

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΤΜΗΜΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

στην Κλιματική Κρίση και Τεχνολογίες Πληροφορικής και Επικοινωνιών

**ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΛΥΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΤΗΣ
ΕΥΡΩΠΗΣ:**

ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μπαλέστραβου Μαρία

Επιβλέπων Καθηγητής: Μανιάτης Ιωάννης

Πειραιάς, 2025

Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο: «ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΛΥΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΗΣ: ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ» καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και οι πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Πειραιώς αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Copyright (C) Μαρία Μπαλέστραβου, 2025, Πειραιάς

Υπογραφή Φοιτητή: Μαρία Μπαλέστραβου

Περίληψη

Η παρούσα εργασία διερευνά το υδρογόνο ως ενεργειακό φορέα και ως βασικό παράγοντα για την μελλοντική ενεργειακή ασφάλεια της Ευρώπης, αξιολογώντας το ρόλο του στην ενεργειακή μετάβαση προς μια πιο βιώσιμη κοινωνία με ουδέτερο αποτύπωμα άνθρακα. Μέσα από την αποτύπωση των προκλήσεων και προοπτικών της εφαρμογής του υδρογόνου στο ενεργειακό σύστημα, διαφαίνεται η καίρια σημασία του για την επίτευξη της απανθρακοποίησης βασικών τομέων της οικονομίας καθώς και για τη δυνατότητα αποθήκευσης της ενέργειας. Επιπρόσθετα, η εργασία εξετάζει κριτικά τις τεχνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές πτυχές από την υιοθέτηση του υδρογόνου στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με ιδιαίτερη έμφαση στις ευρωπαϊκές πρωτοβουλίες. Τα ευρήματα υπογραμμίζουν την αναγκαιότητα της διαρκούς καινοτομίας, των στρατηγικών επενδύσεων, και της ισχυρής πολιτικής υποστήριξης για να διασφαλιστεί η βιωσιμότητα του υδρογόνου ως ασφαλούς, αποδοτικής, και ανταγωνιστικής ενεργειακής λύσης για το μέλλον της Ευρώπης.

Λέξεις-κλειδιά: Υδρογόνο; Ενέργεια; ΑΠΕ; Ενεργειακή ασφάλεια; Βιωσιμότητα.

UNIVERSITY OF PIRAEUS

DEPARTMENT OF DIGITAL SYSTEMS



MASTER PROGRAMME

in Climate Crisis and Information and Communication Technologies

Hydrogen as a future solution for Europe's energy security:
Challenges and prospects

POSTGRADUATE DIPLOMA THESIS

Balestravou Maria

Supervising Professor: Dr Maniatis Ioannis

Piraeus, 2025

Abstract

This paper explores hydrogen as an energy carrier and as a key factor for Europe's future energy security, assessing its role in the energy transition towards a more sustainable, carbon-neutral society. By mapping the challenges and prospects of integrating hydrogen into the energy system, the crucial importance of its contribution to the decarbonization of major economic sectors as well as to large-scale energy storage becomes evident. In addition, the thesis critically examines the technical, economic, and environmental dimensions of hydrogen adoption within the framework of the European Union, with particular emphasis on European initiatives and strategies. The findings highlight the need for continuous innovation, strategic investments, and strong policy support to ensure the sustainability of hydrogen as a safe, efficient, and competitive energy solution for Europe's future.

Key-words: Hydrogen; Energy; RES; Energy security; Sustainability.

Για το μέλλον, τη φύση, και τη βιωσιμότητα.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	III
Abstract	V
Ευχαριστίες	9
Εισαγωγή	10
Κεφάλαιο 1. Το υδρογόνο ως πηγή ενέργειας	11
1.1 Σύντομη ιστορία του υδρογόνου στη φύση και την επιστήμη	11
1.2 Οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του υδρογόνου	15
Κεφάλαιο 2. Περί παραγωγής του υδρογόνου	17
2.1 Τα βασικά είδη του υδρογόνου σύμφωνα με τον τρόπο παραγωγής του	17
2.2 Παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση	19
2.3 Παραγωγή υδρογόνου με θερμοχημικές μεθόδους	21
2.4 Παραγωγή υδρογόνου με βιολογικές διεργασίες	22
Κεφάλαιο 3. Περί αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου	23
3.1 Μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου	23
3.2 Ο ρόλος των κυψελών καυσίμου	25
3.3 Υφιστάμενα δίκτυα και μοντέλα διανομής του υδρογόνου	27
3.4 Αξιοποίηση υπαρχουσών ενεργειακών εγκαταστάσεων φυσικού αερίου	29
3.5 Η ευρωπαϊκή πρωτοβουλία «European Hydrogen Backbone»	30
Κεφάλαιο 4. Οι προοπτικές του «πράσινου» υδρογόνου ως καύσιμο του μέλλοντος	32
4.1 Συμβολή στην απανθρακοποίηση και στην ενεργειακή μετάβαση	32
4.2 Ενεργειακή ασφάλεια- σχέδιο REPower	33
4.3 Αποθήκευση και διανομή	34
4.4 Το «πράσινο» υδρογόνο στην Ευρωπαϊκή βιομηχανία, και το παράδειγμα της Hydrogen Europe	34
Κεφάλαιο 5. Οι προκλήσεις του «πράσινου» υδρογόνου ως καύσιμο του μέλλοντος	39
5.1 Υψηλό κόστος παραγωγής	39
5.2 Απώλειες ενέργειας-ζητήματα αποδοτικότητας	40
5.3 Έλλειψη δικτύου-υποδομών	41
5.4 Ζητήματα ασφάλειας και κοινωνικής αποδοχής	43
Κεφάλαιο 6: Αναπτυξιακές στρατηγικές και πολιτικές για το υδρογόνο στην Ευρώπη	46
6.1 Η Στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το Υδρογόνο	46

6.2 Μελέτη περίπτωσης: Η ανάπτυξη του υδρογόνου στην Ελλάδα	47
6.3 Μελέτη περίπτωσης: Η Γερμανία και η απανθρακοποίηση του χάλυβα μέσω υδρογόνου	52
6.4 Μελέτη περίπτωσης: Η Εθνική Στρατηγική Υδρογόνου της Κροατίας	54
6.5 Άλλα παραδείγματα ευρωπαϊκών χωρών	58
6.6. Συμπεράσματα	61
Κεφάλαιο 7. Το μέλλον της ενεργειακής ασφάλειας στην Ευρώπη	63
7.1. Ο ρόλος του υδρογόνου στη διασφάλιση της ενεργειακής ασφάλειας της Ευρώπης	63
7.2. Η μη βιωσιμότητα του σημερινού ενεργειακού συστήματος και η ανάγκη για μετάβαση	65
7.3 Ο ρόλος του τομέα των μεταφορών στις παγκόσμιες ενεργειακές και κλιματικές προκλήσεις	67
7.4. Η σχέση υδρογόνου και ηλεκτρικής ενέργειας	69
7.5. Συμπεράσματα, μελλοντικές προοπτικές, και δυνατότητες	73
Επίλογος.....	80
Βιβλιογραφία	83
Πίνακες	93
Εικόνες.....	94

Ευχαριστίες

Η θεματική, οι προβληματικές, τα επιχειρήματα, και οι θέσεις που αποτυπώνονται στην παρούσα εργασία εκμαιεύτηκαν από προσωπικές ανησυχίες σχετικά με τη μελλοντική βιωσιμότητα του πλανήτη μας. Η σύγχρονη πραγματικότητα, όπως βιώνεται σήμερα, καθιστά αναγκαία την αναζήτηση και αξιοποίηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας, εξ ου και η επιλογή του υδρογόνου ως μελλοντική λύση για την ενεργειακή ασφάλεια της Ευρώπης.

Το αποτέλεσμα των ανησυχιών, που αποτυπώνονται σε αυτές τις σελίδες, δεν θα ήταν δυνατό χωρίς την αδιάκοπη ενθάρρυνση και υποστήριξη ορισμένων προσώπων, καθένα από τα οποία με τον τρόπο του, με βοήθησαν και μου έδωσαν τα απαραίτητα εφόδια ώστε να συνεχίσω. Αρχικά, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επόπτη καθηγητή μου, κ. Μανιάτη Ιωάννη, για την παρουσία και μεντορία του στο εν λόγω πόνημά μου, παρέχοντάς μου την αναγκαία ανατροφοδότηση σχετικά με τις επόμενες κινήσεις μου, αναγνώσεις, και επιχειρηματολογίες μου. Θέλω επίσης να ευχαριστήσω ολόψυχα την οικογένειά μου, η οποία μου παρείχε συνεχή υποστήριξη, ακούγοντας τις ανησυχίες μου, παρακολουθώντας και ενισχύοντας την πρόοδό μου, και δίνοντας λύση στα ενίοτε, αδιέξοδά μου.

Στο πλαίσιο της συγγραφής μου, βασική μου ανησυχία υπήρξε η σωστή διατύπωση και ερμηνεία του επιστημονικού πλαισίου γύρω από το υδρογόνο ως ενεργειακό φορέα, με την παράλληλη διατήρηση ενός ευανάγνωστου λόγου και μιας μορφής που αποτελεί εύπεπτη σύμπτυξη αφενός μιας αυστηρής βιβλιογραφικής μελέτης, κυρίως ξενόγλωσσης και αφετέρου μιας θεωρητικής προσέγγισης σχετικά με τις βιώσιμες λύσεις που δύναται να παράσχει η χρήση του υδρογόνου ως πηγή ενέργειας στο μέλλον. Την επιτυχία ή όχι του εγχειρήματος, εν τέλει, θα την κρίνει ο αναγνώστης. Προσωπικά, η μελέτη που οδήγησε στη συγγραφή αυτή υπήρξε ίσως από τα πολυτιμότερα αναγνωστικά μου ταξίδια.

Καλή ανάγνωση.

Εισαγωγή

Οι διαρκώς αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες του σύγχρονου κόσμου σε συνδυασμό με την ανάγκη αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής, της προστασίας του φυσικού περιβάλλοντος και της ενίσχυσης της ενεργειακής ασφάλειας επιβάλλουν την αναζήτηση και υιοθέτηση καθαρότερων και πιο βιώσιμων μορφών ενέργειας, καθώς διαφαίνεται εναργώς ότι το παραδοσιακό ενεργειακό μοντέλο δεν δύναται να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του 21ου αιώνα. Στο πλαίσιο αυτό, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξημένο ερευνητικό και πολιτικό ενδιαφέρον για την ανάπτυξη τεχνολογιών που αξιοποιούν ανανεώσιμες και εναλλακτικές πηγές ενέργειας, ως βασικό εργαλείο για την επίτευξη των στόχων της ενεργειακής μετάβασης και τη διασφάλιση της ενεργειακής ασφάλειας σε παγκόσμιο και ευρωπαϊκό επίπεδο.

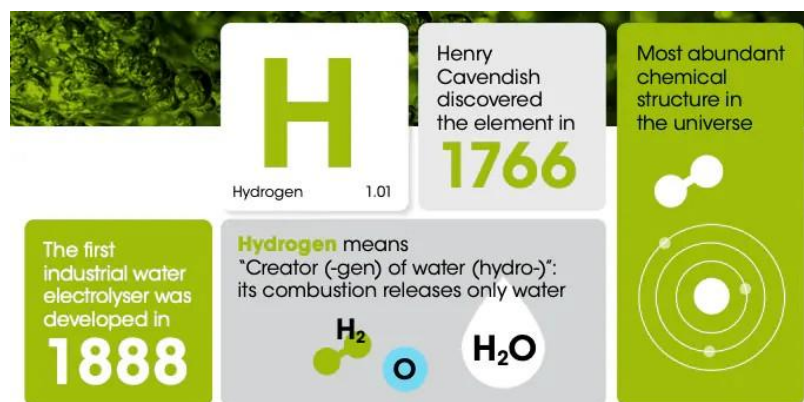
Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να αναδείξει τον ρόλο του υδρογόνου ως εναλλακτική πηγή ενέργειας για τη μελλοντική ενεργειακή ασφάλεια της Ευρώπης μέσα από την αποτύπωση των προοπτικών που εμφανίζει η ανάπτυξή του και των βασικών προκλήσεων που πρέπει να ξεπεραστούν.

Ειδικότερα, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη αναφορά στην ιστορία του υδρογόνου στη φύση και στην επιστήμη καθώς και στις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του υδρογόνου ως χημικό στοιχείο. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρατίθενται συνοπτικά οι κυριότερες τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου με έμφαση στην διαδικασία της ηλεκτρόλυσης με την οποία παράγεται το «πράσινο» υδρογόνο. Στο κεφάλαιο αυτό με αφορμή τους τρόπους παραγωγής υδρογόνου γίνεται αναφορά και στην χρωματική του κωδικοποίηση σε γκρι, μπλε και πράσινο. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική ανασκόπηση των μεθόδων αποθήκευσης και διανομής του υδρογόνου. Στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται οι προκλήσεις και οι προοπτικές της χρήσεως του πράσινου υδρογόνου ως μελλοντικού ενεργειακού φορέα για την ασφάλεια της Ευρώπης, στο έκτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε αναπτυξιακές στρατηγικές ευρωπαϊκών χωρών ως προς το υδρογόνο και τέλος στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στον ρόλο που θα διαδραματίσει το υδρογόνο μελλοντικά.

Κεφάλαιο 1. Το υδρογόνο ως πηγή ενέργειας

1.1 Σύντομη ιστορία του υδρογόνου στη φύση και την επιστήμη

Η πρώτη αναφορά στο υδρογόνο ως διακριτή ουσία έγινε το 1766 από τον Henry Cavendish (1731–1810), ο οποίος το ταύτισε με το αέριο H_2 και το ονόμασε «εύφλεκτο αέρα» (*inflammable air*). Αν και, όπως και ο Boyle, θεώρησε αρχικά ότι επρόκειτο για το υποθετικό φλόγιστρον¹, η έρευνά του έθεσε τα θεμέλια για την εν συνεχεία αναγνώριση του υδρογόνου ως ξεχωριστού στοιχείου. Εν συνεχεία, το 1781 ο Henry Cavendish απέδειξε ότι ο «εύφλεκτος αέρας» αποτελεί διακριτό αέριο, το οποίο κατά την καύση του σε *αποφλογισμένο αέρα* [δηλ. οξυγόνο] παράγει νερό (H_2O), ωστόσο, η οριστική ονομασία του στοιχείου ως *hydrogen* («σχηματιστής νερού») δόθηκε το 1783 από τον Antoine Lavoisier.² Το 1783, η ανακάλυψη του Cavendish ενέπνευσε τον Antoine Lavoisier [1743-1794] να ονομάσει την ουσία *hydro-gen*, που σημαίνει *σχηματιστής νερού*³.



Εικόνα 1: Hydrogen is the most abundant chemical structure in the universe. International Renewable Energy Agency

¹ Σύμφωνα με τη θεωρία του φλογίστρου, πρόκειται για ένα υλικό που είναι πιο εύφλεκτο και καίγεται πιο βίαια όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητά του σε φλόγιστρο. Για πρώτη φορά κατέστη δυνατό να περιγραφούν αρκετές χημικές αντιδράσεις μέσω της θεωρίας του φλογίστρου. Ο μόλυβδος, για παράδειγμα, αποτελείται από οξείδιο του μολύβδου και φλόγιστο και το φλόγιστο απελευθερώνεται κατά την καύση αφήνοντας πίσω του οξείδιο του μολύβδου. Η θεωρία του φλογίστρου υπήρξε ιδιαίτερα εξηγητική στην εξήγηση φαινομένων, και για τον λόγο αυτό εξακολουθούσαν να την υπερασπίζονται όταν εμφανίστηκε μια προφανής αδυναμία της θεωρίας και χρειάστηκε να γίνει μια αυθαίρετη παραδοχή. Μετά την παρατήρηση του Boyle ότι η μάζα μιας ουσίας αυξάνεται κατά την καύση, για παράδειγμα, η μάζα του οξειδίου του μολύβδου είναι μεγαλύτερη από τη μάζα του μολύβδου, αποδόθηκε αρνητική μάζα στο φλόγιστρον [βλ. Zuttel, et al., *Hydrogen as a Future Energy Carrier*, σ.8].

² Stwertka, *A Guide to the Elements*, σσ.16-21.

³ Για μια ιστορική προσέγγιση των ανωτέρω βλ. Zuttel, et al., *Hydrogen as a Future Energy Carrier*, σσ.7κ.ε.

Παραδόξως, για τις πρώτες δεκαετίες, δεν υπήρξαν ιδιαίτερα μεγάλες καινοτομίες αναφορικά με τις χρήσεις του υδρογόνου. Ωστόσο, με το ξεκίνημα το 19^{ου} αιώνα, το 1800, οι *William Nicholson* [1753-1815] και *Anthony Carlisle* [1768-1840] κατάφεραν να διασπάσουν το νερό στα στοιχειώδη συστατικά του χρησιμοποιώντας ηλεκτρόλυση⁴. Μέχρι το 1806, το υδρογόνο χρησιμοποιήθηκε, σχεδόν αποκλειστικά, μονάχα για τη πλήρωση μπαλονιών⁵, αλλά, την χρονιά εκείνη, προέκυψε το σημείο καμπής όπου, από εκεί κι έπειτα, άρχισαν να εμφανίζονται ραγδαία νέες προοπτικές. Το 1806, ο *François Isaac de Rivaz* [1752-1828], κατάφερε να κατασκευάσει τον πρώτο κινητήρα εσωτερικής καύσης που τροφοδοτούνταν από ένα μείγμα υδρογόνου και οξυγόνου, η οποία πήρε και το όνομά του⁶.

Από εκείνο το σημείο κι έπειτα ακολούθησαν μια σειρά από καινοτομίες, τεχνολογικές και πειραματικές, οι οποίες άλλαξαν τον τρόπο με τον οποίο η επιστημονική κοινότητα αντιμετώπιζε το υδρογόνο. Ενδεικτικά, το 1819 ο *Daniel Edward Clarke* [1769-1822] εφηύρε την φυσητήρα αερίου υδρογόνου, το 1823, ο *Johann Wolfgang Döbereiner* [1780-1849] εφηύρε, μεταξύ πολλών, τη λυχνία, και τον προβολέα. Ο *William Grove* [1811-1896] κατασκεύασε το 1839 μια *βολταϊκή μπαταρία αερίου*, η οποία αποτέλεσε τον πρόδρομο των σύγχρονων κυψελών καυσίμου. Βασίστηκε στο πείραμά του στο γεγονός ότι η αποστολή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του νερού διασπά το νερό στα συστατικά του μέρη υδρογόνο και οξυγόνο. Ο *Grove* επέτρεψε στην

⁴ Walter, et al., “*Solar Water Splitting Cells*”. Το αέριο H₂ που αναπτύσσεται είναι ένας, εξαιρετικά ελαφρύς, φορέας ενέργειας το οποίο δύναται να αποτελέσει ιδανικό καύσιμο καθώς, εκτός από άφθονο, είναι και φιλικό προς το περιβάλλον, αφού η οξειδωσή του παράγει νερό. Το μοριακό H₂ δύναται, και καταφέρνει, να εξυπηρετήσει τις ανάγκες καυσίμων σε διάφορους τομείς τους τελευταίους δυο αιώνες. Είτε πρόκειται για ένα από τα πρώτα αερόστατα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μεταφορά ανθρώπων το 1783, είτε πρόκειται για τις δεξαμενές καυσίμων των πυραύλων. Για πρακτικές εφαρμογές, ωστόσο, καθίσταται αναγκαίο να αποθηκεύεται σε συμπιεσμένη, υγροποιημένη ή στερεή κατάσταση [βλ. την μελέτη στο Schlapbach L., & A. Züttel, “*Hydrogen-storage materials for mobile applications*”].

⁵ Το πρώτο αερόστατο γεμάτο υδρογόνο εφευρέθηκε από τον Ζακ Σαρλ το 1783. Το υδρογόνο παρείχε την άνωση για την πρώτη αξιόπιστη μορφή αεροπορικών ταξιδιών μετά την εφεύρεση του πρώτου αερόπλοιου με ανύψωση υδρογόνου το 1852 από τον Henri Giffard. Ο Γερμανός κόμης Ferdinand von Zeppelin [1838-1917] προώθησε την ιδέα των άκαμπτων αερόπλοιων που ανυψώνονταν με υδρογόνο και που αργότερα ονομάστηκαν Ζέπελιν. Τακτικές προγραμματισμένες πτήσεις ξεκίνησαν το 1910, με την πρώτη ωστόσο να έχει ήδη πραγματοποιηθεί το 1901, και μέχρι το ξέσπασμα του Α'ΠΠ, δεν είχε υπάρξει κανένα σοβαρό περιστατικό. Τα αερόπλοια που ανυψώθηκαν με υδρογόνο χρησιμοποιήθηκαν ως πλατφόρμες παρατήρησης και βομβαρδιστικά κατά τη διάρκεια του Α'ΠΠ, με την πρώτη απευθείας υπερατλαντική διάσχιση να γίνεται το 1919. Οι τακτικές επιβατικές πτήσεις επαναλήφθηκαν τη δεκαετία του 1920 και η ανακάλυψη αποθεμάτων ηλίου στις ΗΠΑ υποσχέθηκε αυξημένη ασφάλεια, αλλά η κυβέρνηση αρνήθηκε να πουλήσει το αέριο για το σκοπό αυτό. Ως εκ τούτου, το 1937, το H₂ χρησιμοποιήθηκε στο αερόπλοιο Hindenburg, το οποίο και καταστράφηκε [βλ. την ανάλυση στο Motta, “*Hydrogen in zirconium alloys*”, σσ.440-460]

⁶ Szydło, “*Hydrogen - Some Historical Highlights*”, σ.19.

αντίδραση να αντιστραφεί, συνδυάζοντας το υδρογόνο και το οξυγόνο για την παραγωγή ηλεκτρισμού και νερού⁷. Αξίζει εδώ να αναφερθεί πως, όταν ο *Gustav Kirchhoff* [1824-1887] και ο *Robert Bunsen* [1811-1899] ανέλυσαν το 1861 το εκπεμπόμενο φάσμα του ήλιου και διαπίστωσαν ότι το υδρογόνο ήταν το κύριο συστατικό του ήλιου, και λαμβάνοντας υπόψη την ανακάλυψη του μετάλλου παλλάδιο το 1803 από τον *William Hyde Wollaston* [1766-1828], ο *Thomas Graham* [1805-1869] ανέφερε ότι το μέταλλο αυτό μπορούσε να απορροφήσει μεγάλες ποσότητες υδρογόνου σχηματίζοντας ένα υδρίδιο μετάλλου. Ενώ, εκείνη την εποχή, η ανακάλυψη αποτελούσε περισσότερο μια επιστημονική περιέργεια, σήμερα αποτελεί τη βάση για την πολλά υποσχόμενη τεχνολογία αποθήκευσης υδρογόνου σε υδρίδια μετάλλων⁸.

Τέλος, το 1898, ήταν και η πρώτη φορά που υγροποιήθηκε το υδρογόνο με τη χρήση αναγεννητικής ψύξης από τον *James Dewar* [1842-1923], και εφευρέθηκε, παράλληλα, από τον ίδιο, η *φιάλη κενού*. Ο *Dewar*, εκτός του ότι υπήρξε ο πρώτος που χρησιμοποίησε αναγεννητική ψύξη υγροποιώντας στατικά το υδρογόνο, χρησιμοποίησε για την επίτευξη αυτού υγρό άζωτο, προψύχοντας το αέριο υδρογόνο, κάτω από 180 ατμόσφαιρες, και στη συνέχεια επεκτείνοντάς το μέσω μιας βαλβίδας σε ένα μονωμένο δοχείο, που επίσης ψύχθηκε με υγρό άζωτο. Τα πρώτα έτη του 20^{ου} αιώνα, συγκεκριμένα το 1909 στη Γερμανία, ο χημικός *Fritz Haber* [1868-1934] ανακάλυψε μια καταλυόμενη διαδικασία, η οποία επέτρεψε τη σύνθεση αμμωνίας [NH₃] από τα στοιχεία υδρογόνο και άζωτο. Για την ανακάλυψή του έλαβε το βραβείο Νόμπελ Χημείας⁹ το 1918.

Κατά το δεύτερο ήμισυ του 20^{ου} αιώνα, παρά το γεγονός πως είχαν θεμελιωθεί οι διαδικασίες παραγωγής ενέργειας, το υδρογόνο συνηθιζόταν να χρησιμοποιείται συχνά ως αέριο διεργασιών στην πετροχημική βιομηχανία, και, ιστορικά, ξεκίνησε με την παραγωγή αερίου νερού [μείγμα CO και H₂]. Σε βιομηχανική κλίμακα τουλάχιστον, η αναμόρφωση με ατμό, αναμόρφωση υδρογόνου, ή καταλυτική οξείδωση, αποτελεί μια μέθοδο παραγωγής υδρογόνου από υδρογονάνθρακες που, έως και τον 21^ο αιώνα, κατέχει τη κυρίαρχη θέση ως μέθοδο παραγωγής

⁷ Ο όρος κυψέλη καυσίμου [*fuel cell*] επινοήθηκε αργότερα, το 1889, από τους *Ludwig Mond* και *Charles Langer*, οι οποίοι προσπάθησαν να κατασκευάσουν την πρώτη πρακτική συσκευή χρησιμοποιώντας αέρα και βιομηχανικό αέριο άνθρακα. Ωστόσο, η εξέλιξη της κυψέλης καυσίμου σε ισχυρή πηγή ρεύματος ήταν πολύ δύσκολη, και το 1866 παρουσιάστηκε η πρώτη δυναμοηλεκτρική γεννήτρια, η οποία μετατρέπει αποτελεσματικά κάθε είδους μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Ως εκ τούτου, οι κυψέλες καυσίμου έχασαν τη σημασία τους ως γεννήτριες ηλεκτρικής ενέργειας και δεν αναπτύχθηκαν περαιτέρω μέχρι τα μέσα του εικοστού αιώνα [ο.π., σσ.24-26].

⁸ βλ. Zuttel, et al., *Hydrogen as a Future Energy Carrier*, σσ.11-12.

⁹ Charles, “*Master mind: The Rise and Fall of Fritz Haber*”.

υδρογόνου¹⁰. Από τις σημαντικότερες εξελίξεις του 20^{ου} αιώνα υπήρξε, το 1955, όπου, αφού ο *Eduard Justi* [1904-1986] περιέγραψε την αξιοποίηση του υδρογόνου ως μέσο μεταφοράς ενέργειας, το 1969, ο *John Bockris* [1923-2013], παρουσίασε μια συνολική ενεργειακή αντίληψη για το υδρογόνο που χρησιμοποιεί τις ευνοϊκές ιδιότητες του υδρογόνου και περιλαμβάνει μη συμβατικά ενεργειακά συστήματα. Οι αρχικές σκέψεις που τελικά οδήγησαν έμπρακτα σε ένα νέο πεδίο, αυτό του υδρογόνου ως καυσίμου, ως πηγή ενέργειας, και δημιούργησαν το πρώτο μεγάλο κίνημα για την εγκατάλειψη του πετρελαίου για κάτι λιγότερο καταστροφικό, ξεκίνησαν το 1968 σε ένα δείπνο, κατά τη διάρκεια μιας επιστημονικής συνάντησης, στην Στοκχόλμη στο οποίο παρευρέθηκε ο *Bockris*. Οι παρευρισκόμενοι συζητούσαν τις ιδέες ενός Γερμανού, κατά πάσα πιθανότητα του *Lawaczeck* σχετικά με τη μεταφορά υδρογόνου μέσω σωλήνων.

Η ραγδαία ανάπτυξη της φυσικής στερεάς κατάστασης τον 20^ο αιώνα προώθησε επίσης την ανάπτυξη νέων διατάξεων στερεάς κατάστασης που συνδέονται με το υδρογόνο. Παραδείγματα είναι οι αισθητήρες [παραδείγματος χάρη, δομές Pd-MOS ευαίσθητες στο υδρογόνο], οι μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου, τα διακοπτόμενα από υδρογόνο κάτοπτρα, και η αμορφοποίηση χύδην δειγμάτων από υδρογόνο¹¹. Η μπαταρία υδριδίου μετάλλου ήταν η πρώτη υλοποίηση της αποθήκευσης ενέργειας με βάση το υδρογόνο, επειδή πρέπει να αποθηκευτεί μεγάλη ποσότητα υδρογόνου σε ένα από τα ηλεκτρόδιά της. Η επανάσταση ήταν η ανακάλυψη ενός φθηνού κράματος μετάλλων με ανώτερες ικανότητες αποθήκευσης υδρογόνου. Ωστόσο, τα υλικά αποθήκευσης υδρογόνου για εφαρμογή σε αυτοκίνητα, ήταν αναγκαίο, να πληρούν υψηλότερες ικανότητες αποθήκευσης υδρογόνου. Για τα τέλη του 20^{ου} αιώνα, ήταν πολύ νωρίς για να οριστεί το απόλυτο υλικό αποθήκευσης υδρογόνου, αλλά σίγουρα, μια σημαντική ανακάλυψη στο δρόμο προς την υψηλή περιεκτικότητα σε υδρογόνο υπήρξε η ανακάλυψη, το 1996 από τον *Borislav Bogdanović* [1934-2010], ενός καταλύτη που καταλύει ελαφριά αλανικά άλατα¹².

¹⁰ Το 2000, η συνολική ετήσια παραγωγή υδρογόνου παγκοσμίως ανερχόταν σε $500 \times 10^9 \text{ m}^3$ [STP], ή περίπου 45×10^6 τόνους. Οι κυριότερες πηγές είναι το φυσικό αέριο και ο άνθρακας, που αντιπροσωπεύουν το 78% της συνολικής παραγωγής, και 30% αντίστοιχα. Το 50% της συνολικής παραγωγής υδρογόνου χρησιμοποιείται για τη σύνθεση αμμωνίας και το 25% για την πυρόλυση και τον καθαρισμό του αργού πετρελαίου [βλ. Zuttel, et al., *Hydrogen as a Future Energy Carrier*, σ.12].

¹¹ Liu, & Zhang, “*Hydrogen Storage Materials*”, σσ.33κ.ε.].

¹² Το 1996, ο Bogdanović ανακάλυψε μια μέθοδο για την παραγωγή συμπλόκων μετάλλων μετάπτωσης με την αντίδραση μετάλλων μετάπτωσης με μαγνήσιο που ενεργοποιείται από ανθρακένιο ή ανθρακένιο μαγνησίου παρουσία συμπλοκοποιητικών ligands. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται λεπτομερώς στο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας των ΗΠΑ 4,569,719, που κατατέθηκε στις 25 Απριλίου 1984 και χορηγήθηκε στις 3 Δεκεμβρίου 1985 [available at <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/patent/US-6096391-A>].

1.2 Οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του υδρογόνου

Όπως προαναφέρθηκε ανωτέρω, το υδρογόνο συνιστά ουσιώδες χημικό στοιχείο για την επίτευξη της μελλοντικής μετάβασης σε πιο καθαρές μορφές ενέργειας και τούτο οφείλεται στις ιδιαίτερες φυσικές και χημικές του ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα, το υδρογόνο ως στοιχείο συναντάται σε μεγάλη αφθονία στο σύμπαν, κατά βάση σε μορφή χημικών ενώσεων, και παράγεται από πρώτες ύλες που προέρχονται είτε από ορυκτές πηγές είτε από ανανεώσιμες.¹³

Πρόκειται για ένα άχρωμο, άοσμο και άγευστο αέριο υπό κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, ιδιότητες που το καθιστούν δυσχερώς ανιχνεύσιμο, απαιτώντας κατάλληλα συστήματα ασφαλείας¹⁴. Περαιτέρω, χαρακτηρίζεται για την εξαιρετικά χαμηλή πυκνότητά του, είναι δηλαδή ελαφρύ αέριο αλλά παρέχει μεγάλη ποσότητα ενέργειας λόγω της υψηλής ενεργειακής του πυκνότητας ανά μονάδα μάζας. Αξίζει να αναφερθεί ότι ένα κιλό υδρογόνου αποδίδει περίπου 120 MJ ενέργειας, δηλαδή σχεδόν τριπλάσια ποσότητα σε σχέση με την αντίστοιχη μάζα βενζίνης.¹⁵

Επίσης, το υδρογόνο συνιστά εξαιρετικά εύφλεκτο στοιχείο με υψηλή εκρηκτικότητα ώστε καθιστά αναγκαία την τήρηση αυστηρών προτύπων ασφαλείας σε όλο τον κύκλο ζωής του, από την παραγωγή έως την χρήση του.¹⁶ Τα εν λόγω χαρακτηριστικά δικαιολογούν αναμφισβήτητα την αξιοποίηση του υδρογόνου σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από την ηλεκτροπαραγωγή μέσω κυψελών καυσίμου έως τη χρήση του ως πρώτη ύλη στη βιομηχανία.¹⁷

Έχοντας παρουσιάσει μια σύντομη ιστορία του υδρογόνου και των ιδιοτήτων του ως χημικού στοιχείου, είναι απαραίτητο να επικεντρωθούμε στη σύγχρονη σημασία του, ιδίως στο πλαίσιο των παγκόσμιων προσπαθειών για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, και την επίτευξη βιώσιμων ενεργειακών λύσεων. Η πορεία του υδρογόνου αρχικά ως ένα θεμελιώδες στοιχείο που μελετήθηκε από τους πρώτους επιστήμονες έως την εφαρμογή του σε μια σειρά βιομηχανιών, ανέδειξε το υδρογόνο ως βασικό παράγοντα για το μέλλον της καθαρής ενέργειας. Αν και η

¹³ Patel, S. K. S., Gupta, R. K., Rohit, M. V., & Lee, J.-K. (2024). Recent Developments in Hydrogen Production, Storage, and Transportation: Challenges, Opportunities, and Perspectives. *Fire*, σσ 233 κ.ε

¹⁴ Dincer, I. & Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), 11094–11111

¹⁵ IEA (2019). *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities*. International Energy Agency, Paris.

¹⁶ Laveet Kumar, Ahmad K. Sleiti, A comprehensive review of hydrogen safety through a metadata analysis framework, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 214, 2025, 115509,

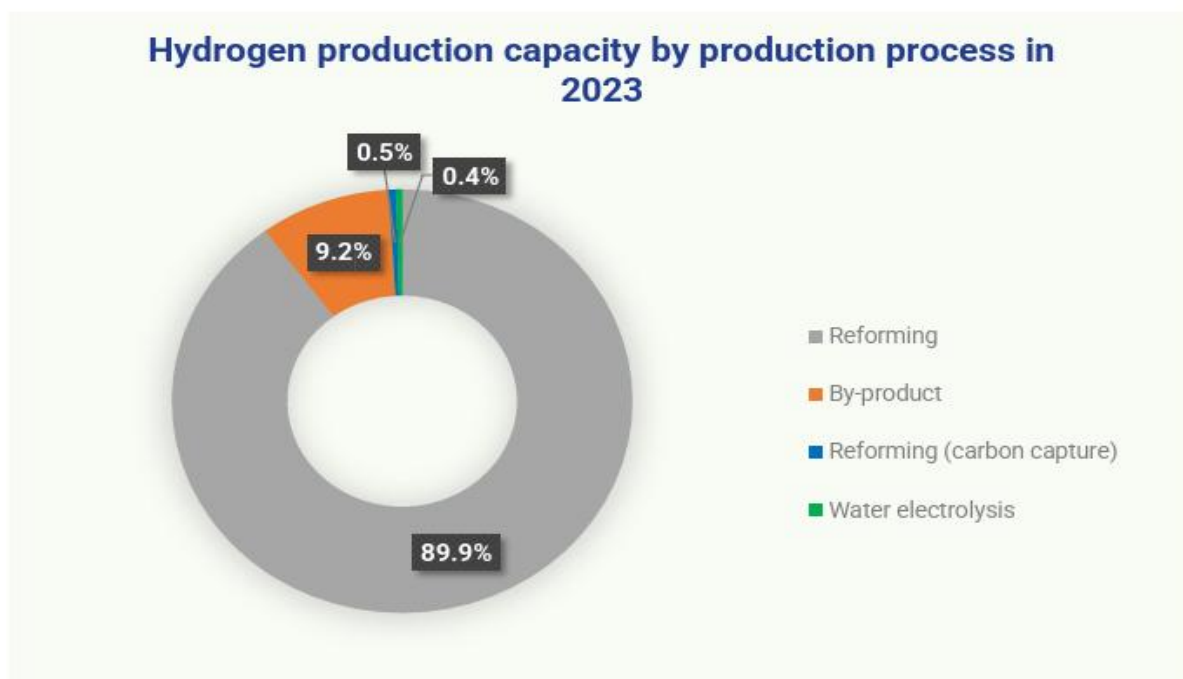
¹⁷ Staffell, I., Scamman, D., Velazquez Abad, A., Balcombe, P., Dodds, P., Ekins, P., Shah, N. & Ward, K. (2019). *The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system*. *Energy & Environmental Science*, 12, 463–491.

ιστορική του σημασία είναι σημαντική, εκείνο που συζητείται εκτενώς τα τελευταία έτη είναι οι δυνατότητές του ως «πράσινης» πηγής ενέργειας, δεδομένης της αυξανόμενης επείγουσας ανάγκης στις μέρες μας για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και μετάβαση από τα ορυκτά καύσιμα.

Κεφάλαιο 2. Περί παραγωγής του υδρογόνου

2.1 Τα βασικά είδη του υδρογόνου σύμφωνα με τον τρόπο παραγωγής του

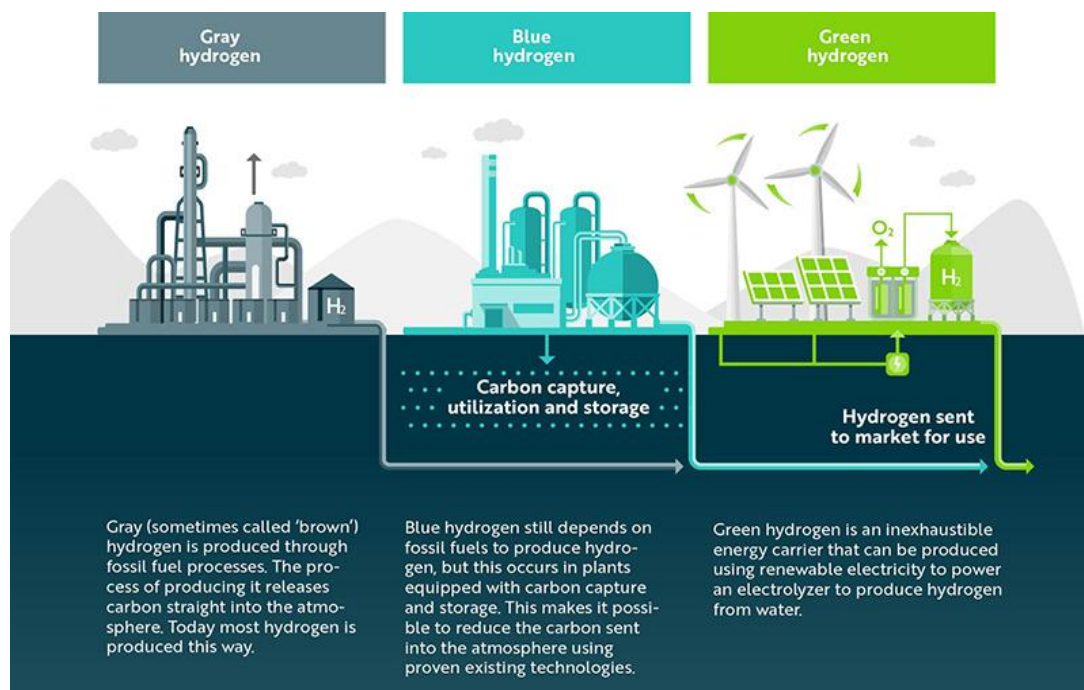
Η παραγωγή υδρογόνου πραγματοποιείται είτε από ορυκτές είτε από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Όπως γίνεται φανερό στο παρακάτω γράφημα, το υδρογόνο παράγεται σήμερα κατά ποσοστό 96% με αναμόρφωση ορυκτών καυσίμων από φυσικό αέριο, προκαλώντας περίπου 70–100 Mt CO₂ ετησίως ενώ η ηλεκτρόλυση νερού και οι τεχνολογίες με δέσμευση άνθρακα καταλαμβάνουν ελάχιστο ποσοστό (0,4% και 0,5% αντίστοιχα).



Εικόνα 2: «Κατανομή της παγκόσμιας παραγωγικής ικανότητας υδρογόνου ανά τεχνολογία παραγωγής για το 2023, European Hydrogen Observatory, 2024»

Με βάση το καύσιμο αλλά και τον τρόπο που θα επιλέξουμε να το μετασχηματίσουμε, διακρίνουμε το υδρογόνο σε τρεις βασικές κατηγορίες: το γκρι, το μπλε και το πράσινο. Η παραγωγή του γκρι υδρογόνου επιτυγχάνεται με τον μετασχηματισμό του φυσικού αερίου ή του άνθρακα, γεγονός που συνεπάγεται εκπομπή μεγάλων ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Η παραγωγή του μπλε υδρογόνου επιτυγχάνεται επίσης από τον μετασχηματισμό του φυσικού αερίου, με τη διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση γίνεται αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα και δεν υπάρχει περιβαλλοντική επιβάρυνση. Ολοκληρώνοντας, η παραγωγή του πράσινου

υδρογόνου επιτυγχάνεται εξ ολοκλήρου από τις ΑΠΕ, αξιοποιώντας τη μέθοδο της ηλεκτρόλυσης, μίας διαδικασίας που βοηθά στη διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο.¹⁸ Να σημειωθεί ότι η διαδικασία παραγωγής που επιλέγεται κάθε φορά εξαρτάται από πλήθος παραγόντων, με κυριότερους τη διαθεσιμότητα της πρώτης ύλης, το στάδιο ωριμότητας της τεχνολογίας, τις συνθήκες της αγοράς και της ζήτησης, καθώς επίσης και το κόστος.¹⁹



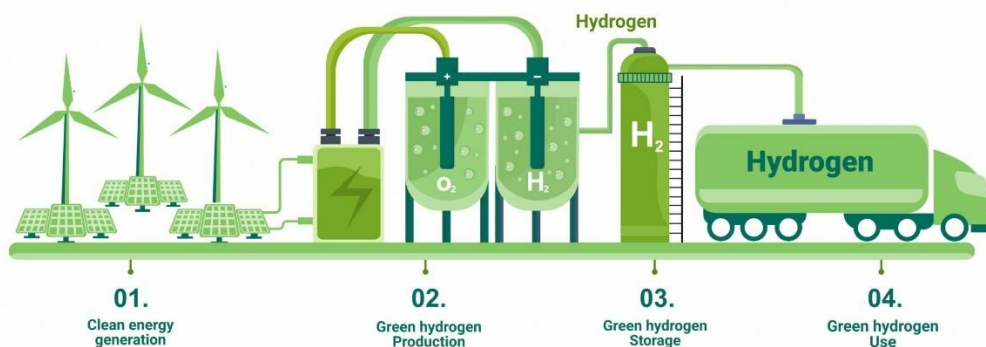
Εικόνα 3: International Renewable Energy Agency

¹⁸ European Parliament (2021). *Understanding hydrogen: Grey, blue and green*. European Parliamentary Research Service (EPRS) Briefing, PE 689.332. Available at: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689332/EPRS_BRI\(2021\)689332_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689332/EPRS_BRI(2021)689332_EN.pdf) [Accessed 30 August 2025].

¹⁹ World Economic Forum (2021). *Grey, blue, green – the many colours of hydrogen explained*.

2.2 Παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση

Η παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης του νερού συνιστά μία ιδιαίτερως ελπιδοφόρα τεχνολογία, καθώς μπορεί να συνδράμει δυναμικά στη σύσταση ενός ενεργειακού συστήματος, βασισμένου στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η εν λόγω διαδικασία πραγματοποιείται μέσω της διάσπασης του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο, αξιοποιώντας παράλληλα την ηλεκτρική ενέργεια. Όταν η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από βιώσιμες ενεργειακές πηγές όπως η ηλιακή, η αιολική και η γεωθερμική ενέργεια, τότε το παραγόμενο υδρογόνο δε συνοδεύεται από εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Το γεγονός αυτό καθίσταται μείζονος σημασίας για τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την παραγωγή ενέργειας.²⁰



Εικόνα 4: Απεικόνιση της αλυσίδας αξίας του πράσινου υδρογόνου, από την παραγωγή ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας έως την τελική χρήση.

Η ηλεκτρόλυση πραγματοποιείται κυρίως μέσω δύο βασικών συστημάτων. Το πρώτο σύστημα βασίζεται στην αξιοποίηση των παραδοσιακών ηλεκτρολυτικών διατάξεων με τους υγρούς ηλεκτρολύτες και το δεύτερο στηρίζεται στις πιο εξελιγμένες τεχνολογίες με τη χρήση μεμβρανών ανταλλαγής πρωτονίων (PEM). Οι εν λόγω μεμβράνες διακρίνονται για την αυξημένη απόδοσή τους και την προσαρμοστικότητά τους με αποτέλεσμα να καθίστανται κατάλληλες για χρήση. Και μολονότι το κόστος της συγκεκριμένης τεχνολογίας διατηρείται υψηλό σε σχέση με τις

²⁰ IRENA (2022). *Green Hydrogen: A Guide to Policy Making*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.

παραδοσιακές μεθόδους, η πρόοδος στην ανάπτυξη νέων υλικών και η συνεχής βελτίωση της αποδοτικότητάς της αναμένεται να μειώσουν σημαντικά το κόστος.²¹

Η ηλεκτρόλυση του νερού συνιστά καίρια μέθοδο για να παραχθεί πράσινο υδρογόνο, δεδομένου ότι άλλες τεχνικές, όπως η αναμόρφωση μεθανίου, σχετίζονται με την έκλυση αερίων του θερμοκηπίου που μολύνουν τον περιβάλλοντα χώρο. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου έρχεται να προστεθεί και η προσαρμοστικότητά της, καθώς δύναται να εφαρμοστεί τόσο σε μικρές όσο και σε μεγάλες εγκαταστάσεις, καλύπτοντας διαφορετικές ανάγκες σε ενέργεια και αποθήκευση. Άξιο αναφοράς, ωστόσο, καθίσταται το αυξημένο ενεργειακό κόστος λόγω των σημαντικών ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτούνται για τη διάσπαση του νερού.²²

Επιπρόσθετα, η διαδικασία της ηλεκτρόλυσης του νερού αποτελεί, επίσης, κρίσιμη τεχνολογία για την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό σύστημα. Οι πηγές όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια παρουσιάζουν αστάθεια λόγω των καιρικών συνθηκών, και η ηλεκτρόλυση αποτελεί μια αποτελεσματική μέθοδο για τη μετατροπή της πλεονάζουσας ενέργειας σε υδρογόνο, το οποίο μπορεί να αποθηκευτεί για μελλοντική χρήση. Αυτή η δυνατότητα ενισχύει τη σταθερότητα του δικτύου και μειώνει την ανάγκη για ορυκτά καύσιμα.²³

²¹ Wang, Wang, Gong, & Guo, “*The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production*”, σσ.573-588.

²² Kumar, R., Kumar, A., & Pal, A. (2021). An overview of conventional and non-conventional hydrogen production methods. *Materials Today: Proceedings*, 46, 5353–5359.

²³ 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* ;

2.3 Παραγωγή υδρογόνου με θερμοχημικές μεθόδους

Για την παραγωγή υδρογόνου με θερμοχημικές μεθόδους απαιτείται αξιοποίηση υψηλών θερμοκρασιών και χημικών αντιδράσεων, προκειμένου να διασπαστούν οι υδρογονάνθρακες και οι λοιπές χημικές ενώσεις, οι οποίες περιέχουν υδρογόνο. Στις εν λόγω μεθόδους εμπεριέχεται η αναμόρφωση μεθανίου με ατμό, η οξείδωση των υδρογονανθράκων και η υδροθερμική διάσπαση οργανικών ουσιών. Μολονότι αυτές οι διαδικασίες έχουν κερδίσει σημαντικό έδαφος στην παραγωγή υδρογόνου, εντούτοις το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα και η εξάρτησή τους από ορυκτά θεωρούνται σημαντικά προσκόμματα για τη βιωσιμότητά τους.²⁴

Από τις ως άνω τεχνικές, η αναμόρφωση μεθανίου με ατμό καθίσταται ως η πλέον συνηθισμένη και στηρίζεται στη χημική αντίδραση της διάσπασης μεθανίου σε υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα με τη σύμπραξη ατμού και καταλύτη. Οι συνθήκες που απαιτούνται για την πραγματοποίηση της διεργασίας προϋποθέτουν υψηλές θερμοκρασίες της τάξεως των 700° C έως 100° C. Αν και ως τεχνική θεωρείται οικονομική με σημαντική αποδοτικότητα, ωστόσο η παραγωγή CO₂ καθιστά αναγκαίες τις τεχνολογίες αποθήκευσης άνθρακα για να μειωθούν οι εκπομπές ρύπων.

Μία ακόμη θερμοχημική μέθοδος άξια αναφοράς καθίσταται η οξείδωση των υδρογονανθράκων. Πρόκειται για διεργασία κατά την οποία οι υδρογονάνθρακες καίγονται με συγκεκριμένη ποσότητα οξυγόνου, ώστε να παραχθεί υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα. Συγκριτικά με την αναμόρφωση ατμού, η εν λόγω μέθοδος απαιτεί λιγότερη ενέργεια. Ωστόσο εξακολουθεί να είναι επιβλαβής για το περιβάλλον, καθώς εκλύονται κατά την εφαρμογής της σημαντικές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα και λοιπών αερίων του θερμοκηπίου.²⁵

²⁴ 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.

²⁵ 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.

2.4 Παραγωγή υδρογόνου με βιολογικές διεργασίες

Μια άλλη προσέγγιση για την παραγωγή υδρογόνου είναι μέσω μιας βιολογικής διαδικασίας, το λεγόμενο βιοϋδρογόνο [H_2 που παράγεται βιολογικά], που παράγεται όταν μικροοργανισμοί μετατρέπουν μόρια νερού και οργανικά υποστρώματα σε υδρογόνο με την καταλυτική δράση δύο βασικών ενζύμων [υδρογενάση και νιτρογενάση]. Οι προαναφερθείσες βιολογικές διεργασίες έχουν επίσης αποδείξει πως δύναται να αποτελέσουν μια εναλλακτική λύση για τη βιώσιμη παραγωγή υδρογόνου με τη χρήση ΑΠΕ, ιδίως αν τοποθετηθούν στο πλαίσιο της διαχείρισης των αποβλήτων. Η δυνατότητα αξιοποίησης πηγών αποβλήτων, όπως τα λύματα, για βιώσιμη παραγωγή υδρογόνου από πηγές υποστρώματος χαμηλού κόστους και ηλιακή ενέργεια, συμβάλλει σε ένα άλλο μεγάλο περιβαλλοντικό ζήτημα, αυτό της διαχείρισης αποβλήτων²⁶.

²⁶ Akhlaghi, & Najafpour-Darzi, “A comprehensive review on biological hydrogen production”, σσ.2492-2512.

Κεφάλαιο 3. Περί αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου

3.1 Μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου

Η αποθήκευση υδρογόνου συνιστά μία από τις βασικότερες ενέργειες προκειμένου να αξιοποιηθεί ως φορέας ενέργειας. Η ιδιαίτερη φύση του με την χαμηλή πυκνότητα σε συνθήκες περιβάλλοντος δυσχεραίνει σημαντικά την αποθήκευσή του, καθιστώντας την όλη διαδικασία ως μία τεχνική και οικονομική πρόκληση. Αναρίθμητες τεχνολογίες αναπτύσσονται διαρκώς, προκειμένου να σταθούν αντάξιες των απαιτήσεων για ασφάλεια, αποδοτικότητα και οικονομικότητα στη χρήση του. Στην παρούσα ενότητα παρατίθενται οι κύριες μέθοδοι αποθήκευσης του υδρογόνου, οι τεχνικές προκλήσεις που τις συνοδεύουν καθώς και οι προοπτικές βελτίωσής τους.²⁷

Ο πρώτος τρόπος αφορά στην αποθήκευση υδρογόνου σε συμπίεσμένη μορφή. Η εν λόγω μέθοδος επιτυγχάνεται σε κυλίνδρους και δεξαμενές πίεσης κατασκευασμένες από ανθεκτικά υλικά και απαιτεί υψηλές πιέσεις που κυμαίνονται από 350 έως 700 bar. Πρόκειται για απλή διαδικασία, η οποία ήδη βρήκε εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία και συγκεκριμένα στα συστήματα μεταφορών λόγω της ευκολίας στην φόρτωση και εκφόρτωση του στοιχείου. Ωστόσο, δεν πρέπει να παραβλέψουμε και τις σημαντικές δυσκολίες, όπως είναι το υψηλό ποσοστό κατανάλωσης ενέργειας που απαιτεί η διαδικασία της συμπίεσης καθώς και η ανάγκη ανθεκτικών υλικών για την αποφυγή διαρροών και ρωγμών.²⁸

Η δεύτερη μέθοδος αφορά στην αποθήκευση υδρογόνου σε υγρή μορφή, διαδικασία που απαιτεί την ψύξη του σε κρυογενικές δεξαμενές θερμοκρασίας -253°C . Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου σε σχέση με την αέρια μορφή υδρογόνου. Το υγροποιημένο υδρογόνο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε αεροναυτικές ή βιομηχανικές εφαρμογές. Παρ' όλα αυτά, το υψηλό ποσοστό κατανάλωσης ενέργειας που χρειάζεται για την ψύξη, οι εξειδικευμένες μονώσεις και οι απώλειες λόγω εξάτμισης καθιστούν την υγρή αποθήκευση λιγότερο προσβάσιμη.²⁹

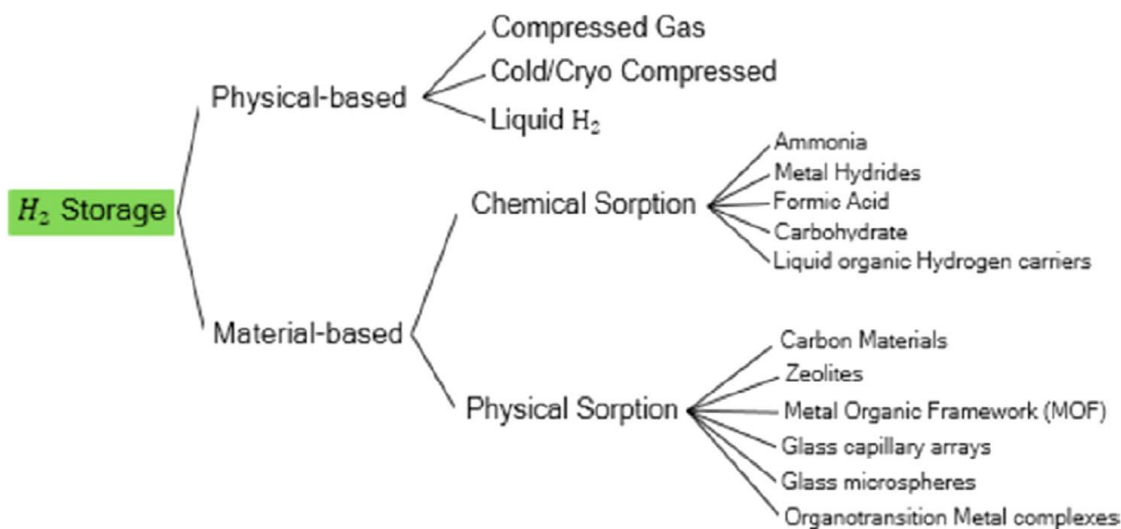
²⁷ C. Tarhan and M. A. Çil, "A study on hydrogen, the clean energy of the future: Hydrogen storage methods," *Journal of Energy Storage*, vol. 40, p. 102676, Aug. 2021.

²⁸ Davies, E., Ehrmann, A., & Schwenzfeier-Hellkamp, E. (2024). Safety of hydrogen storage technologies. *Processes*, 12(10), 2182

²⁹ Xie, Z., Jin, Q., Su, G., & Lu, W. (2024). A review of hydrogen storage and transportation: Progresses and challenges. *Energies*, 17(16), 4070

Τέλος, η στερεά αποθήκευση αποτελεί την τρίτη μέθοδο αποθήκευσης υδρογόνου. Καθίσταται ασφαλέστερη και πιο φιλική προς το περιβάλλον αλλά συνοδεύεται από αυξημένο κόστος και βαριές κατασκευές. Εν κατακλείδι, η αποθήκευση του υδρογόνου συνιστά κομβικό πεδίο για τη βιωσιμότητα της υδρογονοενέργειας. Μολονότι οι τεχνολογίες αποθήκευσής του παραμένουν ακόμη ένα τεχνολογικά απαιτητικό εγχείρημα, εντούτοις καθίστανται μείζονος σημασίας για την ομαλή μετάβαση σε ένα ενεργειακό σύστημα με χαμηλές εκπομπές άνθρακα. Στον βωμό αυτής της μετάβασης προς μία πιο «καθαρή ενέργεια» η επένδυση στην αποδοτική και ασφαλή αποθήκευση υδρογόνου αποτελεί στρατηγική προτεραιότητα.

Συνοψίζοντας, οι λύσεις αποθήκευσης υδρογόνου αποτελούν βασικό στοιχείο στα συστήματα υδρογόνου, λόγω της φύσης του μορίου του υδρογόνου, πράγμα που τονίζεται ιδιαίτερα όταν πρόκειται για την αξιοποίηση έργων και λειτουργιών μεγάλης κλίμακας. Χωρίζονται γενικά ανάλογα με το σκοπό τους, σε εκείνες που είναι πιο κατάλληλες για την κινητή εφαρμογή και σε εκείνες που προορίζονται για σταθερές εγκαταστάσεις. Ο δεύτερος διαχωρισμός βασίζεται στη μέθοδο αποθήκευσης με σχεδιασμούς που βασίζονται σε φυσικές και υλικές δομές, όπως μπορεί να φανεί και στο παρακάτω *σχεδιάγραμμα*.



Πίνακας 1: Hydrogen storage methods [Moradi R., & K. Groth, “Hydrogen storage and delivery: Review of the state-of-the-art technologies and risk and reliability analysis”, σ.1258, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.44, 2019].

3.2 Ο ρόλος των κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν ηλεκτροχημικές διατάξεις, οι οποίες μετατρέπουν τη χημική ενέργεια ενός καυσίμου, συνήθως υδρογόνου, και ενός οξειδωτικού μέσου, συνήθως οξυγόνου, απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια, με μοναδικά παραπροϊόντα το νερό και τη θερμότητα. Σε αντίθεση με τη συμβατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω κινητήρων εσωτερικής καύσης ή θερμικών σταθμών, όπου η μετατροπή πραγματοποιείται σε πολλαπλά στάδια (χημική–θερμική–μηχανική–ηλεκτρική), στις κυψέλες καυσίμου η μετατροπή είναι άμεση, γεγονός που επιτρέπει την επίτευξη υψηλότερης ενεργειακής απόδοσης και σημαντικής μείωσης των εκπομπών ρύπων.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου, όπως οι κυψέλες με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), οι στερεού ηλεκτρολύτη (SOFC) και οι ανθρακικού άλατος (MCFC), οι οποίες διαφοροποιούνται ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας, τα υλικά και το πεδίο εφαρμογής τους. Ιδιαίτερα για τις κινητές εφαρμογές, κυρίαρχη τεχνολογία αποτελεί η PEMFC, η οποία λειτουργεί αποκλειστικά με καθαρό υδρογόνο και εμφανίζει αποδόσεις της τάξεως του 40–50% στα επιβατικά οχήματα, έναντι 25–30% των συμβατικών κινητήρων εσωτερικής καύσης υπό πραγματικές συνθήκες οδήγησης. Επιπλέον, οι κυψέλες καυσίμου παρουσιάζουν υψηλότερη απόδοση σε μερικό φορτίο, καθιστώντας τις ιδιαίτερα κατάλληλες για αστικές μετακινήσεις και εφαρμογές όπου η ζήτηση ενέργειας μεταβάλλεται δυναμικά.³⁰

Ο ρόλος των κυψελών καυσίμου στην ενεργειακή μετάβαση είναι καθοριστικός, ιδίως σε τομείς όπου η ηλεκτροκίνηση με μπαταρίες αντιμετωπίζει τεχνικούς ή οικονομικούς περιορισμούς, όπως οι βαριές οδικές μεταφορές, η ναυτιλία και η σταθερή παραγωγή ενέργειας. Η χρήση τους επιτρέπει την αξιοποίηση υδρογόνου παραγόμενου από καθαρές πηγές ενέργειας, προσφέροντας λύσεις μηδενικών εκπομπών, υψηλής ενεργειακής απόδοσης και ενίσχυσης της ενεργειακής ασφάλειας. Παράλληλα, η εξέλιξη της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου αναμένεται να μειώσει το κόστος και να επιτρέψει τη μαζική διείσδυση της τεχνολογίας στον τομέα των μεταφορών τις επόμενες δεκαετίες.

³⁰ Hydrogen Council, 2022

Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για τον τομέα των μεταφορών, προσφέροντας σημαντικά περιβαλλοντικά, ενεργειακά και τεχνικά πλεονεκτήματα. Όταν τροφοδοτούνται με υδρογόνο, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλεκτροχημικής αντίδρασης, χωρίς εκπομπές ρύπων, καθώς το μόνο παραπροϊόν είναι το νερό. Ως αποτέλεσμα, συμβάλλουν ουσιαστικά στη μείωση των τοπικών ατμοσφαιρικών ρύπων και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ενώ μειώνουν σημαντικά και τον θόρυβο στις αστικές περιοχές, κάτι που έχει ιδιαίτερη σημασία για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής σε πυκνοκατοικημένα περιβάλλοντα. Επιπλέον, τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν ως κατανεμημένες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όταν είναι σταθμευμένα και συνδεδεμένα με δίκτυα, παρέχοντας ενέργεια σε κτίρια ή τοπικά δίκτυα και ενισχύοντας έτσι την αποκεντρωμένη ενεργειακή ασφάλεια.

Παρά τα παραπάνω πλεονεκτήματα, το κόστος των οχημάτων με κυψέλες καυσίμου εξακολουθεί να είναι υψηλό, αποτελώντας το σημαντικότερο εμπόδιο για τη μαζική εμπορική τους διάδοση. Η μείωση του κόστους παραγωγής και λειτουργίας παραμένει κρίσιμη πρόκληση, ιδίως για τα επιβατικά οχήματα. Ωστόσο, τα συστήματα κυψελών καυσίμου προσφέρουν εντελώς νέες δυνατότητες σχεδιασμού, καθώς απαιτούν λιγότερα μηχανικά και υδραυλικά υποσυστήματα σε σχέση με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε πιο ευέλικτες κατασκευαστικές προσεγγίσεις και, μακροπρόθεσμα, σε πρόσθετη μείωση του κόστους. Από αυτή την άποψη, η χρήση υδρογόνου σε κινητήρες εσωτερικής καύσης θεωρείται μεταβατική επιλογή, ενώ οι κυψέλες καυσίμου συνιστούν τη μακροπρόθεσμη, αποδοτικότερη και περιβαλλοντικά καθαρή λύση για την ενεργειακή μετάβαση στις μεταφορές.³¹

Ωστόσο, αυτό το δυναμικό μείωσης του κόστους πρέπει πρώτα να υλοποιηθεί και βρίσκεται σε συνεχή αλληλεπίδραση με τις απαιτήσεις για αποδοτικότητα και *διάρκεια ζωής*. Αυτή, απ' ό,τι φάνηκε, είναι η κύρια, αλλά όχι η μόνη, πηγή αβεβαιότητας για την επιτυχία των οχημάτων κυψελών καυσίμου στην αγορά. Πρέπει επίσης να επιλυθούν πρόσθετες τεχνικές προκλήσεις, όπως η αποθήκευση υδρογόνου και θέματα ασφάλειας. Για να επιτευχθεί σχετική επιτυχία στην αγορά, είναι σημαντικό να επιτευχθούν οι στόχοι που έχουν τεθεί για το κόστος, τη διάρκεια ζωής και την αξιοπιστία των κυψελών καυσίμου. Αυτές οι τεχνολογικές εξελίξεις διαρκούν προφανώς

³¹ Ajanovic, A. and Haas, R. (2018) 'Prospects and impediments for hydrogen and fuel cell vehicles in the transport sector', *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(9), pp. 4249–4262.

πάντα περισσότερο από ό,τι έχει προγραμματίσει η βιομηχανία. Ωστόσο, η προετοιμασία για τις διαρθρωτικές αλλαγές στη βιομηχανία είναι εξίσου σημαντική με την τεχνική βελτιστοποίηση των κυψελών καυσίμου. Πρέπει να υπάρχουν εξειδικευμένοι τεχνικοί σέρβις και ειδικευμένοι εργαζόμενοι για να εξασφαλιστεί η όσο το δυνατόν πιο ομαλή διαχείριση της εισαγωγής της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου. Η επιτυχία του υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών θα εξαρτηθεί καθοριστικά από την ανάπτυξη και την εμπορική διάθεση ανταγωνιστικών οχημάτων κυψελών καυσίμου.

3.3 Υφιστάμενα δίκτυα και μοντέλα διανομής του υδρογόνου

Η κατασκευή κατάλληλων και βιώσιμων δικτύων διανομής υδρογόνου συνιστά βασική προϋπόθεση για την εδραίωση του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα και την επίτευξη της απανθρακοποίησης του ενεργειακού μείγματος. Επιπλέον, η διανομή, ως ενδιάμεσο στάδιο της αλυσίδας του υδρογόνου μεταξύ της παραγωγής και της τελικής κατανάλωσης, συμβάλει καθοριστικά στη διαμόρφωση του κόστους και εν τέλει της βιωσιμότητας και της ικανότητας του υδρογόνου να ανταγωνιστεί τα συμβατικά καύσιμα.

Δύο είναι οι βασικές κατηγορίες, στις οποίες διακρίνονται τα μοντέλα διανομής. Τα κεντρικά δίκτυα αγωγών και τα αποκεντρωμένα. Τα κεντρικά δίκτυα αγωγών συνιστούν τον βασικότερο και αποδοτικότερο τρόπο μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου τόσο σε περιφερειακό όσο και σε διεθνές επίπεδο, διότι εμφανίζουν οικονομικά και τεχνικά πλεονεκτήματα. Ειδικότερα, μολονότι το αρχικό κόστος κατασκευής των αγωγών είναι υψηλό, το κόστος λειτουργίας τους παραμένει σημαντικά χαμηλότερο σε σχέση με τις λοιπές εναλλακτικές μεθόδους, καθώς επιτρέπει την συνεχή ροή μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου. Έτσι, οι αγωγοί καθίστανται μακροπρόθεσμα ιδιαιτέρως ανταγωνιστικοί και ιδανικοί για μεταφορά υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα.³²

Σε τεχνικό επίπεδο, παρά τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα δίκτυα αγωγών λόγω των ιδιαίτερων ιδιοτήτων του υδρογόνου, όπως η ευθραυστότητα που προκαλεί στα μέταλλα και ο κίνδυνος διαρροών, με την χρήση κατάλληλων υλικών και τεχνολογικών παρεμβάσεων οι αγωγοί δύνανται να μεταφέρουν διαρκώς μεγάλες ποσότητες υδρογόνου, εξασφαλίζοντας σταθερή και

³² Hydrogen Europe (2023). *Hydrogen Infrastructure Report*. Brussels: Hydrogen Europe.

αξιόπιστη τροφοδοσία στις διάφορες μονάδες, στους σταθμούς παραγωγής ενέργειας και στα σημεία ανεφοδιασμού.³³

Στα αποκεντρωμένα συστήματα διανομής το υδρογόνο παράγεται συνήθως μέσω ηλεκτρόλυσης σε μικρές ή μεσαίες μονάδες, εγκατεστημένες δίπλα στον τελικό χρήστη (πχ βιομηχανίες, σταθμοί ανεφοδιασμού). Χαρακτηριστικά στοιχεία των μοντέλων αυτών είναι η μείωση αφενός των απωλειών και τους κόστους που σχετίζεται με τη μεταφορά, και η αύξηση αφετέρου της ευελιξίας τροφοδοσίας. Πρέπει να τονιστεί ότι το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ιδιαίτερα ελκυστικό σε απομονωμένες ή αγροτικές περιοχές, διότι καθιστά τις περιοχές ενεργειακά αυτόνομες χωρίς την ανάγκη κατασκευής εκτεταμένων υποδομών αγωγών³⁴. Ωστόσο, οι προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα αποκεντρωμένα συστήματα διανομής είναι το υψηλό κόστος παραγωγής σε μικρές μονάδες και τα σύνθετα συστήματα αποθήκευσης και ελέγχου.³⁵

Παρά τα όσα προσφέρουν τα κεντρικά και αποκεντρωμένα μοντέλα διανομής, ένα σημαντικό ζήτημα που ανακύπτει και έχει στρατηγική σημασία για την ανάπτυξη της ευρωπαϊκής αγοράς υδρογόνου είναι η αξιοποίηση των ήδη υπαρχόντων δικτύων φυσικού αερίου. Στην επόμενη ενότητα εξετάζεται εκτενέστερα η εν λόγω προβληματική.

Τέλος, ως προς τη διανομή του υδρογόνου υφίστανται και τα λεγόμενα εναλλακτικά μοντέλα διανομής. Πρόκειται για τους τρόπους μεταφοράς και διάθεσης του καυσίμου πέρα από τα δίκτυα αγωγών και συνιστούν μεταβατικό στάδιο, καθώς τα πανευρωπαϊκά δίκτυα βρίσκονται ακόμη σε φάση ανάπτυξης. Ένας από τους πιο διαδεδομένους τρόπους διανομής αλλά με υψηλό κόστος είναι το συμπιεσμένο υδρογόνο (CGH₂), το οποίο μεταφέρεται σε κυλίνδρους ή ειδικά trailer και είναι κατάλληλο για μικρές αποστάσεις και ανεφοδιασμό οχημάτων. Το υγροποιημένο υδρογόνο (LH₂) ενδείκνυται ως πιο αποδοτικό στις διεθνείς μεταφορές, ωστόσο η διαδικασία της υγροποίησης απαιτεί πολλή ενέργεια και ακριβές εγκαταστάσεις. Είναι φανερό ότι τα εναλλακτικά μοντέλα διανομής είναι μεν ευέλικτα καλύπτοντας ειδικές ανάγκες και περιστάσεις, ωστόσο έχουν

³³ Melaina, M.W., Antonia, O. & Penev, M. (2013). Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues. Technical Report NREL/TP-5600-51995. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.

³⁴ Guandalini, G., Campanari, S. & Romano, M. (2021). *Hydrogen from renewable power: Technology outlook for decentralized systems*. International Journal of Hydrogen Energy, 46(10), 7231–7245.

³⁵ Teng, F., et al. (2022). Decentralized hydrogen production and distribution: techno-economic perspectives. Applied Energy, 308,

μεγάλο κόστος και αξιοποιούνται συμπληρωματικά έως ότου αναπτυχθούν πλήρως τα δίκτυα αγωγών μεγάλης κλίμακας.³⁶

3.4 Αξιοποίηση υπαρχουσών ενεργειακών εγκαταστάσεων φυσικού αερίου

Για τη μεταβατική περίοδο προς μια κοινωνία με ουδέτερο αποτύπωμα άνθρακα, που να εστιάζει, εν μέρει, σε αξιοποίηση ΑΠΕ, η εκμετάλλευση των ήδη κατασκευασμένων εγκαταστάσεων που δεν βασίζονται σε ΑΠΕ θα μπορούσε να είναι απαραίτητη για την παραγωγή υδρογόνου³⁷ Είναι γεγονός πως αυτή η επιλογή απαιτεί προσαρμογές, διότι οι ιδιότητες του υδρογόνου είναι διαφορετικές σε σύγκριση με του φυσικού αερίου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το υδρογόνο έχει υψηλότερη διαπερατότητα και διαβρωτική δράση. Περαιτέρω, η μείξη του υδρογόνου με το φυσικό αέριο δύναται να επιφέρει προβλήματα στη λειτουργία των συσκευών κατανάλωσης.³⁸ Αν και η μέθοδος αυτή μπορεί να μειώσει τις αρχικές επενδύσεις, μακροπρόθεσμα απαιτεί εκτεταμένη αναβάθμιση του δικτύου.

Η αξιοποίηση αυτών των υποδομών για την παραγωγή υδρογόνου δεν είναι σύμφωνη με τις αξίες παραγωγής πράσινου υδρογόνου, αλλά θα μπορούσε ωστόσο να μειώσει σημαντικά το κόστος της επένδυσης κεφαλαίου σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας. Η μείωση των αρχικών επενδύσεων διαδραματίζει έναν ρόλο ιδιαίτερα σημαντικό όσον αφορά τη πρώτη φάση της ενθάρρυνσης της παραγωγής υδρογόνου³⁹. Άλλες εγκαταστάσεις βασικού φορτίου με τις ίδιες δυνατότητες αξιοποίησης είναι οι πυρηνικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Δεδομένου ότι οι απόψεις στον κόσμο σχετικά με την πυρηνική τεχνολογία παραμένουν, κυρίως,

³⁶ Hydrogen Europe (2023). *Hydrogen Infrastructure Report*. Brussels: Hydrogen Europe.

³⁷ Quarton, & Samsatli, “Power-to-gas for injection into the gas grid”, σσ.302-316; Αξίζει να αναφερθεί εδώ πως παράλληλα με την αυτοκινητοβιομηχανία, οι ναυπηγικές και αεροπορικές εταιρείες έχουν τη δυνατότητα να αρχίσουν σταδιακά να εφαρμόζουν λύσεις υδρογόνου, στρεφόμενες προς μια κλιματικά ουδέτερη οικονομία. Αποτελώντας δύο κύριες αγορές, οι τομείς της βιομηχανίας και της κινητικότητας μπορούν να συμβάλουν στην ανάπτυξη της τεχνολογίας υδρογόνου και στην εφαρμογή της για τη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα, δεδομένου ότι και οι δύο παράγουν τη μεγαλύτερη ποσότητα εκπομπών. Η ΕΕ είναι αποφασισμένη να στηρίξει οικονομικά και να παράσχει πρότυπα και μεθοδολογίες για τη δημιουργία μιας παγκόσμιας αγοράς υδρογόνου, η οποία θα συμβάλει στην βιωσιμότητα, και την οικονομία κλίματος.

³⁸ Patel et al., 2024, ο.π

³⁹ Novosel, Zivic, & Avsec, “The production of electricity, heat and hydrogen with the thermal power plant in combination with alternative technologies”, σσ.1072-1081].

διχασμένες⁴⁰, τα συνδυαστικά συστήματα με βάση την πυρηνική ενέργεια και τις ΑΠΕ αποτελούν μια εναλλακτική επιλογή, παρότι και αυτή δεν αποτελεί ιδανική⁴¹.

Συνοψίζοντας, τα κεντρικά δίκτυα αγωγών έχουν μεγαλύτερη αποδοτικότητα, διότι επιτρέπουν τη συνεχή και σταθερή ροή υδρογόνου, ενώ τα αποκεντρωμένα συστήματα και η ενσωμάτωση στα δίκτυα φυσικού αερίου προσφέρουν εναλλακτικές λύσεις με μέτρια αποδοτικότητα, έχοντας μεγαλύτερη ευελιξία. Η μεταφορά με οχήματα είναι λιγότερο αποδοτική, κυρίως λόγω των απωλειών και του υψηλού κόστους αποθήκευσης.

3.5 Η ευρωπαϊκή πρωτοβουλία «European Hydrogen Backbone»

Το European Hydrogen Backbone (EHB) συνιστά μία δυναμική ευρωπαϊκή πρωτοβουλία με στόχο να συσταθεί ένα εκτεταμένο ευρωπαϊκό δίκτυο μεταφοράς υδρογόνου. Το εν λόγω δίκτυο αποσκοπεί να υποστηρίξει την ευρωπαϊκή αγορά υδρογόνου εξασφαλίζοντας τη σύνδεση περιοχών παραγωγής υδρογόνου με περιοχές κατανάλωσης.⁴²

Πρωταρχικός στόχος της ως άνω πρωτοβουλίας είναι να αναπτυχθεί μία πανευρωπαϊκή υποδομή για τη μεταφορά υδρογόνου, η οποία θα είναι χαμηλή σε κόστος αλλά υψηλή σε απόδοση. Επιπλέον, κύριο μέλημα των φορέων είναι η διασφάλιση της διαθεσιμότητας του υδρογόνου και ο ασφαλής εφοδιασμός του στα πλαίσια μίας ενοποιημένης αγοράς εντός των χωρών της ΕΕ. Τέλος, η παραγωγή πράσινου υδρογόνου, η εισαγωγή υδρογόνου από τρίτες χώρες και η αύξηση του βιομηχανικού ανταγωνισμού, ιδιαίτερα στους τομείς που χρειάζονται καθαρό καύσιμο υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, ορίζονται επίσης ως σημαντικοί στόχοι της εν λόγω πρωτοβουλίας.

Οι προτεινόμενες υποδομές προδιαγράφουν ένα δίκτυο, το οποίο μέχρι το 2040 θα περιλαμβάνει αγωγούς υδρογόνου 53.000χλμ.⁴³ Το 60% του συγκεκριμένου δικτύου θα στηρίζεται σε υφιστάμενους επαναχρησιμοποιούμενους αγωγούς φυσικού αερίου, προκειμένου να μειωθούν αμφότερα το κόστος και ο χρόνος υλοποίησης.⁴⁴ Ακόμη, θα υπάρχουν διασυνοριακές συνδέσεις

⁴⁰ Caglar, Gönenç, & Destek. “The influence of nuclear energy research and development investments on environmental sustainability”, σσ.861-872.

⁴¹ Ένα από τα σημαντικά εμπόδια στο συνδυασμό δύο τεχνολογιών είναι ότι η παραγωγή πυρηνικής ενέργειας πρέπει να προσαρμόζεται ανάλογα με τις τιμές παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ [ο.π.].

⁴² Joule. (2023). *The Potential Role of a Hydrogen Network in Europe*. Joule, 7(8), 1793–1817.

⁴³ Wang, A., van der Leun, K., Peters, D., & Buseman, M. (2020). *European Hydrogen Backbone: How a dedicated hydrogen infrastructure can be created*.

⁴⁴ Joule. (2023). *The Potential Role of a Hydrogen Network in Europe*. Joule, 7(8), 1793–1817

για να μπορεί εύκολα να διασφαλιστεί η πρόσβαση του υδρογόνου από περιοχές με αυξημένη δυναμική παραγωγής προς τα βιομηχανικά κέντρα της Κεντρικής Ευρώπης.

Σε οικονομικό επίπεδο η εκτίμηση για το συνολικό κόστος ανέρχεται περίπου στο ύψος των 100 δισεκατομμυρίων ευρώ μέχρι το 2040.⁴⁵ Πρόκειται για κόστος που μπορεί να θεωρηθεί ανταγωνιστικό αν λάβει κανείς υπόψη τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των υπάρχοντων αγωγών, την ανάγκη για ασφαλή μεταφορά υδρογόνου αλλά και μεγάλο χρονικό εύρος χρήσης που προσφέρουν.⁴⁶

⁴⁵ ο.π Hydrogen Europe, 2023

⁴⁶ Schiebahn, S., et al. (2022). *Hydrogen as an energy carrier: techno-economic analysis for Europe*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167,

Κεφάλαιο 4. Οι προοπτικές του «πράσινου» υδρογόνου ως καύσιμο του μέλλοντος

4.1 Συμβολή στην απανθρακοποίηση και στην ενεργειακή μετάβαση

Έως τα τέλη του 20ού αιώνα, η παγκόσμια οικονομική ανάπτυξη υπήρξε στενά συνυφασμένη με την ευρεία χρήση ορυκτών καυσίμων, δημιουργώντας μια ισχυρή εξάρτηση μεταξύ τους. Αναμφισβήτητα, η αξιοποίηση των ορυκτών καυσίμων επέφερε ραγδαία τεχνολογική και οικονομική πρόοδο. Ωστόσο, η εκτεταμένη χρήση τους προκάλεσε ουσιώδη περιβαλλοντική ρύπανση, λόγω των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα και μάλιστα σε τέτοια κλίμακα, ώστε η Γη αδυνατεί πλέον να τα απορροφήσει.⁴⁷ Ο φυσικός πλούτος του πλανήτη στον οποίο είμαστε φιλοξενούμενοι, υπήρξε ενεργειακή πηγή την οποία το ανθρώπινο είδος χρησιμοποίησε δίχως να αναλογιστεί τις συνέπειες⁴⁸.

Η κατάσταση αυτή προκάλεσε επανειλημμένες προειδοποιήσεις εκ μέρους της επιστημονικής κοινότητας, ούτως ώστε η παγκόσμια οικονομία να στραφεί στην ανάπτυξη και προώθηση τεχνολογικών συστημάτων που βασίζονται στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Μολονότι μεγάλο μέρος της παγκόσμιας οικονομίας εξακολουθεί σήμερα να κινείται με τη δύναμη των ορυκτών καυσίμων, υπήρξε επιτακτική η ανάγκη για αναζήτηση καθαρότερων μορφών ενέργειας όπως το πράσινο υδρογόνο.⁴⁹

Η ισχυρότερη υποστήριξη της ιδέας ότι το υδρογόνο θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην ενεργειακή μετάβαση διατυπώθηκε στις αρχές του 21ου αιώνα, κυρίως λόγω των περιβαλλοντικών του πλεονεκτημάτων.⁵⁰ Ως ενεργειακός φορέας με μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και αερίων του θερμοκηπίου κατά τη χρήση του, το υδρογόνο θεωρήθηκε σχεδόν μοναδικό τεχνολογικό σήμα κατατεθέν μιας νέας εποχής καθαρής ενέργειας που δύναται να επιφέρει απανθρακοποίηση σημαντικών τομέων της οικονομίας, όπως η βιομηχανία, οι βαριές μεταφορές κλπ. Παρά τη μακρά και δαπανηρή πορεία για τη μετάβαση σε ώριμες και σταθερές τεχνολογίες, αποδείχθηκε ότι η ανάπτυξη του υδρογόνου αποτελεί μια

⁴⁷ IEA (2021), *World Energy Outlook 2021*, IEA, Paris

⁴⁸ Schipper, et al., “*The debate: Is global development adapting to climate change?*”, σσ.102-105].

⁴⁹ Frano, “*Transition to renewable energy systems with hydrogen as an energy carrier*”, σσ.308-312.

⁵⁰ Elam, et al., “*Realizing the hydrogen future*”, σσ.601-607.

στρατηγική επιλογή που δικαιολογεί την επένδυση πόρων και έρευνας.⁵¹ Για τον λόγο αυτό, κατέχει σήμερα ουσιαστική θέση στον τομέα της αποθήκευσης ενέργειας και αναγνωρίζεται διεθνώς ως βασικό εργαλείο για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας και τη μείωση της περιβαλλοντικής πίεσης στον πλανήτη.

4.2 Ενεργειακή ασφάλεια- σχέδιο REPower

Το σχέδιο REPowerEU, που παρουσίασε η Ευρωπαϊκή Επιτροπή τον Μάιο του 2022, συνιστά μία ολοκληρωμένη στρατηγική με σκοπό την αντιμετώπιση της ενεργειακής κρίσης, η οποία προκλήθηκε συνεπεία της ρωσικής εισβολής στην Ουκρανία. Στόχος του σχεδίου είναι να μειωθεί με ταχείς ρυθμούς η εξάρτηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης από τα ρωσικά ορυκτά καύσιμα, να ενισχυθεί η ενεργειακή ασφάλεια των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης και να επιταχυνθεί η μετάβαση σε ένα πιο καθαρό και βιώσιμο ενεργειακό σύστημα.⁵²

Οι βασικοί στόχοι του σχεδίου REPowerEU συνίστανται στην εξοικονόμηση ενέργειας, στη διαφοροποίηση των πηγών εφοδιασμού και την επιτάχυνση της ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ταυτόχρονα, το σχέδιο εστιάζει στην ενίσχυση της αγοράς καθαρού υδρογόνου, μέσω της σύστασης της Ευρωπαϊκής Τράπεζας Υδρογόνου και της ανάπτυξης στρατηγικών ενεργειακών συνεργασιών σε διεθνές επίπεδο. Περαιτέρω, συμπλέει με τους στόχους της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και του πακέτου Fit for 55, αποσκοπώντας στον περιορισμό των εκπομπών κατά 55% έως το 2030 και την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050.

Ως προς τη χρηματοδότηση του REPowerEU, αυτή προέρχεται κατά κύριο λόγο από τον Μηχανισμό Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας (RRF), διαμέσω του οποίου τα κράτη-μέλη προβαίνουν σε επενδύσεις και μεταρρυθμίσεις, οι οποίες συμβάλλουν στην ενίσχυση της ενεργειακής τους ανεξαρτησίας και στηρίζουν την πράσινη μετάβαση. Ουσιαστικά, συνιστά ένα σημαντικό ευρωπαϊκό εργαλείο για την αντιμετώπιση των γεωπολιτικών προκλήσεων και τον σχεδιασμό ενός βιώσιμου ενεργειακού μέλλοντος.

⁵¹ Hetland, & Grietus, “*In search of a sustainable hydrogen economy*”, σσ.736-747.

⁵² European Commission (2022). *REPowerEU: Joint European Action for more affordable, secure and sustainable energy*. Brussels: European Commission.

4.3 Αποθήκευση και διανομή

Αξίζει ωστόσο να αναφερθεί πως έχει υπάρξει μια πληθώρα μελετών που αναδεικνύουν και προειδοποιούν σχετικά με τις επιπτώσεις της εφαρμογής του υδρογόνου, όπως οι ιδιότητες των υλικών των αγωγών υδρογόνου/φυσικού αερίου⁵³, θέματα ασφάλειας⁵⁴, οικονομικές επιπτώσεις⁵⁵, και απόδοσης ροής⁵⁶, συμβάλλοντας στο ρόλο του υδρογόνου στην ενεργειακή μετάβαση. Δεδομένου ότι η άμεση και πλήρης μετάβαση από το φυσικό αέριο στο υδρογόνο δεν αποτελεί ρεαλιστικό σενάριο, τόσο για το δίκτυο διανομής όσο και για το δίκτυο μεταφοράς, εξετάζεται ευρέως μια μεταβατική περίοδος με μείγματα⁵⁷.

4.4 Το «πράσινο» υδρογόνο στην Ευρωπαϊκή βιομηχανία, και το παράδειγμα της Hydrogen Europe

Ο μεγαλύτερος εκπρόσωπος για την προώθηση του υδρογόνου στον ευρωπαϊκό επιχειρηματικό τομέα είναι η ένωση Hydrogen Europe. Αποτελείται από περισσότερες από 160 εταιρείες, 78 ερευνητικούς οργανισμούς και 25 εθνικές ενώσεις, σε μια σύμπραξη καινοτομίας με την Κοινή Επιχείρηση Κυψελών Καυσίμου και Υδρογόνου [Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, εφεξής FCH JU]. Στόχος της FCH JU έχει υπάρξει να διευκολύνει την άφιξη της αγοράς τεχνολογιών υδρογόνου και να ενισχύσει την ανταγωνιστικότητά της με ένα ταμείο ύψους ~1,5 δισεκατομμυρίων ευρώ. Με την Hydrogen Europe συγκεντρώνονται διάφορες βιομηχανίες, μεγάλες και μεσαίες επιχειρήσεις, οι οποίες υποστηρίζουν τη μετάβαση στην πράσινη ενέργεια⁵⁸.

⁵³ βλ. ενδεικτικά Liu B., et al., “Decompression of hydrogen and natural gas mixtures in high-pressure pipelines”, σσ.7428-7437.

⁵⁴ Molnarne, & Schroeder, “Hazardous properties of hydrogen and hydrogen containing fuel gases”, σσ.1-5.

⁵⁵ Για μια συζήτηση βλ. Quarton, & Samsatli, “Should we inject hydrogen into gas grids?”, σσ.115-172.

⁵⁶ Wojtowicz, “An analysis of the effects of hydrogen addition to natural gas on the work of gas appliances”, σσ.465-473.

⁵⁷ Διάφορες έρευνες υποδεικνύουν ότι η μέθοδος αποθήκευσης και παροχής καθαρής ενέργειας στις αγορές μέσω αγωγών υδρογόνου/φυσικού αερίου δεν αυξάνει σημαντικά τους κινδύνους που σχετίζονται με τις συσκευές των τελικών χρηστών, τη δημόσια ασφάλεια ή την ανθεκτικότητα του υφιστάμενου δικτύου, εάν προηγουμένως ληφθούν οι κατάλληλες προφυλάξεις. Ανεξάρτητα από αυτό, η συγκέντρωση του μείγματος θα πρέπει να αξιολογείται λεπτομερώς, καθώς μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το σύστημα του δικτύου αγωγών και τη σύνθεση του φυσικού αερίου. Συμπερασματικά, κάθε προοδευτικό βήμα προς την εφαρμογή υδρογόνου στις υποδομές φυσικού αερίου απαιτεί πρώτα εκτεταμένη μελέτη, δοκιμές, πιθανές τροποποιήσεις, παρακολούθηση και πρακτικές συντήρησης [για μια συζήτηση βλ. Haeseldonckx, & D’haeseleer, “The use of the natural gas pipeline infrastructure for hydrogen transport in a changing market structure”, σσ.1381-1386].

⁵⁸ Για την ιστοσελίδα της Hydrogen Europe, βλ. Hydrogen Europe industry, accessed at March 3rd, 2025, available at <https://hydrogeneurope.eu/about-us>.

Οι ευρύτερα διαδεδομένες βιομηχανικές χρήσεις υδρογόνου είναι στη χαλυβουργία, τη χημική βιομηχανία, τη βιομηχανία γυαλιού, και την ηλεκτρονική βιομηχανία. Η σημερινή ευρωπαϊκή χαλυβουργία ανταγωνίζεται την κινεζική και, καθώς η παραγωγή χάλυβα βασίζεται ακόμη στον άνθρακα, καθίσταται αναγκαίο να υποστηρίξει διεργασίες με ουδέτερο αποτύπωμα άνθρακα για να μπορέσει να συμβαδίσει σε παγκόσμιο επίπεδο. Το υδρογόνο χρησιμοποιείται επίσης στη βιομηχανία διύλισης για την υδρογονοπυρόλυση και την αποθείωση, καθώς και για τη σύνθεση χημικών προϊόντων για το σχηματισμό αμμωνίας και μεθανόλης.

Άλλες χρήσεις αφορούν τη γεωργική λίπανση, την παραγωγή και κατασκευή μετάλλων, την παραγωγή μεθανόλης, την επεξεργασία τροφίμων και τα καλλυντικά. Περίπου το 55% της παγκόσμιας ζήτησης υδρογόνου αφορά τη σύνθεση αμμωνίας, το 25% στα διυλιστήρια, το 10% για την παραγωγή μεθανόλης και το 10% για άλλες χρήσεις⁵⁹. Μια άλλη διερευνημένη πιθανή εφαρμογή του υδρογόνου στη βιομηχανία είναι η παραγωγή θερμότητας σε υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες. Οι αλκαλικοί ηλεκτρολύτες και οι ηλεκτρολύτες PEM, καθώς και οι PEMFC, παράγουν θερμότητα σε χαμηλή-μέση θερμοκρασία, η οποία μπορεί να παρέχεται για οικιακές εφαρμογές, τηλεθέρμανση και ορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές, ενώ οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου [Solid oxide fuel cell, εφεξής SOFC] μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας, όπως οι βιομηχανίες μετάλλων.

Επιπλέον, οι βιομηχανίες αρχίζουν να χρησιμοποιούν τα υποπροϊόντα της ηλεκτρόλυσης προς όφελός τους. Η ηλεκτρόλυση με ανάκτηση θερμότητας και οξυγόνου θα μπορούσε να μειώσει το κόστος και να αυξήσει τη συνολική ενεργειακή απόδοση της παραγωγής υδρογόνου, καθώς χάνεται περίπου το 15-30% της ενέργειας⁶⁰. Περαιτέρω, η αυξανόμενη χρήση του υδρογόνου στις μεταφορές αναμένεται να δημιουργήσει μια αγορά με σημαντικές επενδυτικές δυνατότητες. Σύμφωνα με ορισμένες έρευνες, τα οχήματα υδρογόνου θα αποτελέσουν τη μεγαλύτερη οικονομία στην αναπτυσσόμενη αγορά μεταξύ 2020 και 2030⁶¹, κάτι που φαίνεται να επιβεβαιώνεται σήμερα [έτος αναφοράς 2025]. Κατά συνέπεια, θα αυξηθεί η ανάγκη για υποδομές υδρογόνου

⁵⁹ Bezdek, “*The hydrogen economy and jobs of the future*”, σσ.1-5, 26-28.

⁶⁰ Σουηδοί ερευνητές μελέτησαν τις δυνατότητες ενσωμάτωσης για μια εθνική βιομηχανία χαρτοπολτού και χαρτιού. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι με την αξιοποίηση του οξυγόνου και της θερμότητας των παραπροϊόντων, η δυνατότητα πώλησης του υδρογόνου που παράγεται από την ηλεκτρόλυση είναι μεγαλύτερη. Στη Σουηδία, από τη συνολική ζήτηση οξυγόνου, περίπου το 65% χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία επεξεργασίας μετάλλων, περίπου το 15% χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία χαρτοπολτού και χαρτιού και άλλο ένα 15% από τη χημική βιομηχανία [Saxe, “*Advantages of integration with industry for electrolytic hydrogen production*”, σσ.42-50].

⁶¹ Bertuccioli, et al., “*Study on development of water electrolysis in the EU*”, σ.125.

[παραδείγματος χάρη, HRS και αγωγούς], καθώς και η ζήτηση για συστήματα υδρογόνου, όπως κυψέλες καυσίμου και ηλεκτρολύτες.

Η Ευρώπη με την αυξανόμενη κατασκευή συστημάτων με βάση το καθαρό υδρογόνο είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστική και σε καλή θέση στην εμπορία πωλήσεων. Οι αθροιστικές επενδύσεις σε πράσινο υδρογόνο στην Ευρώπη θα μπορούσαν να ανέλθουν σε μισό τρισεκατομμύριο ευρώ μέχρι το 2050, ενώ για το υδρογόνο χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα με βάση τα ορυκτά καύσιμα θα ήταν της τάξης των ~18 δισεκατομμυρίων ευρώ. Σε συνδυασμό με την παγκόσμια ηγετική θέση της ΕΕ στην τεχνολογία με βάση τις ΑΠΕ, η ανάδυση μιας αλυσίδας αξίας υδρογόνου που θα εξυπηρετεί πολλούς βιομηχανικούς τομείς και άλλες τελικές χρήσεις θα μπορούσε να απασχολήσει έως και 1 εκατομμύριο υπαλλήλους. Εκτιμάται ότι το πράσινο υδρογόνο θα μπορούσε να καλύψει το 24% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης έως το 2050, με ετήσιες πωλήσεις της τάξης των ~630 δισεκατομμυρίων ευρώ⁶².

Ειρήσθω εν παρόδω, το πράσινο υδρογόνο δεν φαίνεται να αποτελεί ακόμη αρκετά ανταγωνιστικό ως προς το κόστος σε σύγκριση με το υδρογόνο ορυκτής προέλευσης. Για να μπορέσει να αξιοποιήσει όλες τις ευκαιρίες που συνδέονται με το υδρογόνο, η ΕΕ χρειάζεται μια στρατηγική προσέγγιση που να αναδεικνύει συντονισμένες επενδύσεις και πολιτικές που να προτρέπουν τη συνεργασία μεταξύ ιδιωτικών και δημόσιων φορέων⁶³. Δεδομένου του ρόλου του υδρογόνου ως φορέα ενέργειας, η χρήση του για αποθήκευση και μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις θεωρείται ότι θα αυξηθεί επίσης, περισσότερο από ό,τι έχει ήδη.

Επί του παρόντος, υπάρχουν στον κόσμο πάνω από 5 χιλιάδες χιλιόμετρα αγωγών υδρογόνου, αλλά αυτό δεν είναι τίποτα σε σύγκριση με τα πάνω από 3 εκατομμύρια χιλιόμετρα αγωγών φυσικού αερίου⁶⁴. Για περαιτέρω δυνατότητες και βιομηχανική επέκταση των εφαρμογών υδρογόνου, η κατασκευή νέων υποδομών υδρογόνου φαίνεται να αποτελεί ζωτικής σημασίας, καθώς και η αξιοποίηση των υφιστάμενων υποδομών [όπως, για παράδειγμα, μερική έγχυση ή μετατροπή υφιστάμενων δικτύων φυσικού

⁶² Ο.π., σ.128.

⁶³ *Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions, Brussels: A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*".

⁶⁴ Russo, "Hydrogen", σσ.24-32.

Από επιχειρηματική άποψη, ο κλάδος έχει τις μεγαλύτερες δυνατότητες, ενώ τα περιθώρια κέρδους αναμένονται στις μεταφορές. Η ενεργειακή βιομηχανία είναι σήμερα ο μεγαλύτερος καταναλωτής υδρογόνου, ο οποίος είναι επίσης ιδιαίτερα ευαίσθητος στις τιμές και παγκοσμίως ανταγωνιστικός. Σχεδόν το σύνολο του υδρογόνου που χρησιμοποιείται είναι γκρίζο υδρογόνο [κλιματικά ζημιογόνο, σε αντίθεση με το πράσινο], το οποίο παράγεται με τη χρήση ορυκτών καυσίμων, πράγμα κατανοητό, καθώς οι εταιρείες δεν είναι διατεθειμένες να πληρώσουν υψηλότερη τιμή για το πράσινο υδρογόνο χωρίς εποικοδομητική πρωτοβουλία. Η μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη θα μπορούσε να μειώσει το κόστος των ηλεκτρολυτών⁶⁵. Το μπλε υδρογόνο [μεταβατικό στάδιο μεταξύ γκρίζου και πράσινου] με σχετικές κλιματικές διασφαλίσεις, θα μπορούσε ενδεχομένως να επιταχύνει τον βιομηχανικό μετασχηματισμό μειώνοντας τις τιμές μέσω οικονομιών κλίμακας⁶⁶.

Η προοπτική της αγοράς πράσινου υδρογόνου βασίζεται στην ευρωπαϊκή βιομηχανική δύναμη στην παραγωγή ηλεκτρολυτών, όπου περίπου 280 εταιρείες δραστηριοποιούνται στην αλυσίδα παραγωγής και εφοδιασμού. Από το ξεκίνημα της διανοιγόμενης δεκαετίας, υπάρχουν περισσότερα από 1GW έργων ηλεκτρολυτών σε διαδικασία κατασκευής, ενώ η συνολική ευρωπαϊκή παραγωγική ικανότητα ηλεκτρολυτών είναι κάτω από 1GW ετησίως. Για να καταστεί το υδρογόνο ανταγωνιστικό ως προς το κόστος, είναι ζωτικής σημασίας μια συντονισμένη προσπάθεια με την Clean Hydrogen Joint Undertaking [Κοινή επιχείρηση Καθαρό υδρογόνο], τα κράτη μέλη και τις ήδη ανεπτυγμένες περιοχές. Καθώς η τεχνολογία ωριμάζει και το κόστος παραγωγής του μειώνεται, το υδρογόνο θα πρέπει σταδιακά να αναπτυχθεί σε μεγαλύτερη κλίμακα, γεγονός που θα φέρει στους επενδυτές ασφάλεια στην ενεργειακή μετάβαση και θα αυξήσει περαιτέρω τον αριθμό των επιχειρήσεων που σχετίζονται με το υδρογόνο.

⁶⁵ Για μια συζήτηση όσων αναφέρονται προηγουμένως, αλλά και για την εν λόγω θεματική, βλ. van Renssen, “*The hydrogen solution*”, σσ.799-801.

⁶⁶ Αξίζει εδώ να αναφερθεί πως η τιμή του γκρίζου υδρογόνου ανέρχεται σε 1,50 ευρώ ανά κιλό, του μπλε υδρογόνου σε 2-3 ανά κιλό, και του πράσινου υδρογόνου σε 3,50-6 ανά κιλό. Το κόστος του πράσινου υδρογόνου μειώνεται γρήγορα, καθώς το κόστος των ηλεκτρολυτών έχει ήδη μειωθεί κατά 60% τα τελευταία δέκα χρόνια και προβλέπεται να μειωθεί στο μισό το 2030 σε σχέση με σήμερα με οικονομίες κλίμακας. Οι ηλεκτρολύτες αναμένεται να ανταγωνιστούν το υδρογόνο με βάση τα ορυκτά το 2030, όταν η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ΑΠΕ θα γίνει φθηνότερη και η βιομηχανία της ΕΕ έχει προγραμματίσει να φτάσει σε δυναμικότητα 40 GW. Μια κοινή προσπάθεια της διευκόλυνσης για τις μεταφορές είχε ως αποτέλεσμα τη χρηματοδότηση υποδομών υδρογόνου, την επαναχρησιμοποίηση δικτύων φυσικού αερίου, έργων δέσμευσης άνθρακα και HRS. Εξάλλου, το Ταμείο Καινοτομίας της ΕΕ θα στηρίζει τις τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα με 10 δισεκατομμύρια ευρώ για την περίοδο 2020-2030 [βλ. European Commission, “*Questions and answers: a hydrogen strategy for a climate neutral Europe, Brussels, 2020-2024*”].

Η ΕΕ, ιδίως η Γαλλία και η Νορβηγία, έχουν αναγνωρίσει το υδρογόνο ως βιομηχανική πρώτη ύλη και, ως εκ τούτου, έχουν κατευθύνει τις στρατηγικές τους προς τον βιομηχανικό τομέα. Επενδύοντας στην τεχνολογία υδρογόνου και φέρνοντας σε επαφή ακαδημαϊκά ιδρύματα, παρόχους υπηρεσιών, προμηθευτές, καινοτόμες νεοφυείς επιχειρήσεις, ΜΜΕ, και μεγαλύτερες εταιρείες, η ευρωπαϊκή βιομηχανία γίνεται πιο πράσινη και πιο ανταγωνιστική στην ταχέως διαμορφούμενη αγορά υδρογόνου, καθώς η οικονομία γίνεται πιο κυκλική και οι χώρες πιο αυτόνομες ενεργειακά, καθιστώντας την Ευρώπη πιο κοντά στο στάδιο της κλιματικής ουδετερότητας⁶⁷.

⁶⁷ Tian, et al., “*The multiple selections of fostering applications of hydrogen energy by integrating economic and industrial evaluation of different regions*”, σσ.2939-2948.

Κεφάλαιο 5. Οι προκλήσεις του «πράσινου» υδρογόνου ως καύσιμο του μέλλοντος

5.1 Υψηλό κόστος παραγωγής

Παρά τις προαναφερθείσες περιβαλλοντικές ωφέλειες του πράσινου υδρογόνου, το υψηλό κόστος παραγωγής του με την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης συνιστά έναν από τους κυριότερους παράγοντες που αναστέλλουν την εμπορική του διείσδυση και την ευρεία χρήση του σε βιομηχανική και ενεργειακή κλίμακα.⁶⁸ Έτσι το πράσινο υδρογόνο δεν καθίσταται ανταγωνιστικό σε σχέση με το γκρι υδρογόνο. Ειδικότερα, το έτος 2023 η τιμή του πράσινου υδρογόνου κυμαινόταν διεθνώς μεταξύ 4–6 €/kg, ενώ η αντίστοιχη τιμή του γκρι υδρογόνου ήταν 1–2 €/kg.⁶⁹

Το υψηλό κόστος παραγωγής του πράσινου υδρογόνου οφείλεται σε τρεις βασικούς παράγοντες. Πρώτον, οι ηλεκτρολύτες εξακολουθούν να συνιστούν ιδιαίτερως δαπανηρή τεχνολογία, διότι απαιτούν σημαντικές επενδύσεις κεφαλαίου για εγκατασταθούν και να λειτουργήσουν. Δεύτερον, το λειτουργικό κόστος τους εξαρτάται άμεσα από την τιμή της ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία, παρά τη σταδιακή μείωση των τελευταίων ετών, παραμένει καθοριστικός παράγοντας για την τελική τιμή του υδρογόνου. Σημειωτέον απαιτούνται μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ μέσω της διαδικασίας της ηλεκτρόλυσης που σε συνδυασμό με ο υψηλό κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας αναχαιτίζουν την πορεία του υδρογόνου.⁷⁰ Τρίτον, η περιορισμένη διάρκεια ζωής των ηλεκτρολυτών, σε συνδυασμό με την ανάγκη χρήσης σπάνιων και ακριβών πρώτων υλών, αυξάνουν έτι περαιτέρω το συνολικό κόστος.⁷¹

⁶⁸ Ως ουδέτερο αποτύπωμα άνθρακα εννοούνται οι προσπάθειες κατά τις οποίες οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που οφείλονται σε ανθρώπινες δραστηριότητες και οι απορροφήσεις αυτών των αερίων εξισορροπούνται κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης περιόδου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι εκπομπές αναφέρονται στις εκπομπές όλων των αερίων του θερμοκηπίου, ενώ σε άλλες αναφέρονται μόνο στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, CO₂. Για την επίτευξη των στόχων αυτών, απαιτούνται δράσεις για τη μείωση των εκπομπών. Ένα παράδειγμα θα ήταν η στροφή από την ενέργεια από ορυκτά καύσιμα σε βιώσιμες ΑΠΕ [ενδεικτικά, βλ. Fankhauser, et al., “*The meaning of net zero and how to get it right*”, σσ.15-21].

⁶⁹ IEA (2023). *Global Hydrogen Review 2023*. Paris: International Energy Agency.

⁷⁰ European Commission (2023a). *Renewable hydrogen production: new rules formally adopted*. Brussels.

⁷¹ Zhang, H., Li, Y. and Chen, X. (2023). Advances in electrolyser technology for green hydrogen production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 181, 113–129.

5.2 Απώλειες ενέργειας-ζητήματα αποδοτικότητας

Η αποδοτικότητα των τεχνολογιών υδρογόνου συνιστούν μία περαιτέρω σημαντική πρόκληση για την ευρεία τους εφαρμογή. Σε όλη την αλυσίδα του υδρογόνου, από το στάδιο της παραγωγής έως την τελική χρήση του παρατηρούνται ουσιώδεις απώλειες ενέργειας, οι οποίες παρακωλύουν την ανταγωνιστικότητα του υδρογόνου σε σχέση με άλλες ώριμες τεχνολογίες. Ειδικότερα, αξίζει να αναφερθεί ως προς τις τεχνολογίες υδρογόνου ότι κατά το στάδιο της παραγωγής, οι ηλεκτρολύτες που χρησιμοποιούνται για τη διάσπαση του νερού, παρουσιάζουν ηλεκτρική απόδοση σε ποσοστά 60–70%, οι δε κυψέλες καυσίμου κατά τη μετατροπή του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια παρουσιάζουν ηλεκτρική απόδοση σε ποσοστά 40–60%.⁷² Οι απώλειες επομένως ενέργειας από την παραγωγή έως την τελική χρήση είναι μεγάλες. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι αρκετές φορές, με επίκεντρο τα ζητήματα της ενεργειακής αποδοτικότητας, οι τεχνολογίες υδρογόνου συγκρίνονται με τις μπαταρίες ιόντων λιθίου.

Ειδικότερα, γίνεται σύγκριση των ηλεκτρικών οχημάτων με συσσωρευτές και των ηλεκτρικών οχημάτων με κυψέλες καυσίμου [εφεξής FCV, *fuel cell vehicle* [όχημα κυψέλης καυσίμου]], και FCEV [*fuel cell electric vehicle* [ηλεκτρικό όχημα κυψέλης καυσίμου]]. Ωστόσο, δεν πρόκειται για ανταγωνιστικές τεχνολογίες αλλά για συμπληρωματικές. Οι μπαταρίες είναι ιδανικές για βραχυπρόθεσμη αποθήκευση και για αστική ηλεκτροκίνηση, ενώ το υδρογόνο είναι απαραίτητο για μακροπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας και για την απανθρακοποίηση τομέων όπου οι μπαταρίες δεν μπορούν να ανταποκριθούν επαρκώς. Είναι εμφανές ότι η παράλληλη ανάπτυξη και αξιοποίηση των τεχνολογιών αυτών μπορεί να οδηγήσει σε μία κοινωνία με ουδέτερο αποτύπωμα άνθρακα.⁷³

⁷² IRENA (2022). *Green Hydrogen: A Guide to Policy Making*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.

⁷³ Shafiei, et al., “Energy, economic, and mitigation cost implications of transition toward a carbon-neutral transport sector”, σσ.237-247.

5.3 Έλλειψη δικτύου-υποδομών

Η κυριότερη πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπιστεί ώστε να μπορέσει να αξιοποιηθεί το υδρογόνο σε μεγάλη κλίμακα είναι να αναπτυχθούν οι απαραίτητες υποδομές⁷⁴. Ειδικότερα απαιτείται η ανάπτυξη έξυπνων και εκτεταμένων δικτύων που απαρτίζονται από αγωγούς μεταφοράς υδρογόνου, σταθμούς ανεφοδιασμού και εγκαταστάσεις αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας.⁷⁵

Προς την κατεύθυνση δημιουργίας κατάλληλου δικτύου μεταφοράς υδρογόνου κινείται η πανευρωπαϊκή πρωτοβουλία European Hydrogen Backbone, η οποία στοχεύει στην ανάπτυξη δικτύου αγωγών μήκους περίπου 53.000 km έως το 2040, αξιοποιώντας μερικώς τις ήδη υπάρχουσες υποδομές φυσικού αερίου.⁷⁶ Η πρωτοβουλία αυτή βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο, απαιτώντας τον κατάλληλο συντονισμό μεταξύ των κρατών-μελών και σημαντικές επενδύσεις κεφαλαίου. Ακόμη, λιγостоί παραμένουν οι σταθμοί ανεφοδιασμού του υδρογόνου για οδικές μεταφορές, γεγονός που δυσχεραίνει την ανάπτυξη στόλου οχημάτων κυψελών καυσίμου.⁷⁷

Η απουσία υποδομών υφίσταται και στο στάδιο της παραγωγής. Οι υπάρχουσες εγκαταστάσεις ηλεκτρολυτών βρίσκονται σε πιλοτικό στάδιο ή εκτείνονται σε μικρή κλίμακα, επομένως δεν είναι εφικτή η παραγωγή φθηνού και ανταγωνιστικού υδρογόνου. Συνοψίζοντας, βασική προϋπόθεση για την επίτευξη των στόχων κλιματικής ουδετερότητας είναι να δημιουργηθεί ένα πλήρες «οικοσυστήμα υδρογόνου», απαρτιζόμενο από έξυπνα δίκτυα («smart grids»), που θα εκτείνεται από την παραγωγή έως την τελική κατανάλωση.⁷⁸

Το παγκόσμιο δίκτυο φυσικού αερίου διαθέτει εκτεταμένες δυνατότητες μεταφοράς και αποθήκευσης [>100 GWh], και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο έχουν υπάρξει αρκετές μελέτες που πραγματεύονται τη δυνατότητα έγχυσης υδρογόνου στην υπάρχουσα υποδομή⁷⁹. Ένα

⁷⁴ Lin, Zhao, & Wu, “*Toward a hydrogen society*” σσ.64-75.

⁷⁵ IEA (2023). *Global Hydrogen Review 2023*. Paris: International Energy Agency.

⁷⁶ EHB (2023). *European Hydrogen Backbone: A vision towards 2040*. Brussels: European Hydrogen Backbone Initiative.

⁷⁷ Hydrogen Council & McKinsey (2023). *Hydrogen Insights – December 2023 Update*. Brussels: Hydrogen Council.

⁷⁸ You, & Kim, “*Optimal design and global sensitivity analysis of a 100% renewable energy sources based smart energy network for electrified and hydrogen cities*”, σσ.232-252.

⁷⁹ Για μια έρευνα που συζητά ταυτόχρονα τα επιχειρήματα υπέρ ενός τέτοιου εγχειρήματος βλ. Melaina, et al., “*Blending hydrogen into natural gas pipeline networks*”, σσ.560-595.

σημαντικό πλεονέκτημα της ανάμειξης υδρογόνου με φυσικό αέριο είναι η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ιδίως εάν το προστιθέμενο υδρογόνο είναι, όπως ονομάζεται, «πράσινο». Η ανάμειξη υδρογόνου στον αγωγό φυσικού αερίου είναι μια πρακτική λύση για την αύξηση της παραγωγής συστημάτων που βασίζονται σε ΑΠΕ, όπως μεγάλα ηλιακά πάρκα και αιολικά πάρκα. Στην ίδια κατεύθυνση, η εξαγωγή υδρογόνου από το μείγμα φυσικού αερίου κοντά στο σημείο τελικής χρήσης προτείνεται ως μέθοδος παροχής πράσινου υδρογόνου. Ταυτόχρονα, η χρήση της υφιστάμενης υποδομής παρουσιάζει σημαντικά χαμηλότερες επενδύσεις σε σύγκριση με την κατασκευή νέων αγωγών υδρογόνου, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό σε αυτό το στάδιο ανάπτυξης της ενεργειακής μετάβασης⁸⁰. Ωστόσο, οι διάφορες τροποποιήσεις του δικτύου του συστήματος, η διερεύνηση των πιθανών κινδύνων, τα μέτρα ασφαλείας, ο καθαρισμός, η ανάμειξη, και η εξαγωγή του υδρογόνου αποτελούν πρόσθετο κόστος που καθίσταται αναγκαίο να πραγματοποιηθεί.

Αξίζει να αναφερθεί ότι για τη δημιουργία των ανωτέρω υποδομών απαιτούνται κοστοβόρες ενέργειες, καθώς το υδρογόνο, λόγω της χαμηλής του πυκνότητας, πρέπει να υποβληθεί σε επιπλέον διεργασίες είτε συμπίεσης (σε υψηλές πιέσεις) είτε υγροποίησης. Ως προς τη μεταφορά δε, απαιτούνται αγωγοί ειδικών προδιαγραφών καθώς το υδρογόνο έχει την ικανότητα να προκαλεί διάβρωση στα υλικά.⁸¹

Η μέθοδος μεταφοράς του υδρογόνου στους καταναλωτές με τη χρήση ανάμειξης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του φυσικού αερίου και του αγωγού και, ως εκ τούτου, οφείλεται να διερευνάται διεξοδικά και ξεχωριστά ανά περίπτωση. Μια άλλη πτυχή που πρέπει να προσεχθεί είναι ο όγκος του υδρογόνου που προστίθεται στο φυσικό αέριο, καθώς επηρεάζει την πτυχή της ασφάλειας. Επιπλέον, η έγχυση υδρογόνου θα πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά ώστε να αποφεύγεται η απότομη αύξηση της συγκέντρωσής του [π.χ. ταχύτητα μεταβολής <2% ανά λεπτό]⁸². Η αναλογία μίγματος καθορίζει επίσης την ποσότητα του παραγόμενου υδρογόνου για τις ανάγκες αποθήκευσης ενέργειας. Σε αρκετές μελέτες φαίνεται να συμφωνούν ότι ένα μίγμα όγκου 5-10% υδρογόνου προς το φυσικό αέριο είναι δυνητικά βέλτιστο για το σύστημα φυσικού αερίου, καθώς δεν απαιτεί τροποποίηση της τρέχουσας υποδομής ή του

⁸⁰ βλ. Tlili, et al., “Hydrogen market penetration feasibility assessment”, σσ.1648-1668.

⁸¹ European Commission (2022). *REPowerEU Plan*. COM(2022) 230 final. Brussels.

⁸² Altfeld, & Pinchbeck, “Admissible hydrogen concentrations in natural gas systems”, σσ.2112-2115.

εξοπλισμού των οικιακών και βιομηχανικών τελικών χρηστών⁸³. Ωστόσο, καθώς το ποσοστό κυμαίνεται μεταξύ 0-80%, καθίσταται σαφές πως απαιτείται ακόμη περισσότερη έρευνα για να επιτευχθεί η τεχνική σκοπιμότητα και η βιωσιμότητα των προτεινόμενων λύσεων⁸⁴.

5.4 Ζητήματα ασφάλειας και κοινωνικής αποδοχής

Κρίσιμη παράμετρος αναφορικά με την ανάπτυξη του υδρογόνου είναι τα ζητήματα ασφαλείας που ανακύπτουν λόγω των φυσικοχημικών του ιδιοτήτων. Το υδρογόνο λόγω της υψηλής του διαπερατότητας διαπερνά εύκολα τις ρωγμές των σωληνώσεων και των δεξαμενών, αυξάνοντας την πιθανότητα ανάφλεξης.⁸⁵ Επιπλέον, το υδρογόνο είναι αρκετά εύφλεκτο και απαιτεί προηγμένες τεχνολογίες αποθήκευσης και μεταφοράς και αυστηρά πρότυπα ασφαλείας.⁸⁶

Τέλος, η ομαλή ενεργειακή μετάβαση με την αξιοποίηση του υδρογόνου, δεν εξαρτάται μόνο από τις ανωτέρω οικονομοτεχνικές παραμέτρους, αλλά και από την αποδοχή των καταναλωτών.⁸⁷ Η κοινωνία ανησυχεί για τον τρόπο με τον οποίο η εφαρμογή του υδρογόνου θα επηρεάσει, ή θα κινδυνέψει, τη ζωή τους, καθώς έχει συνδυάσει το υδρογόνο με κινδύνους εκρήξεων.⁸⁸ Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, τοπικές κοινωνίες συχνά αντιδρούν στην εγκατάσταση υποδομών αποθήκευσης ή μεταφοράς υδρογόνου, επικαλούμενες φόβους για σεισμικότητα, διαρροές ή περιβαλλοντικές επιπτώσεις.⁸⁹

Πιο συγκεκριμένα, το υδρογόνο έχει κακή φήμη, καθώς ενώ ορισμένοι από τους συνειρμούς προέρχονται από την έλλειψη επιστημονικών γνώσεων, κυρίως τραγικά γεγονότα σφράγισαν την εικόνα του υδρογόνου στο ευρύτερο Ευρωπαϊκό κοινωνικό πεδίο. Η κακή φήμη του υδρογόνου, ως εκρηκτικού αερίου⁹⁰, αντανακλάται στην ανάπτυξη και τη χρήση της τεχνολογίας υδρογόνου

⁸³ Ο.π.

⁸⁴ Deymi-Dashtebayaz, et al., “Investigating the effect of hydrogen injection on natural gas thermophysical properties with various compositions”, σσ.183-192. Kouchachvili, & Entchev, “Power to gas and H₂/NG blend in SMART energy networks concept”, σσ.456-464.

⁸⁵ Heuser, P., Tietze, I. & Lichtenberg, G. (2023) ‘Risk perception and public acceptance of underground hydrogen storage in Germany’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(12), pp. 4489–4503.

⁸⁶ Borah, Courage, Kofi, & Nyankomo, “Generation Z’s green purchase behavior”, σσ.4530-4546].

⁸⁷ Wahl, & Kallo, “Quantitative valuation of hydrogen blending in European gas grids and its impact on the combustion process of large-bore gas engines”, σσ.534-546].

⁸⁸ Dodds, P.E. & Demski, C. (2022) ‘Societal perceptions of hydrogen: safety, trust, and acceptance’, *Nature Energy*, 7, pp. 989–997

⁸⁹ Heuser et al., 2023

⁹⁰ Το υδρογόνο, ένα άοσμο, άχρωμο, άγευστο και μη τοξικό αέριο, 14 φορές ελαφρύτερο από τον αέρα, με ταχεία διάχυση [ο συντελεστής διάχυσης στον αέρα NTP είναι 0,61 cm²/s] και άνωση. Έχει χαμηλή πυκνότητα 0,08987 kg/m³ στους 0°C και 1 ατμόσφαιρα, η οποία δημιουργεί συνθήκες αποθήκευσης σε πολύ υψηλές πιέσεις, και είναι εξαιρετικά εύφλεκτο με κατώτερο όριο αναφλεξιμότητας [εφεξής, LFL] 4,1% και ανώτερο όριο αναφλεξιμότητας

παγκοσμίως, ιδίως στις περιοχές που δεν έχουν ακόμη αναπτύξει πλήρως οιαδήποτε μορφή υποδομής ούτε έχουν εμπειρία με τη βιομηχανική εφαρμογή του υδρογόνου.

Παρά ταύτα, πραγματοποιούνται πολυάριθμες μελέτες που ασχολούνται με θέματα ασφάλειας που αφορούν την παραγωγή, τη μεταφορά και τη χρήση του υδρογόνου. Αναλύονται, παραδείγματος χάρη, προβλήματα απώλειας της ακεραιότητας του εξοπλισμού υδρογόνου για την αύξηση της ασφάλειας. Ατυχήματα του παρελθόντος που περιλαμβάνουν υδρογόνο έχουν μελετηθεί διεξοδικά και έχουν καταλήξει στον καθορισμό λύσεων για την αποφυγή περαιτέρω ατυχημάτων. Επιπλέον, έχουν διεξαχθεί προσομοιώσεις και αναλύσεις ατυχημάτων διαρροής υδρογόνου για να υποδειχθεί η κλίμακα των ζημιών που θα συνέβαιναν σε περίπτωση πραγματικού ατυχήματος, ώστε να μπορούν να εγκατασταθούν κατάλληλα μέτρα ασφαλείας για την ελαχιστοποίηση των συνεπειών⁹¹.

Γενικά, οι κίνδυνοι που συνδέονται με τη χρήση υδρογόνου ομαδοποιούνται σε *φυσιολογικούς* [κρυοπαγήματα, αναπνευστικές παθήσεις, ασφυξία], *φυσικούς* [αλλαγές φάσης, αστοχίες εξαρτημάτων και ευθραυστότητα] και *χημικούς* [ανάφλεξη και καύση], αλλά τις περισσότερες φορές οι ρεαλιστικές περιπτώσεις παρουσιάζουν συνδυασμό των προαναφερθέντων. Μπορούν να διακριθούν τρεις τύποι ευθραυστότητας υδρογόνου, που προκαλούνται από τη διάχυση του. Ο *περιβαλλοντικός*, σε μέταλλα και κράματα προκαλεί επιφανειακές ρωγμές, παραμορφώσεις, απώλειες στην ολκιμότητα και μειώσεις στην τάση θραύσης, και ο *εσωτερικός*, που δημιουργεί εσωτερικές ρωγμές. Ο ευθραυστότητα λόγω αντίδρασης υδρογόνου είναι μια παρενέργεια της

[εφεξής, UFL] 74,8% σε συνθήκες αέρα θερμοκρασίας 25°C και 1 ατμόσφαιρα. Μεταξύ του κατώτερου και του ανώτερου ορίου υπάρχει μια περιοχή έκρηξης. Ωστόσο, αυτός ο, κατά κοινή ακαδημαϊκή αποδοχή αβάσιμος, φόβος προέρχεται από το 1937, όταν το γεμάτο υδρογόνο ζεπέλιν Hindenburg εξερράγη σε ένα καταστροφικό ατύχημα. Η ευθύνη έπεσε στο εξαιρετικά εύφλεκτο υδρογόνο, αν και επίσημα αποδείχθηκε ότι η έκρηξη προκλήθηκε από την επίστρωση του υλικού. Εκείνη ήταν η εποχή των νεοεισαχθέντων μέσω μαζικής ενημέρωσης, οπότε η ιστορία πήρε παγκόσμιες διαστάσεις. Σήμερα, η πιθανότητα ατυχήματος που περιέχει υδρογόνο δεν είναι μεγαλύτερη από ό,τι με οποιοδήποτε άλλο καύσιμο που χρησιμοποιείται συνήθως στην καθημερινή πρακτική [βλ. Airships net, “*Myths about the Hindenburg Crash*”].

⁹¹ ενδεικτικά, Sakamoto, et al., “*Leakagetype based analysis of accidents involving hydrogen fueling stations in Japan and USA*”, σσ.1564-1570, και Ustolin, et al., “*Loss of integrity of hydrogen technologies*”, σσ.3809-3840. Παρατηρείται επίσης, πως ο φόβος της έκρηξης με καταστροφικές συνέπειες δεν θα αποτελέσει αδιαπέραστο εμπόδιο στην κοινωνική αποδοχή της τεχνολογίας. Ένα παράδειγμα ατυχήματος που συνέβη στον 21^ο αιώνα δείχνει προς αυτή την κατεύθυνση. Το 2019 συνέβη ένα ατύχημα στο χημικό εργοστάσιο υδρογόνου στη Σάντα Κλάρα της Καλιφόρνια. Εξαιτίας του, μια σημαντική μονάδα παραγωγής υδρογόνου στην Καλιφόρνια τέθηκε εκτός λειτουργίας για αρκετό χρονικό διάστημα, ώστε να προκληθεί καθυστέρηση στην προμήθεια υδρογόνου για τους ιδιοκτήτες FCEV στην περιοχή. Κάθε πρόβλημα δημιουργεί δυσαρεστημένους χρήστες και μειώνει τη φήμη της αξιοπιστίας της τεχνολογίας. Κατά συνέπεια, με την επένδυση σε νέα αναδυόμενη τεχνολογία, η ανεπαρκώς ανεπτυγμένη υποδομή θα βελτιωθεί και το θετικό κοινωνικό κύρος του υδρογόνου θα παγιωθεί [Sakamoto, et al., “*Leakagetype based analysis of accidents involving hydrogen fueling stations in Japan and USA*”, σσ.1564-1570].

χημικής σύνδεσης του απορροφημένου υδρογόνου και ενός μεταλλικού συστατικού, η οποία οδηγεί σε ένα εύθραυστο υδρίδιο [παραδείγματος χάρη, το υδρογόνο μπορεί να σχηματίσει μεθάνιο με τον άνθρακα στους χάλυβες]. Ορισμένες μέθοδοι πρόληψης περιλαμβάνουν την προσθήκη κραμάτων τιτανίου και αλουμινίου με το βασικό υλικό, την επιλογή υλικού άμορφης δομής, τεχνικές επιμετάλλωσης όπως επιμετάλλωση ψευδαργύρου και νικελίου και τεχνικές επικάλυψης με γραφένιο και νιόβιο. Επιπλέον, μπορεί να προστεθεί στρώμα διάχυσης οξειδίου, αζώτου και άνθρακα για να δημιουργηθεί ένα φράγμα για τη διείσδυση του υδρογόνου⁹². Σε ανοικτούς χώρους, ο κίνδυνος είναι ο μικρότερος, καθώς το υδρογόνο ανεβαίνει γρήγορα και διασκορπίζεται προτού μπορέσει να αναφλεγεί. Το πρόβλημα εμφανίζεται σε κλειστούς, μη αεριζόμενους χώρους, από όπου το αέριο δεν μπορεί να διαφύγει εύκολα, γεγονός που οδηγεί σε πολύ υψηλότερες υπερπτήσεις. Το τελευταίο μέτρο προστασίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση των συνεπειών των εκπυρσοκροτήσεων σε κλειστά συστήματα είναι ο εξαερισμός από έκρηξη [όπως είναι, για παράδειγμα, οι πίνακες εκτόνωσης πίεσης⁹³].

⁹² Οι επιστήμονες ουσιαστικά συμφωνούν ότι ένα κρίσιμο πρόβλημα παρουσιάζει η διαρροή ενός εύφλεκτου ή εκρηκτικού μείγματος, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε πυρκαγιά ή έκρηξη. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η διαρροή αερίου όταν αναφλεγεί μπορεί να οδηγήσει σε κινδύνους εκπυρσοκρότησης και πυροδότησης, το εύρος των οποίων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η ποσότητα του υδρογόνου που απελευθερώνεται, οι συνθήκες του αέρα, ο περιορισμός του χώρου, καθώς και η θέση και η ισχύς της πηγής ανάφλεξης [Kumar, “*Hydrogen embrittlement in different materials*”, σσ.603-616].

⁹³ Casamirra, & Castiglia, “*Safety studies of a hydrogen refuelling station*”, σσ.846-854].

Κεφάλαιο 6: Αναπτυξιακές στρατηγικές και πολιτικές για το υδρογόνο στην Ευρώπη

6.1 Η Στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το Υδρογόνο

Η ενεργειακή μετάβαση κάθε είδους δεν μπορεί να γίνει δίχως την εφαρμογή της πολιτικής λύσης, την ανάπτυξη εθνικών στρατηγικών, των σχεδίων δράσης με σαφή ατζέντα, τη μεθοδολογία ανάπτυξης, την κατάλληλη νομοθεσία, και τη δομή χρηματοδότησης. Λόγω της ραγδαίας προόδου της τεχνολογίας υδρογόνου, έχει καταστεί αρκετά σαφές πως διαμορφώθηκε η συνειδητοποίηση ότι η ανάπτυξή της αποτελεί ουσιαστικό μέρος οιασδήποτε μελλοντικής κοινωνίας με ουδέτερο αποτύπωμα άνθρακα. Πολλές χώρες και πολιτικές οντότητες άρχισαν να αναπτύσσουν εθνικά σχέδια για την εφαρμογή του υδρογόνου στην ενεργειακή μετάβαση, με τη μορφή της αναβάθμισης των υφιστάμενων ενεργειακών εθνικών σχεδίων με ΑΠΕ, και παραγωγή καθαρής ενέργειας. Οι νέες κατευθύνσεις εστιάζουν περαιτέρω στην αποθήκευση ενέργειας, και η εκμετάλλευση του πλήρους δυναμικού του υδρογόνου.

Οι στρατηγικές ανάπτυξης, τα εθνικά σχέδια [ή η τρέχουσα κατάσταση της τεχνολογικής προόδου] μερικών επιλεγμένων χωρών που αναπτύσσονται συνοπτικά παρακάτω, στοχεύουν να παρουσιάσουν και να συγκρίνουν διαφορετικές προσεγγίσεις στις τεχνολογίες υδρογόνου, από τις κορυφαίες χώρες, όπως η Ιαπωνία και η Γερμανία, μέσω ορισμένων κρατών με ασθενέστερη φήμη που εξετάζουν την ανάπτυξη του υδρογόνου, μέχρι τις χώρες που βρίσκονται στην αρχή της πραγματικής εφαρμογής του υδρογόνου. Σχεδόν όλες οι χώρες του κόσμου διεξάγουν έργα και δημιουργούν νέα. Τα τελευταία χρόνια, το υδρογόνο εξαπλώθηκε σε όλο τον κόσμο από τα περισσότερα αστικά μέρη μέχρι και σε μέρη με ποιοτική ανάπτυξη υδρογόνου που τυγχάνει να βρίσκονται μακριά από τα κύρια κέντρα Ε&Κ⁹⁴.

Η Ευρώπη κατέχει εξέχουσα θέση στην ανάπτυξη της τεχνολογίας του υδρογόνου, έχοντας προωθήσει σημαντικές καινοτομίες τόσο σε επίπεδο υποδομών όσο και σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Ωστόσο, η τεχνολογική πρόοδος δεν περιορίζεται αποκλειστικά στην ευρωπαϊκή ήπειρο, καθώς αξιόλογες εξελίξεις έχουν σημειωθεί επίσης στην Ιαπωνία, τις Ηνωμένες Πολιτείες

⁹⁴ Αναφέρομαι στο παράδειγμα, που θα αναλυθεί μερικώς παρακάτω, της Παταγονίας [για την περίπτωση της Παταγονίας, βλ. Luis, “*The energy transition towards hydrogen utilization for green life and sustainable human development in Patagonia*”, σσ.627-645].

και τη Νότια Κορέα, ιδίως στους τομείς των κυψελών καυσίμου και της κινητικότητας (IEA, 2022). Αναγνωρίζοντας τον στρατηγικό ρόλο του υδρογόνου για την επίτευξη των στόχων της κλιματικής ουδετερότητας, η Ευρωπαϊκή Ένωση παρουσίασε το 2020 τη Στρατηγική της για το Υδρογόνο, συνοδευόμενη από τη δημιουργία της Ευρωπαϊκής Συμμαχίας για το Καθαρό Υδρογόνο (European Clean Hydrogen Alliance, ECHA). Η στρατηγική αυτή δεν ταυτίζεται με την ίδια τη Συμμαχία· η πρώτη αποτελεί το πολιτικό και θεσμικό πλαίσιο, ενώ η δεύτερη λειτουργεί ως πλατφόρμα συνεργασίας βιομηχανίας, δημόσιων φορέων και επενδυτών για την προώθηση έργων μεγάλης κλίμακας.⁹⁵

Η στρατηγική της ΕΕ οργανώνεται σε τρεις διακριτές φάσεις. Στην πρώτη φάση (2020–2024), προβλέπεται η εγκατάσταση τουλάχιστον 6 GW ηλεκτρολυτών και η παραγωγή έως 1 εκατομμυρίου τόνων ανανεώσιμου υδρογόνου, με στόχο τη δημιουργία πιλοτικών clusters και την ανάπτυξη της αγοράς. Στη δεύτερη φάση (2025–2030), ο στόχος κλιμακώνεται σε 40 GW ηλεκτρολυτών με παραγωγή έως 10 εκατομμυρίων τόνων πράσινου υδρογόνου στην ΕΕ, συμπληρωματικά με εισαγωγές από γειτονικές περιοχές, όπως η Βόρεια Αφρική και η Μέση Ανατολή. Η τρίτη φάση (2030–2050) εστιάζει στη μαζική διείσδυση του υδρογόνου σε τομείς που είναι δύσκολο να απαλλαγούν από τις εκπομπές άνθρακα, όπως η βαριά βιομηχανία (χάλυβας, τσιμέντο), η ναυτιλία και οι αερομεταφορές, συμβάλλοντας καθοριστικά στην επίτευξη του στόχου της κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050.⁹⁶

Η στρατηγική της ΕΕ για το υδρογόνο καταδεικνύει, συνεπώς, τη βούληση της Ευρώπης να διαδραματίσει ηγετικό ρόλο στη διαμόρφωση μιας παγκόσμιας αγοράς καθαρού υδρογόνου, ενώ παράλληλα αναγνωρίζει την ανάγκη συνεργασιών με τρίτες χώρες για την κάλυψη της μελλοντικής ζήτησης.

6.2 Μελέτη περίπτωσης: Η ανάπτυξη του υδρογόνου στην Ελλάδα

Παρά το γεγονός ότι η Ελλάδα ξεκίνησε με καθυστέρηση σε σχέση με άλλες ευρωπαϊκές χώρες, την τελευταία δεκαετία βρίσκεται σε μια διαδικασία σταδιακής ενσωμάτωσης του υδρογόνου στην εθνική ενεργειακή στρατηγική της. Η πορεία αυτή συνδέεται όχι μόνο με την τεχνολογία, αλλά και βαθιά με τα κοινωνικο-οικονομικά ζητήματα, καθώς σχετίζεται με την απεξάρτηση από τον

⁹⁵ European Commission (2020a) *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*. Brussels: European Commission.

⁹⁶ European Commission (2020b) *European Clean Hydrogen Alliance*. Brussels: European Commission.

λιγνίτη, την αποκέντρωση της παραγωγής ενέργειας και την ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας.⁹⁷

Το πιο εμβληματικό έργο είναι το White Dragon, σχεδιασμένο για τη Δυτική Μακεδονία, περιοχή που επλήγη περισσότερο από την απολιγνιτοποίηση⁹⁸. Πρόκειται για έργο μεγάλης κλίμακας, προϋπολογισμού άνω των 8 δισ. ευρώ, που προβλέπει την εγκατάσταση ηλεκτρολυτών συνολικής ισχύος 1,5 GW, με τροφοδοσία από φωτοβολταϊκά πάρκα ισχύος περίπου 3 GW. Η παραγόμενη



ποσότητα πράσινου υδρογόνου προορίζεται για ηλεκτροπαραγωγή, τηλεθέρμανση και βιομηχανικές χρήσεις, δημιουργώντας ταυτόχρονα πάνω από 5.000 θέσεις εργασίας⁹⁹. Το έργο εντάχθηκε στον ευρωπαϊκό μηχανισμό *IPCEI Hydrogen* [Important Projects of Common European Interest]¹⁰⁰, μια στρατηγική πρωτοβουλία που στοχεύει στην παραγωγή περίπου 250.000 τόνων υδρογόνου ετησίως, στη μείωση εκπομπών CO₂ κατά 11,5 εκατομμύρια τόνους και στη δημιουργία 18.000 άμεσων και 29.500 έμμεσων θέσεων εργασίας, αξιοποιώντας ΑΠΕ, την απολιγνιτοποίηση και

την υπάρχουσα υποδομή φυσικού αερίου.

Η εφοδιαστική αλυσίδα βασίζεται σε υβριδικό μοντέλο παραγωγής, συνδυάζοντας κεντρικές μονάδες ηλεκτρόλυσης για οικονομίες κλίμακας με αποκεντρωμένες μονάδες για ευελιξία και ανθεκτικότητα. Προβλέπει η ανάπτυξη ειδικού αγωγού κορμού υδρογόνου, η σύνδεση με τον

⁹⁷ Για την σημαντικότητα και το βάθος της ελληνικής μετα-λιγνιτικής εποχής, βλ. την εξαιρετική ανάλυση στο Ρίση, Α. Γ., *Δίκαιη Μετάβαση στην Μεταλιγνιτική εποχή*, Διατριβή επί διδακτορία. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2025

⁹⁸ «Ο πυρήνας του έργου βασίζεται στη σταδιακή αντικατάσταση των λιγνιτικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Δυτικής Μακεδονίας και τη μετάβαση σε καθαρές μορφές ενέργειας με τελικό στόχο την απανθρακοποίηση του ενεργειακού μείγματος της χώρας» (ΔΕΠΑ, «Κατατέθηκε η πρόταση White Dragon για τα Σημαντικά Έργα Κοινού Ευρωπαϊκού Ενδιαφέροντος (IPCEI) υδρογόνου»). Παρόμοια έργα, όπως για παράδειγμα ο Κόμβος Καινοτομίας Υδρογόνου (H2-HUB) που έχει ενταχθεί ήδη στο Πρόγραμμα ΔΑΜ, υλοποιείται από το ΕΚΕΤΑ και αποσκοπεί στο να προάγει την έρευνα σε τεχνολογίες πράσινου υδρογόνου, βλ. την έκθεση της ΕΥΔΑΜ, Μάρτιος 2025, online, available at <https://eydam.gr/en/26-03-2025-i-dytiki-makedonia-pernaei-sti-nea-epochi-anaptyxis.com>.

⁹⁹ European Commission (Directorate-General for Energy), «Hydrogen generation in Europe: overview of costs and key benefits», στο Publications Office, 2021, online, available at: <https://data.europa.eu/doi/10.2833/821682>.

¹⁰⁰ Για μια γενική επισκόπηση του έργου βλ. Vezzoni, R. «A “return of the state” in energy transitions? The making of a hydrogen economy in the European Union», σσ. 195-212, στο ZFW—Advances in Economic Geography, τομ. 68, τευχ. 3-4, 2024.

αγωγό *TAP* και η συμμετοχή στην ευρωπαϊκή πρωτοβουλία *European Hydrogen Backbone (EHB)*¹⁰¹, εξασφαλίζοντας αποτελεσματική μεταφορά και εξαγωγή υδρογόνου. Η υποδομή ανεφοδιασμού περιλαμβάνει σταθμούς για οχήματα, φορτηγά και τρένα, ενώ παράλληλα διασφαλίζεται η ασφάλεια, η κανονιστική συμμόρφωση και η προσβασιμότητα στους τελικούς χρήστες. Η προώθηση συνεργασιών μεταξύ εταιρειών, ερευνητικών ιδρυμάτων και κυβερνητικών φορέων, μέσω τεχνολογικών πάρκων και κέντρων μελέτης, ενισχύει την καινοτομία και την επενδυτική δυναμική στην περιοχή. Συνολικά, έως το 2040, το *White Dragon* πρόκειται να συμβάλλει καθοριστικά στη μετάβαση σε ένα πράσινο ενεργειακό τοπίο στην Ελλάδα και την Ευρώπη, συνδυάζοντας τεχνολογική καινοτομία, περιβαλλοντικά οφέλη και κοινωνικό αντίκτυπο και προωθώντας τη βιώσιμη χρήση του υδρογόνου ως εναλλακτικής πηγής ενέργειας.

Πέραν του *White Dragon*, η ΔΕΗ, για παράδειγμα, έχει προχωρήσει στον σχεδιασμό πιλοτικών έργων ηλεκτρόλυσης και αξιοποίησης πράσινου υδρογόνου σε συνεργασία με διεθνείς εταίρους. Σημαντική πρωτοβουλία αποτελεί η ανάπτυξη υποδομών υδρογόνου στον τερματικό σταθμό *LNG Ρεβυθούσας*¹⁰², με στόχο τη μελλοντική ανάμειξη υδρογόνου στο δίκτυο φυσικού αερίου. Επιπλέον, προγραμματίζονται οι πρώτοι σταθμοί ανεφοδιασμού με υδρογόνο για οχήματα στην Αττική και στη Θεσσαλονίκη, με χρηματοδότηση από το πρόγραμμα *Connecting Europe Facility (CEF)*. Το 2021, το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας παρουσίασε την Εθνική Στρατηγική για το Υδρογόνο, ενσωματωμένη στο *Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ)*. Οι βασικοί στόχοι περιλαμβάνουν την ανάπτυξη υποδομών υδρογόνου σε ενεργειακούς κόμβους και βιομηχανικές περιοχές, την πιλοτική ενσωμάτωση σε μεταφορές με τουλάχιστον 200 λεωφορεία κυψελών καυσίμου έως το 2030, καθώς και τη μείωση εκπομπών CO₂ κατά 55% έως το 2030 σε σχέση με το 1990, με το υδρογόνο να καλύπτει ποσοστό 5–10% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας¹⁰³.

Η ενσωμάτωση του υδρογόνου στην ελληνική οικονομία στοχεύει κυρίως στη μείωση του αποτυπώματος CO₂. Σημαντική περιβαλλοντική διάσταση αποτελεί η μετάβαση των λιγνιτικών

¹⁰¹ βλ. Neumann, F., et al., “*The potential role of a hydrogen network in Europe*”, σσ. 1793-1817, στο *Joule*, τομ. 7, τευχ.8, 2023.

¹⁰² ΔΕΣΦΑ, (Σεπτέμβριος 2024), Σχέδιο Προγράμματος Ανάπτυξης ΕΣΦΑ 2024 – 2033, online, available at: <https://tinyurl.com/26yd47a8>.

¹⁰³ βλ. Kantilieraki A., “*Important Greek projects of common European interest relating to hydrogen*”, *Lexology* (2022). Online, available at: <https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g.com>.; Για την ΕΣΕΚ βλ. την επίσημη ανακοίνωση στην ιστοσελίδα του Υπουργείου Περιβάλλοντος & Ενέργειας εδώ: <https://ypen.gov.gr/energeia/esek/>.

περιοχών, οι οποίες παραδοσιακά εμφανίζουν υψηλές εκπομπές. Η αντικατάσταση του λιγνίτη με πράσινο υδρογόνο μπορεί να μειώσει κατά εκατομμύρια τόνους ετησίως τις εκπομπές CO₂, ενώ παράλληλα περιορίζει τη ρύπανση της ατμόσφαιρας σε τοπικό επίπεδο. Παρ' όλα αυτά, η ελληνική περίπτωση αντιμετωπίζει δυσκολίες, όπως η περιορισμένη τεχνογνωσία σε βιομηχανικό επίπεδο, η εξάρτηση από ευρωπαϊκά χρηματοδοτικά εργαλεία και η ανάγκη για νομικό πλαίσιο που θα ρυθμίζει την ασφάλεια και τις υποδομές¹⁰⁴.

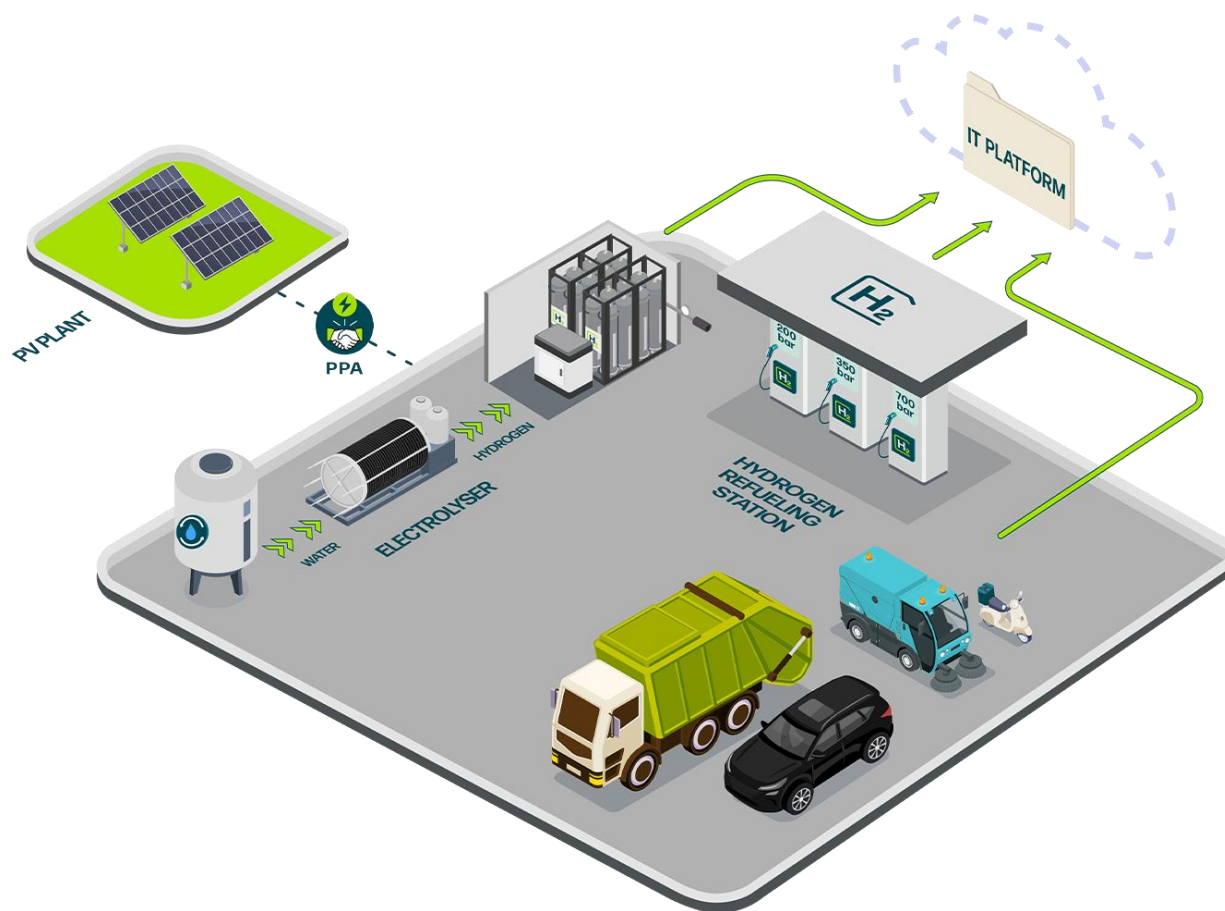
Μία άλλη σημαντική πρωτοβουλία αναφορικά με το υδρογόνο στην Ελλάδα είναι το life GreenH2orn (Green Hydrogen mobility for the transition to climate neutrality), το οποίο αποτελεί την πρώτη οργανωμένη προσπάθεια στην χώρα μας για ανάπτυξη υποδομών υδρογόνου, με σκοπό την προώθηση της υδρογονοκίνησης και τη μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στον τομέα των μεταφορών. Η χρηματοδότηση του εγχειρήματος αυτό λαμβάνει χώρα από το πρόγραμμα life της Ευρωπαϊκής Ένωσης και υλοποιείται στην Κοζάνη, η οποία έχει επιλεγεί ανάμεσα σε εκατό ευρωπαϊκές πόλεις, επιλεγμένες να γίνουν «έξυπνες και κλιματικά ουδέτερες» έως το 2030.¹⁰⁵

Το εν λόγω έργο αποσκοπεί να δημιουργήσει μία μικρογραφία της υδρογονοοικονομίας, ήτοι μία ολοκληρωμένη αλυσίδα υδρογόνου, που θα εκτείνεται από την παραγωγή έως την τελική χρήση και η οποία θα μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά σε τοπικό επίπεδο μέσα από την δημιουργία ενός πρωτοποριακού σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου με επιτόπια παραγωγή. Ειδικότερα, όπως διαφαίνεται στην κατωτέρω εικόνα, προβλέπεται η εγκατάσταση ενός σταθμού στην πόλη της Κοζάνης, ο οποίος θα παράγει πράσινο υδρογόνο μέσω ηλεκτρόλυσης νερού, αξιοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές. Το υδρογόνο θα χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία διαφόρων οχημάτων, συμπεριλαμβανομένων απορριμματοφόρων, σαρώθρων, επιβατικών αυτοκινήτων και ηλεκτρικών σκούτερ, που θα λειτουργούν ως πιλοτικός στόλος μηδενικών εκπομπών.¹⁰⁶

¹⁰⁴ Για μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα επισκόπηση των προβλημάτων, αλλά και μια ανάλυση των έργων σχετικά με το υδρογόνο στην Ελλάδα βλ. Φανή Ε. *Οικονομικές και τεχνικές παράμετροι για την έγχυση υδρογόνου στο δίκτυο φυσικού αερίου στην Ελλάδα*, Διπλωματική Εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2025), σσ. 41-58, αλλά και Ραχμανίδης, Π., *Βελτιστοποιημένα δίκτυα Υδρογόνου*, Διπλωματική Εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2025).

¹⁰⁵ GreenH2orn (2023). *LIFE GREENH2ORN Project Website*. Διαθέσιμο στο: <https://greenh2orn.com>

¹⁰⁶ βλ. ο.π., GreenH2orn, 2023



πηγή: life GreenH2orn (Green Hydrogen mobility for the transition to climate neutrality) προσβάσιμο στο <https://greenh2orn.com>

Η επιτόπια παραγωγή υδρογόνου συνεπάγεται μείωση του κόστους και των απωλειών διανομής, ενώ καθιστά αποτελεσματικότερο τον έλεγχο της ποιότητας και της ασφάλειας. Ο σταθμός θα ενσωματώνει επίσης ψηφιακή πλατφόρμα παρακολούθησης και διαχείρισης σε πραγματικό χρόνο, η οποία θα συλλέγει δεδομένα λειτουργίας, ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών, υποστηρίζοντας έτσι την αξιολόγηση της απόδοσης και της βιωσιμότητας του έργου.¹⁰⁷

Το έργο εντάσσεται στρατηγικά στη διαδικασία δίκαιης μετάβασης της Δυτικής Μακεδονίας, μιας περιοχής που επί δεκαετίες βασιζόταν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη και η οποία σήμερα βρίσκεται στο επίκεντρο της εθνικής και ευρωπαϊκής στρατηγικής

¹⁰⁷ European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency (CINEA) (2023). *LIFE Programme – Hydrogen Mobility Projects Overview*. Brussels: CINEA.

απανθρακοποίησης. Μέσω του GREENH2ORN, η περιοχή επιχειρεί να διαφοροποιήσει το ενεργειακό της προφίλ, προσελκύοντας καινοτόμες τεχνολογίες καθαρής ενέργειας και ενισχύοντας τη βιώσιμη κινητικότητα σε αστικό επίπεδο.

Επιπλέον, στόχος του έργου είναι να επιφέρει σημαντική μείωση των εκπομπών CO₂ που σχετίζονται με τις δημοτικές και τοπικές μεταφορές, η δε πιλοτική εφαρμογή του λειτουργεί ως μοντέλο αναφοράς και για άλλες πόλεις, αποδεικνύοντας ότι η υδρογονοκίνηση μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία όχι μόνο σε μεγάλες μητροπόλεις, αλλά και σε μεσαίου μεγέθους αστικά κέντρα με σαφή περιβαλλοντικά οφέλη. Το έργο αναμένεται να υλοποιηθεί και να τεθεί σε λειτουργία έως το 2028, με πλήρη λειτουργία του σταθμού υδρογόνου και του πιλοτικού στόλου οχημάτων.

Συνοψίζοντας, πρέπει να λεχθεί ότι το εν λόγω έργο είναι ιδιαίτερης σημασίας, διότι συνδυάζει τεχνολογική καινοτομία, περιβαλλοντική πολιτική και τοπική ανάπτυξη, αποτελώντας χαρακτηριστικό παράδειγμα της πορείας της Ελλάδας προς την υδρογονοκεντρική εποχή.¹⁰⁸

6.3 Μελέτη περίπτωσης: Η Γερμανία και η απανθρακοποίηση του χάλυβα μέσω υδρογόνου

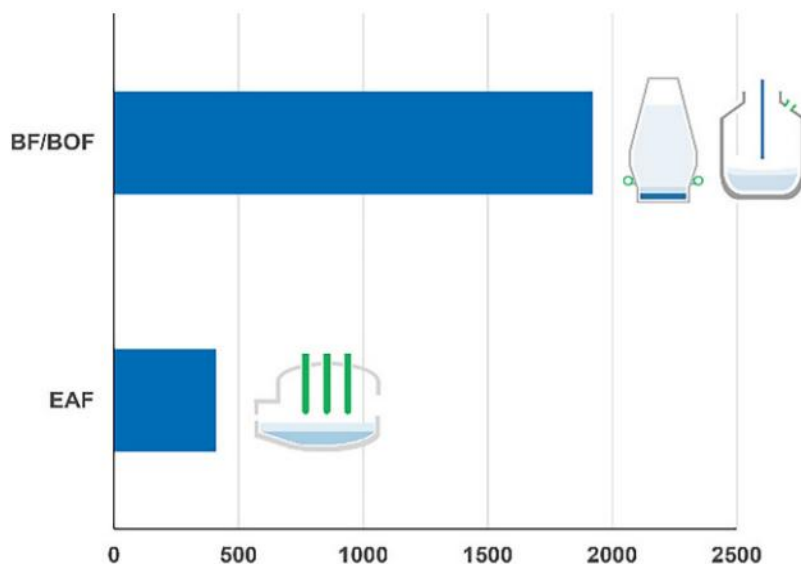
Η χαλυβουργία είναι ένας σημαντικός εκπομπέας διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), με την Γερμανία να αντιπροσωπεύει το 4% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) της χώρας¹⁰⁹. Με γνώμονα αυτό, η Γερμανία έχει αναδειχθεί την τελευταία δεκαετία σε πρωτοπόρο της ευρωπαϊκής στρατηγικής για το υδρογόνο, εστιάζοντας σε τομείς υψηλής έντασης εκπομπών, όπως η χαλυβουργία. Ο κλάδος αυτός ευθύνεται για περίπου 30% των βιομηχανικών εκπομπών CO₂ στη Γερμανία. Η μετάβαση σε «πράσινο χάλυβα» αποτελεί κρίσιμο βήμα για την επίτευξη του στόχου κλιματικής ουδετερότητας έως το 2045. Το πιο χαρακτηριστικό έργο είναι το SALCOS [Salzgitter Low CO₂ Steelmaking] της εταιρείας Salzgitter AG, που υλοποιείται στη Κάτω Σαξονία. Το έργο επιδιώκει τη σταδιακή αντικατάσταση του άνθρακα στις υψικαμίνους από τις απλές

¹⁰⁸ ο.π, GreenH2orn, 2023

¹⁰⁹ βλ. την ανάλυση στο Worrell E., et al., “Pathways to a low-carbon iron and steel industry in the medium-term – the case of Germany”, σσ. 1-28, στο Journal of Cleaner Energy, Science direct, 959652615019228.

οξυγόνου [*basic oxygen furnace/ BF*] σε σύγχρονες με πράσινο υδρογόνο, μέσω τεχνολογίας *Direct Reduction of Iron (DRI)* και ηλεκτρικών καμίνων τόξου [*electric arc furnace/ EAF*]¹¹⁰.

Οι επενδύσεις ξεπερνούν τα 3 δισ. ευρώ μέχρι το 2033, με στόχο μείωση εκπομπών CO₂ κατά 95% σε σχέση με τη συμβατική παραγωγή χάλυβα. Η παραγωγική δυναμικότητα του έργου θα φτάσει τους 4 εκατ. τόνους «πράσινου» χάλυβα ετησίως. Στην πρώτη φάση (2026) προβλέπεται εγκατάσταση ηλεκτρολυτών ισχύος 100 MW, ενώ μέχρι το 2033 θα φτάσουν τα 2 GW. Η μετάβαση αυτή επιτρέπει στην Salzgitter AG να μειώσει τις



Εκπομπές CO₂ που αποδίδονται σε κάθε τρόπο παραγωγής (Πηγή: Mühlegger C., “Using Process Simulation to Support Decarbonization in the Steel Industry”, σσ. 409-414, στο *Berg Huettenmaenn Monatsh*, τομ. 170, τευχ. 7, 2025, σ. 410).

εκπομπές της κατά περίπου 8 εκατ. τόνους CO₂ ετησίως, ποσό που ισοδυναμεί με τις εκπομπές περίπου 4 εκατ. αυτοκινήτων. Η υιοθέτηση υδρογόνου στη χαλυβουργία δεν αποτελεί μόνο τεχνολογική καινοτομία, αλλά και στρατηγικό παράδειγμα για άλλες βαριές βιομηχανίες. Το έργο SALCOS συνδέεται με την εθνική *German Hydrogen Strategy*, που, ήδη από το 2020, έχει θέσει ως στόχο την εγκατάσταση τουλάχιστον 10 GW ηλεκτρολυτών έως το 2030¹¹¹. Παράλληλα, υποστηρίζεται από το πρόγραμμα *H2Global*, που στοχεύει στη δημιουργία αγοράς για πράσινο υδρογόνο¹¹².

¹¹⁰ Η Γερμανία, ως σημαντικός συντελεστής των βιομηχανικών εκπομπών CO₂, η βιομηχανία σιδήρου και χάλυβα πρέπει να μεταβεί σε διαδικασίες με χαμηλές εκπομπές CO₂, προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της ουδετερότητας άνθρακα της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας για το 2050 (βλ. Mühlegger C., “Using Process Simulation to Support Decarbonization in the Steel Industry”, σσ. 409-414, στο *Berg Huettenmaenn Monatsh*, τομ. 170, τευχ. 7, 2025).

¹¹¹ Για μια επισκόπηση της ιδέας περί μετάβασης σε «πράσινη» παραγωγή χάλυβα βλ. Preis P. “Turning German Steel Production Green: Quantifying Diffusion Scenarios for Hydrogen-Based Steelmaking and Policy Implications”, σσ. 682-716, στο *Junior Management Science (JUMS)*, τομ. 8, τευχ. 3, 2023.

¹¹² Όπου, ειδικά σε τέτοιες περιπτώσεις, φαίνεται η σύμπραξη βιομηχανίας-πολιτείας θεωρείται κρίσιμη για τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα του εγχειρήματος (βλ. Wagner N., et al., “Instruments Affecting the Decarbonisation of Steel in the EU and Germany: Taking Stock and Looking Ahead”, online, Available at SSRN 5075112).

6.4 Μελέτη περίπτωσης: Η Εθνική Στρατηγική Υδρογόνου της Κροατίας

Το σχέδιο εφαρμογής της τεχνολογίας υδρογόνου λαμβάνει υπόψη την εξάρτηση της κροατικής οικονομίας από τον τουρισμό και την ανάγκη για τεχνολογική πρόοδο ώστε να συμβαδίζει με την υπόλοιπη Ευρώπη¹¹³. Τα 1244 νησιά της Κροατίας, ιδιαίτερα δημοφιλείς προορισμοί, επιδιώκουν να ενσωματωθούν σε έργα τεχνολογίας υδρογόνου, όπου το υδρογόνο ως φορέας ενέργειας σε συνδυασμό με τις διαλείπουσες ΑΠΕ αποτελεί τον αυτόνομο ενεργειακό εφοδιασμό των νησιωτικών κοινοτήτων¹¹⁴. Τα μεσαίου και μικρού μεγέθους πλοία μεταφοράς επιβατών που συνδέουν τα νησιά με την ηπειρωτική χώρα αποτελούν ευκαιρία για εφαρμογή κυψελών καυσίμου. Οι εκπομπές από τις θαλάσσιες μηχανές που είναι προϊόντα καύσης μαζούτ ρυπαίνουν το ποικιλόμορφο οικοσύστημα της Αδριατικής και την ευημερία του πληθυσμού. Ως εναλλακτικό καύσιμο, το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί ως υγρή αμμωνία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόωση, είτε με την καύση της αμμωνίας είτε με τη χρήση της σε κυψέλες καυσίμου¹¹⁵. Η Κροατία, μέσω μιας ανεπτυγμένης ναυπηγικής βιομηχανίας, θα μπορούσε ενδεχομένως να πρωτοστατήσει στην κατασκευή πλοίων νέας πράσινης γενιάς¹¹⁶.

Στις αρχές της δεκαετίας, η κροατική κυβέρνηση άλλαξε την ενεργειακή της νομοθεσία και έχει εισηγηθεί ένα πλαίσιο για τη συστηματική ανάπτυξη και την αυξημένη χρήση των ΑΠΕ και της συμπαραγωγής, όπου υποστηρίζεται η χρήση υδρογόνου σε κυψέλες καυσίμου¹¹⁷. Δεδομένου ότι η Κροατία είναι ένας σημαντικός ευρωπαϊκός τουριστικός προορισμός, ο εκτιμώμενος αριθμός των υδρογόνων FCEV που χρησιμοποιούνται από ξένους τουρίστες στην Κροατία μέχρι το 2030 έφτασε τις 84 χιλιάδες. Ως εκ τούτου, φάνηκε η επιτακτική ανάγκη να τεθεί μια υποδομή

¹¹³ Daniel, “Mapping the potential for decentralized energy generation based on renewable energy sources in the Republic of Croatia”, σσ.731-744.

¹¹⁴ Martins, & Busuttil, “Hydrogen as an energy vector in the islands’ energy supply”, σσ.91-103.

¹¹⁵ Ο.π.; Τα υβριδικά πλοία διαθέτουν ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μηχανές ντίζελ που κινούν ηλεκτρικές γεννήτριες, μια κυψέλη καυσίμου και μια μπαταρία, γεγονός που τα καθιστά φιλικότερα προς το περιβάλλον από τα συμβατικά συστήματα. Εκτός αυτού, παράγουν λιγότερο CO₂, SO_x, NO_x και μπορούν να επιτύχουν μηδενικές εκπομπές στα λιμάνια [Vladimir, “Alternative power options to reduce carbon footprint of ro-ro passenger fleet: a case study of Croatia”, σσ.226-238].

¹¹⁶ βλ. τα πρακτικά του 24th world hydrogen energy conference [WHEC2024], online, accessed on March 22nd, 2025, available at <https://shorturl.at/H83Hd>.

¹¹⁷ Bogdan, “An analysis of the legal and market frame work for the cogeneration sector in Croatia”, σσ.134-143.

υδρογόνου, ενσωματωμένη στο εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και στο ευρωπαϊκό δίκτυο αυτοκινητοδρόμων υδρογόνου, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Πίνακας 2 Proposed development of hydrogen infrastructure in Croatia [όπως παρουσιάζονται στο Firak, & Ankica, “Hydrogen transportation fuel in Croatia: road map strategy”, σσ.3820-3830.

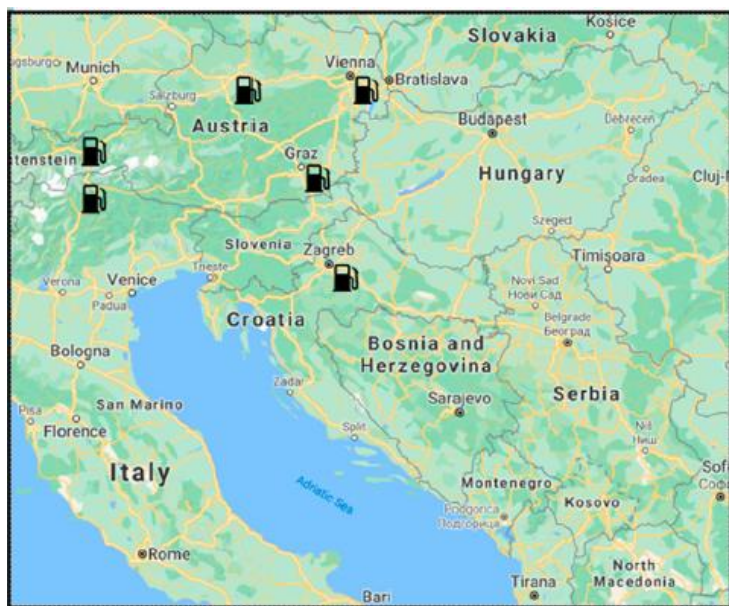
Συνοπτικά, στο πλαίσιο της εθνικής στρατηγικής της, η Κροατία ανέπτυξε τον θεμελιώδη σχεδιασμό για την εγκατάσταση αυτόνομων σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου (Hydrogen Refuelling Stations – HRS) και τον σχετικό εθνικό οδικό χάρτη. Στο σχέδιο αυτό υπολογίστηκαν οι απαιτούμενες ποσότητες υδρογόνου για την τροφοδοσία τουριστικών οχημάτων κυψελών καυσίμου (FCEVs), με στόχο την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης λόγω τουρισμού και μεταφορών. Η ανάπτυξη των HRS χωρίστηκε σε τρεις φάσεις: εγκατάσταση τριών σταθμών έως το 2020 (στόχος που επιτεύχθηκε), επτά έως το 2025 και δώδεκα έως το 2030, σε στρατηγικά επιλεγμένες τοποθεσίες. Το πρώτο πιλοτικό HRS της χώρας σχεδιάστηκε με πρόβλεψη για μελλοντικές τεχνολογικές αναβαθμίσεις και δυνατότητα τροφοδοσίας απομακρυσμένων περιοχών, ενισχύοντας την ενεργειακή ανθεκτικότητα του δικτύου υδρογόνου.¹¹⁸

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από φωτοβολταϊκές μονάδες χρησιμοποιείται για την κάλυψη των αναγκών των καταναλωτών και, όταν η παραγωγή υπερβαίνει την κατανάλωση, η

¹¹⁸ Paranos, “Design of a solar hydrogen refuelling station following the development of the first Croatian fuel cell powered bicycle to boost hydrogen urban mobility”, σσ.14-22.

ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται μέσω ηλεκτρολύτη για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου, το οποίο στη συνέχεια συμπιέζεται και αποθηκεύεται. Το έργο σχεδιάστηκε έτσι ώστε να αναπτύξει τον ενεργειακό πυρήνα κινητών και σταθερών συστημάτων έκτακτης ανάγκης με βάση την τεχνολογία υδρογόνου που θα εξασφαλίζει την παροχή ενέργειας σε περίπτωση κινδύνων μικρότερης διάρκειας. Ένα βοηθητικό σύστημα που εγκαθίσταται με αυτόν τον τρόπο αποτελεί δυνητικό θεμέλιο για τη βιομηχανική ανάπτυξη των κροατικών μεγάλων και μεσαίων επιχειρήσεων. Ο πολλαπλασιασμός των μικροδικτύων θα μειώσει την εισαγωγή ορυκτών καυσίμων και, συνεπώς, την εξάρτηση από τρίτες χώρες.

Η ανάπτυξη υποδομών υδρογόνου στην Κροατία θα ενθαρρύνει ενδεχομένως τις παραμεθόριες χώρες [Ιταλία, Σλοβενία, Ουγγαρία, Σερβία, Βοσνία-Ερζεγοβίνη, και Μαυροβούνιο] να συνδεθούν με το προοδευτικό τμήμα της Ευρώπης και να ενταχθούν στην οικονομία του υδρογόνου. Ειρήσθω εν παρόδω, από τις 6 γειτονικές χώρες, μόνο η Ιταλία διέθετε, έως το 2020, συστήματα υδρογόνου σε λειτουργία¹¹⁹, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.



Πίνακας 3 Map of HRSs in Croatia and surrounding countries [όπως παρουσιάζεται στο Astiaso, “*Analysis of non-economic barriers for the deployment of hydrogen technologies and infrastructures in European countries*”, σσ.435-447]

Η ανάλυση των μη οικονομικών εμποδίων για την ανάπτυξη της τεχνολογίας και των υποδομών υδρογόνου στις ευρωπαϊκές χώρες δείχνει ότι η ανάπτυξη χωρών όπως αυτή της Σλοβενίας και της Ουγγαρίας εμποδίζεται κυρίως από τις πολύπλοκες διαδικασίες μεταξύ των εμπλεκόμενων αρχών και την έλλειψη κυβερνητικών πρωτοβουλιών για την αύξηση των δικτύων μεταφοράς και διανομής και τη χρήση οχημάτων υδρογόνου¹²⁰. Δεδομένης της

¹¹⁹ Για τις υπόλοιπες χώρες βλ. το κεφάλαιο 2.2.2.3. Άλλα Ευρωπαϊκά παραδείγματα και ερμηνευτικές προσεγγίσεις.

¹²⁰ Astiaso, “*Analysis of non-economic barriers for the deployment of hydrogen technologies and infrastructures in European countries*”, σσ.435-447.

πολυπλοκότητας των εθνικών οδηγιών και των διοικητικών διαδικασιών, οι τελικοί χρήστες και οι επενδυτές επιλέγουν διαφανείς λύσεις που έχουν ήδη καθιερωθεί στην αγορά. Επιπλέον, η πλειονότητα των πολιτών δεν είναι επαρκώς ενημερωμένοι για την τεχνολογία του υδρογόνου και, ως εκ τούτου, επιλέγουν τα γνωστά καύσιμα. Ο αριθμός των αιτούντων μειώνεται επιπλέον λόγω της έλλειψης πληροφοριών και βοήθειας προς τους εμπειρογνώμονες υδρογόνου για την υποβολή προτάσεων έργων¹²¹.

Λαμβάνοντας υπόψη τη δημοσίευση της Ευρωπαϊκής Στρατηγικής για το Υδρογόνο και τη δημιουργία της European Clean Hydrogen Alliance, η Κροατία βρίσκεται στη διαδικασία διαμόρφωσης της δικής της Εθνικής Στρατηγικής για το Υδρογόνο, με στόχο την ενεργό συμμετοχή της στην ευρωπαϊκή ενεργειακή μετάβαση μέσω διαφόρων προγραμμάτων και μηχανισμών ανάπτυξης. Η πρωτοβουλία αυτή, στο πλαίσιο της CroH₂, υλοποιείται από το Υπουργείο Οικονομίας και Βιώσιμης Ανάπτυξης, ενώ η χώρα έχει ενταχθεί στη Hydrogen Europe, ενισχύοντας τη συνεργασία της με την ευρωπαϊκή βιομηχανία και ερευνητική κοινότητα. Η στρατηγική δίνει έμφαση στη δημιουργία θετικού κοινωνικού, πολιτικού, εκπαιδευτικού και οικονομικού πλαισίου για την ανάπτυξη και την αποδοχή της τεχνολογίας υδρογόνου, φέρνοντας κοντά βασικούς φορείς της βιομηχανίας, της επιστήμης και της καινοτομίας. Μέσα από αυτές τις πρωτοβουλίες, η Κροατία επιδιώκει να διαμορφώσει ένα συνεκτικό πλαίσιο πολιτικής και τεχνολογικής ανάπτυξης, ώστε να καταστεί ισότιμος εταίρος στην ευρωπαϊκή οικονομία του υδρογόνου και να ενισχύσει τη θέση της στους τομείς των μεταφορών, της σταθερής παραγωγής ενέργειας και της βιομηχανίας.¹²²

Διεθνείς μελέτες καταδεικνύουν ότι, τόσο σε βραχυπρόθεσμο (έως το 2030) όσο και σε μακροπρόθεσμο (έως το 2050) ορίζοντα, το υδρογόνο αποτελεί την πλέον ολοκληρωμένη λύση για την ενεργειακή μετάβαση. Στο πλαίσιο αυτό, η Κροατία διαμόρφωσε μια **τριπλή στρατηγική** που βασίζεται στην παραγωγή, τη χρήση και την εκπαίδευση. Ο πρώτος πυλώνας εστιάζει στη

¹²¹ Ο.π.; Επίσης, και παρά τις συνθήκες αυτές, μελλοντικές οργανώσεις παρόμοιες με την Κροατική Ένωση Υδρογόνου [CroH₂], όπως η Hungarian Hydrogen Technology Association [HHTA], η Hydrogen Serbia, η Italian Hydrogen and Fuel Cell Association [H₂IT], και η National Hydrogen Association of Slovenia, καταβάλλουν προσπάθειες που φέρνουν τις χώρες πιο κοντά στην εφαρμογή του υδρογόνου. Για παράδειγμα, η πρωτοβουλία Spreading hydrogen mobility in South-East Europe [HYSEE] σχεδιάζεται να συνδέσει τη Σερβία, την Ουγγαρία, τη Βουλγαρία, τη Ρουμανία, και την Ελλάδα. Επίσης, ενδείκνυται πως υπάρχει μεγάλο δυναμικό αποθήκευσης υδρογόνου σε ένα αλατούχο σπήλαιο στη Βοσνία-Ερζεγοβίνη [για μια ανάλυση των ανωτέρω, τις καταβαλλόμενες προσπάθειες, αλλά και τις εθνικές πολιτικές στρατηγικές, βλ. Caglayan, et al., “*Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe*”, σσ.793-805].

¹²² Ο.π., σσ.799-801

μετάβαση από το γκρίζο προς το πράσινο υδρογόνο, με σταδιακή μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων και ανάπτυξη παραγωγής μέσω ΑΠΕ και ηλεκτρόλυσης, σε συνδυασμό με την ενίσχυση της εγχώριας βιομηχανίας εξοπλισμού ώστε να τονωθεί η απασχόληση και να μειωθεί η εξάρτηση από εισαγωγές. Ο δεύτερος πυλώνας αφορά τη διεύρυνση της ζήτησης, με προτεραιότητα στις δημόσιες αστικές συγκοινωνίες, τα βαρέα οχήματα και σταδιακά στα ιδιωτικά μέσα μεταφοράς και τα τοπικά ενεργειακά μικροδίκτυα.¹²³ Ο τρίτος πυλώνας επικεντρώνεται στη δημιουργία ενός θεσμικού και εκπαιδευτικού πλαισίου, μέσω πανεπιστημίων και ερευνητικών κέντρων, για την ανάπτυξη εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού και την υποστήριξη της καινοτομίας. Η στρατηγική αυτή προσφέρει στην Κροατία τη δυνατότητα να ενισχύσει την ενεργειακή της ανεξαρτησία, να μειώσει τις εκπομπές και να αναπτύξει μια ανταγωνιστική εσωτερική αγορά υδρογόνου.¹²⁴

6.5 Άλλα παραδείγματα ευρωπαϊκών χωρών

Η Γερμανία αποτελεί την κορυφαία χώρα της Ευρώπης στην ανάπτυξη και επένδυση στην τεχνολογία υδρογόνου, διαθέτοντας μια ολοκληρωμένη Εθνική Στρατηγική Υδρογόνου, η οποία δύναται να λειτουργήσει ως πρότυπο για άλλα κράτη μέλη της ΕΕ. Η στρατηγική, που υιοθετήθηκε τον Ιούνιο του 2020, βασίζεται σε ένα σύνολο 38 μέτρων που καλύπτουν ολόκληρη την αλυσίδα αξίας του υδρογόνου — από την παραγωγή και τις μεταφορές έως τη βιομηχανία, τη θερμότητα, τις υποδομές, την έρευνα, την καινοτομία, την εκπαίδευση και τη διεθνή συνεργασία. Η εφαρμογή της Εθνική Στρατηγική Υδρογόνου της Γερμανίας ακολουθεί δύο φάσεις. Η πρώτη φάση (2020–2023) επικεντρώθηκε στη δημιουργία μιας εγχώριας αγοράς υδρογόνου, στην ενίσχυση της βιομηχανικής βάσης και στην ανάπτυξη των αρχικών υποδομών. Από το 2024 ξεκίνησε η δεύτερη φάση, με στόχο τη σταθεροποίηση της αγοράς, την ενίσχυση των εισαγωγών, τη διαμόρφωση των ευρωπαϊκών και διεθνών διαστάσεων του υδρογόνου και την ανάδειξη της Γερμανίας ως κεντρικού κόμβου υδρογόνου στην Ευρώπη.¹²⁵

Στις χώρες της Μπενελούξ [Be-Ne-Lux, Βέλγιο – Ολλανδία – Λουξεμβούργο], καθώς ο στόχος της ενεργειακής μετάβασης προς μια κοινωνία με ουδέτερο αποτύπωμα άνθρακα δεν αποτελεί

¹²³ CroH₂ (2021). *Croatian Hydrogen Strategy 2021–2050*. Zagreb: Ministry of Economy and Sustainable Development.

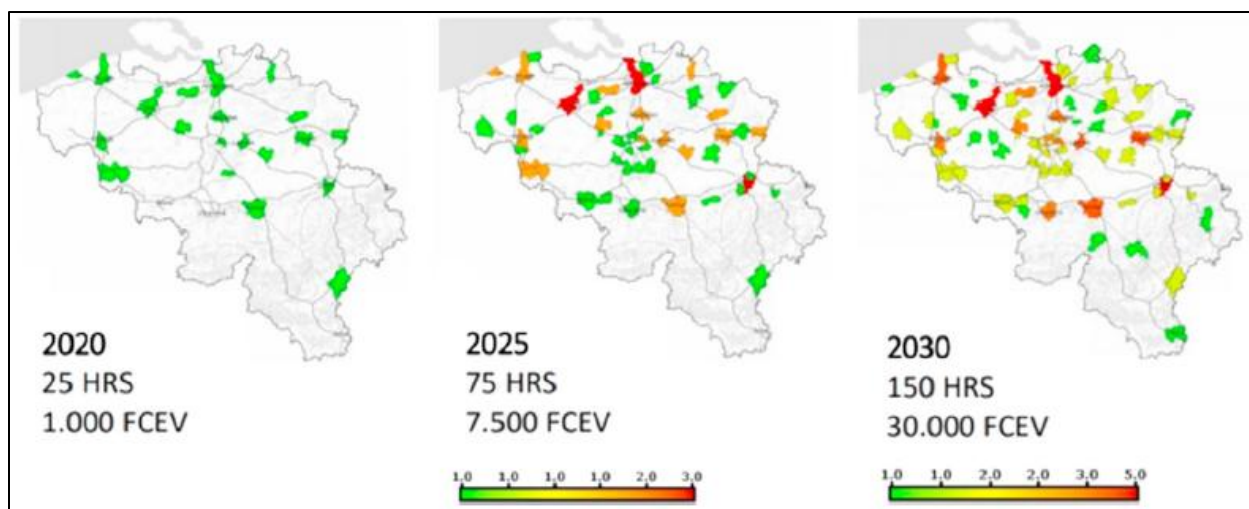
¹²⁴ Ο.π., σσ.802-804.

¹²⁵ European Commission (2023). *Hydrogen Valleys in Germany – EU Hydrogen Strategy Implementation Report*. Brussels: European Commission.

μόνο μέρος των λίγων κορυφαίων χωρών του κόσμου, αλλά ένα κοινό παγκόσμιο εγχείρημα, πρέπει να διεξαχθούν έργα και στις υπόλοιπες χώρες. Η Ολλανδία, παραδείγματος χάρη, αποτελεί καλό παράδειγμα του τρόπου με τον οποίο σχεδιάζεται μια τέτοια ενεργειακή μετάβαση. Κύριος στόχος τους είναι η μείωση της χρήσης του φυσικού αερίου στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης, επενδύοντας, μεταξύ άλλων, στο υδρογόνο. Η κυβερνητική στρατηγική για το υδρογόνο έχει αναγνωρίσει το υδρογόνο ως μια τεχνολογία που θα ερευνηθεί και θα εφαρμοστεί έντονα αυτή και την επόμενη δεκαετία, και έχει προσαρμόσει την πολιτική της έτσι ώστε η Ολλανδία να εισέλθει ενεργά στους τομείς της αγοράς και της ανάπτυξης. Η Ολλανδική ατζέντα, αρκετά κοντά με το παράδειγμα της Κροατίας, βασίζεται σε τέσσερις πυλώνες. Πρώτον, τη δημιουργία ποιοτικής και αποτελεσματικής νομοθεσίας. Δεύτερον, τη δημιουργία κανονισμών για τη μείωση του κόστους και την κλιμάκωση της παραγωγής πράσινου υδρογόνου. Τρίτον, τη βιωσιμότητα της τελικής κατανάλωσης και, τέταρτον, την πολιτική υποστήριξης που κυμαίνεται από τη διεθνή συνεργασία έως την περιφερειακή ανάπτυξη¹²⁶.

Το Βέλγιο, από την άλλη, δεν έχει δημιουργήσει κάποια ιδιαίτερη στρατηγική η οποία θα μπορούσε να το καταστήσει ως πρωτοπόρο στην ανάπτυξη του υδρογόνου. Καθώς περιβάλλεται από τη Γαλλία, την Ολλανδία, και τη Γερμανία που δραστηριοποιούνται στον τομέα αυτό, η ιδέα είναι το Βέλγιο να παραμείνει συνδεδεμένο με την ανάπτυξη του περιφερειακού χάρτη πορείας για το υδρογόνο. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένες συνθήκες που τοποθετούν το Βέλγιο σε μια αρκετά μοναδική θέση. Το τεράστιο πλεονέκτημα του Βελγίου, η πόλη-λιμάνι της Αμβέρσας, είναι ένα από τα ευρωπαϊκά κέντρα παραγωγής υδρογόνου, από όπου ξεκινά ένα από τα μεγαλύτερα υπόγεια δίκτυα μεταφοράς υδρογόνου με αγωγούς. Επίσης, πολλές εταιρείες που συνδέονται με την ανάπτυξη του υδρογόνου βρίσκονται στο Βέλγιο, όπως, για παράδειγμα, η H₂-Mobility Belgium, η οποία επιδίωξε, με γνώμονα την εφαρμογή του υδρογόνου στις βελγικές μεταφορές, να αναπτύξει ένα ολοκληρωμένο εθνικό δίκτυο όπου, βάση του σχεδίου εφαρμογής του υδρογόνου στο Βέλγιο, θα προετοιμάσει τη βελγική αγορά για τα FCEV.

¹²⁶ Το χρονοδιάγραμμα δεν έχει καθοριστεί, αλλά οι βασικές προϋποθέσεις για την ανάπτυξη του υδρογόνου πρέπει να διαμορφωθούν έως το 2025, κάτι που φαίνεται πως επιτυγχάνεται, συμπεριλαμβανομένης της διαμόρφωσης του εθνικού προγράμματος για το υδρογόνο. Καθώς η Ολλανδία διαθέτει εξαιρετικό αιολικό δυναμικό, διερευνήθηκε η ιδέα της αξιοποίησης της συγκεκριμένης ΑΠΕ με συνεκτική υποδομή. Μια έρευνα διεξήχθη σε ήδη εγκατεστημένους σταθμούς ανεφοδιασμού στην Ολλανδία, έδειξε πως 132 από τους 3021 σταθμούς ανεφοδιασμού στις Κάτω Χώρες, δηλαδή περίπου το 4,6%, είναι κατάλληλοι για την εγκατάσταση ανεμογεννήτριας για την παραγωγή υδρογόνου. Οι ανεμογεννήτριες προτείνεται να εγκατασταθούν στη θέση του σταθμού ανεφοδιασμού με μια μονάδα ηλεκτρολύτη για την επιτόπια παραγωγή υδρογόνου [Government of Netherland, “Government strategy on hydrogen”].



Πίνακας 4 Projection of hydrogen infrastructure development in Belgium [όπως παρουσιάζονται στο van der Laak, et al., “National implementation plan hydrogen refuelling infrastructure Belgium”].

Με βάση την πρόβλεψη του πίνακα 4., όπου διατυπώνεται και η στρατηγική του Βελγίου για το υδρογόνο που απαιτείται για περαιτέρω ανάπτυξη, υπολογίστηκε η ανάπτυξη των HRS και των FCEV στους δρόμους. Προβλέπεται ότι μέχρι το τέλος του 2020 θα εγκατασταθούν 25 HRS, 75 μέχρι το τέλος του 2025 και 150 μέχρι το τέλος του 2030, καλύπτοντας τις ανάγκες 30.000 FCEV. Ωστόσο, η σκληρή αλήθεια, προς το παρόν, είναι πως τα επιτευχθέντα αποτελέσματα για το 2020, και η σημερινή κατάσταση εν έτη 2025, υποδηλώνουν υπερεκτίμηση των προβλεπόμενων αριθμών που παρουσιάζονται.

Όσον αφορά τη χρήση του υδρογόνου ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές, συχνά τονίζεται ως μια φιλική προς το περιβάλλον, ποιοτική λύση που μπορεί να εξασφαλίσει ηλεκτρική ενέργεια για τους κατοίκους. Για τον λόγο αυτό, η ιδέα της οικονομίας του υδρογόνου στο νησιωτικό κράτος της Ισλανδίας δεν υπήρξε ιδιαίτερα ριζοσπαστική ή νέα¹²⁷. Λαμβάνοντας υπόψη τα προαναφερθέντα, το παράδειγμα της Ισλανδίας αξίζει να αναφερθεί καθώς ο φιλόδοξος στόχος για τον μετασχηματισμό της εθνικής οικονομίας της Ισλανδίας μέσω της ενεργειακής μετάβασης προς την οικονομία του υδρογόνου έως το 2050 αποτελεί απόδειξη μακροπρόθεσμου σχεδιασμού και ορθολογικής χάραξης πολιτικής. Δεδομένου ότι η Ισλανδία είναι μια χώρα με μεγάλη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, και κατέχει δυνατότητες

¹²⁷ Για μια επισκόπηση των πολιτικών της Ισλανδίας για το υδρογόνο βλ. Arnason, “Iceland: a future hydrogen economy”, σσ.389-394; Ως εκ τούτου, πραγματοποιήθηκαν μερικές έρευνες και μελέτες περιπτώσεων σχετικά με την πρόοδο και τις κοινωνικοτεχνικές επιπτώσεις στους ανθρώπους και το κράτος [βλ. ενδεικτικά, εκτός από ο.π., το Park, “Iceland’s hydrogen energy policy development [1998-2007] from a sociotechnical experiment viewpoint”, σσ.443-454].

επιδίωξης μιας, περαιτέρω, εφαρμογής εξηλεκτρισμού με κύριο στόχο τη μείωση της εξάρτησης από το καύσιμο βενζίνη, οι μεταφορές είναι ο κατάλληλος τομέας για την εφαρμογή του υδρογόνου. Για τους Ισλανδούς, όπως φαίνεται, παρά την υπάρχουσα απαίτηση της ανάπτυξης συστημάτων ενεργειακού εφοδιασμού και περαιτέρω επενδύσεις, το υδρογόνο αποτελεί μια ελκυστική εναλλακτική λύση για τη μείωση της εισαγωγής πετρελαιοειδών, μειώνοντας κατά συνέπεια το συνολικό κόστος καυσίμων για τους καταναλωτές. Ως εκ τούτου, η ενεργειακή μετάβαση της Ισλανδίας θα συνεχιστεί με το υδρογόνο ως έναν από τους κύριους παράγοντες.

6.6. Συμπεράσματα

Η συζήτηση γύρω από τον ρόλο του υδρογόνου στην παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση έχει πλέον μετατοπιστεί από θεωρητικό επίπεδο σε πρακτικές εφαρμογές και επενδυτικά σχέδια. Το πράσινο υδρογόνο αναδεικνύεται σε βασικό πυλώνα για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως τα μέσα του αιώνα, σε συνδυασμό με την κυριαρχία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), την αποθήκευση και την ευέλικτη διανομή ενέργειας. Χωρίς την ενσωμάτωση της τεχνολογίας υδρογόνου στις εθνικές στρατηγικές, δεν μπορεί να επιτευχθεί πλήρως ένα μέλλον μηδενικών εκπομπών.

Η πρόοδος σε τεχνολογικό, κοινωνικό και θεσμικό επίπεδο είναι ήδη εμφανής: εκατοντάδες έργα έρευνας και ανάπτυξης βρίσκονται σε εξέλιξη παγκοσμίως, ενώ οι προβλέψεις δείχνουν σημαντική επιτάχυνση της ανάπτυξης τα επόμενα χρόνια. Οι προκλήσεις πλέον εστιάζουν λιγότερο στο κόστος και την αποδοτικότητα, και περισσότερο στην κοινωνική αποδοχή, τη ρύθμιση, την ασφάλεια και τη δημιουργία αγορών. Η κακή φήμη του υδρογόνου ως «επικίνδυνου» καυσίμου αντιμετωπίζεται μέσα από ενημέρωση, εμπειρία και πραγματικά έργα, ενώ η ανάγκη για μετάβαση σε βιώσιμα ενεργειακά συστήματα καθίσταται ολοένα και πιο επιτακτική λόγω της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, των φυσικών καταστροφών και της γενικότερης περιβαλλοντικής υποβάθμισης.

Σήμερα, οι χώρες που ηγούνται στον τομέα, όπως η Ιαπωνία, η Γερμανία και οι Ηνωμένες Πολιτείες, έχουν αναγνωρίσει τόσο την περιβαλλοντική όσο και την οικονομική διάσταση της τεχνολογίας υδρογόνου. Η πρόοδος τους δημιουργεί σταδιακά μια παγκόσμια αγορά και ένα σταθερότερο τεχνολογικό περιβάλλον, το οποίο επιτρέπει σε νεοεισερχόμενες χώρες να επιταχύνουν τη μετάβασή τους αξιοποιώντας ώριμες και οικονομικότερες λύσεις. Στην Ευρώπη,

η Κροατία αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα χώρας που βρίσκεται σε φάση έντονης στρατηγικής προετοιμασίας και ανάπτυξης έργων.

Εφόσον ακόμη και ένα τμήμα των εθνικών και διεθνών στρατηγικών εφαρμοστεί μέχρι το 2030, ο αντίκτυπος θα είναι εκτεταμένος, θέτοντας τις βάσεις για τη μετάβαση σε μια «κοινωνία υδρογόνου» έως το 2050. Το υδρογόνο αναμένεται να εδραιώσει τη θέση του ως βασικό στοιχείο του μελλοντικού ενεργειακού συστήματος — τόσο για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας όσο και για την ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας στην Ευρώπη και παγκοσμίως

Κεφάλαιο 7. Το μέλλον της ενεργειακής ασφάλειας στην Ευρώπη

7.1. Ο ρόλος του υδρογόνου στη διασφάλιση της ενεργειακής ασφάλειας της Ευρώπης

Ως ενεργειακή ασφάλεια, νοείται η ικανότητα μιας κοινωνίας, μιας οικονομίας, ή ενός έθνους, να εξασφαλίζει σταθερό, αξιόπιστο και οικονομικά προσιτό ενεργειακό εφοδιασμό, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τους κινδύνους που συνδέονται με τις διαταραχές του εφοδιασμού, τη μεταβλητότητα των τιμών και τις γεωπολιτικές εξαρτήσεις. Αποτελεί κρίσιμη πτυχή των σύγχρονων οικονομιών, καθώς η ενέργεια αποτελεί το θεμέλιο της βιομηχανικής παραγωγής, των μεταφορών και της κατανάλωσης των νοικοκυριών. Χωρίς ασφαλή πρόσβαση στην ενέργεια, η οικονομική ανάπτυξη και η κοινωνική σταθερότητα μπορεί να υπονομευθούν σοβαρά.

Η διασφάλιση της ενεργειακής ασφάλειας απαιτεί μια πολύπλευρη προσέγγιση που περιλαμβάνει τη διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας, την επένδυση σε ανθεκτικές υποδομές, τη σταθεροποίηση των τιμών και την ενσωμάτωση βιώσιμων λύσεων για τη μείωση της εξάρτησης από τους πεπερασμένους πόρους. Έχοντας την προαναφερθείσα προσέγγιση κατά νου, και τη διαπίστωση της παρούσας εργασίας, μέσω της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε κατά την έκτασή της, φαίνεται πως τα τελευταία χρόνια, η Ευρώπη έχει αντιμετωπίσει σημαντικές προκλήσεις που σχετίζονται με την ενεργειακή ασφάλεια, ιδίως λόγω της ιστορικής εξάρτησής της από τα εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα. Η πολιτική αστάθεια, οι διαταραχές της αλυσίδας εφοδιασμού και οι διακυμάνσεις της αγοράς έχουν υπογραμμίσει την ανάγκη για στρατηγική στροφή προς πιο βιώσιμες και εγχώρια διαθέσιμες πηγές ενέργειας.

Καθώς η ΕΕ επιδιώκει τους στόχους της Πράσινης Συμφωνίας [*Green Deal*], και στοχεύει στην κλιματική ουδετερότητα έως το 2050, το υδρογόνο έχει αναδειχθεί ως βασικό στοιχείο για το μέλλον της ενεργειακής ασφάλειας. Το υδρογόνο, ως ευέλικτος ενεργειακός φορέας, προσφέρει τη δυνατότητα να μειωθεί η εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, παρέχοντας παράλληλα μια σταθερή και αποτελεσματική εναλλακτική λύση που μπορεί να ενσωματωθεί στις υπάρχουσες ενεργειακές υποδομές¹²⁸.

¹²⁸ European Commission. “Focus on EU energy security and gas supplies”, available at <https://shorturl.at/IH6J1>, “Hydrogen in the EU’s energy system”, available at <https://shorturl.at/u0ett>, και “Renewable hydrogen and decarbonization”, available at <https://shorturl.at/G3Vg6>; International Energy Agency [IEA], “Energy security in energy transitions”, available at <https://shorturl.at/egNfF>; International Council on Clean Transportation [ICCT], “The price of green hydrogen: Estimate future production costs”, available at <https://shorturl.at/gRuXr>; Energy Business Review, “Unveiling the potential of hydrogen storage in Europe”, available at <https://tinyurl.com/v33tpe87>; EE Times,

Το δυναμικό του υδρογόνου έγκειται στην ικανότητά του να παράγεται από μια ποικιλία πηγών, συμπεριλαμβανομένης της ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ηλεκτρόλυσης, του φυσικού αερίου με δέσμευση άνθρακα, ακόμη και της βιομάζας. Το πράσινο υδρογόνο, το οποίο παράγεται με τη χρήση ΑΠΕ, αντιπροσωπεύει την πιο βιώσιμη επιλογή, και ευθυγραμμίζεται με τους στόχους της Ευρώπης για την απαλλαγή από τον άνθρακα. Επενδύοντας σε τεχνολογίες υδρογόνου, η Ευρώπη μπορεί να μειώσει την εξάρτησή της από το εισαγόμενο φυσικό αέριο και πετρέλαιο, δημιουργώντας ένα πιο αυτόνομο και ανθεκτικό ενεργειακό σύστημα.

Επιπλέον, φάνηκε κατά την, έως τώρα, έκταση της εργασίας πως το υδρογόνο μπορεί να χρησιμεύσει ως λύση αποθήκευσης ενέργειας, αντιμετωπίζοντας τα ζητήματα διαλείψεων που σχετίζονται με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια. Μέσω δικτύων αποθήκευσης και διανομής υδρογόνου μεγάλης κλίμακας, η Ευρώπη μπορεί να σταθεροποιήσει τον ενεργειακό της εφοδιασμό και να εξασφαλίσει συνεχή ροή ενέργειας, ακόμη και σε περιόδους χαμηλής παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές.

Ωστόσο, παρά τις πολλά υποσχόμενες δυνατότητές του, το υδρογόνο παρουσιάζει επίσης σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για να καταστεί βιώσιμος πυλώνας της ενεργειακής ασφάλειας της Ευρώπης. Η παραγωγή πράσινου υδρογόνου παραμένει δαπανηρή λόγω της υψηλής εισροής ενέργειας που απαιτείται για την ηλεκτρόλυση. Η κλιμάκωση των υποδομών υδρογόνου, από τις εγκαταστάσεις παραγωγής έως τα δίκτυα αποθήκευσης και διανομής, απαιτεί σημαντικές επενδύσεις και συντονισμένη πολιτική στήριξη. Επιπλέον, η ανάπτυξη της οικονομίας του υδρογόνου απαιτεί αδιάκοπες εξελίξεις στην τεχνολογία, τα ρυθμιστικά πλαίσια, και τη διεθνή συνεργασία για τη δημιουργία μιας λειτουργικής αγοράς που θα επιτρέπει το διασυνοριακό εμπόριο και την αποτελεσματική ανάπτυξη λύσεων με βάση το υδρογόνο.

Υπό το πρίσμα της συνεχώς αυξανόμενης παγκόσμιας χρήσης ενέργειας, του αυξανόμενου κόστους των ενεργειακών υπηρεσιών, των ανησυχιών για την ασφάλεια του ενεργειακού

“Evaluating hydrogen’s role in energy storage solutions”, available at <https://tinyurl.com/3dthvnr7>; Montel Energy, “Hydrogen production cost trends: 2025 outlook”, available at <https://tinyurl.com/c63pau3w>; Clean Hydrogen Partnership, “Policy support for hydrogen: Revised final report”, available at <https://tinyurl.com/324ae338>; Center for Strategic & International Studies [CSIS], “The future of European energy security”, available at <https://tinyurl.com/2e9n7u3v>; Hydrogen Europe, “EU backs hydrogen infrastructure projects with over €250 million”, available at <https://tinyurl.com/5fdftw67>; και τέλος ScienceDirect, “Large-scale green hydrogen storage challenges”, available at <https://tinyurl.com/yc8mwv8v>.

εφοδιασμού, της κλιματικής αλλαγής, και της τοπικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης, το παρακάτω κεφάλαιο, εφοδιασμένο με την ιστορία, τις προκλήσεις και προοπτικές του πράσινου υδρογόνου, επικεντρώνεται στο ερώτημα πώς μπορεί να καλυφθεί μακροπρόθεσμα η αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, όπου το υδρογόνο αποτελεί τη λύση για την ενεργειακή ασφάλεια της Ευρώπης.

7.2. Η μη βιωσιμότητα του σημερινού ενεργειακού συστήματος και η ανάγκη για μετάβαση

Όπως κατέστη σαφές, το σημερινό σύστημα ενέργειας και μεταφορών, το οποίο βασίζεται, κατά κύριο λόγο, ακόμη σε ορυκτούς ενεργειακούς φορείς, δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να αξιολογηθεί ως βιώσιμο. Δεδομένης της συνεχιζόμενης αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού καθώς και της προοδευτικής εκβιομηχάνισης των αναπτυσσόμενων χωρών, η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας αναμένεται να συνεχίσει να κλιμακώνεται τις επόμενες δεκαετίες, κατά περισσότερο από 50% μέχρι το 2030, με τα ορυκτά καύσιμα να συνεχίζουν να κυριαρχούν στην παγκόσμια χρήση ενέργειας. Ταυτόχρονα, υπάρχει αυξανόμενη παγκόσμια συναίνεση ότι οι GHG, οι οποίες συνεχίζουν να αυξάνονται, πρέπει να τεθούν υπό διαχείριση, προκειμένου να αποφευχθεί η επικίνδυνη ανθρωπογενής παρέμβαση στο κλιματικό σύστημα.

Ως εκ τούτου, η ασφάλεια του εφοδιασμού και η κλιματική αλλαγή συνιστούν δύο μείζονες ανησυχίες για το μέλλον του ενεργειακού τομέα, οι οποίες δημιουργούν την πρόκληση να βρεθεί ο καλύτερος τρόπος για τον περιορισμό των εκπομπών, παρέχοντας ταυτόχρονα την ενέργεια που απαιτείται για τη διατήρηση των οικονομιών. Οι ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού, την κλιματική αλλαγή, καθώς και την τοπική ατμοσφαιρική ρύπανση και τις αυξανόμενες τιμές των ενεργειακών υπηρεσιών επηρεάζουν, όπως φάνηκε, όλο και περισσότερο τη χάραξη πολιτικής σε όλο τον κόσμο¹²⁹.

Ενδεικτικά, ο τομέας των μεταφορών αντιπροσωπεύει σήμερα περίπου το 18 % της παγκόσμιας κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας και περίπου το 17 % των παγκόσμιων εκπομπών CO₂, με τη συντριπτική πλειονότητα αυτών να προέρχεται από τις οδικές μεταφορές. Επιπλέον, οι μεταφορές εκτιμάται ότι θα συνεισφέρουν περίπου 20 % της προβλεπόμενης αύξησης τόσο της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης όσο και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έως το 2030. Το πετρέλαιο

¹²⁹ Frano, “Transition to renewable energy systems with hydrogen as an energy carrier”, σσ.308-312, και Hetland, & Grietus, “In search of a sustainable hydrogen economy”, σσ.736-747

παραμένει το κυρίαρχο πρωτογενές καύσιμο, με μερίδιο άνω του ενός τρίτου στο παγκόσμιο ενεργειακό μίγμα και πάνω από το 95 % της ενεργειακής ζήτησης στις μεταφορές να καλύπτεται από αυτό. Ως εκ τούτου, τυχόν διαταραχές στον εφοδιασμό πετρελαίου θα επηρεάσουν δυσανάλογα τον τομέα των μεταφορών, ο οποίος παραμένει σχεδόν πλήρως εξαρτημένος από αυτό το καύσιμο σε παγκόσμια κλίμακα.

Παράλληλα, η υψηλή γεωγραφική συγκέντρωση των πετρελαϊκών αποθεμάτων και η αυξανόμενη εξάρτηση των εισαγωγών από περιορισμένο αριθμό χωρών —πολλές από τις οποίες χαρακτηρίζονται από πολιτική αστάθεια— ενισχύουν τους κινδύνους για την ενεργειακή ασφάλεια. Οι οικονομικές και γεωπολιτικές συνέπειες ενδεχόμενων ελλείψεων πετρελαίου, σε συνδυασμό με την ανάγκη μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στον τομέα των μεταφορών, καθιστούν επιτακτική την αναζήτηση εναλλακτικών καυσίμων και ενεργειακών λύσεων που θα μειώσουν την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα.¹³⁰

Το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο εξακολουθούν να αποτελούν τους βασικούς πυλώνες του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος, καθώς τα ορυκτά καύσιμα καλύπτουν περίπου το 80 % του σημερινού παγκόσμιου πρωτογενούς ενεργειακού εφοδιασμού. Παρά τις πολιτικές ενίσχυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η παγκόσμια ζήτηση πετρελαίου παραμένει σε μη βιώσιμα επίπεδα, με κύριους οδηγούς την Κίνα και άλλες ταχέως εκβιομηχανιζόμενες οικονομίες. Η μείωση του περιθωρίου μεταξύ παραγωγικής ικανότητας και ζήτησης πετρελαίου έχει συμβάλει σημαντικά στη διαχρονική άνοδο των τιμών του τα τελευταία χρόνια.

Δεδομένης της δομικής εξάρτησης των βιομηχανικών οικονομιών από το πετρέλαιο ως κύρια ενεργειακή πηγή, πιθανές ελλείψεις στην προσφορά λόγω περιορισμένης παραγωγής θα μπορούσαν να προκαλέσουν —και σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν ήδη προκαλέσει— απότομες και συστημικές αναταράξεις. Παρά τη μακρά ιστορία αβέβαιων ή λανθασμένων προβλέψεων σχετικά με την «κορύφωση» της παραγωγής πετρελαίου, υπάρχουν πλέον ισχυρότεροι λόγοι αξιοπιστίας των τρεχουσών προβλέψεων σε σύγκριση με το παρελθόν.¹³¹ Η αναντιστοιχία μεταξύ

¹³⁰ Acar, & Dincer, “*The potential role of hydrogen as a sustainable transportation fuel to combat global warming*”, σσ.3396-3406.

¹³¹ Για παράδειγμα, η παγκόσμια παραγωγή υπερβαίνει τις νέες ανακαλύψεις από τη δεκαετία του 1980 και το μέγεθος των νέων ανακαλύψεων μειώνεται επίσης. Τα πιο πρόσφατα παγκόσμια ενεργειακά σενάρια προβλέπουν ότι η παγκόσμια ζήτηση πετρελαίου θα αυξηθεί κατά περισσότερο από το ένα τρίτο μέχρι το 2030. Σύμφωνα με την πρόβλεψη αυτή, η σωρευτική παραγωγή πετρελαίου θα πρέπει να διπλασιαστεί σχεδόν για να καλυφθεί η αυξανόμενη ζήτηση [βλ. ενδεικτικά Dale, & Fattouh “*Peak oil demand and long-run oil prices*”, σσ.2-11].

της αναμενόμενης ανάπτυξης των ΑΠΕ και του περιορισμένου εναπομείναντος δυναμικού των συμβατικών αποθεμάτων πετρελαίου, σε συνδυασμό με πιθανή αποτυχία εφαρμογής πολιτικών ενεργειακής μετάβασης, ενδέχεται να οδηγήσει σε σοβαρές ελλείψεις προσφοράς στο άμεσο μέλλον. Μια τέτοια εξέλιξη θα επιβάλλει αναγκαστικά επιτάχυνση της μετάβασης από τα συμβατικά καύσιμα προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.¹³²

7.3 Ο ρόλος του τομέα των μεταφορών στις παγκόσμιες ενεργειακές και κλιματικές προκλήσεις

Τα συστήματα μεταφορών επιτελούν ζωτικές κοινωνικές λειτουργίες, αλλά στην παρούσα κατάστασή τους δεν μπορούν να θεωρηθούν *βιώσιμα*. Ιδιαίτερες ανησυχίες από την άποψη αυτή περιλαμβάνουν την τοπική ατμοσφαιρική ρύπανση [σωματίδια, όζον], την κλιματική αλλαγή, τη συμφόρηση, τη χρήση γης, τα ατυχήματα και τον θόρυβο. Η τοπική ατμοσφαιρική ρύπανση, ιδίως από τις οδικές μεταφορές, έχει υπάρξει, τουλάχιστον τις τελευταίες δεκαετίες, μείζον ζήτημα για την ποιότητα του αέρα των πόλεων, ιδίως στις αναπτυσσόμενες μεγαλουπόλεις του κόσμου. Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα των μεταφορών και από την παραγωγή καυσίμων αποτελούν ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα, και, όπως φάνηκε, υπήρξαν τα πρώτα που κρίθηκε αναγκαίο να υπόκεινται σε περισσότερες ρυθμίσεις σε όλο τον κόσμο. Από τη δεκαετία του 1970, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα των μεταφορών έχουν αυξηθεί κατά περισσότερο από 150% παγκοσμίως, και τα περισσότερα σενάρια, που προέβλεπαν ότι η τάση αυτή θα συνεχιστεί και στο μέλλον, επιβεβαιώθηκαν.

Η αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση καυσίμων είναι ένας από τους κύριους λόγους για την αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Οι εκπομπές CO₂, του κυριότερου αερίου του θερμοκηπίου από τις ανθρώπινες δραστηριότητες, αποτελούν καιρό αντικείμενο παγκόσμιας συζήτησης σχετικά με την ενεργειακή βιωσιμότητα και τη σταθερότητα του παγκόσμιου κλίματος. Οι αποδείξεις ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες προκαλούν την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη είναι πλέον αδιαμφισβήτητες¹³³.

Η επίτευξη αυστηρών στόχων για την κλιματική αλλαγή, όπως η σταθεροποίηση των συγκεντρώσεων CO₂ κάτω από τα 550 ppm [Parts-per notation] ή ο περιορισμός της αύξησης της

¹³² Fattouh, & Mahadeva, “OPEC”, σσ.427-443.

¹³³ Ενδεικτικά, βλ. τις εκθέσεις της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή [Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC]

παγκόσμιας θερμοκρασίας στους 2°C πάνω από τα προ-βιομηχανικά επίπεδα, απαιτεί δραστική μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 60-80% το 2050 σε σύγκριση με τις εκπομπές της αρχής του 21^{ου} αιώνα, γεγονός που αποτελεί τρομακτική πρόκληση. Αυτό θα απαιτήσει ένα χαρτοφυλάκιο τεχνολογιών, και δραστηριοτήτων, μετριασμού σε όλους τους τομείς, όπως η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, η δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα [Carbon capture and storage, εφεξής CCS], και η χρήση ΑΠΕ ή πυρηνικής ενέργειας. Βαθιές μειώσεις των εκπομπών θα απαιτηθούν επίσης στον τομέα των μεταφορών, καθώς η εφαρμογή μέτρων μείωσης των εκπομπών CO₂ στον τομέα των μεταφορών συνοδεύεται συχνά από τα συνεπακόλουθα οφέλη της μείωσης της κυκλοφοριακής συμφόρησης ή/και της βελτίωσης της ποιότητας του αέρα.

Η επίλυση των προβλημάτων των οδικών μεταφορών απαιτεί νέες λύσεις για τη χρήση της ενέργειας στις μεταφορές. Οι κύριες επιλογές είναι τα μέτρα από την πλευρά της ζήτησης, τα αποδοτικότερα οχήματα, και τα καθαρότερα καύσιμα, κάτι το οποίο αποτέλεσε ιδιαίτερο σημείο εστίασης της εργασίας. Τα πρώτα αποσκοπούν στη μείωση της ζήτησης για μεταφορές και στην αποδοτικότερη χρήση των οχημάτων και περιλαμβάνουν κυρίως μέτρα διαχείρισης της ζήτησης για μεταφορές [Transportation demand management, εφεξής TDM], όπως δημοτικοί φόροι, τιμολόγηση των δρόμων και της στάθμευσης, μετατόπιση από τη χρήση του ιδιωτικού αυτοκινήτου στα μέσα μαζικής μεταφοράς, κοινή χρήση αυτοκινήτων¹³⁴, ή προώθηση της ποδηλασίας και του περπατήματος, αλλά και βελτιωμένη εφοδιαστική αλυσίδα εμπορευμάτων, μετατόπιση των εμπορευματικών μεταφορών από τους δρόμους στον σιδηρόδρομο, τηλεργασία καθώς, και βελτίωση των οδηγικών συνηθειών.

Ταυτόχρονα, κάτι που κατέστη ιδιαίτερα σαφές στο προηγούμενο κεφάλαιο, βραχυπρόθεσμα και μεσοπρόθεσμα, τα μικρότερα αυτοκίνητα, οι πιο ελαφριές και αεροδυναμικές κατασκευές, και η καλύτερη απόδοση του συστήματος μετάδοσης κίνησης μέσω βελτιωμένων συμβατικών κινητήρων εσωτερικής καύσης/ υβριδισμού μπορούν να βελτιώσουν περαιτέρω την οικονομία καυσίμου των οχημάτων και να συμβάλουν στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών¹³⁵. Οι μακροπρόθεσμες στρατηγικές, από την άλλη, πρέπει να επικεντρωθούν στην

¹³⁴ Η κοινή χρήση αυτοκινήτων αποτελεί, κατά τον 21^ο αιώνα, ίσως η μεγαλύτερη εξάπλωση και αφομοίωση της τεχνολογίας από το κοινωνικό σύνολο. Για λόγο αυτό, έχει εισηχθεί η *κοινή χρήση* αυτοκινήτων, για μια ενδιαφέρουσα μελέτη σχετική με την ευρεία χρήση του αυτοκινήτου βλ. Ferrero, et al., “Car-sharing services”, σσ.501-518.

¹³⁵ Καθώς δόθηκε ξανά η ευκαιρία, αξίζει να αναφερθεί ένα ακόμη θεωρητικό παράδειγμα για το τι θα μπορούσε να επιτευχθεί με τη βελτίωση της οικονομίας καυσίμου των οχημάτων. Η ντιζελοποίηση ολόκληρου του στόλου των ελαφρών επαγγελματικών οχημάτων των ΗΠΑ ή η αντικατάσταση του σημερινού στόλου βενζινοκίνητων οχημάτων

ανάπτυξη εναλλακτικών καυσίμων και συστημάτων κίνησης, δίνοντας την ίδια στιγμή κίνητρα για να παρακινηθούν οι κατασκευαστές αυτοκινήτων να παράγουν οχήματα με χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου, και αποδοτικότερα από πλευράς CO₂, ενθαρρύνοντας τους πολίτες να αγοράζουν αυτοκίνητα με μειωμένη κατανάλωση καυσίμου. Ωστόσο, η κινητικότητα αποτελεί έναν από τους κύριους μοχλούς της οικονομικής ανάπτυξης, και της κοινωνικής εξέλιξης, οπότε η μείωση της ζήτησης ενέργειας και των εκπομπών CO₂ από τις μεταφορές, ιδίως από τις προσωπικές μεταφορές, αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση που, παρά το γεγονός πως έχει ενσωματωθεί στις πολιτικές στρατηγικές των χωρών που αναφέρθηκαν, μέλλει να δοθούν τα αποτελέσματα/συμπεράσματα.

7.4. Η σχέση υδρογόνου και ηλεκτρικής ενέργειας

Εάν η παραγωγή υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα πρόκειται να ενσωματωθεί στο ενεργειακό σύστημα, πρέπει να εφαρμοστεί μια πιο ολιστική θεώρηση των αλληλεπιδράσεων της με τον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα με τη δυνατότητα παραγωγής υδρογόνου από ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλεκτρολυτών, υπάρχουν και άλλες άμεσες συνδέσεις μεταξύ του υδρογόνου και του τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτοί αφορούν, για παράδειγμα, τον συνακόλουθο ανταγωνισμό για τις ΑΠΕ, καθώς μακροπρόθεσμα μόνο η παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορεί να μειώσει την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και να ενισχύσει την ασφάλεια του εφοδιασμού. Το υδρογόνο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως μέσο αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με διαλείψεις, όπως η αιολική ενέργεια. Τέλος, η συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και υδρογόνου σε μονάδες IGCC [με CCS] αποτελεί δυνητικά μια πολλά υποσχόμενη επιλογή για το μέλλον.

Οι χρήσεις των ΑΠΕ θα αντιμετωπίσουν αυξανόμενο ανταγωνισμό όσον αφορά τη διαθεσιμότητα πρώτων υλών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και καυσίμων, και στην περίπτωση της βιομάζας και για την παραγωγή τροφίμων. Σήμερα, δεδομένου ότι τα αποθέματα ΑΠΕ εξακολουθούν, αν και όχι όσο μερικές δεκαετίες πριν να είναι περιορισμένα στις περισσότερες χώρες, το ερώτημα που τίθεται είναι πού μπορούν να χρησιμοποιηθούν καλύτερα, ώστε να επιτευχθεί η μεγαλύτερη μείωση του CO₂ για το ενεργειακό σύστημα στο σύνολό του; Στον τομέα της ενέργειας ή στον τομέα των μεταφορών;

των ΗΠΑ με πιο αποδοτικά βενζινοκίνητα οχήματα τύπου ΕΕ θα είχε ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση καυσίμου 2-3 εκατομμυρίων βαρελιών πετρελαίου ημερησίως [Del Rosal, “*European dieselization*”, σσ.181-194].

Οι νέες ΑΠΕ θα μειώσουν τις εκπομπές CO₂ σε μεγαλύτερο βαθμό εάν χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που αντικαθιστά την ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου, παρά εάν χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή καυσίμων για οχήματα όπως το υδρογόνο [ή άλλα ανανεώσιμα καύσιμα] και συνεπώς για την υποκατάσταση των συμβατικών καυσίμων. Η μείωση αυτή θα είναι ακόμη μεγαλύτερη εάν υπάρχει υψηλό μερίδιο ορυκτών καυσίμων στο μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας.

Επιπλέον, εάν παράγεται από ΑΠΕ, το υδρογόνο συμπληρώνει την ασφάλεια εφοδιασμού και μειώνει τις εκπομπές CO₂ μόνο στο βαθμό που η ΑΠΕ είναι πρόσθετη σε αυτή που θα χρησιμοποιούνταν διαφορετικά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η εικόνα αυτή μπορεί να αλλάξει εάν η ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ με διακυμάνσεις, όπως η αιολική ή η ηλιακή ενέργεια, πρέπει να αποθηκευτεί. Ως εκ τούτου, από τη συνολική προοπτική της μείωσης του CO₂, οι ΑΠΕ θα πρέπει να εισέλθουν στον τομέα των μεταφορών μόνο αφού έχουν επιτύχει σημαντική διείσδυση στον τομέα της ενέργειας.

Όσον αφορά τον ανταγωνισμό μεταξύ υδρογόνου και ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ στον τομέα των μεταφορών, είναι σαφές ότι η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ σε ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρίες είναι μακράν η πιο αποτελεσματική εφαρμογή και αποδίδει πολύ μεγαλύτερη μείωση του CO₂ από ό,τι τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, λόγω του υψηλού ρυθμού εκφόρτισης των μπαταριών. Τα οχήματα με μπαταρίες εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν σημαντικά τεχνικά εμπόδια, αλλά ακόμη και αν η τεχνολογία των μπαταριών ή/και των κυψελών καυσίμου δεν μπορεί να αναπτυχθεί επαρκώς, τα υβριδικά οχήματα plug-in που μειώνουν σημαντικά τη ζήτηση υγρών καυσίμων και τις εκπομπές CO₂ από τις μεταφορές θα επιτύχουν ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό σύστημα¹³⁶.

Αναμένεται ταχεία ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, αλλά και των φωτοβολταϊκών και ηλιοθερμικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Παρά ορισμένα σαφή πλεονεκτήματα [ΑΠΕ και απαλλαγή από CO₂] η ασυνέχεια της αιολικής και ηλιακής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί πρόκληση όσον αφορά την εξισορρόπηση του φορτίου όταν αυξάνεται η δυναμικότητα. Το υδρογόνο θα μπορούσε να αποτελέσει μια λύση στο πρόβλημα αυτό, καθώς προσφέρει τη δυνατότητα αποθήκευσης και μεταφοράς της ενέργειας. Ειδικά για τις κινητές εφαρμογές, όπου η

¹³⁶ Για μια ολική ματιά, βλ. Ang, et al., “A comprehensive study of renewable energy sources”, σσ.109-139.

ενέργεια πρέπει ούτως ή άλλως να αποθηκευτεί, αυτό θα μπορούσε να είναι μια πιο υποσχόμενη επιλογή από την αποθήκευση και την επανατροφοδότηση για τις σταθερές εφαρμογές.

Η παραγωγή υδρογόνου θα μπορούσε επίσης να είναι μια ελκυστική επιλογή για απομακρυσμένες περιοχές, όπως τα πυκνοκατοικημένα νησιά χωρίς πρόσβαση στο κύριο δίκτυο και για την εκμετάλλευση μεγάλων ΑΠΕ, οι οποίες βρίσκονται μακριά από τα κέντρα των χρηστών [οι λεγόμενοι αδρανείς πόροι]. Η χρήση υδρογόνου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα σε μεγάλες κεντρικές μονάδες θα συμβάλει στην επίτευξη σημαντικών μειώσεων των εκπομπών CO₂, εάν συνδυαστεί με δέσμευση και αποθήκευση CO₂. Τέτοιες μονάδες θα συμβάλουν επίσης στην αύξηση της διαφοροποίησης των πόρων, δεδομένου ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ποικιλία ορυκτών πρώτων υλών, συμπεριλαμβανομένων πόρων όπως ο άνθρακας και τα απόβλητα που διαφορετικά προκαλούν σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, καθώς και η βιομάζα. Επιπλέον, είναι δυνατή η συμπαραγωγή υδρογόνου και ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτές τις μονάδες, η οποία μπορεί να συμβάλει στην εξισορρόπηση του φορτίου.

Για παράδειγμα, οι μονάδες IGCC μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή περισσότερης ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις περιόδους αιχμής και για την παραγωγή περισσότερου υδρογόνου κατά τις περιόδους εκτός αιχμής. Αυτό καταδεικνύει το σημαντικό πλεονέκτημα των μονάδων IGCC, καθώς μπορούν να παρέχουν σε δύο αγορές, την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και την αγορά μεταφορών, ανάλογα με τα σήματα τιμών. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι υψηλές θερμοκρασίες των καυσαερίων που παράγονται από τις υψηλής θερμοκρασίας [σταθερές] κυψέλες καυσίμου λιωμένου ανθρακικού άλατος [Molten carbonate fuel cell, MCFC] και τις κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου [Solid oxide fuel cell, SOFC] είναι ιδανικές για μονάδες συμπαραγωγής και συνδυασμένου κύκλου, επιτυγχάνοντας συνολική απόδοση του συστήματος έως και 90%, ή για την παροχή θερμότητας για θέρμανση χώρων και ζεστό νερό. Δεδομένου όμως ότι μπορούν να τροφοδοτηθούν απευθείας με υδρογονάνθρακες λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας τους, το φυσικό αέριο ή το βιοαέριο θα ήταν εδώ το καύσιμο επιλογής αντί του υδρογόνου.

Καθ' όλη τη διάρκεια της εν χείρας εργασίας τονίζεται συνεχώς η σημασία, και η βαρύτητα, της μεταφοράς ως τέτοιας. Η διεθνής ανταγωνιστικότητα του τομέα των μεταφορών έχει μεγάλη πολιτική σημασία για ορισμένες περιοχές, ενώ όσον αφορά το υδρογόνο, η διάρθρωση των αναγκών επενδύσεων στο υδρογόνο ως ενεργειακό φορέα κυριαρχείται σαφώς από τις δαπάνες

για τα υδρογονοκίνητα οχήματα. Εάν ένα όχημα υδρογόνου εισάγεται, είναι πολύ πιθανό να αφορά ολόκληρο το όχημα και όχι μόνο το σύστημα κίνησης υδρογόνου. Επομένως, η δομή της εγχώριας βιομηχανίας οχημάτων είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες για την ανάπτυξη της απασχόλησης και του ΑΕΠ [Ακαθάριστου Εγχώριου Προϊόντος].

Η μακροοικονομική ανάλυση για την Ευρώπη αποκάλυψε ότι η εισαγωγή του υδρογόνου έχει θετικά αποτελέσματα για τη μακροπρόθεσμη απασχόληση, υπό την προϋπόθεση ότι η ανταγωνιστικότητα των τεχνολογιών που δεν χρησιμοποιούν υδρογόνο και οι οποίες θα υποκατασταθούν από τεχνολογίες υδρογόνου θα είναι παρόμοια με τη σημερινή. Η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών απαιτεί υψηλότερο επίπεδο προσόντων, χρειάζεται περισσότερους εργαζόμενους λόγω χαμηλότερου επιπέδου αυτοματοποίησης και αποτελεί εμπόδιο για την εξωστρέφεια της παραγωγής. Ο συνολικός αντίκτυπος στην οικονομική ανάπτυξη [ως προς το ΑΕΠ δηλαδή] από την εισαγωγή του υδρογόνου στο ενεργειακό σύστημα είναι μικρός. Εκτός από το γεγονός ότι οι καθαρές μεταβολές στα πρότυπα δαπανών είναι μικρές, το γεγονός ότι το υδρογόνο εισάγεται μόνο σε μέρος του ενεργειακού συστήματος συμβάλλει επίσης στην εξήγηση των σχετικά μικρών επιπτώσεων στο ΑΕΠ. Συνολικά, ωστόσο, η οικονομική ανάπτυξη αποδεικνύεται θετική, μεταξύ άλλων λόγω της αύξησης των επενδύσεων¹³⁷.

Αυτή η αύξηση των επενδύσεων οφείλεται σε διάφορους λόγους. Πρώτον, στις πρόσθετες επενδύσεις σε υποδομές παραγωγής και ανεφοδιασμού υδρογόνου, καθώς και στις πρόσθετες ανανεώσιμες ικανότητες που απαιτούνται για την παραγωγή ανανεώσιμου υδρογόνου [και τα δύο χρηματοδοτούνται από τα έσοδα από την πώληση υδρογόνου ως καυσίμου], και δεύτερον, στις ευρύτερες οικονομικές επιπτώσεις μετά από αυτές τις πρόσθετες επενδύσεις, δηλαδή στην αύξηση της απασχόλησης και του εισοδήματος με αποτέλεσμα την αύξηση του ΑΕΠ, η οποία οδηγεί σε αυξημένη ζήτηση και συνεπώς σε περισσότερες επενδύσεις στον δεύτερο γύρο¹³⁸.

Πρέπει να επισημανθεί ότι η οικονομική ανάλυση βασίζεται στην υπόθεση ότι, μετά από μια αρχική περίοδο στήριξης, οι τεχνολογίες υδρογόνου παρουσιάζουν πλεονεκτήματα κόστους σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες. Επιπλέον, όλα τα παραπάνω συμπεράσματα βασίζονται στην υπόθεση ότι δεν υπάρχουν μετατοπίσεις στις εξαγωγές/εισαγωγές [παραδείγματος χάρη, ίδιο

¹³⁷ βλ. Cader, Koneczna, & Olczak, “*The impact of economic, energy, and environmental factors on the development of the hydrogen economy*”, σσ.11-48.

¹³⁸ Ο.π.

μερίδιο αγοράς των οχημάτων κυψελών καυσίμου για τις ευρωπαϊκές αυτοκινητοβιομηχανίες με το σημερινό για τα συμβατικά οχήματα].

Ωστόσο, οι μεσοπρόθεσμες επιπτώσεις στην απασχόληση στους τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας θα μπορούσαν να είναι δραστικές, εάν η υπόθεση της παρόμοιας ανταγωνιστικότητας απορριφθεί για τις τεχνολογίες υδρογόνου. Ως εκ τούτου, μπορεί να εντοπιστεί το ακόλουθο *δίλημμα* για τις μεγάλες χώρες κατασκευής αυτοκινήτων. Αφενός, οι απώλειες θέσεων εργασίας θα μπορούσαν να είναι δραστικές εάν οι χώρες αυτές χάσουν μερίδια αγοράς λόγω καθυστερημένης εισόδου στην αγορά. Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν αβεβαιότητες σχετικά με την επιτυχία των αυτοκινήτων υδρογόνου στην αγορά και ο δυνητικός κίνδυνος απώλειας πολλών δισεκατομμυρίων δολαρίων λόγω επενδύσεων σε πρόωρες υποδομές υδρογόνου και στην ανάπτυξη αυτοκινήτων υδρογόνου. Σε σύγκριση με αυτές τις χώρες, οι οικονομικοί κίνδυνοι της οικονομίας του υδρογόνου είναι πολύ μικρότεροι για τις χώρες χωρίς μεγάλη εγχώρια αυτοκινητοβιομηχανία και υπόσχονται σημαντική αύξηση της απασχόλησης εδώ, εάν ακολουθηθεί η σωστή στρατηγική. Παρόμοια συμπεράσματα, αλλά με μικρότερες συνολικές επιπτώσεις μπορούν να εξαχθούν για τους κλάδους εγκαταστάσεων και εξοπλισμού. Η αντικατάσταση των συμβατικών οχημάτων από οχήματα με κυψέλες καυσίμου προκαλεί μια κλαδική μετατόπιση της απασχόλησης από την παραδοσιακή αυτοκινητοβιομηχανία προς τους κλάδους των μεταλλικών κατασκευών, των ηλεκτρικών, των μηχανημάτων και του ελαστικού/πλαστικού, μεταξύ άλλων. Λόγω της απαιτούμενης σταδιακής δημιουργίας μεταποιητικής ικανότητας και εξειδικευμένου εργατικού δυναμικού, η προετοιμασία για την αναμενόμενη μαζική παραγωγή καθιστά απαραίτητη την έγκαιρη πολιτική δράση.

7.5. Συμπεράσματα, μελλοντικές προοπτικές, και δυνατότητες

Ο βαθμός στον οποίο το υδρογόνο θεωρείται ότι θα διαδραματίσει ρόλο στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα στο μέλλον ποικίλλει ευρέως μεταξύ των διαφόρων παγκόσμιων ενεργειακών σεναρίων. Το υδρογόνο δεν περιλαμβάνεται ως σημαντικός ενεργειακός φορέας στα επίσημα σενάρια αναφοράς. Η διείσδυση του υδρογόνου υποτίθεται μόνο σε σενάρια με αυστηρή κλιματική πολιτική, υψηλές τιμές πετρελαίου και φυσικού αερίου και, επιπλέον, τεχνολογική επανάσταση στις κυψέλες καυσίμου και στην αποθήκευση υδρογόνου. Σύμφωνα με τις πιο ευνοϊκές παραδοχές όσων αναλύθηκαν, τα οχήματα υδρογόνου προβλέπεται να φτάσουν σε μερίδια 30-70% του παγκόσμιου αποθέματος [ελαφρών επαγγελματικών] οχημάτων έως το 2050, με τη μεγάλη

πλειοψηφία να κατανέμεται σε σχεδόν ίσα μέρη μεταξύ Ευρώπης, Βόρειας Αμερικής και Κίνας. Η προκύπτουσα μείωση της κατανάλωσης πετρελαίου, με την ταυτόχρονη υλοποίηση μιας πλήρους υποδομής εφοδιασμού υδρογόνου [δηλαδή μονάδες παραγωγής, αγωγοί μεταφοράς, σταθμοί ανεφοδιασμού κ.λπ.], οι [σωρευτικές] επενδύσεις που απαιτούνται για τη δημιουργία της απαραίτητης δυναμικότητας εφοδιασμού έως το 2050 θα ανέλθουν σε ιδιαίτερα υψηλό επίπεδο. Αν και μια ακριβής εκτίμηση, κατά πάσα πιθανότητα, θα ήταν άστοχη, οι εκτιμήσεις ενέχουν σημαντικές αβεβαιότητες και θα πρέπει να ερμηνεύονται μόνο ως ενδεικτικές τάξεις μεγέθους, θα πρέπει να εξετάζονται στο πλαίσιο των συνολικών παγκόσμιων επενδύσεων που απαιτούνται στον ενεργειακό τομέα.

Οι σωρευτικές επενδύσεις που απαιτούνται μόνο στους τομείς του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, καθιστούν σαφές πως η μετάβαση στο υδρογόνο στον τομέα των μεταφορών θα αντιστοιχούσε σε ένα πολύ μικρό ποσοστό αύξησης της προβλεπόμενης αύξησης του ΑΕΠ μέχρι το 2050. Αν και οι επενδύσεις για την εισαγωγή του υδρογόνου θα προστεθούν σημαντικά στις ήδη απαιτούμενες για το ενεργειακό σύστημα, δεν θα πρέπει να θεωρηθούν ανυπέρβλητο εμπόδιο για την εφαρμογή ενός συστήματος καυσίμου υδρογόνου. Επιπλέον, στο βαθμό που το υδρογόνο θα υποκαταστήσει τα καύσιμα μεταφορών με βάση το πετρέλαιο, οι επενδύσεις που προβλέπονται στον πετρελαϊκό τομέα θα μειωθούν¹³⁹.

Το παγκόσμιο μείγμα υδρογόνου το 2050 είναι δύσκολο να προβλεφθεί. Στο σενάριο όπου η σωρευτική ζήτηση υδρογόνου μέχρι το 2050 καλύπτεται μόνο από μία πρωτογενή πηγή ενέργειας [το οποίο αντικατοπτρίζει τις μέγιστες επιπτώσεις στους πόρους] μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι οι επιπτώσεις στην εξάντληση των ορυκτών πόρων θα είναι οριακές [έως 4% των σημερινών αποθεμάτων φυσικού αερίου και έως 2% των αποθεμάτων λιθάνθρακα]. Αντίθετα, θα απαιτηθεί σημαντική επέκταση των ΑΠΕ που προορίζονται για την παραγωγή υδρογόνου, ίσως και έως και σαράντα φορές μεγαλύτερη από την τρέχουσα παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύ και έως και έξι φορές μεγαλύτερη από την τρέχουσα παγκόσμια χρήση βιομάζας. Δεν είναι δυνατόν να συναχθεί κάποια προτίμηση για το υδρογόνο [από ορυκτά καύσιμα] έναντι των πετρελαϊκών άμμων και του σχιστόλιθου από άποψη πόρων, διότι η πρωτογενής ενέργεια που δαπανάται για την παραγωγή τους [αν και σημαντικά υψηλότερη από ό,τι για την ανάκτηση

¹³⁹ Cader, Koneczna, & Olczak, “*The impact of economic, energy, and environmental factors on the development of the hydrogen economy*”, σσ.11-48.

συμβατικού πετρελαίου] αποδίδει μεγαλύτερη *κινητικότητα* από ό,τι όταν χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου¹⁴⁰.

Επίσης, για να αποκτήσουμε μια ιδέα της δυνητικής μείωσης των εκπομπών CO₂ που μπορεί να επιτευχθεί στον τομέα των μεταφορών από την εισαγωγή οχημάτων υδρογόνου, οι εκπομπές CO₂ από την προμήθεια υδρογόνου πρέπει να συγκριθούν σε βάση από το πηγάδι στον τροχό [Well to Wheel, εφεξής WTW, δηλαδή λαμβάνοντας υπόψη ολόκληρη την αλυσίδα προμήθειας] με τα συμβατικά καύσιμα βενζίνης/ντίζελ.

Χρειάστηκε περισσότερος από ένας αιώνας για να εξελιχθεί το υπάρχον σύστημα μεταφορών, το οποίο σήμερα εξακολουθεί να βασίζεται σχεδόν εξ ολοκλήρου σε μία πηγή ενέργειας, το αργό πετρέλαιο. Πρόσφατα, η αυξανόμενη ανησυχία για την ενεργειακή ασφάλεια με φόντο την αυξανόμενη εξάρτηση από τις εισαγωγές διαμόρφωσε τη συζήτηση σχετικά με τη μελλοντική παροχή ενέργειας και ειδικότερα την παροχή καυσίμων. Ο βαθμός στον οποίο η μείωση της παραγωγής [συμβατικού] πετρελαίου θα αποτελέσει πρόβλημα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το κατά πόσο είναι δυνατόν να υποκατασταθεί το πετρέλαιο από άλλους ενεργειακούς φορείς σε εύθετο χρόνο. Από την άποψη αυτή, η βιομηχανία και οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής καλούνται όλο και περισσότερο να αναπτύξουν εναλλακτικές λύσεις για το πετρέλαιο. Η διαχείριση των ελλείψεων στην προσφορά πετρελαίου και η πραγματοποίηση της αναγκαίας μετάβασης σε

¹⁴⁰ Γενικά, σχεδόν το 90% των συνολικών εκπομπών CO₂ της αλυσίδας εφοδιασμού υδρογόνου προέρχεται από την παραγωγή υδρογόνου. Υποθέτοντας ότι οι μέσες εκπομπές WTW για τα συμβατικά επιβατικά αυτοκίνητα είναι 160 g CO₂/km, τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου επιτυγχάνουν - χωρίς CCS - μείωση των εκπομπών CO₂ κατά περίπου 35% για το υδρογόνο από φυσικό αέριο, 90% για τη βιομάζα και σχεδόν 100% για την αιολική ενέργεια. Σύμφωνα με αυτό το σενάριο, το υδρογόνο από άνθρακα οδηγεί σε αύξηση των εκπομπών CO₂ κατά 25% [η οποία θα ξεπερνούσε ακόμη και τις εκπομπές WTW από καύσιμα που προέρχονται από άμμο πετρελαίου]. Εάν εφαρμοστεί CCS, οι εκπομπές CO₂ για το ορυκτό υδρογόνο μπορούν να μειωθούν έως και 80%. Για τα αυτοκίνητα εσωτερικής καύσης υδρογόνου, οι εκπομπές WTW είναι σε κάθε περίπτωση 60-80% υψηλότερες λόγω της χαμηλότερης απόδοσης του κινητήρα εσωτερικής καύσης σε σύγκριση με την κυψέλη καυσίμου, η εφαρμογή τους θα πρέπει επομένως να περιοριστεί σε μεγάλο βαθμό στη μεταβατική φάση. Ενώ το υδρογόνο δεν εκπέμπει εκπομπές κατά την τελική χρήση, είναι προφανές ότι αν το υδρογόνο παράγεται από άνθρακα χωρίς CCS, δεν είναι δυνατή η συνολική μείωση του CO₂ στο ενεργειακό σύστημα. Δεδομένου ότι ο άνθρακας θα καταστεί η πιο οικονομική πρώτη ύλη μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα, καθώς οι τιμές του φυσικού αερίου αυξάνονται, η CCS καθίσταται αναπόφευκτη προϋπόθεση για την παροχή υδρογόνου. Τόσο η παραγωγή υδρογόνου από άνθρακα όσο και η παραγωγή πετρελαίου από μη συμβατικούς πόρους [πετρελαϊκή άμμος, σχιστόλιθος, CTL, GTL] οδηγούν σε υψηλές εκπομπές CO₂ και αυξάνουν σημαντικά το αποτύπωμα άνθρακα του εφοδιασμού καυσίμων, εκτός εάν το CO₂ δεσμεύεται και αποθηκεύεται. Ενώ η δέσμευση του CO₂ σε μια κεντρική πηγή είναι εξίσου δυνατή για τα μη συμβατικά κοιτάσματα και την κεντρική παραγωγή υδρογόνου, στην περίπτωση του υδρογόνου προκύπτει ένα καύσιμο με μειωμένο CO₂, σε αντίθεση με τα υγρά καύσιμα υδρογονανθράκων. Αυτό είναι ακόμη πιο σημαντικό, καθώς περίπου το 80% των εκπομπών CO₂ του WTW προκύπτει από τη χρήση καυσίμου στα οχήματα. Εάν εφαρμοζόταν CCS στην παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα, θα ήταν εφικτή ακόμη και η καθαρή δέσμευση CO₂ [Ο.π.].

εναλλακτικά καύσιμα θα είναι δυνατή μόνο με τον έγκαιρο καθορισμό της κατεύθυνσης, καθώς οποιαδήποτε αλλαγή στο ενεργειακό σύστημα θα διαρκέσει πολύ.

Όπως φάνηκε, το υδρογόνο προσφέρει τη δυνατότητα να ανταποκριθεί ταυτόχρονα σε όλους τους σημαντικούς στόχους της ενεργειακής πολιτικής στον τομέα των μεταφορών, δηλαδή στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, στην ενεργειακή ασφάλεια και στη μείωση της τοπικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης και του θορύβου. Το υδρογόνο θα μπορούσε να αποτελέσει το συνδετικό κρίκο μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και του τομέα των μεταφορών, μετατρέποντας τη βιομάζα, την αιολική και την ηλιακή ενέργεια σε καύσιμο για τις μεταφορές και μειώνοντας την εξάρτηση από το πετρέλαιο καθώς και τις εκπομπές CO₂.

Επιπλέον, το υδρογόνο θα μπορούσε να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο ως μέσο αποθήκευσης της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας από διαλείπουσες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ωστόσο, για το υδρογόνο από ορυκτά καύσιμα, ιδίως άνθρακα, η CCS αποτελεί κρίσιμη προϋπόθεση για να επιτευχθεί συνολική μείωση του CO₂ σε ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού. Επιπλέον, εάν η CCS αναπτυχθεί σε μεγάλη κλίμακα, τα ορυκτά καύσιμα θα μπορούσαν να απαλλαγούν από τον άνθρακα μέσω της παραγωγής υδρογόνου, το οποίο στη συνέχεια θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως καθαρό καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα ενεργειακά συστήματα και οι τεχνολογίες εξελίσσονται αργά, η μηχανή εσωτερικής καύσης χρειάστηκε περισσότερο από έναν αιώνα για να αναπτυχθεί και να βελτιωθεί. Το υδρογόνο και οι κυψέλες καυσίμου δεν θα διαφέρουν και θα χρειαστούν αρκετές δεκαετίες για τη δημιουργία υποδομών υδρογόνου και για τη σημαντική συμβολή του υδρογόνου στο μείγμα καυσίμων. Απειλές όπως η εξάντληση των ενεργειακών πόρων ή η κλιματική αλλαγή, ή μάλλον κλιματική καταστροφή, ενδέχεται να οδηγήσουν σε ταχύτερη διείδυση των οχημάτων υδρογόνου στην αγορά από ό,τι αναμενόταν γενικά. Το υδρογόνο δεν πρέπει να αξιολογείται μεμονωμένα, αλλά να συγκρίνεται με τους κύριους ανταγωνιστές του, καθώς η αξιολόγηση των δυνατοτήτων του χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι ανταγωνιστικές επιλογές θα οδηγούσε σε παραπλανητικά συμπεράσματα. Η εισαγωγή του υδρογόνου θα πρέπει επίσης να αναλύεται στο πλαίσιο της ανάπτυξης του ενεργειακού συστήματος στο σύνολό του. Στον τομέα των μεταφορών, σε μακροπρόθεσμη προοπτική, παράλληλα με το υδρογόνο, μόνο η ηλεκτρική ενέργεια φαίνεται να έχει τη δυνατότητα να καλύψει όλες τις παραπάνω ενεργειακές απαιτήσεις των μεταφορών.

Η ευρεία εισαγωγή του υδρογόνου ως καυσίμου οχημάτων αντιμετωπίζει τρεις μεγάλες τεχνικές προκλήσεις: ανάπτυξη ανταγωνιστικών ως προς το κόστος και αποδοτικών κυψελών καυσίμου για οχήματα, σχεδιασμός ασφαλών δεξαμενών για την αποθήκευση υδρογόνου στο όχημα με αποδεκτή εμβέλεια οδήγησης και ανάπτυξη υποδομής για την παραγωγή, τη διανομή και τον ανεφοδιασμό με υδρογόνο. Τόσο η πλευρά της προσφοράς [οι τεχνολογίες και οι πόροι που παράγουν υδρογόνο] όσο και η πλευρά της ζήτησης [οι τεχνολογίες μετατροπής υδρογόνου] πρέπει ταυτόχρονα να υποστούν θεμελιώδη μετασχηματισμό, καθώς η μία δεν θα λειτουργήσει χωρίς την άλλη.

Ωστόσο, η μετάβαση των μεταφορών στο υδρογόνο δεν είναι μόνο τεχνικό ζήτημα. Θα προκαλέσει επίσης διαρθρωτικές οικονομικές αλλαγές μέσω της δημιουργίας κατασκευαστικών δυνατοτήτων και της ανάπτυξης μιας βιομηχανίας μεγάλης κλίμακας που θα παράγει και θα διανέμει υδρογόνο. Επιπλέον, θα υπάρξουν αλλαγές στις εμπορικές ροές λόγω της μείωσης του εμπορίου ορυκτών καυσίμων και της αύξησης του εμπορίου πρώτων υλών για την παραγωγή υδρογόνου, καθώς και αλλαγές στις ευκαιρίες απασχόλησης.

Οι τεχνολογικές ανακαλύψεις που μειώνουν σημαντικά το κόστος ολόκληρης της αλυσίδας εφοδιασμού είναι απαραίτητες για την επιτυχή απογείωση της αγοράς υδρογόνου. Ωστόσο, αποδείχθηκε πως η εισαγωγή του υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών φαίνεται εφικτή από οικονομική άποψη, για παράδειγμα, το σωρευτικό κεφάλαιο που απαιτείται για την ανάπτυξη υποδομών υδρογόνου δεν πρέπει να θεωρείται αποτρεπτικό σε σχέση με τις εκτιμώμενες επενδύσεις που απαιτούνται τις επόμενες δεκαετίες στον τομέα της ενέργειας γενικά και στον τομέα του πετρελαίου ειδικότερα για να διατηρηθούν τα επίπεδα παραγωγής. Το κόστος παραγωγής υδρογόνου και υποδομών δεν αποτελεί οικονομικό εμπόδιο στις σημερινές τιμές των συμβατικών ενεργειακών φορέων. Το κρίσιμο στοιχείο είναι η εξέλιξη του κόστους του συστήματος κίνησης με κυψέλες καυσίμου, οι προβλέψεις του οποίου αποτελούν εδώ σημαντική πηγή αβεβαιότητας.

Το υδρογόνο και οι κυψέλες καυσίμου είναι απίθανο να εμφανιστούν στις μελλοντικές ενεργειακές αγορές χωρίς αποφασιστική και ευνοϊκή *πολιτική υποστήριξη και κίνητρα*. Τα μέτρα πρέπει να θεσπιστούν και να διατηρηθούν για αρκετό χρονικό διάστημα ώστε να δημιουργηθεί η ευαισθητοποίηση του κοινού και να ενθαρρυνθεί η αποδοχή του υδρογόνου από τους καταναλωτές και να εξασφαλιστεί η ασφάλεια των επενδύσεων για τους επιχειρηματίες, δεδομένου ότι

απαιτούνται σημαντικές βιομηχανικές επενδύσεις για την κατασκευή οχημάτων και τη δημιουργία υποδομών πολύ νωρίτερα από τις δυνάμεις της αγοράς.

Επιπλέον, απαιτούνται κανονισμοί, κώδικες και πρότυπα για την παραγωγή, τη διανομή, την αποθήκευση και τη χρήση του υδρογόνου [ιδίως όσον αφορά την ασφάλεια των οχημάτων και των συστημάτων αποθήκευσης επί του οχήματος]. Η διεθνής συνεργασία θα είναι επίσης ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία διασυνοριακών υποδομών υδρογόνου, επειδή τα οχήματα οδηγούνται, εισάγονται και εξάγονται πέρα από τα σύνορα των χωρών. Τέλος, αλλά όχι λιγότερο σημαντικό, το κοινό θα πρέπει να εκπαιδευτεί και να ενημερωθεί για τη χρήση των τεχνολογιών υδρογόνου, για παράδειγμα για τον ανεφοδιασμό των αυτοκινήτων υδρογόνου.

Το υδρογόνο θα αντικαταστήσει πιθανότατα κυρίως τα καύσιμα με βάση το πετρέλαιο στον τομέα των μεταφορών, ενώ άλλοι φορείς ενέργειας, όπως η ηλεκτρική ενέργεια, θα συνεχίσουν να παίζουν ρόλο. Συνεπώς, η χρήση του όρου *οικονομία υδρογόνου*, όπως την συναντήσαμε στον Bockris¹⁴¹, μπορεί να είναι παραπλανητική. Μέσω των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και του CCS, το υδρογόνο έχει τη δυνατότητα να λύσει ορισμένα από τα ενεργειακά μας προβλήματα, αλλά η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης διαδραματίζει επίσης ζωτικό ρόλο στην αντιμετώπιση της κλιματικής καταστροφής, καθώς και στη συμβολή του στην ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού. Η συζήτηση σχετικά με το νόημα και το μη νόημα του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα υπήρξε αμφιλεγόμενη στο παρελθόν και αυτό είναι πιθανό να συνεχιστεί στο ορατό μέλλον, όπως θα συμβεί με οποιοδήποτε από τα εναλλακτικά καύσιμα. Μεγάλο μέρος αυτής της αμφιλεγόμενης διαμάχης μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι οι παράμετροι και οι παραδοχές για την αξιολόγηση δεν καθορίζονται συχνά με σαφήνεια. Η αξιολόγηση του υδρογόνου παγκοσμίως είναι θετική εάν η τιμή του πετρελαίου παραμένει μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα υψηλή, όπως και οι τιμές των άλλων συμβατικών ενεργειακών, οι ΑΠΕ και η CCS αναπτύσσονται σε μεγάλη κλίμακα, ο τομέας των μεταφορών πρέπει να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, δεν υπάρχει σημαντική τεχνολογική επανάσταση στις μπαταρίες των οχημάτων, τις δυνατότητες και το κόστος των τεχνολογιών και των μέτρων για την εισαγωγή υδρογόνου, αναγνωρίζοντας ότι αυτό υπόκειται σε σημαντικές αβεβαιότητες. Σε αυτές περιλαμβάνονται οι δυσκολίες εκτίμησης του κόστους των τεχνολογιών για αρκετές δεκαετίες στο μέλλον, καθώς και του τρόπου με τον οποίο θα εξελιχθούν οι τιμές των ορυκτών καυσίμων στο

¹⁴¹ Θυμίζω, Bockris, *A Hydrogen Economy*, σσ.1323-1323.

μέλλον. Είναι επίσης δύσκολο να προβλεφθεί ποια θα είναι η αποδοχή του υδρογόνου από το κοινό.

Τέλος το υδρογόνο δεν θα πρέπει να θεωρηθεί ως η συνολική λύση στα ενεργειακά προβλήματα του κόσμου και ειδικότερα δεν θα πρέπει να θεωρηθεί ως η μία και μοναδική απάντηση στις προκλήσεις που αντιμετωπίζει ο τομέας των μεταφορών. Είναι επίσης εξαιρετικά απίθανο να υπάρχει κάποια μεμονωμένη τεχνολογία/καύσιμο που να έχει τη δυνατότητα να αποτελέσει αυτή τη *χρυσή σφαίρα*, ικανή να ανταποκριθεί στην ενεργειακή πρόκληση και σε όλα τα άλλα κριτήρια για τη βελτίωση της ενεργειακής ασφάλειας και τον μετριασμό των επιπτώσεων της κλιματικής καταστροφής και άλλων επιβλαβών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, διότι όλες οι επιλογές υπόκεινται σε κάποιου είδους περιορισμούς. Ο τομέας των μεταφορών πιθανόν να δει ένα πολύ διαφοροποιημένο χαρτοφυλάκιο καυσίμων στο μέλλον, με το μερίδιο της ηλεκτροκίνησης με την ευρύτερη έννοια, δηλαδή των ηλεκτροκίνητων οχημάτων που κινούνται με κυψέλες καυσίμου, μπαταρίες ή υβριδικό σύστημα κίνησης, να αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά¹⁴².

¹⁴² Σήμερα, υπάρχει ένας αυξανόμενος αριθμός συμπράξεων δημόσιου και ιδιωτικού τομέα με στόχο την επιτάχυνση της εμπορικής αξιοποίησης των τεχνολογιών υδρογόνου και κυψελών καυσίμου, καθώς και έργων επίδειξης υδρογόνου σε όλο τον κόσμο. Θα ανοίξουν έτσι το δρόμο για την εμπορική εισαγωγή των οχημάτων υδρογόνου; Θα παραμείνει το υδρογόνο το καύσιμο του μέλλοντος;

Επίλογος

Η μετάβαση προς ένα ενεργειακό σύστημα βασισμένο στο υδρογόνο συνοδεύεται από σημαντικές τεχνολογικές, οικονομικές και θεσμικές προκλήσεις. Απαιτούνται εκτεταμένες επενδύσεις σε υποδομές, ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και διαμόρφωση κατάλληλων πολιτικών πλαισίων, γεγονός που καθιστά τη διαδικασία πολύπλοκη και χρονοβόρα. Ωστόσο, τα μακροπρόθεσμα οφέλη μιας επιτυχημένης μετάβασης θα μπορούσαν να είναι καθοριστικά και μετασχηματιστικά, καθώς συνδέονται με τη μείωση των εκπομπών, την ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας και τη δημιουργία νέων οικονομικών ευκαιριών.

Η Ευρώπη, αξιοποιώντας την προηγμένη τεχνολογική της γνώση και το ισχυρό θεσμικό και πολιτικό της πλαίσιο για την κλιματική δράση, έχει τη δυνατότητα να διαδραματίσει ηγετικό ρόλο στη διεθνή ανάπτυξη της οικονομίας του υδρογόνου. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να αποτελέσει παράδειγμα για τη μετάβαση σε ένα βιώσιμο και ασφαλές ενεργειακό σύστημα, επιδεικνύοντας πώς η πράσινη μετάβαση μπορεί να συνδυαστεί με οικονομική ανάπτυξη και ενεργειακή ανεξαρτησία.

Το υδρογόνο θα μπορούσε να διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στην απαλλαγή από τον άνθρακα βιομηχανιών όπως ο χάλυβας, τα χημικά, και οι βαριές μεταφορές, οι οποίες είναι δύσκολο να ηλεκτροδοτηθούν με τις υπάρχουσες τεχνολογίες ΑΠΕ. Εάν η Ευρώπη καταφέρει να ξεπεράσει τα σημερινά εμπόδια για την υιοθέτηση του υδρογόνου, θα μπορούσε να δημιουργήσει ένα καθαρότερο, πιο ανθεκτικό και γεωπολιτικά ανεξάρτητο ενεργειακό σύστημα. Σε μια εποχή όπου η ενεργειακή ασφάλεια είναι όλο και περισσότερο συνυφασμένη με τη βιωσιμότητα και τη γεωπολιτική σταθερότητα, το υδρογόνο αποτελεί ευκαιρία και πρόκληση για το μέλλον της Ευρώπης.

Παρόλο που παραμένουν σημαντικά εμπόδια, οι επενδύσεις, και τα πλαίσια πολιτικής που αναπτύσσονται επί του παρόντος δείχνουν ότι το υδρογόνο έχει τη δυνατότητα να αποτελέσει ακρογωνιαίο λίθο ενός ασφαλούς και βιώσιμου ενεργειακού μέλλοντος. Με την αντιμετώπιση των τεχνολογικών, οικονομικών και υποδομών προκλήσεων, το υδρογόνο μπορεί τελικά να βοηθήσει την Ευρώπη να επιτύχει τους μακροπρόθεσμους στόχους της για την ενεργειακή ασφάλεια και το κλίμα.

Η επιδίωξη της ενεργειακής ασφάλειας και βιωσιμότητας είναι μια από τις πιο πιεστικές προκλήσεις της εποχής μας. Καθώς το παγκόσμιο ενεργειακό τοπίο υπόκειται σε θεμελιώδη μετασχηματισμό, το υδρογόνο αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη αλλά πολύπλοκη λύση για τις ενεργειακές ανάγκες της Ευρώπης. Ενώ οι δυνατότητές του για την απαλλαγή των βιομηχανιών από τον άνθρακα, τη σταθεροποίηση του ενεργειακού εφοδιασμού και τη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα είναι αναμφισβήτητες, παραμένουν σημαντικά εμπόδια. Οι υποδομές, το κόστος παραγωγής, οι τεχνολογικές εξελίξεις και τα πλαίσια πολιτικής πρέπει να ευθυγραμμιστούν για την πλήρη ενσωμάτωση του υδρογόνου στο ευρύτερο ενεργειακό μείγμα.

Η συζήτηση αυτή οδηγεί φυσικά σε περαιτέρω ερευνητικά ερωτήματα: Πώς μπορεί η τεχνολογική καινοτομία να επιταχύνει τη μείωση του κόστους της πράσινης παραγωγής υδρογόνου; Ποιοι μηχανισμοί πολιτικής θα εξασφαλίσουν ισότιμη πρόσβαση σε βιώσιμη ενέργεια σε διάφορες κοινωνικοοικονομικές ομάδες; Πώς μπορεί η διεθνής συνεργασία να διευκολύνει τη δημιουργία μιας παγκόσμιας οικονομίας υδρογόνου; Ποιες απρόβλεπτες προκλήσεις μπορεί να προκύψουν καθώς το υδρογόνο θα γίνεται πιο διαδεδομένο, ιδίως όσον αφορά περιβαλλοντικές και γεωπολιτικές εκτιμήσεις;

Η ανθρωπότητα οφείλει να επικεντρωθεί στην ανάπτυξη ενός διαφοροποιημένου και ανθεκτικού ενεργειακού χαρτοφυλακίου, όπου το υδρογόνο συμπληρώνει τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή και η αιολική. Οι επενδύσεις στην έρευνα και την ανάπτυξη, η ισχυρή πολιτική υποστήριξη και η διεθνής συνεργασία είναι κρίσιμες για την υπέρβαση των τεχνολογικών και οικονομικών εμποδίων στην ευρεία υιοθέτηση του υδρογόνου. Εξίσου σημαντική είναι η ανάγκη εκπαίδευσης των κοινωνιών σε θέματα εξοικονόμησης ενέργειας και βιώσιμων πρακτικών, διασφαλίζοντας ότι η μετάβαση σε καθαρότερη ενέργεια δεν θα επιδεινώσει τις υφιστάμενες ανισότητες.

Έχοντας κατά νου την ανάλυση των δεδομένων που πραγματοποιήθηκε, και των σημερινών τροχιών, θα πρέπει να παραμείνουμε αισιόδοξοι για ένα βιώσιμο μέλλον. Αν και οι προκλήσεις που έχουμε μπροστά μας είναι σημαντικές, δεν είναι ανυπέρβλητες. Οι ταχείες εξελίξεις στην τεχνολογία υδρογόνου, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη πολιτική και οικονομική δέσμευση για τη βιωσιμότητα, υποδηλώνουν ότι ένα καθαρότερο μέλλον είναι εφικτό. Ωστόσο, η αισιοδοξία προϋποθέτει να βασίζεται στη δράση. Οι επιλογές που θα γίνουν σήμερα, είτε στην πολιτική, είτε στις επενδύσεις, είτε στην E&K, θα καθορίσουν αν οι μελλοντικές γενιές θα κληρονομήσουν έναν

κόσμο που θα είναι όχι μόνο ενεργειακά ασφαλής αλλά και περιβαλλοντικά και κοινωνικά βιώσιμος. Εάν η ανθρωπότητα παραμείνει προσηλωμένη στην επιστημονική πρόοδο, την υπεύθυνη διακυβέρνηση, και την παγκόσμια συνεργασία, τότε υπάρχει λόγος να ελπίζουμε σε μια ενεργειακή μετάβαση που, παρότι μπορεί να είναι πολύπλοκη, δηλώνει μια σαφής κατεύθυνση προς την *ενεργειακή ασφάλεια της Ευρώπης*, της οποίας ένα βιώσιμο μέλλον δεν είναι απλώς μια φιλοδοξία, είναι μια *εφικτή αναγκαιότητα*.

Βιβλιογραφία

1. Abdel-Aal H.K., et al., “*A new approach to utilize Hydrogen as a safe fuel*”, σσ.511-514, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.30, 2005.
2. Acar C., & I. Dincer, “*The potential role of hydrogen as a sustainable transportation fuel to combat global warming*”, σσ.3396-3406, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.45, 2020.
3. Airships.net, “*Myths about the Hindenburg Crash*”, online article, accessed at March 15th, 2025, available at <https://www.airships.net/hindenburg/disaster/myths/>.
4. Akhlaghi N., & G. Najafpour-Darzi, “*A comprehensive review on biological hydrogen production*”, σσ.2492-2512, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.45, 2020.
5. Almqvist E., *History of industrial gases*. New York: Plenum Publishers, 2003.
6. Altfeld K., & D. Pinchbeck, “*Admissible hydrogen concentrations in natural gas systems*”, σσ.2092-2158, στο Gas for Energy, τομ.3, 2023.
7. Ang T.Z., et al., “*A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions*”, σσ.109-139, στο Energy strategy reviews, τομ.43, 2022.
8. Aramendia E., & J. Malskær, “*A review of public opinion on liquid biofuels in the EU: Current knowledge and future challenges*”, σσ.94-106, στο Biomass and Bioenergy, τευχ.150, 2021.
9. Arnason B., “*Iceland: a future hydrogen economy*”, σσ.389-394, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.25, 2000;
10. Astiaso G.D., “*Analysis of non-economic barriers for the deployment of hydrogen technologies and infrastructures in European countries*”, σσ.435-447, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.42, 2017.
11. Baroutaji A., T. Wilberforce, M. Ramadan, & Ghani O.A., “*Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors*”, σσ.31-40, στο Renewable Sustainable Energy Review, τευχ.106, 2019.
12. Bertuccioli L., et al., “*Study on development of water electrolysis in the EU*”, σσ.1-160, στο Fuel Cells, 2014.
13. Bezdek R.H., “*The hydrogen economy and jobs of the future*”, σσ.1-30, στο Renewable Energy and Environmental Sustainability, τευχ.4, 2019.

14. Bockris J., & A.J. Appleby, “*Hydrogen Economy: An Ultimate Economy. A Practical Answer to the Problem of Energy Supply and Pollution*”, σσ.29-35, στο Environment this month, τομ.1, Ιούλιος 1972.
15. Bockris J., “*The hydrogen economy: Its history*”, σσ.579-588, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.38, τευχ.6, 2013.
16. Bockris,J., *A Hydrogen Economy*, σσ.1323-1323, Environment This Month, τομ.13, τευχ.51, 1971.
17. Boeck M., T. Zörner, & O. Nationalbank, “*Natural gas prices and unnatural propagation effects: The role of inflation expectations in the euro area*”, σσ.40-79, στο SSRN, 2023.
18. Bogdan Z., “*An analysis of the legal and market frame work for the cogeneration sector in Croatia*”, σσ.134-143, στο Energy, τευχ.34, 2009.
19. Borah P.S., S. Courage, D. Kofi, & M. Nyankomo, “*Generation Z’s green purchase behavior: Do green consumer knowledge, consumer social responsibility, green advertising, and green consumer trust matter for sustainable development?*”, σσ.4530-4546, στο Business Strategy and the Environment, τομ.33, τευχ.5, 2024.
20. Bouzek K., et al., “*The hydrogen context and vulnerabilities in the central and Eastern European countries*”, σσ.36-54, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.44, 2019.
21. Cader J., R. Koneczna, & P. Olczak, “*The impact of economic, energy, and environmental factors on the development of the hydrogen economy*”, σσ.11-48, στο Energies, τομ.14, τευχ.16, 2021.
22. Caglar A.E., et al., “*Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe*”, σσ.793-805, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.45, 2020.
23. Caglar A.E., S. Gönenç, & M.A. Destek. “*The influence of nuclear energy research and development investments on environmental sustainability: Evidence from the United States and France*”, σσ.861-872, στο International Journal of Sustainable Development & World Ecology, τομ.31, τευχ.7, 2024.
24. Casamirra M., & F. Castiglia, “*Safety studies of a hydrogen refuelling station: determination of the occurrence frequency of the accidental scenarios*”, σσ.846-854, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.34, 2009.

25. Cavendish H. [12 May 1766], “*Three Papers, Containing Experiments on Factitious Air, by the Hon. Henry Cavendish, F. R. S.*”, σσ.141-184, στο Philosophical Transactions, τευχ.56, 2006.
26. Charles D., “*Master mind: The Rise and Fall of Fritz Haber, the Nobel Laureate Who Launched the Age of Chemical Warfare*”. New York: Ecco, 2005.
27. Dale S., & B. Fattouh “*Peak oil demand and long-run oil prices*”, σσ.2-11, στο Energy Insight, τομ.25, 2018.
28. Daniel R., “*Mapping the potential for decentralized energy generation based on renewable energy sources in the Republic of Croatia*”, σσ.731-744, στο Energy, τομ.32, 2007.
29. Del Rosal I., “*European dieselization: Policy insights from EU car trade*”, σσ.181-194, Transport policy, τομ.115, 2022.
30. Deymi-Dashtebayaz M., et al., “*Investigating the effect of hydrogen injection on natural gas thermophysical properties with various compositions*”, σσ.183-192, στο Energy, τομ.18, τευχ.35, 2018.
31. Díaz S., & Y. Malhi, “*Biodiversity: Concepts, patterns, trends, and perspectives*”, σσ.31-63, στο Annual Review of Environment and Resources, τομ.47, τευχ.1, 2022.
32. Dodds P.E, et al., “*Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review*”, σσ.2065-2083, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.40, 2015.
33. Ederington L.H., et al., “*The relation between petroleum product prices and crude oil prices*”, σσ.79-105, στο Energy Economics, τευχ.94, 2021.
34. Elam C.C., et al., “*Realizing the hydrogen future: the international energy agency’s efforts to advance hydrogen energy technologies*”, σσ.601-607, στο International Journal of Hydrogen Energy, τευχ.18, 2003.
35. European Commission, “*Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions, Brussels: A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*”, online, accessed at March 15th, 2025, available at <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52020DC0301>.
36. European Commission, “*European Clean Hydrogen Alliance*”, online webpage, accessed at March 15th, 2025, available at https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/industrial-alliances/european-clean-hydrogen-alliance_en.

37. European Commission, “*Questions and answers: a hydrogen strategy for a climate neutral Europe, Brussels, 2020-2024*”, online, accessed at March 15th, 2025, available at https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/hydrogen_strategy_0.pdf.
38. Fankhauser S., et al., “*The meaning of net zero and how to get it right*”, σσ.15-21, στο Nature Climate Change. τομ.12, τευχ.1, 2022.
39. Fattouh B., & L. Mahadeva, “*OPEC: what difference has it made?*”, σσ.427-443, στο Annual Review for Resource Economy, τομ.5, τευχ.1, 2013.
40. Federal ministry for economic affairs and energy [Germany], “*The National Hydrogen Strategy*”, online, accessed on March 22nd, 2025, available at <https://shorturl.at/KNq0w>.
41. Ferrero F., et al., “*Car-sharing services: An annotated review*”, σσ.501-518, στο Sustainable Cities and Society, τευχ.37, 2018.
42. Frano B., “*Transition to renewable energy systems with hydrogen as an energy carrier*”, σσ.308-312, στο International Journal of Hydrogen Energy, τευχ.34, 2009.
43. Government of the Netherlands, “*Government strategy on hydrogen*”, online, accessed at March 22nd, 2025, available at <https://shorturl.at/W6zl8>.
44. Grube T., & M. Robinius, “*A hydrogen supply chain with spatial resolution: comparative analysis of infrastructure technologies in Germany*”, σσ.438-453, στο Applied Energy, τευχ.247, 2019.
45. Guban D., et al., “*Assessment of sustainable high temperature hydrogen production technologies*”, σσ.2156-2165, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.45, 2020.
46. Haeseldonckx D., & W. D’haeseleer, “*The use of the natural gas pipeline infrastructure for hydrogen transport in a changing market structure*”, σσ.1381-386, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.32, 2007.
47. Haile S., et al., “*Solid acids as fuel cell electrolytes*”, σσ.910-913, στο Springer Science and Business: Nature Publishing Group, τευχ.410, 2001.
48. Hetland J., & M. Grietus, “*In search of a sustainable hydrogen economy: How a large-scale transition to hydrogen may affect the primary energy demand and greenhouse gas emissions*”, σσ.736-747, στο International Journal of Hydrogen Energy, τευχ.32, 2007.
49. Incropera F.P., et al., *Fundamentals of heat and mass transfer*. USA: John Wiley and Sons, Inc, 2008.

50. Karapekmez A., & I. Dincer “*Thermodynamic analysis of a novel solar and geothermal based combined energy system for hydrogen production*”, σσ.5608-5628, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.45, 2020.
51. Kim J., et al., “*Households’ willingness to pay for developing marine bio-hydrogen technology: the case of South Korea*”, σσ.2907-2917, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.44, 2019.
52. Kołos, W., & L. Wolniewicz, “*Potential Energy Curves for the $X\ 1\Sigma^+$, $b\ 3\Sigma^+$, and $C\ 1\Pi$ States of the Hydrogen Molecule*”, σσ. 2429–2441, στο American Institute of Physics: The Journal of Chemical Physics, τομ.7, τευχ.43, 1965.
53. Kouchachvili L., & E. Entchev, “*Power to gas and H_2 / NG blend in SMART energy networks concept*”, σσ.456-464, στο Renewable Energy, τευχ.125, 2018.
54. Kubas G.J. et al., “*Dihydrogen complexes as prototypes for the coordination chemistry of saturated molecules*”, σσ. 451–452, στο Journal of the American Chemical Society, τομ.106, τευχ.2, 2007.
55. Kumar D.S., “*Hydrogen embrittlement in different materials: a review*”, σσ.603-616, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.43, 2018.
56. Kuzemko C., et al., “*Covid-19 and the politics of sustainable energy transitions*”, σσ.116-186, στο Energy Resources & Social Sciences, τευχ.68, 2020.
57. Laursen, S., et al., “*An Extremely Brief Introduction to Computational Quantum Chemistry*”, σσ.65-80, στο Molecular Modeling in Chemical Engineering. University of Michigan, τευχ.27, Ιούλιος, 2004.
58. Li Q., et al., “*Explosion characteristics of H_2 / CH_4 /air and CH_4 /coal dust/air mixtures*”, σσ.222-228, στο Powder Technologies, τευχ.229, 2012.
59. Lin R.-H., Zhao Y.-Y., & Wu B.-D., “*Toward a hydrogen society: hydrogen and smart grid integration*” σσ.64-75, στο International Journal of Hydrogen Energy, τευχ.45, 2020.
60. Liu B., et al., “*Decompression of hydrogendnatural gas mixtures in high-pressure pipelines: CFD modelling using different equations of state*”, σσ.7428-7437, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.44, 2019.
61. Liu B., & S. Zhang, “*Hydrogen Storage Materials: The Characterization of Their Storage Properties*”. USA: Springer SBM, 2011.

62. Luis A.J., “*The energy transition towards hydrogen utilization for green life and sustainable human development in Patagonia*”, σσ.627-645, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.45, 2020.
63. Martins R., & A. Busuttil, “*Hydrogen as an energy vector in the islands’ energy supply*”, σς.91-103, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.33, 2008.
64. McDowall W., “*Exploring possible transition pathways for hydrogen energy: a hybrid approach using socio-technical scenarios and energy system modelling*”, σσ.1-14, στο Futures, τευχ.63, 2014.
65. McPherson M., N. Johnson, & M. Strubegger, “*The role of electricity storage and hydrogen technologies in enabling global low-carbon energy transitions*”, σσ.649-661, στο Applied Energy, τευχ.216, 2018.
66. Melaina M.W., et al., “*Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: A review of key issues*”, σσ.560-595, στο Technical Report NREL/TP, 2023.
67. Ming L., et al., “*Review of hydrogen production using chemical-looping technology*”, σσ.3186-3214, στο Renewable Sustainable Energy Review, τευχ.81, 2018.
68. Molnarne M., & V. Schroeder, “*Hazardous properties of hydrogen and hydrogen containing fuel gases*”, σσ.1-5, στο Process Safeties for Environmental Protects, τευχ.130, 2019.
69. Montero-Sousa J.A., et al., “*Hydrogen consumption prediction of a fuel cell-based system with a hybrid intelligent approach*”, σσ.1179-1186, στο Energy, τευχ.205, 2020].
70. Motta A.T., “*Hydrogen in zirconium alloys: A review*”, σσ.440-460, στο Journal of Nuclear Materials, τευχ.518, 2019.
71. Myers R., *The Basics of Chemistry*. London: Greenwood Publishing Group, 2003.
72. Nadaleti W.C., “*The potential of hydrogen production from high and low-temperature electrolysis methods using solar and nuclear energy sources: The transition to a hydrogen economy in Brazil*”, σσ.727-738, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.47, 2023.
73. Nagashima M., “*Japan’s hydrogen strategy and its economic and geopolitical implications*”, σσ.55-78, στο Etudes de l’Ifri, 2018.
74. NASA, “*Extending Hubble’s Mission Life with New Batteries*”, online, NASA Science, accessed on March 20th, 2025, available at

<https://science.nasa.gov/missions/hubble/extending-hubbles-mission-life-with-new-batteries/>.

75. Nastasi B., & B.L. Gianluigi, “*Hydrogen to link heat and electricity in the transition towards future*”, σσ.5-22, στο Smart Energy Systems, τευχ.110, 2016.
76. Novosel U., M. Zivic, & J. Avsec, “*The production of electricity, heat and hydrogen with the thermal power plant in combination with alternative technologies*”, σσ.1072-1081, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.46, 2020.
77. Okere C.J., & J. Sheng, “*Review on clean hydrogen generation from petroleum reservoirs: Fundamentals, mechanisms, and field applications*”, σσ.188-222, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.48, 2023.
78. Olah G.A., et al., “*Electrophilic reactions at single bonds. III. H-D exchange and protolysis [deuterolysis] of alkanes with superacids. The mechanism of acid-catalyzed hydrocarbon transformation reactions involving the .sigma. electron pair donor ability of single bonds via three-center bond formation*”, σσ. 1251–1256, στο Journal of the American Chemical Society, τομ.93, τευχ.5, 1971.
79. Paranos M., “*Design of a solar hydrogen refuelling station following the development of the first Croatian fuel cell powered bicycle to boost hydrogen urban mobility*”, σσ.14-22, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.44, 2019].
80. Park S., “*Iceland’s hydrogen energy policy development [1998-2007] from a sociotechnical experiment viewpoint*”, σσ.443-454, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.36, 2011.
81. Purves, W.K., et al., *Life: The Science of Biology*, USA: Inc. Publishers, 2003.
82. Quarton C., & S. Samsatli, “*Power-to-gas for injection into the gas grid: what can we learn from real-life projects, economic assessments and systems modelling?*”, σσ.302-316, στο Renewable & Sustainable Energy Review, τευχ.98, 2018.
83. Quarton C.J., & S. Samsatli, “*Should we inject hydrogen into gas grids? Practicalities and whole-system value chain optimization*”, σσ.115-172, στο Applied Energy, τευχ.275, 2020.
84. Rigden J.S., *Hydrogen: The essential element*. Cambridge: Harvard University Press, 2003.
85. Rosenberg D.A., “*American atomic strategy and the hydrogen bomb decision*”, σσ.62-87, στο The Journal of American History, τομ.66, τευχ.1, 1979.

86. Russo T.N., “*Hydrogen: hype or a glide path to decarbonizing natural gas*”, σσ.24-32, στο Climate and Energy, τευχ.37, 2020.
87. Sakamoto J., et al., “*Leakagetype based analysis of accidents involving hydrogen fueling stations in Japan and USA*”, σσ.1564-1570, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.41, 2016.
88. Saxe M., “*Advantages of integration with industry for electrolytic hydrogen production*”, σσ.42-50, στο Energy, τευχ.32, 2007].
89. Schipper E.L.F., et al., “*The debate: Is global development adapting to climate change?*”, σσ.102-105, στο World Development Perspectives, τομ.18, 2020.
90. Schlapbach L., & A. Züttel, “*Hydrogen-storage materials for mobile applications*”, σσ.353-358, στο Springer Science and Business: Nature Publishing Group, τευχ.414, 2001.
91. Schroeder V., “*Safetyrelated studies on hydrogen production in high-pressure electrolyzers*”, σσ.759-770, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.29, 2004.
92. Schroeder V., et al., “*Explosion limits of hydrogen/oxygen mixtures at initial pressures up to 200 bar*”, σσ.51-68, στο Chemical Engineering Technologies, τευχ.27, 2004.
93. Sdanghi G, et al., “*Review of the current technologies and performances of hydrogen compression for stationary and automotive applications*”, σσ.150-170, στο Renewable Sustainable Energy Review, τευχ.102, 2019.
94. Shafiei E., & D. Brynhildur, “*Comparative analysis of hydrogen, biofuels and electricity transitional pathways to sustainable transport in a renewable-based energy system*”, σσ.614-627, στο Energy, τευχ.83, 2015.
95. Shafiei E., et al., “*Energy, economic, and mitigation cost implications of transition toward a carbon-neutral transport sector: a simulation-based comparison between hydrogen and electricity*”, σσ.237-247, στο Journal for Clean Production, τευχ.141, 2017.
96. Sharma K., “*Carbohydrate-to-hydrogen production technologies: A mini-review*”, σσ.138-143, στο Renewable Sustainable Energy Review, τευχ.105, 2019.
97. Shulga R.N., “*The Arctic: ecology and hydrogen energy*”, σσ.185-198, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.45, 2020.
98. Sorita G.D., et al., “*Aqueous extraction processing: An innovative and sustainable approach for recovery of unconventional oils*”, σσ.99-113, στο Trends in Food Science & Technology, τευχ.133, 2023.

99. Stwertka A., *A Guide to the Elements*. Oxford University Press, 1997.
100. Szydło Z.A., “Hydrogen - Some Historical Highlights”, σσ.5-39, στο Chemistry-Didactics-Ecology-Metrology, том.1, τευχ.2, 2020.
101. Tabelin C.B., “Towards a low-carbon society: A review of lithium resource availability, challenges and innovations in mining, extraction and recycling, and future perspectives”, σσ.43-67, στο Minerals Engineering, τευχ.163, 2021.
102. Teng T., et al., “A comprehensive review of energy management optimization strategies for fuel cell passenger vehicle”, σσ.2293-2303, στο International Journal of Hydrogen Energy, том.45, 2020.
103. Tian M.W., et al., “The multiple selections of fostering applications of hydrogen energy by integrating economic and industrial evaluation of different regions”, σσ.2939-2948, στο International Journal of Hydrogen Energy, том.44, 2019.
104. Tlili O., et al., “Hydrogen market penetration feasibility assessment: Mobility and natural gas markets in the US, Europe, China, and Japan”, σσ.1648-1668, στο International Journal of Hydrogen Energy, том.44, 2019.
105. Tran M.K., et al., “A review of range extenders in battery electric vehicles: Current progress and future perspectives”, σσ.54-65, στο World Electric Vehicle Journal, том.12, τευχ.2, 2021.
106. Ustolin F., et al., “Loss of integrity of hydrogen technologies: a critical review”, σσ.3809-3840, στο International Journal of Hydrogen Energy, том.45, 2020.
107. van Renssen S., “The hydrogen solution”, σσ.799-801, στο Nature & Climate Change, τεύχ.10, 2020.
108. van Vucht, J H.N., F.A. Kuijpers, & C.A.M. Bruning, “Reversible Room-Temperature Absorption of Large Quantities of Hydrogen by Intermetallic Compounds”, σσ.133-140, στο Philips Research Laboratories, том.25, Απρίλιος 1970.
109. Veziroglu T.N., “Hydrogen versus synthetic fossil fuels”, σσ.355-366, στο International Journal of Hydrogen Energy, том.9, τευχ.5, 1984.
110. Vignais P.M., & B. Billoud, “Occurrence, classification, and biological function of hydrogenases: an overview”, σσ.4206-4672, στο American Chemical Society: Chemical Reviews, том.107, τευχ.10, 2007.

111. Vladimir N., “*Alternative power options to reduce carbon footprint of ro-ro passenger fleet: a case study of Croatia*”, σσ.226-238, στο Journal for Clean Production, τευχ.271, 2020].
112. von Colbe J.B., et al., “*Application of hydrides in hydrogen storage and compression: Achievements, outlook and perspectives*”, σσ.7780-7808, στο International Journal of Hydrogen Energy, том.44, 2019.
113. Wahl J., & J. Kallo, “*Quantitative valuation of hydrogen blending in European gas grids and its impact on the combustion process of large-bore gas engines*”, σσ.534-546, στο International Journal of Hydrogen Energy, том.45, 2020].
114. Walter M.G., et al., “*Solar Water Splitting Cells*”, σσ.6443-6936, στο American Chemical Society: Chemical Reviews, том.110, τευχ.11, 2010.
115. Wang M., Z. Wang, X. Gong, and Z. Guo, “*The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production: a review*”, σσ.573-588, στο Renewable Sustainable Energy Review, том.29, 2014.
116. Winter M., “*Hydrogen: historical information*”, online, accessed at February 18th, 2025, available at <https://shorturl.at/zgfVq>.
117. Wojtowicz R., “*An analysis of the effects of hydrogen addition to natural gas on the work of gas appliances*”, σσ.465-473, στο Nafta Gaz, том.8, 2019.
118. Xu Y., et al., “*Occurrence space and state of shale oil: A review*”, σσ.110-183, στο Journal of Petroleum Science and Engineering, τευχ.211, 2022].
119. You C., & J. Kim, “*Optimal design and global sensitivity analysis of a 100% renewable energy sources based smart energy network for electrified and hydrogen cities*”, σσ.232-252, στο Energy Conversations, τευχ.223, 2020.
120. Zhang D., et al., “*Optimal design, thermodynamic, cost and CO₂ emission analyses of coal-to-methanol process integrated with chemical looping air separation and hydrogen technology*”, σσ.1178-1185, στο Energy, τευχ.203, 2020].
121. Zuttel A., et al., *Hydrogen as a Future Energy Carrier*, Germany: Wiley-VCH, 2008.

Πίνακες

1. Πίνακας 1: Hydrogen storage methods [Moradi R., & K. Groth, “*Hydrogen storage and sery: Review of the state-of-the-art technologies and risk and reliability analysis*”, σ.1258, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.44, 2019].
2. Πίνακας 2 Proposed development of hydrogen infrastructure in Croatia [όπως παρουσιάζονται στο Firak F., & D. Ankica, “*Hydrogen transportation fuel in Croatia: road map strategy*”, σσ.3820-3830, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.41, 2016].
3. Πίνακας 3 Map of HRSs in Croatia and surrounding countries [όπως παρουσιάζονται στο Astiaso G., “*Analysis of non-economic barriers for the deployment of hydrogen technologies and infrastructures in European countries*”, σσ.435-447, στο International Journal of Hydrogen Energy, τομ.42, 2017].
4. Πίνακας 4 Projection of hydrogen infrastructure development in Belgium [όπως εμφανίζεται στο van der Laak W., et al., “*National implementation plan hydrogen refuelling infrastructure Belgium*”, H₂-mobility Belgium, online, accessed on March 19th, 2025, available at https://www.waterstofnet.eu/_asset/_public/H2MobilityBelgium-WaterstofNet-Final.pdf].

Εικόνες

Εικόνα 1: Hydrogen is the most abundant chemical structure in the universe. International Renewable Energy Agency

Εικόνα 2: «Κατανομή της παγκόσμιας παραγωγικής ικανότητας υδρογόνου ανά τεχνολογία παραγωγής για το 2023, European Hydrogen Observatory, 2024»

Εικόνα 3: International Renewable Energy Agency

Εικόνα 4: Απεικόνιση της αλυσίδας αξίας του πράσινου υδρογόνου, από την παραγωγή ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας έως την τελική χρήση.