review and research on fuel cell electric vehicles: Topologies, power electronic converters, energy management methods, technical challenges, marketing and future aspects,” 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.110648.
- [70] G. Kubilay Karayel, N. Javani, and I. Dincer, “A comprehensive assessment of energy storage options for green hydrogen,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 291, p. 117311, 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.117311.
- [71] I. A. Hassan, H. S. Ramadan, M. A. Saleh, and D. Hissel, “Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications: Review, analysis and perspectives,” 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111311.
- [72] J. Andersson and S. Gr, “Large-scale storage of hydrogen,” 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.063.
- [73] R. K. Ahluwalia *et al.*, “Technical assessment of cryo-compressed hydrogen storage tank

- systems for automotive applications,” 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.02.074.
- [74] E. Rivard, M. Trudeau, and K. Zaghib, “Hydrogen Storage for Mobility: A Review,” *Mater.* 2019, Vol. 12, Page 1973, vol. 12, no. 12, p. 1973, Jun. 2019, doi: 10.3390/MA12121973.
  - [75] “Physical Hydrogen Storage | Department of Energy.” <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/physical-hydrogen-storage> (accessed Jul. 17, 2023).
  - [76] S. M. Aceves *et al.*, “High-density automotive hydrogen storage with cryogenic capable pressure vessels,” 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.11.069.
  - [77] Z. Yanxing, Z. Yuan, D. Xueqiang, and S. Jun, “Thermodynamics analysis of hydrogen storage based on compressed gaseous hydrogen, liquid hydrogen and cryo-compressed hydrogen,” 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.207.
  - [78] “Cryo-compressed hydrogen, the best solution for storage and refueling stations? | CompositesWorld.” <https://www.compositesworld.com/articles/cryo-compressed-hydrogen-the-best-solution-for-storage-and-refueling-stations> (accessed Jul. 16, 2023).
  - [79] N. A. A. Rusman and M. Dahari, “A review on the current progress of metal hydrides material for solid-state hydrogen storage applications,” 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.244.
  - [80] M. A. N. Ahmad, N. Sazelee, N. A. Ali, and M. Ismail, “An Overview of the Recent Advances of Additive-Improved Mg(BH<sub>4</sub>)<sub>2</sub> for Solid-State Hydrogen Storage Material,” *Energies* 2022, Vol. 15, Page 862, vol. 15, no. 3, p. 862, Jan. 2022, doi: 10.3390/EN15030862.
  - [81] L. George and S. K. Saxena, “Structural stability of metal hydrides, alanates and borohydrides of alkali and alkali- earth elements: A review,” 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.03.078.
  - [82] S. M. Aceves, G. D. Berry, J. Martinez-Frias, and F. Espinosa-Loza, “Vehicular storage of hydrogen in insulated pressure vessels,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 31, pp. 2274–2283, 2006, doi: 10.1016/j.ijhydene.2006.02.019.
  - [83] J. Ren, N. M. Musyoka, H. W. Langmi, M. Mathe, and S. Liao, “Current research trends and perspectives on materials-based hydrogen storage solutions: A critical review,” 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.195.
  - [84] pidjoe, “The Future of Hydrogen.”
  - [85] “Hydrogen roadmap Europe - Publications Office of the EU.” <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0817d60d-332f-11e9-8d04-01aa75ed71a1/language-en> (accessed Jul. 16, 2023).
  - [86] “Path to hydrogen competitiveness A cost perspective,” 2020, Accessed: Jul. 16, 2023. [Online]. Available: [www.hydrogencouncil.com](http://www.hydrogencouncil.com).
  - [87] “Demonstration of a large-scale (min. 20MW) electrolyser for converting renewable energy to hydrogen.” [https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020\\_FCH-02-1-2018](https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020_FCH-02-1-2018) (accessed Jul. 16, 2023).
  - [88] “Energy Park Bad Lauchstädt | Uniper.” <https://www.uniper.energy/projects-and-cases/energy-park-bad-lauchstadt> (accessed Jul. 16, 2023).
  - [89] “Hydrogen can provide low-carbon flexibility to UK power system | Aurora Energy Research.” <https://auroraer.com/media/hydrogen-can-provide-low-carbon-flexibility-to-uk-power-system/> (accessed Jul. 16, 2023).

- [90] "Hydrogen's forty-fold kick start: The boost from the European Hydrogen Strategy. | Energy Central." <https://energycentral.com/c/cp/40-fold-increase-for-hydrogen-eu> (accessed Jul. 16, 2023).
- [91] "Global Green Hydrogen Market Size Report, 2022-2030." <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/green-hydrogen-market> (accessed Jul. 16, 2023).
- [92] "EU invests €3.6 billion of emissions trading revenues." [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_23\\_3787](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_3787) (accessed Jul. 16, 2023).
- [93] "The PEM electrolyzer: a giant leap for low-carbon hydrogen | Air Liquide." <https://www.airliquide.com/stories/industry/pem-electrolyzer-giant-leap-low-carbon-hydrogen> (accessed Jul. 16, 2023).
- [94] "Hydrogen electrolysis using renewable energy begins at 10MW Fukushima plant - Energy-Storage.News." <https://www.energy-storage.news/hydrogen-electrolysis-using-renewable-energy-begins-at-10mw-fukushima-plant/> (accessed Jul. 16, 2023).
- [95] "'World's cheapest green hydrogen' | Start-up with ultra-efficient electrolyser to develop pilot factory after securing \$29m | Recharge." <https://www.rechargenews.com/energy-transition/worlds-cheapest-green-hydrogen-start-up-with-ultra-efficient-electrolyser-to-develop-pilot-factory-after-securing-29m/2-1-1270403> (accessed Jul. 16, 2023).
- [96] "Hydrogen - Nowega." <https://www.nowega.de/en/hydrogen/> (accessed Jul. 16, 2023).