



Δεξιότητες για την ασφάλεια στον τομέα του υδρογόνου

Erasmus+ KA202 - Στρατηγικές Συμπράξεις στον τομέα
της Επαγγελματικής Εκπαίδευσης και Κατάρτισης (ΕΕΚ)

Κεφάλαιο 1

Βασικές πληροφορίες για το υδρογόνο

Περιεχόμενα

Ενότητα 1

1.1. Ορυκτά Καύσιμα.....	04
1.1.1. Πετρέλαιο.....	04
1.1.2. Άνθρακας.....	05
1.1.3. Τύρφη.....	06
1.1.4. Φυσικό Αέριο.....	07
1.1.5. Τα προβλήματα των ορυκτών καυσίμων.....	09
1.2. 1.2.Αέρια του Θερμοκηπίου και Κλιματική Αλλαγή.....	09
1.3. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	11
1.4. Υδρογόνο.....	11

Ενότητα 2

2.1. Ιδιότητες του υδρογόνου.....	15
2.2. Παραγωγή υδρογόνου.....	16
2.2.1 Αναμόρφωση μεθανίου με ατμό.....	17
2.2.2. Αεριοποίηση άνθρακα.....	18
2.2.3. Αεριοποίηση βιομάζας.....	18
2.2.4. Ηλεκτρόλυση.....	18
2.3. Τα χρώματα του υδρογόνου.....	20

Ενότητα 3

3.1. Power-to-Gas.....	23
3.1.1. Βασικά στοιχεία ηλεκτρολύτη.....	25
3.2. Ρόλοι του υδρογόνου στη θέρμανση.....	26
3.2.1. Οικιακή και εμπορική θέρμανση.....	26
3.2.2. Βιομηχανική θέρμανση.....	26
3.3. Ρόλοι του υδρογόνου στις μεταφορές.....	27
3.3.1. Βαριές μεταφορές.....	27
3.3.2. Ελαφρές μεταφορές.....	28

Ενότητα 4

4.1. Συμπύεση και αποθήκευση υδρογόνου.....	30
4.1.1. Υγρό υδρογόνο.....	31
4.1.2. Υπόγεια αποθήκευση.....	32
4.2. Διανομή υδρογόνου και σωληνώσεις.....	32
4.3. Μετατροπή του υδρογόνου σε ενέργεια.....	34
4.3.1. Κυψέλλες υδρογόνου.....	34
4.3.2. Καύση υδρογόνου.....	36

Ενότητα 5

5.1. Το υδρογόνο στην πετρομηχανική βιομηχανία.....	38
5.1.1. Υδρογονοκατεργασία.....	38
5.1.2. Υδρογονοπυρόλυση.....	38
5.2. Παραγωγή αμμωνίας.....	39
5.2.1. Power-to-Ammonia.....	40
5.3. Υδρογόνωση.....	41
5.4. Άλλοι ρόλοι του υδρογόνου στη βιομηχανία.....	42
5.4.1. Κατασκευή ημιαγωγών.....	42
5.4.2. Υδρογόνο ως ψυκτικό μέσο.....	43
5.4.3. Εφεδρική ισχύς.....	43
5.4.4. Ο τομέας του γυαλιού και του μετάλλου.....	44
5.4.5. Αεροδιαστημικές εφαρμογές.....	44
Παραπομπές.....	45

----- ΕΝΟΤΗΤΑ 1 -----

1.1. Ορυκτά Καύσιμα

Τα ορυκτά καύσιμα είναι υδρογονάνθρακες, κυρίως άνθρακας, πετρέλαιο ή φυσικό αέριο, που σχηματίζονται από τα υπολείμματα νεκρών φυτών και ζώων. Αποτελούνται από θαμμένες καύσιμες γεωλογικές αποθέσεις οργανικών υλικών, που σχηματίζονται από αποσυντεθειμένα φυτά και ζώα. Τα κοιτάσματα αυτά έχουν μετατραπεί σε πετρέλαιο, άνθρακα ή φυσικό αέριο με την έκθεση σε θερμότητα και πίεση στο φλοιό της γης επί εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια.

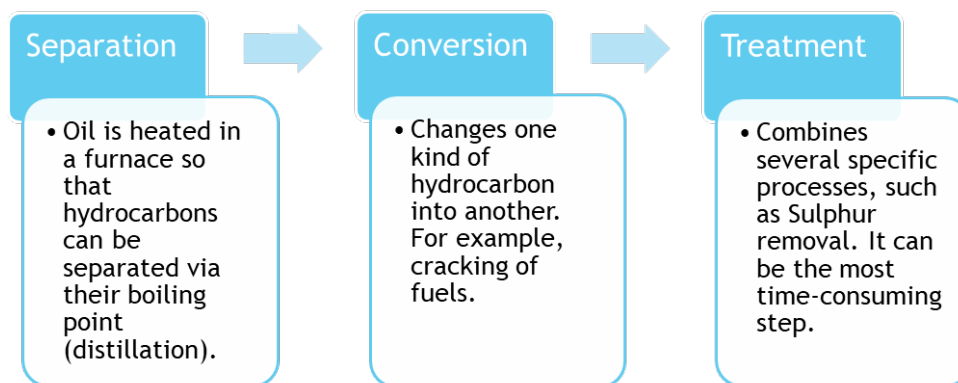
Η χρήση ορυκτών καυσίμων επέτρεψε τη βιομηχανική επανάσταση και σήμερα αποτελεί μακράν την κύρια πηγή ενέργειας στον κόσμο. Η καύση ορυκτών καυσίμων από τον άνθρωπο είναι η μεγαλύτερη πηγή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα - ενός αερίου του θερμοκηπίου.

Τα ορυκτά καύσιμα σχηματίζονται συνεχώς από φυσικές διεργασίες - ωστόσο, είναι μη ανανεώσιμοι πόροι. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι χρειάζονται εκατομμύρια χρόνια για να σχηματιστούν και τα αποθέματα χρησιμοποιούνται απείρως ταχύτερα από ό,τι αναπληρώνονται. Με άλλα λόγια, τα ορυκτά καύσιμα δεν αναπληρώνονται με φυσικό τρόπο σε ανθρώπινη χρονική κλίμακα.

1.1.1. Πετρέλαιο

Το πετρέλαιο, που ονομάζεται επίσης αργό πετρέλαιο όταν βρίσκεται στη φυσική του μορφή, αποτελείται από ένα μείγμα υδρογονανθράκων και άλλων ουσιών (κυρίως θείου). Αφού εξαχθεί, εξευγενιστεί και διαχωριστεί, το πετρέλαιο παράγει μια ποικιλία προϊόντων, όπως καύσιμα, πλαστικά, λιπαντικά, κεριά, πίσσα, ασφαλτο και λιπάσματα, μεταξύ άλλων.

Η διύλιση του πετρελαίου είναι η διαδικασία μετατροπής του αργού πετρελαίου σε χρήσιμα προϊόντα, η οποία χωρίζεται σε τρία στάδια:



Από το 2018, περίπου 80 εκατομμύρια βαρέλια πετρελαίου εξάγονται καθημερινά σε όλο τον κόσμο, με τις Ηνωμένες Πολιτείες, τη Σαουδική Αραβία και τη Ρωσία να είναι οι κύριες χώρες παραγωγής.

Πίνακας 1. Οι 10 μεγαλύτερες πετρελαιοπαραγωγές χώρες το 2018 [Πηγή: U.S. Energy Information Administration].

Χώρα	Εκατομμύρια βαρέλια ανά ημέρα
Ηνωμένες Πολιτείες	12.0
Σαουδική Αραβία	11.1
Ρωσία	10.8
Ιράκ	4.5
Ιράν	4.0
Κίνα	4.0
Καναδάς	3.7
ΗΑΕ (Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα)	3.1
Κουβέιτ	2.9
Βραζιλία	2.5

1.1.2. Άνθρακας

Ο άνθρακας είναι ένα οργανικό ιζηματογενές πέτρωμα που αποτελείται από άνθρακα και μεταβλητές ποσότητες άλλων ουσιών. Εξακολουθεί να αποτελεί τη μεγαλύτερη πηγή

ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο. Υπάρχουν τέσσερις ποιότητες άνθρακα, ανάλογα με την ποσότητα άνθρακα που περιέχει:

- ✓ **Τύρφη:** το πρωιμότερο και νεότερο στάδιο σχηματισμού του άνθρακα
- ✓ **Λιγνίτης:** ονομάζεται επίσης καστανός άνθρακας, έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και συνεπώς αποδίδει χαμηλή ενέργεια
- ✓ **Ασβεστόχος:** ονομάζεται επίσης μαλακός άνθρακας, είναι η πιο κοινή κατηγορία
- ✓ **Ανθρακίτης:** ονομάζεται επίσης σκληρός άνθρακας, έχει υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και αποδίδει την υψηλότερη ενέργεια.

Από το 2018, περίπου 7.700 εκατομμύρια τόνοι άνθρακα παράγονται καθημερινά στον κόσμο, με την Κίνα να αντιπροσωπεύει σχεδόν το ήμισυ αυτής της ποσότητας.

Πίνακας 2. Οι 10 μεγαλύτερες χώρες παραγωγής άνθρακα το 2018 [Πηγή: The British Petroleum Company plc].

Χώρα	Εκατομμύρια τόνοι ετησίως
Κίνα	3,523
Ινδία	716
Ηνωμένες Πολιτείες	702
Αυστραλία	481
Ινδονησία	461
Ρωσία	411
Νότια Αφρική	252
Γερμανία	175
Πολωνία	127
Καζακστάν	111

1.1.3. Τύρφη

Η τύρφη βρίσκεται σε έλη ή βάλτους και αποτελεί το πρώτο βήμα στο γεωλογικό σχηματισμό του άνθρακα. Η τύρφη σχηματίζεται σε υγροτοπικές συνθήκες επειδή οι πλημμύρες εμποδίζουν τη ροή οξυγόνου από την ατμόσφαιρα, επιβραδύνοντας τον ρυθμό αποσύνθεσης. Είναι ένα ιδιαίτερα αναποτελεσματικό ορυκτό καύσιμο, εκπέμποντας

σημαντικά περισσότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από άλλα καύσιμα όπως ο άνθρακας και το φυσικό αέριο.



Σχήμα 1. Εξαγωγή τύρφης.

Η εξόρυξη τύρφης (που απεικονίζεται στο Σχήμα 1) αποτελεί σημαντική περιβαλλοντική επίπτωση και πραγματοποιείται κυρίως σε υπερυψωμένους βάλτους με την απομάκρυνση του ζωντανού στρώματος και τη συνακόλουθη έκθεση μεγάλων ποσοτήτων τύρφης που διευκολύνουν την οξείδωση και την απώλεια άνθρακα.

Η παραγωγή τύρφης περιορίζεται σε κατάλληλες περιοχές και καταναλώνεται κυρίως τοπικά, με τη Φινλανδία και την Ιρλανδία να κατέχουν την πρώτη θέση στην παγκόσμια παραγωγή.

Πίνακας 3. Οι 10 μεγαλύτερες χώρες παραγωγής τύρφης το 2013.
[Πηγή: United States Geological Survey (USGS) Minerals Resources Program].

Χώρα	Χιλιάδες τόνοι ανά έτος
Φινλανδία	7,470
Ιρλανδία	6,600
Σουηδία	3,300
Γερμανία	3,000
Λευκορωσία	2,970
Ρωσία	1,500
Λετονία	1,380
Καναδάς	1,295

Εσθονία	927
Πολωνία	760

1.1.4. Φυσικό αέριο

Το φυσικό αέριο αποτελείται από μίγμα αερίων υδρογονανθράκων, κυρίως μεθανίου (CH₄). Βρίσκεται σε υπόγειους βραχώδεις σχηματισμούς και άλλους ταμιευτήρες και παρουσιάζει ποικίλες χρήσεις σε τομείς όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η θέρμανση, το μαγείρεμα, οι βιομηχανικές εφαρμογές, η παραγωγή χημικών προϊόντων και οι μεταφορές.

Από το 2017, περίπου 3.700 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα φυσικού αερίου παράγονται παγκοσμίως ετησίως, με τις Ηνωμένες Πολιτείες και τη Ρωσία να είναι οι κορυφαίες χώρες παραγωγής.

Πίνακας 4. Οι 10 μεγαλύτερες χώρες παραγωγής φυσικού αερίου το 2017 [Πηγή: Enerdata Yearbook].

Χώρα	Δισεκατομμύρια m ³ ανά έτος
Ηνωμένες Πολιτείες	767
Ρωσία	694
Ιράν	209
Καναδάς	184
Κατάρ	166
Κίνα	147
Νορβηγία	128
Αυστραλία	99
Σαουδική Αραβία	98
Αλγερία	95

Η καύση φυσικού αερίου (που απεικονίζεται στο Σχήμα 2), σπαταλά περίπου το 3,5% της παγκόσμιας παραγωγής. Αυτό γίνεται συνήθως από τις εταιρείες για να αποφευχθεί μια επικίνδυνη συσσώρευση, όταν υπάρχει έλλειψη εξοπλισμού ή χρημάτων για τη δέσμευση

του αερίου ή όταν το αέριο είναι μολυσμένο με άκαυστα αέρια. Γενικά, είναι πολύ καλύτερο να εκτοξεύεται το φυσικό αέριο παρά να εξαερίζεται απλώς, δεδομένου ότι το CO₂ έχει δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη 21 φορές χαμηλότερο από το CH₄.



Σχήμα 2. Εκτόξευση φυσικού αερίου.

1.1.5. Τα προβλήματα των ορυκτών καυσίμων

Τα ορυκτά καύσιμα παρουσιάζουν ποικίλα περιβαλλοντικά και κοινωνικά προβλήματα, στα οποία περιλαμβάνεται το γεγονός ότι είναι:

- ✓ Εντατικά σε άνθρακα: παράγουν μεγάλες ποσότητες εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG), με καταστροφικές συνέπειες όσον αφορά την κλιματική αλλαγή,
- ✓ Ρυπογόνα: είναι υπεύθυνα για περίπου 9 εκατομμύρια θανάτους ετησίως, προκαλώντας αμέτρητες ασθένειες και απώλεια ποιότητας ζωής,
- ✓ Πεπερασμένα: με τον σημερινό ρυθμό χρήσης, τα σημερινά επίπεδα δεν θα διαρκέσουν περισσότερο από μερικές δεκαετίες,
- ✓ Ακριβά: αναφέρεται επίσης ως ενέργεια "Pay-as-you-go".

Συζήτηση → Συνιστάται μία συζήτηση μέσα στην τάξη για την ανάδειξη των θεμάτων των ορυκτών καυσίμων και των προβλημάτων που είναι εγγενή στην τρέχουσα ενεργειακή υποδομή που βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα.

1.2. Αέρια του Θερμοκηπίου και Κλιματική Αλλαγή

Τα αέρια του θερμοκηπίου (GHG) είναι αέρια που απορροφούν και εκπέμπουν ενέργεια στο θερμικό υπέρυθρο φάσμα. Παγιδεύουν θερμότητα στην ατμόσφαιρα και αποτελούν την κύρια αιτία του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι ένα φυσικό φαινόμενο, ζωτικής σημασίας για την ύπαρξη ζωής στη Γη - χωρίς αυτό, η θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης θα ήταν περίπου - 18 °C. Ωστόσο, οι ανθρώπινες δραστηριότητες τους τελευταίους αιώνες - χρήση ορυκτών καυσίμων, αποψίλωση των δασών κ.λπ. - έχουν ενισχύσει το φαινόμενο του θερμοκηπίου, προκαλώντας/εντείνοντας την κλιματική αλλαγή.

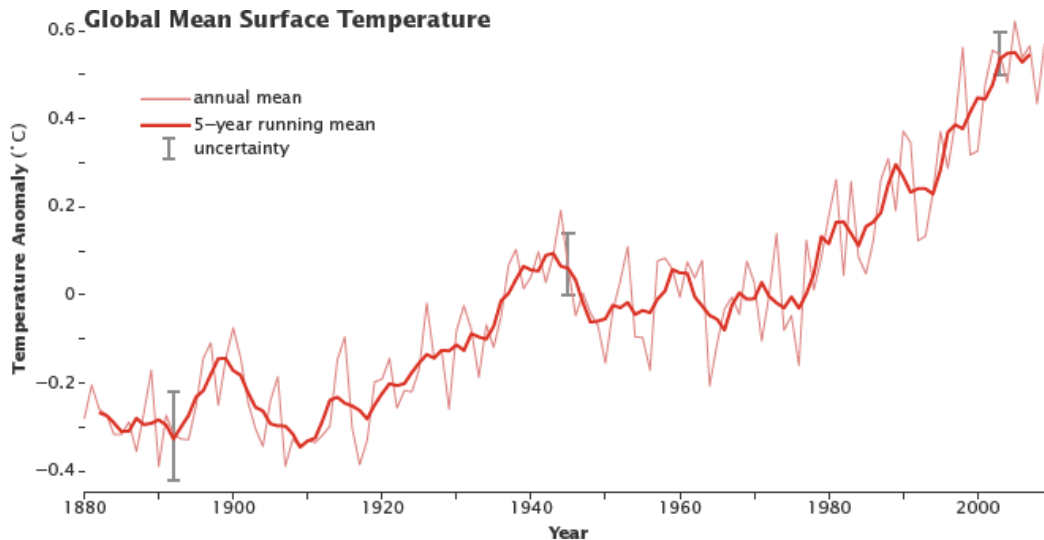
Τα πιο συνηθισμένα αέρια του θερμοκηπίου είναι:

- Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) → απελευθερώνεται από την καύση ορυκτών καυσίμων και βιομάζας και απομακρύνεται (δεσμεύεται) όταν απορροφάται από τα φυτά
- Μεθάνιο (CH_4) → εκπέμπεται κατά την παραγωγή ορυκτών καυσίμων, από την κτηνοτροφία και από την αποσύνθεση της οργανικής ύλης
- Οξείδιο του αζώτου (N_2O) → εκλύεται από γεωργικές και βιομηχανικές δραστηριότητες, καθώς και από την καύση ορυκτών καυσίμων
- Φθοριούχα αέρια → ισχυρά αέρια που εκπέμπονται από διάφορες βιομηχανικές διεργασίες.

Η επίδραση κάθε αερίου εξαρτάται από παράγοντες όπως η συγκέντρωση (π.χ. τα σημερινά επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα είναι 230 φορές υψηλότερα από εκείνα του μεθανίου), η επίδραση (π.χ. το CH_4 είναι 21 φορές ισχυρότερο από το CO_2) και το χρονικό διάστημα παραμονής τους στην ατμόσφαιρα (το οποίο μπορεί να κυμαίνεται από λίγες ώρες έως χιλιάδες χρόνια).

Η κλιματική αλλαγή, με τη σειρά της, σχετίζεται με αλλαγές στη στατιστική κατανομή των καιρικών συνθηκών, όταν η αλλαγή αυτή διαρκεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτό μπορεί να συμβεί με φυσικό τρόπο, που προκαλείται από φυσικές διεργασίες, όπως εκρήξεις ηφαιστείων, μεταβολές στην ηλιακή ακτινοβολία, τεκτονική των πλακών κ.λπ., αλλά γίνεται πηγή ανησυχίας όταν είναι εξαναγκασμένη, που προκαλείται από την ανθρώπινη δραστηριότητα - και τότε ονομάζεται ανθρωπογενής αλλαγή.

Σύμφωνα με την Εθνική Υπηρεσία Αεροναυτικής και Διαστήματος (NASA), στις αρχές του 21ου αιώνα, η θερμοκρασία της Γης ήταν περίπου 0,5 °C πάνω από τον μακροπρόθεσμο μέσο όρο. Στο σχήμα 3 παρουσιάζεται αυτή η εκτιμώμενη μεταβολή.



Σχήμα 3. Μεταβολή της μέσης παγκόσμιας επιφανειακής θερμοκρασίας [Πηγή: NASA].

Οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής/της υπερθέρμανσης του πλανήτη είναι πολλές, όπως η άνοδος της θερμοκρασίας, η οποία προκαλεί αλλαγές στη βλάστηση, οικολογικές ανισορροπίες και διαταραχές στα χερσαία και υδάτινα οικοσυστήματα, προκλήσεις για τη γεωργία και την παραγωγή τροφίμων, αλλαγές στα πρότυπα βροχοπτώσεων, πλημμύρες, ξηρασίες και καύσωνες, ισχυρότερες και συχνότερες φυσικές καταστροφές, καθώς και λιώσιμο των παγετώνων και άνοδο της στάθμης της θάλασσας. Μάλιστα, ορισμένοι εμπειρογνώμονες χρησιμοποιούν τον όρο Κλιματική Έκτακτη Ανάγκη για να τονίσουν την ανάγκη για επείγουσα αλλαγή.

1.3. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Η ανανεώσιμη ενέργεια αφορά την ενέργεια που συλλέγεται από ανανεώσιμες πηγές - αυτό σημαίνει ότι οι πόροι αυτοί αναπληρώνονται σε ανθρώπινη χρονική κλίμακα. Είναι διαθέσιμες σε πολύ ευρύτερες περιοχές, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, τα οποία βρίσκονται μόνο σε ορισμένες χώρες. Σήμερα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εξακολουθούν να συνεισφέρουν ελάχιστα (λιγότερο από 20%) στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας και αποτελούν ένα από τα καλύτερα εργαλεία της ανθρωπότητας για την καταπολέμηση και τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής.

Στα γνωστά είδη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας περιλαμβάνονται η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, οι οποίες είναι ώριμες τεχνολογίες που γνώρισαν σημαντική αύξηση της δημοτικότητάς τους και αντίστοιχη μείωση του κόστους τους τα τελευταία χρόνια. Άλλα είδη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας περιλαμβάνουν την υδροηλεκτρική ενέργεια, τη γεωθερμική ενέργεια και τη βιομάζα.

Συζήτηση → Συνιστάται μια συζήτηση στην τάξη για τον εντοπισμό και την περιγραφή άλλων τύπων παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας.

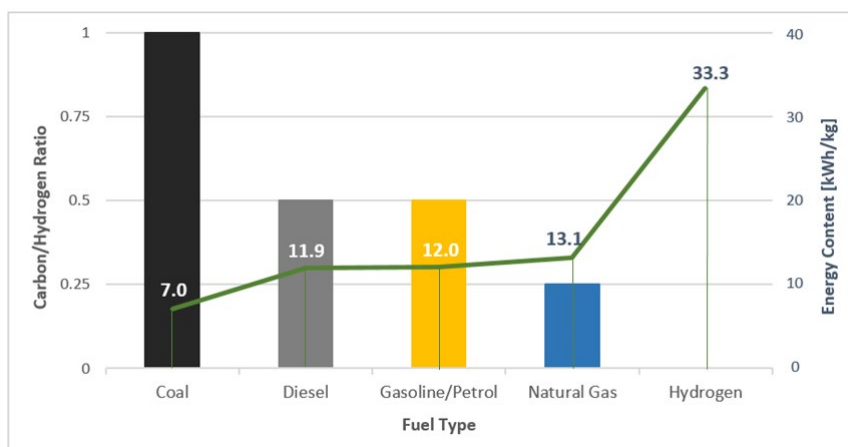
Οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παρουσιάζουν μια σειρά από περιβαλλοντικά και κοινωνικά πλεονεκτήματα, στα οποία περιλαμβάνεται το γεγονός ότι είναι:

- ✓ Καθαρότερες: εκπέμποντας πολύ λιγότερα αέρια του θερμοκηπίου, συμβάλλουν στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής
- ✓ Ανεξάντλητες: ασφαλής ενεργειακός εφοδιασμός, που δεν θα εξαντληθεί.
- ✓ Φθηνότερες: αν και απαιτούν μια αρχική επένδυση, μακροπρόθεσμα οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κοστίζουν λιγότερο.
- ✓ Ωφέλιμες για όλους: φέρνουν τεχνολογική πρόοδο και θέσεις εργασίας σε έργα ανανεώσιμης ενέργειας.

1.4. Υδρογόνο

Το υδρογόνο (H_2) είναι ένα μη τοξικό, εξαιρετικά εύφλεκτο αέριο που δεν παράγει εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα μετά την καύση - όταν συνδυάζεται με οξυγόνο (O_2), παράγει μόνο νερό (H_2O). Είναι ένα ευέλικτο αέριο και ένας πολύτιμος και σημαντικός ενεργειακός φορέας που μπορεί να αποτελέσει βασικό συστατικό μιας μελλοντικής οικονομίας χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Το υδρογόνο έχει την υψηλότερη ενεργειακή περιεκτικότητα κατά βάρος (33,3 kWh/kg) από κάθε άλλο μόριο, περιέχοντας 3-4 φορές περισσότερη ενέργεια από το πετρέλαιο (12,0 kWh/kg), το φυσικό αέριο (13,1 kWh/kg) ή τον άνθρακα (7,0 kWh/kg), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4. Σύγκριση της αναλογίας άνθρακα/υδρογόνου και του ενεργειακού περιεχομένου κατά βάρος μεταξύ υδρογόνου και άλλων τύπων κοινών καυσίμων.

Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ποικίλες εφαρμογές στον ενεργειακό τομέα, από την ηλεκτρική ενέργεια και τη θέρμανση έως την ηλεκτροδότηση των μεταφορών.

Η τεχνολογία υδρογόνου δεν είναι νέα. Το πρώτο υδρογονοκίνητο όχημα κατασκευάστηκε το 1807 από τον Γάλλο μηχανικό Francois Isaac de Rivaz. Ακολούθησαν και άλλα πρωτότυπα οχημάτων, αλλά η εξέχουσα θέση της πετρελαϊκής βιομηχανίας - που στηριζόταν στους άφθονους πόρους και το χαμηλό κόστος - μείωσε σημαντικά τη μαζική προβολή του υδρογόνου ως καυσίμου. Πιο πρόσφατα, μεταξύ της πετρελαϊκής κρίσης της δεκαετίας του 1970 και των προτροπών για καθαρότερες εκπομπές ρύπων και γενική απεξάρτηση από τον άνθρακα, το υδρογόνο άρχισε και πάλι να αποκτά προβολή.

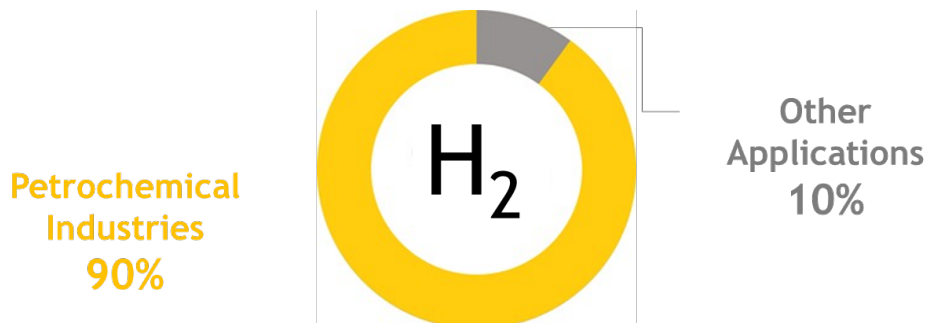
Η **οικονομία του υδρογόνου** είναι ένα προτεινόμενο σύστημα παροχής ενέργειας που χρησιμοποιεί το υδρογόνο ως φορέα μηδενικών εκπομπών CO₂. Ο όρος επινοήθηκε από τον John Bockris τη δεκαετία του 1970 και αντανακλά το έντονο ενδιαφέρον για το υδρογόνο ως φορέα ενέργειας για διάφορους λόγους:

- ✓ Μπορεί να διανεμηθεί, να καεί και να χρησιμοποιηθεί με τον ίδιο τρόπο όπως το ορυκτό φυσικό αέριο - με τις κατάλληλες τροποποιήσεις
- ✓ Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παραχθεί από υδρογόνο με πολύ υψηλή απόδοση σε σύγκριση με την παραδοσιακή παραγωγή
- ✓ Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από ορυκτές, ανανεώσιμες πηγές και πηγές βιομάζας, διευκολύνοντας τη γέφυρα από τον άνθρακα σε μια μελλοντική οικονομία μηδενικών εκπομπών άνθρακα, και αυτή η παραγωγή υδρογόνου με πολλαπλούς τρόπους μπορεί να προσαρμοστεί στις τοπικές συνθήκες και τους διαθέσιμους πόρους

- ✓ Το υδρογόνο έχει μηδενικές εκπομπές καυσαερίων μετά την καύση, γεγονός που διευκολύνει την απομάκρυνση CO₂ από την ατμόσφαιρα με χαμηλότερο κόστος στο μέλλον,
- ✓ Η μετατροπή από υδρογόνο σε ηλεκτρική ενέργεια είναι αντιστρεπτή, πράγμα που σημαίνει ότι το υδρογόνο είναι ανάλογο της ηλεκτρικής ενέργειας και μπορεί να αποτελέσει μια αποτελεσματική λύση αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Πρόσφατα, οι κυβερνήσεις και οι οργανισμοί δείχνουν αυξανόμενο ενδιαφέρον για τις τεχνολογίες υδρογόνου και επενδύουν όλο και περισσότερο σε έργα υδρογόνου. Επίσης, τα τελευταία χρόνια έχει δημοσιευθεί σημαντικός αριθμός δημοσιεύσεων σχετικά με στρατηγικές, γνώσεις και προοπτικές για το υδρογόνο.

Ωστόσο, παρά το αυξανόμενο παγκόσμιο ενδιαφέρον, το υδρογόνο εξακολουθεί να χρησιμοποιείται σπάνια ως λύση απαλλαγής από τον άνθρακα. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5, σήμερα, περισσότερο από το 90% της τρέχουσας παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου (περίπου 70-80 εκατομμύρια τόνοι ετησίως) αφορά τις ανάγκες της πετροχημικής βιομηχανίας.



Σχήμα 5. Μόνο το ένα δέκατο του υδρογόνου που παράγεται σήμερα δεν χρησιμοποιείται από τις πετροχημικές βιομηχανίες, ενώ αμελητέες ποσότητες χρησιμοποιούνται για την απαλλαγή από τον άνθρακα.

Επί του παρόντος, το ήμισυ του παγκόσμιου υδρογόνου χρησιμοποιείται για την παραγωγή αμμωνίας, κυρίως για τη γεωργία. Το υπόλοιπο απορροφάται από διάφορες βιομηχανίες, από την υδρογόνωση λίπους έως τις διεργασίες ημιαγωγών.

Επιτείνοντας το πρόβλημα, η σημερινή παγκόσμια παραγωγή υδρογόνου εκπέμπει 830 MtCO₂e_q (εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα) ετησίως, επειδή η πρώτη ύλη της βασίζεται κυρίως σε ορυκτά καύσιμα.

Συζήτηση → Συνιστάται μια συζήτηση στην τάξη για να προσδιοριστούν οι ρόλοι που μπορεί να διαδραματίσει το υδρογόνο στην τόσο αναγκαία ενεργειακή μετάβαση και να συζητηθούν τα δυνατά και αδύνατα σημεία του υδρογόνου ως παράγοντα απαλλαγής από τον άνθρακα.

Προτεινόμενη Βιβλιογραφία → Hydrogen on the Horizon: Ready, Almost Set, Go?
https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Innovation_Insights_Briefing_-_Hydrogen_on_the_Horizon_-_Ready%2C_Almost_Set%2C_Go_-_July_2021.pdf

ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ 1: ΠΡΟΣΩΠΙΚΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΣΜΟΣ

----- Τέλος Ενότητας 1 -----

----- ΕΝΟΤΗΤΑ 2 -----

2.1. Ιδιότητες του υδρογόνου

Το υδρογόνο (H) είναι το πρώτο και ελαφρύτερο στοιχείο του Περιοδικού Πίνακα των Στοιχείων (Σχήμα 6).

Group→	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
↓Period																		
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	* 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			* 57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
			* 89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		

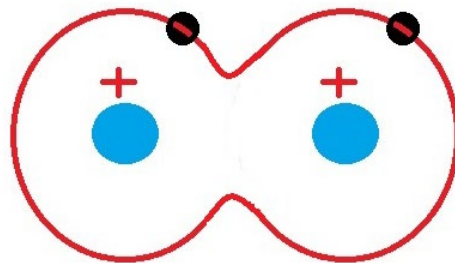
Σχήμα 6. Ο Περιοδικός Πίνακας των Στοιχείων, με το στοιχείο Υδρογόνο τονισμένο.

Το άτομο του υδρογόνου είναι ηλεκτρικά ουδέτερο, καθώς περιέχει ένα θετικά φορτισμένο πρωτόνιο, ένα αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόνιο και κανένα νετρόνιο. Το υδρογόνο είναι το ελαφρύτερο και πιο άφθονο στοιχείο, αποτελώντας περίπου το 75% της μάζας του σύμπαντος.

Hydrogen ⁺¹ 1 312.0 ⁻¹ 2.20 H ₁ ^{1s¹} 1.007975	→ Atomic number
	→ Symbol
	→ Atomic mass

Σχήμα 7. Το στοιχείο Υδρογόνο και οι βασικές του ιδιότητες.

Ωστόσο, το ατομικό υδρογόνο είναι πολύ σπάνιο στη Γη. Τα άτομα υδρογόνου τείνουν να συνδυάζονται με άλλα άτομα σε ενώσεις και με άλλα άτομα υδρογόνου για να σχηματίσουν αέριο υδρογόνο (H_2).



Εικόνα 8. Βασική σχηματική αναπαράσταση του μορίου του αερίου υδρογόνου, με τα δύο πρωτόνια και τα δύο ηλεκτρόνια.

Υπό κανονική θερμοκρασία και πίεση, το αέριο υδρογόνο είναι μη τοξικό, άχρωμο, άοσμο, άγευστο, εξαιρετικά εύφλεκτο και μη μεταλλικό. Συχνά αποκαλείται "καύσιμο των άστρων", καθώς τα άστρα περνούν το μεγαλύτερο μέρος της ζωής τους με τη σύντηξη υδρογόνου και ο ήλιος μας αποτελείται κυρίως από υδρογόνο.

Το μοριακό υδρογόνο μπορεί να αντιδράσει με μια ποικιλία στοιχείων και ενώσεων - ωστόσο, σε θερμοκρασία δωματίου, οι ρυθμοί αντίδρασης είναι τόσο χαμηλοί ώστε να είναι αμελητέοι. Αυτό σημαίνει ότι το H_2 είναι πρακτικά αδρανές σε θερμοκρασία δωματίου, λόγω της υψηλής ενέργειας διάσπασής του (η ενέργεια που απαιτείται για να σπάσει ο δεσμός που συγκρατεί τα άτομα μεταξύ τους).

Το αέριο υδρογόνο έχει επίσης πολύ χαμηλά σημεία τήξης και βρασμού, πράγμα που σημαίνει ότι υγροποιείται και παγώνει σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες.

Ενέργεια διάσπασης ($25^\circ C$) = 104.2 kcal/mole
Σημείο τήξης = $-259.2^\circ C$
UPoint = $-252.8^\circ C$

2.2. Παραγωγή Υδρογόνου

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί με πολλές μεθόδους, οι οποίες παρουσιάζουν διαφορετικά επίπεδα τεχνολογικής ωριμότητας, εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

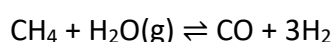
Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι παραγωγής σήμερα είναι η αναμόρφωση μεθανίου με ατμό (SMR), η αεριοποίηση άνθρακα, η αεριοποίηση βιομάζας και η ηλεκτρόλυση νερού.

2.2.1. Αναμόρφωση μεθανίου με ατμό

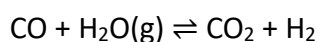
Η SMR είναι η διαδικασία μετατροπής του φυσικού αερίου σε υδρογόνο. Είναι μακράν η πιο συνηθισμένη μέθοδος παραγωγής εμπορικού αερίου υδρογόνου σήμερα, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 95% του υδρογόνου που χρησιμοποιείται στον κόσμο.

Δεδομένου ότι χρησιμοποιεί ένα ορυκτό καύσιμο, δεν αποτελεί ανανεώσιμη τεχνολογία. Δεν είναι επίσης τόσο καθαρή όσο μπορεί να είναι η ηλεκτρόλυση νερού. Ωστόσο, τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν υδρογόνο το οποίο παράγεται μέσω SMR εξακολουθούν να εκπέμπουν πολύ λιγότερα αέρια θερμοκηπίου από ό,τι συγκρίσιμα οχήματα με βενζίνη.

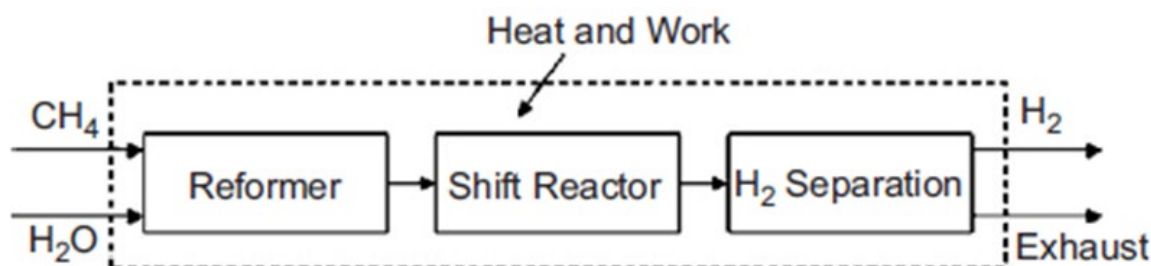
Στον SMR, ο ατμός αντιδρά με το μεθάνιο σε έναν αναμορφωτή, σε υψηλές θερμοκρασίες (700 - 1100 °C) και παρουσία καταλύτη με βάση μέταλλο, παράγοντας μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο:



Το αέριο σύνθεσης που εξέρχεται από τον αναμορφωτή διέρχεται από έναν αντιδραστήρα μετατόπισης νερού-αερίου, ο οποίος μετατρέπει το CO σε CO₂ και H₂ χρησιμοποιώντας το διαθέσιμο νερό στο αέριο σύνθεσης (ή πρόσθετο ατμό που μπορεί να προσφερθεί):



Το τελικό στάδιο είναι ο διαχωρισμός του υδρογόνου από το αέριο σύνθεσης που εξέρχεται από τον αντιδραστήρα μετατόπισης, ο οποίος μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους. Συνολικά, η παραγωγή 1 kg υδρογόνου απαιτεί περίπου 2.4 kg μεθανίου ως πρώτη ύλη. Το σχήμα 9 συνοψίζει τη μέθοδο.



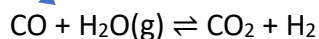
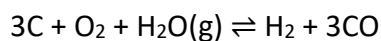
Εικόνα 9. Η διεργασία αναμόρφωσης μεθανίου με ατμό.

Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα του SMR είναι η μεγάλη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα που εκπέμπεται κατά τη διαδικασία: κατά μέσο όρο, για κάθε κιλό υδρογόνου παράγονται περίπου 9 kg CO₂. Στην πραγματικότητα, οι εγκαταστάσεις SMR είναι υπεύθυνες για το 3% περίπου των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ του βιομηχανικού τομέα.

Μια λύση που μπορεί να συμβάλει στη μείωση ή την ελαχιστοποίηση αυτού του προβλήματος είναι η δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα (CCS) ή ο έλεγχος και η δέσμευση άνθρακα. Πρόκειται για τη διαδικασία δέσμευσης των αποβλήτων CO₂ από μεγάλες σημειακές πηγές και τη μεταφορά τους σε χώρο αποθήκευσης όπου θα εναποθεθούν, αποτρέποντας την απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων του αερίου. Οι χώροι αυτοί είναι συνήθως υπόγειοι γεωλογικοί σχηματισμοί. Η CCS μπορεί να μειώσει την ποσότητα των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που εκπέμπονται από τα συστήματα SMR και να καταστήσει την παραγωγή υδρογόνου μέσω αυτής της μεθόδου πιο βιώσιμη.

2.2.2. Αεριοποίηση άνθρακα

Σε αυτή τη μέθοδο, ο άνθρακας αντιδρά με οξυγόνο και ατμό για την παραγωγή υδρογόνου, μονοξειδίου του άνθρακα και διοξειδίου του άνθρακα:



Είναι επίσης μια μέθοδος που χρησιμοποιεί ορυκτό καύσιμο και συνδέεται με μεγάλες ποσότητες εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα - για κάθε κιλό υδρογόνου μπορούν να παραχθούν έως και 30 kg CO₂. Οι τεχνολογίες CCS μπορούν επίσης να εφαρμοστούν στην αεριοποίηση του άνθρακα.

2.2.3. Αεριοποίηση βιομάζας

Η αεριοποίηση βιομάζας, που μερικές φορές αποκαλείται Waste-to-Gas, προβλέπει την παραγωγή υδρογόνου από πρώτες ύλες βιομάζας σε υψηλές θερμοκρασίες. Η μέθοδος παράγει μεταβλητά ποσοστά εκπομπών άνθρακα, αλλά αντιμετωπίζει επίσης το ζήτημα της περίσσειας οργανικών αποβλήτων που παράγονται από τη βιομηχανία.

Παρά την παραγωγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η μέθοδος παρουσιάζει καθαρά μηδενικούς συντελεστές εκπομπών, δεδομένου ότι χρησιμοποιεί ανανεώσιμες/βιώσιμες

οργανικές ύλες ως καύσιμο. Ωστόσο, αυτό μπορεί να δημιουργήσει πίεση στη γη για τρόφιμα και άλλα βιοκαύσιμα, καθώς και προκλήσεις για τη βιοποικιλότητα.

2.2.4. Ηλεκτρόλυση

Η ηλεκτρόλυση του νερού είναι μια διαδικασία κατά την οποία τα μόρια του νερού διασπώνται σε υδρογόνο και οξυγόνο μέσω της εφαρμογής ηλεκτρικής ενέργειας. Ως εκ τούτου, αναφέρεται επίσης ως "Power-to-Gas".



Ήταν η πρώτη εμπορική τεχνολογία για την παραγωγή καθαρού υδρογόνου, που χρονολογείται από τη δεκαετία του 1920, και είναι ικανή να παράγει υδρογόνο χωρίς άμεσες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, λόγω της εξέχουσας σημασίας της βιομηχανίας ορυκτών καυσίμων και της καθιερωμένης υποδομής SMR παγκοσμίως, μόνο το 4% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου βασίζεται σήμερα στην ηλεκτρόλυση.

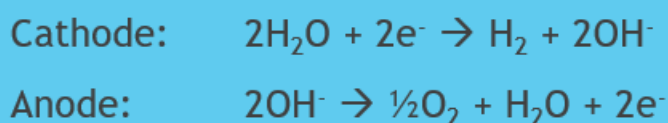
Οι κυψέλες ηλεκτρόλυσης είναι τα θεμελιώδη στοιχεία του συστήματος. Σε κάθε κυψέλη, μια πηγή ενέργειας συνδέεται με δύο ηλεκτρόδια - συνήθως κατασκευασμένα από ένα αδρανές μέταλλο - τα οποία τοποθετούνται στο νερό. Καθώς τα μόρια διασπώνται:

- Το υδρογόνο εμφανίζεται στην κάθοδο (όπου τα ηλεκτρόνια εισέρχονται στο νερό),
- Το οξυγόνο εμφανίζεται στην άνοδο (όπου τα ηλεκτρόνια φεύγουν).

Οι κυψέλες μπορούν να συνδεθούν παράλληλα ή σε σειρά προκειμένου να σχηματίσουν τη μονάδα ηλεκτρολύτη. Το παραγόμενο υδρογόνο ψύχεται, καθαρίζεται, συμπιέζεται και αποθηκεύεται, ενώ το οξυγόνο συνήθως αποβάλλεται στην ατμόσφαιρα.

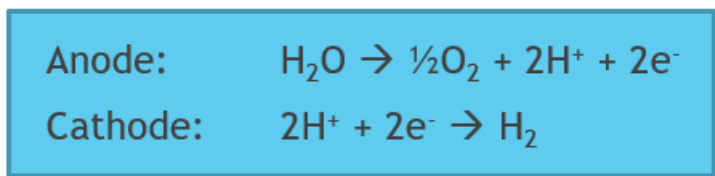
Υπάρχουν δύο κύριες παραλλαγές της διαδικασίας ηλεκτρόλυσης. Στην **αλκαλική** ηλεκτρόλυση, ένα διάφραγμα διαχωρίζει τα δύο ηλεκτρόδια και το συγκρότημα βυθίζεται σε υγρό ηλεκτρολύτη (διάλυμα βασικής ουσίας όπως το KOH ή το NaOH). Το υδρογόνο εξελίσσεται από την κάθοδο, όπου το νερό ανάγεται δίνοντας ανιόντα υδροξειδίου (OH⁻). Τα ανιόντα διέρχονται μέσω του διαφράγματος προς την άνοδο εντός του ηλεκτρικού πεδίου, ανασυνδυάζονται και παράγουν O₂.

Αλκαλική ηλεκτρόλυση

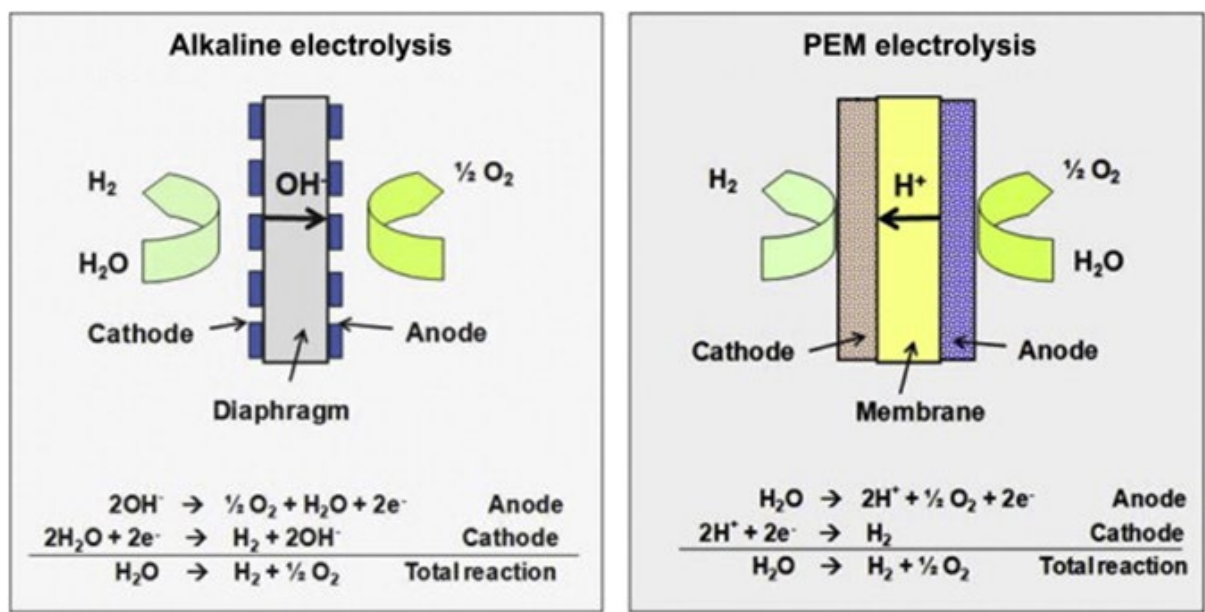


Στην ηλεκτρόλυση με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM), δεν απαιτείται υγρός ηλεκτρολύτης - αντίθετα, χρησιμοποιείται μια λεπτή πολυμερική μεμβράνη που είναι στεγανή σε αέρια. Στην άνοδο, το νερό οξειδώνεται παράγοντας οξυγόνο, ηλεκτρόνια και πρωτόνια (τα οποία στην πραγματικότητα είναι ιόντα υδρογόνου). Τα πρωτόνια περνούν μέσω της μεμβράνης στην κάθοδο όπου ανάγονται, παράγοντας αέριο υδρογόνο.

PEM Ηλεκτρόλυση



Υπάρχουν και άλλες παραλλαγές, ωστόσο οι αλκαλικές και οι PEM είναι οι πιο ώριμες και οι πιο εύκολα διαθέσιμες στο εμπόριο. Το σχήμα 10 απεικονίζει και τις δύο παραλλαγές.



Εικόνα 10. Αλκαλική and PEM ηλεκτρόλυση

Για κάθε τύπο ηλεκτρόλυσης, ένα βασικό σημείο που πρέπει να εξεταστεί είναι η πηγή της χρησιμοποιούμενης ηλεκτρικής ενέργειας: το υδρογόνο που παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης μπορεί να οδηγήσει σε μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, εάν χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές αντί του υπάρχοντος ενεργειακού δικτύου. Επί του παρόντος, στις περισσότερες χώρες, η ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου δεν είναι η ιδανική πηγή ενέργειας, επειδή είναι εντατική σε άνθρακα.

2.3. Τα χρώματα του υδρογόνου

Παρά το γεγονός ότι είναι άχρωμο αέριο, χρησιμοποιούνται διαφορετικά χρώματα για την αναγνώριση του υδρογόνου ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής του και τις σχετικές εκπομπές. Για παράδειγμα:

- ✓ Όταν το υδρογόνο παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης με χρήση ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας, ονομάζεται **πράσινο** υδρογόνο,
- ✓ Όταν παράγεται μέσω SMR, ονομάζεται **γκρίζο** υδρογόνο,
- ✓ Ωστόσο, όταν η δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα πραγματοποιείται μετά την SMR, τότε ονομάζεται **μπλε** υδρογόνο.

Στον Πίνακα 5 παρατίθενται τα διάφορα χρώματα του υδρογόνου, ενώ στον Πίνακα 6 παρατίθενται περαιτέρω λεπτομέρειες σχετικά με την ένταση άνθρακα και το κόστος των κύριων μεθόδων παραγωγής υδρογόνου.

Πίνακας 5. Τα χρώματα του υδρογόνου.

Colour code	Description	GHG Intensity
Black	Hydrogen produced using fossil fuel derived coal.	High
Brown	Hydrogen produced using fossil fuel derived lignite.	
Grey	Hydrogen produced using fossil natural gas (via SMR).	Medium
Blue	Hydrogen produced via SMR with CCS.	Low
Turquoise	Hydrogen extracted using the thermal splitting of methane.	Yields solid carbon
Green	Hydrogen produced using electrolysis powered by renewables.	Minimal
Purple Pink Red	Hydrogen produced used nuclear power as the energy source.	
White	Naturally occurring hydrogen.	

Πίνακας 6. Ένταση άνθρακα και κόστος του υδρογόνου ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής του.

Production Method	Carbon Intensity [kg CO ₂ /kg H ₂]	Cost [€/kg H ₂]	Cost with CCS [€/kg H ₂]
SMR (grey/blue hydrogen)	8.9 - 9.3	€ 1.17	€ 1.75
Coal Gasification (black hydrogen)	22.0 - 29.3	€ 1.29	€ 2.02
Biomass Gasification	2.7 - 32.8 (Net zero)	€ 2.09	€3.23
Water Electrolysis (green hydrogen - from renewable source)	< 4.4	€ 4.88	CCS not needed

Βίντεο → What Is Green Hydrogen And Will It Power The Future?

<https://www.youtube.com/watch?v=aYBGSfzaa4c>

Προτεινομενη βιβλιογραφία → Decarbonising end-use sectors: Practical insights on green hydrogen. [https://www.irena.org/-](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/May/IRENA_Coalition_Green_Hydrogen_2021.pdf?rev=ffd96aeed97c4d029b01aa3a93131e8b)

[/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/May/IRENA_Coalition_Green_Hydrogen_2021.pdf?rev=ffd96aeed97c4d029b01aa3a93131e8b](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/May/IRENA_Coalition_Green_Hydrogen_2021.pdf?rev=ffd96aeed97c4d029b01aa3a93131e8b)

ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ 2: ΚΟΥΙΖ

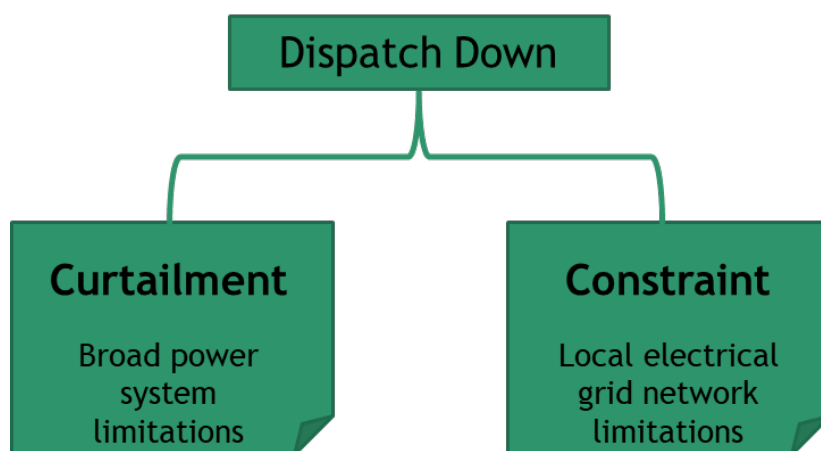
----- ΤΕΛΟΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ 2 -----

----- ΕΝΟΤΗΤΑ 3 -----

3.1. Power-to-Gas

Ένα από τα κύρια προβλήματα με την ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια, όπως η αιολική και η ηλιακή, είναι το γεγονός ότι είναι εγγενώς ασύγχρονη και δύσκολα προβλέψιμη. Για παράδειγμα, η ταχύτητα του ανέμου ποικίλλει κατά τη διάρκεια της ημέρας και κατά τη διάρκεια του έτους, ενώ η ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται επίσης από παράγοντες όπως η κάλυψη από σύννεφα, η τοποθεσία και η εποχικότητα.

Μερικές φορές, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας από μόνες τους δεν παράγουν αρκετή ηλεκτρική ενέργεια για να καλύψουν τη ζήτηση. Άλλες φορές, η υπεραφθονία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής ζήτησης ενέργειας θα έχει ως αποτέλεσμα διαθέσιμη ενέργεια που δεν μπορεί πάντα να απορροφηθεί από το σύστημα. Αυτό είναι γνωστό ως η κατανομή προς τα κάτω της ενέργειας.



Συζήτηση → Συνιστάται μια συζήτηση στην τάξη για να αναδειχθούν τρόποι αποθήκευσης - και στη συνέχεια χρήσης - της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές που καταλήγει να διατεθεί. Μέθοδοι όπως οι παραδοσιακές μπαταρίες και τα αντλητικά υδροηλεκτρικά (Σχήμα 11) θα πρέπει να συζητηθούν και να αξιολογηθούν από την άποψη των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων.



Εικόνα 11. Υδροηλεκτρική ενέργεια αντλησιοταμίευσης.

Στην πραγματικότητα, εδώ υπάρχει ένας σημαντικός ρόλος για το υδρογόνο: η διακύμανση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές αποτελεί ευκαιρία για το υδρογόνο ως φορέα ενέργειας και μέσο αποθήκευσης. Η κατανεμημένη ενέργεια έχει τη δυνατότητα να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί μέσω της υιοθέτησης τεχνολογιών Power-to-Gas (PtG).

Power-to-Gas είναι η διαδικασία κατά την οποία η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε χημική ενέργεια και αποθηκεύεται με τη μορφή αερίου, όπως το υδρογόνο. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί κατά τη διάρκεια περιόδων εκτός αιχμής ή περιόδων κατά τις οποίες υπάρχει περίσσεια ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας, αντί για την περικοπή της. Στη συνέχεια, αυτό το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξισορρόπηση του δικτύου όταν υπάρχει αυξημένη ζήτηση ή να παραδοθεί σε άλλες εφαρμογές: πρόκειται για μια κατάσταση στην οποία όλοι κερδίζουν.

Στα συστήματα PtG, το υδρογόνο παράγεται συνήθως μέσω ηλεκτρόλυσης νερού, πράγμα που σημαίνει ότι πρόκειται για πράσινο υδρογόνο. Τα συστήματα Power-to-Gas μπορούν να αποτελέσουν μια πολύτιμη λύση για την απαλλαγή από τον άνθρακα, παρουσιάζοντας πολλά πλεονεκτήματα:

- Το υδρογόνο παράγεται με καθαρό τρόπο χωρίς συναφείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (πράσινο υδρογόνο)

- Οι ανανεώσιμοι πόροι θα έχουν μειωμένη ανάγκη για περικοπή και λιγότερη πλεονάζουσα ενέργεια θα σπαταληθεί
- Το αποθηκευμένο υδρογόνο θα παρέχει πρόσθετη ασφάλεια και εξισορρόπηση του ενεργειακού εφοδιασμού
- Υπάρχει επίσης η δυνατότητα πώλησης πλεονάζοντος υδρογόνου για διάφορους άλλους σκοπούς

Ωστόσο, η τεχνολογία θέτει ορισμένες προκλήσεις:

- Υψηλό κόστος - τα συστήματα PtG εξακολουθούν να είναι ακριβά για εγκατάσταση και συντήρηση, αλλά γίνονται όλο και πιο αποδοτικά
- Ο καθορισμός του βέλτιστου μεγέθους και της φυσικής θέσης του(των) ηλεκτρολύτη(ων) δεν είναι πάντα εύκολος και απαιτεί στρατηγικό σχεδιασμό
- Οι μεγάλες ποσότητες υδρογόνου που παράγονται πρέπει να αποθηκευτούν κάπου

Συζήτηση → Συνιστάται μια συζήτηση στην τάξη για να προσδιοριστούν (προκαταρκτικά) πώς και πού μπορεί να γίνει η αποθήκευση υδρογόνου μεγάλης κλίμακας.

Μελέτες περιπτώσεων → Μια ευκαιρία να παρουσιαστούν υφιστάμενα και προτεινόμενα συστήματα Power-to-Gas σε όλο τον κόσμο.

3.1.1. Βασικά στοιχεία ηλεκτρολύτη

Στην καρδιά των περισσότερων συστημάτων Power-to-Gas βρίσκεται η ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού. Η λειτουργία των ηλεκτρολυτών και οι διαφορές μεταξύ αλκαλικής και PEM ηλεκτρόλυσης διερευνήθηκαν στο ενότητα 2 - συνιστάται μια γρήγορη επανάληψη.

Σε πρακτικό επίπεδο, τα κύρια στοιχεία μίας κυψέλης ηλεκτρόλυσης είναι:

- ✓ Η παροχή ρεύματος (ηλεκτρισμός)
- ✓ Η εισαγωγή νερού (H₂O)
- ✓ Οι έξοδοι του υδρογόνου (H₂) και του οξυγόνου (O₂)
- ✓ Η κάθοδος (αρνητικό φορτίο)
- ✓ Η άνοδος (θετικό φορτίο)
- ✓ Το διάφραγμα ή η μεμβράνη που διαχωρίζει τις δύο πλευρές

Άλλα στοιχεία μπορεί να περιλαμβάνουν αντλίες, εξαεριστήρες, δεξαμενές αποθήκευσης και άλλα εξαρτήματα.

Εργαστηριακό πείραμα → Σε αυτό το σημείο συνιστάται ένα εργαστηριακό πείραμα ώστε οι εκπαιδευόμενοι/ες να μπορούν να λειτουργήσουν έναν μικρό ηλεκτρολύτη 64 W. Οδηγίες μπορείτε να βρείτε στη διεύθυνση

<https://www.fuelcellstore.com/manuals/e206-e207-electrolyzer-65-230.pdf>

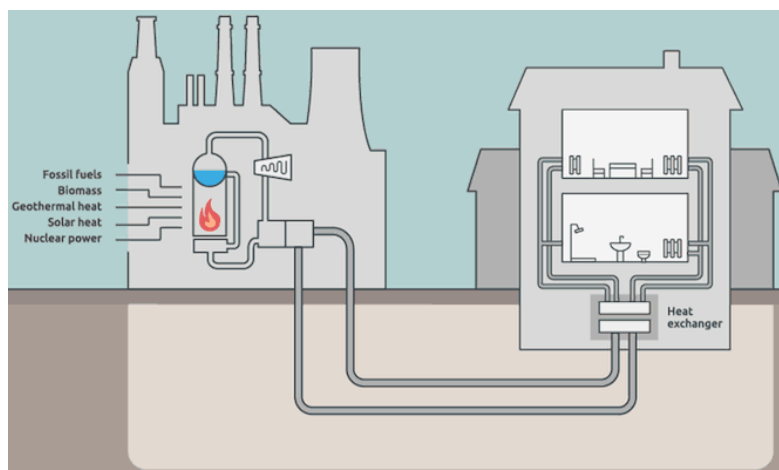
3.2. Ρόλοι του υδρογόνου στη θέρμανση

Πέρα από το ρόλο του ως μέσο αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, το υδρογόνο μπορεί επίσης να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο σε άλλους τομείς του ενεργειακού τομέα, όπως η θέρμανση.

3.2.1. Οικιακή και εμπορική θέρμανση

Σε περιοχές με ψυχρότερο κλίμα, ο οικιακός και ο εμπορικός τομέας απαιτούν συνήθως θέρμανση χώρων - δηλαδή θέρμανση χώρων για ανθρώπινη άνεση - καθώς και θέρμανση νερού. Σήμερα, στις περισσότερες χώρες όπου απαιτείται θέρμανση χώρων, αυτή παρέχεται κατά κανόνα μέσω της καύσης ορυκτών καυσίμων.

Υπάρχουν πιο βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις για την απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές για τη θέρμανση κατοικιών και εμπορικών χώρων, όπως η τηλεθέρμανση. Αυτός ο τύπος θέρμανσης σε τοπικό επίπεδο, που απεικονίζεται στο Σχήμα 12, μπορεί να τροφοδοτείται από μια ποικιλία ανανεώσιμων πηγών και είναι πιο αποδοτικός από τους μεμονωμένους λέβητες.



Εικόνα 12. Κινούμενα σχέδια τηλεθέρμανσης.

Άλλες βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις περιλαμβάνουν επίσης τις αντλίες θερμότητας, όταν λειτουργούν με καθαρή ηλεκτρική ενέργεια, και το υδρογόνο, ως υποκατάστατο του ορυκτού φυσικού αερίου.

3.2.2. Βιομηχανική θέρμανση

Όσον αφορά τη βιομηχανική θέρμανση, ωστόσο, η θέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες απαιτείται για μια σειρά από βιομηχανικές διεργασίες. Στην περίπτωση αυτή, εναλλακτικές λύσεις όπως οι αντλίες θερμότητας και η πυρηνική τηλεθέρμανση δεν μπορούν να παρέχουν τις απαιτούμενες υψηλές θερμοκρασίες.

Επομένως, η καύση ενός αερίου καυσίμου είναι η καταλληλότερη λύση για τη θέρμανση της βαριάς βιομηχανίας. Ως εναλλακτική λύση για το ορυκτό φυσικό αέριο (το οποίο είναι το πρότυπο σήμερα), το πράσινο υδρογόνο προκύπτει ως ένα εξαιρετικά καύσιμο αέριο που αποτελεί υποκατάστατο του μεθανίου με χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Ωστόσο, απαιτούνται μεγάλες ποσότητες του αερίου και, σήμερα, το πράσινο υδρογόνο εξακολουθεί να αποτελεί επιλογή υψηλού κόστους.

3.3. Ρόλοι του υδρογόνου στις μεταφορές

Το υδρογόνο έχει σημαντικό δυνητικό ρόλο στην απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές σε έναν ακόμη τομέα του ενεργειακού τομέα: τις μεταφορές. Ως καύσιμο, μπορεί είτε να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια σε μια κυψέλη καυσίμου για την τροφοδοσία ενός ηλεκτροκινητήρα, είτε να καεί σε έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης.

Σήμερα, παρόλο που το δίκτυο ανεφοδιασμού καυσίμων δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί ευρέως, τα οχήματα που κινούνται με υδρογόνο είναι εμπορικά διαθέσιμα σε όλες σχεδόν τις ευρωπαϊκές χώρες, τις Ηνωμένες Πολιτείες και πολλές ασιατικές χώρες.



Εικόνα 13. Ο πρώτος σταθμός ανεφοδιασμού υδρογόνου των ΗΠΑ με αγωγό στο Torrance της Καλιφόρνια.

3.3.1. Βαριές μεταφορές

Το υδρογόνο ως καύσιμο επιτρέπει μεγάλες αποστάσεις και γρήγορους χρόνους ανεφοδιασμού, γεγονός που το καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικό για μεγάλα εμπορικά οχήματα που εκτελούν μεγάλες αποστάσεις, όπως

- ✓ Βαρέα φορτηγά οχήματα (HGV): Το ενδιαφέρον για το υδρογόνο αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη δυναμική μεταξύ των κατασκευαστών φορτηγών - η Volvo, για παράδειγμα, αναμένει ότι οι μισές από τις ευρωπαϊκές πωλήσεις φορτηγών της θα είναι υδρογονοκίνητες ή μπαταριοκίνητες μέχρι το 2030.
- ✓ Λεωφορεία: Το Λονδίνο εξυπηρετείται ήδη από τουλάχιστον είκοσι λεωφορεία υδρογόνου, ενώ το Δουβλίνο διαθέτει τρία λεωφορεία υδρογόνου στους δρόμους του.
- ✓ Τρένα: Το Coradia iLint, το πρώτο τρένο με κινητήρα υδρογόνου στον κόσμο στη Γερμανία, μπορεί να διανύσει σχεδόν 1.200 χιλιόμετρα χωρίς ανεφοδιασμό.



Εικόνα 14. Το τρένο Coradia iLint που κινείται με υδρογόνο.

- ✓ Πλοία: Έχουν παρουσιαστεί ιδέες για πλοία που κινούνται με υδρογόνο και αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη λύση για θαλάσσιες μεταφορές χωρίς εκπομπές ρύπων.
- ✓ Αεροπλάνα: Ένας άλλος τομέας που είναι δύσκολο να μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, οι αερομεταφορές θα πρέπει να εξετάσουν καύσιμα όπως το υδρογόνο προκειμένου να μειώσουν τις εκπομπές. Μια ιδέα, το Airbus ZEROe, θα μπορούσε να τεθεί σε λειτουργία μέχρι το 2035 - περισσότερες πληροφορίες στο <https://youtu.be/5Fi65k2K3Mw>

3.3.2. Ελαφρές μεταφορές

Οι ελαφρές μεταφορές μικρών αποστάσεων μπορούν επίσης να τροφοδοτηθούν με υδρογόνο. Για παράδειγμα, τα αυτοκίνητα με κινητήρα υδρογόνου που είναι διαθέσιμα στο εμπόριο περιλαμβάνουν το Toyota Mirai, στην εικόνα 15, και το Hyundai Nexu.



Εικόνα 15. Το Toyota Mirai.

Ωστόσο, ενώ το υδρογόνο έχει απόλυτο νόημα για τις βαριές μεταφορές, ορισμένοι αμφισβητούν την υπεροχή του έναντι μιας τυπικής ηλεκτρικής κίνησης με μπαταρία, σε μικρότερα οχήματα. Λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες που σχετίζονται με την παραγωγή, τη συμπίεση και τη μεταφορά του υδρογόνου, σε συνδυασμό με την περιορισμένη απόδοση της μετατροπής του σε ηλεκτρική ενέργεια, το μέλλον του υδρογόνου στο πλαίσιο των ελαφρών μεταφορών δεν είναι ομόφωνο.

Προτεινόμενη βιβλιογραφία → “Why Hydrogen Will Never Be The Future Of Electric Cars” του James Morris. <https://www.forbes.com/sites/jamesmorris/2020/07/04/why-hydrogen-will-never-be-the-future-of-electric-cars/?sh=1e8f1dfd12fa>

Συζήτηση → Συνιστάται μια συζήτηση στην τάξη για να αναλυθεί η καταλληλότητα του υδρογόνου ως καυσίμου για τις βαριές και κυρίως τις ελαφρές μεταφορές.

ΣΥΝΕΧΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ 3: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΗ

----- Τέλος Ενότητας 3 -----

----- ΕΝΟΤΗΤΑ 4 -----

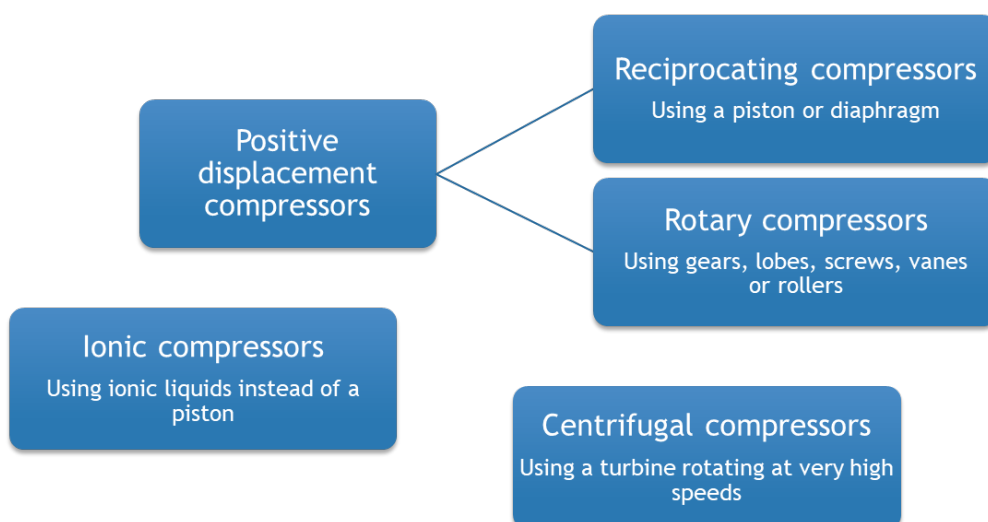
4.1. Συμπίεση και αποθήκευση υδρογόνου

Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί στο έδαφος ως αέριο- ωστόσο, αυτό απαιτεί συμπίεση - η πυκνότητά του είναι τόσο χαμηλή που 1 kg υδρογόνου σε ατμοσφαιρική πίεση (1 atm) καταλαμβάνει περίπου 12 m³.

Το υδρογόνο παράγεται συνήθως σε σχετικά χαμηλές πιέσεις (<30 bar) και η συμπίεση είναι συχνά απαραίτητη αμέσως μετά την παραγωγή. Για παράδειγμα, 1 kg υδρογόνου συμπιεσμένο στα 100 bar καταλαμβάνει μόνο 0,13 m³ - πολύ λιγότερο από τα αρχικά 12 m³.

Οι συμπιεστές θετικής εκτόπισης μπορεί να είναι παλινδρομικοί ή περιστροφικοί. Ο πρώτος χρησιμοποιεί έναν κινητήρα με γραμμική κίνηση για να κινεί ένα διάφραγμα μπρος-πίσω, μειώνοντας έτσι τον όγκο που καταλαμβάνει το αέριο μέσω αυτής της κίνησης. Ο δεύτερος, από την άλλη πλευρά, λειτουργεί μέσω της περιστροφής γραναζιών, λοβών ή κυλίνδρων. Υπάρχει επίσης μια τρίτη παραλλαγή των συμπιεστών θετικής εκτόπισης: οι ιοντικοί συμπιεστές έχουν γραμμική κίνηση αλλά χρησιμοποιούν ιοντικά υγρά αντί για διαφράγματα.

Όσον αφορά τους φυγοκεντρικούς συμπιεστές, είναι συνήθως η καταλληλότερη επιλογή για εφαρμογές σε αγωγούς λόγω της υψηλής απόδοσης και του μέτριου λόγου συμπίεσης. Λειτουργούν με την περιστροφή ενός στροβίλου σε πολύ υψηλές ταχύτητες για τη συμπίεση του αερίου και πρέπει να λειτουργούν σε ταχύτητες τρεις φορές ταχύτερες από αυτές των συμπιεστών φυσικού αερίου για να επιτευχθεί ο ίδιος λόγος συμπίεσης λόγω της χαμηλής μοριακής μάζας του υδρογόνου.



Το κόστος συμπίεσης δεν είναι ασήμαντο - στην πραγματικότητα αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος του κόστους CDS (συμπίεση, αποθήκευση και διανομή). Ο αντίκτυπος της συμπίεσης στο κόστος του υδρογόνου είναι διττός και περιλαμβάνει το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία του εξοπλισμού και το κόστος κεφαλαίου του ίδιου του συμπιεστή.

Η συμπίεση του υδρογόνου επιτρέπει την αποθήκευσή του σε σύνθετες δεξαμενές, όπως αυτή που παρουσιάζεται στην εικόνα 16.



Εικόνα 16. Σύνθετη δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου.

4.1.1. Υγρό υδρογόνο

Το υδρογόνο μπορεί επίσης να αποθηκευτεί επίγεια ως υγρό, σε σχετικά χαμηλές πιέσεις και υψηλή ενεργειακή πυκνότητα. Ωστόσο, απαιτούνται κρυογονικές θερμοκρασίες: όπως μελετήθηκε στην ενότητα 2, το σημείο βρασμού του υδρογόνου είναι πολύ χαμηλό ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$) και το θερμοκρασιακό εύρος της υγρής του φάσης είναι στενό (περίπου $20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Το υγρό υδρογόνο πρέπει να αποθηκεύεται σε κρυογονικές δεξαμενές, όπως αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 17.



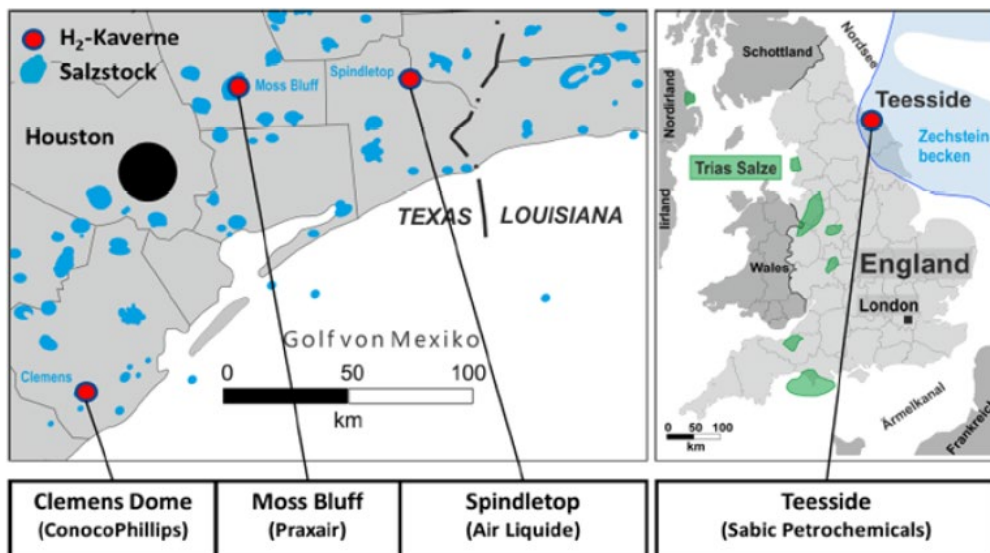
Εικόνα 17. Μια κρυογονική δεξαμενή για την αποθήκευση υγρού υδρογόνου.

4.1.2. Υπόγεια αποθήκευση

Μεγάλες ποσότητες ασυμπίεστου υδρογόνου μπορούν να αποθηκευτούν υπόγεια, για παράδειγμα σε σπήλαια αλατιού ή εξαντλημένα κοιτάσματα φυσικού αερίου. Η αποθήκευση φυσικού αερίου (μεθάνιο) σε υπόγειες κοιλότητες είναι μια ευρέως διαδεδομένη πρακτική που εφαρμόζεται εδώ και δεκαετίες.

Ορισμένα πλεονεκτήματα της υπόγειας αποθήκευσης υδρογόνου είναι το χαμηλό κόστος, η υψηλή λειτουργική ασφάλεια και η καλή ικανότητα στεγανοποίησης. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή περιορίζεται φυσικά σε γεωλογικά κατάλληλες περιοχές με τις κατάλληλες γεωλογικές προϋποθέσεις.

Στις τοποθεσίες όπου το υδρογόνο αποθηκεύεται σε αλατούχα σπήλαια περιλαμβάνονται το Teesside (στο Ηνωμένο Βασίλειο) και ορισμένες περιοχές του Τέξας (στις Ηνωμένες Πολιτείες). Οι περιοχές αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 18.



Εικόνα 18. Αποθήκευση υδρογόνου σε σπήλαια άλατος στις ΗΠΑ και το Ηνωμένο Βασίλειο.

[Πηγή: <https://energnet.eu/wp-content/uploads/2021/02/3-Hevin-Underground-Storage-H2-in-Salt.pdf>]

4.2. Διανομή υδρογόνου και σωληνώσεις

Μικρές και μεσαίες ποσότητες υδρογόνου μπορούν να μεταφερθούν μέσω οδικών μεταφορών, ιδίως σε μικρότερες αποστάσεις.

Το συμπιεσμένο αέριο υδρογόνο μπορεί να μεταφερθεί με φορτηγά που ονομάζονται tube trailers, ενώ το υγρό υδρογόνο μπορεί να μεταφερθεί με υπερ-μονωμένα, κρυογενικά βυτιοφόρα που ονομάζονται liquid tankers.

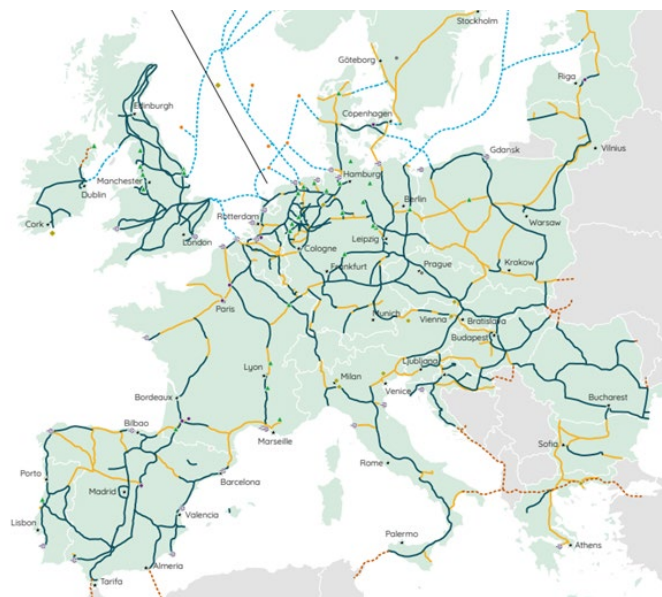


Εικόνα 19. Ένα ρυμουλκούμενο με σωλήνες (αριστερά) και ένα βυτιοφόρο υγρού (δεξιά)

Για μεταφορές σε μεγάλες αποστάσεις και μεγάλες ποσότητες, το αέριο υδρογόνο μπορεί επίσης να μεταφερθεί μέσω αγωγών - όπως σήμερα το φυσικό αέριο. Γενικά, η μετατροπή των αγωγών φυσικού αερίου για τη μεταφορά μίγματος φυσικού αερίου και υδρογόνου (<15% H₂) μπορεί να απαιτήσει μικρές τροποποιήσεις. Ωστόσο, η μετατροπή αυτών των αγωγών για τη μεταφορά καθαρού υδρογόνου μπορεί να απαιτήσει πιο ουσιαστικές τροποποιήσεις.

Το υδρογόνο μπορεί να αναμιχθεί με το ορυκτό φυσικό αέριο σε πολλούς τύπους υφιστάμενων αγωγών, να το ενισχύσει ή, τελικά, να το αντικαταστήσει πλήρως. Πολλά έργα έγχυσης σε δίκτυο υπάρχουν σε όλο τον κόσμο, συμπεριλαμβανομένων ορισμένων στο Ηνωμένο Βασίλειο: το έργο H₂1 Leeds City Gate παρουσιάζει ένα σχέδιο δικτύου υδρογόνου 100% για την πόλη του Leeds, το οποίο είναι οικονομικά εφικτό και τεχνικά εφικτό, ενώ το έργο HyDeploy πραγματοποίησε την πρώτη έγχυση υδρογόνου σε δίκτυο στον κόσμο.

Το 2020, η πρωτοβουλία European Hydrogen Backbone (EHB) παρουσίασε το όραμά της για μια ειδική πανευρωπαϊκή υποδομή υδρογόνου, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 20.



Σχήμα 20. Η προτεινόμενη υποδομή EHB, με έμφαση στους νέους και επαναχρησιμοποιημένους αγωγούς.

[Πηγή: <https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2022/04/EHB-A-European-hydrogen-infrastructure-vision-covering-28-countries.pdf>]

Αρχικά, η υποδομή ΕΗΒ σχεδιαζόταν να εκτείνεται σε 10 ευρωπαϊκές χώρες, με βάση επαναχρησιμοποιημένους υφιστάμενους αγωγούς φυσικού αερίου καθώς και νέες υποδομές υδρογόνου. Το όραμα επεκτάθηκε σε 28 χώρες το 2022, με ένα δίκτυο 53.000 χιλιομέτρων να προτείνεται για το 2040, με εκτιμώμενο κόστος 80-143 δισεκατομμυρίων ευρώ.

Η πρωτοβουλία αποτελείται από μια ομάδα 31 εταιρειών υποδομών φυσικού αερίου, με τις τελευταίες επικαιροποιήσεις του έργου να αποσκοπούν στην επιτάχυνση της υλοποίησης του ΕΗΒ προκειμένου να εξαλειφθεί σταδιακά η εξάρτηση της Ευρώπης από τα ορυκτά καύσιμα από τη Ρωσία.

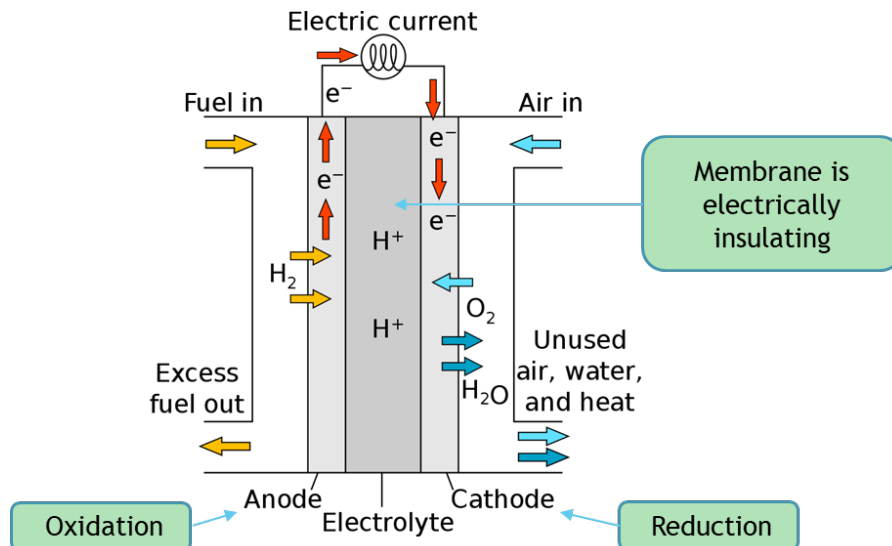
4.3. Μετατροπή του υδρογόνου σε ενέργεια

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του υδρογόνου ως φορέα ενέργειας είναι το γεγονός ότι η μετατροπή μεταξύ υδρογόνου και ηλεκτρικής ενέργειας είναι αντιστρεπτή και οι δύο φορείς ενέργειας μπορούν να θεωρηθούν συμπληρωματικοί. Όταν χρειάζεται, το υδρογόνο μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια με δύο βασικούς τρόπους: ηλεκτροχημικά (σε μια κυψέλη καυσίμου) ή μέσω καύσης.

4.3.1. Κυψέλλες καυσίμου

Μια κυψέλη καυσίμου είναι μια ηλεκτροχημική κυψέλη που μετατρέπει τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική. Αυτό συμβαίνει μέσω μιας αντίδρασης μεταξύ υδρογόνου και οξυγόνου.

Απαιτούν μια συνεχή πηγή υδρογόνου και οξυγόνου (συχνά από τον αέρα). Εάν χρησιμοποιείται πράσινο υδρογόνο, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται είναι καθαρή - η περίσσεια υδρογόνου και οι υδρατμοί είναι τα μόνα παραπροϊόντα.



Εικόνα 21. Σχηματική αναπαράσταση κυψέλης καυσίμου.

Οι κυψέλες καυσίμου διαθέτουν μια άνοδο, όπου εισέρχεται το καύσιμο (υδρογόνο), και μια κάθοδο, όπου παρέχεται οξυγόνο. Οι δύο πλευρές χωρίζονται από μια ηλεκτρικά μονωτική μεμβράνη. Η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου χωρίζεται σε τέσσερα βασικά στάδια:

1. Ένας καταλύτης προκαλεί τη διάσπαση ατόμων υδρογόνου σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια
2. Τα πρωτόνια ταξιδεύουν μέσω της μεμβράνης προς την κάθοδο
3. Τα ηλεκτρόνια αναγκάζονται στη συνέχεια να ταξιδέψουν σε ένα εξωτερικό κύκλωμα
4. Στη συνέχεια παρέχεται ισχύς



Οι κυψέλες καυσίμου συναρμολογούνται συνήθως σε μια στοίβα, όπου τα παραγόμενα ρεύματα αθροίζονται.

Έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογών: όταν συνδυάζονται με έναν ηλεκτρικό κινητήρα, μπορούν να τροφοδοτήσουν πολλά μέσα μεταφοράς, όπως αυτοκίνητα, τρένα, λεωφορεία, φορτηγά, θαλάσσια σκάφη και αεροπλάνα. Μπορούν επίσης να τροφοδοτήσουν συσκευές όπως προσωπικές ηλεκτρονικές συσκευές, φακούς, παιχνίδια, μη επανδρωμένα αεροσκάφη, ακόμη και στρατιωτικές εφαρμογές, καθώς και συστήματα εφεδρικής τροφοδοσίας για εφαρμογές εκτός δικτύου, όπως φωτισμός εργασίας, κάμερες ασφαλείας, συστήματα παρακολούθησης περιβάλλοντος και ελέγχου διεργασιών.

Οι κυψέλες καυσίμου δεν έχουν σημαντικά κινούμενα μέρη και δεν περιλαμβάνουν καύση. Ως εκ τούτου, είναι εξαιρετικά αξιόπιστες. Ωστόσο, τα εξαρτήματα είναι ακριβά (μεμβράνες, συλλέκτες ρεύματος κ.λπ.), το υδρογόνο υψηλής καθαρότητας εξακολουθεί να είναι σχετικά ακριβό και η συναρμολόγησή τους πρέπει να είναι πολύ ακριβής για την αποφυγή διαρροών.

Εργαστηριακό πείραμα → Σε αυτό το σημείο συνιστάται ένα εργαστηριακό πείραμα ώστε οι μαθητές να μπορούν να λειτουργήσουν μια μικρή στοίβα κυψελών καυσίμου 1W με πέντε αρθρωτές κυψέλες 200mW. Οι κυψέλες μπορούν να προστεθούν ή να αφαιρεθούν ανάλογα με τις ανάγκες. Οδηγίες μπορείτε να βρείτε στη διεύθυνση <https://www.fuelcellstore.com/manuals/f108-f109-f110-fuel-cell-stacks.pdf>

4.3.2. Καύση υδρογόνου

Η καύση είναι μια εξώθερμη χημική διεργασία κατά την οποία μια ουσία αντιδρά με οξυγόνο και εκλύει θερμότητα. Κατά την καύση του υδρογόνου, αυτό αντιδρά με το οξυγόνο προς σχηματισμό νερού, με την έκλυση ενέργειας:



Η αντίδραση αυτή χρησιμοποιείται συνήθως στον τομέα του διαστήματος για την τροφοδοσία πυραυλοκινητήρων.

Η αντίδραση αυτή χρησιμοποιείται συνήθως στον τομέα του διαστήματος για την τροφοδοσία πυραυλοκινητήρων.

Το υδρογόνο καίγεται με μια ανοιχτό μπλε φλόγα που είναι σχεδόν αόρατη στο φως της ημέρας - η φλόγα μπορεί να φαίνεται κίτρινη εάν υπάρχουν ακαθαρσίες στον αέρα, όπως σκόνη. Μια καθαρή φλόγα υδρογόνου δεν παράγει καπνό και η θερμοκρασία της φλόγας είναι σχετικά υψηλή.

Πίνακας 7. Σύγκριση της θερμοκρασίας μιας φλόγας υδρογόνου με εκείνες άλλων καυσίμων.

Καύσιμο	Φλόγα Θερμοκρασία στον αέρα
Υδρογόνο	2,045 °C
Μεθάνιο	1,957 °C
Προπάνιο	1,980 °C
Κερί	1,000 °C

Επιπλέον, οι φλόγες υδρογόνου έχουν χαμηλή ακτινοβολούμενη θερμότητα - μπορεί να μην αισθανθείτε θερμότητα μέχρι να βρεθείτε πολύ κοντά (ή μέσα) στη φλόγα. Έτσι, η χρήση ανιχνευτών φλόγας, όπως οι κάμερες θερμικής απεικόνισης, είναι ο καλύτερος τρόπος για την ανίχνευση φλόγας υδρογόνου.

Οι εφαρμογές για την καύση υδρογόνου περιλαμβάνουν:

- ✓ Μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου (ΜΕΚ): είναι σχεδόν πανομοιότυπες με τις παραδοσιακές μηχανές ανάφλεξης με σπινθήρα, αλλά χρησιμοποιούν υδρογόνο ως καύσιμο. Οι ΜΕΚ υδρογόνου τείνουν να είναι πιο αποδοτικές σε υψηλά φορτία, ενώ οι κυψέλες καυσίμου αποδεικνύονται γενικά πιο αποδοτικές σε χαμηλότερα φορτία.
- ✓ Ως εναλλακτική λύση για το μεθάνιο: το υδρογόνο μπορεί να καεί και να χρησιμοποιηθεί για τις ίδιες εφαρμογές με το ορυκτό φυσικό αέριο, συμπεριλαμβανομένης της καύσης σε αεριοστρόβιλους, τη θέρμανση και το μαγείρεμα στο σπίτι και τη βιομηχανική θέρμανση.

Συζήτηση → Συνιστάται μια συζήτηση στην τάξη για να τονιστούν οι βασικές διαφορές μεταξύ της χρήσης του υδρογόνου σε κυψέλες καυσίμου και στην καύση και να συζητηθεί το θέμα των εκπομπών ΝΟ_x κατά την καύση του υδρογόνου.

ΣΥΝΕΧΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ 4: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

----- Τέλος Ενότητας 4 -----

----- ΕΝΟΤΗΤΑ 5 -----

5.1. Το υδρογόνο στην πετροχημική βιομηχανία

Τα διυλιστήρια πετρελαίου και η παραγωγή αμμωνίας κυριαρχούν σήμερα στην παγκόσμια ζήτηση υδρογόνου, αντιπροσωπεύοντας πάνω από το 90% της συνολικής κατανάλωσης. Το πρόβλημα επιδεινώνεται από το γεγονός ότι αυτές οι εφαρμογές που σχετίζονται με τα ορυκτά καύσιμα εξυπηρετούνται συνήθως από ιδιόκτητες, μεγάλης κλίμακας μονάδες αναμόρφωσης ατμομεθανίου (SMR).

Στα διυλιστήρια πετρελαίου λαμβάνουν χώρα δύο διεργασίες που περιλαμβάνουν υδρογόνο: υδρογονοκατεργασία και υδρογονοπυρόλυση.

5.1.1. Υδρογονοκατεργασία

Η υδρογονοεπεξεργασία - ή καταλυτική επεξεργασία με υδρογόνο - απομακρύνει τα ανεπιθύμητα υλικά από τα κλάσματα πετρελαίου με επιλεκτική αντίδραση των υλικών αυτών με υδρογόνο. Η διεργασία λαμβάνει χώρα σε αντιδραστήρα, σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες.

Αυτά τα ανεπιθύμητα υλικά περιλαμβάνουν θείο, άζωτο και αρωματικά, τα οποία περιέχονται φυσικά στο πετρέλαιο. Η διαδικασία αναβαθμίζει την ποιότητα των ατμοσφαιρικών εκπομπών των καυσίμων που προκύπτουν, μειώνοντας το επίπεδο θείου και οργανομεταλλικών.

Η αυξανόμενη ζήτηση για ορυκτά καύσιμα μεταφοράς κατά τον 20ό αιώνα, σε συνδυασμό με τις προσπάθειες της βιομηχανίας διύλισης να ανταποκριθεί στην παγκόσμια τάση για καθαρότερα καύσιμα, σημαίνει ότι η υδρογονοεπεξεργασία έχει γίνει μια όλο και πιο σημαντική διεργασία διύλισης.

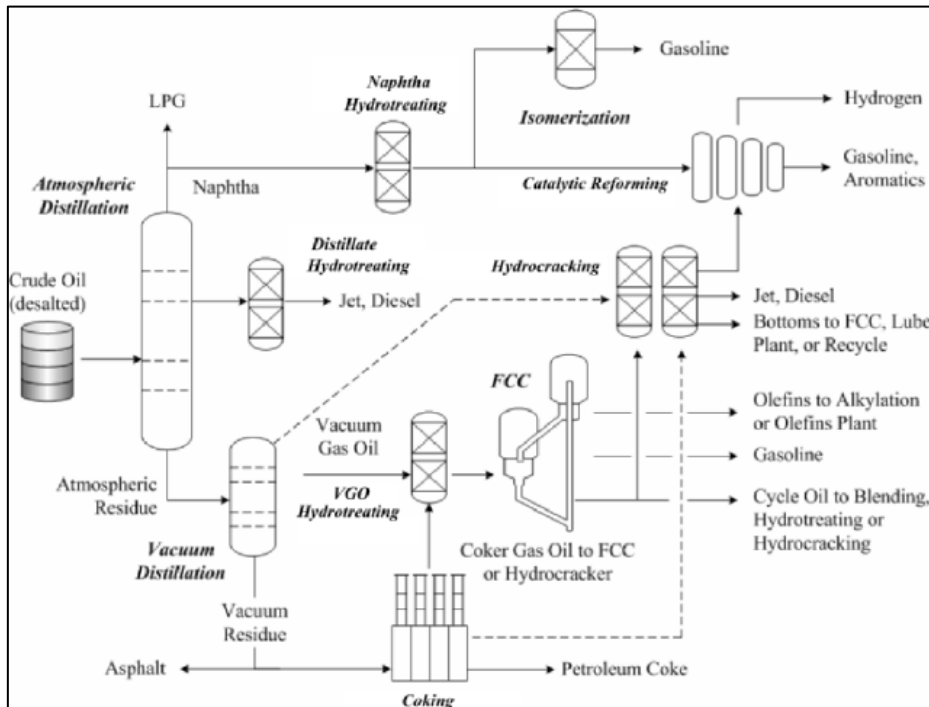
Ομοίως, μια διαδικασία που ονομάζεται υδρογονοαποθείωση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση του θείου από το φυσικό αέριο, εάν απαιτείται.

5.1.2. Υδρογονοπυρόλυση

Η υδρογονοπυρόλυση είναι μια διαδικασία κατά την οποία το βαρύ πετρέλαιο διασπάται σε ελαφρύτερα, πιο πολύτιμα προϊόντα, όπως η βενζίνη, η κηροζίνη και το ντίζελ. Η διεργασία λαμβάνει χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, παρουσία καταλύτη.

Η υδρογονοπυρόλυση συνίσταται στη διάσπαση δεσμών άνθρακα-άνθρακα που συνοδεύεται από υδρογόνωση. Η διεργασία διαδραματίζει βασικό ρόλο στην επεξεργασία

του πετρελαίου, παρέχοντας καύσιμα υψηλής αξίας και αναβαθμίζοντας πρώτες ύλες χαμηλής ποιότητας, ώστε να καταστούν κατάλληλες για περαιτέρω επεξεργασία.



Εικόνα 22. Διεργασίες υδρογονοεπεξεργασίας και υδρογονοσυρόλυσης.

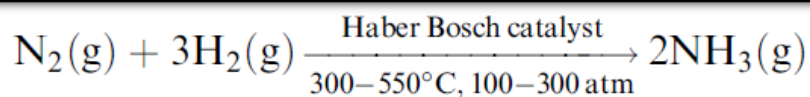
[Πηγή: Robinson, Paul & Dolbear, Geoff. (2007). Hydrotreating and Hydrocracking: Fundamentals]

5.2. Παραγωγή αμμωνίας

Σήμερα, περίπου το ήμισυ του υδρογόνου στον κόσμο χρησιμοποιείται για την παραγωγή αμμωνίας (NH₃). Αυτή η ένωση αποτελεί τη βάση για τη βιομηχανία αζωτούχων λιπασμάτων, η οποία διαδραματίζει βασικό ρόλο στη γεωργία.

Η ίδια η αμμωνία δεν είναι αέριο του θερμοκηπίου - ωστόσο, οι εκπομπές αμμωνίας πρέπει να αντιμετωπιστούν. Η οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρώδη από βακτήρια είναι υπεύθυνη για τις παγκόσμιες εκπομπές οξειδίου του αζώτου (N₂O), γνωστού και ως "αέριο γέλιου" - ένα ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου και μια σημαντική αιτία της καταστροφής του όζοντος. Σήμερα, η συντριπτική πλειονότητα των εκπομπών αμμωνίας προέρχεται από γεωργικές διαδικασίες και πρακτικές.

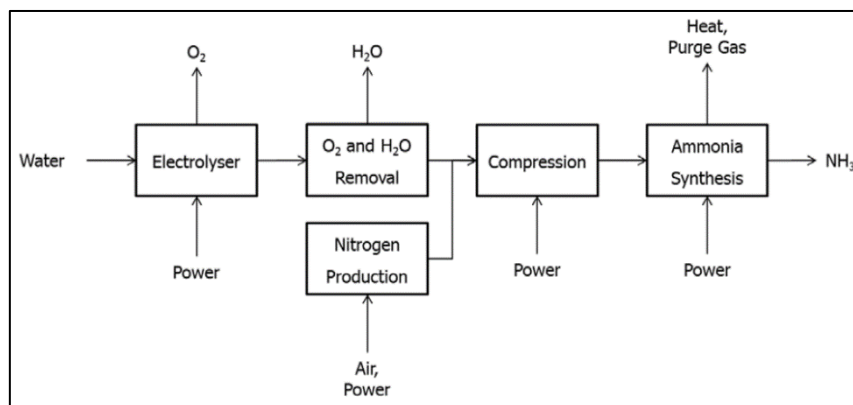
Για την παραγωγή αμμωνίας, το υδρογόνο συνδυάζεται με το άζωτο, σύμφωνα με την αντίδραση:



Αυτό ονομάζεται διεργασία Haber-Bosch - μια ώριμη, χαμηλού κόστους διεργασία που αναπτύχθηκε στις αρχές του 20ου αιώνα από τον Γερμανό χημικό Fritz Haber και μετατράπηκε σε βιομηχανική διεργασία για την παραγωγή λιπασμάτων από τον Carl Bosch.

5.2.1. Power-to-Ammonia

Η παραγωγή αμμωνίας μπορεί επίσης να αποτελέσει λύση για την αποθήκευση υδρογόνου. Η ιδέα - που ονομάζεται Power-to-Ammonia (P2A) - συνίσταται στην παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης και στη συνέχεια στη μετατροπή του σε αμμωνία.



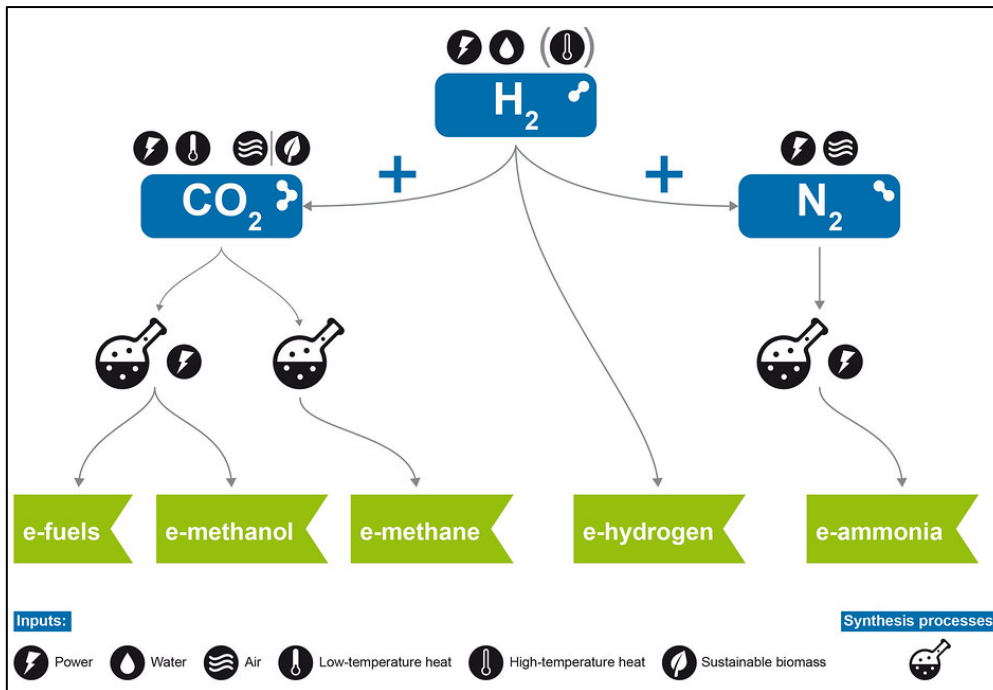
Εικόνα 23. Η ιδέα Power-to-Ammonia.

Μεγάλο μέρος του παγκόσμιου υδρογόνου χρησιμοποιείται σήμερα για την παραγωγή αμμωνίας, αλλά όχι με βιώσιμο τρόπο όπως η P2A. Η διαδικασία παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα:

- ✓ Η αμμωνία έχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, οπότε η μεταφορά και η αποθήκευσή της σε μεγάλες ποσότητες είναι πιο εφικτή από ό,τι μόνο το καθαρό υδρογόνο,
- ✓ Μπορεί να μεταφερθεί και να αποθηκευτεί ως υγρό,
- ✓ Η χημική βιομηχανία μπορεί να τη χρησιμοποιήσει ως ανανεώσιμη πρώτη ύλη για την παραγωγή λιπασμάτων και άλλων προϊόντων.

Ωστόσο, η μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος της αμμωνίας με την παραγωγή της μέσω ηλεκτρόλυσης είναι δυνατή μόνο εάν η χρησιμοποιούμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι ανανεώσιμη. Με άλλα λόγια, η P2A παρουσιάζει περιβαλλοντικό πλεονέκτημα μόνο εάν χρησιμοποιεί πράσινο υδρογόνο.

Στο Σχήμα 24 παρουσιάζεται η ιδέα Power-to-Ammonia στο πλαίσιο της "Power-to-X" - της μετατροπής του υδρογόνου σε διάφορα καύσιμα.

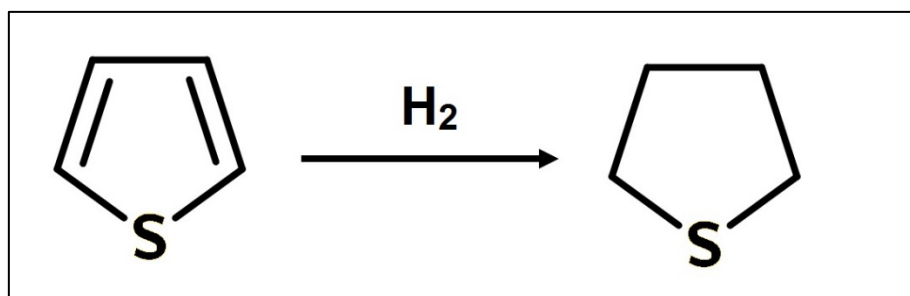


Εικόνα 25. Επισκόπηση των εισροών, των διαδικασιών και των προϊόντων Power-to-X [Πηγή: Oeko-Institut].

Συζήτηση → Συνιστάται μια συζήτηση στην τάξη για να προσδιοριστεί πώς το σημερινό σενάριο του υδρογόνου στην πετροχημική βιομηχανία θα μπορούσε να γίνει πιο βιώσιμο.

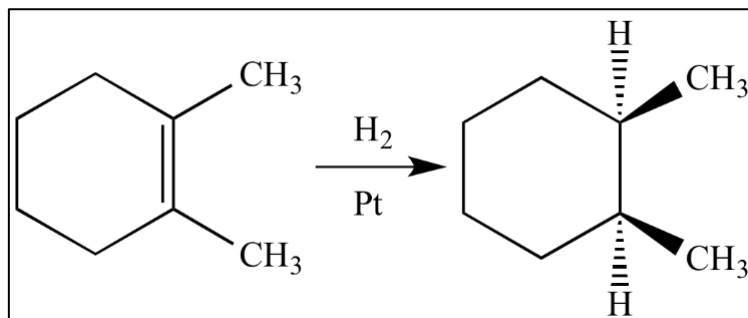
5.3. Υδρογόνωση

Η υδρογόνωση είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιεί υδρογόνο για τον κορεσμό οργανικών ενώσεων. Συνιστάται στην προσθήκη ζευγών ατόμων υδρογόνου σε μόρια τα οποία - παρουσία καταλύτη όπως η πλατίνα ή το νικέλιο - μειώνουν τους διπλούς και τριπλούς δεσμούς σε απλούς δεσμούς.



Εικόνα 26. Υδρογόνωση.

Η υδρογόνωση παράγει, για παράδειγμα, κορεσμένο λίπος. Στο παράδειγμα που ακολουθεί παρουσιάζεται ο κορεσμός ενός οργανικού μορίου με τη χρήση πλατίνας ως καταλύτη, κατά τον οποίο ο διπλός δεσμός μειώνεται.



Εικόνα 27. Παράδειγμα υδρογόνωσης με χρήση πλατίνας.

Η βιομηχανία τροφίμων εκτελεί εκτενώς υδρογόνωση κατά την επεξεργασία φυτικών ελαίων: η αλλαγή του βαθμού κορεσμού ορισμένων λιπών μπορεί να αλλάξει ορισμένες σημαντικές φυσικές ιδιότητες (όπως το σημείο τήξης τους) καθιστώντας τα υγρά έλαια ημιστερεά. Η μαργαρίνη είναι ένα πολύ γνωστό προϊόν υδρογόνωσης - στην πραγματικότητα, για την παραγωγή ενός τόνου μαργαρίνης απαιτούνται πάνω από 7 kg υδρογόνου.

Η διεργασία πραγματοποιείται επίσης στη χημική και τη φαρμακευτική βιομηχανία. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η υδρογόνωση χρησιμοποιείται για την τροποποίηση μορίων και την παροχή διαφόρων οργανικών ενώσεων που υποστηρίζουν την παραγωγή διαφόρων προϊόντων και φαρμάκων.

5.4. Άλλοι ρόλοι του υδρογόνου στη βιομηχανία

Σήμερα, εκτός από την πετροχημική βιομηχανία και τις διεργασίες υδρογόνωσης, το υδρογόνο χρησιμοποιείται επίσης ως πρώτη ύλη από διάφορες βιομηχανίες, όπως:

5.4.1. Κατασκευή ημιαγωγών

Τα τσιπ ημιαγωγών είναι ηλεκτρικά κυκλώματα με πολλά στοιχεία και αποτελούν αναπόσπαστο μέρος των επεξεργαστών υπολογιστών, των τσιπ μνήμης και των μικροελεγκτών. Οι κατασκευαστές ημιαγωγών, όπως η Intel, η Analog Devices, η Samsung και η Toshiba, χρησιμοποιούν υδρογόνο σε διάφορα στάδια των διαδικασιών κατασκευής τους.

Οι διαδικασίες αυτές περιλαμβάνουν κυρίως:

- Λιθογραφία → Μια διαδικασία που χρησιμοποιείται στη μικροκατασκευή για τη μεταφορά γεωμετρικών σχεδίων σε μια επιφάνεια. Στη λιθογραφία, το υδρογόνο δρα ως αέριο καθαρισμού ή θωράκισης.
- Εναπόθεση λεπτών υμενίων → Η τεχνολογία εφαρμογής ενός πολύ λεπτού υμενίου υλικού σε μια επιφάνεια ή σε μια άλλη εναποτιθέμενη επίστρωση. Στην εναπόθεση λεπτών υμενίων, το υδρογόνο δρα ως αέριο-φορέας, μεταφέροντας τα υλικά

εναπόθεσης σε θάλαμο κενού όπου πραγματοποιείται η εναπόθεση. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί αργό, αν και το υδρογόνο παράγει καλύτερα αποτελέσματα.

5.4.2. Υδρογόνο ως ψυκτικό μέσο

Το υδρογόνο είναι ένα εξαιρετικό ψυκτικό μέσο και χρησιμοποιείται συχνά για την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας για την ψύξη στροβιλογεννητριών, ιδίως σε γεννήτριες μεγάλης ισχύος (μεγαλύτερες από 100 MW). Στην πραγματικότητα, το αέριο υδρογόνο είναι επτά φορές πιο αποτελεσματικό ως μέσο μεταφοράς θερμότητας από τον αέρα και 14 φορές λιγότερο πυκνό.

Ωστόσο, οι περισσότεροι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής βασίζονται στην παράδοση υδρογόνου για την ψύξη των γεννητριών τους αντί να το παράγουν επιτόπου. Αυτό προκαλεί αναπόφευκτα κινδύνους για την ασφάλεια και αναποτελεσματικότητα, καθώς και ταλαιπωρία και κόστος που σχετίζονται με την επαναπλήρωση, τη μεταφορά και την αποθήκευση δεξαμενών υδρογόνου.

Μελέτη περίπτωσης → Η γεννήτρια υδρογόνου βελτιώνει την αποδοτικότητα και την ασφάλεια στο εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής Aguirre του Πουέρτο Ρίκο - αντικαθιστώντας τις δεξαμενές αποθήκευσης με μια εγκατάσταση ηλεκτρόλυσης.
<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=10539>

5.4.3. Εφεδρική ισχύς

Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας σε εφεδρικά συστήματα και γεννήτριες. Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται για εφαρμογές εκτός δικτύου, όπως:

- ✓ Φωτισμός εργασίας
- ✓ Κάμερες ασφαλείας
- ✓ Παρακολούθηση περιβάλλοντος
- ✓ Συστήματα ελέγχου διεργασιών

Για παράδειγμα, η χημική εταιρεία Linde εμπορεύεται το σύστημα HYMERA (Εικόνα 28), το οποίο χαρακτηρίζεται ως η πρώτη παγκοσμίως "εμπορικά βιώσιμη" γεννήτρια κυψελών καυσίμου υδρογόνου. Το σύστημα μπορεί να παρέχει έως και 175 W ισχύος αιχμής και προσφέρει μια εναλλακτική λύση σε σχέση με τις γεννήτριες που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα και τις ογκώδεις συστοιχίες μπαταριών.



Εικόνα 28. Η γεννήτρια HYMERA [Πηγή: Linde].

5.4.4. Ο τομέας του γυαλιού και του μετάλλου

Η βιομηχανία γυαλιού χρησιμοποιεί το υδρογόνο σε συνδυασμό με άζωτο ως προστατευτική ατμόσφαιρα για την αποφυγή της οξειδωσης και τη βελτίωση της ποιότητας του γυαλιού.

Με τη σειρά της, η βιομηχανία μετάλλων/χάλυβα χρησιμοποιεί το υδρογόνο για εφαρμογές όπως:

- ✓ Ελεγχόμενες ατμόσφαιρες
- ✓ Στη θερμική επεξεργασία μη σιδηρούχων μετάλλων
- ✓ Για την υποστήριξη της συγκόλλησης και της κοπής με πλάσμα

5.4.5. Αεροδιαστημικές εφαρμογές

Η αεροδιαστημική βιομηχανία χρησιμοποιεί το υδρογόνο ως καύσιμο αέριο για διαστημόπλοια ή σε ορισμένα από τα εσωτερικά τους συστήματα. Σε συνδυασμό με έναν οξειδωτή (όπως το υγρό οξυγόνο), το υγρό υδρογόνο αποδίδει την υψηλότερη ειδική ώθηση από οποιοδήποτε γνωστό προωθητικό μέσο πυραύλων.

Σήμερα, το υγρό υδρογόνο είναι το καύσιμο επιλογής των διαστημικών προγραμμάτων και των εκτοξεύσεων δορυφόρων.

Προσκεκλημένοι/ες ομιλητές/ριες → Σε αυτό το στάδιο, οι εκπρόσωποι της βιομηχανίας μπορούν να δώσουν αξία και να προσθέσουν μια νέα προοπτική στο μάθημα μοιράζοντας τις πραγματικές τους εμπειρίες.

ΣΥΝΕΧΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ 5: ΜΕΛΕΤΗ ΣΕΝΑΡΙΟΥ

----- Τέλος Ενότητας 5 -----

Παραπομπές

Bockris, J.M., 1972. A hydrogen economy. Science, 176(4041), pp.1323-1323

European Hydrogen Backbone – A European Hydrogen Infrastructure Vision Covering 28 Countries. Available at: <https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2022/04/EHB-A-European-hydrogen-infrastructure-vision-covering-28-countries.pdf>.

Gaseous Hydrogen Compression – U.S. Department of Energy. Available at: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/gaseous-hydrogen-compression>.

H₂ Bulletin. Available at: <https://www.h2bulletin.com/knowledge/hydrogen-colours-codes/>

Hydrogen Production – Hydrogen Ireland. Available at: <https://hydrogenireland.org/hydrogen/hydrogen-production/>

Πληροφορίες σχετικά με τους πίνακες και τις εικόνες δίνονται ως επεξήγηση κατά περίπτωση.