



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΝΟΜΗ ΠΡΑΣΙΝΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΟΙ
ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ**

Συγγραφέας:

ΚΟΥΝΤΟΥΡΗΣ ΤΑΞΙΑΡΧΗΣ

A.M.:

46525

Επιβλέποντες Καθηγητές:

ΚΑΒΒΑΔΙΑΣ ΚΟΣΜΑΣ

ΤΖΕΛΕΠΗΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

Diploma Thesis

**GREEN HYDROGEN, STORAGE, DISTRIBUTION AND ITS
APPLICATIONS IN INDUSTRY**

Student Name and Surname:

KOUNTOURIS TAXIARCHIS

Registration Number:

46525

Supervisor name and surname:

KAVVADIAS KOSMAS

TZELEPIS STEFANOS

Athens, February 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ

**ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΝΟΜΗ ΠΡΑΣΙΝΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΟΙ
ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ**

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

Α/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΑΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
	Ευάγγελος Ι. Σακελλαρίου		

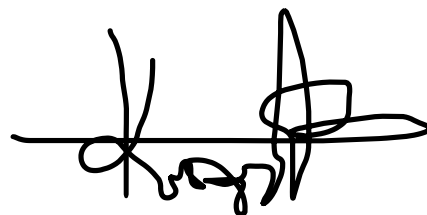
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΚΟΥΝΤΟΥΡΗΣ ΤΑΞΙΑΡΧΗΣ του ΓΕΩΡΓΙΟΥ, με αριθμό μητρώου 46525 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο/Η Δηλών/ούσα



Περίληψη

Τα υψηλά επίπεδα εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα καθώς και η σταδιακή εξάντληση των ορυκτών καυσίμων σε παγκόσμιο επίπεδο καθιστούν επιτακτική την ανάγκη εύρεσης εναλλακτικών λύσεων ως προς την παραγωγή ενέργειας και δραστηκής μείωσης των εκπομπών αυτών από το ενεργειακό σύστημα. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση των μεθόδων αποθήκευσης και μεταφοράς του υδρογόνου ως εναλλακτικό καύσιμο, η ανάδειξη των ποικίλων χρήσεων του στους τομείς της βιομηχανίας και η παράθεση στόχων και στρατηγικών των βιομηχανιών για την επίτευξη μηδενικού αποτυπώματος άνθρακα. Αρχικά παρατίθενται οι μέθοδοι παραγωγής του οι οποίες διαφοροποιούνται ανάλογα με το ανθρακικό τους αποτύπωμα και με αυτόν τον τρόπο το υδρογόνο χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες οι οποίες είναι γκρι, μπλε και πράσινο. Στη συνέχεια αναλύονται οι τέσσερις τεχνικές αποθήκευσης του οι οποίες είναι οι φιάλες πεπιεσμένου αερίου, οι κρυογονικές δεξαμενές υγρού, τα υδρίδια μετάλλων και οι νανοσωλήνες άνθρακα και γίνεται μια σύγκριση των χαρακτηριστικών τους ενώ παρακάτω παρατίθενται και συγκρίνονται οι τρόποι μεταφοράς και διανομής του οι οποίοι είναι οι αγωγοί, τα πλοία και τα φορτηγά. Στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μια μελέτη του υδρογόνου ως εναλλακτικό καύσιμο στον τομέα της βιομηχανίας με απώτερο σκοπό την απανθρακοποίηση της ενώ παράλληλα παρατίθενται ορισμένοι παράγοντες με βάση τους οποίους θα κριθεί αν τελικά το υδρογόνο μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη επιλογή ως καύσιμο μηδενικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σε παγκόσμιο επίπεδο.

Λέξεις Κλειδιά

Υδρογόνο, Απανθρακοποίηση, Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ενεργειακή ασφάλεια, κλιματική αλλαγή, υδρογονοαποθείωση, εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, βιομηχανία χάλυβα, εναλλακτικά καύσιμα, τεχνολογίες αποθήκευσης υδρογόνου, δίκτυα διανομής υδρογόνου

Abstract

The high levels of carbon dioxide emissions as well as the gradual depletion of fossil fuels at a global level make it urgent to find alternative solutions in terms of energy production and to drastically reduce these emissions from the energy system. The aim of this paper is to analyze the methods of storing and transporting hydrogen as an alternative fuel, to highlight its various uses in the industrial sectors and to list the objectives and strategies of the industries to achieve a zero carbon footprint. Initially, its production methods are listed which are differentiated according to their carbon footprint and in this way hydrogen is divided into three categories which are gray, blue and green. Then the four storage techniques are analyzed, which are compressed gas cylinders, cryogenic liquid tanks, metal hydrides and carbon nanotubes, and a comparison of their characteristics is made, while below are listed and compared the ways of its transportation and distribution, which are the pipelines, ships and trucks. In the last chapter, a study is made of hydrogen as an alternative fuel in the industry sector with the ultimate goal of decarbonization, while at the same time some factors are listed on the basis of which it will be judged whether hydrogen can ultimately be a viable option as a fuel with zero carbon dioxide emissions in global level.

Key Words

Hydrogen, Decarbonization, Renewable energy sources, energy security, climate change, hydrogen desulfurization, carbon dioxide emissions, hydrogen storage technologies, steel industries, alternative fuels, hydrogen distribution networks

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Κατάλογος Εικόνων.....	9
Κατάλογος Πινάκων	9
Κατάλογος Διαγραμμάτων	9
1. Υδρογόνο	10
1.1 Εισαγωγή.....	10
1.2 Γενικά στοιχεία για το υδρογόνο	12
2. Παραγωγή υδρογόνου.....	18
2.1 Εισαγωγή	18
2.2 Τεχνολογίες για παραγωγή υδρογόνου	22
2.2.1 Παραγωγή υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα	22
2.2.2 Τεχνολογίες αναμόρφωσης ορυκτών υδρογονανθράκων	23
2.2.3 Πυρόλυση ορυκτών υδρογονανθράκων.....	26
2.2.4 Παραγωγή Υδρογόνου από Νερό	28
2.3 Αναμορφωτές.....	33
3. Χρήσεις και κόστος υδρογόνου γενικά.....	34
3.1 Χρήσεις υδρογόνου.....	34
3.2 Κόστος-περιορισμοί-πλαίσιο στην Ε.Ε.	35
4. Αποθήκευση και μεταφορά υδρογόνου	37
4.1 Τρόποι αποθήκευσης	37
4.1.1 Αποθήκευση υδρογόνου σε μέταλλα και υδρίδια μετάλλων	38
4.1.2 Μηχανισμοί αποθήκευσης υδρογόνου σε νανοσωλήνες άνθρακα	42
4.1.3 Αποθήκευση σε νανοσωλήνες άνθρακα προσμίξεων αλκαλίων	43
4.1.4 Αποθήκευση υδρογόνου σε στέρεα κατάσταση	43
4.1.5 Αποθήκευση υδρογόνου σε αέρια κατάσταση.....	45
4.2 Κόστος αποθήκευσης.....	45

4.3 Ο ρόλος της αποθήκευσης του υδρογόνου στην ενεργειακή κρίση	47
4.4 Μεταφορά και διανομή υδρογόνου	49
4.5 Κόστος μεταφοράς.....	52
5. Χρήσεις του υδρογόνου στην βιομηχανία	54
5.1 Το υδρογόνο στον τομέα των μεταφορών	54
5.2 Χρήση υδρογόνου για διύλιση πετρελαίου.....	56
5.3 Το υδρογόνο στην βιομηχανία ως μέσο απανθρακοποίησής της	58
5.4 Στόχοι και αλλαγές για ένα μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα στη βιομηχανία....	60
5.5 Ο ρόλος της Ελλάδος στην απανθρακοποίηση του ενεργειακού της μίγματος.	64
5.5.1 Το πρόγραμμα H2CEM για την απανθρακοποίηση της Titan Group	66
5.6 Χρήση πράσινου υδρογόνου στις Ευρωπαϊκές βιομηχανίες χάλυβα.....	67
5.6.1 Έργα μηδενικού αποτυπώματος άνθρακα στις βιομηχανίες χάλυβα.....	72
6. Συμπεράσματα	79
7. Βιβλιογραφικές αναφορές.....	80

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Παραγωγή πράσινου υδρογόνου, μετατροπή και τελικές χρήσεις σε όλο το ενεργειακό σύστημα [46].....	13
Εικόνα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση του ενεργειακού συστήματος σήμερα και στο μέλλον [48]	21
Εικόνα 4.1: Δυναμική ενέργεια υδρογόνου συναρτήσει της απόστασης του από καθαρή επιφάνεια μετάλλου [49].....	39
Εικόνα 5.1: Διάγραμμα ροής διεργασιών στη μονάδα υδρογονοαποθείωσης [49].....	57

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Επισκόπηση των παραγόντων για τον εντοπισμό πιθανών εμπορικών εταίρων του υδρογόνου και των παραγώγων του [46]	15
Πίνακας 2.1: Περίληψη Τεχνολογιών Παραγωγής Υδρογόνου από Ορυκτά Καύσιμα	22
Πίνακας 4.1: Κύρια Χαρακτηριστικά Μεθόδων Αποθήκευσης[6]	45

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1.1: Ενεργειακή πυκνότητα και ειδική ενέργεια διαφόρων καυσίμων και συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [46].....	14
Διάγραμμα 2.1: Παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά πηγή ενέργειας [47].....	18
Διάγραμμα 2.2: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που σχετίζονται με την ενέργεια.[47].....	19

1. Υδρογόνο

1.1 Εισαγωγή

Το σχέδιο δράσης καινοτομίας της G20 Karuizawa για τις ενεργειακές μεταβάσεις και το παγκόσμιο περιβάλλον για βιώσιμη ανάπτυξη, που δημοσιεύθηκε στις 16 Ιουνίου 2019, καλεί τον Διεθνή Οργανισμό Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (IRENA) να αναπτύξει την ανάλυση των πιθανών οδών προς ένα μέλλον καθαρής ενέργειας με δυνατότητα χρήσης υδρογόνου, σημειώνοντας ότι το υδρογόνο καθώς και άλλα συνθετικά καύσιμα μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο μέλλον της καθαρής ενέργειας, με στόχο μακροπρόθεσμες στρατηγικές [1]. Αυτή η έκθεση εκπονήθηκε ως απάντηση και εγκαινιάζεται με την ευκαιρία της υπουργικής συνόδου για την ενέργεια υδρογόνου στις 25 Σεπτεμβρίου 2019 στο Τόκιο της Ιαπωνίας.

Η τρέχουσα συζήτηση προσανατολισμού υποδηλώνει ότι τώρα είναι η ώρα να επεκταθούν οι τεχνολογίες και να μειωθεί το κόστος ώστε να καταστεί δυνατή η ευρεία χρήση του υδρογόνου:

- Το υδρογόνο μπορεί να συμβάλει στην αντιμετώπιση διαφόρων κρίσιμων ενεργειακών προκλήσεων. Προσφέρει τρόπους για την απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές μιας σειράς τομέων – συμπεριλαμβανομένων των εντατικών και μακρινών μεταφορών, των χημικών προϊόντων και του σιδήρου και χάλυβα – όπου αποδεικνύεται δύσκολο να μειωθούν ουσιαστικά οι εκπομπές. Μπορεί επίσης να συμβάλει στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα και στην ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας. Επιπλέον, αυξάνει την ευελιξία στα συστήματα ισχύος.
- Το υδρογόνο είναι ευέλικτο όσον αφορά την παροχή και τη χρήση. Είναι ένας ελεύθερος φορέας ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από πολλές πηγές ενέργειας.
- Το υδρογόνο μπορεί να επιτρέψει στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να προσφέρουν ακόμη μεγαλύτερη συμβολή. Έχει τη δυνατότητα να βοηθήσει με μεταβλητή παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως τα ηλιακά φωτοβολταϊκά (PV). Το υδρογόνο είναι μία από τις επιλογές για την αποθήκευση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και φαίνεται έτοιμη να γίνει μια επιλογή χαμηλότερου κόστους για την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας για ημέρες, εβδομάδες ή ακόμη και μήνες. Το υδρογόνο

και τα καύσιμα με βάση το υδρογόνο μπορούν να μεταφέρουν ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές σε μεγάλες αποστάσεις.

Ταυτόχρονα, η ευρεία χρήση καθαρού υδρογόνου στην παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση αντιμετωπίζει διάφορες προκλήσεις:

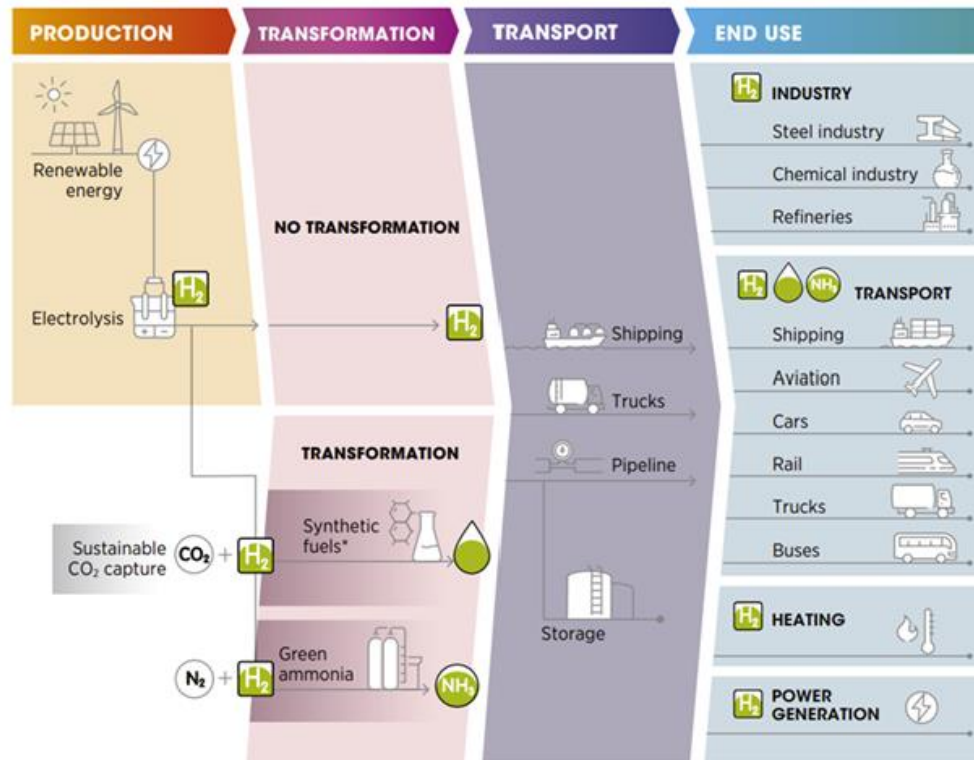
- Σήμερα, το υδρογόνο τροφοδοτείται σχεδόν εξ ολοκλήρου από φυσικό αέριο και άνθρακα. Το υδρογόνο αναπτύσσεται ήδη σε βιομηχανική κλίμακα σε όλο τον κόσμο, αλλά η παραγωγή του είναι υπεύθυνη για ετήσιες εκπομπές CO₂ ισοδύναμες με εκείνες της Ινδονησίας και του Ηνωμένου Βασιλείου μαζί.
- Η παραγωγή υδρογόνου από ενέργεια χαμηλών ανθρακούχων εκπομπών είναι επί του παρόντος δαπανηρή. Ωστόσο, το κόστος παραγωγής υδρογόνου από ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές μειώνεται ραγδαία.
- Το υδρογόνο πρέπει να χρησιμοποιείται πολύ ευρύτερα. Σήμερα, το υδρογόνο χρησιμοποιείται κυρίως στη διύλιση πετρελαίου και για την παραγωγή αμμωνίας. Για να συμβάλει σημαντικά στη μετάβαση σε καθαρές μορφές ενέργειας, πρέπει επίσης να εγκριθεί σε τομείς όπου επί του παρόντος απουσιάζει σχεδόν πλήρως, όπως οι μεταφορές, η κατασκευή κτηρίων και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η ανάπτυξη υποδομών παραγωγής υδρογόνου αποτελεί πρόκληση και εμποδίζει την ευρεία υιοθέτηση. Οι νέοι και αναβαθμισμένοι αγωγοί και οι αποτελεσματικές και οικονομικές ναυτιλιακές λύσεις απαιτούν περαιτέρω ανάπτυξη και εφαρμογή.
- Οι κανονισμοί περιορίζουν επί του παρόντος την ανάπτυξη μιας βιομηχανίας καθαρού υδρογόνου. Οι κυβερνήσεις και οι βιομηχανίες πρέπει να συνεργαστούν για να διασφαλίσουν ότι οι υφιστάμενοι κανονισμοί δεν αποτελούν περιττό εμπόδιο για τις επενδύσεις.

1.2 Γενικά στοιχεία για το υδρογόνο

Τα τελευταία χρόνια ένας αυξανόμενος αριθμός χωρών έχει δεσμευτεί να επιτύχει καθαρές μηδενικές εκπομπές. Μέχρι τον Απρίλιο του 2022, 131 χώρες που κάλυπταν το 88% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου είχαν ανακοινώσει καθαρούς μηδενικούς στόχους. Οι ανθρωπογενείς εκπομπές έχουν ήδη οδηγήσει σε αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας κατά $1,1^{\circ}\text{C}$ σε σύγκριση με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Υπάρχει μια ευρεία αντίληψη ότι το καθαρό μηδέν μέχρι το 2050 είναι επιτακτική ανάγκη για να αυξηθούν οι πιθανότητες να διατηρηθεί αυτή η αύξηση θερμοκρασίας εντός $1,5^{\circ}\text{C}$. Αυτή η ανανεωμένη εστίαση σημαίνει ότι οι εκπομπές από όλες τις τελικές χρήσεις ενέργειας πρέπει να μετριαστούν. Ενώ η ενεργειακή απόδοση, η ηλεκτροδότηση και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να επιτύχουν το 70% του μετριασμού που απαιτείται, το υδρογόνο θα χρειαστεί για την απεξάρτηση των τελικών χρήσεων όπου άλλες επιλογές είναι λιγότερο ώριμες ή πιο δαπανηρές, όπως η βαριά βιομηχανία, οι μεταφορές μεγάλων αποστάσεων και η εποχιακή αποθήκευση ενέργειας. Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις εφαρμογές, το υδρογόνο θα μπορούσε να συνεισφέρει, στο 10% του μετριασμού που απαιτείται για την επίτευξη του σεναρίου του IRENA για την αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας έως $1,5^{\circ}\text{C}$, και στο 12% της τελικής ζήτησης ενέργειας.[2]

Το υδρογόνο παράγεται σε εμπορική βάση σήμερα. Χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη στη χημική βιομηχανία και στα διυλιστήρια, ως μέρος ενός μείγματος αερίων στην παραγωγή χάλυβα και στην παραγωγή θερμότητας και ενέργειας. Η παγκόσμια παραγωγή ανέρχεται σε περίπου $75 \text{ MtH}_2/\text{έτος}$ ως καθαρό υδρογόνο και επιπλέον $45 \text{ MtH}_2/\text{έτος}$ ως μέρος ενός μείγματος αερίων. Αυτό ισοδυναμεί με το 3% της παγκόσμιας ζήτησης τελικής ενέργειας και παρόμοιο με την ετήσια κατανάλωση ενέργειας της Γερμανίας.

Το υδρογόνο είναι ένας ευέλικτος φορέας ενέργειας (όχι πηγή ενέργειας). Μπορεί να παραχθεί από πολλαπλές πρώτες ύλες και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σχεδόν οποιαδήποτε εφαρμογή όπως εμφανίζεται και στην Εικόνα 1.1. Η ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές μπορεί να μετατραπεί σε υδρογόνο μέσω ηλεκτρόλυσης. Αυτή η σύζευξη επιτρέπει επίσης στους ηλεκτρολύτες να παρέχουν ευελιξία στο δίκτυο, συμπληρώνοντας εναλλακτικές λύσεις όπως π.χ. μπαταρίες.



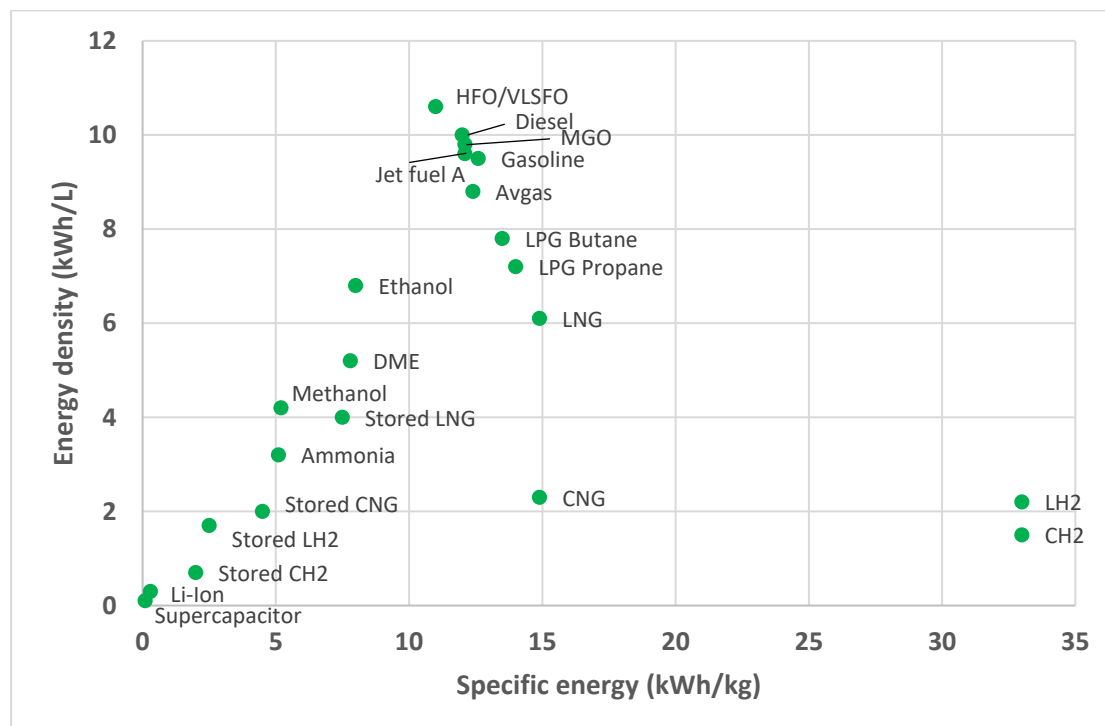
Εικόνα 1.1: Παραγωγή πράσινου υδρογόνου, μετατροπή και τελικές χρήσεις σε όλο το ενεργειακό σύστημα [46]

Στα τέλη του 2021, σχεδόν το 47% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου προερχόταν από φυσικό αέριο, 27% από άνθρακα, 22% από πετρέλαιο (ως υποπροϊόν) και μόνο περίπου το 4% προερχόταν από ηλεκτρόλυση. Η ηλεκτρική ενέργεια είχε παγκόσμιο μέσο μερίδιο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας περίπου 33% το 2021, πράγμα που σημαίνει ότι μόνο το 1% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου προερχόταν από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το ηλεκτρολυτικό υδρογόνο από αποκλειστική παραγωγή παρέμεινε περιορισμένο σε έργα επίδειξης με συνολική παραγωγή 0,7 GW το 2021. Αντίθετα, το σενάριο των 1,5°C θα χρειαζόταν 4-5 TW έως το 2050, απαιτώντας ταχύτερο ρυθμό ανάπτυξης από αυτόν που παρουσιάζουν τα ηλιακά φωτοβολταϊκά (PV) και άνεμος μέχρι σήμερα.[3]

Η χρήση υδρογόνου ως φορέας ενέργειας παραμένει περιορισμένη κυρίως στα οδικά οχήματα. Μέχρι τον Ιούνιο του 2021 περισσότερα από 40.000 ηλεκτρικά οχήματα κυβελών καυσίμου κυκλοφορούσαν σε όλο τον κόσμο, με σχεδόν το 90% αυτών σε τέσσερις χώρες: Κορέα, Ηνωμένες Πολιτείες, Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας και Ιαπωνία. Μέχρι το τέλος του 2020 υπήρχαν περίπου 6.000 ηλεκτρικά λεωφορεία κυβελών καυσίμου (το 95% αυτών στην Κίνα) και περισσότερα από 3.100 ηλεκτρικά

φορτηγά κυψελών καυσίμου. Αυτά τα σύνολα είναι μικρά κλάσματα του παγκόσμιου στόλου οχημάτων.

Η πλήρης αξία του υδρογόνου, ωστόσο, συνειδητοποιείται επακριβώς μόνο όταν μετατραπεί περαιτέρω σε παράγωγα. Το υδρογόνο μπορεί να συνδυαστεί με άνθρακα από CO₂ για να παράγει υδρογονάνθρακες και σχεδόν οποιοδήποτε μόριο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή αμμωνίας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για λιπάσματα (το μεγαλύτερο μέρος της τρέχουσας χρήσης) ή ως καύσιμο για νέες εφαρμογές όπως η ναυτιλία. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μεθανόλης, συνθετικών καυσίμων ή ακόμη και ως αναγωγικός παράγοντας για την αντικατάσταση του άνθρακα στην παραγωγή σιδήρου. Μόλις μετατραπεί σε αυτά τα προϊόντα, η ενεργειακή πυκνότητα αυξάνεται περαιτέρω, καθιστώντας τη μεταφορά μεγάλων αποστάσεων και τη μακροπρόθεσμη αποθήκευση οικονομικά αποδοτική. Έτσι, η μετατροπή σε παράγωγα υδρογόνου ξεκλειδώνει αποτελεσματικά το παγκόσμιο εμπόριο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για παράδειγμα, με βάση το Διάγραμμα 1.1 η υγρή αμμωνία έχει σχεδόν οκταπλάσια ενεργειακή πυκνότητα (MJ/m³) από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου και περισσότερο από 20 φορές τη βαρυμετρική ενεργειακή πυκνότητα (MJ/kg).



Διάγραμμα 1.1: Ενεργειακή πυκνότητα και ειδική ενέργεια διαφόρων καυσίμων και συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [46]

Η υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα παραγώγων που προέρχονται από υδρογόνο αυξάνει αποτελεσματικά την απόσταση που μπορεί να μεταφερθεί η ενέργεια με οικονομικά αποδοτικό τρόπο, συνδέοντας περιοχές χαμηλού κόστους ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με κέντρα ζήτησης που έχουν είτε περιορισμένο δυναμικό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είτε δαπανηρή ανανεώσιμη ενέργεια. Το παγκόσμιο εμπόριο ενέργειας μέσω παραγώγων υδρογόνου θα παρείχε οικονομικά οφέλη καθώς οι χώρες εισαγωγής θα μπορούσαν να αξιοποιήσουν φθηνότερους (από τους εγχώριους) πόρους, βελτιώνοντας την ανθεκτικότητα του συστήματος, καθώς υπάρχουν εναλλακτικοί τρόποι για την ικανοποίηση της τελικής ενεργειακής ζήτησης, και ως εκ τούτου την ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας. Μακροπρόθεσμα, όταν οι τεχνολογίες θα έχουν φτάσει σε πλήρη ωριμότητα και θα αναπτυχθούν στο σύνολό τους, αναμένεται ότι οι χώρες εισαγωγής θα μπορούν να βασίζονται σε πολλαπλές εναλλακτικές λύσεις εντός μικρού εύρους κόστους. Ο Πίνακας 1.1 εξηγεί ότι οι εμπορικοί εταίροι θα ορίζονται, σε μεγάλο βαθμό, από μη οικονομικούς παράγοντες.

Πίνακας 1.1: Επισκόπηση των παραγόντων για τον εντοπισμό πιθανών εμπορικών εταίρων του υδρογόνου και των παραγώγων του [46]

Production And Transport Cost					
Trading Dependence	Political	Geopolitical Factors	Economic	Policy	Technical
<ul style="list-style-type: none"> • Share of largest importer • Share of largest exporter • Transportation risks (transit route) • Number of (potential) exporting countries • Number of (potential) importing countries 	<ul style="list-style-type: none"> • Government stability • Public support • Government transparency • Trade relations 	<ul style="list-style-type: none"> • Small energy importers today to large hydrogen exporters • Oil and gas exporters pivoting to hydrogen exporters • Renewable leaders to hydrogen exporters • Fossil fuel importers to hydrogen importers 	<ul style="list-style-type: none"> • Access to finance • Capital availability for investment • Ease of doing business • Resource quality and amount • Distance to trade partners • Industrial and hydrogen ecosystem • Hydrogen applications • Hydrogen production • Hydrogen infrastructure • Ports • Partnerships and alliances • Role of hydrogen in existing scenarios • Size and pathways for hydrogen projects and pilots 	<ul style="list-style-type: none"> • Current energy mix and GHG mitigation targets • Renewable power share and targets • Infrastructure regulation • CAPEX and OPEX support mechanisms • Certification and sustainability criteria for hydrogen production and transport • Incentive systems (for market creation, long-term signals, bankability of the projects) • Blending target, capacity targets and other incentives for market creation • Permitting and complexity of administrative processes for project execution 	<ul style="list-style-type: none"> • Experience developing similar projects • Availability of human and technological resources • Patents and R&D on hydrogen • Substitutability of the imported energy carrier • Domestic capability for equipment manufacturing (e.g. electrolysis)

Το υδρογόνο έχει επί του παρόντος πολλαπλές προκλήσεις που μπορεί να εμποδίσουν την εκπλήρωση των δυνατοτήτων του:

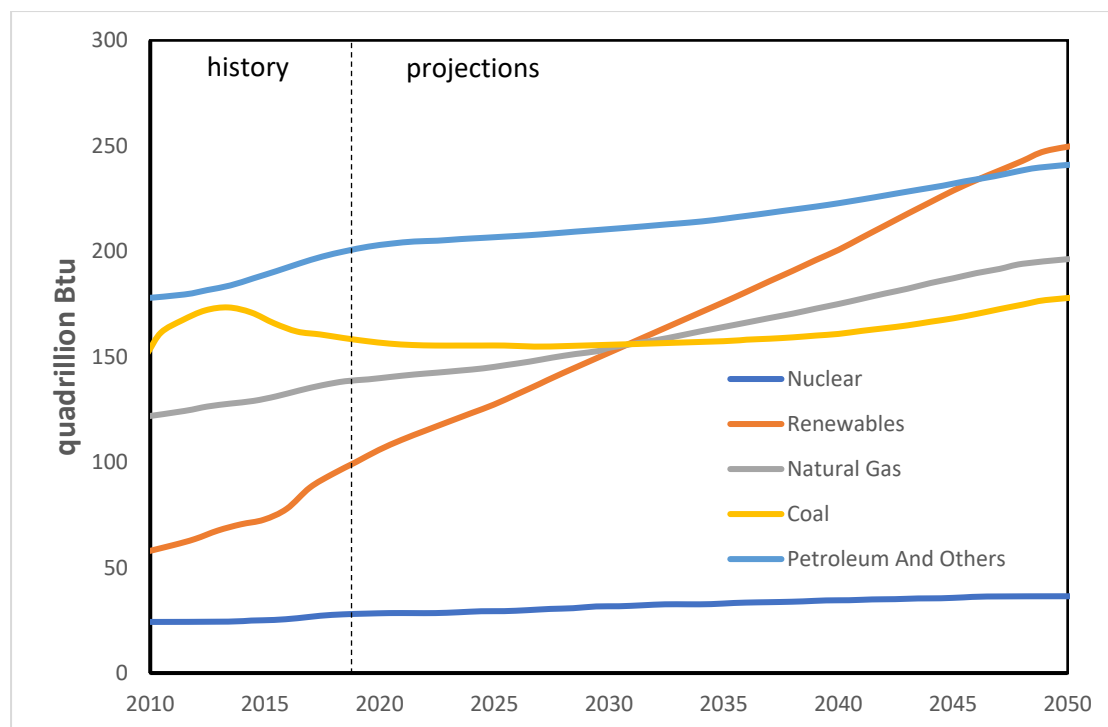
- Κόστος. Με μακροπρόθεσμες μέσες τιμές ορυκτών καυσίμων 75 \$/βαρέλι για το πετρέλαιο και 4-6 \$/GJ για το φυσικό αέριο, το ανανεώσιμο υδρογόνο είναι δύο έως τρεις φορές πιο ακριβό στην παραγωγή από τα ορυκτά στοιχεία αναφοράς. Οι αγωγοί υδρογόνου μπορεί να είναι 10-50% ακριβότεροι. Οι κυψέλες καυσίμου και οι δεξαμενές αποθήκευσης για τις οδικές μεταφορές είναι πολλαπλάσια πιο ακριβές από τους κινητήρες εσωτερικής καύσης. Τα συνθετικά καύσιμα για την αεροπορία μπορεί επί του παρόντος να είναι τρεις έως έξι φορές πιο ακριβά από τα καύσιμα αεριωθουμένων από ορυκτό πετρέλαιο. Το ασφάλιστρο κόστους για τις οδούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε σύγκριση με τις επιλογές με βάση τα ορυκτά μπορεί να είναι 50-75% πιο ακριβό για την αμμωνία, 150% για τη μεθανόλη και 30-40% για τον χάλυβα.
- Έλλειψη διαφοροποίησης. Δεν υπάρχει καθιερωμένος τρόπος διαφοροποίησης του υδρογόνου με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα από το υδρογόνο με βάση τα ορυκτά. Αυτό σημαίνει ότι λείπει η σύνδεση μεταξύ κινήτρων (αγοράς και πολιτικής) και παραγωγής και ότι δεν υπάρχει τρόπος να γνωρίζουν οι καταναλωτές την προέλευση και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του παραγόμενου υδρογόνου. Υπάρχουν πολλές συνεχείς προσπάθειες για την πιστοποίηση υδρογόνου που θα μπορούσαν να εξαλείψουν αυτό το κενό.
- Έλλειψη αγοράς υδρογόνου. Το υδρογόνο δεν είναι εμπορεύσιμο προϊόν σήμερα, πράγμα που σημαίνει ότι δεν υπάρχει δείκτης τιμών. Αυτό μεταφράζεται σε υψηλότερο κόστος που καταβάλλουν οι καταναλωτές, καθώς υπάρχει χαμηλή διαφάνεια τιμών και ανταγωνισμός ενώ επίσης υπάρχει προς το παρόν μικρή ζήτηση για υδρογόνο με χαμηλές εκπομπές άνθρακα.
- Περιορισμένες υποδομές. Σε παγκόσμιο επίπεδο, υπάρχουν μόνο περίπου 4.500 km αγωγών υδρογόνου. Η χρήση ανανεώσιμων πηγών από απομακρυσμένες τοποθεσίες θα απαιτούσε πρόσθετες επενδύσεις στην υποδομή μεταφορών, από αγωγούς έως μονάδες μετατροπής και υγροποίησης, καθώς και αποθήκευση, γεγονός που αυξάνει την αρχική επένδυση που απαιτείται.

- Απώλειες ενέργειας. Κάθε βήμα μετατροπής οδηγεί σε απώλειες ενέργειας, οι οποίες αυξάνουν τη χρήση ανανεώσιμων πηγών που απαιτείται για την ικανοποίηση μιας συγκεκριμένης τελικής χρήσης. Η πρόσθετη χρήση υδρογόνου, πέραν των εφαρμογών όπου είναι απολύτως απαραίτητη, θα αυξήσει τον απαιτούμενο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης της δυναμικότητας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, γεγονός που θα καταστήσει το έργο της απαλλαγής από τον άνθρακα πιο δύσκολο.
- Πολιτική. Οι περισσότερες προσπάθειες πολιτικής έχουν επικεντρωθεί μέχρι στιγμής στις οδικές μεταφορές, ιδίως για ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου και σταθμούς ανεφοδιασμού. Με την εστίαση σε ένα ευρύτερο σύνολο εφαρμογών για το υδρογόνο, η προσοχή της πολιτικής στρέφεται προς τις ολοκληρωμένες εθνικές στρατηγικές, τον εφοδιασμό υδρογόνου, τις υποδομές και την απορρόφηση στη βιομηχανία.

2. Παραγωγή υδρογόνου

2.1 Εισαγωγή

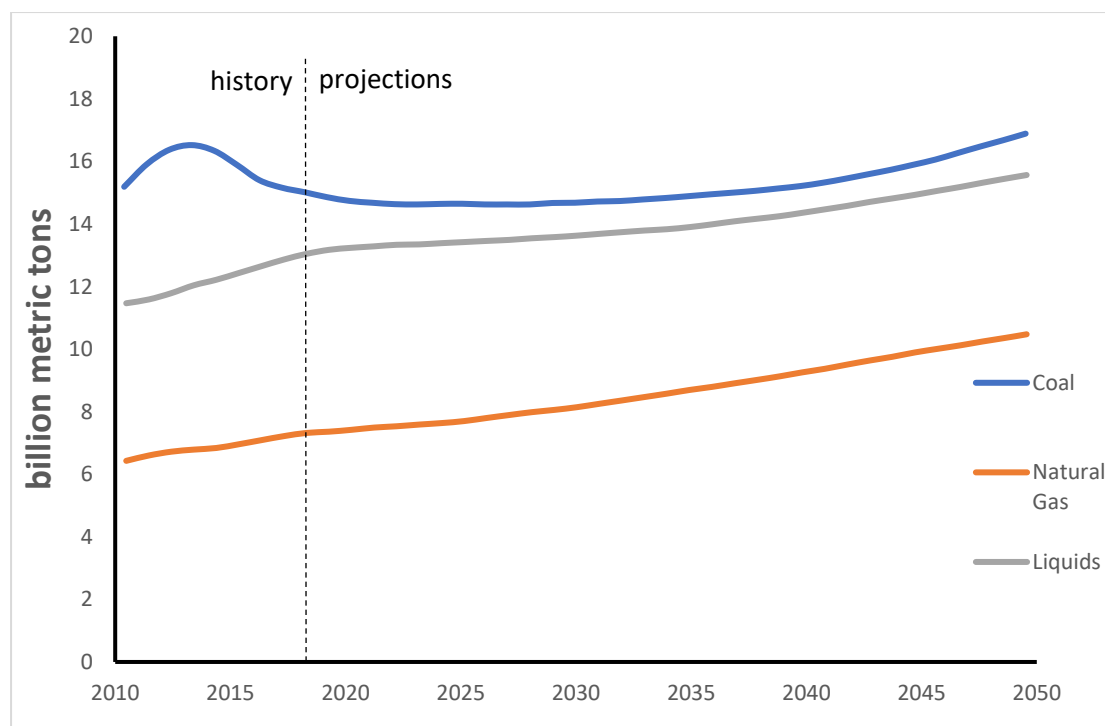
Η παγκόσμια ζήτηση για πρωτογενή ενέργεια θα αυξάνεται κατά 1,3% κάθε χρόνο έως τουλάχιστον το 2040, με αυξανόμενη ζήτηση για ενεργειακές υπηρεσίες ως συνέπεια της παγκόσμιας οικονομικής ανάπτυξης, της αύξησης του πληθυσμού και της προόδου της τεχνολογίας. Υπό αυτή την έννοια, τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο και άνθρακας) έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για την παραγωγή ενέργειας και προβλέπεται να παραμείνουν η κυρίαρχη πηγή ενέργειας μέχρι τουλάχιστον το 2030, κάτι που δείχνει και το Διάγραμμα 2.1. Η χρήση ορυκτών καυσίμων για παραγωγή ενέργειας ή χημικών έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή αερίων θερμοκηπίου, όπως διοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου και άλλες πτητικές ενώσεις και στερεά σωματίδια στην ατμόσφαιρα, συμβάλλοντας στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή.



Διάγραμμα 2.1: Παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά πηγή ενέργειας [47]

Επί του παρόντος, τα καύσιμα με βάση τον άνθρακα καλύπτουν το 85% της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας. Περίπου 16 δισεκατομμύρια τόνοι CO₂ εκπέμπονται

στην ατμόσφαιρα κάθε χρόνο για να καλυφθεί η ενεργειακή ζήτηση. Από αυτές τις εκπομπές, πάνω από το 90% προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, και αναμένεται να αυξηθεί περαιτέρω τα επόμενα χρόνια με βάση το Διάγραμμα 2.2.



Διάγραμμα 2.2: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που σχετίζονται με την ενέργεια. [474747]

Εκτός από τις ισχυρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, τα ορυκτά καύσιμα μειώνονται διαρκώς και οι τιμές του πετρελαίου παρουσιάζουν άγριες διακυμάνσεις, επηρεάζοντας τα κέρδη για τις βιομηχανίες που παράγουν και χρησιμοποιούν πετρέλαιο και την ικανότητα των καταναλωτών να αγοράζουν αγαθά και υπηρεσίες. Η κατανάλωση ενέργειας και οι εκπομπές άνθρακα αντιπροσωπεύουν δύο κρίσιμα στοιχεία της ενεργειακής στρατηγικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Έχουν τεθεί διαφορετικοί στόχοι για να εξασφαλιστεί η μείωση τόσο της κατανάλωσης ενέργειας όσο και των εκπομπών άνθρακα. Υπό αυτή την έννοια, η επόμενη δεσμευτική συμφωνία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τον στόχο ενεργειακής απόδοσης (κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας) επικεντρώνεται σε μείωση 30% το 2030 σε σύγκριση με το επίπεδο του 1990. Ωστόσο, οι άμεσες επιπτώσεις της πανδημίας COVID-19 στο ενεργειακό σύστημα έδειξαν πτώση το 2020 κατά 5% στην παγκόσμια ζήτηση ενέργειας, 7% στις εκπομπές CO₂ που σχετίζονται με την ενέργεια και 18% στις ενεργειακές επενδύσεις. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ειδικά εκείνες στον τομέα της ενέργειας, έχουν επηρεαστεί λιγότερο

από την πανδημία σε σύγκριση με άλλα καύσιμα. Το World Energy Outlook 2020 έχει συμπεριλάβει το νέο σενάριο καθαρών μηδενικών εκπομπών έως το 2050, το οποίο επεκτείνει το σενάριο βιώσιμης ανάπτυξης που βασίζεται σε πολιτικές καθαρής ενέργειας και περιλαμβάνει την πρώτη λεπτομερή μοντελοποίηση του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (IEA).

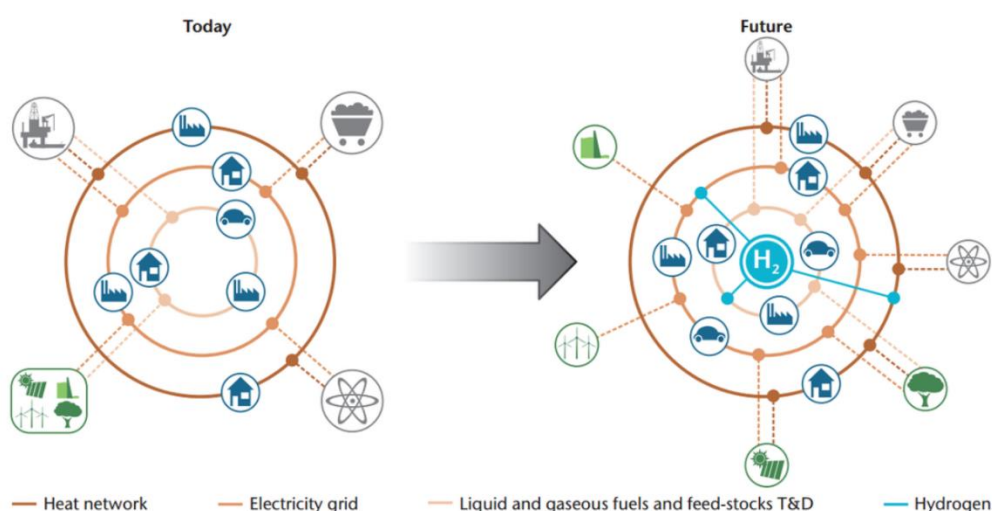
Αυτή, ορίζει ποια πρόσθετα μέτρα θα πρέπει τα επόμενα 10 χρόνια να υιοθετηθούν ώστε να τεθούν οι παγκόσμιες εκπομπές CO₂ σε τροχιά για καθαρό μηδενικό αποτύπωμα έως το 2050 [4]. Από αυτή την άποψη, ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με καθαρές μηδενικές εκπομπές απαιτεί προσεκτικό μακροπρόθεσμο και ολοκληρωμένο σχεδιασμό. Ο τομέας της ηλεκτρικής ενέργειας θα διαδραματίσει βασικό ρόλο στις προσπάθειες μείωσης των εκπομπών, αλλά χρειάζονται επίσης καύσιμα χαμηλών εκπομπών άνθρακα, όπως το υδρογόνο. Η επίτευξη αυτού του στόχου θα σήμαινε επιτάχυνση της ανάπτυξης τεχνολογιών καθαρής ενέργειας.

Με βάση τα παραπάνω, πολλές μελέτες έχουν επικεντρωθεί στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ως εναλλακτική λύση στα ορυκτά καύσιμα. Σε αυτό το πλαίσιο, ο αριθμός των χωρών με πολιτικές που υποστηρίζουν άμεσα τις επενδύσεις σε τεχνολογίες υδρογόνου αυξάνεται. Επιπλέον, δεδομένου ότι η πρωταρχική χρήση του υδρογόνου είναι επί του παρόντος οι βιομηχανικές εφαρμογές, είναι προς το συμφέρον της Ευρωπαϊκής Ένωσης να στραφεί προς την παραγωγή πράσινου υδρογόνου για την επίτευξη στόχων καθαρών μηδενικών εκπομπών άνθρακα. Το υδρογόνο είναι το πιο άφθονο αέριο στο σύμπαν και έχει το μέγιστο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα βάρους σε σύγκριση με οποιοδήποτε άλλο γνωστό καύσιμο.

Η χρήση υδρογόνου για παραγωγή ενέργειας δεν έχει ως αποτέλεσμα εκπομπές ρύπων επειδή παράγει μόνο θερμότητα και υδρατμούς, μειώνοντας την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου. Εκτός από τις ενεργειακές εφαρμογές, το υδρογόνο χρησιμοποιείται ευρέως στη χημική βιομηχανία και στη βιομηχανία πετρελαίου. Παρά την αφθονία του υδρογόνου, δεν είναι διαθέσιμο σε ελεύθερη μορφή στη φύση. Σήμερα, το υδρογόνο παράγεται κυρίως μέσω θερμοχημικών διεργασιών που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα: αναμόρφωση υδρογονανθράκων, αεριοποίηση άνθρακα, πυρόλυση υδρογονανθράκων και αναμόρφωση πλάσματος.

Ως αποτέλεσμα, παράγονται σημαντικές εκπομπές CO₂ (περίπου 830 εκατομμύρια τόνοι ετησίως). Η Εικόνα 2.1 δείχνει ότι η παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές μπορεί να αντιμετωπίσει αυτό το πρόβλημα μειώνοντας το αποτύπωμα άνθρακα, οδηγώντας σε ένα βιώσιμο ενεργειακό σύστημα στο εγγύς μέλλον.

Επιπλέον συμβάλει σημαντικά στη μετάβαση στην καθαρή ενέργεια. Το υδρογόνο, εκτός από το ότι παράγεται με καθαρότερο τρόπο, πρέπει επίσης να υιοθετηθεί σε τομείς στους οποίους αυτή τη στιγμή εκπροσωπείται ελάχιστα, όπως οι μεταφορές ή τα κτίρια.



Εικόνα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση του ενεργειακού συστήματος σήμερα και στο μέλλον [48]

Το υδρογόνο θεωρείται ο ενεργειακός φορέας του μέλλοντος. Ωστόσο, η βιωσιμότητά του εξαρτάται από την καθαρότητα της μεθόδου παραγωγής του και την ενέργεια που χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία λήψης. Από αυτή την άποψη, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα διαδραματίσουν βασικό ρόλο στην απεξάρτηση του τρέχοντος ενεργειακού συστήματος από τον άνθρακα. Ως εκ τούτου, οι κύριες τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου, διαχωρίζονται σε ανανεώσιμες και μη ανανεώσιμες πηγές. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές διαφοροποιούνται επίσης με βάση την ενεργειακή απόδοση, τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και την απόδοση υδρογόνου.

2.2 Τεχνολογίες για παραγωγή υδρογόνου

Το υδρογόνο σε μοριακή μορφή μπορεί να ληφθεί από πολλούς διαφορετικούς πόρους, όπως ορυκτά καύσιμα, βιομάζα και νερό. Για την εξαγωγή υδρογόνου από αυτές τις πηγές, η ενέργεια που δαπανάται πρέπει να είναι διαθέσιμη σε πλεονάζουσα ποσότητα με συνεχή διαθεσιμότητα. Έτσι, η αξιοποίηση του δυναμικού των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή, αιολική, θαλάσσια κύματα κ.λπ.) στις τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου θα επέτρεπε τη βιώσιμη παραγωγή του. Στο εξής, οι κύριες τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου θα καθορίζονται ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη: ορυκτά καύσιμα ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

2.2.1 Παραγωγή υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα

Τα ορυκτά καύσιμα παραμένουν κυρίαρχα στην παγκόσμια προσφορά υδρογόνου, επειδή το κόστος της παραγωγής έχει άμεση σχέση με τις τιμές των καυσίμων, οι οποίες ακόμα διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα. Επί του παρόντος, αρκετές ώριμες τεχνολογίες παράγουν υδρογόνο από ορυκτά καύσιμα, με την αναμόρφωση υδρογονανθράκων και την πυρόλυση να είναι οι πιο χρησιμοποιούμενες. Αυτές οι τεχνικές σχεδόν επιτρέπουν την παραγωγή της πραγματικής ζήτησης υδρογόνου. Πιο συγκεκριμένα, το 2015, το υδρογόνο παρήχθη κατά 48% από φυσικό αέριο, 30% από πετρέλαιο και 18% από άνθρακα. Στον Πίνακα 2.1 συνοψίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά, συμπεριλαμβανομένης της χρησιμοποιούμενης πρώτης ύλης, των συνθηκών λειτουργίας και της ωριμότητας κάθε τεχνολογίας που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα και περιγράφεται στις ακόλουθες υποενότητες.

Πίνακας 2.1: Περίληψη Τεχνολογιών Παραγωγής Υδρογόνου από Ορυκτά Καύσιμα

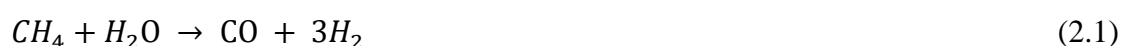
Technology		Feedstock
Reforming technologies	Steam reforming	Light hydrocarbons (less frequently from liquefied petroleum)
	Partial oxidation	Hydrocarbons, heavy fuel oil, and coal
	Autothermal reforming	Light hydrocarbons (less frequently from liquefied petroleum)
Pyrolysis		Hydrocarbons
Gasification		Coal

2.2.2 Τεχνολογίες αναμόρφωσης ορυκτών υδρογονανθράκων

Η αναμόρφωση υδρογονανθράκων είναι η πιο ανεπτυγμένη τεχνική για την παραγωγή υδρογόνου. Εκτός από τον υδρογονάνθρακα, απαιτούνται άλλοι αντιδραστήρες για αυτή τη διαδικασία, οι οποίοι θα μπορούσαν να είναι είτε ατμός είτε οξυγόνο, κοινώς γνωστή ως αντίδραση αναμόρφωσης ατμού ή μερικής οξείδωσης, αντίστοιχα. Όταν συνδυάζονται και οι δύο αντιδράσεις, με την καθαρή μεταβολή της ενθαλπίας αντίδρασης να είναι 0, η διαδικασία ονομάζεται αυτόθερμη αναμόρφωση.

Αναμόρφωση με ατμό

Η αντίδραση αναμόρφωσης ατμού είναι μια αντίδραση ενός μείγματος ατμού και υδρογονανθράκων σε υψηλές θερμοκρασίες για την παραγωγή υδρογόνου και οξειδίων του άνθρακα. Η αναμόρφωση ατμού εξάγει υδρογόνο από το φυσικό αέριο και πολύ σπανιότερα από το υγροποιημένο αέριο πετρελαίου και τη νάφθα. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη διαδικασία αναμόρφωσης υδρογονανθράκων είναι η αναμόρφωση μεθανίου με ατμό από φυσικό αέριο ή ελαφρούς υδρογονάνθρακες. Σε αυτή τη διαδικασία, το μονοξείδιο του άνθρακα παράγεται αρχικά με υδρογόνο, προκαλώντας αέριο σύνθεσης σύμφωνα με την Εξίσωση (2.1), και στη συνέχεια μέσω της αντίδρασης μετατόπισης νερού-αερίου, το μονοξείδιο του άνθρακα μετατρέπεται σε διοξείδιο του άνθρακα και επιπλέον υδρογόνο με βάση την Εξίσωση (2.2). Τέλος η Εξίσωση (2.3) παρουσιάζει την συνολική αντίδραση αναμόρφωσης με ατμό μεθανίου:



Η αντίδραση αναμόρφωσης είναι εξαιρετικά ενδόθερμη και απαιτείται μεγάλη ποσότητα θερμότητας. Για το λόγο αυτό, αυτές οι αντιδράσεις συνήθως διεξάγονται σε θερμοκρασίες μεταξύ 800 και 1000 °C. Δεδομένων των υψηλών θερμοκρασιών που απαιτούνται για τη μετατροπή του μεθανίου σε υδρογόνο, καθορίζεται η ανάγκη για ακριβή δομικά υλικά ώστε ο αναμορφωτής να αντέχει στις θερμικές καταπονήσεις (π.χ. χάλυβας υψηλής κραματοποίησης νικελίου-χρωμίου). Ο σχηματισμός άνθρακα και η εμφάνιση μεγάλης θερμοκρασίας στην καταλυτική κλίνη θα πρέπει επίσης να ληφθούν

υπόψη ως άλλα μειονεκτήματα. Για να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα της αναμόρφωσης με ατμό μεθανίου, απαιτούνται καταλύτες υψηλής απόδοσης συνήθως με βάση το νικέλιο (αν και τα ευγενή μέταλλα είναι επίσης ενεργά αλλά πολύ ακριβά για εμπορική εφαρμογή) που στηρίζονται σε κεραμικά οξειδία ή οξειδία που σταθεροποιούνται από τσιμέντο, για τη μεγιστοποίηση του υδρογόνου που παράγεται. Ωστόσο, αφού ληφθούν υπόψη και ελαχιστοποιηθούν αυτές οι πτυχές, η αναμόρφωση με ατμό μεθανίου παράγει ένα αέριο πλούσιο σε υδρογόνο και λιγότερες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα, μονοξειδίου του άνθρακα και μεθανίου. Επειδή το υδρογόνο αναμιγνύεται με άλλες ενώσεις, απαιτείται ένα στάδιο διαχωρισμού γνωστό και ως καθαρισμός του υδρογόνου. Στις εγκαταστάσεις υδρογόνου, ο καθαρισμός πραγματοποιείται μέσω του συστήματος προσρόφησης αιώρησης πίεσης, το οποίο μπορεί να παράγει έως και 99,9% καθαρό υδρογόνο με ανάκτηση 70-95% [5]. Η αναμόρφωση με ατμό των υδρογονανθράκων είναι ευρέως διαδεδομένη και ανεπτυγμένη μέθοδος στο μεγαλύτερο ποσοστό σε σχέση με τις υπόλοιπες, η οποία χρησιμοποιείται για παραγωγή υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα και έχει απόδοση μετατροπής που κυμαίνεται από 74% έως 85%. Έχει ενεργειακή απαίτηση 63,3 kJ/mol H₂ η οποία παρέχεται από το φυσικό αέριο ως κάυσιμο διεργασίας στο 30–35% της συνολικής του ποσότητας. Υπολογίζεται ότι το κόστος παραγωγής υδρογόνου, που αντιστοιχεί σε μονάδες με χωρητικότητα σχεδιασμού 379.387 kg/ημέρα, είναι 2,08 – 2,27\$/kg.[6]

Μερική οξείδωση

Η μερική οξείδωση είναι μια εναλλακτική προσέγγιση στις αντιδράσεις αναμόρφωσης με ατμό. Αυτή η διαδικασία θα μπορούσε να λειτουργήσει με διαφορετικές πρώτες ύλες που κυμαίνονται από μεθάνιο έως βαρύ μαζούτ και άνθρακα ενώ είναι η καταλληλότερη τεχνολογία για τη λήψη υδρογόνου από αυτές τις πρώτες ύλες.

Η μερική οξείδωση είναι μια εξώθερμη διαδικασία που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή καυσίμων υδρογονανθράκων σε μείγμα υδρογόνου, μονοξειδίου του άνθρακα και άλλων μερικώς οξειδωμένων ειδών. Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτής της διαδικασίας είναι ότι οι αντιδράσεις με το οξυγόνο είναι εξαιρετικά εξώθερμες, χωρίς να απαιτείται εξωτερική πηγή ενέργειας. Η κατανομή των προϊόντων των αντιδράσεων μερικής οξείδωσης εξαρτάται από την αναλογία άνθρακα-οξυγόνου (C/O) και συνοδεύεται από υψηλές θερμοκρασίες αντίδρασης (>1.000 °C). Έτσι, οι

αντιδράσεις μερικής οξείδωσης συνήθως διεξάγονται χρησιμοποιώντας ετερογενείς καταλύτες σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Όντας φθηνότεροι από τα ευγενή μέταλλα, οι καταλύτες με βάση τα μέταλλα μεταπτώσεως είναι κατάλληλοι για αντιδράσεις μερικής οξείδωσης λόγω της ικανότητάς τους να αλλάζουν καταστάσεις οξείδωσης και να προσροφούν αντιδρώντα στην επιφάνειά τους. Συνολικά, η αντίδραση μερικής οξείδωσης περιγράφεται μέσω της Εξίσωσης (2.4).



Θερμοδυναμικά, σε αυτή τη διαδικασία, το H₂ και το CO είναι τα πιο άφθονα προϊόντα άνω των 550 °C, με το CO να μπορεί να αφαιρεθεί με την οξείδωσή του προς το CO₂ ή με την αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου αυξάνοντας την παραγωγή H₂.

Η μερική οξείδωση προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως απλή λειτουργία, χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και ευέλικτη πρώτη ύλη. Επίσης ο χρόνος αντίδρασης είναι σύντομος λόγω της εξωτερικής παροχής θερμότητας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Ωστόσο, εξακολουθεί να αντιμετωπίζει προκλήσεις για τη βιομηχανική του εφαρμογή, όπως τη μικρή ωφέλιμη ζωή της μονάδας λόγω της υψηλής εξώθερμης αντίδρασης που θα μπορούσε να οδηγήσει σε θερμά σημεία και, κατά συνέπεια, στην καταστροφή του καταλύτη λόγω πυροσυσσωμάτωσης. Επίσης η μειωμένη παραγωγή υδρογόνου και το υψηλό ποσοστό εκπομπών αερίων ρύπων που αποτελούν ανεπιθύμητες πτυχές. Η διαδικασία παράγει επίσης θερμότητα, η οποία, με κατάλληλη σχεδίαση του συστήματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να θερμάνει τον αντιδραστήρα. Επιπλέον, η απόδοση υδρογόνου αυξάνεται μέσω της αντίδρασης μετατόπισης του CO. Το κύριο εμπόδιο εδώ είναι η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας (>800°C), καθώς και τα θέματα για την ασφάλεια και τον έλεγχο της θερμότητας που προκύπτουν, κάνοντας δύσκολη τη χρήση αυτής της τεχνολογίας σε πρακτικές φορητές εφαρμογές. Η απόδοση μετατροπής των αντιδραστήρων μερικής οξείδωσης που λειτουργούν με καύσιμο το μεθάνιο κυμαίνεται μεταξύ 60% και 75%. Πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι το κόστος για την παραγωγή υδρογόνου μέσω της μερικής οξείδωσης φυσικού αερίου ή άλλων αερίων πετρελαίου ανέρχεται σε περίπου 1,33 \$/kg H₂, ενώ για μεγάλη κλίμακα παραγωγής υδρογόνου το κόστος κυμαίνεται από 1 έως 1,5 \$/kg H₂.

Αυτόθερμη αναμόρφωση

Η αυτόθερμη αναμόρφωση περιλαμβάνει την εξώθερμη μερική οξείδωση με O_2 , η οποία παρέχει την ενέργεια που απαιτείται για τις αντιδράσεις ενδόθερμης αναμόρφωσης ατμού. Ουσιαστικά, τόσο ατμός όσο και οξυγόνο εισάγονται στον αναμορφωτή, οδηγώντας σε αντιδράσεις αναμόρφωσης και οξείδωσης ταυτόχρονα για να ληφθεί μια θερμοδυναμικά ουδέτερη αντίδραση. Όπως και στην αναμόρφωση με ατμό ή τη μερική οξείδωση, η επιλογή καταλύτη διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη συνολική απόδοση, με τους καταλύτες με βάση το νικέλιο να είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι λόγω της αποτελεσματικότητάς τους και του χαμηλού κόστους τους. Δεδομένης της υψηλής θερμικής απόδοσης αυτής της διαδικασίας, απαιτείται χαμηλότερη ενέργεια από την αναμόρφωση με ατμό ή τη μερική οξείδωση.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της αυτόθερμης αναμόρφωσης συγκριτικά με την αναμόρφωση με ατμό και την μερική οξείδωση είναι η δυνατότητα γρήγορης διακοπής και επανεκκίνησης της διαδικασίας, ενώ μπορεί να παράγει μεγαλύτερες ποσότητες υδρογόνου σε σύγκριση με την μερική οξείδωση μόνη της.

Στην περίπτωση της αυτόθερμης αναμόρφωσης του μεθανίου, η απόδοση μετατροπής κυμαίνεται περίπου στο 60-75%, παραμένοντας σχεδόν ίδια με αυτή της μερικής οξείδωσης και ελαφρώς μικρότερη από αυτή της αναμόρφωσης με ατμό.

Επιπλέον, το κόστος της επένδυσης είναι περίπου 15-25% χαμηλότερο από αυτό της αναμόρφωσης με ατμό και περίπου 50% χαμηλότερο σε σύγκριση με την αεριοποίηση άνθρακα. Μονάδες αυτόθερμης αναμόρφωσης μεγάλης κλίμακας, οι οποίες επιτυγχάνουν απόδοση περίπου 73%, παράγουν υδρογόνο με κόστος περίπου 1,48 \$/kg.

2.2.3. Πυρόλυση ορυκτών υδρογονανθράκων

Η πυρόλυση είναι μια διαδικασία θερμικής αποσύνθεσης που λαμβάνει χώρα απουσία οξυγόνου η οποία μετατρέπει διαφορετικούς ελαφρούς υγρούς υδρογονάνθρακες σε στοιχειακό άνθρακα και υδρογόνο. Οι Εξισώσεις (2.5), (2.6), (2.7) χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την παραπάνω διαδικασία.





Όταν η θερμική αποσύνθεση γίνεται από βαριά υπολειμματικά κλάσματα με σημείο βρασμού υψηλότερο από 350 °C, η παραγωγή υδρογόνου είναι λογικό να πραγματοποιηθεί σε δύο στάδια. Αυτά είναι, η υδροαερίωση και η επακόλουθη πυρόλυση του μεθανίου, επειδή τα βαριά υπολειμματικά κλάσματα περιέχουν μεγάλες ποσότητες θείου και μετάλλων, τα οποία, σε περίπτωση άμεσης αποσύνθεσης, θα μεταφερθούν στον καταλύτη και θα τον καταστήσουν άχρηστο για περαιτέρω χρήση. Αν και η ποσότητα του παραγόμενου υδρογόνου είναι μικρότερη σε σύγκριση με τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούν ελαφρά κλάσματα υδρογονανθράκων, αυτή η διαδικασία επιτρέπει την ταυτόχρονη παραγωγή πολύτιμων υποπροϊόντων, όπως το θείο ή τα μέταλλα.

Η πυρόλυση μεθανίου αναφέρεται ευρέως καθώς δεν παράγεται διοξείδιο του άνθρακα επειδή όλος ο άνθρακας ανακτάται σε στερεή μορφή. Από ενεργειακή άποψη, η παραγωγή υδρογόνου με πυρόλυση μεθανίου (απανθρακοποίηση μεθανίου), είναι μικρότερη από εκείνη της αναμόρφωσης ατμού (41 kJ/mol H₂) εάν η ενέργεια για την εξάτμιση του νερού δεν λαμβάνεται υπόψη. Στην πράξη, για τις βιομηχανικές διεργασίες, το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη αντί για μεθάνιο. Ως εκ τούτου, άλλες ενώσεις αναμιγνύονται με μεθάνιο, όπως CO₂ ή H₂O. Αυτές οι ενώσεις αντιδρούν επίσης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πυρόλυσης, επηρεάζοντας έτσι έντονα την μετατροπή του προϊόντος. Για αυτή τη διαδικασία, έχουν αναφερθεί διαφορετικοί καταλύτες, που κυμαίνονται από μεταλλικούς έως ανθρακικούς. Οι καταλύτες με βάση το νικέλιο (Ni) έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς ως μεταλλικοί καταλύτες λόγω της δραστηριότητάς τους και της ικανότητάς τους να παράγουν νηματώδη άνθρακα σε μέτριες θερμοκρασίες, ενώ καταλύτες με βάση τον ενεργό άνθρακα χρησιμοποιούνται ως ανθρακικοί καταλύτες.

Αεριοποίηση άνθρακα

Η αεριοποίηση άνθρακα ορίζεται ως η διαδικασία θερμοχημικής μετατροπής κατά την οποία ο άνθρακας μετατρέπεται σε αέρια προϊόντα, συμπεριλαμβανομένου του υδρογόνου και του μονοξειδίου του άνθρακα. Αυτή η διαδικασία στοχεύει να γίνει μια εναλλακτική λύση στην καύση άνθρακα για τη μείωση των επιβλαβών εκπομπών και την αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας του καυσίμου. Στην πράξη, ο άνθρακας μετατρέπεται σε αέριο σύνθεσης παρουσία ατμού και οξυγόνου ή αέρα σε υψηλές

θερμοκρασίες και πιέσεις. Εκτός από τις κύριες αντιδράσεις, μπορεί να υπάρχουν και άλλες δευτερεύουσες αντιδράσεις στις οποίες ο άνθρακας δεν αντιδρά με οξυγόνο ή ατμό αλλά με άλλα προϊόντα αντίδρασης, όπως το διοξείδιο του άνθρακα, παράγοντας επιπλέον μονοξείδιο του άνθρακα. Το κύριο πρόβλημα που σχετίζεται με την παραγωγή υδρογόνου μέσω αεριοποίησης άνθρακα αντί άλλων τεχνολογιών που χρησιμοποιούν διαφορετικές πρώτες ύλες, είναι οι υψηλότερες εκπομπές CO₂ λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Για το λόγο αυτό, αναπτύσσονται πλεονεκτήματα συνδέοντας την αεριοποίηση άνθρακα με τεχνολογίες που βασίζονται στη δέσμευση άνθρακα. Στην περίπτωση της αεριοποίησης άνθρακα, η απόδοση μετατροπής είναι γύρω 35-50%. Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα, από οικονομική άποψη, η αεριοποίηση άνθρακα διαφέρει δεδομένου του χαμηλότερου κόστους πρώτης ύλης. Το κόστος παραγωγής υδρογόνου μέσω της αεριοποίησης άνθρακα κυμαίνεται μεταξύ 0,54–1,26 \$/kgH₂.

2.2.4. Παραγωγή Υδρογόνου από Νερό

Το νερό είναι ο πιο άφθονος πόρος για την παραγωγή υδρογόνου και μπορεί να χωριστεί σε υδρογόνο και οξυγόνο εάν παρέχεται αρκετή ενέργεια χωρίς επιβλαβείς εκπομπές. Η διάσπαση του νερού στην απλούστερη μορφή του χρησιμοποιεί ένα ηλεκτρικό ρεύμα (ηλεκτρόλυση) που διέρχεται από δύο ηλεκτρόδια για να σπάσει το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο. Ωστόσο, μπορεί επίσης να διαχωριστεί χρησιμοποιώντας άλλες πηγές ενέργειας, όπως θερμική ενέργεια (θερμόλυση), φωτονική ενέργεια (φωτοηλεκτρόλυση) και βιοφωτόλυση με χρήση μικροοργανισμών.

Ηλεκτρόλυση

Η ηλεκτρόλυση είναι ένας από τους απλούστερους τρόπους παραγωγής υδρογόνου από το νερό. Μπορεί να συνοψιστεί ως η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική ενέργεια με τη μορφή οξυγόνου και υδρογόνου ως υποπροϊόν με δύο αντιδράσεις σε κάθε ηλεκτρόδιο. Η Εξίσωση (2.6) αντιστοιχεί στην άνοδο, η Εξίσωση (2.7) στην κάθοδο ενώ η Εξίσωση (2.8) στην συνολική διαδικασία.



Διατίθενται διαφορετικές τεχνολογίες για την ηλεκτρόλυση νερού, συμπεριλαμβανομένης της ηλεκτρόλυσης αλκαλικού νερού, της ηλεκτρόλυσης στερεών οξειδίων και της ηλεκτρόλυσης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. Η ηλεκτρόλυση αλκαλικού νερού απαιτεί διαχωριστή αερίων για να αποτραπεί η ανάμειξη των προϊόντων αερίου. Χρησιμοποιεί συμπυκνωμένη αλισίβα ως ηλεκτρολύτη και ηλεκτρόδια με βάση μη ευγενή μέταλλα (π.χ. νικέλιο). Η ηλεκτρόλυση μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων χρησιμοποιεί υγροποιημένες πολυμερείς μεμβράνες ως ηλεκτρολύτη και ευγενή μέταλλα ως ηλεκτροκαταλύτες, όπως οξείδιο της πλατίνας ή του ιριδίου.[7]

Η θερμοκρασία λειτουργίας έχει εύρος από 50 έως 80 °C και οι πιέσεις λειτουργίας μπορούν να ρυθμιστούν έως και 30 bar και για τις δύο τεχνολογίες. Αντίθετα, η ηλεκτρόλυση στερεού οξειδίου μετατρέπει το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο σε υψηλές θερμοκρασίες (700–900 °C), αυξάνοντας τη θερμική ζήτηση. Έτσι, η ηλεκτρόλυση αλκαλικού νερού και η ηλεκτρόλυση μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων είναι πιο ελπιδοφόρες τεχνολογίες για εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα δεδομένου του χαμηλότερου κόστους επένδυσης και της μεγαλύτερης διάρκειας ζωής της μονάδας. Η ηλεκτρόλυση νερού που τροφοδοτείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (π.χ. άνεμος, θαλάσσια κύματα και βιομάζα) αναμένεται να επιτρέψει την κλιμάκωση της παραγωγής υδρογόνου (υψηλή καθαρότητα 99,9%) με μηδενικές εκπομπές CO₂, επιτρέποντας την παραγωγή υδρογόνου επί τόπου χωρίς μεταφορά. Ωστόσο, το κόστος του H₂ που παράγεται με ηλεκτρόλυση εξακολουθεί να είναι σημαντικά υψηλότερο από αυτό που παράγεται από ορυκτά καύσιμα.

Οι αλκαλικοί ηλεκτρολύτες στο εμπόριο μπορούν να φτάσουν τα 380.000 kg H₂ σε ετήσιους ρυθμούς παραγωγής με κατανάλωση ενέργειας συστήματος 53,4 kWh/kg H₂ και απόδοση έως 73%. Το κόστος παραγωγής υδρογόνου κυμαίνεται από 4,15 \$/kg H₂ έως 10,5 \$/kg H₂ ανάλογα με την πηγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η παραγωγή υδρογόνου από το νερό μέσω της διάσπασης των μορίων του νερού με χρήση ηλεκτρόλυσης είναι η προσέγγιση που μελετάται όλο και περισσότερο για τη βιώσιμη παραγωγή υδρογόνου. Για τη διαδικασία ηλεκτρόλυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε νερό είτε ατμός. Οι προκλήσεις που αναφέρονται επί του παρόντος για την ηλεκτρόλυση νερού περιλαμβάνουν : 1) το υψηλό κόστος παραγωγής λόγω των υψηλών επενδύσεων κεφαλαίου, 2) τη χαμηλή απόδοση μετατροπής και 3) το κόστος

ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, καθώς η τεχνολογία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συνεχίζει να ωριμάζει, αναμένεται ότι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας θα μειωθεί με την πάροδο του χρόνου. Αναφέρεται ότι το κόστος ηλεκτρόλυσης βάσει δικτύου θα ελαττωθεί προς το 2050 με μέσο όρο περίπου 1,5 \$/kg H₂.

Θερμόλυση

Η θερμόλυση είναι μια θερμοχημική διαδικασία διάσπασης του νερού που βασίζεται στην αποσύνθεση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο με θέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες. Παρόλο που αυτή η διαδικασία είναι εύκολη, η αποσύνθεση του νερού απαιτεί θερμοκρασίες πάνω από 2.500 °C. Η διαδικασία θερμόλυσης είναι αναστρέψιμη και, επομένως, μία από τις κύριες προκλήσεις στην εφαρμογή είναι ο διαχωρισμός του παραγόμενου υδρογόνου και του οξυγόνου, επειδή ο ανασυνδυασμός αερίων προϊόντων μπορεί να προκαλέσει ένα εκρηκτικό μείγμα. Η άλλη πρόκληση είναι η διαθεσιμότητα υλικών, τα οποία να μπορούν να αντέξουν τις επιθυμητές θερμοκρασίες.

Ενάντια στη θερμόλυση, οι θερμοχημικοί κύκλοι διάσπασης νερού προχωρούν σε χαμηλότερες μέγιστες θερμοκρασίες λειτουργίας (συνήθως κάτω από 1.000 °C) και παράγουν H₂ και O₂ σε ξεχωριστά στάδια, αποφεύγοντας έτσι τον ανασυνδυασμό τους και παρακάμπτοντας την ανάγκη για υψηλή θερμοκρασία. Η αύξηση του αριθμού των κύκλων μειώνει τη θερμοκρασία που απαιτείται για τη διάσπαση του νερού, αλλά περιπλέκει την διαδικασία. Οι θερμοχημικοί κύκλοι για τη διάσπαση του νερού μπορούν να χωριστούν σε κύκλους με ελαφριές συνθήκες λειτουργίας και υψηλές θερμοκρασίες. Αν και ο θερμοχημικός κύκλος θείου ιωδίου απαιτεί υψηλή θερμοκρασία, θεωρείται ο πιο πολλά υποσχόμενος κύκλος. Αντίθετα, οι κύκλοι χαμηλής θερμοκρασίας που αναφέρονται περισσότερο είναι οι κύκλοι χλωρίου χαλκού (Cu-Cl) και χλωριούχου μαγνησίου (Mg-Cl). Η πρόσφατη πρόοδος σε αυτές τις τεχνολογίες εστιάζεται στη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή ενέργεια, ή πηγών ενέργειας από μη ορυκτά καύσιμα, όπως η πυρηνική ενέργεια.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, εκτός από την επένδυση κεφαλαίου για τον απαραίτητο εξοπλισμό, στο κόστος παραγωγής συμπεριλαμβάνονται τα εμπλεκόμενα στοιχεία τα οποία υφίστανται τοξικότητα, καθώς και το κόστος των χημικών όπως επίσης και η διαθεσιμότητα τους, τα προβλήματα διαχωρισμού υλικών και η διάβρωση, αντανακλώνονται στο κόστος παραγωγής H₂. Το κόστος παραγωγής υδρογόνου με

διάφορες προσεγγίσεις για τη θερμοχημική διάσπαση του νερού ποικίλλει από 7 \$/kg H₂ έως 8,4 \$/kg H₂ ανάλογα με την πηγή θερμότητας.

Βιοφωτόλυση

Η βιοφωτόλυση είναι μια φωτονική βιοχημική διαδικασία για την παραγωγή υδρογόνου από το νερό. Στην άμεση βιοφωτόλυση, ένα μόριο νερού διασπάται σε ιόντα οξυγόνου και υδρογόνου μέσω φωτοσύνθεσης χρησιμοποιώντας την καταλυτική δραστηριότητα του ενζύμου υδρογονάσης υπό αναερόβιες συνθήκες μικροοργανισμών, όπως πράσινα μικροφύκη ή κυανοβακτήρια. Ένα πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι ότι το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από νερό σε υδατικό περιβάλλον σε συνθήκες περιβάλλοντος. Θα μπορούσε να θεωρηθεί μια περιβαλλοντικά βιώσιμη και οικονομικά εφικτή μέθοδος τόσο από την άποψη της χρήσης του νερού όσο και από την άποψη του CO₂. Επί του παρόντος, δεδομένης της χαμηλής απόδοσης του υδρογόνου, αυτή η τεχνολογία απαιτεί σημαντική επιφάνεια για να συλλέξει αρκετό ηλιακό φως. Αντίθετα, στην έμμεση βιοφωτόλυση, οι υδατάνθρακες συσσωρεύονται κατά το στάδιο δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα, παράγοντας οξυγόνο. Το υδρογόνο παράγεται στο επόμενο στάδιο, όπου τα παραγόμενα υποστρώματα στα πρώτα στάδια χρησιμοποιούνται ως πηγή άνθρακα, μειώνοντας έτσι την ανάγκη προσθήκης θρεπτικών ουσιών στο μέσο.[8]

Σύμφωνα με τα παραπάνω, και με βάση τα δεδομένα διαφόρων μεθόδων παραγωγής H₂ καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα: Αυτές οι μέθοδοι είναι πολύ ώριμες και ανεπτυγμένες και υπάρχουν ήδη. Οι βιολογικές διεργασίες παράγουν χαμηλή απόδοση και χρειάζονται αντιδραστήρα μεγαλύτερου όγκου. Το συνολικό κόστος των μεθόδων παραγωγής H₂ εξαρτάται από την πρώτη ύλη, την πηγή ενέργειας και τις επενδύσεις κεφαλαίου. Η χαμηλή τιμή καυσίμου όπως ο άνθρακας και το φυσικό αέριο, καθιστούν τις συμβατικές τεχνικές πιο αποτελεσματικές καθώς χρησιμοποιούν αυτά τα καύσιμα ως πρώτη ύλη, και παράγουν H₂ σε χαμηλό κόστος σχεδόν 2 \$/kg. Γενικώς το κόστος παραγωγής ανά kg H₂ κυμαίνεται μεταξύ 1,3–2,2 \$.

Οι τεχνολογίες αναμόρφωσης είναι πιο ώριμες και παρέχουν επίσης μια πιο αποτελεσματική μετατροπή της ενέργειας, έως 80% όσων αφορά την αναμόρφωση ατμού και έως και 70% όσων αφορά την μερική οξείδωση και την αυτόθερμη αναμόρφωση, γεγονός που τις καθιστά, στις περισσότερες περιπτώσεις, την πιο βιώσιμη προσέγγιση. Αντίθετα, η εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, συνδυαζόμενη με

το διοξείδιο του άνθρακα που εκλύεται στην ατμόσφαιρα κατά τη διαδικασία αναμόρφωσης, αποτελεί τους κύριους περιορισμούς που καθοδηγούν τις περισσότερες έρευνες προς εναλλακτικές, ανανεώσιμες μεθόδους. Δεδομένου ότι τα ορυκτά καύσιμα χρησιμοποιούνται τόσο ως αντιδρώντα όσο και ως καύσιμα για τη διαδικασία, αυτές οι προσεγγίσεις είναι σημαντικά εξαρτημένες από την τρέχουσα τιμή τους. Συνοψίζοντας, όσο οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας γίνονται πιο ανταγωνιστικές, το σχετικό κόστος μειώνεται ενώ χρειάζεται περισσότερη έρευνα για την ανάπτυξη ενός πιο αποτελεσματικού τρόπου παραγωγής υδρογόνου [9]

Από την άλλη, όταν πρόκειται για τον υπολογισμό του κόστους παραγωγής υδρογόνου, υπάρχουν αρκετές αβεβαιότητες, δεδομένου ότι το κόστος επηρεάζεται αρκετά από το επίπεδο προόδου της τεχνολογίας παραγωγής, τη διαθεσιμότητα της υπάρχουσας υποδομής και τις τιμές των πρώτων υλών. Τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής έρευνας του μέσου κόστους παραγωγής υδρογόνου (\$/kg H₂) παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2.

Οι πιο συμφέρουσες οικονομικά μέθοδοι για την παραγωγή υδρογόνου είναι η μερική οξείδωση και η αεριοποίηση άνθρακα. Ακολουθούν η αυτόθερμη αναμόρφωση και η αναμόρφωση με ατμό οι οποίες είναι ανταγωνιστικές μέθοδοι όσον αφορά πάντα τις τιμές παραγωγής. Ωστόσο η θερμόλυση και η ηλεκτρόλυση δίνουν το υψηλότερο κόστος παραγωγής ανά κιλό υδρογόνου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στη μελέτη αυτή αναφερόμαστε πάντα στον μέσο όρο του κόστους παραγωγής. [10]

Πίνακας 2.2: Σύγκριση Μεθόδων Παραγωγής Υδρογόνου [11],[12]

Διαδικασία	Απόδοση (%)	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Κόστος (\$/kg) (2019)
Αναμόρφωση με ατμό	74-85	Η πιο ανεπτυγμένη τεχνολογία, με υπάρχουσες υποδομές	Εκπομπές CO ₂ ως υποπροϊόν, εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα	1.5 - 3.0
Μερική οξείδωση	60-75	Αποδεδειγμένη τεχνολογία, υπάρχουσες υποδομές	Εκπομπές CO ₂ ως υποπροϊόν, εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα	1.0 – 1.63
Αυτόθερμη αναμόρφωση	60-75	Αποδεδειγμένη τεχνολογία, υπάρχουσες υποδομές	Εκπομπές CO ₂ ως υποπροϊόν, εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα	1.48
Αεριοποίηση άνθρακα	35-50	Άφθονη και φθηνή πρώτη ύλη	Εκπομπές CO ₂ ως υποπροϊόν, εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα	0.54–1.26
Πυρόλυση	35–50	Άφθονη, φθηνή πρώτη ύλη και ουδέτερη σε εκπομπές CO ₂ .	Σχηματισμός πίσσας, κυμαινόμενη ποσότητα H ₂ λόγω των ακαθαρσιών της πρώτης ύλης και της εποχιακής διαθεσιμότητας	1.59–1.70
Βιοφωτόλυση	10-15	Κατανάλωση CO ₂ , το O ₂ είναι το μόνο υποπροϊόν, λειτουργία σε ήπιες συνθήκες	Απαίτηση ηλιακής ενέργειας, χαμηλή απόδοση, απαίτηση αντιδραστήρα μεγάλου όγκου, υψηλό κόστος πρώτης ύλης	1.42–2.13

Ηλεκτρόλυση	60-80	Αποδεδειγμένη τεχνολογία χωρίς ρυπογόνα υπόπροϊόντα, υπάρχουσες υποδομές, άφθονη πρώτη ύλη, O ₂ ως μόνο υποπροϊόν	Χαμηλή συνολική απόδοση, υψηλό κόστος κεφαλαίου.	4.0 – 9.0
Θερμόλυση	20-50	Καθαρή και βιώσιμη τεχνολογία, άφθονη πρώτη ύλη, O ₂ ως μόνο υποπροϊόν	Τοξικότητα στοιχείων, διαβρωτικά προβλήματα, υψηλό κόστος κεφαλαίου	7.98–8.40

2.3 Αναμορφωτές

Στο υδρογόνο είναι βασισμένες οι κυψέλες καυσίμου. Όποιο υλικό περιέχει υδρογόνο, έχει την δυνατότητα χρήσης σαν καύσιμο. Για παράδειγμα, η μεθανόλη, η αιθανόλη, το φυσικό αέριο, και τα παράγωγα του πετρελαίου είναι καύσιμα τα οποία περιέχουν ικανή ποσότητα υδρογόνου για χρήση. Η αναμόρφωση είναι μια διαδικασία, κατά την οποία παράγεται το υδρογόνο από τα προαναφερθέντα υλικά και με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η χρήση του σε διάφορες εκτελέσεις, όπως η κίνηση ενός αυτοκινήτου χωρίς να είναι απαραίτητη η αποθήκευση του.

Κρίνεται πως οι αναμορφωτές είναι αναγκαίοι, καθώς δεν έχει υπάρξει μέχρι στιγμής οργανωμένη υποδομή για να γίνει παράδοση του υδρογόνου ενώ ούτε αποτελεσματικοί τρόποι για την αποθήκευσή του, με στόχο την άμεση χρήση του.

Οι κλίμακες στις οποίες μπορεί να διαφοροποιηθεί η αναμόρφωση διαχωρίζονται σε μικρή, μεσαία ή μεγάλη. Ως παράδειγμα της μεσαίας κλίμακας, μπορούμε να θέσουμε, τους σταθμούς ανεφοδιασμού που ήδη υφίστανται, ενώ ως παράδειγμα της μεγάλης κλίμακας, μπορούμε να θέσουμε την επεξεργασία των καυσίμων στα μεγάλα εργοστάσια παραγωγής στα οποία παράγεται το υδρογόνο σε υγρή μορφή. Αν σε μια κυψέλη καυσίμου γίνει άμεση τροφοδότηση από τον αναμορφωτή, μπορεί να πραγματοποιηθεί η αναμόρφωση τοπικά. Σε ένα αυτοκίνητο για παράδειγμα, το οποίο δέχεται συμβατική βενζίνη, μπορεί αυτό το καύσιμο να μετατραπεί σε υδρογόνο προς χρήση στην κυψέλη καυσίμου. [13]

3. Χρήσεις και κόστος υδρογόνου γενικά

3.1 Χρήσεις υδρογόνου

Για πολλά χρόνια, το υδρογόνο είχε πολλαπλές εφαρμογές, τόσο στη βιομηχανία όσο και στην καθαρότητα του περιβάλλοντος.

Στον τομέα της καθαρότητας του περιβάλλοντος, η κύρια χρήση του υδρογόνου είναι η αφαίρεση του θείου που περιέχεται φυσικά στο πετρέλαιο για την παραγωγή καθαρότερων καυσίμων.

Το υδρογόνο είναι ένα αντιδρόν που χρησιμοποιείται σε πολλούς βιομηχανικούς τομείς, συμπεριλαμβανομένων των χημικών, της κατασκευής υφαντικών ινών, του γυαλιού, της ηλεκτρονικής και της μεταλλουργίας.

Χρησιμοποιείται επίσης ως καύσιμο για εκτοξευτές πυραύλων.

Το υδρογόνο, σε συνδυασμό με μια κυψέλη καυσίμου, είναι επίσης ένας σπουδαίος φορέας καθαρής ενέργειας, καθώς καθιστά δυνατή την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας απευθείας στα ηλεκτρικά οχήματα ή σε απομακρυσμένες περιοχές που είναι αποκομμένες από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Στη διαστημική βιομηχανία

Το υδρογόνο διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο από την έναρξη της διαστημικής βιομηχανίας ως καύσιμο σε πυραύλους. Αυτό συνέβη διότι είναι καύσιμο που εμπεριέχει αρκετή ενέργεια: 1 kg υδρογόνου κατέχει τριπλάσια ενέργεια από 1 kg βενζίνης. Αυτό είναι ένα κρίσιμο κριτήριο δεδομένου ότι ένας εκτοξευτής πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ελαφρύς.

Επί του παρόντος, το υγρό υδρογόνο και το υγρό οξυγόνο συνδυάζονται και χρησιμοποιούνται για την εκτόξευση του ευρωπαϊκού πυραύλου Ariane 5. Στο κύριο κρουστικό στάδιο του Ariane 5, η καύση του υδρογόνου παράγει μια τεράστια ποσότητα ατμού, ο οποίος διοχετεύεται με πολύ υψηλή ταχύτητα μέσα από τον ουραίο σωλήνα του κινητήρα Vulcain. Η εκτόξευση αερίου με υψηλή ταχύτητα είναι που ωθεί τον πύραυλο, σύμφωνα με την αρχή δράσης-αντίδρασης.

Το υδρογόνο καίγεται κατά την επαφή με το οξυγόνο, αλλά το τελευταίο δεν υπάρχει στο διάστημα. Αυτός είναι ο λόγος που το Ariane 5 φέρει μια τεράστια κεντρική δεξαμενή που περιέχει 162 τόνους υγρού οξυγόνου σε θερμοκρασία -183°C και 28 τόνους υγρού υδρογόνου στους $-252,87^{\circ}\text{C}$.

Για ενέργεια

Το υδρογόνο χρησιμοποιείται για την παραγωγή καθαρής και αθόρυβης ενέργειας σε ποικίλες εφαρμογές όπου χρειάζεται άμεση ανάγκη και προσφέρει επίσης ένα πραγματικό όφελος. Αυτό έχει να κάνει με την παροχή ρεύματος σε απομονωμένες περιοχές χωρίς σύνδεση με ηλεκτρισμό, ευαίσθητες τοποθεσίες που απαιτούν αξιόπιστα εφεδρικά ενεργειακά συστήματα, δέσμιους στόλους (περονοφόρα και λεωφορεία) και φορητές γεννήτριες ενέργειας που χρησιμοποιούνται για υπαίθριες εκδηλώσεις.

Στις βιομηχανίες αεροδιαστημικής και θαλάσσιων μεταφορών

Η χρήση του υδρογόνου επεκτείνεται τώρα και σε άλλους τομείς όπως η αεροδιαστημική και οι θαλάσσιες μεταφορές. Εταιρίες συμμετέχουν σε μεγάλα έργα, σκοπός των οποίων είναι η εύρεση καθαρών και βιώσιμων εναλλακτικών μορφών ενέργειας.

3.2 Κόστος-περιορισμοί-πλαίσιο στην Ε.Ε.

Μία λύση για το κόστος του πράσινου υδρογόνου να μειωθεί και να καλυφθεί το χάσμα με το κόστος του γκρι υδρογόνου είναι να προσφερθούν ειδικές χρεώσεις ή πριμοδοτήσεις για αγορά του πράσινου υδρογόνου, με βάση την περιβαλλοντική του αξία. Αυτό το σχήμα στήριξης έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για να επιταχυνθεί η ανάπτυξη της ηλεκτροπαραγωγής από σταθμούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μέσω της εφαρμογής των τιμολογίων τροφοδότησης σταθερών τιμών (FIT) και των διαφορικών προσαυξήσεων (FIP).

Επίσης, η παροχή επιδοτήσεων για κάθε μονάδα που παράγει υδρογόνο μπορεί να ενθαρρύνει την ανάπτυξη νέων έργων για μονάδες ηλεκτρόλυσης. Η εισαγωγή των πράσινων τιμολογίων υδρογόνου ή των πριμοδοτήσεων μπορεί να συγκριθεί με τις υπάρχουσες επιδοτήσεις για την εισαγωγή βιομεθανίου που ισχύουν σήμερα σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες. Στη Γαλλία, το κόστος για την έγχυση βιομεθανίου στο δίκτυο φυσικού αερίου κυμαίνεται από 53 έως 166 \$/MWh, ανάλογα με την μονάδα

βιομεθανίου και το μέγεθός της. Το μέγιστο όριο για τη Γαλλία ισοδυναμεί με περίπου 5,5 \$/kgH₂, άρα ήδη θα μπορούσε να καλύψει το τρέχον κόστος παραγωγής. Ειδικότερα, μια τιμολόγηση που θα καλύπτει το κόστος του πράσινου υδρογόνου αντιστοιχεί σε 6 \$/kgH₂ (περίπου 180 \$/MWh) και είναι χαμηλότερη από την αντίστοιχη FIT της ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές η οποία ίσχυε πριν από δέκα χρόνια (όταν η ηλεκτρική ενέργεια ανανεώσιμων πηγών ήταν σε αρχικό στάδιο, όπως σήμερα είναι το πράσινο υδρογόνο). Η τεχνική με τα καθεστώτα FIT και FIP για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αναφορά για το σχεδιασμό ενός τιμολογίου ή πριμοδότησης για το πράσινο υδρογόνο.[14]

4. Αποθήκευση και μεταφορά υδρογόνου

4.1 Τρόποι αποθήκευσης

Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και ατμοσφαιρική πίεση, 1 kg αερίου H₂ καταλαμβάνει όγκο 11m³. Με τόσο χαμηλή πυκνότητα (0,09 kg/m³), η αποθήκευση H₂ έχει γίνει ένα από τα βασικά εμπόδια που περιορίζουν τη χρήση του σε ευρεία κλίμακα. Οι κύριες μέθοδοι αποθήκευσης επιτρέπουν την φυσική αποθήκευση του υδρογόνου ως αέριο ή υγρό και στις επιφάνειες ή μέσα στα στερεά με προσρόφηση και απορρόφηση, αντίστοιχα. Η επιλογή του καταλληλότερου συστήματος εξαρτάται από την τελική εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί. Συνοπτικά μπορούμε να αναφέρουμε τα εξής:

Αποθήκευση υπό πίεση: Συνήθως αποθηκεύεται σε πίεση μεταξύ 200-350 bar σε χαλύβδινες δεξαμενές ή κυλίνδρους. Δεδομένου ότι η ποσότητα του αποθηκευμένου υδρογόνου εξαρτάται από την πίεση (όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση, τόσο περισσότερο αέριο υδρογόνο αποθηκεύεται), στις μέρες μας γίνεται εργασία για την ανάπτυξη υλικών, όπως ανθρακονήματα ή αλουμίνιο, που έχουν την ικανότητα να αντέχουν μια πίεση έως 700 bar. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα σημαντική για την εφαρμογή στις μεταφορές.

Αποθήκευση υγρού: Το υδρογόνο γίνεται υγρό σε θερμοκρασία κάτω των -253°C και μπορεί να αποθηκευτεί σε κρυογονικές δεξαμενές μέσω μιας διαδικασίας διπλού σταδίου συμπίεσης και ψύξης σε εναλλάκτη θερμότητας. Λόγω του χαμηλού σημείου ζέσεως των -252,87 °C, η απαιτούμενη ενέργεια υπολογίζεται σε 15,2 kWh/kg, επιτυγχάνοντας ογκομετρική πυκνότητα 70,8 kg/m³ σε ατμοσφαιρική πίεση, ενώ η βαρυμετρική πυκνότητα εξαρτάται από το μέγεθος της δεξαμενής. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιείται μόνο όταν χρειάζεται να μεγιστοποιήσουμε τη χωρητικότητα αποθήκευσης σε μειωμένο χώρο (για παράδειγμα, σε ορισμένες εφαρμογές μεταφοράς).

Υδρίδια μετάλλων: Διάφορα μέταλλα σχηματίζουν ενώσεις με το υδρογόνο, γνωστές ως υδρίδια. Ο σχηματισμός αυτών των ενώσεων είναι αναστρέψιμος, επομένως είναι δυνατό να επιστρέψουμε εύκολα στο αρχικό υδρογόνο και μέταλλο. Αυτό το σύστημα προσφέρει υψηλή χωρητικότητα αποθήκευσης και παρουσιάζει διάφορα πλεονεκτήματα ασφάλειας και χειρισμού (αποθήκευση στερεών υπό πίεση και

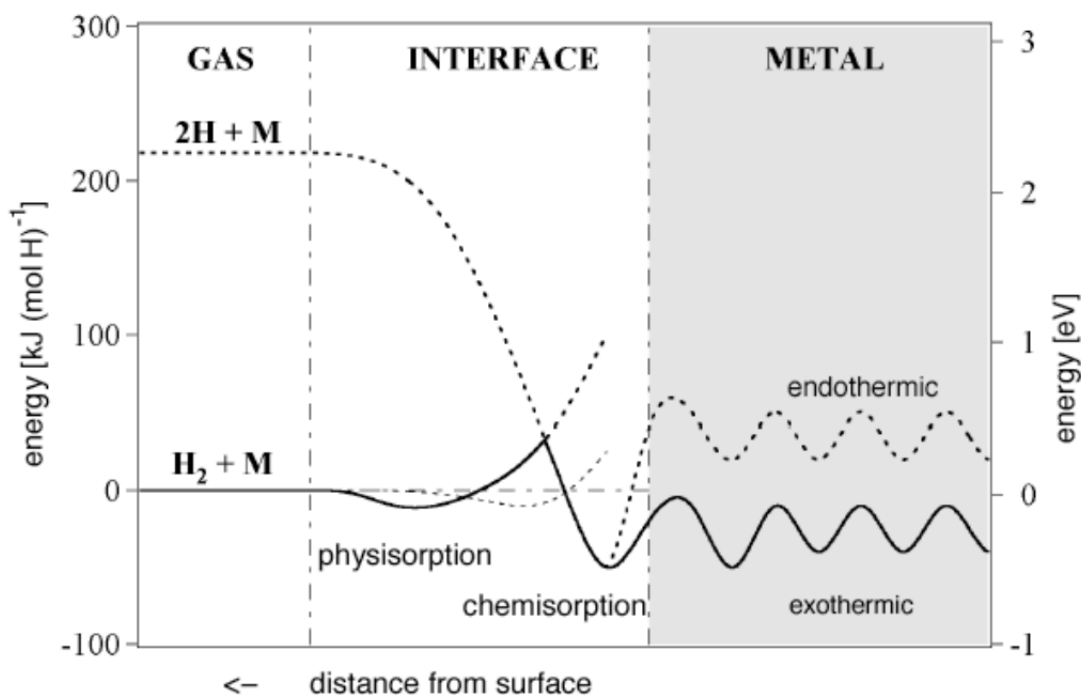
θερμοκρασία δωματίου) σε σύγκριση με άλλα συστήματα. Τα βασικά του μειονεκτήματα είναι το μεγάλο βάρος του εξοπλισμού και η υψηλή τιμή του.

Νανοσωλήνες άνθρακα: Είναι δομές γραφίτη, με τη μορφή εξαγώνων άνθρακα, οι οποίοι είναι διατεταγμένοι ώστε να σχηματίζουν σωλήνες πολύ μικρής διαμέτρου (νανοσωλήνες), μέσα στους οποίους μπορεί να αποθηκευτεί μεγάλη ποσότητα υδρογόνου. Οι ερευνητές αναπτύσσουν διάφορες διαδικασίες και, παρόλο που εξακολουθούν να υπάρχουν διαφορές στα αποτελέσματα, όλοι συμφωνούν για τις μεγάλες δυνατότητες του συστήματος.

4.1.1 Αποθήκευση υδρογόνου σε μέταλλα και υδρίδια μετάλλων

Το H_2 μπορεί να αντιδράσει σε υψηλές θερμοκρασίες με πολλά μέταλλα μετάπτωσης και τα κράματά τους για να σχηματίσει υδρίδια. Τα ελαφρά μέταλλα όπως το Li, το Be, το Na, το Mg, το B και το Al, σχηματίζουν μια μεγάλη ποικιλία ενώσεων μετάλλου-υδρογόνου, ενώ μια υψηλή ογκομετρική πυκνότητα 150 kg/m^3 σε θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος έχει επιτευχθεί στο $Al(BH_4)_3$. Ωστόσο, η βαρυμετρική πυκνότητα περιορίζεται σε λιγότερο από 3 wt% και ως εκ τούτου, έχει αναπτυχθεί έντονο ενδιαφέρον για ακόμη ελαφρύτερα μέταλλα και σύνθετα υδρίδια. Τα σύνθετα υδρίδια ανοίγουν ένα νέο πεδίο υλικών αποθήκευσης υδρογόνου, παρέχοντας βαρυμετρικές πυκνότητες έως και 18 wt% για το $LiBH_4$.

Η αποθήκευση υδρογόνου όσον αφορά το μέταλλο συμβαίνει με την είσοδο του υδρογόνου σε ατομικό μέγεθος στο κυρίως πλέγμα του μετάλλου. Η διαδικασία αυτή για να έχει ουσιαστικό ρόλο πρέπει να μπορεί να αντιστραφεί. Για να αναλύσουμε επαρκώς τη διαδικασία απορρόφησης του υδρογόνου από μια καθαρή μεταλλική επιφάνεια, μπορούμε να διαιρέσουμε την διαδικασία σε διάφορα στάδια. Η Εικόνα 4.1 αναπαριστά τη σχέση της δυναμικής ενέργειας του ατομικού και μοριακού υδρογόνου σε σχέση με την απόσταση του από τη μεταλλική επιφάνεια και λειτουργεί ως σημείο αναφοράς για την ανάλυση της διαδικασίας.



Εικόνα 4.1: Δυναμική ενέργεια υδρογόνου συναρτήσει της απόστασης του από καθαρή επιφάνεια μετάλλου [49]

1. Η δυναμική ενέργεια του ατομικού υδρογόνου έχει μια συγκεκριμένη τιμή, ενώ αντίστοιχα η δυναμική ενέργεια του μοριακού υδρογόνου είναι υψηλότερη και εκφράζεται στην ενέργεια διάσπασης του σε δύο ατομικά υδρογόνα.
2. Κατά την προσέγγισή μας στην επιφάνεια του μετάλλου, παρατηρούμε ότι το μοριακό υδρογόνο απορροφάται φυσικά από αυτήν στο ελάχιστο σημείο της καμπύλης. Αυτή η ελκτική αλληλεπίδραση μεταξύ του μεταλλικού υλικού και του μοριακού υδρογόνου οφείλεται στις δυνάμεις Van Der Waals που αναπτύσσονται μεταξύ τους.
3. Για μικρές αποστάσεις, το μοριακό υδρογόνο αντιλαμβάνεται ένα αδιαφοροποιητικό δυναμικό λόγω της μικρής απόστασης από την επιφάνεια. Οι καμπύλες του ατομικού και μοριακού επιπέδου αλληλεπικαλύπτονται σε ένα σημείο μεταβατικής κατάστασης, έπειτα από το οποίο το ατομικό υδρογόνο αρχίζει να αλληλεπιδρά με την επιφάνεια. Καθώς η απόσταση μειώνεται, η κινητική ενέργεια του μοριακού υδρογόνου μειώνεται συνεχώς και ο διατομικός δεσμός γίνεται ασθενέστερος διότι τα άτομα κινούνται παράλληλα.

4. Στην επιφάνεια του μετάλλου, τα άτομα του υδρογόνου αλληλεπιδρούν μεταξύ τους δημιουργώντας μια φάση. Με την κατάλληλη τοποθέτηση των ατόμων σε αυτήν την επιφάνεια, μπορούν να εισχωρήσουν βαθύτερα στο μέταλλο.

5. Αυτό το βήμα επιτρέπει στο υδρογόνο να εισέλθει στο εσωτερικό του μετάλλου.

Οι παραπάνω διαδικασίες μπορούν να περιγράψουν και την εξαγωγή του υδρογόνου από το μέταλλο, αρκεί να ακολουθηθούν τα βήματα αντίθετα. Επιπλέον, αυτή η διαδικασία επηρεάζει την προσρόφηση άλλων στοιχείων, όπως για παράδειγμα του οξυγόνου, αλλά το υδρογόνο είναι αυτό το οποίο απορροφάται σε ικανοποιητικές ταχύτητες από τα μέταλλα και τα κράματα τους σε θερμοκρασία δωματίου. Αντίθετα, τα ευγενή αέρια είναι αδιάλυτα στα μέταλλα και δεν προσροφώνται από αυτά.

Προηγουμένως, λάβαμε υπόψη μας το γεγονός ότι η επιφάνεια του μετάλλου είναι καθαρή, διότι σε αντίθετη περίπτωση, όπου υπάρχουν διάφορα οξειδία ή άλλες προσμίξεις στην επιφάνεια, η διαδικασία απορρόφησης γίνεται πιο περίπλοκη. Σε αυτήν την περίπτωση, αναφερόμαστε στην ενεργοποίηση του μετάλλου, δηλαδή στη διάσπαση του στρώματος των οξειδίων που παρεμποδίζουν την είσοδο του υδρογόνου στο μέταλλο, καθώς και τη διαδικασία με την οποία το υδρογόνο διασπάται από μοριακό σε ατομικό στην επιφάνεια του μετάλλου. Η διάσπαση αυτού του στρώματος της επιφάνειας απαιτεί κατά κανόνα πολύ υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα της διαδικασίας του σχηματισμού του υδριδίου είναι πολλοί και ποικίλοι. Ανάμεσα τους, η δομή του μετάλλου, η καθαρότητα της επιφάνειας (όπως έχει ήδη αναφερθεί), η παρουσία καταλυτών (οι οποίοι μπορούν να παρακάμψουν τη διαδικασία ενεργοποίησης της επιφάνειας) και πολλοί άλλοι παράγοντες.

Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας είναι η μεταφορά θερμότητας, δεδομένου ότι η διαδικασία του σχηματισμού του υδριδίου είναι εξώθερμη. Σε περίπτωση που το υδρίδιο δεν ψύχεται αρκετά γρήγορα, η ταχύτητα σχηματισμού του μειώνεται.

Ένας λόγος για τον οποίο τα υδρίδια μετάλλου δεν είναι πρακτικά για την αποθήκευση υδρογόνου είναι οι χαμηλοί κινητικοί μηχανισμοί που έχουν, παρά τις υψηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται για την αποθήκευση. Επιπλέον, πολλά υδρίδια είναι δραστικά και σχηματίζουν στρώματα προσμίξεων στην επιφάνειά τους, καθιστώντας απαραίτητη την ενεργοποίησή τους.

Γενικά, ένα υδρίδιο μετάλλου για να μπορέσει να αποθηκεύσει υδρογόνο πρέπει να διαθέτει τα εξής:

- Μεγάλη χωρητικότητα
- Υψηλή ταχύτητα εισαγωγής υδρογόνου και εξαγωγής του
- Εύκολη ενεργοποίηση
- Πολύ μικρή διαφοροποίηση στη σύσταση κατά επαναλαμβανόμενους κύκλους εισαγωγής και εξαγωγής υδρογόνου.

Πρόσφατα έχει δημιουργηθεί μεγάλο ενδιαφέρον όσον αφορά τα υδρίδια μετάλλου για χρήση στην αποθήκευση υδρογόνου. Αυτό οφείλεται σε πολλούς λόγους, αλλά ο κυριότερος είναι η βελτίωση των χαρακτηριστικών τους, η οποία επιτυγχάνεται μέσω της δημιουργίας νανοδομών με μέγεθος διαστάσεων νανομέτρων.

Συνδυάζοντας δύο ή περισσότερα υδρίδια μετάλλου, είναι δυνατόν να δημιουργήσουμε ένα σύστημα με βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με αυτές των αρχικών συστατικών. Αυτή η μέθοδος έχει σημασία μόνο σε συστατικά με δομές μεγέθους της τάξης των νανομέτρων. Ένα παράδειγμα αυτού, μπορεί να θεωρηθεί το σύστημα που προκύπτει από τον συνδυασμό του Mg, το οποίο χρειάζεται μεγάλες θερμοκρασίες για την απορρόφηση του υδρογόνου, και του FeTi (ή LaNi₅), το οποίο απαιτεί χαμηλές θερμοκρασίες για το ίδιο σκοπό. Κατά την απελευθέρωση σε θερμοκρασία δωματίου, το FeTi αποβάλλει το δεσμευμένο υδρογόνο του, ένα μέρος του οποίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να θερμανθεί το Mg και να συνεχιστεί η απελευθέρωση.

Ακόμη, εστιάζουμε σε συστήματα όπου τα συστατικά μπορούν να δρουν ως καταλύτες βοηθώντας το ένα το άλλο, όπως το μίγμα MgH₂ και MgNiH₄. Σε αυτό το σύστημα, παρατηρούμε ότι η ικανότητα απορρόφησης είναι το άθροισμα των επιμέρους συστατικών (περίπου 5% κ.β.), ενώ ταυτόχρονα οι ταχύτητες με τις οποίες αποδεσμεύεται το υδρογόνο είναι μεγάλες και η απαιτούμενη θερμοκρασία είναι χαμηλότερη (περίπου 220°C).[15]

Ο ρόλος του δεύτερου υλικού είναι σημαντικός όχι μόνο για την αύξηση της χωρητικότητας ενός συστήματος αλλά και για τη βελτίωση της κινητικότητας των αντιδράσεων. Λόγω της ενδόθερμης φύσης της διαδικασίας απελευθέρωσης, ο ρυθμός διοχέτευσης της θερμότητας εντός του συστήματος είναι σημαντικός παράγοντας. Αν ο ρυθμός αυτός είναι χαμηλός, η ταχύτητα ολοκλήρωσης της διαδικασίας μειώνεται. Για να αντιμετωπιστεί αυτός ο περιορισμός, χρησιμοποιείται ένα δεύτερο υλικό που

παίζει τον ρόλο του αγωγού θερμότητας. Το σύστημα Mg-Al είναι ένα τέτοιο σύστημα, όπου το Al λειτουργεί και ως αγωγός θερμότητας κατά τη διαδικασία απελευθέρωσης και συμμετέχει στο μηχανισμό της απορρόφησης με βάση την Εξίσωση (4.1).



Αφού η σημασία της απαγωγής θερμότητας πλέον έχει παρέλθει και το μεγαλύτερο μέρος του υδρογόνου έχει αποδεσμευθεί από το σύστημα, το αργίλιο παίζει διαφορετικό ρόλο καθώς αντιδρά με το μαγνήσιο, όπως φαίνεται από το δεξί μέλος της αντίδρασης.

4.1.2 Μηχανισμοί αποθήκευσης υδρογόνου σε νανοσωλήνες άνθρακα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αποθήκευση σε στερεά κατάσταση είναι πιο αποτελεσματική για την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου σε μέτρια θερμοκρασία και πίεση. Σε μια διαδικασία προσρόφησης, ένα μόριο αερίου αλληλεπιδρά με πολλά άτομα στην επιφάνεια ενός στερεού όπου συνδέεται και απελευθερώνεται αναστρέψιμα όταν χρειάζεται. Οι νανοσωλήνες άνθρακα είναι σε θέση να αποθηκεύουν H_2 σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες ($-196,15 \text{ }^\circ\text{C}$) και πιέσεις (6 MPa), παρέχοντας βαρυμετρική και ογκομετρική πυκνότητα 10,8 wt% και 41 kg/m^3 , αντίστοιχα. Η χαμηλή πίεση και το κόστος των σχετικών υλικών είναι βασικά πλεονεκτήματα έναντι των πολύ χαμηλών θερμοκρασιών που απαιτούνται.

Η αποθήκευση στους νανοσωλήνες μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: είτε με τη φυσική απορρόφηση του υδρογόνου από την επιφάνεια των νανοσωλήνων, επικρατούντων δυνάμεων Van der Waals, είτε με τη χημική προσρόφηση, μέσω δημιουργίας χημικών δεσμών μεταξύ του ατομικού υδρογόνου και των άνθρακων των νανοσωλήνων. Παρόλα αυτά, οι ακριβείς μηχανισμοί που καθορίζουν τη διαδικασία αυτή δεν έχουν ακόμα εξακριβωθεί. Συχνά υπάρχει ασυμφωνία μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και θεωρητικών προβλέψεων, ενώ η δυσκολία στην ακριβή μέτρηση σε ατομικό επίπεδο και η μη ρεαλιστική παραμετροποίηση των μοντέλων αποτελούν επιπλέον προκλήσεις. Επομένως, είναι δύσκολο να αποφανθούμε με ακρίβεια αν η προσρόφηση του υδρογόνου στους νανοσωλήνες γίνεται αποκλειστικά με φυσικό τρόπο ή αν συμβαίνουν και χημικές διεργασίες.

Η αποθήκευση του υδρογόνου στους νανοσωλήνες λαμβάνει χώρα με διάφορους τρόπους:

1. Στο εσωτερικό τους: Σε αυτήν την περίπτωση, το υδρογόνο διαμορφώνει, σε περίπτωση μικρής ποσότητας, ένα στρώμα κυλινδρικής μορφής, ενώ σε μεγαλύτερες ποσότητες δημιουργεί πολλά κυλινδρικά στρώματα, ομοκεντρικά σε μικρές ποσότητες πάντα (διότι αναφερόμαστε σε νανοσωλήνες με μεγάλη διάμετρο).
2. Για τα μονοφλοιϊκά στην επιφάνειά τους ενώ για τα πολυφλοιϊκά στην εξωτερική επιφάνεια τους.
3. Στα πολυφλοιϊκά μεταξύ των εσωτερικών επιφανειών τους. Τότε, η ποσότητα του υδρογόνου η οποία έχει εισαχθεί δεν αλλοιώνεται από τη διάμετρο του νανοσωλήνα.
4. Μεταξύ των νανοσωλήνων οι οποίοι βρίσκονται σε συστοιχίες. Στην συγκεκριμένη περίπτωση οι νανοσωλήνες αποκτούν μεγαλύτερες αποθηκευτικές ικανότητες από ότι τα στρώματα γραφίτη τα οποία είναι πιο απλά. Οι νανοσωλήνες μιας συστοιχίας θα πρέπει να διασπαστούν και αυτό γίνεται με χρήση υψηλών πιέσεων. Με αυτόν τον τρόπο το υδρογόνο εισχωρεί μέσα στην συστοιχία και απορροφάται από όλες τις εκτεθειμένες επιφάνειες άνθρακα.

4.1.3 Αποθήκευση σε νανοσωλήνες άνθρακα προσμίξεων αλκαλίων

Η αποθήκευση υδρογόνου σε νανοσωλήνες θεωρείται ιδανική, αλλά οι πειραματικές επιβεβαιώσεις δεν έχουν ακόμα φτάσει στα επίπεδα που θα θεωρούνταν πρακτικά, τουλάχιστον σε χαμηλές πιέσεις και θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Ωστόσο, ενθαρρυντικά είναι τα αποτελέσματα πειραμάτων με νανοσωλήνες άνθρακα που προσμίχθηκαν με αλκαλικά άτομα, όπως Li ή K (alkali - metal - doped carbon nanotubes). Σε αυτήν την περίπτωση το αλκαλικό άτομο ευρίσκεται σε μια απόσταση από το κέντρο του δακτυλίου εξαγωνικής διατομής και επηρεάζει το μοριακό υδρογόνο δημιουργώντας έναν ασθενή δεσμό μεταξύ τους. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι το μεταλλικό σωματίδιο πολώνεται θετικά καθώς μεταφέρει φορτίο από αυτό στο νανοσωλήνα, και εν συνεχεία πολώνει το μοριακό υδρογόνο έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένας ασθενής δεσμός μεταξύ των δύο.

4.1.4 Αποθήκευση υδρογόνου σε στέρεα κατάσταση

Όπως έχει αναφερθεί ήδη παραπάνω, μέσω της διαδικασίας της υδρογόνωσης, το αέριο υδρογόνο μπορεί να αντιδράσει με μεταλλικά στοιχεία για τη δημιουργία υδριδίων

μετάλλων. Τα υδρίδια αυτά έχουν υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης, καθώς οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων μετάλλου - υδρογόνου παρέχουν σταθερότητα. Ο ασφαλέστερος τρόπος αποθήκευσης υδρογόνου θεωρείται η αποθήκευση σε στερεή μορφή, ο συνδυασμός δηλαδή του υδρογόνου με υλικά με φυσική ή χημική προσρόφηση. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει την αποθήκευση υδρογόνου με υψηλή πυκνότητα και μπορεί να αντληθεί από το σημείο που είναι αποθηκευμένο σε ατμοσφαιρική πίεση, χωρίς την ανάγκη συμπίεσης ή υγροποίησης, μειώνοντας έτσι το κόστος προετοιμασίας. Παρόλο που υπάρχουν διάφορα μέταλλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση υδρογόνου, τα περισσότερα από αυτά παρουσιάζουν κάποια προβλήματα και απαιτούν πρόσθετη έρευνα για να διαπιστωθεί η βιωσιμότητά τους. Ένα σημαντικό κριτήριο που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την επιλογή ενός μετάλλου για την αποθήκευση μεταλλικών υδριδίων είναι η δυνατότητα αντιστροφής της διαδικασίας υδρογόνωσης. Εκτός από τη χωρητικότητα αποθήκευσης, αυτό είναι ένα κρίσιμο κριτήριο που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την επιλογή του μετάλλου, καθώς εξαρτάται από αυτήν τη δυνατότητα η βιωσιμότητα της διαδικασίας αποθήκευσης υδρογόνου. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε την δύναμη των δεσμών υδρογόνου-μετάλλου καθώς και την θερμοκρασία θέρμανσης του υδριδίου μετάλλου για να μπορούν να σπάσουν οι δεσμοί κατά την αφυδρογόνωση προκειμένου να είναι οικονομικά βιώσιμη η διαδικασία αποθήκευσης. Το μαγνήσιο αποτελεί μια επιλογή μετάλλου με πλεονεκτήματα για την αποθήκευση μεταλλικών υδριδίων, καθώς είναι φθηνό και εύκολα διαθέσιμο, μπορεί να αποθηκεύσει μεγάλες ποσότητες υδρογόνου, και έχει υψηλή αντιστρεψιμότητα. Αντίθετα, τα υδρίδια έχουν το μειονέκτημα του βάρους και της θερμικής καταπόνησης που απαιτείται για την προσρόφηση και απελευθέρωση του υδρογόνου. Μπορούμε να αυξήσουμε την πυκνότητα αποθήκευσης του υδρογόνου συνδέοντάς το χημικά με άλλους φορείς, όπως η αμμωνία, και η μεθανόλη, παράλληλα με την αποθήκευση μεταλλικών υδριδίων. Η υγρή μορφή του υδριδίου καθιστά ευκολότερη τη μεταφορά και τη μεταβίβαση της θερμότητας και της μάζας κατά τις διαδικασίες υδρογόνωσης και αφυδρογόνωσης. Ακόμη και η αποθήκευση γίνεται πιο απλή σε μεγάλο βαθμό, καθώς η υποδομή για την αποθήκευση χημικών ουσιών (όπως οι φορείς υδρογόνου) είναι ήδη ευρέως εφαρμοσμένη. Η αμμωνία και η μεθανόλη είναι δύο από τους πιο δημοφιλείς χημικούς φορείς υδρογόνου. Η μεθανόλη μπορεί να αποθηκεύσει περίπου 12,5% του όγκου της σε βάρος, ενώ η αμμωνία μπορεί να αποθηκεύσει μέχρι περίπου 17,7% του όγκου της σε βάρος. Και οι δύο φορείς υδρογόνου μπορούν να παραχθούν μέσω της σύνθεσης του

φυσικού αερίου, αλλά πρόσφατα έχουν αναπτυχθεί καινούριες, περιβαλλοντικά πιο φιλικές προσεγγίσεις βασισμένες στην ηλεκτρόλυση του νερού.

4.1.5 Αποθήκευση υδρογόνου σε αέρια κατάσταση

Η αποθήκευση αερίου υδρογόνου υψηλής πίεσης είναι επί του παρόντος η πιο κοινή και ώριμη μέθοδος, η οποία επιτυγχάνει υψηλές πιέσεις έως και 77 MPa χρησιμοποιώντας τυπικούς μηχανικούς συμπιεστές τύπου εμβόλου. Ωστόσο, το έργο που απαιτείται για τη συμπίεση είναι 2,21 kWh/kg, παρέχοντας βαρυμετρική και ογκομετρική πυκνότητα 13 wt% και 40 kg/m³, αντίστοιχα.

Η αποθήκευση του υδρογόνου είναι δυνατή με τη συμπίεσή του σε δεξαμενές υπό πίεση, καθώς και σε κατάλληλες φιάλες με πίεση έως και 700 bar. Στα οχήματα που φέρουν κυψέλες καυσίμου, το υδρογόνο αποθηκεύεται υπό πίεση στις φιάλες και δεξαμενές όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Λόγω της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας του, απαιτείται συμπίεση σε μεγάλες πιέσεις προκειμένου να ελαττωθεί το μέγεθος της αποθήκευσής του. Η συμπίεση του υδρογόνου για αποθήκευση σε φιάλες και δεξαμενές αντιστοιχεί σε περίπου 7% της ενέργειας που παράγεται κατά την υδρογόνωση για να φτάσει στην πίεση των 200 bar και 10% για την πίεση των 700 bar.

4.2 Κόστος αποθήκευσης

Τα κύρια χαρακτηριστικά των πέντε βασικών μεθόδων που επιτρέπουν την αναστρέψιμη αποθήκευση υδρογόνου παρατίθενται στον Πίνακα 4.1 παρακάτω.

Πίνακας 4.1: Κύρια Χαρακτηριστικά Μεθόδων Αποθήκευσης[6]

Μέθοδος Αποθήκευσης	Βαρυμετρική Πυκνότητα ρ_m (wt%)	Ογκομετρική Πυκνότητα ρ_v (kg/m ³)	Θερμοκρασία (°C)	Πίεση (MPa)
Αέριο υδρογόνο υψηλής πίεσης	13	40	περιβάλλοντος	77
Κρυογονικές Δεξαμενές	-	70,8	-252,87	ατμοσφαιρική
Νανοδομικές άνθρακα	10,8	41	-196,15	6
Υδρίδια μετάλλων	3	150	περιβάλλοντος	ατμοσφαιρική

Δεν υπάρχει οικονομική βιωσιμότητα για το υδρογόνο μέχρι να είναι προσιτό σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα. Το κόστος του υδρογόνου καθορίζεται σε μεγάλο

βαθμό από το κόστος αποθήκευσης του. Μια σταθερή χρέωση του κεφαλαιακού κόστους αντιπροσωπεύει περίπου το 62% του κόστους που σχετίζεται με την υγροποίηση υδρογόνου σε μεγάλες εγκαταστάσεις. Στη συνέχεια, η κατανάλωση ενέργειας και το κόστος λειτουργίας και διαχείρισης αντιπροσωπεύουν 30% και 8%, αντίστοιχα. Υπολογίζεται ότι η υγροποίηση υδρογόνου κοστίζει επί του παρόντος περίπου 1,11 \$/kg υγρού υδρογόνου και το κόστος πρόκειται να μειωθεί σε 0,53 \$/kg από το πρόγραμμα υδρογόνου των ΗΠΑ. Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα κεφαλαιουχικού κόστους που σχετίζεται με τα κρυογονικά δοχεία αποθήκευσης, που κυμαίνονται από 20 \$/kg έως 4500 \$/kg, ανάλογα με την ικανότητα αποθήκευσης.

Τα δοχεία συμπιεσμένου αερίου κοστίζουν περισσότερο καθώς λειτουργούν σε υψηλότερες πιέσεις και έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα. Στα 140 bar, ένα δοχείο κοστίζει 400 \$/kg αποθηκευμένου υδρογόνου και στα 540 bars, κοστίζει περίπου 2100 \$/kg. Μπορεί επίσης να κοστίσει περίπου 13.000\$ για κυλινδρικές χαλύβδινες δεξαμενές χωρητικότητας 765 λίτρων και λειτουργίας περίπου 415 bars. Επομένως, η συμπίεση ανά kg υδρογόνου κοστίζει περίπου 650\$, σε σύγκριση με περίπου 500\$ για την αποθήκευση συμπιεσμένου φυσικού αερίου. Μια δεξαμενή συμπιεσμένου υδρογόνου κοστίζει σημαντικά λιγότερο από μια δεξαμενή υγρού υδρογόνου για βραχυπρόθεσμη αποθήκευση. Σε σύγκριση με την αποθήκευση συμπιεσμένου υδρογόνου, η μακροχρόνια αποθήκευση υδρογόνου ως υγρό μπορεί να προσφέρει πλεονέκτημα κόστους. Επίσης, υπάρχει μεγάλη διακύμανση στην τιμή μεταξύ δοχείων αποθήκευσης μεταλλικών υδριδίων.[16]

Η αποτελεσματικότητα είναι ένας σημαντικός παράγοντας στο κόστος αποθήκευσης. Ένα αποτελεσματικό σύστημα αποθήκευσης απαιτεί λιγότερη ενέργεια για την αποθήκευση υδρογόνου, γεγονός που συμβάλλει στη μείωση του συνολικού κόστους.

Μεταξύ αυτών των συστημάτων αποθήκευσης, το συμπιεσμένο αέριο παρουσιάζει την υψηλότερη απόδοση αποθήκευσης περίπου 92%. Από την άλλη πλευρά, το υγρό υδρογόνο είναι ενεργοβόρο, αλλά αναμένεται ότι η τρέχουσα ζήτηση ενέργειας θα μπορούσε να μειωθεί κατά περίπου 50% στο εγγύς μέλλον, βελτιώνοντας τη διαδικασία υγροποίησης. Στην περίπτωση αυτή, η απόδοση θα μπορούσε να αυξηθεί σε περίπου 89%. Τέλος τα υδρίδια μετάλλων έχουν επίσης σχετικά υψηλή απόδοση περίπου 78%.

Μια πρόσφατη μελέτη των Abdin., Khalilpour κ.α. ανέλυσε τη βιωσιμότητα μιας σειράς τεχνολογιών αποθήκευσης υδρογόνου όπως το συμπιεσμένο αέριο το υγρό υδρογόνο και το υδρίδιο μετάλλου (LaNi₅) για σταθερή αποθήκευση. Μεταξύ αυτών

των τεχνολογιών για τη διάρκεια του ημερήσιου κύκλου αποθήκευσης, το κόστος αποθήκευσης συμπιεσμένου αερίου κυμαίνεται στα 0,33 \$/kgH₂. Η μέθοδος των μεταλλικών υδριδίων (MH) είναι αναδύομενη τεχνολογία, αλλά θα μπορούσε να γίνει τεχνοοικονομικά ανταγωνιστική σε σχέση με τις κυρίαρχες τεχνολογίες πυκνής αποθήκευσης, συμπιεσμένων αερίων και υγρών, ειδικά για μακροχρόνια σταθερή αποθήκευση. Το κόστος αποθήκευσης των MH είναι 0,70 \$/kgH₂, και το κόστος αποθήκευσης του υδροποιημένου υδρογόνου είναι 0,94 \$/kgH₂. Η ανακύκλωση της θερμότητας υδρογόνωσης θα μπορούσε να αυξήσει την απόδοση αποθήκευσης στο 88%. Το MH έχει πρόσθετα πλεονεκτήματα, για παράδειγμα, χαμηλή πίεση λειτουργίας και υψηλή ογκομετρική πυκνότητα (π.χ. η ογκομετρική πυκνότητα του κλασικού διμεταλλικού υδριδίου LaNi₅H₆ είναι 115 kg/m³ σε θερμοκρασία δωματίου και < 1 MPa πίεση σε σύγκριση με τα 70,8 kg/m³ σε 20,3 K και 0,1 MPa για υγρό υδρογόνο) γεγονός που το καθιστά πολλά υποσχόμενο για μακροχρόνια αποθήκευση. Η ανάλυσή μας δείχνει ότι για τη βραχυπρόθεσμη αποθήκευση (ημερήσια διάρκεια κύκλου), το κόστος των τεχνολογιών που διερευνήθηκαν κυμαίνεται μεταξύ 0,33 - 1\$/kg H₂. Επιπλέον, η μακροπρόθεσμη/εποχιακή αποθήκευση υδρογόνου (4μηνιαίος κύκλος διάρκειας) έχει υψηλό οικονομικό αντίκτυπο για σταθερές εφαρμογές από 2,97 - 36,06 \$/kg H₂. [17]

4.3 Ο ρόλος της αποθήκευσης του υδρογόνου στην ενεργειακή κρίση

Μετά από δεκαετίες αμφιβολιών, φαίνεται ότι το υδρογόνο είναι πλέον έτοιμο να αποτελέσει το κυρίαρχο καύσιμο για την ανθρωπότητα. Η αλλαγή του κλίματος, αλλά και η σοβαρή κρίση στην τιμή και προμήθεια του φυσικού αερίου και των ορυκτών καυσίμων, που έχει προκαλέσει ανησυχίες σε κυβερνήσεις και πολίτες για το ενεργειακό κόστος, καθιστούν πιο επίκαιρη τη σημασία που μπορεί να έχει το υδρογόνο [18].

Από την εποχή της καταστροφής του αεροστάτου “Χίντεμπουργκ” το 1937, το υδρογόνο έχει αμφισβητηθεί για τη χρησιμότητα του ως καύσιμο. Οι υποστηρικτές του υδρογόνου πιστεύουν ότι μπορεί να αποτελέσει ένα θαύμα χαμηλής εκπομπής άνθρακα, τροφοδοτώντας αυτοκίνητα και σπίτια και δημιουργώντας μια οικονομία υδρογόνου που θα αναδιαμορφώσει τον παγκόσμιο ενεργειακό χάρτη. Ωστόσο, οι σκεπτικιστές έχουν αμφιβολίες για την αξιοπιστία του υδρογόνου, αναφέροντας τις τεχνικές δυσκολίες και τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν στο παρελθόν. Παρόλα αυτά, οι τεχνολογίες υδρογόνου μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του

θερμοκηπίου κατά ένα δέκατο έως το 2050, προσφέροντας μια εναλλακτική λύση στα ορυκτά καύσιμα και την κλιματική αλλαγή.

Το υδρογόνο δεν αποτελεί πρωτογενή πηγή ενέργειας, αλλά λειτουργεί μάλλον ως μεταφορέας και μέσο αποθήκευσης ενέργειας, όπως ο ηλεκτρισμός και οι μπαταρίες. Δεν είναι διαθέσιμο στη φύση και πρέπει να παραχθεί μέσω ακριβών διαδικασιών. Για την παραγωγή υδρογόνου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικές πηγές ενέργειας χαμηλού άνθρακα, όπως η ανανεώσιμη ενέργεια και η πυρηνική ενέργεια. Η διαδικασία παραγωγής του υδρογόνου απαιτεί επίσης μεγάλες επενδύσεις και δημιουργεί πολλές εκπομπές ρύπων, εκτός γίνει συνδυασμός με τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης του άνθρακα που εκλύεται. Ωστόσο, παρόλα αυτά, το κόστος της διαδικασίας μειώνεται σταδιακά. Επιπλέον, το υδρογόνο είναι πιο εύφλεκτο και ογκώδες σε σχέση με άλλα καύσιμα.

Οι πετρελαϊκές κρίσεις της δεκαετίας του 1970 έθεσαν το θέμα της ανάγκης να αναζητηθούν νέες τεχνολογίες υδρογόνου. Αν και οι έρευνες άρχισαν τότε, ποτέ δεν προχώρησαν αρκετά.

Η ΕΣΣΔ για παράδειγμα, πραγματοποίησε μια πτήση με υδρογονοκίνητο αεροσκάφος στη δεκαετία του 1980, αλλά αυτή διήρκεσε μόνο 21 λεπτά και δεν είχε συνέχεια.

Σήμερα, η κλιματική αλλαγή δημιουργεί ένα νέο κύμα ενθουσιασμού για το υδρογόνο. Πολλά μεγάλα προγράμματα ανάπτυξης σχετικά με το υδρογόνο βρίσκονται σε εξέλιξη και οι συνολικές επενδύσεις τους μπορεί να φθάσουν τα 500 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2030. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, οι ετήσιες πωλήσεις υδρογόνου μπορεί να φθάσουν τα 600 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2050, από τα 150 δισεκατομμύρια δολάρια που είναι σήμερα. Πολλές χώρες, όπως η Βρετανία, η Γαλλία, η Γερμανία, η Ιαπωνία. Η Νότια Κορέα κ.α. έχουν θεσπίσει πλέον εθνικά σχέδια ανάπτυξης όσων αφορά το υδρογόνο.[19]

Οι αυτοκινητοβιομηχανίες της Ιαπωνίας και της Νότιας Κορέας είναι διατεθειμένες να πωλήσουν οχήματα που λειτουργούν με υδρογόνο ως καύσιμο, παρόλο που τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με μπαταρίες είναι πιο αποδοτικά μέχρι τώρα. Από την άλλη πλευρά, κάποιες ευρωπαϊκές χώρες επιθυμούν να τροφοδοτήσουν τα σπίτια με υδρογόνο, αν και οι αντλίες θερμότητας είναι πιο αποτελεσματικές ακόμα. Επίσης απαιτείται ένα ασφαλές δίκτυο σωλήνων για την μεταφορά του υδρογόνου, το οποίο δεν είναι πάντα εφικτό.

Το υδρογόνο μπορεί να εφαρμοστεί σε βιομηχανίες με περίπλοκες χημικές διαδικασίες και ανάγκες χρήσης υψηλών θερμοκρασιών, που δεν μπορούν να καλυφθούν με τη χρήση ηλεκτρισμού. Για παράδειγμα, οι χαλυβουργίες που αποτελούν το 8% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂, μπορούν να αντικατασταθούν από το υδρογόνο. Επιπλέον, τα υδρογονοκίνητα φορτηγά μπορούν να αποτελέσουν μια βιώσιμη λύση για τις εμπορικές μεταφορές μεγάλων αποστάσεων, που δεν μπορούν να καλυφθούν από ηλεκτροκίνητα οχήματα. Επιπλέον, τα καύσιμα υδρογόνου μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα αεροπλάνα και στα πλοία. Εταιρίες τρένων έχουν ήδη θέσει σε λειτουργία υδρογονοκίνητα τρένα στην Ευρώπη.

Επιπλέον, το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό για τη μαζική αποθήκευση και μεταφορά ενέργειας. Τα δίκτυα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αντιμετωπίζουν προβλήματα όταν δεν υπάρχει αέρας ή ηλιακή ακτινοβολία. Η αποθήκευση ενέργειας σε μπαταρίες μπορεί να βοηθήσει, αλλά η μετατροπή της ανανεώσιμης ενέργειας σε υδρογόνο μπορεί να επιτρέψει τη φθηνή αποθήκευση για μεγάλες χρονικές περιόδους. Στη συνέχεια, η ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρικό ρεύμα όταν χρειάζεται. Οι χώρες με σημαντικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν ακόμα και να εξάγουν αυτήν την ενέργεια σε μορφή υδρογόνου.

Καθώς γίνεται επένδυση περισσότερων κεφαλαίων στην έρευνα και σε νέες τεχνολογίες για την αξιοποίηση του υδρογόνου, οι πιθανές χρήσεις του θα γίνονται ολοένα και πιο πολλές. Τόσο ο ιδιωτικός τομέας όσο και οι κυβερνήσεις μπορούν να συμβάλουν στην ευημερία της οικονομίας του υδρογόνου.

4.4 Μεταφορά και διανομή υδρογόνου

Με βάση τη διαθεσιμότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την έντασή τους, την τεχνολογική ετοιμότητα των υποδομών και των κυβερνητικών πολιτικών, η παραγωγή πράσινου υδρογόνου είναι ευνοϊκότερη σε ορισμένα μέρη του πλανήτη σε σύγκριση με άλλα. Χώρες όπως η Αυστραλία, οι ΗΠΑ, το Μαρόκο και η Νορβηγία έχουν τη δυνατότητα να ηγηθούν της μελλοντικής αγοράς εμπορίου υδρογόνου λόγω της διαθεσιμότητας ανανεώσιμων πηγών και της απαραίτητης υποδομής. Από την άλλη πλευρά, χώρες όπως η Ιαπωνία, η Ινδία, η Κίνα, η Γαλλία, η Ισπανία και μέρος της ΕΕ θα πρέπει να βασίζονται στην εισαγωγή υδρογόνου λόγω κυρίως έλλειψης γης/πηγών (Ιαπωνία, Νότια Κορέα, ΕΕ) ή υποδομής (Ινδία). Η τρέχουσα παγκόσμια κατανάλωση υδρογόνου είναι ιδιαίτερα συγκεντρωμένη στη Βόρεια Αμερική, την Ευρώπη και την

Ανατολική Ασία. Η συνδυασμένη ζήτηση αυτών των εθνών είναι περίπου το 65% της συνολικής ζήτησης.[20]

Μεταφορά

Κατ' αρχήν, το υδρογόνο μπορεί να μεταφερθεί σε αέρια (υπό πίεση) ή υγρή (κρυογονική) κατάσταση και μπορεί να διανεμηθεί μέσω αγωγών ή με φορτηγά, πλοία ή τρένα, τα οποία ενσωματώνουν οποιαδήποτε από τις μεθόδους αποθήκευσης που είδαμε προηγουμένως.

Διανομή

Η διανομή είναι η διαδικασία διάθεσης του υδρογόνου στον τελικό χρήστη. Επί του παρόντος, γίνεται από δεξαμενές πίεσης στο σημείο τροφοδοσίας. Στο μέλλον, όταν η χρήση του υδρογόνου γίνει ευρέως διαδεδομένη στη λεγόμενη «κοινωνία του υδρογόνου», τα συστήματα διασύνδεσης θα σχεδιαστούν από σωλήνες που θα το παραδίδουν στα σπίτια (παρόμοια με τις τρέχουσες συνδέσεις φυσικού αερίου), αλλά και στα πρατήρια καυσίμων υδρογόνου (υδρογεννήτριες), που θα επιτρέψουν την ταχεία επαναφόρτιση οποιουδήποτε οχήματος που κινείται με υδρογόνο.

Η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα του υδρογόνου σημαίνει ότι μπορεί να είναι πολύ δαπανηρή η μεταφορά του σε μεγάλες αποστάσεις. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν διαθέσιμες διάφορες πιθανές επιλογές για να ξεπεραστεί αυτό το εμπόδιο, συμπεριλαμβανομένης της συμπίεσης και της υγροποίησης.

Σε πολλές χώρες υπάρχει ένα εκτεταμένο υπάρχον δίκτυο αγωγών φυσικού αερίου που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά και τη διανομή υδρογόνου. Θα μπορούσαν επίσης να αναπτυχθούν νέες υποδομές, όπως αποκλειστικά δίκτυα αγωγών καθώς και επενδύσεις στο κομμάτι της ναυτιλίας που θα επιτρέπουν δυναμικά μεγάλης κλίμακας υπερπόντια μεταφορά υδρογόνου. Κάθε πιθανή επιλογή έχει ποικίλα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και η φθηνότερη επιλογή θα ποικίλλει ανάλογα με τη γεωγραφία, την απόσταση, την κλίμακα και την απαιτούμενη τελική χρήση του υδρογόνου.

Όπως το φυσικό αέριο, το καθαρό υδρογόνο μπορεί να υγροποιηθεί πριν μεταφερθεί για να αυξήσει την πυκνότητά του. Ωστόσο, η υγροποίηση απαιτεί το υδρογόνο να ψύχεται στους -253°C . Εάν το ίδιο το υδρογόνο χρησιμοποιηθεί για την παροχή αυτής της ενέργειας, τότε θα καταναλώνεται περίπου 25% - 35% της αρχικής ποσότητας του

(με βάση τις σημερινές τεχνολογίες) [21]. Αυτή είναι πολύ περισσότερη ενέργεια από ό,τι απαιτείται για να υγροποιηθεί το φυσικό αέριο, το οποίο καταναλώνει περίπου το 10% της αρχικής ποσότητας του.

Μεταφορά με αγωγούς

Υπάρχουν σχεδόν 5.000 km αγωγών υδρογόνου σε όλο τον κόσμο σήμερα, σε σύγκριση με περίπου 3 εκατομμύρια km αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου. Αυτοί οι υφιστάμενοι αγωγοί υδρογόνου λειτουργούν από βιομηχανικούς παραγωγούς υδρογόνου και χρησιμοποιούνται κυρίως για την παράδοση υδρογόνου σε εγκαταστάσεις χημικών και διυλιστηρίων. Οι Ηνωμένες Πολιτείες έχουν 2.600 km, το Βέλγιο 600 km και η Γερμανία λίγο λιγότερο από 400 km. Οι αγωγοί έχουν χαμηλό λειτουργικό κόστος και διάρκεια ζωής μεταξύ 40 και 80 ετών. Τα δύο κύρια μειονεκτήματά τους είναι το υψηλό κόστος κεφαλαίου καθώς και την ανάγκη απόκτησης δικαιωμάτων διέλευσης. Αυτά σημαίνουν ότι η βεβαιότητα της μελλοντικής ζήτησης υδρογόνου και η κρατική υποστήριξη είναι ουσιαστικής σημασίας εάν πρόκειται να κατασκευαστούν νέοι αγωγοί. Οι υπάρχοντες αγωγοί μεταφοράς φυσικού αερίου υψηλής πίεσης θα μπορούσαν να μετατραπούν για να παρέχουν καθαρό υδρογόνο στο μέλλον, εάν δεν χρησιμοποιούνται πλέον για φυσικό αέριο, αλλά η καταλληλότητά τους πρέπει να αξιολογηθεί κατά περίπτωση και θα εξαρτηθεί από τον τύπο του χάλυβα που χρησιμοποιείται στον αγωγό και την καθαρότητα του υδρογόνου που μεταφέρεται [22]. Η κύρια πρόκληση είναι ότι χρειάζεται τρεις φορές περισσότερος όγκος για την παροχή της ίδιας ποσότητας ενέργειας συγκριτικά με το φυσικό αέριο. Μπορεί επομένως να απαιτηθεί πρόσθετη χωρητικότητα μεταφοράς και αποθήκευσης σε όλο το δίκτυο, ανάλογα με την έκταση της ανάπτυξης του υδρογόνου.

Μεταφορά με πλοία

Το εισαγόμενο υδρογόνο προσφέρει περιθώρια στις χώρες να διαφοροποιήσουν τις εισαγωγές ενέργειας τους και ένα παράδειγμα αυτού είναι το σημαντικό ενδιαφέρον ως προς τη χρήση πλοίων για τη μεταφορά υδρογόνου. Τέτοια πλοία θα ήταν σε γενικές γραμμές παρόμοια με τα πλοία LNG και θα απαιτούσαν το υδρογόνο να υγροποιηθεί πριν από τη μεταφορά. Ενώ τόσο τα πλοία όσο και η διαδικασία υγροποίησης θα συνεπάγονταν σημαντικό κόστος, ορισμένα έργα αναζητούν ενεργά την ανάπτυξη κατάλληλων πλοίων. Η πρώτη μεταφορά υγροποιημένου υδρογόνου με χρήση πλοίου

αποδείχθηκε πρόσφατα στο έργο HySTRA το 2022. Το πλοίο εξοπλισμένο με χωρητικότητα 1250m³ υγροποιημένης αποθήκευσης και βάρους περίπου 8000 τόνων, ταξίδεψε 9000 km από το λιμάνι του Hastings της Αυστραλίας στο λιμάνι της Kobe, Ιαπωνία.[23]

Μεταφορά με φορτηγά

Σήμερα η διανομή υδρογόνου βασίζεται κυρίως σε ρυμουλκούμενα φορτηγά πεπιεσμένου αερίου για αποστάσεις μικρότερες από 300 km. Τα φορτηγά βυτιοφόρα υγρού υδρογόνου χρησιμοποιούνται συχνά αντ' αυτού όπου υπάρχει αξιόπιστη ζήτηση και το κόστος υγροποίησης μπορεί να αντισταθμιστεί από το χαμηλότερο μοναδιαίο κόστος μεταφοράς υδρογόνου. Και στις δύο περιπτώσεις, το υδρογόνο διανέμεται σε κυλίνδρους που φορτώνονται σε ρυμουλκούμενα

Θεωρητικά ένα μόνο ρυμουλκούμενο που μεταφέρει συμπιεσμένο αέριο υδρογόνο μπορεί να χωρέσει έως και 1.100 kgH₂ σε ελαφρούς σύνθετους κυλίνδρους (στα 500 bar). Αυτό το βάρος σπάνια επιτυγχάνεται στην πράξη, καθώς οι κανονισμοί σε όλο τον κόσμο περιορίζουν την επιτρεπόμενη πίεση, το ύψος, το πλάτος και το βάρος των κυλίνδρων που μπορούν να μεταφερθούν.

Υψηλής μόνωσης κρυογονικά βυτιοφόρα φορτηγά μπορούν να μεταφέρουν έως και 4.000 kg υγροποιημένου υδρογόνου και χρησιμοποιούνται συνήθως σήμερα για μεγάλα ταξίδια έως και 4.000 km. Αυτά τα φορτηγά δεν είναι κατάλληλα για μεταφορά πάνω από αυτή την απόσταση, καθώς το υδρογόνο θερμαίνεται και προκαλεί αύξηση της πίεσης.

4.5 Κόστος μεταφοράς

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, το υδρογόνο μπορεί να μεταφερθεί μέσω φορτηγών, ρυμουλκούμενων σωλήνων, αγωγών ή πλοίων. Ο προτιμώμενος τρόπος μεταφοράς βασίζεται στον όγκο μεταφοράς καθώς και στην απόσταση. Το πλήρες κόστος της παράδοσης υδρογόνου στους τελικούς χρήστες πρέπει να λαμβάνει υπόψη όλα τα πιθανά στάδια της αλυσίδας εφοδιασμού. Οι διαφορετικοί τρόποι μεταφοράς έχουν πολύ διαφορετικό κόστος, μεταφοράς, διανομής, και αποθήκευσης. Ενώ μια επιλογή μπορεί να είναι φθηνότερη για ένα συγκεκριμένο μέρος της αλυσίδας αξίας, αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί από υψηλότερο κόστος σε άλλο τμήμα της αλυσίδας. Οι διάφορες τεχνολογίες που εμπλέκονται βρίσκονται επίσης σε διαφορετικούς βαθμούς ωριμότητας και έτσι έχουν πολύ διαφορετικές δυνατότητες μείωσης του κόστους στο

μέλλον. Το συνολικό κόστος παράδοσης υδρογόνου θα ποικίλλει ανάλογα με τη διαθέσιμη υποδομή στις χώρες εξαγωγής και εισαγωγής, τις αποστάσεις μεταφοράς και διανομής, τη μέθοδο μεταφοράς και τη ζήτηση τελικής χρήσης. Παρά τις πολλές αβεβαιότητες σχετικά με τις περισσότερες από αυτές τις συνιστώσες κόστους, μια μέση τιμή κόστους μεταφοράς με βάση τους διάφορους τρόπους που προαναφέρθηκαν έχει ως εξής: Η μεταφορά υδρογόνου με τη μορφή συμπιεσμένου αερίου σε φορητά (ρυμουλκούμενο με χαλύβδινο σωλήνα: 380 kgH₂ στα 250 bar, σύνθετοι κύλινδροι: 560-900 kgH₂ στα 500-700 bar) μπορεί να είναι οικονομικά αποδοτική έως 400 km με κόστος μεταφοράς 0,55-0,75 \$/kgH₂. Για αποστάσεις άνω των 400 km και έως 4000 km, η μεταφορά υδρογόνου γίνεται συνήθως σε υγροποιημένη κατάσταση με κόστος 0,75-2,6 \$/kgH₂. Το σύνηθες βάρος υδρογόνου που μεταφέρεται με ρυμουλκούμενα υγρού είναι περίπου 4000 - 4300 kg. Οι αγωγοί διανομής υδρογόνου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά μεγάλου όγκου υδρογόνου 10-100 τόνων την ημέρα (tpd) με αποτελεσματικό κόστος έως 1800 km περίπου (<2 \$/kg). Οι αγωγοί μεταφοράς μπορούν να μεταφέρουν υδρογόνο με ακόμη μεγαλύτερους ρυθμούς ροής 100-10000 tpd σε απόσταση 5000-7000 km με 0,05-2 \$/kgH₂. Η επένδυση κεφαλαίου που απαιτείται για την κατασκευή νέας υποδομής αγωγών υδρογόνου είναι αρκετά υψηλή. Η μεταφορά υδρογόνου σε μεγάλες αποστάσεις θα εξαρτηθεί και πάλι από το κόστος μεταφοράς. Για έναν πολύ μεγάλο όγκο μεταφοράς, ως πούμε 1000-10000 tpd πέρα από τα διεθνή σύνορα (ως πούμε 7000-10000 km), το κόστος μεταφοράς υπερβαίνει τα 2 \$/kgH₂, με την προτιμώμενη μέθοδο να είναι το υγρό υδρογόνο που μεταφέρεται στα πλοία. Ωστόσο, για κάποιες εμπορικές οδούς, το σχετικά υψηλό κόστος μεταφοράς και διανομής υδρογόνου σημαίνει ότι γενικά η παραγωγή υδρογόνου στην εγχώρια αγορά σε σχέση με την εισαγωγή του θα είναι φθηνότερη. Αυτό συμβαίνει επειδή το κόστος μεταφοράς θα υπερτερεί του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ή των τιμών του φυσικού αερίου. Στην Ευρώπη, για παράδειγμα, η εγχώρια παραγωγή υδρογόνου χαμηλών εκπομπών άνθρακα από φυσικό αέριο είναι πιθανό να είναι φθηνότερη για τη βιομηχανία και τις εφαρμογές ισχύος, από την εισαγωγή υδρογόνου χαμηλών εκπομπών άνθρακα από τη Ρωσία. Ακόμα κι έτσι, ορισμένες χώρες με περιορισμένη αποθήκευση CO₂ ή περιορισμένους αναξιοποίητους ανανεώσιμους πόρους μπορεί να εξακολουθούν να βλέπουν τις εισαγωγές υδρογόνου με χαμηλές εκπομπές άνθρακα ως αξιόλογες λόγω της συμβολής τους στη διαφοροποίηση των ενεργειακών τους συστημάτων και στη μείωση των εκπομπών CO₂. [24]

5. Χρήσεις του υδρογόνου στην βιομηχανία

5.1 Το υδρογόνο στον τομέα των μεταφορών

Στα στοιχεία της Eurostat αναφέρεται ότι το 2018, η συνολική ποσότητα εκπομπών CO₂ της Ευρώπης ανερχόταν στους 3,9 Gt, εκ των οποίων το 24,6% προήλθε από τον τομέα των μεταφορών [25]. Αυτό σημαίνει ότι οι μεταφορές έχουν σημαντικό αντίκτυπο στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην Ευρώπη. Σε σύγκριση με οχήματα που χρησιμοποιούν μόνο μπαταρίες, η χρήση υδρογόνου στα μεταφορικά μέσα πλεονεκτεί λόγω του πιο γρήγορου ανεφοδιασμού και της μεγαλύτερης ενεργειακής πυκνότητας. Οι τεχνολογίες των μπαταριών και του υδρογόνου μπορούν να συμπληρώνουν η μία την άλλη.

Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου αυξάνονται σημαντικά λόγω των βαρέων φορτηγών τα οποία μεταφέρουν εμπορεύματα. Ως κύριο καύσιμο, χρησιμοποιούν πετρέλαιο, καθώς έχει σχετικά χαμηλό λειτουργικό κόστος. Παρόλο που τα βαρέα φορτηγά χρησιμοποιούνται συνήθως για τις εμπορευματικές μεταφορές λόγω του χαμηλού κόστους του πετρελαίου ως καύσιμο, είναι σημαντικό να βρεθούν εναλλακτικές λύσεις που θα μειώσουν τις εκπομπές αερίων ρύπων. Σύμφωνα με τη Σύμβαση Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή, οι χώρες που συμμετέχουν στη Συμφωνία του Παρισιού δείχνουν με δεδομένα ότι το 2015 ο τομέας των μεταφορών ήταν υπεύθυνος για πάνω από το 20% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου [26]. Έτσι, απαιτούνται περαιτέρω προσπάθειες για την ανάπτυξη καθαρότερων εναλλακτικών λύσεων στον τομέα των μεταφορών. Τα φορτηγά έχουν ένα σημαντικό ανταγωνιστικό πλεονέκτημα σε σχέση με τις σιδηροδρομικές μεταφορές λόγω του γεγονότος ότι μπορούν να παραδώσουν τα φορτία σε σύντομο χρονικό διάστημα και απευθείας στον προορισμό τους. Στον Καναδά, ο τομέας των φορτηγών αντιστοιχεί στο 17% - 37% των συνολικών εκπομπών αερίων του τομέα των μεταφορών. Παρόμοιες αυξήσεις έχουν καταγραφεί και σε άλλες χώρες, όπως η Γερμανία και οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Η αύξηση των εκπομπών αερίων ρύπων από τα εμπορευματικά φορτηγά αποτελεί εμπόδιο στην προσπάθεια μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος στον τομέα των μεταφορών. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, μια δυνατότητα είναι η σταδιακή αντικατάσταση του πετρελαίου με άλλα καύσιμα όπως το LNG και το H₂.

Πολλές χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης καθώς και η ΕΕ η ίδια, έχουν καθορίσει στόχους για την προώθηση και χρήση του υδρογόνου και των κυψελών καυσίμου. Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία εμπεριέχει ένα σχέδιο δράσης που στοχεύει στην αποδοτικότερη χρήση των πόρων και την επίτευξη μιας καθαρής κυκλικής οικονομίας. Συγκεκριμένα, η πρωτοβουλία στοχεύει στην βελτίωση της βιοποικιλότητας και την ελάττωση των επιπέδων ρύπανσης με σκοπό την επίτευξη της μηδενικής εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου έως το 2050. Για να επιτευχθεί ο στόχος της ΕΕ για την καθαρή κυκλική οικονομία και τη μείωση της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου, ένας από τους τρόπους είναι, ο τομέας των μεταφορών να λειτουργεί εξ ολοκλήρου από υδρογόνο. Μερικοί από τους στόχους της ΕΕ και κάποιων κρατών μελών σχετικά με τη χρήση υδρογόνου επεξηγούνται ως εξής:

Η Γαλλία έχει καθορίσει ένα Εθνικό Σχέδιο με στόχο να έχει έως το 2023 περίπου 5.000 υδρογονοκίνητα οχήματα, συμπεριλαμβανομένων επιβατικών και επαγγελματικών οχημάτων, 200 λεωφορείων και φορτηγών και 100 σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου. Οι στόχοι για το 2028 περιλαμβάνουν την κατασκευή περίπου 20.000-50.000 υδρογονοκίνητων αυτοκινήτων και εμπορικών οχημάτων, καθώς και 800 - 2.000 λεωφορείων και φορτηγών.

Στόχος της Κροατίας είναι η κατασκευή 25 σταθμών ανεφοδιασμού με υδρογόνου μέχρι και το 2030, 50 μέχρι και το 2040 και 75 μέχρι και το 2050.

Στόχος της Γερμανίας είναι να αυξήσει τους σταθμούς ανεφοδιασμού με υδρογόνου σε 400 μέχρι το 2025. Επιπλέον, από το 2021, έχουν ξεκινήσει να λειτουργούν 14 επιβατικά τρένα τα οποία χρησιμοποιούν την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου, με άλλα 27 να είναι προγραμματισμένα να κυκλοφορήσουν έως το 2023. Η βόρεια Γερμανία στοχεύει στην εισαγωγή περισσότερων από 400 φορτηγών τα οποία χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου, καθώς και στην κατασκευή 20 σταθμών ανεφοδιασμού για φορτηγά και 60 σταθμών ανεφοδιασμού για αυτοκίνητα μέχρι το 2025. Επιπλέον, προτίθεται να ενσωματώσει 500 λεωφορεία υδρογόνου στο δημόσιο σύστημα μεταφορών. Οι στόχοι για το έτος 2030 εμπεριέχουν την δημιουργία και χρήση 11.000 βαρέων φορτηγών περίπου 20 τόνων με ενσωματωμένες κυψέλες καυσίμου, την κατασκευή τουλάχιστον 200 σταθμών ανεφοδιασμού για φορτηγά και αυτοκίνητα, τη χρήση 1.000 κάδων απόρριψης των κυψελών καυσίμου και την δημιουργία 3.800 λεωφορείων κυψελών καυσίμου για χρήση στις δημόσιες συγκοινωνίες.

Η Ισπανία, στοχεύει μέχρι το 2030 να χρησιμοποιήσει 5.000 - 7.000 οχήματα για μεταφορά εμπορευμάτων, ελαφρά και βαρέα, 150 - 200 λεωφορεία και την κατασκευή δύο γραμμών τρένων που θα λειτουργούν με κυψέλες καυσίμου, ενώ θα υπάρχουν επίσης 100 - 150 σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου για δημόσια χρήση.

Στην Ελβετία, έχει προγραμματιστεί η κυκλοφορία 1.600 βαρέων φορτηγών έως το 2025.

Στην Ιταλία, οι στόχοι για το έτος 2030 περιλαμβάνουν την κυκλοφορία 290.000 επιβατικών αυτοκινήτων και 3.600 λεωφορείων. Επιπλέον, προγραμματίζεται η εγκατάσταση 346 σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου για τα επιβατικά αυτοκίνητα και 96 για τα λεωφορεία, μέχρι την πραγματοποίηση του στόχου. Επιπλέον, έχει ως στόχο να φτάσει τα 200.000 βαρέα φορτηγά μέχρι το 2030 και να αναπτύξει μια υποδομή από 40 σταθμούς ανεφοδιασμού για τα βαρέα οχήματα μέσα στα επόμενα έξι χρόνια.

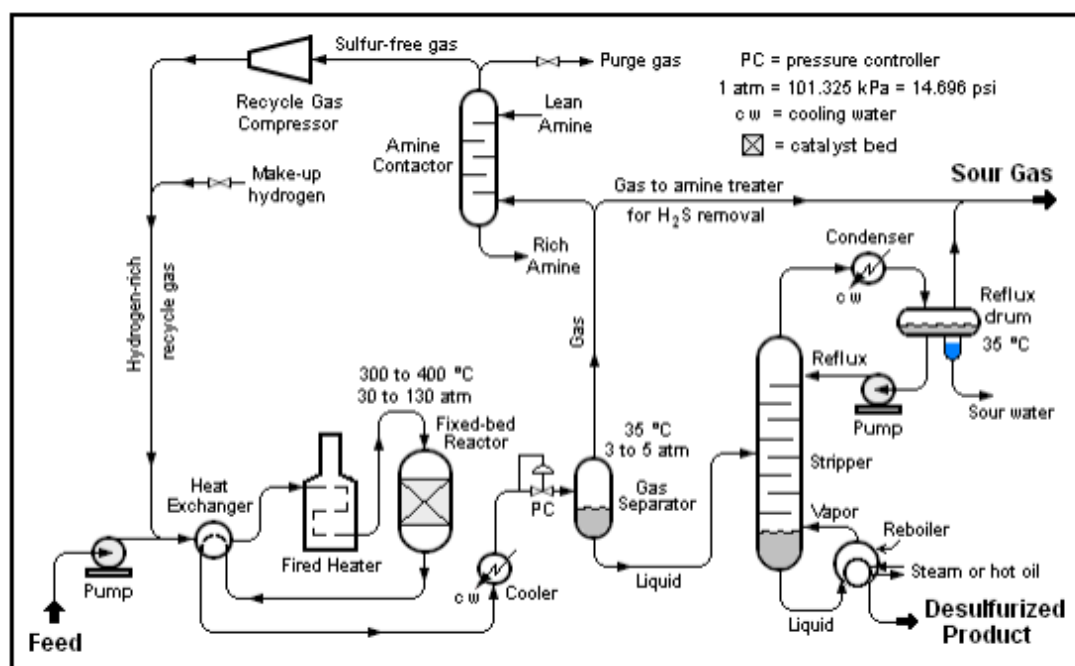
5.2 Χρήση υδρογόνου για διύλιση πετρελαίου

Ένας τρόπος διύλισης πετρελαίου είναι γνωστός και ως υδρογονοαποθείωση. Η υδρογονοαποθείωση, γνωστή επίσης ως υδρογονοκατεργασία, είναι μια χημική διαδικασία που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση θείου από το πετρέλαιο. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται καταλυτικά με τη χρήση υδρογόνου σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση. Εκτός από το θείο, στις μονάδες υδρογονοαποθείωσης γίνεται απομάκρυνση παράλληλα και άλλων μετάλλων, όπως το άζωτο, από το πετρέλαιο. Η ονομασία της διαδικασίας προέρχεται από τη χρήση του υδρογόνου στην αντίδραση. Η απλοποιημένη μορφή της γενικής χημικής αντίδρασης υδρογονοαποθείωσης περιγράφεται από την Εξίσωση (5.1):



Οι υδρογονάνθρακες οι οποίοι περιέχουν επίσης ενώσεις θείου υπόκεινται σε αντίδραση με υδρογόνο και κάποιον καταλύτη για να παραχθούν υδρόθειο και οργανικές ενώσεις χωρίς θείο. Όλες οι ενώσεις που έχει το θείο με το πετρέλαιο δεν αφαιρούνται με την ίδια ευκολία. Η δυσκολία απομάκρυνσής τους αυξάνεται όταν η περιεκτικότητα σε θείο είναι μικρότερη και η ένωση είναι μεγάλη και ογκώδης. Οι θειόλες, τα σουλφίδια και τα δισουλφίδια απομακρύνονται ευκολότερα με υδρογονοαποθείωση σε σχέση με τις βενζοθειοφαίνες και τις διβενζοθειοφαίνες, οι οποίες είναι κυκλικές ενώσεις.

Η διαδικασία της υδρογονοαποθείωσης λαμβάνει χώρα σε μια ειδική μονάδα του δυλιστηρίου που περιλαμβάνει έναν αντιδραστήρα με καταλυτικές κλίνες στο εσωτερικό του. Η διαδικασία αυτή απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες, οι οποίες κυμαίνονται από 300°C έως 400°C, και υψηλές πιέσεις, οι οποίες διαφέρουν ανάλογα με τον βαθμό αποθείωσης που απαιτείται και τη φύση των θειούχων ενώσεων στην τροφοδοσία. Αυτές οι πιέσεις μπορούν να κυμαίνονται από 30 έως 130 atm.



Εικόνα 5.1: Διάγραμμα ροής διεργασιών στη μονάδα υδρογονοαποθείωσης [50]

Όπως δείχνει η Εικόνα 5.1, η ροή του υγρού στο κάτω αριστερό μέρος ανυψώνεται σε πίεση με μια αντλία και συνδυάζεται με ένα ρεύμα ανακυκλωμένου αερίου που περιέχει υδρογόνο. Η ανάμειξη του υγρού και του αερίου διέρχεται από έναν θερμαντήρα για προθέρμανση.

Στη συνέχεια, η προθερμασμένη ροή διέρχεται από έναν θερμαντήρα, όπου θερμαίνεται στην απαιτούμενη υψηλή θερμοκρασία και μετατρέπεται πλήρως σε ατμό πριν εισέλθει στον αντιδραστήρα. Στον αντιδραστήρα, οι καταλυτικές κλίνες πραγματοποιούν τη διαδικασία υδρογονοαποθείωσης. Ο καταλύτης διασπά το δεσμό θείου-άνθρακα για να επιτρέψει την αντίδραση του θείου με το υδρογόνο και τη δημιουργία υδρόθειου. Τα μέταλλα παραμένουν στην επιφάνεια του καταλύτη με μια μικρή ποσότητα θείου, ενώ οι άλλες ενώσεις απομακρύνονται.

Τα προϊόντα που δημιουργήθηκαν από την αντίδραση ψύχονται εν μέρει καθώς ρέουν μέσω του ίδιου εναλλάκτη θερμότητας που χρησιμοποιήθηκε για την προθέρμανση της τροφοδοσίας του αντιδραστήρα. Έπειτα, περνούν μέσω ενός δεύτερου εναλλάκτη θερμότητας (ψυκτήρα), ο οποίος χρησιμοποιεί το νερό ως ψυκτικό μέσο. Μετά από αυτό, μέσω μιας βαλβίδας ρύθμισης πίεσης, το ρεύμα υφίσταται πτώση πίεσης μεταξύ 3-5atm και το μίγμα εισέρχεται σε ένα δοχείο διαχωρισμού αερίου σε αυτό το εύρος πίεσης και σε θερμοκρασία 35°C.

Σε αυτό το σημείο πραγματοποιείται η διαχωριστική διαδικασία του υλικού σε υγρή και αέρια φάση. Το μεγαλύτερο μέρος του αερίου που παράγεται αποτελείται από υδρογόνο και υδρόθειο και οδηγείται για ανακύκλωση. Το αέριο αυτό περνά μέσα από μια στήλη που περιέχει μια επαφή αμίνης, με σκοπό την απομάκρυνση του υδρόθειου που περιέχεται σε αυτό.[27]

5.3 Το υδρογόνο στην βιομηχανία ως μέσο απανθρακοποίησής της

Η χρήση του υδρογόνου ως υποκατάστατο των ορυκτών καυσίμων στη βιομηχανία έχει τη δυνατότητα να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και να συμβάλει στην μείωση των επιπτώσεων της αλλαγής του κλίματος. Για να επιτευχθεί αυτή η μετάβαση, απαιτείται μια πολύπλευρη προσέγγιση που περιλαμβάνει, όπως έχουμε αναφέρει και στα προηγούμενα κεφάλαια, την ανάπτυξη οικονομικών μεθόδων παραγωγής υδρογόνου, την κατασκευή υποδομής υδρογόνου, την υιοθέτηση τεχνολογιών που έχουν ως βάση τους το υδρογόνο, την ενθάρρυνση των επενδύσεων στην τεχνολογία υδρογόνου και τη θέσπιση προτύπων και κανονισμών.

1. Ανάπτυξη οικονομικών μεθόδων παραγωγής υδρογόνου: Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί μέσω ποικίλων μεθόδων, όπως η ηλεκτρόλυση, η αναμόρφωση μεθανίου με ατμό και οι βιολογικές διεργασίες. Η ηλεκτρόλυση διασπά το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια, ενώ η αναμόρφωση μεθανίου με ατμό χρησιμοποιεί φυσικό αέριο για την παραγωγή υδρογόνου. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να τροφοδοτηθούν από αιολική και ηλιακή ενέργεια, για την παραγωγή καθαρού υδρογόνου. Βιολογικές διεργασίες, όπως η ζύμωση φυκιών, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή υδρογόνου. Η ανάπτυξη οικονομικά αποδοτικών και επεκτάσιμων μεθόδων παραγωγής υδρογόνου είναι απαραίτητη για να καταστεί

το υδρογόνο βιώσιμη εναλλακτική λύση για τα ορυκτά καύσιμα στη βιομηχανία.

2. Κατασκευή υποδομής υδρογόνου: Για να είναι άμεσα διαθέσιμο το υδρογόνο στους χρήστες της βιομηχανίας, πρέπει να δημιουργηθεί μια υποδομή υδρογόνου. Αυτό περιλαμβάνει την ανάπτυξη συστημάτων αποθήκευσης και διανομής υδρογόνου, όπως αγωγούς, δεξαμενές και σταθμούς ανεφοδιασμού. Η υποδομή υδρογόνου μπορεί επίσης να ενσωματωθεί σε υπάρχοντες αγωγούς φυσικού αερίου και συστήματα αποθήκευσης, καθιστώντας ευκολότερη και πιο οικονομική τη διανομή του στους χρήστες.
3. Υιοθέτηση τεχνολογιών που έχουν ως βάση τους το υδρογόνο: Η χρήση του υδρογόνου ως καυσίμου σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές μπορεί να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Για παράδειγμα, τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου μπορούν να αντικαταστήσουν τα παραδοσιακά οχήματα που κινούνται με ορυκτά καύσιμα, εκπέμποντας μόνο υδρατμούς ως υποπροϊόν. Οι σταθερές κυψέλες καυσίμου μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας για τους χρήστες της βιομηχανίας. Η υιοθέτηση τεχνολογιών με βάση το υδρογόνο απαιτεί την ανάπτυξη οικονομικά αποδοτικών και αξιόπιστων συστημάτων κυψελών καυσίμου.
4. Ενθάρρυνση των επενδύσεων στην τεχνολογία υδρογόνου: Οι κυβερνήσεις και οι ιδιωτικοί οργανισμοί μπορούν να παρέχουν χρηματοδότηση και κίνητρα για να υποστηρίξουν την ανάπτυξη και την εξάπλωση της τεχνολογίας υδρογόνου στη βιομηχανία. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει χρηματοδότηση για έρευνα και ανάπτυξη, καθώς και φορολογικές εκπτώσεις και επιχορηγήσεις για την ανάπτυξη τεχνολογιών με βάση το υδρογόνο.
5. Θέσπιση προτύπων και κανονισμών: Για να διασφαλιστεί η ασφαλής και αποτελεσματική χρήση του υδρογόνου στη βιομηχανία, πρέπει να θεσπιστούν πρότυπα και κανονισμοί. Αυτό περιλαμβάνει πρότυπα για την παραγωγή, αποθήκευση, μεταφορά και χρήση υδρογόνου, καθώς και κανονισμούς για τον ασφαλή χειρισμό του υδρογόνου στη βιομηχανία. Η ανάπτυξη προτύπων και κανονισμών θα συμβάλει στη διασφάλιση της ασφαλούς και αποτελεσματικής ανάπτυξης της τεχνολογίας υδρογόνου και θα την καταστήσει πιο ελκυστική επιλογή για τους χρήστες του κλάδου.

5.4 Στόχοι και αλλαγές για ένα μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα στη βιομηχανία

Στόχοι Βιομηχανικών Μονάδων

Το υδρογόνο έχει αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική πηγή ενέργειας λόγω των δυνατοτήτων του να παρέχει καθαρή και ανανεώσιμη ενέργεια. Οι μεγάλες βιομηχανίες στοχεύουν στη χρήση μόνο υδρογόνου ως καυσίμου έως το 2035. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, οι μεγάλες βιομηχανίες έχουν θέσει διάφορους στόχους.

- Ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών κυψελών καυσίμου υδρογόνου

Ένας από τους κύριους στόχους των μεγάλων βιομηχανιών στη χρήση του υδρογόνου ως καυσίμου έως το 2035 είναι η ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών κυψελών καυσίμου υδρογόνου. Σύμφωνα με μια μελέτη των Huang, Henghui, κ.ά η απόδοση και η ανθεκτικότητα των κυψελών καυσίμου πρέπει να βελτιωθούν για εμπορευματοποίηση [28]. Για παράδειγμα, η απόδοση των κυψελών καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFCs) μπορεί να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας προηγμένα υλικά όπως μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων υψηλής θερμοκρασίας και καταλύτες με αυξημένη δραστηριότητα και σταθερότητα.

Ένας άλλος τρόπος για να βελτιωθεί η απόδοση των κυψελών καυσίμου είναι η ανάπτυξη διαδικασιών παραγωγής που μπορούν να αυξήσουν την κλίμακα και την απόδοση της παραγωγής κυψελών καυσίμου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη βελτίωση της ποιότητας και την τυποποίηση των εξαρτημάτων κυψελών καυσίμου, καθώς και με την ανάπτυξη νέων διαδικασιών παραγωγής που είναι πιο αποδοτικές και προσιτές.

- Επέκταση της υποδομής τροφοδοσίας υδρογόνου

Ένας άλλος στόχος των μεγάλων βιομηχανιών είναι η επέκταση της υποδομής τροφοδοσίας υδρογόνου, η οποία είναι κρίσιμη για την ευρεία υιοθέτηση οχημάτων κυψελών καυσίμου υδρογόνου, πλοίων και άλλων συστημάτων μεταφοράς, καθώς και για εφαρμογές σταθερής παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας.

Σύμφωνα με μια μελέτη των Shamsi, Hamidreza, κ.ά. η ανάπτυξη υποδομής τροφοδοσίας υδρογόνου είναι ένα κρίσιμο βήμα προς την εμπορευματοποίηση οχημάτων κυψελών καυσίμου [29]. Η μελέτη προτείνει ότι ο αριθμός των σταθμών

ανεφοδιασμού υδρογόνου πρέπει να αυξηθεί για να διασφαλιστεί ότι τα οχήματα έχουν πρόσβαση σε καύσιμο υδρογόνου σε όλη την εμβέλειά τους.

Για την επέκταση της υποδομής τροφοδοσίας υδρογόνου, μεγάλες βιομηχανίες επενδύουν στην κατασκευή σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου, αγωγών και εγκαταστάσεων αποθήκευσης. Αυτές οι εγκαταστάσεις θα είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική διανομή και αποθήκευση υδρογόνου, η οποία αποτελεί βασικό παράγοντα για την προώθηση της ευρείας υιοθέτησης των τεχνολογιών κυψελών καυσίμου υδρογόνου.

- Μείωση των αέριων ρύπων καθώς και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της χρήσης του υδρογόνου ως πηγής καυσίμου είναι ότι παράγει μόνο νερό ως υποπροϊόν, καθιστώντας το μια ελκυστική εναλλακτική λύση για εταιρείες και χώρες που θέλουν να μειώσουν το αποτύπωμα άνθρακα. Για να επιτευχθεί αυτό, μεγάλες βιομηχανίες εστιάζουν στην ανάπτυξη και την κλιμάκωση πρακτικών παραγωγής υδρογόνου, όπως η ηλεκτρόλυση του νερού που τροφοδοτείται από πηγές ανανεώσιμης ενέργειας.

Ωστόσο, η παραγωγή υδρογόνου μπορεί επίσης να προκαλέσει εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, αναλόγως την πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, οι μεγάλες βιομηχανίες επικεντρώνονται στην ανάπτυξη μεθόδων παραγωγής υδρογόνου με χαμηλές εκπομπές άνθρακα, όπως η χρήση τεχνολογιών δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS) για τη δέσμευση και αποθήκευση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από την παραγωγή υδρογόνου. Σύμφωνα με μια μελέτη των Yang, Yan, κ.ά. η ενσωμάτωση των τεχνολογιών CCS στην παραγωγή υδρογόνου μπορεί να μειώσει σημαντικά το αποτύπωμα άνθρακα της παραγωγής υδρογόνου [30].

- Ενσωμάτωση κυψελών καυσίμου υδρογόνου σε συστήματα μεταφοράς και αποθήκευσης ενέργειας

Ένας άλλος στόχος των μεγάλων βιομηχανιών είναι η ενσωμάτωση κυψελών καυσίμου υδρογόνου σε διάφορα συστήματα μεταφοράς και αποθήκευσης ενέργειας. Αυτό περιλαμβάνει τη χρήση κυψελών καυσίμου υδρογόνου σε οχήματα, πλοία και αεροσκάφη, καθώς και σε σταθερά συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, οι μεγάλες βιομηχανίες ελπίζουν να επωφεληθούν από την υψηλή

ενεργειακή πυκνότητα και την ευελιξία των κυψελών καυσίμου υδρογόνου και να προχωρήσουν προς ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό μείγμα. Σύμφωνα με μια μελέτη των Al-Mufachi, Naser A., και Nilay Shah η χρήση κυψελών καυσίμου υδρογόνου σε συστήματα μεταφοράς και αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα, στην προώθηση της ενεργειακής ασφάλειας και στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου [31]. Για να επιτευχθεί αυτή η ολοκλήρωση, οι μεγάλες βιομηχανίες εστιάζουν επίσης στην ανάπτυξη έξυπνων δικτύων με βάση το υδρογόνο, τα οποία μπορούν να βοηθήσουν στη βελτιστοποίηση της παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής υδρογόνου και άλλης ανανεώσιμης ενέργειας.

Αλλαγές στις εκπομπές άνθρακα με χρήση 100% υδρογόνου

Το υδρογόνο θεωρείται ευρέως ως σημαντικό συστατικό για τη μετάβαση σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα και την επίτευξη ουδετερότητας άνθρακα. Η δυνατότητα του υδρογόνου να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην επίτευξη ουδετερότητας άνθρακα είναι σημαντική και πολλές βιομηχανίες διερευνούν τη χρήση του σε διάφορους τομείς. Μια μελέτη από τους “Radley-Gardner, Oliver” διαπίστωσε ότι το υδρογόνο θα μπορούσε να διαδραματίσει βασικό ρόλο στην απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές του βιομηχανικού τομέα [32]. Η μελέτη επικεντρώθηκε στους βιομηχανικούς τομείς των Ηνωμένων Πολιτειών, της Ευρώπης και της Κίνας και ανέλυσε τη δυνατότητα του υδρογόνου να αντικαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα σε βασικές βιομηχανικές εφαρμογές. Η μελέτη διαπίστωσε ότι εάν οι βιομηχανικοί τομείς αυτών των τριών περιοχών στραφούν στο υδρογόνο ως καύσιμο, αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση κατά 1,7 Gt εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ετησίως έως το 2050. Αυτό αντιπροσωπεύει μείωση περίπου 20% στην παγκόσμια εκπομπή άνθρακα του βιομηχανικού τομέα. Η μελέτη επισημαίνει ότι το δυναμικό υδρογόνου στον βιομηχανικό τομέα είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε τομείς που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από ορυκτά καύσιμα, όπως το τσιμέντο, ο χάλυβας και η χημική παραγωγή. Η μελέτη διαπίστωσε επίσης ότι η χρήση υδρογόνου στην παραγωγή ενέργειας θα μπορούσε επίσης να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Μια άλλη μελέτη, των Lan, Bingying, κ.ά. εξέτασε συγκεκριμένα τη δυνατότητα του υδρογόνου να βοηθήσει στην απανθρακοποίηση της βιομηχανίας χάλυβα [33]. Η μελέτη διαπίστωσε ότι εάν η βιομηχανία χάλυβα μεταβεί σε διεργασίες με βάση το

υδρογόνο, θα μπορούσε να επιτύχει μείωση έως και 90% στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Η μελέτη επισημαίνει ότι η βιομηχανία χάλυβα είναι ένας από τους μεγαλύτερους βιομηχανικούς εκπομπούς αερίων του θερμοκηπίου και ότι η απαλλαγή από τον άνθρακα αυτού του τομέα είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη των παγκόσμιων στόχων μείωσης των εκπομπών.

Η χρήση του υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών είναι επίσης ένας τομέας σημαντικού ενδιαφέροντος. Μια μελέτη των Cui, Shaoqi, κ.ά. διαπίστωσε ότι η χρήση υδρογόνου σε οχήματα κυψελών καυσίμου θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντικές μειώσεις στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου [34].

Η μελέτη σημειώνει ότι τα οχήματα κυψελών καυσίμου μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά 90% σε σύγκριση με τα βενζινοκίνητα οχήματα και ότι η χρήση ανανεώσιμου υδρογόνου θα μπορούσε να ενισχύσει περαιτέρω το δυναμικό μείωσης των εκπομπών αυτών των οχημάτων. Η δυνατότητα του υδρογόνου να μετριάσει τα αέρια του θερμοκηπίου που εκπέμπονται και να επιτύχει ουδετερότητα του άνθρακα οδηγεί σε σημαντικές επενδύσεις και έρευνα σε αυτόν τον τομέα. Ωστόσο, υπάρχουν επίσης σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν, ιδίως σχετικά με το κόστος και τη διαθεσιμότητα του ανανεώσιμου υδρογόνου, καθώς και την ανάπτυξη υποδομής για την υποστήριξη της παραγωγής και χρήσης υδρογόνου. Μια πιθανή λύση για την αντιμετώπιση του κόστους και της διαθεσιμότητας του ανανεώσιμου υδρογόνου είναι η παραγωγή του χρησιμοποιώντας περίσσεια ανανεώσιμης ενέργειας. Μια μελέτη των Millinger, Markus, κ.ά. εξέτασε τη δυνατότητα χρήσης περίσσειας ανανεώσιμης ενέργειας για την παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης [35]. Η μελέτη διαπίστωσε ότι αυτή η προσέγγιση θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά το κόστος παραγωγής ανανεώσιμου υδρογόνου και θα μπορούσε να βοηθήσει στην αντιμετώπιση ορισμένων από τις προκλήσεις που σχετίζονται με την κλιμάκωση της παραγωγής ανανεώσιμου υδρογόνου.

Συμπερασματικά, η δυνατότητα του υδρογόνου να μπορέσει να μετριάσει τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου και να επιτύχει την ουδετερότητα του άνθρακα είναι σημαντική. Η χρήση υδρογόνου σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς και στον τομέα των μεταφορών, θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντικές μειώσεις των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ενώ υπάρχουν σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν, η υπόσχεση του υδρογόνου ως καθαρής και ευέλικτης πηγής ενέργειας οδηγεί σε σημαντικές επενδύσεις και έρευνα σε αυτόν τον τομέα. Ως εκ

τούτου, είναι πιθανό η χρήση του υδρογόνου να συνεχίσει να παίζει βασικό ρόλο στη μετάβαση σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα και στην επίτευξη ουδετερότητας άνθρακα.

5.5 Ο ρόλος της Ελλάδος στην απανθρακοποίηση του ενεργειακού της μίγματος

Πέντε ελληνικές προτάσεις έργων παραγωγής υδρογόνου έχουν συμπεριληφθεί στον κατάλογο που υπέβαλε η κυβέρνηση στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή για συμπερίληψη στην κατηγορία «Σημαντικά Έργα Κοινού Ευρωπαϊκού Ενδιαφέροντος (IPCEI)».

Τα πέντε αυτά έργα περιλαμβάνουν:

- White Dragon – ένα έργο πράσινου υδρογόνου που θα υποστηρίξει τη σταδιακή κατάργηση 2,1 GW χρήσης λιγνίτη έως το 2029. Το έργο των 250.000 τόνων H₂/έτος στοχεύει στη χρήση μεγάλης κλίμακας ηλιακής δυναμικότητας για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου με ηλεκτρόλυση στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας με χρήση για θέρμανση και ηλεκτρισμό, με γενικό στόχο την αντικατάσταση λιγνιτικών μονάδων.
- Blue Med – ένα έργο αφιερωμένο στην παραγωγή μπλε και πράσινου υδρογόνου που θα ξεκινήσει το 2025.
- Green H2Po – Ένα έργο της εταιρίας Advent Technologies Holdings με έδρα τις ΗΠΑ για την κατασκευή μονάδας παραγωγής καινοτόμων ηλεκτρολυτών και κυψελών καυσίμου στη Δυτική Μακεδονία.
- H2CAT TANKS – Έργο κατασκευής αποθήκευσης υδρογόνου, ειδικά για τον τομέα των μεταφορών.
- H2CEM – TITAN – Έργο παραγωγής, αποθήκευσης και χρήσης πράσινου υδρογόνου για καύση και παραγωγή ενέργειας σε καμίνοους με στόχο την απανθρακοποίηση των εργοστασίων τσιμέντου της ελληνικής εταιρείας TITAN.

Τα πέντε αυτά έργα πρόκειται να ενισχύσουν την ενεργειακή στρατηγική της Ελλάδας καθώς και την παραγωγική της ικανότητα έως το 2028 και το υδρογόνο αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην περαιτέρω απελευθέρωση του ελληνικού ενεργειακού μείγματος καθώς και να τονώσει την ενεργειακή μετάβαση της χώρας. Η Ελλάδα θα μπορεί να παράγει έως και 500 MW μπλε υδρογόνο έως το 2030, ενώ η

δημιουργία δείκτη υδρογόνου πρόκειται να προσελκύσει το ενδιαφέρον των συναλλαγών.[36]

Τα δύο έργα (green hipo και white dragon) θα αντικαταστήσουν τις μεγαλύτερες μονάδες καύσης άνθρακα της Ελλάδας με πάρκα ηλιακής ενέργειας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που θα υποστηρίζονται από παραγωγή πράσινου υδρογόνου 4,65 GW και παραγωγή θερμότητας και ενέργειας κυψελών καυσίμου 400 MW.

Το έργο White Dragon θα χρησιμοποιήσει μεγάλης κλίμακας ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης στη Δυτική Μακεδονία για την απανθρακοποίηση του ενεργειακού συστήματος της Ελλάδας. Η Advent έχει στην κατοχή της τις κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων υψηλής θερμοκρασίας (HT-PEM) που θα προμηθεύσουν όλη την Ελλάδα με καθαρό ηλεκτρισμό και θερμότητα. Η θερμότητα που θα παράγεται από το έργο θα χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με τα δίκτυα τηλεθέρμανσης της Δυτικής Μακεδονίας και στο μέλλον θα επεκταθεί και σε άλλες εφαρμογές που απαιτούν συστήματα θέρμανσης και ψύξης, όπως κέντρα δεδομένων βιομηχανικών εργασιών και θερμοκήπια. Το έργο αυτό επίσης, στοχεύει στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου βιομηχανικού ερευνητικού κέντρου υδρογόνου εντός του κέντρου υψηλής τεχνολογίας, έρευνας, ανάπτυξης και καινοτομίας υδρογόνου που αναμένεται να ιδρυθεί στη Δυτική Μακεδονία.

Εν τω μεταξύ, το έργο Green HiPo επικεντρώνεται στην ανάπτυξη, το σχεδιασμό και την κατασκευή κυψελών καυσίμου HT-PEM για παραγωγή θερμότητας και ενέργειας. Το έργο θα εδρεύει στη Δυτική Μακεδονία και θα βοηθήσει τη μετάβαση της περιοχής από μια οικονομία με βάση τον άνθρακα σε ένα πιο πράσινο οικονομικό μοντέλο. Το HiPO συμπληρώνει το White Dragon και, εάν και τα δύο εγκριθούν πλήρως, θα παράγει τις κυψέλες καυσίμου που θα τροφοδοτήσουν το σχέδιο πράσινης ενέργειας του White Dragon.

Σύμφωνα με την Advent, μια νέα μονάδα παραγωγής κυψελών καυσίμου HT-PEM θα συμβάλει στην οικονομική ανάπτυξη της Δυτικής Μακεδονίας παρέχοντας περίπου 1.400 θέσεις εργασίας σε καινοτόμο βιώσιμη τεχνολογία. Η εγκατάσταση θα κατασκευάζει αρχικά κυψέλες καυσίμου 15 kW ανά μονάδα, φθάνοντας σταδιακά τα 120 kW, και στη συνέχεια μεμονωμένες μονάδες κλίμακας 1 MW πριν γίνει πλατφόρμα πολλαπλών MW.[37]

5.5.1 Το πρόγραμμα H2CEM για την απανθρακοποίηση της Titan Group

Η τσιμεντοβιομηχανία ευθύνεται για το 5% περίπου των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ως αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία, οι εκπομπές του ομίλου TITAN το 2020 ήταν 674 kgCO₂/t τσιμεντοειδούς προϊόντος. Οι στόχοι μείωσης τους αγγίζουν τα 590 kgCO₂/t έως το 2025 με περαιτέρω μείωσή τους σε 500 kgCO₂/t το 2030 μέχρι το τελικό στάδιο της ουδετερότητας άνθρακα σε ποσοστό 95,6% το 2050.[38]

Το έργο H2CEM του Ομίλου TITAN σχετικά με την παραγωγή και χρήση πράσινου υδρογόνου για την παραγωγή τσιμέντου, περιλαμβάνεται στο δεύτερο Σημαντικό Έργο Κοινού Ευρωπαϊκού Ενδιαφέροντος (IPCEI «Hy2Use») και είναι το μοναδικό ελληνικό έργο που έχει εγκριθεί για κρατική ενίσχυση από το IPCEI Hy2Use, μετά από αυστηρή αξιολόγηση από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, για δραστηριότητες που σχετίζονται με την έρευνα και την καινοτομία, την πρώτη βιομηχανική ανάπτυξη και την κατασκευή σχετικής υποδομής στην αλυσίδα αξίας υδρογόνου.

Με στόχο την ενίσχυση της υποκατάστασης των ορυκτών καυσίμων με πράσινο υδρογόνο και άλλα καύσιμα βιώσιμης προέλευσης, το H2CEM περιλαμβάνει την παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης, που τροφοδοτείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, στα εργοστάσια τσιμέντου TITAN στην Ελλάδα (Καμάρι Βοιωτίας, Δρέπανο Αχαΐας και Ευκαρπία Θεσσαλονίκης). Η βιομηχανική ανάπτυξη πράσινου υδρογόνου σε αυτές τις μονάδες, θα οδηγήσει σε μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 160.000 τόνους/έτος (τουλάχιστον 8% ανά τόνο προϊόντος).

Επιπλέον, το H2CEM περιλαμβάνει την κατασκευή και λειτουργία ενός περιστροφικού κλιβάνου πιλοτικής κλίμακας, ο οποίος έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί χρησιμοποιώντας υδρογόνο ως κύριο καύσιμο για την παραγωγή τσιμέντου. Λαμβάνοντας υπόψη τις σημαντικές τεχνικές προκλήσεις που αντιμετωπίζονται κατά τη μετάβαση στο πράσινο υδρογόνο ως κλιματικά ουδέτερο καύσιμο για τη βιομηχανία τσιμέντου, οι δραστηριότητες έρευνας και ανάπτυξης του H2CEM θα οδηγήσουν σε μια βαθύτερη κατανόηση των φαινομένων καύσης υδρογόνου. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τον σχεδιασμό και τη λειτουργία των εγκαταστάσεων παραγωγής τσιμέντου στο μέλλον. Με αυτή την έννοια, το H2CEM θεωρείται κρίσιμο βήμα στην πορεία της ευρωπαϊκής βιομηχανίας τσιμέντου προς την απεξάρτηση από τον άνθρακα.

Το H2CEM, συνολικού προϋπολογισμού 60 εκατομμυρίων ευρώ, είναι αυτή τη στιγμή το μοναδικό έργο στο δεύτερο IPCEI που αφορά τη χρήση υδρογόνου ως κλιματικά ουδέτερου καυσίμου για την παραγωγή τσιμέντου. Σημαντική πτυχή του έργου είναι η δημιουργία ενός δικτύου μεταξύ ερευνητικών και ακαδημαϊκών φορέων στην Ελλάδα και την Ευρώπη, καθώς και παρόχων τεχνολογίας πράσινου υδρογόνου και ΑΠΕ. Η υλοποίηση του έργου θα έχει επίσης ως αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων ευκαιριών εργασίας υψηλής εξειδίκευσης, εκτός από τη διάδοση στην ελληνική και ευρωπαϊκή βιομηχανία τσιμέντου, σε κοινωνικούς και άλλους ενδιαφερόμενους φορείς.

Το H2CEM αποτελεί μέρος των δραστηριοτήτων του TITAN για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής βελτιώνοντας το αποτύπωμα άνθρακα της παραγωγής τσιμέντου, συμβάλλοντας στον ευρωπαϊκό στόχο για μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά 55% έως το 2030 και ουδετερότητα άνθρακα έως το 2050.[39]

5.6 Χρήση πράσινου υδρογόνου στις Ευρωπαϊκές βιομηχανίες χάλυβα

Ο χάλυβας είναι ένας από τους βασικούς πυλώνες της σημερινής κοινωνίας και, ως ένα από τα πιο σημαντικά υλικά στον τομέα των κατασκευών, είναι παρών σε πολλές πτυχές της ζωής μας. Ωστόσο, ο κλάδος της παραγωγής του, χρειάζεται πλέον να αντιμετωπίσει την πίεση για μείωση του αποτυπώματος άνθρακα τόσο από περιβαλλοντική όσο και από οικονομική άποψη. Επί του παρόντος, η βιομηχανία χάλυβα είναι μεταξύ των τριών μεγαλύτερων παραγωγών διοξειδίου του άνθρακα. Οι χαλυβουργικές μονάδες είναι επομένως ύψιστης σημασίας όσων αφορά την απανθρακοποίηση.

Το 2018 κάθε τόνος χάλυβα που παρήχθη, κατά μέσο όρο είχε εκπομπές 1,85 τόνους διοξειδίου του άνθρακα, τιμή που ισοδυναμεί με περίπου το 8% των παγκόσμιων εκπομπών. [40]

Κατά συνέπεια, οι εταιρείες χάλυβα σε όλο τον κόσμο, και ειδικά στην Ευρώπη, αντιμετωπίζουν ολοένα και περισσότερες προκλήσεις για απαλλαγή από τον άνθρακα. Αυτές οι προκλήσεις καθοδηγούνται από τρεις βασικούς παράγοντες:

1. *Μεταβαλλόμενες απαιτήσεις πελατών και αυξανόμενη ζήτηση για προϊόντα χάλυβα ουδέτερα από άνθρακα.* Μια τάση που έχει ήδη παρατηρηθεί σε διάφορους κλάδους, συμπεριλαμβανομένης της αυτοκινητοβιομηχανίας όπου κατασκευαστές όπως η Volkswagen ή η Toyota έχουν τον φιλόδοξο στόχο να

εξαλείφουν πλήρως τις εκπομπές άνθρακα από το σύνολο των αλυσίδων αξίας τους (συμπεριλαμβανομένων των προμηθευτών τους) και να υιοθετήσουν μια προοπτική πλήρους κύκλου ζωής.

2. *Περαιτέρω αυστηροποίηση των κανονισμών για τις εκπομπές άνθρακα.* Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τους στόχους μείωσης του διοξειδίου του άνθρακα, καθώς και την αύξηση των τιμών των κυρώσεων για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, όπως περιγράφεται στην Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία.
3. *Αυξανόμενο ενδιαφέρον των επενδυτών και του κοινού για τη βιωσιμότητα.* Για παράδειγμα, η Ομάδα Θεσμικών Επενδυτών για την Κλιματική Αλλαγή, ένα παγκόσμιο δίκτυο με 250 και πλέον επενδυτές και πάνω από 30 τρισεκατομμύρια δολάρια υπό διαχείριση περιουσιακών στοιχείων, έχει αυξήσει τις προσδοκίες της χαλβουργίας να διαφυλάξει το μέλλον της ενόψει της κλιματικής αλλαγής.

Πρόσφατες μελέτες εκτιμούν ότι περίπου το 14% της δυνητικής αξίας των χαλβουργικών εταιρειών παγκοσμίως κινδυνεύει εάν αυτές δεν είναι σε θέση να μειώσουν τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις. Κατά συνέπεια, η απαλλαγή από τον άνθρακα θα πρέπει να αποτελεί κορυφαία προτεραιότητά τους για να παραμείνουν οικονομικά ανταγωνιστικές και να διατηρηθεί η άδεια του κλάδου προκειμένου να συνεχίσει να λειτουργεί.

Ως συνέπεια, μέτρα απανθρακοποίησης, όπως η καθιέρωση ή η μετάβαση σε παραγωγή χάλυβα με βάση το υδρογόνο μπορούν να εφαρμοστούν είτε σε προσεχείς (greenfield) εγκαταστάσεις είτε σε υφιστάμενες (brownfield) εγκαταστάσεις. Η τελευταία περίπτωση απαιτεί είτε να μετασκευαστεί ο υπάρχων εξοπλισμός είτε να ανακατασκευαστεί πλήρως η εγκατάσταση προκειμένου να εφαρμοστεί μια διαδικασία παραγωγής χωρίς εκπομπές άνθρακα. Τα βέλτιστα βήματα για την απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές θα διαφέρουν ανά τοποθεσία, ανάλογα με την τεχνική σκοπιμότητα, την υπάρχουσα υποδομή, τις απαιτήσεις της αγοράς, το λειτουργικό κόστος (δηλαδή την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, την τιμή του σκραπ) και το ρυθμιστικό περιβάλλον.

Στο μέλλον, οι παραγωγοί χάλυβα πρέπει να αξιολογήσουν, και να αποφασίσουν έναν τεχνολογικά και οικονομικά βιώσιμο τρόπο για να μειώσουν το ανθρακούχο αποτύπωμά τους.

Ο χάλυβας ωστόσο μπορεί να παραχθεί μέσω δύο κύριων διαδικασιών: είτε με χρήση συμβατικής υψικάμινου (BF) ή αλλιώς υψικάμινου οξυγόνου (BOF) είτε με κλίβανο ηλεκτρικού τόξου (EAF). Ενώ η πρώτη διαδικασία μπορεί να παράξει χάλυβα από σιδηρομετάλλευμα και χρειάζεται άνθρακα ως αναγωγικό μέσο, η δεύτερη διαδικασία χρησιμοποιεί ανακυκλωμένο χάλυβα (σκραπ) ή άμεσο ανηγμένο σίδηρο (DRI) ως κύρια πρώτη ύλη. Καθώς η κυρίαρχη μέθοδος παραγωγής στην Ευρώπη είναι η συμβατική, εξαρτώμενη από τον άνθρακα, διαδικασία BF/BOF, η ανάγκη αξιολόγησης εναλλακτικών πρωτοποριακών τεχνολογιών για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα είναι υψηλή. Πράγματι, σχεδόν όλοι οι ευρωπαίοι παραγωγοί χάλυβα αναπτύσσουν επί του παρόντος στρατηγικές απαλλαγής από τον άνθρακα και λειτουργούν πιλοτικά έργα για την αξιολόγηση διαφορετικών τεχνολογιών παραγωγής. Ένα από αυτά τα έργα είναι η λειτουργία EAF και η παραγωγή DRI με χρήση υδρογόνου. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί α) τον άμεσο ανηγμένο σίδηρο (DRI) ο οποίος παρήχθει με βάση το πράσινο υδρογόνο και β) σκραπ, σε συνδυασμό με τον κλίβανο ηλεκτρικού τόξου (EAF). Η διαδικασία αυτή αντικαθιστά τα ορυκτά καύσιμα στο στάδιο παραγωγής DRI, με υδρογόνο που παράγεται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αντιπροσωπεύει μια τεχνικά αποδεδειγμένη μέθοδο παραγωγής που επιτρέπει την παραγωγή χάλυβα σχεδόν χωρίς εκπομπές. Όλοι οι μεγάλοι ευρωπαίοι παραγωγοί χάλυβα κατασκευάζουν επί του παρόντος ή ήδη δοκιμάζουν διαδικασίες παραγωγής χάλυβα με βάση το υδρογόνο, είτε χρησιμοποιώντας υδρογόνο σε αντικατάσταση της έγχυσης κονιοποιημένου άνθρακα (PCI) είτε χρησιμοποιώντας άμεση αναγωγή με βάση το υδρογόνο.

Καθώς τα προγράμματα βελτίωσης BF/BOF έχουν ως αποτέλεσμα μόνο μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, χωρίς να μπορούν να τις εξαλείψουν εντελώς, δεν μπορούν να αποτελέσουν μακροπρόθεσμη λύση. Για παράδειγμα, η χρήση βιομάζας και η δέσμευση και χρήση άνθρακα είναι εφικτά μόνο σε ορισμένες περιοχές είτε βρίσκονται ακόμη στα αρχικά στάδια ανάπτυξης. Το πλήθος των κλιβάνων ηλεκτρικού τόξου (EAF) που παράγουν χάλυβα υψηλής ποιότητας θα αυξηθεί, αλλά απαιτεί τη διαθεσιμότητα σκραπ και άμεσου ανηγμένου σιδήρου (DRI). Ως εκ τούτου, η υιοθέτηση μιας προσέγγισης που συνδυάζει σκραπ, DRI και EAF με χρήση υδρογόνου θεωρείται επί του παρόντος η πιο βιώσιμη επιλογή και η μακροπρόθεσμη λύση για την επίτευξη παραγωγής χάλυβα ουδέτερου άνθρακα, ειδικά στην Ευρώπη.

Αν και το υδρογόνο είναι ένα από τα πιο άφθονα στοιχεία στη γη, στην καθαρή του μορφή είναι σπάνιο. Η εξαγωγή υδρογόνου από τις ενώσεις του απαιτεί πολλή ενέργεια. Αν και αυτές οι πηγές ενέργειας μπορεί να είναι διαφορετικές, η πιο δημοφιλής μέθοδος παραγωγής υδρογόνου εκπέμπει και αυτή αρκετό διοξείδιο του άνθρακα. Το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου αποτελείται από «γκρίζο υδρογόνο», που παράγεται μέσω αναμόρφωσης μεθανίου ατμού (SMR), το οποίο σχηματίζει τόσο υδρογόνο όσο και διοξείδιο του άνθρακα. Αντίθετα, ο όρος «μπλε υδρογόνο» προορίζεται για παραγωγή υδρογόνου που περιλαμβάνει δέσμευση και χρήση άνθρακα ή αποθήκευση εκπεμπόμενου διοξειδίου του άνθρακα. Επιπλέον, η ηλεκτρόλυση του νερού μέσω ηλεκτρισμού είναι μια ακόμη διαδικασία για την παραγωγή υδρογόνου και είναι η μόνη τεχνική, ουδέτερη από άνθρακα (με την προϋπόθεση ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας). Αυτό είναι γνωστό ως «πράσινο υδρογόνο».

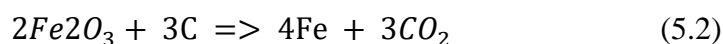
Υπάρχουν γενικά δύο τρόποι χρήσης πράσινου υδρογόνου στην παραγωγή χάλυβα. Πρώτον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτικό υλικό έγχυσης σε σχέση με το PCI, για τη βελτίωση της απόδοσης των συμβατικών υψικαμίνων. Αν και η χρήση του PCI είναι συνηθισμένη, οι πρώτες πιλοτικές μονάδες που χρησιμοποιούν έγχυση υδρογόνου έχουν πρόσφατα δημιουργηθεί για την αξιολόγηση του δυναμικού απανθρακοποίησης. Ωστόσο, ενώ η έγχυση (πράσινου) υδρογόνου σε υψικαμίνους μπορεί να μειώσει τις εκπομπές άνθρακα έως και 20%, αυτό δεν προσφέρει παραγωγή χάλυβα ουδέτερη από άνθρακα, επειδή ο κονιοποιημένος άνθρακας που εγχύεται εξακολουθεί να είναι απαραίτητος αναγωγικός παράγοντας στην υψικάμινο.

Δεύτερον, το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτικό αναγωγικό για την παραγωγή άμεσου ανηγμένου σιδήρου που μπορεί να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία προκειμένου να μετατραπεί σε χάλυβα, χρησιμοποιώντας έναν κλίβανο ηλεκτρικού τόξου. Αυτή η μέθοδος (DRI/EAF) είναι μια δοκιμασμένη διαδικασία παραγωγής που εφαρμόζεται επί του παρόντος χρησιμοποιώντας φυσικό αέριο ως αναγωγικό, για παράδειγμα από βιομηχανίες στη Μέση Ανατολή με πρόσβαση σε φθηνή παροχή φυσικού αερίου. Ωστόσο, η διαδικασία άμεσης αναγωγής μπορεί να πραγματοποιηθεί και με υδρογόνο.

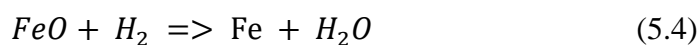
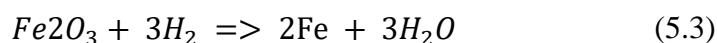
Πιο αναλυτικά, μια μεγάλης κλίμακας διαδικασία παραγωγής χάλυβα μεθόδου DRI/EAF με βάση το πράσινο υδρογόνο περιλαμβάνει τα ακόλουθα βασικά βήματα της διαδικασίας:

Παραγωγή πράσινου υδρογόνου. Το πράσινο υδρογόνο παράγεται με ηλεκτρόλυση νερού σε μια διαδικασία που απαιτεί σημαντικές ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας. Η απόκτηση επαρκούς ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι η βασική πρόκληση για την πράσινη παραγωγή υδρογόνου στην Ευρώπη.

Παραγωγή DRI. Η άμεση αναγωγή του σιδήρου είναι η χημική αφαίρεση του οξυγόνου από το σιδηρομετάλλευμα στη στερεά του μορφή. Το σιδηρομετάλλευμα, μέσω της χρήσης συμβατικών καυσίμων όπως το φυσικό αέριο ή ο άνθρακας επί του παρόντος, μετατρέπεται με χημικό τρόπο σε σίδηρο ο οποίος χρησιμοποιείται στη διαδικασία παραγωγής χάλυβα. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως άμεση ανηγμένη παραγωγή σιδήρου (DRI).[41] Σε αυτήν την διαδικασία, ο άνθρακας ενώνεται με το οξυγόνο του σιδηρομεταλλεύματος, παράγοντας μεταλλικό σίδηρο και ένα εκλυόμενο αέριο πλούσιο σε άνθρακα, σύμφωνα με την Εξίσωση (5.2):



Ένας άλλος τρόπος για την αναγωγή του σιδηρομεταλλεύματος είναι η χρήση υδρογόνου αντί για άνθρακα. Στην περίπτωση αυτή τα εκλυόμενα αέρια που παράγονται είναι μόνο νερό, σύμφωνα με τις Εξισώσεις (5.3) και (5.4):



Παραγωγή ακατέργαστου χάλυβα με χρήση EAF. Οι κλίβανοι ηλεκτρικού τόξου ουσιαστικά λιώνουν τα υλικά εισόδου για περαιτέρω επεξεργασία και εκτελούν βασικές μεταλλουργικές εργασίες. Όπως υποδηλώνει το όνομα, η διαδικασία τήξης επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια για τη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου στον κλίβανο. Μόλις τροφοδοτηθεί ο κλίβανος, κλείνει η θύρα εισόδου και τα τρία ηλεκτρόδια γραφίτη, πάχους περίπου 70 cm το καθένα, αρχίζουν να κατεβαίνουν. Έπειτα με την έναυση της διαδικασίας, περίπου 80.000 amp ρεύματος ρέουν μέσω αυτών των ηλεκτροδίων προκειμένου να σχηματιστεί ένα ηλεκτρικό τόξο. Υποστηριζόμενο από καυστήρες στον κλίβανο, και με θερμοκρασία άνω των

3.000 °C, το ηλεκτρικό τόξο θερμαίνει και λιώνει τα υλικά του κλιβάνου σε περίπου 48 έως 50 λεπτά. Μόλις αυτά τα στοιχεία λιώσουν, η σκωρία αφαιρείται, ο χάλυβας αποσπάται και ο θερμός πλέον κλίβανος τροφοδοτείται ξανά.

5.6.1 Έργα μηδενικού αποτυπώματος άνθρακα στις βιομηχανίες χάλυβα

Το πρόγραμμα GreenTec Steel

Η Voestalpine Stahl GmbH, ο μοναδικός παραγωγός ακατέργαστου χάλυβα της Αυστρίας και παγκόσμιος πρωτοπόρος στην προστασία του περιβάλλοντος, έχει εκπονήσει ένα φιλόδοξο σταδιακό σχέδιο για την παραγωγή πράσινου χάλυβα που ονομάζεται «greentec steel».

Σε ένα πρώτο βήμα, αρχής γενομένης από το 2027, η υπάρχουσα δομή και λειτουργία των συμβατικών υψικαμίνων θα αντικατασταθεί εν μέρει από ένα πλάνο «υβριδικού χάλυβα» και στη συνέχεια η χρήση πράσινου υδρογόνου στη διαδικασία παραγωγής χάλυβα θα αυξηθεί διαδοχικά για να καταστεί δυνατή η παραγωγή χάλυβα ουδέτερου CO₂ έως το 2050.

Στις αρχές του 2027, ένας κλίβανος ηλεκτρικού τόξου θα τεθεί σε λειτουργία στις περιοχές Linz και Donawitz με σκοπό εν συνεχεία γίνει πλήρης εναλλαγή των συμβατικών υψικαμίνων. Ως αποτέλεσμα αυτής της μετατροπής τεχνολογίας, οι εκπομπές CO₂ μπορούν ήδη να μειωθούν σημαντικά κατά περίπου 30%. Αυτό αντιστοιχεί σε εξοικονόμηση σχεδόν 4 εκατομμυρίων τόνων CO₂ ετησίως, δηλαδή σχεδόν του 5% των συνολικών ετήσιων εκπομπών CO₂ της Αυστρίας, καθιστώντας το “greentec steel” το μεγαλύτερο πρόγραμμα προστασίας του κλίματος της χώρας. Η ακριβής έναρξη της εφαρμογής εξαρτάται από την αποσαφήνιση ανεπίλυτων μέχρι στιγμής ζητημάτων χρηματοδότησης στην Αυστρία.[42]

H2 Future

Το πρόγραμμα H2FUTURE στις εγκαταστάσεις της Voestalpine στο Linz είναι αφιερωμένο στην παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης. Το κεφαλαιουχικό κόστος του συγκεκριμένου προγράμματος ήταν 18 εκατ. ευρώ, εκ των οποίων τα 12 εκατ. ευρώ χρηματοδοτήθηκαν από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Η συγκεκριμένη μονάδα είναι από τις μεγαλύτερες εν ενεργεία πιλοτικές μονάδες παραγωγής υδρογόνου μηδενικού αποτυπώματος άνθρακα καθώς οι απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτονται από 100% ανανεώσιμες πηγές. Στο εσωτερικό της

η ηλεκτρόλυση γίνεται μέσω μεμβρανών ανταλλαγής πρωτονίων οι οποίες έχουν απαίτηση ισχύος 6 MW. Η δυναμικότητα της μονάδας με βάση τα παραπάνω είναι η παραγωγή 1.200 m³ υδρογόνου ανά ώρα, ή εναλλακτικά περίπου 100 kg. Από το 2019, χρησιμοποιείται για να ελεγχθεί εάν η τεχνολογία είναι κατάλληλη για χρήση σε βιομηχανική κλίμακα. Μέχρι σήμερα η εγκατάσταση έχει παράγει πάνω από 500 τόνους πράσινου υδρογόνου, ποσότητα επαρκή για την παραγωγή 8.800 τόνων πράσινου χάλυβα.

Από την έναρξη της δοκιμαστικής φάσης, η εγκατάσταση αυτή όχι μόνο έχει παράγει αρκετές εκατοντάδες τόνους πράσινου υδρογόνου, αλλά έχει επίσης υποβληθεί σε μια ποικιλία διαφορετικών προγραμμάτων δοκιμών. Μια δοκιμή αντοχής επιβεβαίωσε τη ικανότητα της εγκατάστασης σε μόνιμη λειτουργία και την ικανότητά της να ανταποκρίνεται γρήγορα σε τεράστιες αλλαγές φορτίου. Μια συγκεκριμένη σειρά σεναρίων προσομοίωσε την εξισορρόπηση των διακυμάνσεων συχνότητας εντός του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας που προκύπτουν είτε από τη διαφορετική διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είτε από αλλαγές στις απαιτήσεις ισχύος.

Μακροπρόθεσμα, η Voestalpine σχεδιάζει να αυξήσει σταδιακά τη χρήση πράσινου υδρογόνου, για να επιτύχει την παραγωγή χάλυβα ουδέτερου άνθρακα έως το 2050. Ωστόσο, αυτό θα απαιτήσει περισσότερο από 400 φορές αύξηση της χωρητικότητας της εγκατάστασης H2FUTURE, καθώς και τεράστιες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας που παράγονται από ανανεώσιμες πηγές.[43]

SuSteel

Το SuSteel σημαίνει βιώσιμη παραγωγή χάλυβα και είναι και αυτό ένα ακόμα πρόγραμμα της βιομηχανίας χάλυβα Voestalpine για μείωση των εκπομπών της . Η διαδικασία είναι βιώσιμη επειδή επιτρέπει την παραγωγή ακατέργαστου χάλυβα χωρίς εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα, σε ένα μόνο βήμα της συνολικής τρέχουσας διαδικασίας. Το πλάσμα υδρογόνου διαχωρίζει το σίδηρο στο μέταλλευμα από το οξυγόνο που το συνοδεύει (αναγωγή) και το λιώνει για περαιτέρω χρήση. Αυτός είναι και ο λόγος όπου αυτή η διαδικασία ονομάζεται αναγωγή τήξης πλάσματος υδρογόνου. Εάν το πρόγραμμα SuSteel αναπτυχθεί επαρκώς ώστε να γίνει οικονομικά εφικτό, ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA) υπολογίζει ότι αυτή και παρόμοιες τεχνολογίες θα συμβάλουν σημαντικά στη μείωση των εκπομπών, επειδή το υποπροϊόν αυτής της διαδικασίας δεν είναι το διοξείδιο του άνθρακα αλλά το νερό.

Hamburg H2

Η βιομηχανία χάλυβα ArcelorMittal στο Αμβούργο της Γερμανίας είναι ήδη μια από τις πιο ενεργειακά αποδοτικές βιομηχανίες χάλυβα της Ευρώπης, που χρησιμοποιεί φυσικό αέριο για την παραγωγή DRI από το σιδηρομετάλλευμα, το οποίο στη συνέχεια τροφοδοτείται σε ένα κλίβανο ηλεκτρικού τόξου μαζί με σκραπ.

Το έργο Hamburg H2, αξίας 110 εκατομμυρίων ευρώ, έχει σχεδιαστεί για να δοκιμάσει την ικανότητα αντικατάστασης της χρήσης φυσικού αερίου με υδρογόνο για την αναγωγή του σιδηρομεταλλεύματος και τη δημιουργία DRI σε βιομηχανική κλίμακα, καθώς και στη συνέχεια δοκιμή του τρόπου με τον οποίο αντιδρά αυτό το προϊόν χωρίς άνθρακα σε έναν EAF.

Η διαδικασία αναγωγής του σιδηρομεταλλεύματος με υδρογόνο θα δοκιμαστεί πρώτα με τη χρήση γκρι υδρογόνου που παράγεται από τη δέσμευση των καυσαερίων στο εργοστάσιο χάλυβα. Σκοπός είναι το έργο αυτό να τεθεί σε λειτουργία πριν από το τέλος του 2025, παράγοντας αρχικά ετήσιο όγκο 100.000 τόνων DRI.

Στο μέλλον, αναμένεται ότι το εργοστάσιο θα λειτουργεί με πράσινο υδρογόνο όταν είναι διαθέσιμο σε επαρκείς ποσότητες σε προσιτές τιμές, με την καθαρή ενέργεια για την παραγωγή υδρογόνου να προέρχεται δυνητικά από αιολικά πάρκα στα ανοικτά των ακτών της Βόρειας Γερμανίας. Η Ομοσπονδιακή Κυβέρνηση εξέφρασε την πρόθεσή της να παράσχει χρηματοδοτική στήριξη 55 εκατομμυρίων ευρώ για την κατασκευή του εργοστασίου, Το επόμενο βήμα είναι η Ευρωπαϊκή Επιτροπή να εγκρίνει την πρόθεση της ομοσπονδιακής κυβέρνησης να παράσχει χρηματοδότηση πριν ξεκινήσει η εγκατάσταση της νέας μονάδας. Η παραγωγή έχει προγραμματιστεί να ξεκινήσει το 2025.[44]

Κόστος και συμπεράσματα

Ιστορικά, το αέριο που χρησιμοποιείται για την παραγωγή γκρίζου υδρογόνου είναι φθηνότερο από την ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου, κι έτσι η ηλεκτρόλυση σπάνια χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν. Σήμερα, το γκρίζο υδρογόνο κοστίζει λιγότερο από το ήμισυ της τιμής του πράσινου υδρογόνου. Ωστόσο, οι τιμές αναμένεται να αντιστραφούν έως το 2030. Αυτή η μείωση της τιμής του πράσινου υδρογόνου οφείλεται: α) στο χαμηλότερο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές το οποίο είναι αποτέλεσμα των χαμηλότερων τιμών

της ηλιακής και αιολικής ενέργειας και β) στη μείωση του κόστους των ηλεκτρολυτών. Το μειωμένο κόστος για τους ηλεκτρολύτες βασίζεται στην κλιμακούμενη παραγωγή και στη βελτίωση της απόδοσης. Ως αποτέλεσμα, το πράσινο υδρογόνο προβλέπεται να γίνει σημαντικά φθηνότερο. Οι τιμές του γκριζου υδρογόνου θα αυξηθούν ως αποτέλεσμα των αυξανόμενων κυρώσεων για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Οι προοπτικές τιμών για το μπλε υδρογόνο είναι σχετικά σταθερές.

Για να αξιολογηθεί η ολοκληρωμένη οικονομική ανταγωνιστικότητα της παραγωγής χάλυβα με βάση το καθαρό πράσινο υδρογόνο σε σύγκριση με την παραγωγή του σε συμβατικές υψικαμίνους, πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη το κόστος κυρώσεων του διοξειδίου του άνθρακα.

Στην Ευρώπη, το σύστημα εμπορίας εκπομπών της ΕΕ (EU ETS) ακολουθεί μια συγκεκριμένη στρατηγική. Η συνολική ποσότητα αερίων θερμοκηπίου που μπορούν να εκπέμψουν οι εταιρείες εντός του EU ETS περιορίζεται από ένα ειδικό για τον κλάδο «ανώτατο όριο» στον αριθμό των δικαιωμάτων εκπομπής. Με την πάροδο του χρόνου, το ανώτατο όριο μειώνεται και τα συνολικά δικαιώματα εκπομπών μειώνονται. Εντός του ανώτατου ορίου, οι εταιρείες μπορούν να λαμβάνουν ή να αγοράζουν δικαιώματα. Κάθε χρόνο, οι εταιρείες πρέπει να παραιτούνται από όλα τα δικαιώματά τους για να καλύψουν τις εκπομπές τους, διαφορετικά επιβάλλονται βαριές κυρώσεις. Οι τιμές του διοξειδίου του άνθρακα αναμένεται να αυξηθούν σημαντικά έως το 2050 και θα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τους πολιτικούς κανονισμούς σε κάθε χώρα της ΕΕ. Στο τέλος του 2019, η μέση τιμή του διοξειδίου του άνθρακα στην Ευρώπη ήταν 25 €/t. Η Γερμανία έχει ήδη ανακοινώσει τιμές 55-65 €/t μετά το 2026 και, έως το 2050, οι τιμές του διοξειδίου του άνθρακα 100-150 €/t θα μπορούσαν να είναι πραγματικότητα στην Ευρώπη.

Η αύξηση των τιμών του διοξειδίου του άνθρακα και η μείωση των τιμών του υδρογόνου είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της οικονομικής βιωσιμότητας (ανάλογα με το κόστος) της παραγωγής χάλυβα καθαρού υδρογόνου. Για αυτό, οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές πρέπει να πέσουν κάτω από ένα όριο περίπου 0,027 €/kWh για να διασφαλιστεί η οικονομικά αποδοτική παραγωγή πράσινου υδρογόνου.

Μέχρι σήμερα, η συμβατική παραγωγή χάλυβα εξακολουθεί να διατηρεί ένα πλεονέκτημα κόστους. Ωστόσο, αυτό το σενάριο αλλάζει μόλις πέσουν οι τιμές του

υδρογόνου (καθοδηγούμενες από το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας) ή αυξηθούν οι τιμές του διοξειδίου του άνθρακα. Ακολουθώντας αυτή τη λογική, η παραγωγή χάλυβα με βάση το καθαρό υδρογόνο αναμένεται να είναι ανταγωνιστική μεταξύ 2030 και 2040 στην Ευρώπη.

Σήμερα, η παραγωγή χάλυβα με βάση το υδρογόνο με χρήση EAF είναι τεχνικά εφικτή και θεωρείται ήδη ότι αποτελεί μέρος μιας πιθανής μακροπρόθεσμης λύσης για την απανθρακοποίηση της βιομηχανίας χάλυβα σε μεγάλη κλίμακα. Το ερώτημα δεν είναι αν, αλλά πότε και σε ποιο βαθμό θα γίνει αυτός ο μετασχηματισμός. Ωστόσο, υπάρχει μια ποικιλία αλληλεξαρτώμενων παραγόντων που θα καθορίσουν πότε θα προκύψουν τα σημεία αιχμής της απανθρακοποίησης στη βιομηχανία χάλυβα. Παρακάτω παρουσιάζονται έξι από τους εξωτερικούς παράγοντες που θα διαμορφώσουν τη μελλοντική ανάπτυξη και τον χρόνο υιοθέτησης του πράσινου χάλυβα με βάση το υδρογόνο:

Παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Ο πράσινος χάλυβας με βάση το υδρογόνο δημιουργεί την ανάγκη για σημαντική αύξηση της δυναμικότητας της ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Για να το θέσουμε σε προοπτική, η συνολική ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή δύο εκατομμυρίων τόνων χάλυβα με βάση το υδρογόνο είναι περίπου 8,8 TWh. Ως εκ τούτου, η διαθεσιμότητα, ο σταθερός εφοδιασμός και το ανταγωνιστικό κόστος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελούν βασικούς αποφασιστικούς παράγοντες για την τεχνολογική αλλαγή.

Ασφάλεια παροχής υδρογόνου. Η μελλοντική στροφή προς το χάλυβα με βάση το υδρογόνο βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ευρεία διαθεσιμότητα πράσινου υδρογόνου σε βιομηχανική κλίμακα. Η παραγωγή δύο εκατομμυρίων τόνων χάλυβα με βάση το υδρογόνο απαιτεί μια ποσότητα πράσινου υδρογόνου 144.000 τόνων. Ως εκ τούτου, η παροχή της απαιτούμενης παραγωγικής ικανότητας και υποδομής για την παραγωγή χάλυβα με βάση το υδρογόνο σε μεγάλη κλίμακα, έχει σημαντικό αντίκτυπο στο χρονοδιάγραμμα για την εμπορική διαθεσιμότητα χάλυβα με βάση το υδρογόνο. Επιπλέον, οι τιμές του πράσινου υδρογόνου, που αντικατοπτρίζονται σε μεγάλο βαθμό από την ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές, πρέπει να μειωθούν ταυτόχρονα για να λειτουργήσει αυτό το

εγχείρημα, συνδέοντας την ασφάλεια εφοδιασμού με υδρογόνο με τη σημασία της παροχής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.

Πρώτη ύλη. Για τη μετάβαση της συμβατικής παραγωγής από BF/BOF σε DRI/EAF με χρήση υδρογόνου, είναι απαραίτητες οι αλλαγές στην πρώτη ύλη οι οποίες θα αυξήσουν ιδιαίτερα τη ζήτηση για σίδηρο άμεσης αναγωγής (DR). Ο εφοδιασμός με DR σε περίπτωση μαζικής μετάβασης στην παραγωγή χάλυβα με βάση το υδρογόνο είναι αβέβαιος και θα μπορούσε να οδηγήσει σε αύξηση των ασφάλιστρων των τιμών, επηρεάζοντας αρνητικά την οικονομία της νέας μεθόδου παραγωγής.

Τεχνολογία παραγωγής. Η βασική μέθοδος παραγωγής για DRI/EAF που τροφοδοτείται με φυσικό αέριο έχει ήδη καθιερωθεί και λειτουργεί σε μεγάλη κλίμακα σε ορισμένες αγορές που επωφελούνται από την άφθονη προσφορά φθηνού φυσικού αερίου. Ωστόσο, η μετάβαση της διαδικασίας σε μια διαδικασία εξ ολοκλήρου με υδρογόνο είναι τεχνικά εφικτή, αν και το συνολικό κόστος είναι ακόμα υψηλό και η τεχνολογία δεν έχει ακόμη αποδειχθεί σε μεγάλη κλίμακα. Από την άλλη πλευρά, ωστόσο, θεωρείται σχετικά εύκολη η αλλαγή μιας μεθόδου παραγωγής DRI/EAF που τροφοδοτείται από φυσικό αέριο σε υδρογόνο.

Προθυμία πληρωμής. Λαμβάνοντας υπόψη τον ζωτικό ρόλο του χάλυβα στην παγκόσμια οικονομία, απαιτείται υποστήριξη των πελατών, καθώς και ζήτηση για να έχει επιτυχία η παραγωγή του πράσινου χάλυβα με βάση το υδρογόνο. Μόνο εάν οι πελάτες είναι σε θέση να εκτιμήσουν ότι τα συγκεκριμένα προϊόντα συμβάλλουν στη μείωση/ουδετερότητα του άνθρακα και είναι πρόθυμοι να πληρώσουν για αυτήν την απαλλαγή από τον άνθρακα, μπορεί να συμβεί αυτή η αλλαγή στις τεχνολογίες παραγωγής. Οι βιομηχανίες τελικών χρήσεων δείχνουν αυξανόμενο ενδιαφέρον για τα προϊόντα «πράσινου χάλυβα» για την απανθρακοποίηση της δικής τους αλυσίδας αξίας, σε συνδυασμό με την προθυμία να πληρώσουν ένα επιπλέον ασφάλιστρο τιμής.

Κανονισμός. Τα οικονομικά στοιχεία της αύξησης του μεριδίου του χάλυβα με βάση το υδρογόνο εξαρτώνται από τη συνεχιζόμενη πολιτική ώθηση για την απαλλαγή από τον άνθρακα μέσω μέτρων όπως η τιμολόγηση του διοξειδίου του άνθρακα. Εξίσου σημαντική είναι η παροχή κεφαλαίου εκκίνησης και επιδοτήσεων για αρχικές επενδύσεις για την αντιστάθμιση των απαιτήσεων κεφαλαίου της

τεχνολογικής αλλαγής. Ανάλογα με την κλίμακα, μια μονάδα που βασίζεται σε DRI και EAF και χρησιμοποιεί υδρογόνο θα έχει σημαντικές κεφαλαιουχικές δαπάνες. Επομένως, αυτή η τεχνολογική αλλαγή εξαρτάται από μια συλλογική προσπάθεια μεταξύ των ρυθμιστικών αρχών, των κυβερνήσεων και των ενδιαφερόμενων μερών του κλάδου για τη διευκόλυνση της πρόσβασης στο απαιτούμενο κεφάλαιο.[45]

Κάνοντας τον απολογισμό, η στροφή προς τον χάλυβα με βάση το υδρογόνο δεν μπορεί να συμβεί από τη μια μέρα στην άλλη και υπάρχει μόνο μια βασική τεχνολογία παραγωγής που μπορεί να αξιοποιηθεί για να επιτευχθεί μια βιομηχανία χάλυβα ουδέτερη από άνθρακα. Η μελλοντική διαθεσιμότητα φθηνής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και οι διάφοροι κανονισμοί λειτουργίας θα είναι οι δύο βασικοί μοχλοί για την υιοθέτηση της παραγωγής χάλυβα με βάση το υδρογόνο. Παρά το γεγονός ότι ο στόχος για ουδετερότητα άνθρακα (στην Ευρώπη) εξακολουθεί να είναι μελλοντικό πλάνο, είναι ζωτικής σημασίας να δράσουμε τώρα: οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις έχουν διάρκεια ζωής άνω των 50 ετών και ορίζοντες επενδυτικού σχεδιασμού από 10 έως 15 χρόνια. Οι αποφάσεις για τα περιουσιακά στοιχεία και το αποτύπωμα πρέπει να ληφθούν σήμερα και πρέπει να ακολουθούν έναν σαφή οδικό χάρτη απεξάρτησης από τις ανθρακούχες εκπομπές. Ο ίδιος ο οδικός χάρτης πρέπει να συνδυάζει μακροπρόθεσμους στόχους με δυνατές γρήγορες νίκες για να επιτρέψει μια σταδιακή στροφή προς την απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές που θα κρατά όλα τα ενδιαφερόμενα μέλη ενεργά. Στην Ευρώπη, η παραγωγή χάλυβα με βάση το πράσινο υδρογόνο είναι πιθανό να γίνει μια βασική τεχνολογία που θα διαμορφώσει τη διαδρομή προς τη μείωση των εκπομπών. Η μέθοδος DRI με τη χρήση υδρογόνου θα είναι το κλειδί για να καταστεί δυνατή η παραγωγή υψηλής καθαρότητας ποιοτήτων χάλυβα στο μέλλον χωρίς την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα. Ως εκ τούτου, ο χάλυβας με βάση το υδρογόνο είναι μια ευκαιρία για τη διασφάλιση της μελλοντικής παραγωγής χάλυβα στην Ευρώπη.

6. Συμπεράσματα

Όπως παραδέχονται πια όλοι οι επιστήμονες το υδρογόνο είναι εδώ για να μείνει. Είναι ένα από το πιο καθαρά καύσιμα που έχουμε μέχρι τώρα. Το υδρογόνο μαζί με τις ΑΠΕ αποτελούν το καλύτερο δίδυμο προκειμένου η παραγωγή του πρώτου να έχει μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα.

Το υδρογόνο επίσης μας δίνει την δυνατότητα μέσω των διάφορων τεχνολογιών που υπάρχουν όπως αυτή των κυψελών καυσίμου να μπορέσουμε να ανακτήσουμε την ενέργεια που έχει αποθηκευτεί σε ηλεκτρική, θερμική ή κινητική.

Το να παραχθεί το υδρογόνο από τις ΑΠΕ είναι ακόμα υπό έρευνα σε πολλές χώρες και ερευνητικά ινστιτούτα. Είναι επιτακτική ανάγκη να δοθούν τα κατάλληλα κίνητρα από την πολιτεία για να μπορέσουν να αναπτυχθούν και να εισχωρήσουν στην αγορά οι τεχνολογίες που έχουν ως βάση τους το υδρογόνο.

Η αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με υδρογόνο στη βιομηχανία απαιτεί συντονισμένη προσπάθεια που περιλαμβάνει την ανάπτυξη οικονομικών μεθόδων παραγωγής υδρογόνου, την κατασκευή υποδομής υδρογόνου, την υιοθέτηση τεχνολογιών υδρογόνου, την ενθάρρυνση των επενδύσεων στην τεχνολογία υδρογόνου και τη θέσπιση προτύπων και κανονισμών. Λαμβάνοντας αυτά τα βήματα, οι βιομηχανίες μπορούν να μεταβούν από τα ορυκτά καύσιμα στο υδρογόνο, μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και συμβάλλοντας στον μετριασμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Αυτό θα δημιουργήσει επίσης νέες οικονομικές ευκαιρίες και θέσεις εργασίας στη βιομηχανία υδρογόνου, συμβάλλοντας στην προώθηση της οικονομικής ανάπτυξης και της καινοτομίας.

Ο 20^{ος} αιώνας ήταν ο αιώνας των ορυκτών καυσίμων. Μπορούμε να πούμε ότι ο 21^{ος} είναι ο αιώνας των συνθετικών καυσίμων, και του υδρογόνου καθώς θα εγκαταλείψουμε σιγά σιγά τα ορυκτά καύσιμα τα οποία δημιούργησαν πολύ μεγάλη και μερικώς μη αναστρέψιμη ζημιά στο περιβάλλον.

7. Βιβλιογραφικές αναφορές

1. IEA Takes Part in G20 Energy and Environment Ministerial in Japan - News. IEA, <https://www.iea.org/news/iea-takes-part-in-g20-energy-and-environment-ministerial-in-japan>.
2. Elam, C. (2003). Realizing the hydrogen future: The International Energy Agency's efforts to advance hydrogen energy technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(6), 601–607. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00147-7](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00147-7)
3. Maynard, I., & Abdulla, A. (2023a). Assessing benefits and costs of expanded green hydrogen production to facilitate fossil fuel exit in a net-zero transition. *Renewable Energy Focus*, 44, 85–97. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2022.12.002>
4. World Energy Outlook 2020 – Analysis. IEA, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>.
5. Chang, J. (2002). Biohydrogen production with fixed-bed bioreactors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(11–12), 1167–1174. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00130-1](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00130-1)
6. Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 597–611. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>
7. Baykara, S. (2004). Hydrogen production by direct solar thermal decomposition of water, possibilities for improvement of process efficiency. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(14), 1451–1458. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.02.014>
8. Patrick C. Hallenbecka, John R. Benemannb, (2002). Biological hydrogen production; fundamentals and limiting processes. *International Journal of Hydrogen Energy* 27 (11–12), 1185–1193. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00131-3](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00131-3)
9. Kumar, R., Kumar, A., & Pal, A. (2021). An overview of conventional and non-conventional hydrogen production methods. *Materials Today: Proceedings*, 46, 5353–5359. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.793>
10. Dincer, I., & Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of*

- Hydrogen Energy, 40(34), 11094–11111.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>
11. Shiva Kumar, S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3), 442–454.
<https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>
 12. Megía, P. J., Vizcaíno, A. J., Calles, J. A., & Carrero, A. (2021). Hydrogen production technologies: From fossil fuels toward renewable sources. A mini review. *Energy & Fuels*, 35(20), 16403–16415.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02501>
 13. Adolf, J., Balzer, C. H., Louis, J., Schabla, U., Fishedick, M., Arnold, K., Pastowski, A., & Schüwer, D. (2017). Energy of the future? : Sustainable mobility through fuel cells and H₂ ; Shell hydrogen study.
<https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/6786>
 14. Fan, L., Tu, Z., & Chan, S. H. (2021). Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review. *Energy Reports*, 7, 8421–8446.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.003>
 15. Tamaura, Y., Ueda, Y., Matsunami, J., Hasegawa, N., Nezuka, M., Sano, T., & Tsuji, M. (1999). Solar hydrogen production by using ferrites. *Solar Energy*, 65(1), 55–57. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00087-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00087-5)
 16. Bosu, S., & Rajamohan, N. (2023). Recent advancements in hydrogen storage—Comparative review on methods, operating conditions and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.344>
 17. Abdin, Z., Khalilpour, K., & Catchpole, K. (2022). Projecting the levelized cost of large scale hydrogen storage for stationary applications. *Energy Conversion and Management*, 270, 116241.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116241>
 18. Bank, European Central. (2022) Could the Transition Away from Fossil Fuels Generate a Divine Coincidence?. Greener and Cheaper.
<https://www.ecb.europa.eu/press/key/date/2022/html/ecb.sp221116~c1d5160785.en.html>.
 19. Öhman, A., Karakaya, E., & Urban, F. (2022). Enabling the transition to a fossil-free steel sector: The conditions for technology transfer for hydrogen-

- based steelmaking in Europe. *Energy Research & Social Science*, 84, 102384.
<https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102384>
20. Melaina, M. W., Antonia, O., & Penev, M. (2013). Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: A review of key issues (NREL/TP-5600-51995, 1068610; σ. NREL/TP-5600-51995, 1068610).
<https://doi.org/10.2172/1068610>
21. Seyam, S., Dincer, I., & Agelin-Chaab, M. (2020). Analysis of a clean hydrogen liquefaction plant integrated with a geothermal system. *Journal of Cleaner Production*, 243, 118562.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118562>
22. Topolski, K., Reznicek, E., Erdener, B., San Marchi, C., Ronevich, J., Fring, L., Simmons, K., Fernandez, O. J. G., Hodge, B.-M., & Chung, M. (2022). Hydrogen blending into natural gas pipeline infrastructure: Review of the state of technology. <https://doi.org/10.2172/1893355>
23. Hystra. (n.d.). HYDROGEN SUPPLY CHAIN – HySTRA
<http://www.hystra.or.jp/>
24. Homepage. (n.d.). Hydrogen Council <https://hydrogencouncil.com/en/>
25. Greenhouse gas emissions from transport in Europe. (n.d.)
<https://www.eea.europa.eu/ims/greenhouse-gas-emissions-from-transport>
26. Paris Climate Agreement: Everything You Need to Know. (2021),
<https://www.nrdc.org/stories/paris-climate-agreement-everything-you-need-know> .
27. Midilli, A., Dogru, M., Akay, G., & Howarth, C. R. (2002). Hydrogen production from sewage sludge via a fixed bed gasifier product gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(10), 1035–1041.
[https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00011-3](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00011-3)
28. Huang, H., Yao, Q., Zhang, X., & Wang, H. (2022). Microporous expanded polytetrafluoroethylene layer functionalized hydrophilic groups for excellent mechanical durability and superior performance in proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*, 526, 231130.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231130>
29. Shamsi, H., Tran, M.-K., Akbarpour, S., Maroufmashat, A., & Fowler, M. (2021). Macro-Level optimization of hydrogen infrastructure and supply chain

- for zero-emission vehicles on a canadian corridor. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125163. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125163>
30. Yang, Y., Tong, L., Yin, S., Liu, Y., Wang, L., Qiu, Y., & Ding, Y. (2022). Status and challenges of applications and industry chain technologies of hydrogen in the context of carbon neutrality. *Journal of Cleaner Production*, 376, 134347. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134347>
 31. Al-Mufachi, N. A., & Shah, N. (2022). The role of hydrogen and fuel cell technology in providing security for the UK energy system. *Energy Policy*, 171, 113286. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113286>
 32. Oliveira, A. M., Beswick, R. R., & Yan, Y. (2021). A green hydrogen economy for a renewable energy society. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 33, 100701. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100701>
 33. Lan, B., Dong, K., Li, L., Lei, Y., Wu, S., Hua, E., & Sun, R. (2023). CO2 emission reduction pathways of iron and steel industry in Shandong based on CO2 emission equity and efficiency. *Resources Policy*, 81, 103406. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103406>
 34. Cui, S., Zhu, G., He, L., Wang, X., & Zhang, X. (2023). Analysis of the fire hazard and leakage explosion simulation of hydrogen fuel cell vehicles. *Thermal Science and Engineering Progress*, 41, 101754. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101754>
 35. Millinger, M., Tafarte, P., Jordan, M., Hahn, A., Meisel, K., & Thrän, D. (2021). Electrofuels from excess renewable electricity at high variable renewable shares: Cost, greenhouse gas abatement, carbon use and competition. *Sustainable Energy & Fuels*, 5(3), 828–843. <https://doi.org/10.1039/D0SE01067G>
 36. Greek government approves a 4.65 gw green hydrogen and 400 mw fuel cell project—Mercomindia. (n.d.). Mercomindia.Com. <https://mercomindia.com/greek-approves-green-hydrogen-fuel-project>
 37. Dimitrov, L. (n.d.). Greek hydrogen projects move closer to EU funding. ICIS Explore. <https://www.icis.com/explore/resources/news/2021/09/07/10682510/greek-hydrogen-projects-move-closer-to-eu-funding>
 38. Our targets and road to net zero. (n.d.). TITAN. <https://www.titan-cement.com/net-zero/our-targets-and-road-to-net-zero/>

39. Titan h2cem is included in the “hy2use” important project of common european interest (Ipcei) for the hydrogen value chain—Titan greece. (n.d.). <https://www.titan.gr/en/newsroom/news-and-press-releases/new?item=1634>
40. Statistics. (n.d.). Worldsteel.Org. <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/>
41. Breakthrough technology. (n.d.). Worldsteel.Org. <https://worldsteel.org/steel-topics/environment-and-climate-change/climate-action/breakthrough-technology/>
42. Held, V. (2023, April 26). Our path to a green future. Voestalpine. <https://www.voestalpine.com/blog/en/commitment/greentec-steel/our-path-to-a-green-future/>
43. Eberl, C. (2021, October 21). H2FUTURE: Valuable findings after two years of testing. Voestalpine. <https://www.voestalpine.com/blog/en/commitment/h2future-valuable-findings-after-two-years-of-testing/>
44. Hamburg H2: Working towards the production of zero-carbon emissions steel with hydrogen | ArcelorMittal. (n.d.). <https://corporate.arcelormittal.com/climate-action/decarbonisation-technologies/hamburg-h2-working-towards-the-production-of-zero-carbon-emissions-steel-with-hydrogen/>
45. Decarbonization in steel | McKinsey. (n.d.). Retrieved September 5, 2023, from <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/decarbonization-challenge-for-steel#/>
46. Hydrogen (2022). <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen>
47. U.S. Energy Information Administration - EIA - Independent Statistics and Analysis. <https://www.eia.gov/outlooks/archive/ieo19/>
48. Technology Roadmap - Hydrogen and Fuel Cells – Analysis. IEA, <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-hydrogen-and-fuel-cells>.
49. Dornheim, M. (2011). Thermodynamics of metal hydrides: Tailoring reaction enthalpies of hydrogen storage materials. In J. C. Moreno Piraján (Ed.), Thermodynamics—Interaction Studies—Solids, Liquids and Gases. InTech. <https://doi.org/10.5772/21662>

50. Imani Moqadam, S., & Mahmoudi, M. (2013). Advent of nanocatalysts in hydrotreating process: Benefits and developments. *American Journal of Oil and Chemical Technologies*, 1(2).

<https://doi.org/10.14266/ajoct12-2>