



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

ΤΙΤΛΟΣ:

ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΚΑΙ Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΤΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ

ΦΡΑΝΤΖΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ 02119119

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΠΔΜ

Επιβλέπων: Δρ.-Μηχ. Δ. Κουλοχέρης, Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Συνεπιβλέπων: Δρ.-Μηχ. Κ. Βόσου, Μεταδιδακτορική Ερευνήτρια ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2022

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	i
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	iii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vi
ABSTRACT	vii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ, ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	3
1.1 Παραγωγή υδρογόνου	3
1.1.1 Παραγωγή υδρογόνου από φυσικό αέριο/υδρογονάνθρακες	3
1.1.2 Αεριοποίηση άνθρακα	8
1.1.3 Ηλεκτρολυτικές μέθοδοι	8
1.1.4 Φωτοκαταλυτικές μέθοδοι.....	12
1.1.5 Παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	14
1.2 Αποθήκευση υδρογόνου.....	17
1.2.1 Αποθήκευση με συμπίεση.....	18
1.2.2 Αποθήκευση με υγροποίηση.....	19
1.2.3 Αποθήκευση υδρογόνου σε υδρίδια μετάλλων	21
1.2.4 Αποθήκευση υδρογόνου σε νανοδομημένο / πορώδες υλικό	23
1.2.5 Υπόγεια αποθήκευση υδρογόνου.....	25
1.2.6 Αποθήκευση υδρογόνου σε δίκτυο αερίου	26
1.3 Μεταφορά υδρογόνου	26
1.4 Κωδικοποίηση του υδρογόνου ανάλογα με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα κατά τον κύκλο ζωής του	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΗΣ ΥΙΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ	29
2.1 Χαρακτηριστικά του υδρογόνου	29
2.2 Ανάλυση περιβαλλοντικού και οικονομικού κόστους που προκύπτει κατά την παραγωγή, αποθήκευση, μεταφορά και τελική χρήση του υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ ΤΟΥ ΚΛΑΔΟΥ ΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ (ΤΡΕΧΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ).....	41

3.1	Ενεργειακό αποτύπωμα των φορτηγών εμπορικών μεταφορών και μείωσή του μέσω της χρήσης υδρογόνου ως καύσιμο.....	42
3.2	Ενεργειακό αποτύπωμα των πολιτικών και εμπορευματικών αερομεταφορών και μείωσή του μέσω της χρήσης υδρογόνου ως καύσιμο	45
3.3	Ενεργειακό αποτύπωμα των θαλάσσιων εμπορευματικών μεταφορών και μείωσή του μέσω της χρήσης υδρογόνου ως καύσιμο	47
3.4	Ενεργειακό αποτύπωμα των σιδηροδρομικών εμπορικών μεταφορών και μείωσή του μέσω της χρήσης υδρογόνου ως καύσιμο	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΥΔΡΟΓΟΚΙΝΗΣΗΣ ΣΕ ΕΥΡΩΠΗ, ΙΑΠΩΝΙΑ ΚΑΙ ΗΠΑ	49
4.1	Υδρογονοκίνηση στην Ευρώπη	49
4.2	Υδρογονοκίνηση στην Ιαπωνία	50
4.3	Υδρογονοκίνηση στις ΗΠΑ	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ, ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	57
5.1	Πολιτικές για την ανάπτυξη δομών παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου στην Ευρώπη	57
5.1.1	Προβλήματα προς αντιμετώπιση.....	68
5.1.2	Ρυθμιστικό πλαίσιο σχετικά με το υδρογόνο.....	69
5.2	Πολιτικές για την ανάπτυξη δομών παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου στην Ιαπωνία	70
5.2.1	Προβλήματα προς αντιμετώπιση	73
5.2.2	Ρυθμιστικό πλαίσιο σχετικά με το υδρογόνο.....	73
5.3	Πολιτικές για την ανάπτυξη δομών παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου στις ΗΠΑ	75
5.3.1	Προβλήματα προς αντιμετώπιση	78
5.3.2	Ρυθμιστικό πλαίσιο σχετικά με το υδρογόνο.....	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	84
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		85

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Στάδια της διεργασίας αναμόρφωσης του μεθανίου με ατμό [2].	4
Σχήμα 1.2: Βιομηχανική εγκατάσταση διεργασίας αναμόρφωσης του μεθανίου με ατμό [7].	4
Σχήμα 1.3: Σχηματική απεικόνιση της διεργασίας της μερικής οξειδωσης [9].	6
Σχήμα 1.4: Τυπική διάταξη της διεργασίας της αυτόθερμης αναμόρφωσης [10].	7
Σχήμα 1.5: Διάταξη ηλεκτρόλυσης [12].	9
Σχήμα 1.6: Τρόπος λειτουργίας αλκαλικής ηλεκτρόλυσης [13].	10
Σχήμα 1.7: Τρόπος λειτουργίας PEM [14].	11
Σχήμα 1.8: Τρόπος λειτουργίας SOEC [15].	12
Σχήμα 1.9: Τρόπος λειτουργίας φωτοηλεκτρόλυσης [16].	13
Σχήμα 1.10: Μεταβολή της πυκνότητας αποθήκευσης του υδρογόνου για διάφορες πιέσεις σε σχέση με τη θερμοκρασία [20].	18
Σχήμα 1.11: Δεξαμενή πίεσης για αποθήκευση υδρογόνου σε οχήματα κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά [20].	19
Σχήμα 1.12: Σύστημα δεξαμενής αποθήκευσης υγρού υδρογόνου [19].	20
Σχήμα 1.13: Ογκομετρικές και βαρυμετρικές πυκνότητες αποθήκευσης υδρογόνου διαφορετικών μεταλλικών υδριδίων [19].	22
Σχήμα 1.14: Τρόπος λειτουργίας νανოსύνθετων υλικών για αποθήκευση υδρογόνου [19].	23
Σχήμα 1.15: Αποτελέσματα νανοσωλήνων άνθρακα για αποθήκευση υδρογόνου στους 77 Κ. Η προσθήκη τους (filled with powder/pellets) δεν είχε κάποιο ουσιαστικό αποτέλεσμα [21].	25
Σχήμα 2.1: Στάδια που πρέπει να συμπεριληφθούν για την αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του υδρογόνου.	32
Σχήμα 2.2: Ποσοστιαία κατανάλωση πόρων στην ηλεκτρόλυση με τη χρήση αιολικής ενέργειας [31].	34
Σχήμα 2.3: GWP (970gCO ₂ eq./kgH ₂) στην ηλεκτρόλυση με χρήση αιολικής ενέργειας [31].	34
Σχήμα 2.4: Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου και τα στάδια που περιλαμβάνονται σε αυτές σύμφωνα με τους Khzouzetaetal [33].	36
Σχήμα 2.5: Παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος για διαφορετικές μεθόδους παραγωγής υδρογόνου [33].	37
Σχήμα 3.1: Κατανομή ανά κράτος της κυκλοφορίας των οχημάτων που λειτουργούν με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου [37].	41
Σχήμα 3.2: Κατανομή ανά ήπειρο της κυκλοφορίας των οχημάτων που λειτουργούν με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου [37].	42
Σχήμα 3.3: Κατανομή οχημάτων υδρογόνου ανά είδος [37].	42
Σχήμα 3.4: Συμβολή διαφορετικών σταδίων του κύκλου ζωής στις συνολικές εκπομπές GHG από ένα στόλο βαρέων επαγγελματικών οχημάτων που λειτουργούν με ντίζελ [38].	44
Σχήμα 3.5: Συμβολή διαφόρων σταδίων του κύκλου ζωής στο συνολικό κόστος του στόλου των 200 βαρέων επαγγελματικών οχημάτων που λειτουργούν με ντίζελ για περίοδο 20 ετών [38].	44
Σχήμα 3.6: Εκπομπές GHG και CAC (ατμοσφαιρικοί ρύποι) για διαφορετικές τιμές του λόγου ντίζελ-υδρογόνου: 0% (καθαρό ντίζελ), 30%, 40% και 50% υδρογόνο [38].	45
Σχήμα 4.1: Σχέδια της Τογοταγια την ηλεκτροκίνηση [48].	52

Σχήμα 4.2: Υιοθέτηση του υδρογόνου σε διάφορους τομείς της οικονομίας στις ΗΠΑ [50].	54
Σχήμα 5.1: Στόχοι αναφορικά με τη παραγωγή και υιοθέτηση του υδρογόνου για την περίοδο 2021-2030 στην Ευρώπη [52].	59
Σχήμα 5.2: Σύγκριση του προγράμματος H2ME σε σχέση με παλαιότερα προγράμματα όσον αφορά: α) Τον αριθμό των οχημάτων, β) τον αριθμό των διαφορετικών μοντέλων οχημάτων, γ) την απόσταση που διένυσαν τα οχήματα κατά τη διάρκεια του προγράμματος [58].	63
Σχήμα 5.3: Σύγκριση του προγράμματος H2ME σε σχέση με παλαιότερα προγράμματα όσον αφορά: α) Τον αριθμό των σταθμών ανεφοδιασμού, β) τον αριθμό των προμηθευτών, γ) τον αριθμό των φορών που τα οχήματα χρειάστηκαν ανεφοδιασμό καυσίμου [58].	63
Σχήμα 5.4: Σοβαρότητα των ατυχημάτων που ενεπλάκησαν τα οχήματα υδρογόνου κατά τη διάρκεια του προγράμματος H2ME [58].	66
Σχήμα 5.5: Χρόνος ανεφοδιασμού ανά στάση για τα οχήματα υδρογόνου κατά τη διάρκεια του προγράμματος H2ME [58].	66
Σχήμα 5.6: Πιθανές βλάβες που μπορεί να παρουσιαστούν σε σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου [58].	67
Σχήμα 5.7: Σχέδιο μεταφοράς υδρογόνου από την Αυστραλία στην Ιαπωνία [59].	71
Σχήμα 5.8: Εγκαταστάσεις πλοίου μεταφοράς υδρογόνου [59].	72
Σχήμα 5.9: Δίκτυο αγωγών φυσικού αερίου και επικίνδυνων υγρών στις ΗΠΑ [49].	77
Σχήμα 5.10: Πιθανές περιοχές αποθήκευσης υδρογόνου (π.χ. περιοχές όπου βρίσκονται σπήλαια αλατιού, ξερά πηγάδια κλπ.) [49].	77
Σχήμα 5.11: Μεταβολή του κόστους των κυψελών καυσίμου σε σχέση με το ρυθμό παραγωγής [50].	79

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Οι πιο σημαντικές οικογένειες υδριδίων που σχηματίζονται σε ενώσεις [21].	21
Πίνακας 2.1: Ιδιότητες υδρογόνου, μεθανίου και βενζίνης [29], [30].	30
Πίνακας 2.2: Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου ενεργειακή απόδοση και επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας [24].	31
Πίνακας 2.3: Ικανότητα παραγωγής υδρογόνου και περιβαλλοντικό αποτύπωμα για τις κυριότερες μεθόδους παραγωγής υδρογόνου [31].	33
Πίνακας 2.4: Μέση κατανάλωση πόρων σε σύστημα ηλεκτρόλυσης με χρήση αιολικής ενέργειας [28].	33
Πίνακας 2.5: Τεχνολογίες αποθήκευσης H ₂ στα οχήματα και αντίστοιχες εκπομπές αέριων ρύπων [32].	35
Πίνακας 2.6: Κόστος κύκλου ζωής για διαφορετικές μεθόδους παραγωγής υδρογόνου [33].	37
Πίνακας 2.7: Σύγκριση κόστους εκπομπών και κατανάλωσης ενέργειας διαφόρων μεθόδων παραγωγής υδρογόνου [34].	38
Πίνακας 2.8: Κόστος και κατανάλωση πόρων για διάφορες μεθόδους αποθήκευσης και διαδικασίες μετατροπής ενέργειας στο όχημα [34].	38
Πίνακας 2.9: Κόστος και περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε όρους εκπομπών και κατανάλωσης ενέργειας για διάφορες μεθόδους αποθήκευσης υδρογόνου σε σταθμούς τροφοδοσίας [34].	39
Πίνακας 2.10: Κατανάλωση ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια ζωής για διάφορες τεχνικές αποθήκευσης υδρογόνου για απόσταση 1 km [31].	40
Πίνακας 3.1: Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία των Hannach et al. [38].	43
Πίνακας 4.1: Υδρογονοκίνηση στις ΗΠΑ για τα έτη 2022, 2025, 2030 [49].	53
Πίνακας 4.2: Ποσοστό πωλήσεων για διάφορες κατηγορίες οχημάτων υδρογόνου στις ΗΠΑ έως το 2030 και 2050 για διαφορετικά σενάρια [50].	53
Πίνακας 5.1: Περιοχές, αριθμός και χαρακτηριστικά σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου στα πλαίσια του προγράμματος H2ME [58].	63
Πίνακας 5.2: Εκτιμώμενη ζήτηση υδρογόνου στην Ευρώπη για ελαφρά οχήματα στα πλαίσια του προγράμματος H2ME [58].	67

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία μελετήθηκε η χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο στις μεταφορές, η τρέχουσα κατάσταση της υδρογονοκίνησης σε ΕΕ, Ιαπωνία και ΗΠΑ, τα μελλοντικά σχέδιά τους για την υιοθέτηση του υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών καθώς και το ισχύον ρυθμιστικό πλαίσιο για το υδρογόνο.

Όσον αφορά στη χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο αξιολογήθηκαν όλα τα τμήματα της αλυσίδας του υδρογόνου (παραγωγή, αποθήκευση, μεταφορά και κατανάλωση) σε όρους περιβαλλοντικού αποτύπωματος και κόστους. Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και το κόστος αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες οι οποίοι θα κρίνουν τον βαθμό κατά τον οποίο θα υιοθετηθεί το υδρογόνο ως καύσιμο. Το κυριότερο συμπέρασμα που προέκυψε από αυτή την ανάλυση είναι ότι οι φιλικότερες προς το περιβάλλον μέθοδοι παραγωγής (ηλεκτρόλυση με χρήση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές) παρουσιάζουν τη μικρότερη αποδοτικότητα και το μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με αυτές που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα (αναμόρφωση με ατμό, αεριοποίηση άνθρακα). Ωστόσο, καθώς οι τεχνολογίες αυτές ωριμάζουν η εικόνα τους αναμένεται να βελτιωθεί.

Όσον αφορά στην τρέχουσα κατάσταση της υδρογονοκίνησης σε ΕΕ, Ιαπωνία και ΗΠΑ αυτή βρίσκεται ακόμα σε αρχικό στάδιο και έχουν ξεκινήσει μία σειρά από προγράμματα, σε συνεργασία με τη βιομηχανία, για την ευρύτερη υιοθέτηση του υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών π.χ. με τη δημιουργία νέων σταθμών ανεφοδιασμού, τη δημιουργία δικτύου αγωγών κ.α. Όσον αφορά στο ρυθμιστικό πλαίσιο αποκλειστικά για το υδρογόνο, αυτό ακόμα δεν υπάρχει, οπότε το υδρογόνο ρυθμίζεται εμμέσως με νόμους και κανονισμούς που διέπουν τα επικίνδυνα υγρά και αέρια ή τα εναλλακτικά καύσιμα.

Λέξεις κλειδιά: Υδρογόνο, περιβαλλοντικό αποτύπωμα, ηλεκτρόλυση, μεταφορές, υδρογονοκίνηση

ABSTRACT

In the present Master's Thesis, the use of hydrogen as a fuel in transport, the current status of hydrogen in the EU, Japan and the USA, their future plans for the adoption of hydrogen in the transport sector as well as the current regulatory framework for hydrogen were studied.

As far as the use of hydrogen as a fuel is concerned, all parts of the hydrogen chain (production, storage, transportation and consumption) were evaluated in terms of environmental footprint and cost. Environmental footprint and cost are the key factors that will determine the degree to which hydrogen will be adopted as a fuel. The main conclusion that emerged from this analysis is that the production techniques with the lowest environmental footprint (electrolysis using energy from renewable sources) demonstrate the lowest efficiency and the highest cost compared to those that use fossil fuels. However, this is expected to change in the future.

As far as the current state of hydrogen in transport sector in the EU, Japan and the USA are concerned, a number of programs have been launched, in collaboration with industry, for greater hydrogen adoption in the transport sector e.g. with the development of new gas stations, the development of a pipeline network, etc. As far as the regulatory framework exclusively for hydrogen is concerned, this does not yet exist and hydrogen is regulated by laws governing hazardous liquids and gases or alternative fuels.

Key words: Hydrogen, environmental footprint, electrolysis, transport, hydrogen mobility

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το υδρογόνο (H_2) είναι το πρώτο στοιχείο του περιοδικού πίνακα. Σε κανονικές συνθήκες είναι ένα άχρωμο, άοσμο και εξαιρετικά εύφλεκτο αέριο. Ο ατομικός του αριθμός είναι ίσος με 1, το ατομικό του βάρος ίσο με $1,00797 \text{ g/mol}$ και το μοριακό του βάρος ίσο με $2,01594 \text{ g}$ [1]. Παρόλο που υπάρχει σε αφθονία στη φύση είναι δύσκολο να βρεθεί ως ξεχωριστό στοιχείο. Συνήθως βρίσκεται στο νερό (συνδέεται με χημικό δεσμό με το οξυγόνο) ή σε υδρογονάνθρακες όπου σχηματίζει δεσμούς με τον άνθρακα [1].

Το υδρογόνο έχει αναγνωριστεί ως εναλλακτική λύση στα ορυκτά καύσιμα και είναι ένα δυνητικά πολύτιμο εργαλείο για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Η κλιματική αλλαγή είναι ένα πρόβλημα που απασχολεί τις κυβερνήσεις παγκοσμίως και προσπαθούν να το αντιμετωπίσουν με πολιτικές μείωσης ή και μηδενισμού των αέριων εκπομπών του θερμοκηπίου οι οποίες αποτελούν και την κύρια πηγή του προβλήματος. Το μεγαλύτερο μέρος του υδρογόνου σήμερα παράγεται στις πετροχημικές βιομηχανίες και η παραγωγή του γίνεται κυρίως από ορυκτά καύσιμα (άνθρακας, φυσικό αέριο). Το υδρογόνο καταναλώνεται μέσα στην ίδια τη βιομηχανία και δεν πωλείται στην αγορά [2]. Χρησιμοποιείται, συνήθως, για τον εξευγενισμό του πετρελαίου και για την παρασκευή λιπασμάτων, πλαστικών, διαλυτών, και άλλων βιομηχανικών προϊόντων [2]. Μόνο το 5% του υδρογόνου μεταφέρεται αλλού σε υγρή ή σε αέρια μορφή [2]. Οι πιο αισιόδοξες προβλέψεις θεωρούν ότι το υδρογόνο θα μπορούσε σύντομα να τροφοδοτήσει φορτηγά, αεροπλάνα και πλοία. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, επίσης, για τη θέρμανση στα σπίτια ακόμα και στη βιομηχανία. Αλλά για να γίνουν όλα αυτά απαιτούνται πολύ μεγάλες ποσότητες υδρογόνου, του οποίου το περιβαλλοντικό αποτύπωμα εξαρτάται από τη μέθοδο παραγωγής του.

Με τον όρο «μεταφορές» ονομάζονται οι μετακινήσεις επιβατών και φορτίων από μία περιοχή σε μία άλλη και διακρίνονται σε χερσαίες, θαλάσσιες και εναέριας. Στην Ευρώπη το 53% της ενέργειας στον τομέα των μεταφορών καταναλώνεται από τα αυτοκίνητα, το 31% από τα φορτηγά, το 10% από άλλα μέσα οδικών μεταφορών και το υπόλοιπο ποσοστό μοιράζεται σε σιδηροδρομικές, εναέριας και θαλάσσιες μεταφορές [3]. Για τις ΗΠΑ το 55,5% της ενέργειας στον τομέα των μεταφορών καταναλώνεται από τα αυτοκίνητα και το 24,4% από τα φορτηγά [4].

Σκοπός της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας είναι να συγκρίνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και το κόστος μεθόδων παραγωγής, αποθήκευσης και χρήσης του υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών. Επίσης, γίνεται αναφορά στο ρυθμιστικό πλαίσιο γύρω από το υδρογόνο για την ΕΕ, την Ιαπωνία και τις ΗΠΑ ενώ

παράλληλα παρουσιάζεται η τρέχουσα κατάσταση στην υδρογονοκίνηση σε αυτές τις περιοχές καθώς και οι μελλοντικοί τους στόχοι σχετικά με αυτήν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ, ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Σε αυτό το Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις κυριότερες μεθόδους παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου. Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει αναλυτική περιγραφή των διεργασιών αλλά και των συνθηκών κάτω από τις οποίες γίνεται η παραγωγή, η αποθήκευση και η μεταφορά του υδρογόνου.

1.1 Παραγωγή υδρογόνου

Οι βασικότερες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου που θα αναλυθούν είναι:

- Παραγωγή υδρογόνου από φυσικό αέριο/υδρογονάνθρακες
- Αεριοποίηση άνθρακα
- Ηλεκτρολυτικές μέθοδοι
- Φωτοκαταλυτικές μέθοδοι
- Παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

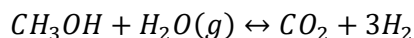
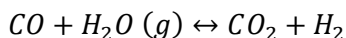
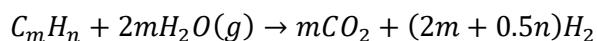
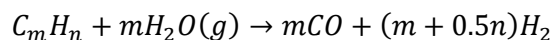
1.1.1 Παραγωγή υδρογόνου από φυσικό αέριο/υδρογονάνθρακες

Οι κυριότερες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου από φυσικό αέριο/υδρογονάνθρακες είναι οι εξής:

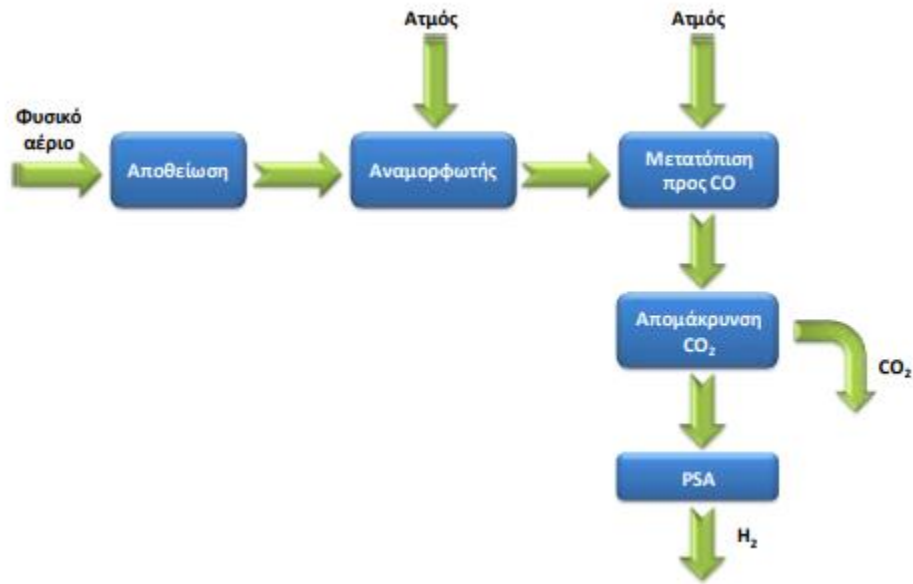
- Αναμόρφωση με ατμό (αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό)
- Μερική οξείδωση
- Αυτόθερμη αναμόρφωση

1.1.1.1 Αναμόρφωση με ατμό (αναμόρφωση μεθανίου με ατμό)

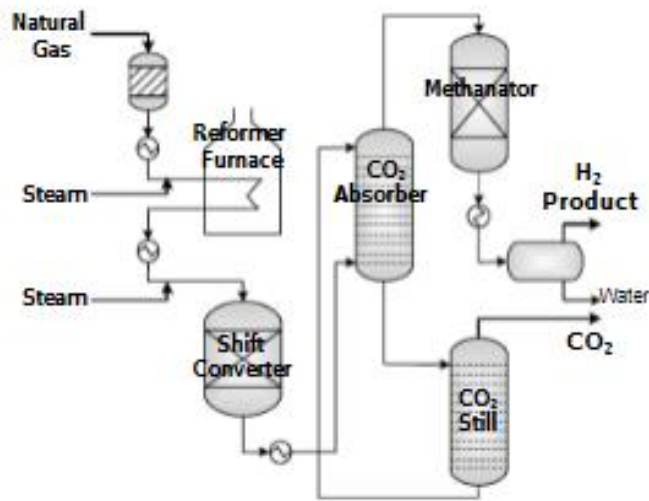
Η αναμόρφωση με ατμό αποτελεί τη συνηθέστερη μέθοδο παραγωγής του υδρογόνου και τη λιγότερο δαπανηρή. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες είναι το φυσικό αέριο και οι ελαφρύτεροι υδρογονάνθρακες, η μεθανόλη και άλλοι οξυγονωμένοι υδρογονάνθρακες. Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι [5]:



Μεταξύ των διαδικασιών αναμόρφωσης, η αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος παραγωγής υδρογόνου (Σχήμα 1.1, 1.2).



Σχήμα 1.1: Στάδια της διεργασίας αναμόρφωσης του μεθανίου με ατμό [2].



Σχήμα1.2: Βιομηχανική εγκατάσταση διεργασίας αναμόρφωσης του μεθανίου με ατμό [7].

Το μεθάνιο, με ενεργειακή πυκνότητα $55,5 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, στην αναμόρφωση αντιδρά με ατμό στους $700\text{--}1.000^\circ\text{C}$ υπό πίεση η οποία κυμαίνεται από τα $3\text{--}25 \text{ bar}$ [6]. Εκτός από το μονοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο, στην έξοδο του αναμορφωτή (πρόκειται για τη συσκευή που αποσπά το καθαρό υδρογόνο από μια πηγή υδρογόνου,

όπως καύσιμα υδρογονανθράκων ή αλκοόλης, και στη συνέχεια παρέχει το υδρογόνο στην κυψέλη καυσίμου) είναι παρών μεθάνιο που δεν αντέδρασε και διοξείδιο του άνθρακα, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα να απαιτούνται περαιτέρω βήματα επεξεργασίας και καθαρισμού για τη λήψη καθαρού υδρογόνου [6].

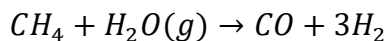
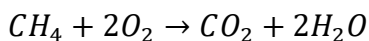
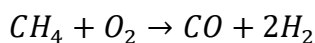
Αν και οι καταλύτες με βάση τα ευγενή μέταλλα είναι οι καταλληλότεροι, το υψηλό κόστος και η περιορισμένη διαθεσιμότητά τους εμποδίζει τη χρήση τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα καταλύτες με βάση το Ni/Al₂O₃ να είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται περισσότερο. Ωστόσο, αυτοί οι καταλύτες αντιμετωπίζουν προβλήματα λόγω της δημιουργίας κοκ. Ένας τρόπος να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα είναι η εφαρμογή ενός θετικού ηλεκτρικού πεδίου διότι είναι ικανό να αλλάξει την καταλυτική συμπεριφορά των καταλυτών με βάση το Ni καθώς μειώνει τη δημιουργία του κοκ [6].

Ένας σημαντικός παράγοντας που παίζει μεγάλο ρόλο στη διαδικασία αναμόρφωσης μεθανίου με ατμό είναι η αναλογία ατόμων H: C στο υλικό της πρώτης ύλης. Όσο υψηλότερη είναι αυτή η αναλογία τόσο μικρότερη είναι η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα [5]. Η θερμική απόδοση της παραγωγής υδρογόνου από αυτή τη διεργασία είναι περίπου 70-85% [5]. Μια σειρά άλλων πρώτων υλών πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον όπως τα στερεά απόβλητα, απόβλητα από τη βιομηχανία τροφίμων, απόβλητα γεωργικής βιομάζας και καύσιμα ορυκτής προέλευσης όπως ο άνθρακας. Το μειονέκτημα των παραπάνω τεχνικών είναι η υψηλή παραγωγή CO₂, περίπου στα 7,05 kg CO₂/kg H₂ [5].

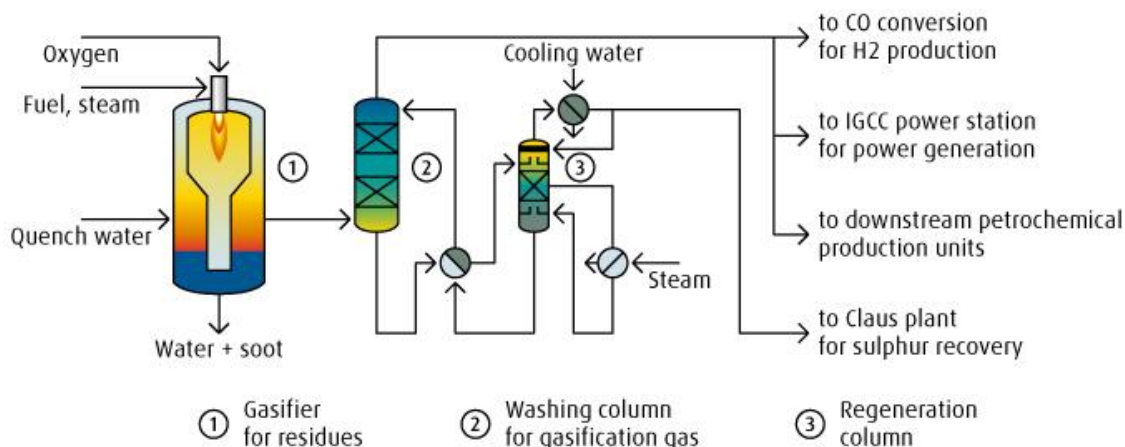
Υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα χρήσης μεθανόλης αντί για μεθάνιο, για βιομηχανική παραγωγή υδρογόνου. Σε αυτή τη διαδικασία η μεθανόλη αντιδρά με ατμό για να παραχθεί H₂. Αποτελεί μία ενδόθερμη αντίδραση και δεν περιλαμβάνει τον σχηματισμό ενδιάμεσων οξυγονωμένων ενώσεων αν και για οικονομικούς λόγους χρησιμοποιείται μόνο όταν υπάρχει περίσσεια μεθανόλης [8].

1.1.1.2 Μερική οξείδωση

Στη διεργασία της μερικής οξείδωσης (Σχήμα 1.3) η πρώτη ύλη μπορεί να είναι μεθάνιο και βιοαέριο αλλά κυρίως κλάσματα βαρέος πετρελαίου και χρησιμοποιείται για τη μετατροπή τους σε H₂, CO, CO₂ και H₂O. Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι οι εξής [2]:



Basic flow diagram of a gasification plant



Σχήμα 1.3: Σχηματική απεικόνιση της διεργασίας της μερικής οξείδωσης [9].

Η διεργασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με την παρουσία (CPOX) ή μη καταλύτη (POX)[2], [5]. Η POX είναι μία διεργασία κατά την οποία η πρώτη ύλη αεριοποιείται παρουσία οξυγόνου και πιθανώς ατμού σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 1300–1500°C και πιέσεις που κυμαίνονται από 3–8 MPa. Σε σύγκριση με την αναμόρφωση με ατμό παράγεται περισσότερο CO. Αυτό οδηγεί στην ανάγκη για μετατροπή του CO σε H₂ και CO₂ με τη χρήση ατμού [5].

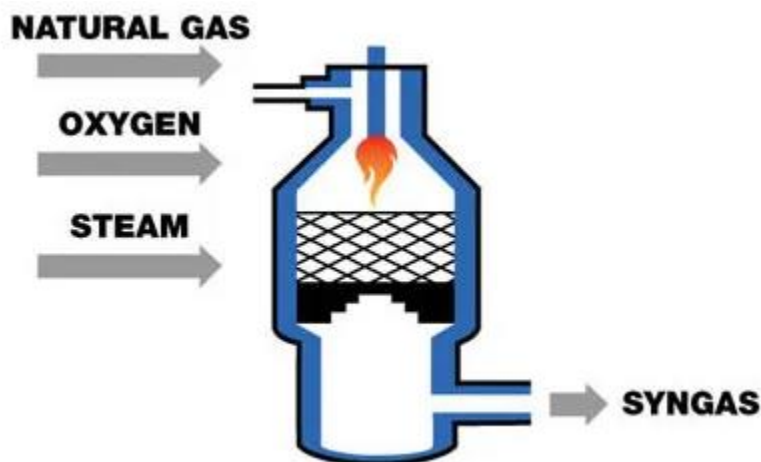
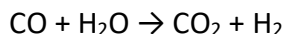
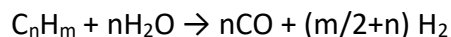
Το αέριο μίγμα που σχηματίζεται μέσω της μερικής οξείδωσης περιέχει CO, CO₂, H₂O, H₂, CH₄, H₂S (υδρόθειο) και COS (οξυσουλφίδιο του άνθρακα). Ένα μέρος του αερίου καίγεται για να παρέχει αρκετή θερμότητα για τις ενδόθερμες διεργασίες. Η αιθάλη που δημιουργείται από την αποσύνθεση του ακετυλενίου ως ενδιάμεσου προϊόντος είναι ένα ανεπιθύμητο προϊόν. Η ποσότητα του εξαρτάται από την αναλογία H:C στην αρχική πρώτη ύλη του καυσίμου. Επομένως, είναι απαραίτητη η χρήση πρώτων υλών που περιέχουν υψηλή αναλογία H:C, όπως είναι για παράδειγμα το φυσικό αέριο. Ενώ η λειτουργία του αντιδραστήρα είναι λιγότερο δαπανηρή σε σύγκριση με την αναμόρφωση με ατμό, η επακόλουθη μετατροπή καθιστά αυτή την τεχνολογία πιο ακριβή. Δεδομένου ότι η διαδικασία δεν απαιτεί τη χρήση καταλύτη, δεν είναι απαραίτητο να αφαιρεθούν θειούχα στοιχεία από το φυσικό αέριο. Οι θειούχες ενώσεις που περιέχονται στην αεριοποιημένη πρώτη ύλη μετατρέπονται σε υδρόθειο (περίπου 95%) και σε οξυσουλφίδιο του άνθρακα (περίπου 5%) [5].

Στη διεργασία μερικής οξείδωσης (CPOX) προστίθενται καταλύτες προκειμένου να μειωθεί η θερμοκρασία λειτουργίας, περίπου στους 700–1.000°C. Ωστόσο, ο έλεγχος της θερμοκρασίας αποδεικνύεται δύσκολος λόγω του σχηματισμού κοκ και θερμών κηλίδων λόγω της εξώθερμης φύσης των αντιδράσεων. Για τη μετατροπή του

φυσικού αερίου οι καταλύτες είναι από Ni (νικέλιο) ή Rh (ρόδιο). Ωστόσο, το νικέλιο έχει ισχυρή τάση για κοκ και το κόστος του Rh είναι υψηλό. Συνήθως, η θερμική απόδοση των αντιδραστήρων POX με μεθάνιο ως καύσιμο κυμαίνεται από 60-75% [5].

1.1.1.3 Αυτόθερμη αναμόρφωση

Η αυτόθερμη αναμόρφωση (Σχήμα 1.4) είναι ένας συνδυασμός αντιδράσεων αναμόρφωσης ατμού (ενδόθερμη) και μερικής οξείδωσης (εξώθερμη). Η αυτόθερμη αναμόρφωση έχει ως πλεονεκτήματα ότι δεν απαιτεί εξωτερική θερμότητα και είναι μία απλούστερη και λιγότερο ακριβή διεργασία σε σχέση με την αναμόρφωση με ατμό του μεθανίου [5]. Οι αντιδράσεις που σχετίζονται με αυτή τη διεργασία είναι οι εξής:



Σχήμα 1.4: Τυπική διάταξη της διεργασίας της αυτόθερμης αναμόρφωσης [10].

Βασικός στόχος είναι η υψηλή απόδοση υδρογόνου με χαμηλή περιεκτικότητα σε μονοξείδιο του άνθρακα. Αυτό είναι δυνατό με την αναμόρφωση με ατμό. Ωστόσο, η αναμόρφωση με ατμό είναι μια ενδόθερμη διαδικασία και επομένως απαιτητική σε ενέργεια.

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας έναντι της διαδικασίας αναμόρφωσης με ατμό είναι ότι μπορεί να τερματιστεί και να ξεκινήσει πολύ γρήγορα, ενώ παράγει μεγαλύτερη ποσότητα υδρογόνου από την μερική οξείδωση. Υπάρχουν

κάποιες προσδοκίες ότι αυτή η διαδικασία θα γίνει ελκυστική για τη βιομηχανία καυσίμων «Gasto Liquid» λόγω της ευνοϊκής σύνθεσης αερίου για τη σύνθεση Fischer-Tropsch και του χαμηλότερου κόστους κεφαλαίου [5]. Η αναμόρφωση μεθανίου έχει θερμική απόδοση συγκρίσιμη με αυτή της POX (περίπου 60–75%) και ελαφρώς μικρότερη από εκείνη της αναμόρφωσης με ατμό. Η βενζίνη και άλλοι ανώτεροι υδρογονάνθρακες μπορούν να μετατραπούν σε υδρογόνο για χρήση σε αυτοκίνητα με την αυτόθερμη διαδικασία χρησιμοποιώντας κατάλληλους καταλύτες [5].

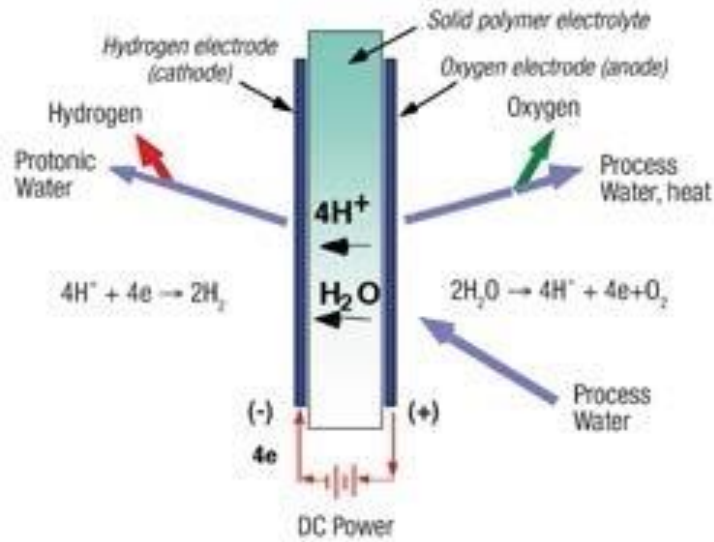
1.1.2 Αεριοποίηση άνθρακα

Η αεριοποίηση άνθρακα αποτελεί μια διαδικασία μερικής οξείδωσης δηλαδή μία διαδικασία κατά την οποία χρησιμοποιείται λιγότερο οξυγόνο στην αεριοποίηση από όσο θα απαιτούνταν για την καύση (πλήρης οξείδωση) της ίδιας ποσότητας καυσίμου. Προϊόντα της αεριοποίησης είναι το CO, το H₂ και σε μικρότερες ποσότητες το H₂O και το CO₂ [11].

Η συγκεκριμένη διαδικασία αν και βρίσκει εμπορικές εφαρμογές, είναι λιγότερο ανταγωνιστική σε σχέση με την αναμόρφωση του μεθανίου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου το φυσικό αέριο παρουσιάζει υψηλή τιμή, επίσης, είναι μία διαδικασία αυξημένης πολυπλοκότητας ενώ για τις περισσότερες εφαρμογές απαιτούνται και περεταίρω διεργασίες καθαρισμού του υδρογόνου. Το κόστος του παραγόμενου υδρογόνου είναι υψηλότερο εξαιτίας του αεριοποιητή (ειδικοί αντιδραστήρες όπου γίνεται η αεριοποίηση) και της απαίτησης για O₂ [2].

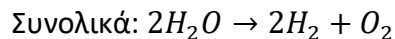
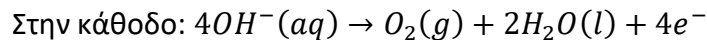
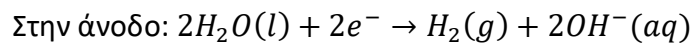
1.1.3 Ηλεκτρολυτικές μέθοδοι

Μια άλλη μέθοδος παραγωγής υδρογόνου αποτελεί η ηλεκτρόλυση νερού (Σχήμα 1.5) η οποία είναι μία μέθοδος που άρχισε να βρίσκει εμπορική εφαρμογή από το 1890. Επί του παρόντος, περίπου μόνο το 4% του υδρογόνου παγκοσμίως παράγεται από αυτή τη διαδικασία [5].



Σχήμα 1.5: Διάταξη ηλεκτρόλυσης [12].

Η ηλεκτρόλυση είναι μια διαδικασία κατά την οποία ένα συνεχές ρεύμα διέρχεται από δύο ηλεκτρόδια τα οποία είναι εμβυτισμένα σε ένα υδατικό διάλυμα και προκαλείται διάσπαση των χημικών δεσμών που υπάρχουν στο μόριο του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο [5]. Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι οι εξής:



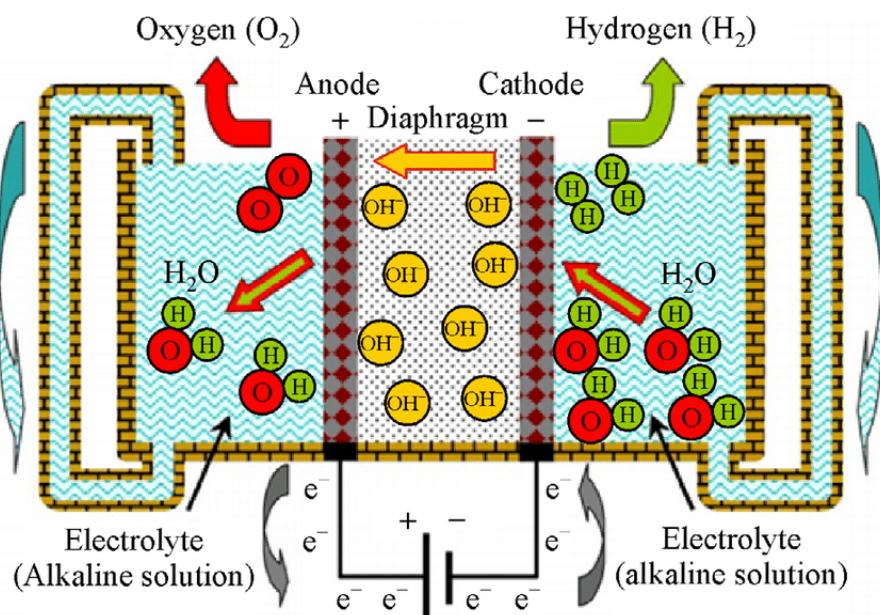
Η ηλεκτρόλυση πραγματοποιείται σε θερμοκρασία δωματίου. Ένας κοινώς χρησιμοποιούμενος ηλεκτρολύτης είναι το H_2SO_4 (θειικό οξύ) ενώ τα ηλεκτρόδια είναι κατασκευασμένα από πλατίνα (Pt), η οποία δεν αντιδρά με το H_2SO_4 . Πρόκειται για μία διεργασία με πολύ χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα καθώς δεν σχηματίζονται αέρια του θερμοκηπίου ενώ το οξυγόνο που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές [5]. Ωστόσο, η ηλεκτρόλυση είναι μια τεχνολογία η οποία απαιτεί μεγάλα ποσά ενέργειας κάτι που οδηγεί σε αύξηση του κόστους της διεργασίας [2], [5].

Η ενεργειακή απόδοση της ηλεκτρόλυσης κυμαίνεται από 50-70% . Η πιο κοινή τεχνολογία ηλεκτρόλυσης είναι η αλκαλική ηλεκτρόλυση, ενώ άλλες τεχνικές είναι η

ηλεκτρόλυση με τη χρήση πολυμερικής μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) και η ηλεκτρόλυση στην οποία γίνεται χρήση κυψελών στερεού οξειδίου (SOEC).

1.1.3.1 Αλκαλική ηλεκτρόλυση

Στις αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης (Σχήμα 1.6) ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται ένα διάλυμα KOH ή NaOH (περιεκτικότητα 25-30% w/w). Σημαντική παράμετρος σε αυτή τη διεργασία αποτελεί η επιλογή των κατάλληλων ηλεκτροκαταλυτών. Αυτοί που βασίζονται σε ευγενή μέταλλα είναι εξαιρετικά αποδοτικοί αλλά συνήθως χρησιμοποιούνται πιο φθηνές εναλλακτικές με βάση το Ni. Για τη βελτίωση της απόδοσης και τη μείωση της υποβάθμισης του καταλύτη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρόσθετα και άλλα μέταλλα όπως το κοβάλτιο, ο σίδηρος, το βανάδιο και το σελήνιο [6].

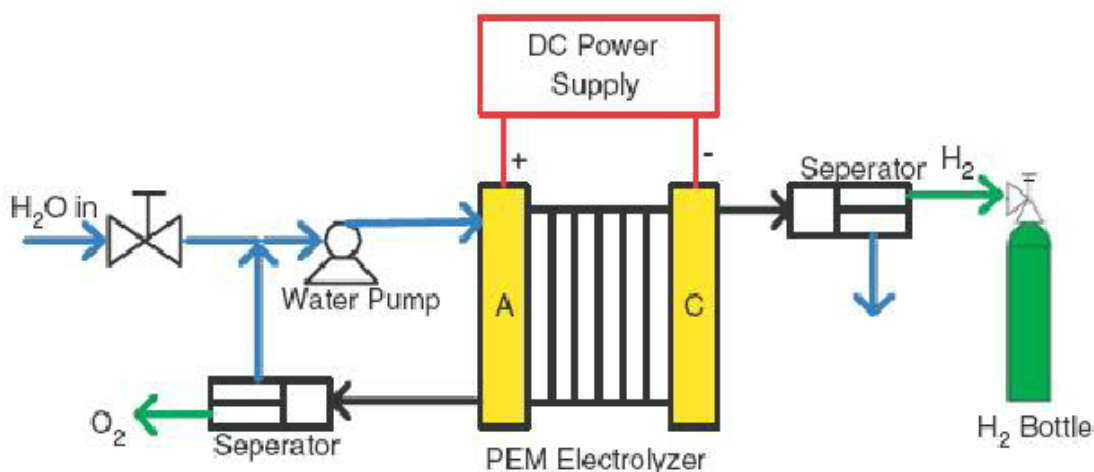


Σχήμα 1.6: Τρόπος λειτουργίας αλκαλικής ηλεκτρόλυσης [13].

Σε αυτή τη διεργασία επιτυγχάνεται υψηλή απόδοση όταν οι κυψέλες λειτουργούν σε χαμηλές πυκνότητες ρεύματος. Σαν διάφραγμα χρησιμοποιείται συνήθως υλικό από πορώδες λευκό αμίαντο ($Mg_3Si_2O_5(OH)_4$). Λόγω της τοξικότητας του υλικού γίνονται προσπάθειες ανάπτυξης πολυμερών αγωγικών υδροξειδίων. Η χρήση υψηλότερης πυκνότητας ρεύματος εμφανίζει προβλήματα λόγω της δημιουργίας φυσαλίδων αερίου ωστόσο έχουν γίνει προσπάθειες για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, όπως είναι για παράδειγμα η ανάπτυξη ηλεκτροδίων κατασκευασμένα σε 3D εκτυπωτή με ελεγχόμενη περιοδική δομή, η οποία είναι σε θέση να αποτρέπει τη συνένωση φυσαλίδων αερίου [3].

1.1.3.2 Ηλεκτρόλυση με τη χρήση πολυμερικής μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM)

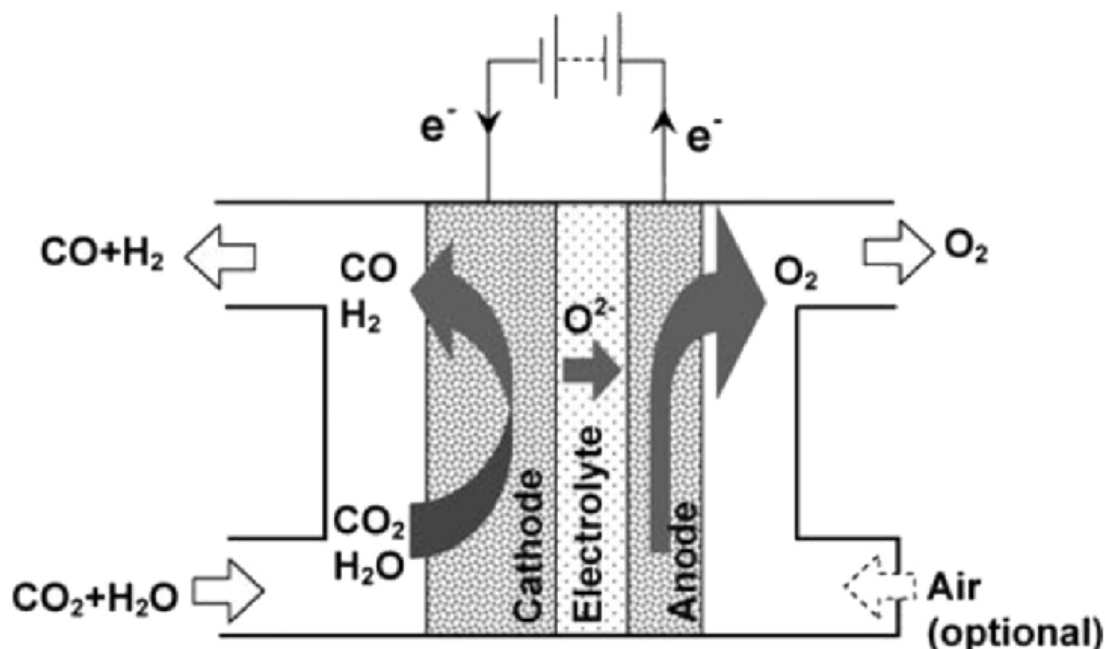
Σε αυτή τη διεργασία χρησιμοποιείται μια οργανική πολυμερική μεμβράνη (Σχήμα 1.7). Σε αυτή την μεμβράνη τα πρωτόνια που παράγονται στην άνοδο μεταφέρονται στην κάθοδο. Οι συσκευές που λαμβάνουν μέρος σε αυτή τη διεργασία μπορούν να αντέξουν πιέσεις που φτάνουν μέχρι και μερικές εκατοντάδες bar [2]. Οι ηλεκτρολύτες PEM είναι πιο αποδοτικοί από τους αλκαλικούς διότι δεν παρουσιάζουν διάβρωση και λειτουργούν σε υψηλότερες πιέσεις [2]. Ωστόσο υστερούν σε σχέση με τους αλκαλικούς καθώς παρουσιάζουν υψηλότερο κόστος και χαμηλή διάρκεια ζωής, με αποτέλεσμα να μην έχουν μεγάλες εμπορικές εφαρμογές [2].



Σχήμα 1.7: Τρόπος λειτουργίας PEM [14].

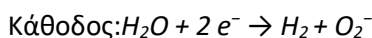
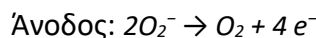
1.1.3.3 Κυψέλες στερεού οξειδίου (SOEC)

Στις κυψέλες στερεού οξειδίου (ή κυψέλες ηλεκτρόλυσης στερεού ηλεκτρολύτη) (Σχήμα 1.8), ένα στερεό οξείδιο ή κεραμικό χρησιμοποιείται ως ηλεκτρολύτης.



Σχήμα 1.8: Τρόπος λειτουργίας SOEC [15].

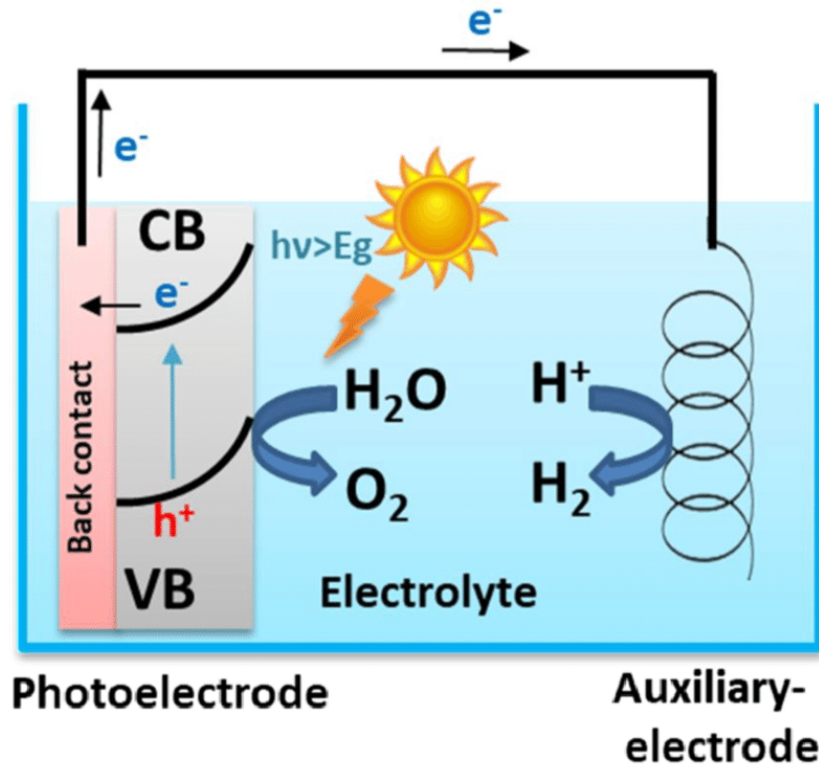
Στην πλευρά της καθόδου παράγεται υδρογόνο από νερό ενώ τα ιόντα οξυγόνου που παράγονται φτάνουν στην άνοδο όπου οξειδώνονται για να παράξουν οξυγόνο σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις [3]:



Οι κυψέλες ηλεκτρόλυσης στερεού καταλύτη λειτουργούν συνήθως μεταξύ $500\text{--}900^\circ\text{C}$, κάτι που προσθέτει ένα πλεονέκτημα έναντι της PEM η οποία λειτουργεί έως 100°C . Ωστόσο, η υποβάθμιση των κυψελών αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για την εμπορική βιωσιμότητα της μεθόδου [6].

1.1.4 Φωτοκαταλυτικές μέθοδοι

Η φωτοηλεκτρόλυση (Σχήμα 1.9) είναι ένας από τους τρόπους παραγωγής υδρογόνου με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ο οποίος βρίσκεται ακόμη σε πειραματική φάση. Αποτελεί τη λιγότερο δαπανηρή και πιο αποτελεσματική μέθοδο παραγωγής υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές.



Σχήμα 1.9: Τρόπος λειτουργίας φωτοηλεκτρόλυσης [16].

Το φωτοηλεκτρόδιο είναι μια ημιαγώγιμη συσκευή που απορροφά την ηλιακή ενέργεια και δημιουργεί ταυτόχρονα την απαραίτητη τάση για την άμεση αποσύνθεση του μορίου του νερού σε οξυγόνο και υδρογόνο. Η φωτοηλεκτρόλυση χρησιμοποιεί ένα φωτοηλεκτροχημικό (PEC) σύστημα συλλογής φωτός για την οδήγηση της ηλεκτρόλυσης του νερού. Εάν το ημιαγώγιμο φωτοηλεκτρόδιο βυθιστεί σε έναν υδατικό ηλεκτρολύτη που εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία, θα παράξει αρκετή ηλεκτρική ενέργεια για να υποστηρίξει τις προκαλούμενες αντιδράσεις υδρογόνου και οξυγόνου. Κατά την παραγωγή υδρογόνου, τα ηλεκτρόνια απελευθερώνονται στον ηλεκτρολύτη, ενώ η παραγωγή οξυγόνου απαιτεί ελεύθερα ηλεκτρόνια. Η αντίδραση εξαρτάται από τον τύπο του υλικού του ημιαγωγού και από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας [5].

Το φωτοηλεκτρόδιο αποτελείται από φωτοβολταϊκά (ημιαγωγικά), καταλυτικά και προστατευτικά στρώματα, τα οποία μπορούν να μοντελοποιηθούν ως ανεξάρτητα στοιχεία. Κάθε στρώμα παίζει σημαντικό ρόλο και επηρεάζει τη συνολική απόδοση του συστήματος [5]. Το φωτοβολταϊκό στρώμα αποτελείται από υλικά ημιαγωγών που απορροφούν το φως. Τα καταλυτικά στρώματα του φωτοηλεκτροχημικού στοιχείου επηρεάζουν, επίσης, την απόδοση της ηλεκτρόλυσης και απαιτούν κατάλληλους

καταλύτες για τη διάσπαση του νερού. Το προστατευτικό στρώμα εμποδίζει τον ημιαγωγό να διαβρωθεί μέσα στον υδατικό ηλεκτρολύτη. Για να επιτευχθεί φωτοκαταλυτική διάσπαση νερού, οι φωτοκαταλύτες πρέπει να πληρούν ορισμένα χαρακτηριστικά: να απορροφούν το ορατό φως, να είναι χημικά σταθεροί υπό συνθήκες οξειδοαναγωγής, να έχουν χαμηλό κόστος, να είναι ανακυκλώσιμοι, να είναι χημικά ανθεκτικοί και να είναι προσαρμόσιμοι για μεγάλης κλίμακας παραγωγή υδρογόνου [5].

1.1.5 Παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι κυριότερες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι οι εξής:

- Αεριοποίηση βιομάζας
- Πυρόλυση
- Αναμόρφωση υδατικής φάσης
- Σκοτεινή ζύμωση
- Βιοφωτόλυση
- Ζύμωση με αέριο
- Ζύμωση παρουσία φωτός

1.1.5.1 Αεριοποίηση βιομάζας

Η βιομάζα μπορεί να προέρχεται από ζωικά και αστικά στερεά απόβλητα, υπολείμματα καλλιεργειών, γεωργικά απόβλητα, πριονίδι, υδρόβια φυτά κ.α. [2].

Η τεχνολογία αεριοποίησης που χρησιμοποιείται συνήθως με τη βιομάζα και τον άνθρακα ως πρώτη ύλη καυσίμου αποτελεί μία ώριμη τεχνολογία και βρίσκει πολλές εμπορικές εφαρμογές. Βασίζεται στη μερική οξείδωση της πρώτης ύλης σε ένα μείγμα H_2 , CH_4 , ανώτερων υδρογονανθράκων, CO , CO_2 και N_2 . Η διαδικασία αεριοποίησης έχει χαμηλή θερμική απόδοση αφού η υγρασία που περιέχεται στη βιομάζα πρέπει εξατμιστεί. Μπορεί να γίνει με ή χωρίς καταλύτη και σε αντιδραστήρα σταθερής ή ρευστοποιημένης κλίνης, με τον τελευταίο αντιδραστήρα να έχει συνήθως καλύτερη απόδοση. Η προσθήκη ατμού ή και οξυγόνου στη διαδικασία αεριοποίησης έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή «αερίου σύνθεσης» (syngas) με το H_2 σε σχέση με το CO να είναι διπλάσιο. Αυτό χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη σε έναν αντιδραστήρα Fischer-Tropsch για την παραγωγή υψηλότερων υδρογονανθράκων (συνθετική βενζίνη και ντίζελ) ή σε αντιδραστήρα WGS για παραγωγή υδρογόνου. Υπέρθερμος ατμός σε θερμοκρασία περίπου $900^\circ C$ έχει χρησιμοποιηθεί για την αναμόρφωση της ξηρής βιομάζας κάτι που οδηγεί σε επίτευξη υψηλών αποδόσεων υδρογόνου. Ωστόσο, κατά τη διαδικασία αεριοποίησης δημιουργούνται σημαντικές ποσότητες «πίσσας» [5]. Ένας

δευτερεύων αντιδραστήρας, ο οποίος χρησιμοποιεί νικέλιο, χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό και την αναβάθμιση του αέριου προϊόντος. Η χρήση οξυγόνου είναι απαραίτητη σε αυτές τις εγκαταστάσεις αεριοποίησης κάτι που είναι απαγορευτικό για τις εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας [5]. Συνήθως, οι αντιδραστήρες αεριοποίησης κατασκευάζονται σε μεγάλη κλίμακα και απαιτούν τεράστιες ποσότητες υλικού για συνεχή τροφοδοσία. Μπορούν να επιτύχουν αποδόσεις της τάξης του 35-50% με βάση τη χαμηλότερη τιμή θέρμανσης [5].

1.1.5.2 Πυρόλυση

Μια άλλη μέθοδος παραγωγής υδρογόνου είναι η πυρόλυση. Σε αυτή τη διεργασία η οργανική ύλη θερμαίνεται και αεριοποιείται σε πίεση από 0,1–0,5 MPa στην περιοχή από 500–900°C απουσία οξυγόνου και αέρα, και επομένως ο σχηματισμός διοξινών μπορεί σχεδόν να αποκλειστεί [5] επίσης, δεν σχηματίζονται οξείδια του άνθρακα (π.χ. CO ή CO₂), εξαλείφοντας την ανάγκη για δευτερεύοντες αντιδραστήρες (WGS, PrOx, κ.λπ.). Κατά συνέπεια, αυτή η διαδικασία προσφέρει σημαντική μείωση των εκπομπών. Ωστόσο, σε περίπτωση που τα υλικά περιέχουν υγρασία θα υπάρξει σημαντική παραγωγή COx. Τα πλεονεκτήματα αυτής της διαδικασίας είναι: η ευελιξία στο καύσιμο, η απλότητα και η μείωση των εκπομπών COx [2]. Με βάση το εύρος της θερμοκρασίας στο οποίο πραγματοποιούνται οι διεργασίες πυρόλυσης χωρίζονται σε χαμηλών θερμοκρασιών (έως 500°C), μεσαίων θερμοκρασιών (500–800°C) και υψηλών θερμοκρασιών (πάνω από 800°C) [5]. Μία από τις προκλήσεις αυτής της διεργασίας είναι η πιθανότητα ρύπανσης από τον σχηματιζόμενο άνθρακα.

1.1.5.3 Αναμόρφωση υδατικής φάσης (APR)

Η αναμόρφωση υδατικής φάσης (APR) είναι μια τεχνολογία υπό ανάπτυξη για την επεξεργασία οξυγονωμένων υδρογονανθράκων ή υδατανθράκων από ανανεώσιμες πηγές βιομάζας για την παραγωγή υδρογόνου. Οι αντιδράσεις σε αυτή τη διεργασία λαμβάνουν χώρα σε σημαντικά χαμηλότερες θερμοκρασίες (220-270° C) από τη συμβατική αναμόρφωση με ατμό αλκανίων (περίπου 600°C) [5]. Οι χαμηλές θερμοκρασίες στις οποίες συμβαίνουν οι αντιδράσεις αναμόρφωσης υδατικής φάσης ελαχιστοποιούν τις ανεπιθύμητες αντιδράσεις αποσύνθεσης που συνήθως συναντώνται όταν οι υδατάνθρακες θερμαίνονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, η αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου (WGS) είναι ευνοϊκή στις ίδιες θερμοκρασίες καθιστώντας έτσι δυνατή τη δημιουργία H₂ και CO₂ σε έναν μόνο αντιδραστήρα με χαμηλές ποσότητες CO. Αντίθετα, οι τυπικές διαδικασίες αναμόρφωσης ατμού απαιτούν πολλαπλά στάδια ή πολλαπλούς αντιδραστήρες για την επίτευξη χαμηλών επιπέδων CO στο τελικό προϊόν. Ένα άλλο πλεονέκτημα της διαδικασίας APR είναι ότι

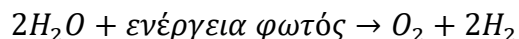
δεν υπάρχει ανάγκη εξάτμισης του νερού κάτι που οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας [5].

1.1.5.4 Σκοτεινή ζύμωση

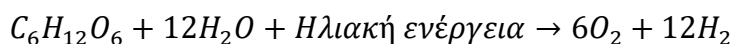
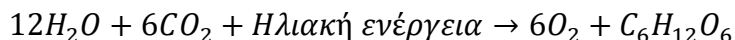
Η σκοτεινή ζύμωση είναι η μετατροπή της βιοχημικής ενέργειας που αποθηκεύεται στην οργανική ύλη σε άλλες μορφές ενέργειας απουσία φωτός. Η παραγωγή υδρογόνου με σκοτεινή ζύμωση έχει πολλά πλεονεκτήματα όπως η ικανότητα παραγωγής υδρογόνου από οργανικά απόβλητα επομένως μπορεί να ενσωματωθεί σε συστήματα επεξεργασίας λυμάτων για την παραγωγή H_2 από λύματα. Η παραγωγή υδρογόνου από οργανικά απόβλητα έχει δυνατότητα μείωσης του κόστους παραγωγής υδρογόνου, δεδομένου ότι είναι οργανική [17].

1.1.5.5 Βιοφωτόλυση

Η βιοφωτόλυση αποτελεί μια διαδικασία «φωτονικής παραγωγής υδρογόνου», στην οποία η διάσπαση του νερού επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας κυανοβακτήρια και γαλαζοπράσινα φύκια. Χωρίζεται σε δύο κατηγορίες: την άμεση βιοφωτόλυση και έμμεση βιοφωτόλυση. Στην άμεση βιοφωτόλυση πραγματοποιείται μια φωτοσυνθετική αντίδραση και χρησιμοποιεί μικροφύκη παρουσία ηλιακής ενέργειας [6]:



Η έμμεση βιοφωτόλυση αποτελείται από δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η φωτοσύνθεση ενώ στο δεύτερο στάδιο παράγεται υδρογόνο και CO_2 [3]:



1.1.5.6 Ζύμωση με αέριο

Στη ζύμωση με αέριο, το υδρογόνο παράγεται από την αντίδραση μονοξειδίου του άνθρακα και νερού παρουσία φωτοσυνθετικών βακτηρίων υπό αναερόβιες συνθήκες, μέσω της συνολικής αντίδρασης. Αν και αυτή η τεχνική είναι πολλά υποσχόμενη για την παραγωγή υδρογόνου, η κατανάλωση υδρογόνου με ομοακετογένεση (σχηματισμός οξικού οξέος από H_2 και CO_2) εξακολουθεί να παραμένει η κύρια πρόκληση. Επίσης μελέτες σε λύματα έχουν δείξει ότι η παραγωγή υδρογόνου εξαρτάται τόσο από το pH όσο και από τη συγκέντρωση του CO . Με αύξησή τους προκαλείται μεγαλύτερη κατανάλωση υδρογόνου κατά την ομοακετογένεση [6].

1.1.5.7 Ζύμωση παρουσία φωτός

Η φωτοζύμωση είναι μια διαδικασία κατά την οποία το υδρογόνο παράγεται από οργανικές ενώσεις μέσω μιας αντίδρασης που καταλύεται από νιτρογενάση, παρουσία φωτεινής ενέργειας, από φωτοσυνθετικά ή αναερόβια βακτήρια. Οι κύριοι περιορισμοί για την εφαρμογή της φωτοζύμωσης σε βιομηχανική κλίμακα είναι η διαθεσιμότητα και η κατανομή του φωτός και η ανάγκη για χημικές ουσίες όπως τα λιπαρά οξέα [6].

1.2 Αποθήκευση υδρογόνου

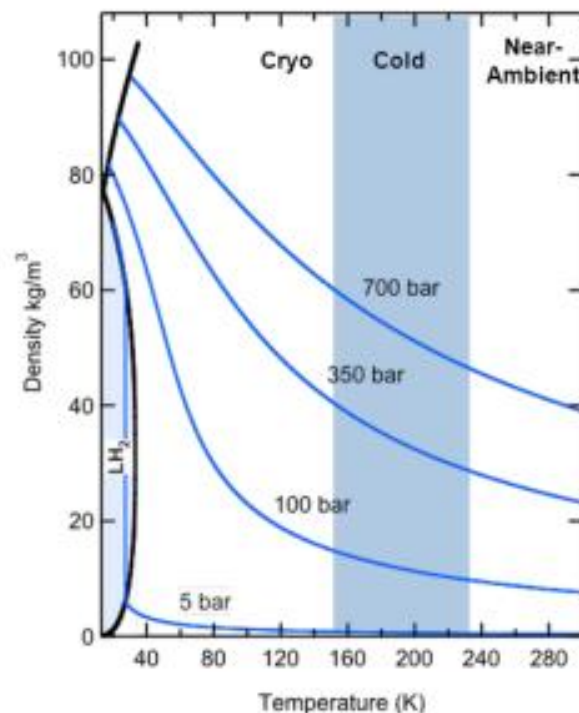
Η επιτυχής και ασφαλής αποθήκευση υδρογόνου είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη εάν αυτό πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως μέρος του μελλοντικού μείγματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου θα μπορούσαν να βοηθήσουν στη δημιουργία μιας πιο πράσινης λύσης για τις ανάγκες παραγωγής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της τροφοδοσίας σε οτιδήποτε, από μικρές ηλεκτρονικές συσκευές μέχρι οχήματα, αεροσκάφη και κτίρια. Ένα άλλο πλεονέκτημα του υδρογόνου είναι ότι μπορεί να ληφθεί με ηλεκτρόλυση από ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, επιτρέποντας ταυτόχρονα στο υδρογόνο να καλύψει μια αντίστοιχη ενεργειακή ζήτηση. Εναλλακτικά, το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σε μεγάλες ποσότητες για παρατεταμένες χρονικές περιόδους. Σε αντίθεση με τις μπαταρίες αυτή η ενέργεια δεν χάνεται με την πάροδο του χρόνου και επομένως μπορεί να παραχθεί και να αποθηκευτεί σε βιομηχανική κλίμακα ως μέρος ενός πράσινου ενεργειακού μείγματος. Αυτό το αποθηκευμένο υδρογόνο μπορεί στη συνέχεια να αποτελέσει εφεδρική παροχή ενέργειας όταν χρειαστεί [18].

Ωστόσο η αποθήκευση του υδρογόνου παρουσιάζει και ορισμένες προκλήσεις. Το υδρογόνο είναι δύσκολο να αποθηκευτεί λόγω της χαμηλής ογκομετρικής του πυκνότητας. Είναι το ελαφρύτερο από όλα τα στοιχεία και έτσι χάνεται εύκολα στην ατμόσφαιρα. Μια άλλη πρόκληση είναι το πολύ χαμηλό σημείο βρασμού του υγρού υδρογόνου ($-252,8^{\circ}\text{C}$), που σημαίνει ότι πρέπει να διατηρείται αποθηκευμένο σε πάρα πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Η αποθήκευση υδρογόνου ως αέριο έχει, επίσης, τις προκλήσεις της καθώς τυπικά απαιτεί τη χρήση δεξαμενών υψηλής πίεσης (35-70MPa) [18]. Το υδρογόνο έχει μια σειρά από ιδιότητες που το καθιστούν ασφαλέστερο από πολλούς άλλους τύπους καυσίμων που χρησιμοποιούνται συνήθως. Είναι μη τοξικό και επειδή είναι ελαφρύτερο από τον αέρα, διαχέεται γρήγορα στην ατμόσφαιρα όταν απελευθερώνεται. Αυτό είναι σημαντικό καθώς σημαίνει ότι το καύσιμο θα διαλυθεί στον αέρα σε περίπτωση ατυχήματος κάτι που δεν συμβαίνει με τη βενζίνη ή το πετρέλαιο. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν κίνδυνοι που σχετίζονται με το

υδρογόνο όπως είναι η χαμηλότερη ενέργεια ανάφλεξης από τη βενζίνη ή το φυσικό αέριο, κάτι που σημαίνει ότι ο εξαερισμός και η ανίχνευση διαρροών είναι απαραίτητα για την ασφαλή λειτουργία ενός συστήματος υδρογόνου. Απαιτούνται, επίσης, ειδικοί ανιχνευτές φλόγας καθώς το υδρογόνο καίγεται με σχεδόν αόρατη φλόγα [18].

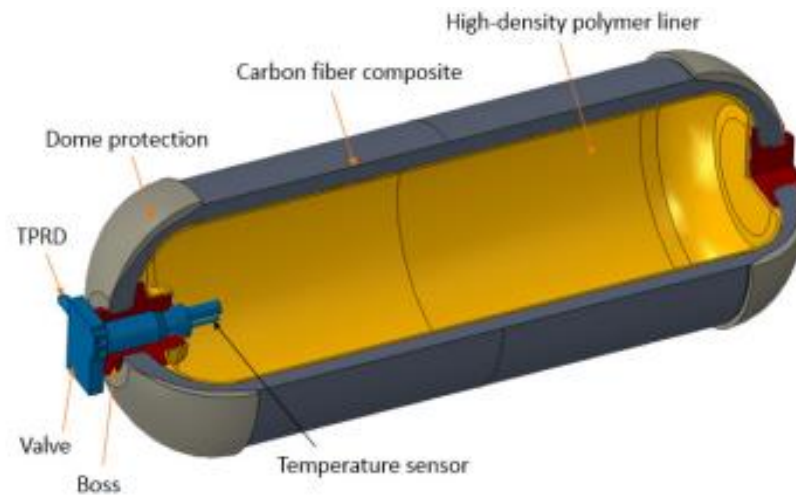
1.2.1 Αποθήκευση με συμπίεση

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος αποθήκευσης υδρογόνου είναι με συμπίεση. Οι πιέσεις μέσα στις δεξαμενές αποθήκευσης ξεπερνούν τα 20MPa. Το συμπιεσμένο υδρογόνο το οποίο χρησιμοποιείται στα οχήματα υδρογόνου αποθηκεύεται σε δεξαμενές όπου η πίεση κυμαίνεται από 35MPa έως 70MPa. Αυτός ο τρόπος αποθήκευσης λόγω των υψηλών πιέσεων που απαιτούνται παρουσιάζει υψηλό κόστος καθώς οι δεξαμενές αποθήκευσης πρέπει να αντέχουν αυτές τις πιέσεις. Για την αύξηση της βαρυμετρικής και ογκομετρικής ικανότητας αποθήκευσης των δεξαμενών χρησιμοποιούνται δεξαμενές οι οποίες είναι ικανές να αποθηκεύσουν υδρογόνο σε κρυογονικές θερμοκρασίες [19]. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο ότι σε σταθερή πίεση και όγκο, η ογκομετρική χωρητικότητα της δεξαμενής αυξάνεται με μείωση της θερμοκρασίας (Σχήμα 1.10).



Σχήμα 1.10: Μεταβολή της πυκνότητας αποθήκευσης του υδρογόνου για διάφορες πιέσεις σε σχέση με τη θερμοκρασία [20].

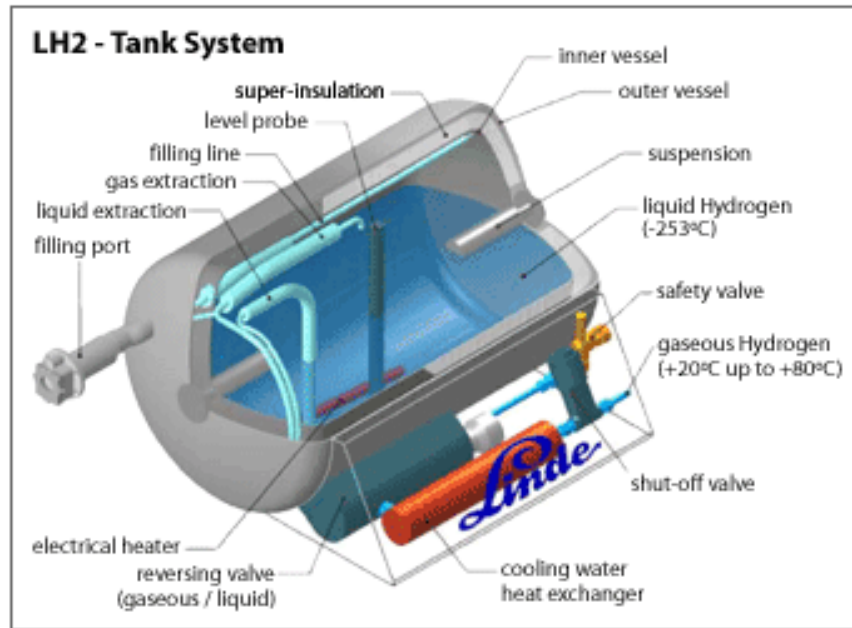
Ένα πρόβλημα που προκύπτει από τη χρήση αυτού του συστήματος είναι η ενέργεια που απαιτείται για τη συμπίεση του αερίου. Περίπου το 20% του ενεργειακού περιεχομένου του υδρογόνου χάνεται με αυτή τη μέθοδο αποθήκευσης. Η ενέργεια που χάνεται για την αποθήκευση υδρογόνου μπορεί να μειωθεί με την ανάπτυξη νέας κατηγορίας δεξαμενών με χρήση νέων υλικών (Σχήμα 1.11) καθώς το κύριο πρόβλημα που συναντάται στα συμβατικά υλικά για χρήση σε αυτές τις δεξαμενές είναι η αστοχία του υλικού σε θραύση λόγω των πολυάριθμων κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης [19].



Σχήμα 1.11: Δεξαμενή πίεσης για αποθήκευση υδρογόνου σε οχήματα κατασκευασμένη από σύνθετα υλικά [20].

1.2.2 Αποθήκευση με υγροποίηση

Η ενεργειακή πυκνότητα του υδρογόνου μπορεί να βελτιωθεί με την αποθήκευσή του σε υγρή κατάσταση. Αυτή η τεχνολογία αναπτύχθηκε κατά την πρώιμη διαστημική εποχή στα διαστημικά σκάφη, αλλά σήμερα χρησιμοποιείται και στις κυψέλες καυσίμου [19]. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας δεξαμενής φαίνεται στο Σχήμα 1.12.



Σχήμα 1.12: Σύστημα δεξαμενής αποθήκευσης υγρού υδρογόνου [19]

Επιπλέον, είναι δυνατός ο συνδυασμός υγρού υδρογόνου με ένα υδρίδιο μετάλλου, όπως το Fe-Ti διότι με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιούνται οι απώλειες υδρογόνου λόγω βρασμού. Σε αυτή τη μέθοδο η αέρια φάση συμπιέζεται σε υψηλότερη πίεση από αυτή που υγροποιείται σε κρυογονική θερμοκρασία σε δεξαμενή υγρού υδρογόνου [19]. Η χαμηλή θερμοκρασία διατηρείται με τη χρήση υγρού ηλίου. Το υδρογόνο δεν υγροποιείται μέχρι έως ότου φτάσει τους -253°C κάτι το οποίο όμως απαιτεί ενέργεια. Τα προβλήματα που παρουσιάζονται σε αυτή τη μέθοδο αποθήκευσης υδρογόνου είναι τα εξής: λόγω του βρασμού του υδρογόνου το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για την υγροποίησή του είναι πολύ υψηλό όπως, επίσης, υψηλός είναι ο όγκος, το βάρος και το κόστος της δεξαμενής. Περίπου το 40% του ενεργειακού περιεχομένου του υδρογόνου μπορεί να χαθεί σε αυτή τη μέθοδο αποθήκευσης [19].

Το θεωρητικό έργο που απαιτείται για την υγροποίηση του αερίου υδρογόνου σε θερμοκρασία δωματίου είναι $3,23 \text{ kWh/kg}$, αλλά το τεχνικό έργο είναι περίπου $15,2 \text{ kWh/kg}$. Η αεριοποίηση υγρού υδρογόνου μέσα στο κρυογονικό ($21,2 \text{ Kelvin}$) δοχείο είναι μια αναπόφευκτη απώλεια ακόμη και με μια τέλεια τεχνική μόνωσης. Το υγρό υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί μόνο σε ανοιχτό σύστημα, διαφορετικά η πίεση σε ένα κλειστό σύστημα μπορεί να φτάσει τα 1.000 MPa σε θερμοκρασία δωματίου [21]. Η σχετικά μεγάλη ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την υγροποίηση και ο συνεχής βρασμός του υγρού περιορίζουν αυτό το σύστημα αποθήκευσης σε χρήσεις όπου το κόστος του υδρογόνου δεν παίζει τόσο μεγάλο ρόλο και το υδρογόνο

καταναλώνεται σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, π.χ. σε εναέριες και διαστημικές εφαρμογές [21].

1.2.3 Αποθήκευση υδρογόνου σε υδρίδια μετάλλων

Ορισμένα μέταλλα και κράματα απορροφούν υδρογόνο και σχηματίζουν υδρίδια. Υπάρχουν δύο κατηγορίες υδριδίων: τα μεταλλικά υδρίδια και τα σύμπλοκαυδρίδια. Η κύρια διαφορά τους είναι η μετάβαση των μετάλλων σε ιοντικές ή ομοιοπολικές ενώσεις όσον αφορά στα σύμπλοκαυδρίδια κατά την απορρόφηση του υδρογόνου. Ορισμένα από τα μεταλλικά υδρίδια που είναι κατάλληλα για την αποθήκευση υδρογόνου φαίνονται στον Πίνακα 1.1.

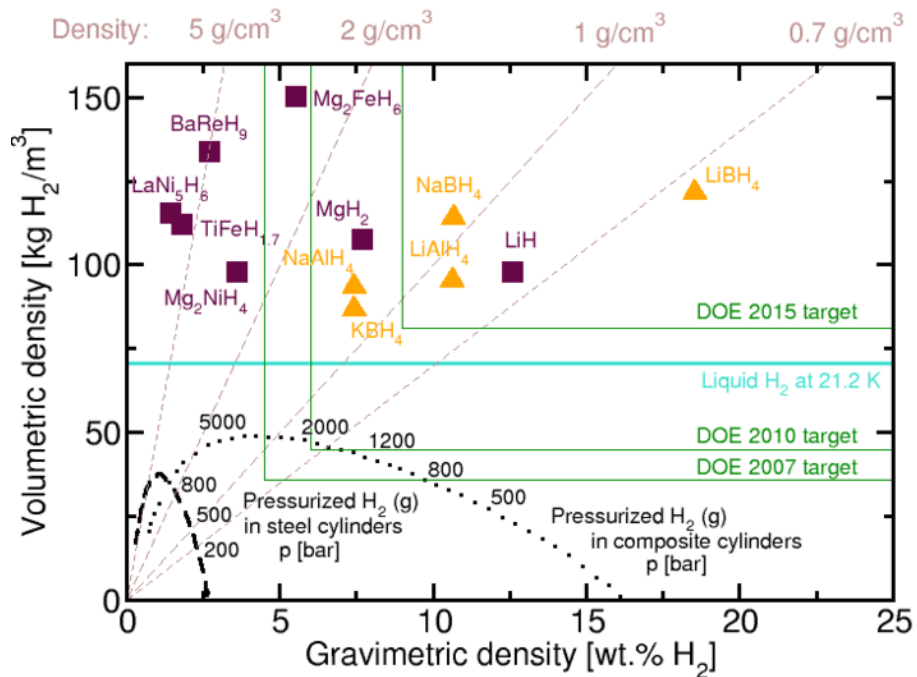
Πίνακας 1.1: Οι πιο σημαντικές οικογένειες υδριδίων που σχηματίζονται σε ενώσεις [21].

Διαμεταλλική ένωση	Χημική ένωση για σχηματισμό υδριδίου	Υδρίδιο
AB ₅	LaNi ₅	LaNi ₅ H ₆
AB ₅	ZrV ₂ , ZrMn ₂ , TiMn ₂	ZrV ₂ H _{5.5}
AB ₃	CeNi ₃ , YFe ₃	CeNi ₃ H ₄
A ₂ B ₇	Y ₂ Ni ₇ , Th ₂ Fe ₇	Y ₂ Ni ₇ H ₃
A ₆ B ₂₃	Y ₆ Fe ₂₃	Ho ₆ Fe ₂₃ H ₁₂
AB	TiFe	TiFeH ₂
A ₂ B	Mg Ni, Ti ₂ Ni	Mg ₂ NiH ₄

Οι χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός μεταλλικού υδριδίου αποτελούνται από δύο στοιχεία. Το στοιχείο A είναι συνήθως ένα μέταλλο αλκαλικής γαίας και τείνει να σχηματίζει ένα σταθερό υδρίδιο. Το στοιχείο B είναι συχνά ένα μέταλλο μετάπτωσης και σχηματίζει μόνο ασταθή υδρίδια. Το νικέλιο χρησιμοποιείται συχνά ως στοιχείο B, καθώς είναι ένας εξαιρετικός καταλύτης για τη διάσταση του υδρογόνου [21].

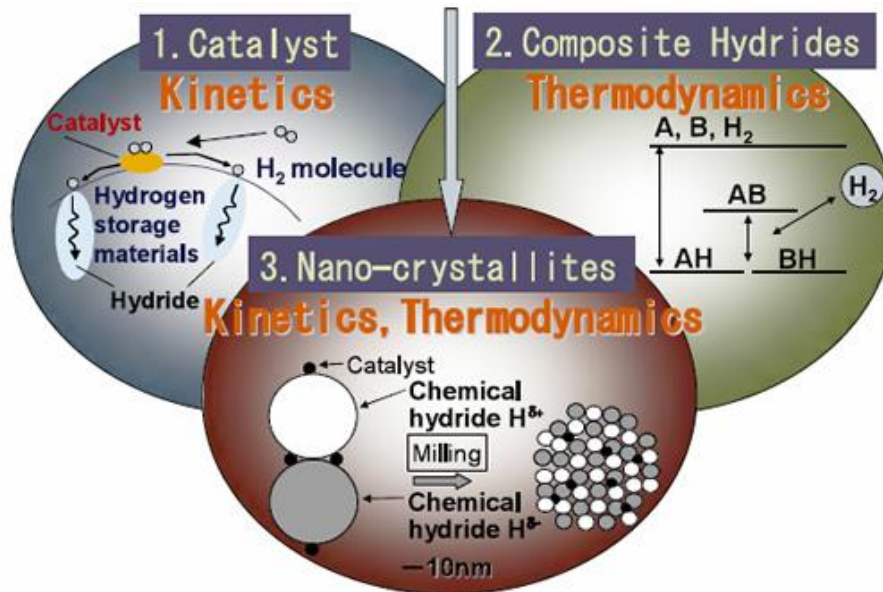
Στοιχεία των ομάδων I, II και III, π.χ. Li, Mg, B, Al, δημιουργούν μια μεγάλη ποικιλία από σύμπλοκα μετάλλου-υδρογόνου. Αυτού του είδους τα σύμπλοκα εμφανίζουν την υψηλότερη ογκομετρική πυκνότητα, 150 kg/m³ στα Mg₂FeH₆ και Al(BH₄)₃, και την υψηλότερη βαρυμετρική πυκνότητα σε θερμοκρασία δωματίου που είναι γνωστή σήμερα στο LiBH₄ (18 wt%) [21]. Αρχικά, κράματα μετάλλων, όπως τα LaNi₅, TiFe και MgNi προτάθηκαν για χρήση στις δεξαμενές αποθήκευσης αφού με χημική υδρογόνωση σχηματίζουν υδρίδια μετάλλων. Τελευταία, το υδρογόνο μπορεί να απελευθερωθεί με αφυδρογόνωση μεταλλικών υδριδίων με ελαφρά στοιχεία (δυσιαδικά υδρίδια και σύμπλοκαυδρίδια) λόγω των μεγάλων βαρυμετρικών τους

πυκνοτήτων σε H_2 σε υψηλή θερμοκρασία [19]. Όσον αφορά τις εφαρμογές οχημάτων, τα υδρίδια μετάλλων (MHs) μπορούν να διακριθούν σε υλικά υψηλής ή χαμηλής θερμοκρασίας. Αυτό εξαρτάται από τη θερμοκρασία στην οποία λαμβάνει χώρα η απορρόφηση ή η εκρόφηση του υδρογόνου. Τα κράματα με βάση το La και το Ti είναι παραδείγματα ορισμένων υλικών χαμηλής θερμοκρασίας με κύριο μειονέκτημά τους ότι παρέχουν πολύ χαμηλή βαρυμετρική πυκνότητα. Οι αντίστοιχες δυνατότητες αποθήκευσης υδρογόνου των υδριδίων μετάλλων εμφανίζονται στο Σχήμα 1.13.



Σχήμα 1.13: Ογκομετρικές και βαρυμετρικές πυκνότητες αποθήκευσης υδρογόνου διαφορετικών μεταλλικών υδριδίων [19].

Για την αποθήκευση υδρογόνου μπορούν να χρησιμοποιηθούν και νανοσύνθετα υλικά (Σχήμα 1.14).



Σχήμα 1.14: Τρόπος λειτουργίας νανοσύνθετων υλικών για αποθήκευση υδρογόνου [19].

Αυτά περιλαμβάνουν έναν καταλύτη για την αύξηση του ρυθμού της αντίδρασης και σύνθετα χημικά υδρίδια σε κλίμακα νανομέτρων. Επίσης, με την τροποποίηση χημικών ιδιοτήτων προκαλείται αύξηση στην ενέργεια αλληλεπίδρασης. Αυτό μπορεί να συμβεί για παράδειγμα με την επεξεργασία της επιφάνειας, μέσω ανταλλαγής ιόντων [19]. Για παράδειγμα, τα νανοσωματίδια Ni με κελύφος δημητρίου αύξησαν την ποσότητα της απελευθέρωσης υδρογόνου με αύξηση της θερμοκρασίας στους 400°C ενώ για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 400°C παρατηρήθηκε σταδιακή μείωση [22].

1.2.4 Αποθήκευση υδρογόνου σε νανοδομημένο / πορώδες υλικό

Οι βασικές κατηγορίες πορώδων υλικών, ανάλογα με τη διάμετρο του πόρου τους είναι οι εξής [19]:

- μικροπορώδη με πόρους μικρότερους από 2 nm σε διάμετρο
- μεσοπορώδη με πόρους μεταξύ 2 και 50 nm
- μακροπορώδη με πόρους μεγαλύτερους από 50 nm
- νανοπορώδη με διάμετρο πόρων μικρότερη από 100 nm.

Έτσι για την αποθήκευση του H₂ χρησιμοποιούνται ζεόλιθοι, μεταλλικά οργανικά πλαίσια, και νανοσωλήνες άνθρακα που είναι πορώδη υλικά.

1.2.4.1 Ζεόλιθοι

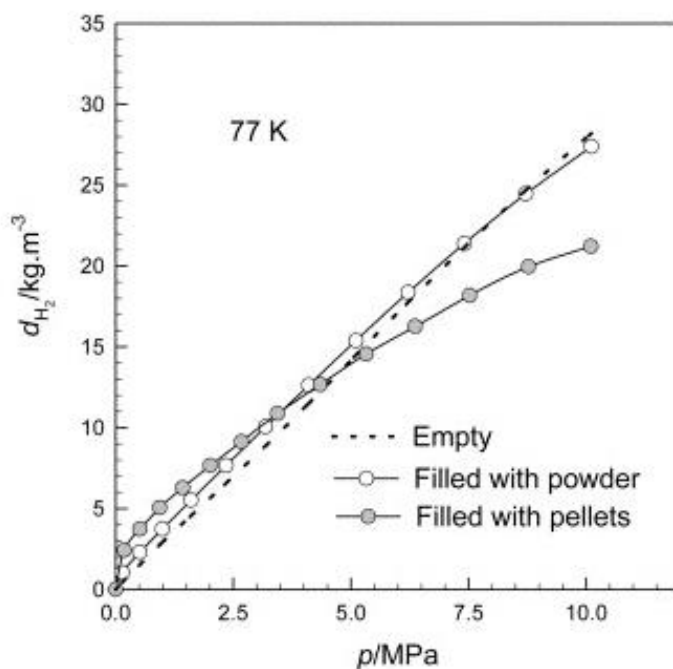
Ο ζεόλιθος είναι ένα μικροπορώδες στερεό που χρησιμοποιείται εμπορικά στην κατάλυση και το διαχωρισμό αερίων. Οι ζεόλιθοι είναι πολύ καλοί υποψήφιοι για μέσο αποθήκευσης υδρογόνου λόγω της δομικής και υψηλής θερμικής σταθερότητάς τους, της μεγάλης εσωτερικής επιφάνειας, του χαμηλού κόστους και της ρυθμιζόμενης σύνθεσης. Επιπλέον, πρόκειται για ένα υλικό που χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικές διεργασίες για πολλές δεκαετίες. Έρευνες έχουν δείξει ότι η δυνατότητα αποθήκευσης υδρογόνου των ζεόλιθων είναι μικρότερη του 2,0 wt% σε κρυογονικές θερμοκρασίες και μικρότερη του 0,3 wt% σε θερμοκρασίες δωματίου και άνω [19]. Η ειδική δομική διαμόρφωση του ζεόλιθου έχει μεγάλη επιρροή στις ιδιότητες που σχετίζονται με την προσρόφηση, την εκλεκτικότητα και την κινητικότητα των φιλοξενούμενων μορίων. Μια σημαντική ιδιότητα των ζεόλιθων είναι η υψηλή τους ικανότητα ανταλλαγής ιόντων η οποία επιτρέπει τον άμεσο χειρισμό του διαθέσιμου κενού χώρου μέσα στο υλικό και επηρεάζει τις χημικές ιδιότητες των θέσεων δέσμευσης κάτι που με τη σειρά του επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ικανότητα αποθήκευσής τους [19].

1.2.4.2 Μεταλλικά οργανικά πλαίσια

Τα μεταλλικά οργανικά πλαίσια (MOFs) είναι κρυσταλλικά πορώδη δίκτυα που αποτελούνται από ιόντα μετάλλων και οργανικές ενώσεις. Τα MOFs έχουν πολύ μεγάλες επιφάνειες, είναι αρκετά πορώδη, έχουν ομοιόμορφα και ρυθμιζόμενα μεγέθη πόρων και καλά καθορισμένες θέσεις κατάληψης υδρογόνου [19]. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν τα MOFs υποψήφια υλικά για αποθήκευση υδρογόνου. Ο ρόλος του εμβαδού της επιφάνειας, του όγκου των πόρων και της θερμότητας προσρόφησης στην πρόσληψη υδρογόνου, τα MOFs αποτελούν αντικείμενο ερευνητικής μελέτης. Για παράδειγμα έχουν αναφερθεί ικανότητες αποθήκευσης υδρογόνου 3,1 wt% στους 77 K σε πίεση 1,6 MPa στο νανοπορώδες υλικό MIL-53 ενώ για το υλικό MIL-101 η ικανότητα αποθήκευσης υδρογόνου στα 8 MPa ήταν 6,1 wt% στους 77 K και 0,43 wt% στους 298 K [19].

1.2.4.3 Νανοσωλήνες άνθρακα

Οι νανοσωλήνες άνθρακα λόγω της κοίλης κυλινδρικής δομής, της μεγάλης επιφάνειας και της χημικής και θερμικής σταθερότητας θεωρούνται υποψήφια υλικά για την απορρόφηση υδρογόνου. Ωστόσο οι πιο πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι αυτά τα υλικά δεν είναι τα καταλληλότερα για αυτή τη χρήση διότι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.15, η μάζα ανά μονάδα όγκου που έχει την ικανότητα να αποθηκεύσει ένα σύστημα που δεν χρησιμοποιεί νανοσωλήνες άνθρακα σε σχέση με αυτό που χρησιμοποιεί είναι η ίδια για μια συγκεκριμένη τιμή πίεσης και θερμοκρασίας.



Σχήμα 1.15: Αποτελέσματα νανοσωλήνων άνθρακα για αποθήκευση υδρογόνου στους 77 K. Η προσθήκη τους (filled with powder/pellets) δεν είχε κάποιο ουσιαστικό αποτέλεσμα [21].

Πιο συγκεκριμένα η ποσότητα υδρογόνου που μπορεί να αποθηκευτεί σε CNTs, είναι μικρότερη από 1,7 wt% υπό πίεση περίπου 12 MPa και σε θερμοκρασία δωματίου [19], [21]. Ωστόσο, οι CNTs μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρόσθετο σε ορισμένα άλλα υλικά αποθήκευσης υδρογόνου [19].

Ένα άλλο υλικό το οποίο είναι πολλά υποσχόμενο για την αποθήκευση υδρογόνου είναι το γραφένιο. Μπορεί να αποθηκεύσει μεμονωμένα άτομα υδρογόνου σε ένα μεταλλικό πλέγμα μέσω χημικών δεσμών με έναν μεταλλικό ξενιστή. Η αποθήκευση υδρογόνου εξαρτάται επίσης από τον αριθμό των στρωμάτων γραφενίου. Εάν το γραφένιο είναι μονής στρώσης, μπορεί να αποθηκεύσει περισσότερο υδρογόνο σε σύγκριση με δύο στρώματα ή περισσότερα στρώματα. Ο βαθμός υδρογόνωσης των στρωμάτων γραφενίου βρέθηκε επίσης 16,67 wt% και εξαρτάται από το πάχος του γραφενίου. Επιπλέον, αναφέρθηκε επίσης περίπου 100% κάλυψη του γραφενίου από άτομα υδρογόνου [19].

1.2.5 Υπόγεια αποθήκευση υδρογόνου

Για την υπόγεια αποθήκευση υδρογόνου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σπήλαια αλατιού, εξαντλημένα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου ή υδροφορείς. Η αποθήκευση υδρογόνου σε σπήλαιο είναι η πιο ακριβή από τις

παραπάνω επιλογές αλλά και η πιο κατάλληλη [18]. Η εμπειρία μιας τέτοιας αποθήκευσης περιορίζεται σε μερικές τοποθεσίες στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ [18]. Οι πιο συνηθισμένες από αυτές είναι οι εξαντλημένες υπόγειες αποθήκες φυσικού αερίου.

1.2.6 Αποθήκευση υδρογόνου σε δίκτυο αερίου

Ως εναλλακτική λύση το πλεόνασμα υδρογόνου μπορεί να τροφοδοτηθεί στο δημόσιο δίκτυο φυσικού αερίου για τη δημιουργία φυσικού αερίου εμπλουτισμένου με υδρογόνο. Ενώ είναι, γενικά, αποδεκτό ότι αέριο με 10% περιεκτικότητα σε υδρογόνο θα μπορούσε να εισαχθεί στο υπάρχον σύστημα φυσικού αερίου χωρίς να προκαλέσει κάποιο πρόβλημα στους καταναλωτές ή στην υποδομή των αγωγών, ορισμένα μέρη του συστήματος έχουν κριθεί ακατάλληλα για χρήση σε αυτά τα επίπεδα συγκέντρωσης υδρογόνου [18]. Παρ' όλα αυτά, θεωρείται ότι μεγάλες ποσότητες αερίου υδρογόνου θα μπορούσαν να αποθηκευτούν με αυτόν τον τρόπο χρησιμοποιώντας μεγάλο μέρος των ήδη υπαρχόντων δικτύων φυσικού αερίου και στη συνέχεια να μετατραπούν απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω κυψελών καυσίμου υδρογόνου [18].

1.3 Μεταφορά υδρογόνου

Η μεταφορά υδρογόνου μέσω αγωγών αποτελεί την πιο οικονομική επιλογή διανομής μεγάλου όγκου υδρογόνου σε μεγάλες αποστάσεις εντός της ΕΕ και του ΗΒ [23]. Εκτιμάται ότι η διανομή του κοστίζει από €0,11-€0,21/kg/1.000km κατά μέσο όρο, υπερτερώντας της μεταφοράς με πλοίο για όλες τις αποστάσεις εντός Ευρώπης και μεταξύ Ευρώπης και πιθανών γειτονικών εξαγωγικών περιοχών. Η οικονομικά αποδοτική μεταφορά υδρογόνου με αγωγό επιτρέπει τις εισαγωγές υδρογόνου από γειτονικές περιοχές όπως η Βόρεια Αφρική, η Ουκρανία, η Νορβηγία και ενδεχομένως η Μέση Ανατολή με στόχο τη συμπλήρωση της εγχώριας παραγωγής υδρογόνου και της ασφαλούς υποστήριξης του ευρωπαϊκού εφοδιασμού. Όλες οι μέθοδοι μεταφοράς με πλοίο έχουν υψηλό αρχικό κόστος που σχετίζεται με τις απαιτούμενες εγκαταστάσεις για τη μεταφορά του υδρογόνου. Η μεταφορά με πλοίο είναι τρεις έως πέντε φορές ακριβότερη σε σύγκριση με τη μεταφορά με αγωγούς για εισαγωγές από τη Βόρεια Αφρική και τη Σαουδική Αραβία. Για τις εισαγωγές από την Αυστραλία, όπου οι αγωγοί δεν αποτελούν επιλογή, το κόστος μεταφοράς πλοίου εκτιμάται ότι είναι περίπου 1 €/kg H₂ [23].

1.4 Κωδικοποίηση του υδρογόνου ανάλογα με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα κατά τον κύκλο ζωής του

Το επίπεδο καθαρότητας του υδρογόνου περιγράφεται στη βιβλιογραφία με χρωματικές κωδικοποιήσεις. Οι κυριότερες από αυτές είναι το πράσινο, το μπλε και το γκρι [24]. Το «χρώμα» που έχει το υδρογόνο βασίζεται αποκλειστικά στην μέθοδο παραγωγής. Για παράδειγμα, το υδρογόνο που έχει γκρι χρωματική κωδικοποίηση παράγεται με τη χρήση ορυκτών καυσίμων όπως είναι το φυσικό αέριο. Η παραγωγή με αυτή τη μέθοδο έχει αρνητικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο καθώς για έναν τόνο υδρογόνου παράγονται 10 τόνοι διοξειδίου του άνθρακα [25]. Από την άλλη πλευρά, το υδρογόνο που έχει μπλε χρωματική κωδικοποίηση μπορεί να παράγεται και αυτό από ορυκτά καύσιμα ωστόσο παίρνονται παράλληλα μέτρα για δέσμευση και αποθήκευση του άνθρακα. Το υδρογόνο με πράσινη κωδικοποίηση παράγεται από 100% ανανεώσιμες πηγές, όπως η αιολική ή η ηλιακή ενέργεια κάτι που οδηγεί σε περιορισμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Υπάρχουν και άλλες χρωματικές κωδικοποιήσεις όπως το «καφέ» υδρογόνο το οποίο παράγεται από την αεριοποίηση καυσίμου με βάση τον άνθρακα και το «τυρκουάζ» υδρογόνο που παράγεται από τη θερμική αποσύνθεση του φυσικού αερίου. Ωστόσο, η προηγούμενη χρωματική κωδικοποίηση έχει και αδυναμίες. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι πως θεωρεί ότι το πράσινο υδρογόνο έχει πάντα χαμηλότερες εκπομπές άνθρακα από το μπλε ή το γκρι, κάτι το οποίο δεν ισχύει πάντα. Για παράδειγμα, οι πρώτες ύλες βιοενέργειας όπως η βιομάζα εκπέμπουν αέρια του θερμοκηπίου όπως CH_4 , SO_x , NO_x και CO_2 κατά την ανάπτυξή τους ή κατά τις θερμοχημικές τους μετατροπές. Από την άλλη πλευρά, η τεχνική δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα που χρησιμοποιείται στο μπλε υδρογόνο μειώνει σημαντικά τις αέριες εκπομπές. Η κατασκευή φωτοβολταϊκών πάνελ ως τεχνολογία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει, επίσης, σημαντικό αποτύπωμα άνθρακα και δημιουργεί διάφορους τύπους αποβλήτων, υγρών και αέριων. Επιπρόσθετα, το ηλιακό πάνελ έχει διάρκεια ζωής 30 ετών και στη συνέχεια, πρέπει να αντιμετωπιστεί και αυτό ως απόβλητο στο τέλος της ζωής του. Η ακριβής καταγραφή των εκπομπών σε όλες τις διαδικασίες που αφορούν το υδρογόνο αλλά και των εκπομπών του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται σε αυτές, είναι απαραίτητη για τη σωστή εκτίμηση της βέλτιστης παραγωγικής διαδικασίας και χρήσης του υδρογόνου. Οι Al-Qahtani et al. [26] συνέκριναν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις όσον αφορά στην αναμόρφωση μεθανίου με ατμό σε σχέση με τις εξής περιπτώσεις ηλεκτρόλυσης του νερού: ηλεκτρόλυση του νερού χρησιμοποιώντας αιολική ενέργεια, ηλιακή ενέργεια, υδροηλεκτρική ενέργεια, ενέργεια από ηλιακή θερμική αεριοποίηση και ενέργεια από αεριοποίηση βιομάζας. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν η ηλεκτρόλυση με τη χρήση φωτοβολταϊκών (ηλιακή ενέργεια) παρουσίασε τις μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αυτό είναι απόρροια του αυξημένου περιβαλλοντικού αποτυπώματος κατά

το στάδιο της παραγωγής τους καθώς και της σχετικά χαμηλής απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Επομένως από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η χρωματική κωδικοποίηση απαιτεί βελτιώσεις έτσι ώστε να αυξήσει την αξιοπιστία της. Μία πρόταση για βελτίωση της χρωματικής κωδικοποίησης είναι αυτή η οποία έγινε από τους Han et al. [27]. Σε αυτή την πρόταση η χρωματική κωδικοποίηση συνοδευόταν και από δύο αριθμούς π.χ. 80 πράσινο-4. Η παραπάνω κωδικοποίηση σημαίνει ότι η παραγωγή είναι κατά 80% «πράσινη» ενώ το 4 συμβολίζει τις αέριες εκπομπές σε CO₂eq. Το ισοδύναμο διοξειδίου του άνθρακα (CO₂eq) είναι μια μονάδα που βασίζεται στο δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) διαφορετικών αερίων του θερμοκηπίου. Η μονάδα CO₂eq μετρά τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο ενός τόνου αυτών των αερίων θερμοκηπίου σε σύγκριση με τον αντίκτυπο ενός τόνου CO₂.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΗΣ ΥΙΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

Στο παρόν Κεφάλαιο αρχικά γίνεται μία σύγκριση των ιδιοτήτων του υδρογόνου με άλλα συμβατικά καύσιμα που χρησιμοποιούνται στις εμπορευματικές μεταφορές. Στη συνέχεια αναλύεται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και το οικονομικό κόστος που προκύπτουν από τη χρήση του υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών.

2.1 Χαρακτηριστικά του υδρογόνου

Το υδρογόνο θεωρείται ότι μπορεί να αποτελέσει ένα καύσιμο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις μεταφορές. Πρόκειται για ένα «πράσινο» καύσιμο καθώς, κατά τη χρήση του, δεν παράγονται αέριοι ρύποι ενώ παράλληλα η παραγωγή του μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας οποιοσδήποτε πηγές ενέργειας, με την ενέργεια η οποία παράγεται από ανανεώσιμες πηγές να αποτελεί την βέλτιστη επιλογή όσον αφορά στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Περίπου ο μισός πληθυσμός των ΗΠΑ ζει σε περιοχές όπου τα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι αρκετά υψηλά ώστε να επηρεάσουν αρνητικά τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον [28]. Οι εκπομπές από βενζινοκίνητα και πετρελαιοκίνητα οχήματα όπως τα οξείδια του αζώτου και τα σωματίδια αποτελούν σημαντική πηγή επιβάρυνσης του ατμοσφαιρικού αέρα. Τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου που κινούνται με υδρογόνο δεν εκπέμπουν καμία από αυτές τις επιβλαβείς ουσίες παρά μόνο νερό (H_2O) και ζεστό αέρα [28]. Τα οφέλη για το περιβάλλον και την υγεία είναι ακόμη μεγαλύτερα εάν για την παραγωγή υδρογόνου χρησιμοποιηθούν πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή, η αιολική και η πυρηνική ενέργεια ακόμα και ενέργεια από ορυκτά καύσιμα με προηγμένους ελέγχους εκπομπών και δέσμευση άνθρακα. Άλλα πλεονεκτήματα του υδρογόνου τα οποία το έχουν καταστήσει ως ιδανικό υποψήφιο για χρήση ως καύσιμο είναι τα εξής: Το υδρογόνο είναι ένα ελαφρύ, άχρωμο, άοσμο και μη τοξικό αέριο ενώ παράλληλα υπάρχει σε αφθονία στη φύση, επίσης, έχει το υψηλότερο ειδικό ενεργειακό περιεχόμενο από όλα τα συμβατικά καύσιμα και υψηλή ενεργειακή απόδοση της οποίας η τιμή φτάνει τα 120 MJ/kg, που είναι περίπου 2,75 φορές μεγαλύτερη από αυτή των καυσίμων υδρογονανθράκων. Ωστόσο η πυκνότητα του υγρού υδρογόνου είναι πολύ μικρότερη από αυτή της βενζίνης. Αυτές οι ιδιότητες δίνουν το πλεονέκτημα στο υδρογόνο να αποθηκεύει περίπου 2,6 φορές περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα μάζας από τη βενζίνη, που σημαίνει ότι το υδρογόνο έχει υψηλότερη θερμογόνο δύναμη από τη βενζίνη. Αλλά λόγω της χαμηλότερης πυκνότητας χρειάζεται περίπου 4 φορές περισσότερο όγκο από τη βενζίνη για να αποθηκεύσει την ίδια ενέργεια [29]. Οι

ιδιότητες του υδρογόνου σε σχέση με τη βενζίνη, το μεθάνιο και το Diesel φαίνονται στον Πίνακα 2.1:

Πίνακας 2.1: Ιδιότητες υδρογόνου, μεθανίου και βενζίνης [29], [30].

Ιδιότητες	Υδρογόνο	Μεθάνιο	Βενζίνη	Diesel
Μοριακό βάρος (g/mol)	2,016	16,04	110	
Σημείο βρασμού (Κ)	20,2	111,6	310-478	
Πυκνότητα (kg/liter)	-	-	0,75	0,84
Πυκνότητα (kg/Nm ³)(πίεση 1 atm, T=0°C)	0,09	0,72	720-780 (υγρό)	-
Πυκνότητα (kg/Nm ³)(πίεση 1 atm, T=20Κ)	70,9	-	-	-
Ενεργειακό περιεχόμενο (HHV) (MJ/kg)	142	55,5	47,3	-
Ενεργειακό περιεχόμενο (LHV) (MJ/kg)	120	50	44	42,8
Ταχύτητα διάχυσης στον αέρα (m/s)	2	0,51	0,17	-
Όριο ευφλεκτότητας (vol.%)	4-75	5,3-15	1-7,6	-
Όριο εκρηκτικότητας (vol.%)	18,3-59	6,3-13,5	1,1-3,3	-
Ενέργεια ανάφλεξης σε στοιχειομετρικό μίγμα (mJ)	0,02	20	0,24	-
Ταχύτητα φλόγας στον αέρα (cm/s)	265-325	37-45	37-43	-
Τοξικότητα	Μη τοξικό	Μη τοξικό	Τοξικό>50ppm	-

2.2 Ανάλυση περιβαλλοντικού και οικονομικού κόστους που προκύπτει κατά την παραγωγή, αποθήκευση, μεταφορά και τελική χρήση του υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών

Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται συνοπτικά οι διάφορες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου, η ενεργειακή τους απόδοση και το επίπεδο τεχνολογικής τους ετοιμότητας. Όσο μεγαλύτερο βαθμό έχει σε αυτή την κατηγορία μία μέθοδος τόσο πιο τεχνολογικά ώριμη είναι.

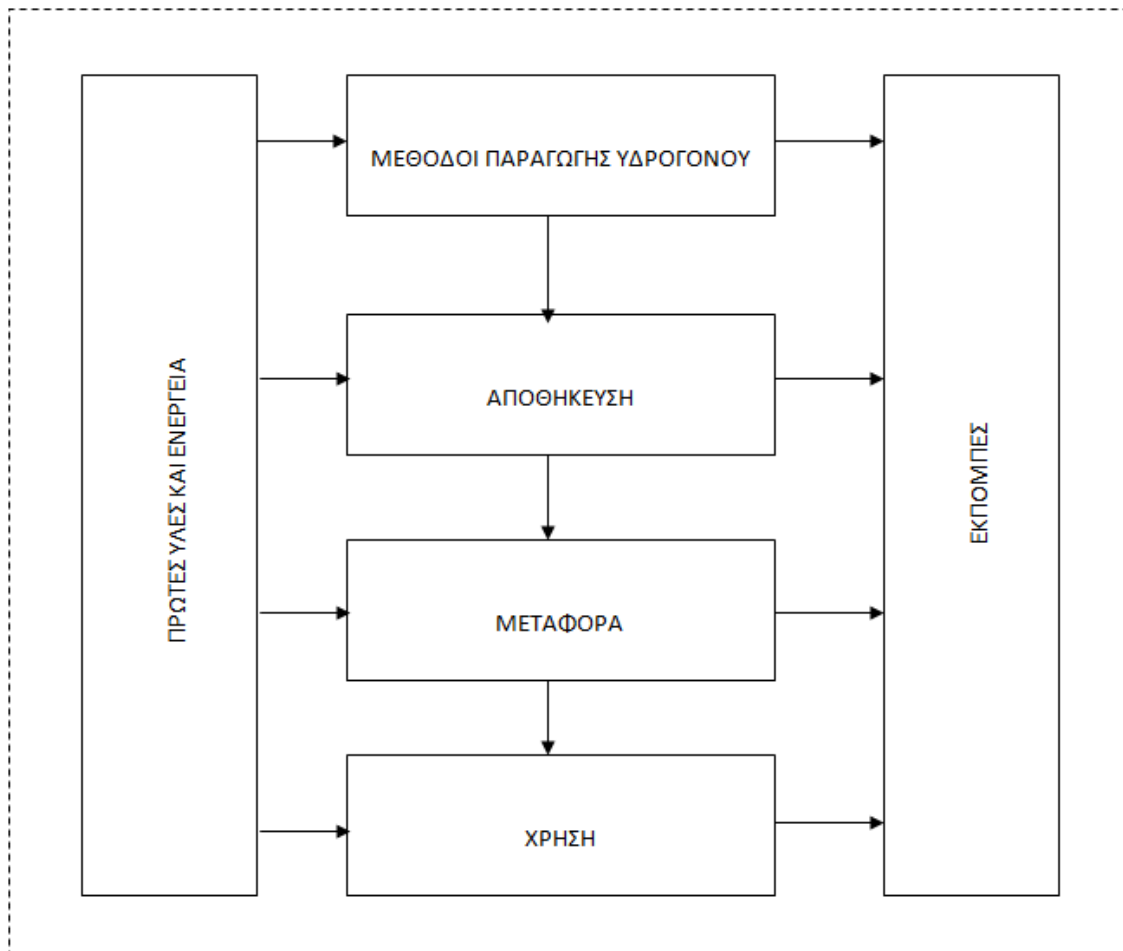
Πίνακας 2.2: Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου ενεργειακή απόδοση και επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας [24].

Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου	Ενεργειακή απόδοση (%)	Επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας (TRL)
Αναμόρφωση φυσικού αερίου με ατμό	74-85	9
Αεριοποίηση άνθρακα	74-85	10
Μερική οξείδωση ορυκτών καυσίμων	60-75	9
Σκοτεινή ζύμωση	60-80	3-5
Ζύμωση παρουσία φωτός	<1	1-3
Αεριοποίηση βιομάζας	35-50	10
Πυρόλυση βιομάζας	35-50	8-10
Αλκαλική ηλεκτρόλυση	61-82	9-10
Φωτοηλεκτρόλυση	0,5-12	1-2
Αναμόρφωση υδατικής φάσης	35-55	5-7
Φωτόλυση	<5	1-3
Παραγωγή υδρογόνου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων	67-84	7-9

Για την ανάλυση του κύκλου ζωής, δηλαδή το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα από την παραγωγή του υδρογόνου μέχρι τη χρήση του στον τομέα των εμπορευματικών μεταφορών πρέπει να ληφθούν υπόψη τα εξής:

- Οι πρώτες ύλες και πρωτογενείς πηγές ενέργειας όπως φυσικό αέριο, άνθρακας, βιομάζα, πυρηνική ενέργεια και νερό
- Οι διαδικασίες παραγωγής υδρογόνου και καθαρισμού υδρογόνου
- Η μέθοδος αποθήκευσης
- Ο τρόπος μεταφοράς υδρογόνου (π.χ. σε υγροποιημένη ή συμπιεσμένη αέρια μορφή με χρήση φορτηγών ή αγωγών)
- Οι εκπομπές κατά την τελική χρήση
- Πιθανά απόβλητα από τα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν, όπως εκπομπές στο έδαφος, τον αέρα και το νερό

Τα παραπάνω στάδια φαίνονται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Στάδια που πρέπει να συμπεριληφθούν για την αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του υδρογόνου.

Οι Ramchandra etal [31] συνέκριναν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των εξής μεθόδων παραγωγής H₂:

- Αναμόρφωση φυσικού αερίου με ατμό
- Αεριοποίηση άνθρακα
- Ηλεκτρόλυση νερού με χρήση αιολικής ενέργειας
- Ηλεκτρόλυση νερού με χρήση ηλιακής ενέργειας

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης φαίνονται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3: Ικανότητα παραγωγής υδρογόνου και περιβαλλοντικό αποτύπωμα για τις κυριότερες μεθόδους παραγωγής υδρογόνου [31].

Μέθοδοι παραγωγής H ₂	Ικανότητα παραγωγής υδρογόνου (kgH ₂ /ημέρα)	GWP (kgCO _{2eq} /kgH ₂)
Αναμόρφωση φυσικού αερίου με ατμό	111.200	11,9
Αεριοποίηση άνθρακα	284.000	11,3
Ηλεκτρόλυση νερού με χρήση αιολικής ενέργειας	14	0,97
Ηλεκτρόλυση νερού με χρήση ηλιακής ενέργειας	160	2,4

Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται εμφανές ότι η ηλεκτρόλυση του νερού με χρήση αιολικής ενέργειας έχει το μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα ωστόσο έχει και τη μικρότερη ικανότητα παραγωγής υδρογόνου. Την μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής υδρογόνου έχουν οι μέθοδοι αναμόρφωσης φυσικού αερίου με ατμό και αεριοποίησης άνθρακα ωστόσο είναι και οι λιγότερο φιλικές προς το περιβάλλον.

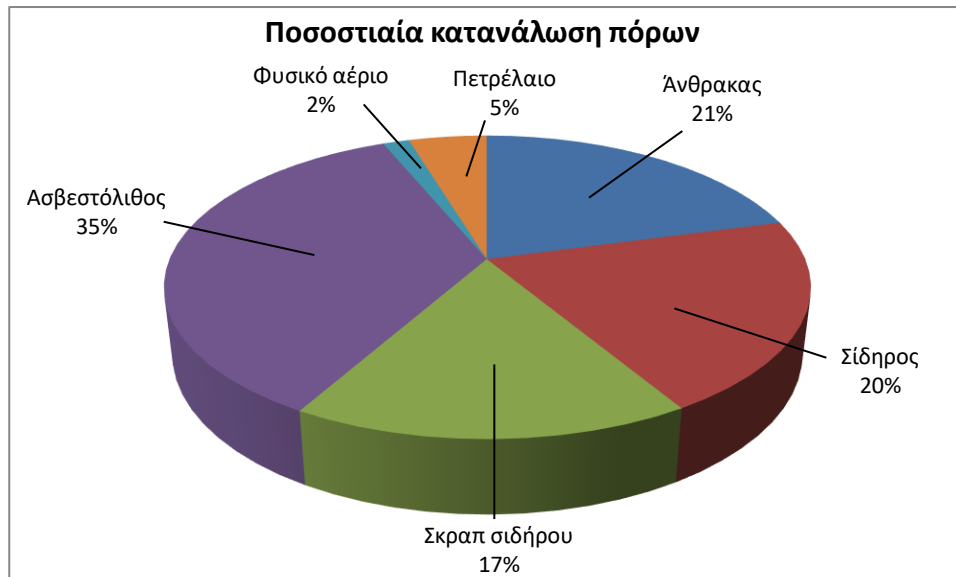
Στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζεται η κατανάλωση πόρων για ένα σύστημα ηλεκτρόλυσης που χρησιμοποιεί αιολική ενέργεια, μία μέθοδος που όπως φάνηκε και προηγουμένως είναι η φιλικότερη προς το περιβάλλον.

Πίνακας 2.4: Μέση κατανάλωση πόρων σε σύστημα ηλεκτρόλυσης με χρήση αιολικής ενέργειας (28).

Πρώτη ύλη	Ποσότητα (g/kgH ₂)	Κατασκευή ανεμογεννητριών (%)	Ηλεκτρόλυση (%)	Αποθήκευση (%)
Άνθρακας	214,7	67	5	27
Σίδηρος	212,2	64	6	30
Σκραπ σιδήρου	174,2	53	8	39
Ασβεστόλιθος	366,6	96	0,3	3
Φυσικό αέριο	16,2	72	15	13
Πετρέλαιο	48,3	76	13	11

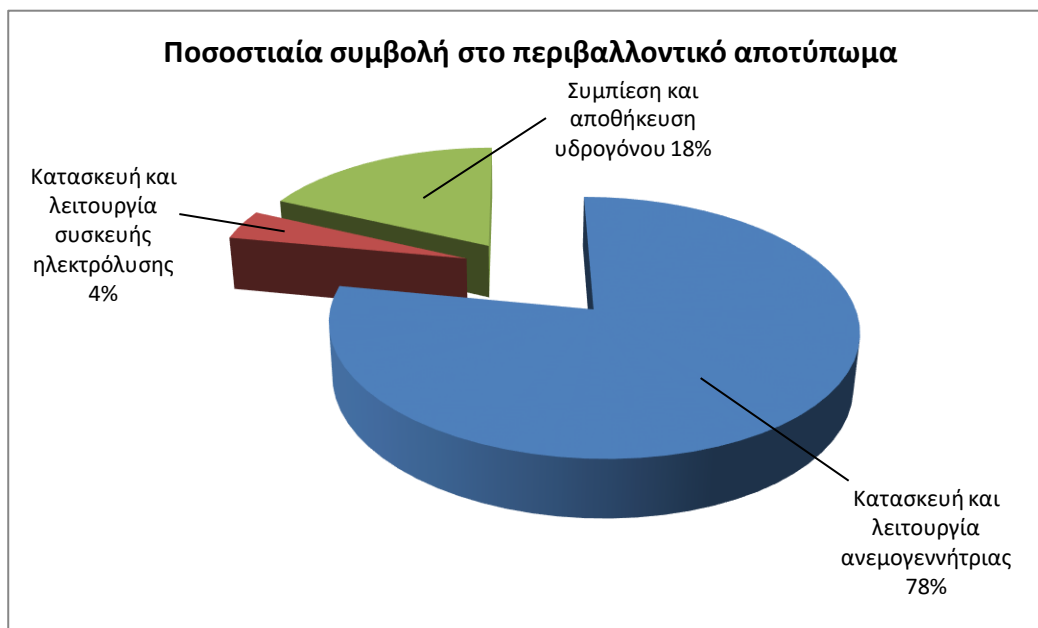
Σε αυτό το σύστημα περιλαμβάνονται οι πόροι για την κατασκευή των ανεμογεννητριών, των δεξαμενών αποθήκευσης κλπ. Τα δεδομένα αναφέρονται σε ένα σύστημα το οποίο αποτελείται από τρεις ανεμογεννήτριες 50 kW και μια συσκευή ηλεκτρόλυσης με ικανότητα 30 Nm³/hr. Αυτή η συσκευή ηλεκτρόλυσης μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε υδρογόνο με απόδοση 85%. Το υδρογόνο συμπιέζεται σε πίεση 20 MPa, αποθηκεύεται και διανέμεται στο σταθμό ανεφοδιασμού.

Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται η συνολική ποσοστιαία κατανάλωση πόρων για αυτή τη μέθοδο



Σχήμα 2.2: Ποσοστιαία κατανάλωση πόρων στην ηλεκτρόλυση με τη χρήση αιολικής ενέργειας [31].

ενώ στο Σχήμα 2.3 φαίνεται η ποσοστιαία συμβολή των κυριότερων παραγόντων για το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της μεθόδου.



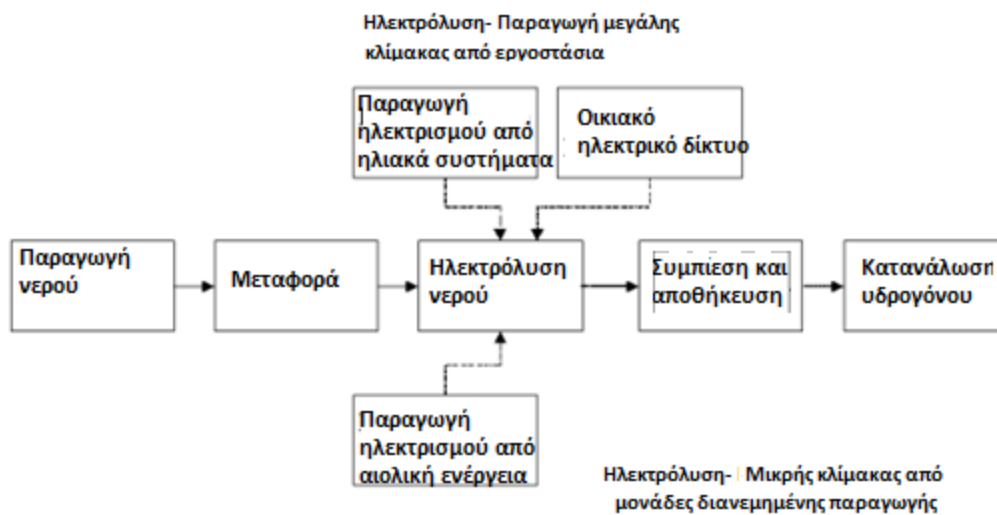
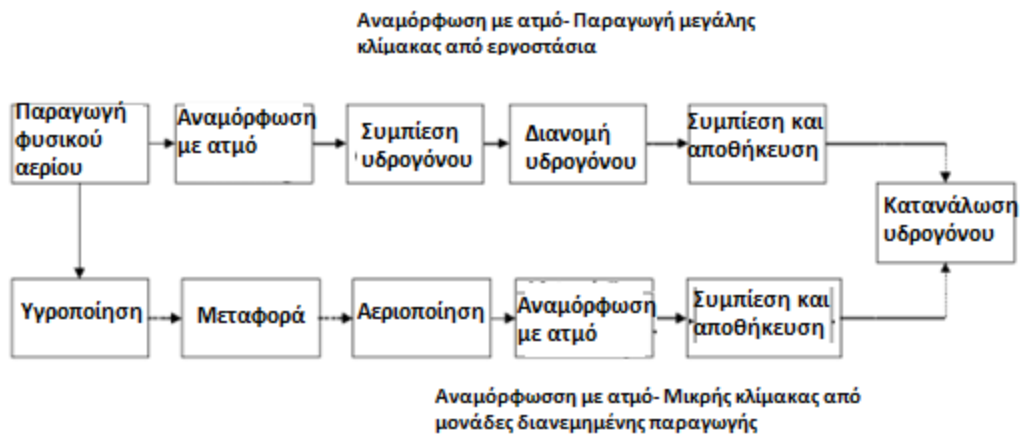
Σχήμα 2.3: GWP (970gCO₂eq./kgH₂) στην ηλεκτρόλυση με χρήση αιολικής ενέργειας [31].

Εκτός από τη μέθοδο παραγωγής το περιβαλλοντικό αποτύπωμα εξαρτάται και από τον τρόπο αποθήκευσης του υδρογόνου στο όχημα. Στον Πίνακα 2.5 φαίνεται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα για κάθε μία από τις τεχνολογίες αποθήκευσης υδρογόνου.

Πίνακας 2.5: Τεχνολογίες αποθήκευσης H₂ στα οχήματα και αντίστοιχες εκπομπές αέριων ρύπων [32].

Τεχνολογίες αποθήκευσης στα οχήματα	Εκπομπές αέριων ρύπων (kgCO _{2eq})
Αποθήκευση υπό πίεση 35MPa (350 bar)	2.210
Αποθήκευση υπό πίεση 70MPa (700 bar)	2.670
Αποθήκευση υπό πίεση σε κρυογονικές θερμοκρασίες	1.490
Αποθήκευση με σωματίδια MOF-5	2.440

Ωστόσο για να αποτελέσει το υδρογόνο μία βιώσιμη λύση στον τομέα των μεταφορών σημαντικό παράγοντα εκτός από το περιβαλλοντικό αποτύπωμα παίζει και το οποιοδήποτε κόστος. Οι Khzouz et al [33] έκαναν ανάλυση κύκλου κόστους των μεθόδων παραγωγής του υδρογόνου. Οι μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου και τα στάδια που περιλαμβάνονται σε αυτές φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



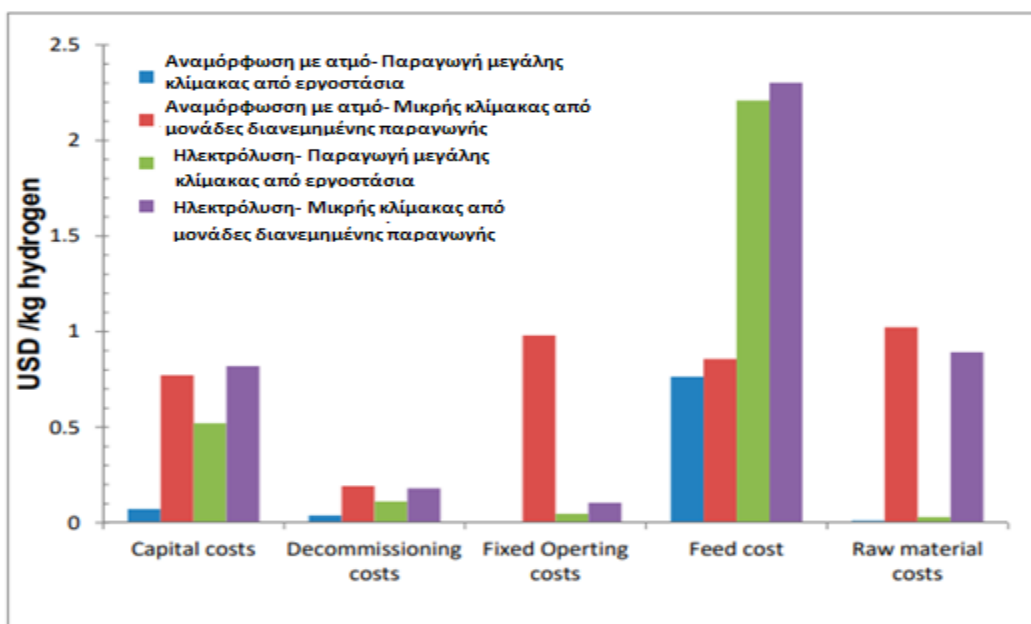
Σχήμα 2.4: Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου και τα στάδια που περιλαμβάνονται σε αυτές σύμφωνα με τους Khzouz etal [33].

Τα αποτελέσματα από την ανάλυση φαίνονται στον Πίνακα 2.6 και στο Σχήμα 2.5.

Πίνακας 2.6: Κόστος κύκλου ζωής για διαφορετικές μεθόδους παραγωγής υδρογόνου [33].

Μέθοδος παραγωγής	Κόστος ζωής για παραγωγή και αποθήκευση (\$/kg)
Αναμόρφωση με ατμό - Παραγωγή μεγάλης κλίμακας από εργοστάσια	0,90
Αναμόρφωση με ατμό - Μικρής κλίμακας από μονάδες διανεμημένης παραγωγής	3,83
Ηλεκτρόλυση - Παραγωγή μεγάλης κλίμακας από εργοστάσια	2,92
Ηλεκτρόλυση - Μικρής κλίμακας από μονάδες διανεμημένης παραγωγής	4,30

Από τον Πίνακα 2.6 φαίνεται ότι η αναμόρφωση με ατμό η οποία πραγματοποιείται σε μεγάλη κλίμακα από εργοστάσια παρουσιάζει το χαμηλότερο κόστος κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής (0,90 USD/kg). Η πιο ακριβή διαδικασία για την παραγωγή υδρογόνου και αποθήκευση βρέθηκε ότι ήταν η ηλεκτρόλυση μικρής κλίμακας από μονάδες διανεμημένης παραγωγής με τιμή 4,30 USD/kg. Οι κύριοι παράμετροι που επηρεάζουν το κόστος της συγκεκριμένης διαδικασίας είναι: το κόστος τροφοδοσίας (feed cost), το κόστος για τις πρώτες ύλες (raw material cost) το κόστος κεφαλαίου (capital cost) και τα λειτουργικά κόστη όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος για διαφορετικές μεθόδους παραγωγής υδρογόνου [33].

Ο Banerjee [34] συνέκρινε το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και το κόστος για διαφορές μεθόδους παραγωγής υδρογόνου, για μεθόδους αποθήκευσης υδρογόνου πάνω στο όχημα και για μεθόδους αποθήκευσης υδρογόνου στο σταθμό ανεφοδιασμού (Πίνακες 2.7-2.10)

Πίνακας 2.7: Σύγκριση κόστους, εκπομπών και κατανάλωσης ενέργειας διαφόρων μεθόδων παραγωγής υδρογόνου [34].

	Αναμόρφωση μεθανίου με ατμό	Ηλεκτρόλυση με χρήση ηλιακής ενέργειας	Ηλεκτρόλυση με χρήση αιολικής ενέργειας	Αεριοποίηση βιομάζας
Χρήση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (MJ/kg)	182	67,5	12,4	67,7
GHG (kg/kg H ₂)	12,8	3,75	0,98	5,4
Κόστος κύκλου ζωής (€/kg)	0,57	14,45	4,74	0,53

Από τον Πίνακα 2.7 προκύπτει ότι η αναμόρφωση με ατμό είναι αυτή με τη μεγαλύτερη περιβαλλοντική επιβάρυνση ενώ η ηλεκτρόλυση με τη χρήση ηλιακής ενέργειας αυτή με το μεγαλύτερο κόστος.

Πίνακας 2.8: Κόστος και κατανάλωση πόρων για διάφορες μεθόδους αποθήκευσης και διαδικασίες μετατροπής ενέργειας στο όχημα [34].

Μέθοδος αποθήκευσης στο όχημα	Συσκευή μετατροπής ενέργειας	Κόστος (€/km)	GHG (g/km)	Χρήση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (MJ/km)	Κατανάλωση H ₂ MJ/km
Συμπιεσμένο H ₂	Κυψέλες καυσίμου	0,25	17,8	0,24	0,83
Υγροποιημένο H ₂	Κυψέλες καυσίμου	0,25	17,8	0,24	0,80
Αποθήκευση σε μεταλλικό υδρίδιο	Κυψέλες καυσίμου	0,26	26,9	0,36	0,88

Συμπιεσμένο H₂	Κινητήρας εσωτερικής καύσης	0,015	-	-	2,47
Υγροποιημένο H₂	Κινητήρας εσωτερικής καύσης	0,016	-	-	2,32
Αποθήκευση σε μεταλλικό υδρίδιο	Κινητήρας εσωτερικής καύσης	0,049	32	0,42	2,74

Από τον Πίνακα 2.8 προκύπτει ότι η αποθήκευση υγροποιημένου υδρογόνου στο όχημα με χρήση κυψελών καυσίμου έχει το μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο ενώ σε όρους κόστους η χρήση κινητήρα εσωτερικής καύσης για την καύση του υδρογόνου ανεξάρτητα από τη μέθοδο αποθήκευσης παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά.

Όσον αφορά στην αποθήκευση σε σταθμούς τροφοδοσίας, η αποθήκευση σε μεταλλικά υδρίδια είναι η καλύτερη επιλογή από περιβαλλοντικής πλευράς αλλά και η πιο κοστοβόρα (Πίνακας 2.9).

Πίνακας 2.9: Κόστος και περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε όρους εκπομπών και κατανάλωσης ενέργειας για διάφορες μεθόδους αποθήκευσης υδρογόνου σε σταθμούς τροφοδοσίας [34].

Παράμετροι	Συμπιεσμένο υδρογόνο	Υγρό υδρογόνο	Αποθήκευση σε μεταλλικά υδρίδια
Κόστος μεταφοράς και αποθήκευσης (€/kg)	0,10	0,5	0,40
Εκπομπές (kg/kg)	1,24	7,2	0,28
Χρήση μη ανανεώσιμης ενέργειας (MJ/kg)	12,72	74	3,84

Τέλος, όσον αφορά τον Πίνακα 2.10 τη μικρότερη κατανάλωση ενέργειας για διαδρομή 1km παρουσιάζει η αποθήκευση του υδρογόνου σε δεξαμενή υψηλής πίεσης ενώ τη χειρότερη η αποθήκευση σε υδρίδιο Mg.

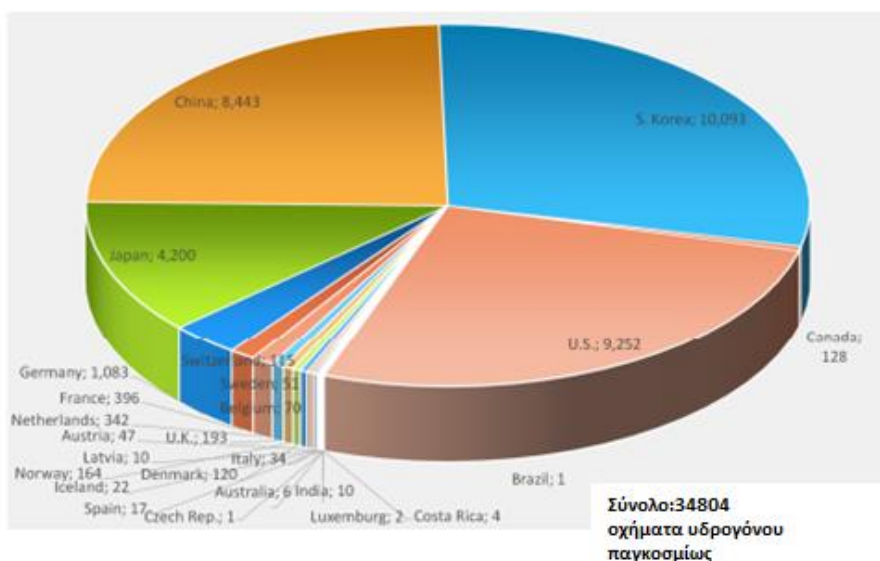
Πίνακας 2.10: Κατανάλωση ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια ζωής για διάφορες τεχνικές αποθήκευσης υδρογόνου για απόσταση 1 km [31].

	Αποθήκευση σε δεξαμενή υψηλής πίεσης	Αποθήκευση σε δεξαμενή κρυογονικών θερμοκρασιών	Αποθήκευση σε υδρίδιο FeTi	Αποθήκευση σε υδρίδιο Mg
Κατανάλωση H ₂ (gms)	6,24	6,4	8,04	9,7
Ενέργεια για τη παραγωγή και αποθήκευση H ₂ (kJ)	1.260,7	2.175,7	1.473,7	1.777
Ενέργεια για τη παραγωγή της δεξαμενής (kJ)	34,2	15,6	177,3	60

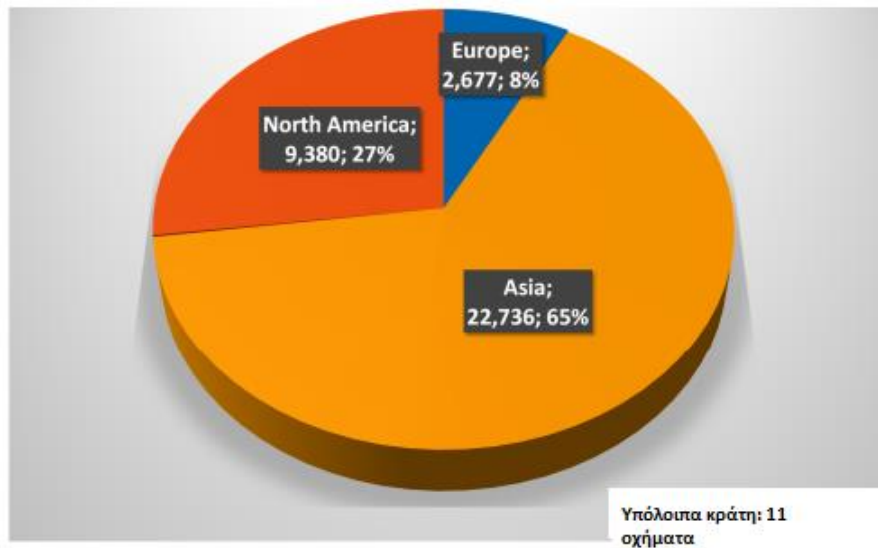
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ ΤΟΥ ΚΛΑΔΟΥ ΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ (ΤΡΕΧΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ)

Το υδρογόνο μπορεί να διαδραματίσει έναν πολύ σημαντικό ρόλο στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος στον τομέα των μεταφορών ο οποίος είναι υπεύθυνος για ένα ποσοστό του 20-30% των εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα [35]. Σύμφωνα με την Eurostat το έτος 2018 οι συνολικές εκπομπές CO_{2eq} στην Ευρώπη ήταν 3,9 δισεκατομμύρια τόνοι όπου το 24,6% οφειλόταν στον τομέα των μεταφορών [36]. Σε σύγκριση με τα οχήματα τα οποία χρησιμοποιούν αποκλειστικά και μόνο μπαταρίες τα μεταφορικά μέσα τα οποία θα χρησιμοποιούν υδρογόνο θα έχουν το πλεονέκτημα του μικρότερου χρόνου ανεφοδιασμού και της μεγαλύτερης ενεργειακής πυκνότητας που παρουσιάζει το υδρογόνο. Η τεχνολογία των μπαταριών και αυτή του υδρογόνου μπορεί να είναι και συμπληρωματικές η μία με την άλλη [35].

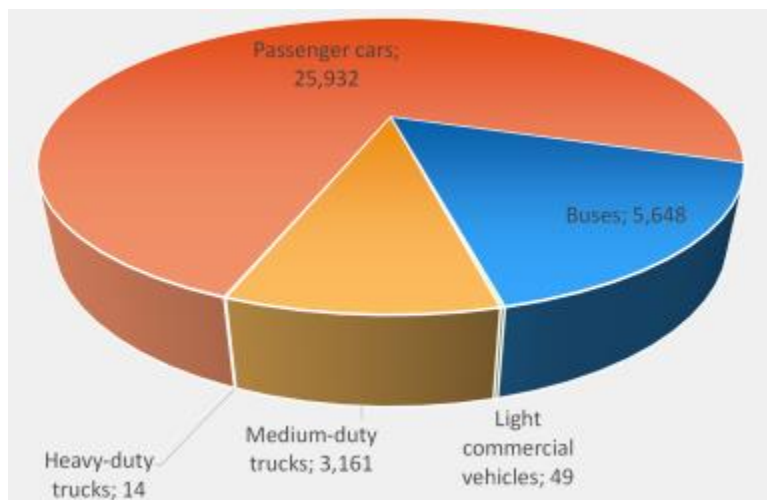
Στα Σχήματα 3.1-3.3 φαίνεται η κατανομή των οχημάτων που χρησιμοποιούν το υδρογόνο ως καύσιμο ανά κράτος, ανά ήπειρο και ανά είδος. Από αυτά τα σχήματα γίνεται εμφανές ότι τα περισσότερα οχήματα που χρησιμοποιούν υδρογόνο βρίσκονται στην Ασία, ακολουθεί η Βόρεια Αμερική και στην τρίτη θέση βρίσκεται η Ευρώπη. Οι χώρες που έχουν το μεγαλύτερο αριθμό οχημάτων αυτού του είδους είναι η Νότια Κορέα, η Ιαπωνία, η Κίνα και οι ΗΠΑ. Όσον αφορά το είδος τα περισσότερα οχήματα υδρογόνου που κυκλοφορούν παγκοσμίως είναι τα επιβατικά (passenger cars), ενώ ακολουθούν τα λεωφορεία (buses) και τα φορτηγά μεσαίας κατηγορίας (medium-dutytrucks).



Σχήμα 3.1: Κατανομή ανά κράτος της κυκλοφορίας των οχημάτων που λειτουργούν με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου [37].



Σχήμα 3.2: Κατανομή ανά ήπειρο της κυκλοφορίας των οχημάτων που λειτουργούν με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου [37].



Σχήμα 3.3: Κατανομή οχημάτων υδρογόνου ανά είδος [37].

3.1 Ενεργειακό αποτύπωμα των φορτηγών εμπορικών μεταφορών και μείωσή του μέσω της χρήσης υδρογόνου ως καύσιμο

Τα βαρέα φορτηγά τα οποία χρησιμοποιούνται στις εμπορευματικές μεταφορές συμβάλλουν σημαντικά στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Το καύσιμο που χρησιμοποιούν κυρίως αυτά τα φορτηγά είναι το ντίζελ λόγω του σχετικά χαμηλού λειτουργικού του κόστους. Ωστόσο, λόγω των σημαντικών εκπομπών αέριων ρύπων είναι σημαντικό να βρεθούν εναλλακτικές λύσεις οι οποίες θα τις μειώσουν. Τα δεδομένα που συνέλεξε η «Σύμβαση Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική

Αλλαγή» (UNFCCC) από τις χώρες που συμμετέχουν στη Συμφωνία του Παρισιού δείχνουν ότι ο τομέας των μεταφορών αντιπροσώπευε περισσότερο από το 20% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Green House Gases - GHG) το 2015 (34). Τα φορτηγά είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστικά σε σύγκριση με τις σιδηροδρομικές μεταφορές λόγω της ικανότητάς τους να παραδίδουν σε συντομότερο χρόνο και απευθείας στο σημείο προορισμού. Στον Καναδά, οι εκπομπές των φορτηγών αντιπροσωπεύουν το 17%-37% των συνολικών εκπομπών του τομέα των μεταφορών. Παρόμοιες αυξήσεις έχουν καταγραφεί στη Γερμανία και στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Αυτή η αύξηση βάζει εμπόδια στην μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος στον τομέα των εμπορευματικών μεταφορών [38].

Ένας τρόπος για τη μείωση των αέριων ρύπων που προκύπτουν από την καύση του ντίζελ είναι η σταδιακή αντικατάσταση του από ένα άλλο καύσιμο όπως είναι για παράδειγμα το LNG και το H₂. Οι Hannach et al [38] πραγματοποίησαν ανάλυση κύκλου ζωής για να εκτιμήσουν τα πιθανά οφέλη που προκύπτουν από την ταυτόχρονη χρήση υδρογόνου/ντίζελ ως λύση για τους υπάρχοντες στόλους βαρέων φορτηγών κατηγορίας 8. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την ανάλυση φαίνονται στον Πίνακα 3.1.

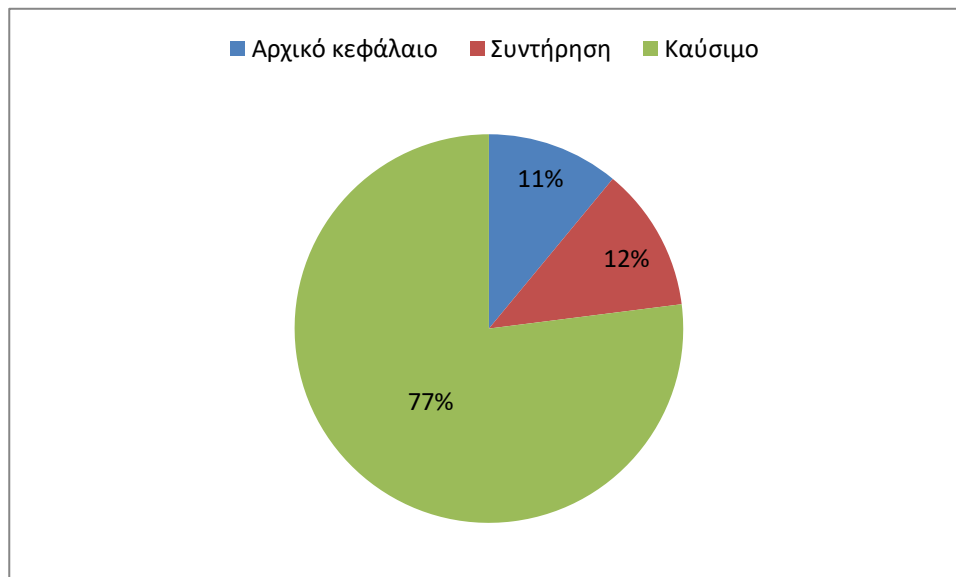
Πίνακας 3.1: Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία των Hannach et al. [38].

Αριθμός οχημάτων	200
Διάρκεια κύκλου ζωής	20 χρόνια
Απόδοση καυσίμου	54,88 L/100km
Αναλογία Diesel/H₂	0%, 30%, 40%, 50%
Κόστος H₂	1\$/kg, 2\$/kg, 3\$/kg, 4\$/kg
Κόστος Diesel	1,09\$/L

Τα αποτελέσματα φαίνονται στα Σχήματα 3.4- 3.5.

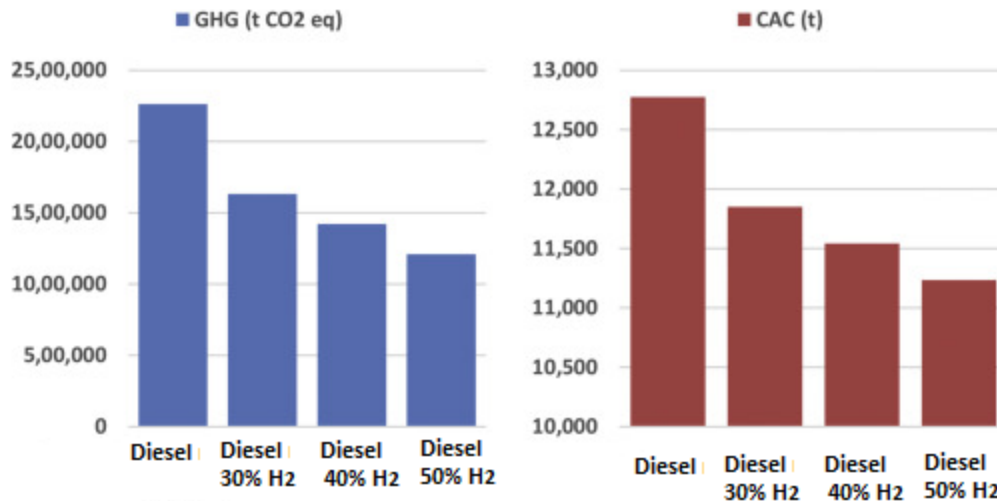


Σχήμα 3.4: Συμβολή διαφορετικών σταδίων του κύκλου ζωής στις συνολικές εκπομπές GHG από ένα στόλο βαρέων επαγγελματικών οχημάτων που λειτουργούν με ντίζελ [38].



Σχήμα 3.5: Συμβολή διαφόρων σταδίων του κύκλου ζωής στο συνολικό κόστος του στόλου των 200 βαρέων επαγγελματικών οχημάτων που λειτουργούν με ντίζελ για περίοδο 20 ετών [38].

Από τα Σχήματα 3.4 και 3.5 προκύπτει ότι περίπου το 75% των συνολικών εκπομπών GHG εμφανίζονται κατά το στάδιο της κατανάλωσης καυσίμου ενώ παράλληλα το ίδιο ποσοστό του συνολικού κόστους αποτελεί και το κόστος του καυσίμου κατά τη διάρκεια ζωής ενός βαρέος οχήματος. Είναι αυτό που συνεισφέρει περισσότερο σε σχέση με τα άλλα στάδια του κύκλου ζωής τόσο σε αέριους ρύπους όσο και σε κόστος.



Σχήμα 3.6: Εκπομπές GHG και CAC (ατμοσφαιρικοί ρύποι) για διαφορετικές τιμές του λόγου ντίζελ-υδρογόνου: 0% (καθαρό ντίζελ), 30%, 40% και 50% υδρογόνο [38].

Από το Σχήμα 3.6 γίνεται φανερό ότι όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του υδρογόνου που θα αντικαταστήσει το Diesel τόσο μικρότερη η περιβαλλοντική επιβάρυνση.

3.2 Ενεργειακό αποτύπωμα των πολιτικών και εμπορευματικών αερομεταφορών και μείωσή του μέσω της χρήσης υδρογόνου ως καύσιμο

Κάθε χρόνο, η διεθνής εναέρια κυκλοφορία εκπέμπει 900 εκατομμύρια τόνους διοξειδίου του άνθρακα κάτι που αναμένεται να υπερδιπλασιαστεί μέχρι το 2050 υποθέτοντας έναν ρυθμό ανάπτυξης της βιομηχανίας 3-4% ετησίως [39]. Επομένως απαιτείται να ληφθούν μέτρα για τη μείωση αυτών των εκπομπών. Μία από αυτές τις λύσεις είναι η χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο. Οι ειδικοί του κλάδου εκτιμούν ότι το υδρογόνο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τις αερομεταφορές σε μεγάλη κλίμακα σε 10 με 15 χρόνια. Στην περίπτωση των αεροσκαφών που κινούνται με υδρογόνο υπάρχουν και άλλες τεχνολογικές προκλήσεις που θα πρέπει να εξεταστούν. Για παράδειγμα, θα πρέπει να αυξηθεί η συνολική απόδοση με ελαφρύτερες δεξαμενές και συστήματα κυψελών καυσίμου. Θα είναι απαραίτητη, επίσης, η χρήση στροβίλων οι οποίοι θα μπορούν να καίνε υδρογόνο με χαμηλές εκπομπές NOx καθώς και η χρήση αποτελεσματικών τεχνολογιών ανεφοδιασμού που επιτρέπουν ρυθμούς ανεφοδιασμού παρόμοιους με εκείνους της κηροζίνης [39].

Ωστόσο προσπάθειες για τη χρήση του υδρογόνου στον τομέα των αεροπορικών μεταφορών έχουν γίνει από τις αρχές της δεκαετίας του 2000. Κάποιες

από τις προσπάθειες που έγιναν καθώς και κάποιες από αυτές που αναμένεται να γίνουν είναι οι εξής [39]:

- Το πρώτο «επιβατικό αεροπλάνο» καθαρού υδρογόνου απογειώθηκε το 2016 και ήταν αποτέλεσμα της συνεργασίας ανάμεσα στο Γερμανικό Αεροδιαστημικό Κέντρο και τον Σλοβένο κατασκευαστή Pipistrel. Αυτό ήταν το μικρό αεροσκάφος HY4 και έχει τέσσερις θέσεις και μπορεί να διανύσει έως και 1.500 χιλιόμετρα.
- Τον Οκτώβριο του 2020, η εταιρεία κατασκευής αεροσκαφών Zero Avia, κατασκεύασε ένα αεροσκάφος υδρογόνου που ονομάζεται «Hy Flyer». Το «Hy Flyer» είναι ένα αεροσκάφος κυψελών καυσίμου με έξι θέσεις, το οποίο αναμένεται να μπορεί να διανύει περισσότερα από 400 χιλιόμετρα. Μεσοπρόθεσμα, η Zero Avia στοχεύει να ενσωματώσει την τεχνολογία της σε αεροσκάφη δέκα έως είκοσι θέσεων, τα οποία θα έχουν αυτονομία έως και 800 χιλιόμετρα. Αυτά τα αεροπλάνα πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για μεταφορές επιβατών, αφενός, αλλά και για μεταφορά εμπορευμάτων. Η Zero Avia αναμένει μάλιστα ότι το σύστημα μετάδοσης κίνησης θα έχει λειτουργικό κόστος χαμηλότερο από συγκρίσιμα αεροσκάφη κηροζίνης λόγω χαμηλότερου κόστους καυσίμου και συντήρησης.
- Η Airbus στοχεύει να κατασκευάσει το πρώτο εμπορικό αεροσκάφος στον κόσμο με μηδενικές εκπομπές έως το 2035. Οι τρεις επικρατέστερες ιδέες είναι: Το turbofan το οποίο προορίζεται να μεταφέρει από 120 έως 200 επιβάτες σε μεσαίες αποστάσεις περίπου 3.700 χιλιομέτρων. Το δεύτερο σχέδιο είναι ένα αεροσκάφος με στροβιλοκινητήρα και έλικα για έως και 100 επιβάτες για μικρές διαδρομές. Ίσως το πιο εντυπωσιακό είναι το "Blended Wing Body" που λειτουργεί με υδρογόνο. Εδώ, τα φτερά και η άτρακτος σχηματίζουν ένα συνεχές αεροδυναμικό σώμα για βέλτιστη προσαρμογή της δεξαμενής υδρογόνου.

Ωστόσο για να γίνουν όλα τα παραπάνω βιώσιμα πρέπει να αντιμετωπιστεί μία σειρά από προκλήσεις που σχετίζονται με το υδρογόνο καθώς και με τις ιδιότητές του, κάποιες από τις οποίες έχουν αναφερθεί προηγουμένως στην παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία. Αυτές οι προκλήσεις είναι οι ακόλουθες [39]:

- Το υδρογόνο μπορεί να έχει ενεργειακή πυκνότητα τρεις φορές υψηλότερη από εκείνη της κηροζίνης, ωστόσο καταλαμβάνει τέσσερις φορές μεγαλύτερο όγκο από αυτή.
- Το υγρό υδρογόνο απαιτεί πολύπλοκα συστήματα ψύξης, που σημαίνει μεγαλύτερο βάρος.
- Είναι απαραίτητη η λήψη κατάλληλων μέτρων όπως μεγαλύτερες δεξαμενές και αποθήκες υδρογόνου στο έδαφος.

- Η ίδια η παραγωγή υδρογόνου την τρέχουσα χρονική περίοδο είναι περίπλοκη και δαπανηρή.

Ο Verstraete [40] πραγματοποίησε μία ανάλυση με στόχο να ποσοτικοποιήσει το πιθανό οικονομικό και περιβαλλοντικό όφελος από τη χρήση του υδρογόνου στις εναέριες μεταφορές. Καθώς το καύσιμο αποθηκεύεται σε δεξαμενές που βρίσκονται στην άτρακτο, το μέγεθος των πτερυγίων για τα αεροσκάφη υδρογόνου δεν περιορίζεται από την ικανότητα αποθήκευσης καυσίμου. Κατά συνέπεια, τα αεροσκάφη υδρογόνου μπορούν να έχουν μικρότερες περιοχές πτερύγων. Για το υπό έρευνα στην εργασία του αεροσκάφος διαπιστώθηκε μείωση 31% στην περιοχή των πτερυγίων. Λόγω της μείωσης του βάρους του καυσίμου επιτυγχάνεται μείωση του μεικτού βάρους απογείωσης περίπου 30% για αεροσκάφη μεταφοράς μεγάλης εμβέλειας. Παρά τις βαριές και ογκώδεις δεξαμενές υγρού υδρογόνου, το λειτουργικό κενό βάρος του αεροσκάφους παραμένει περίπου σταθερό και για τα δύο καύσιμα. Τα μικρότερα φτερά και η μεγαλύτερη άτρακτος του αεροσκάφους που λειτουργεί με υδρογόνο οδήγησε στη μείωση της αεροδυναμικής απόδοσης. Ωστόσο, αυτό αντισταθμίζεται από το χαμηλότερο βάρος του καυσίμου που απαιτείται σε μία πτήση κάτι που οδηγεί σε μείωση της απαιτούμενης ενέργειας για την πτήση κατά περίπου 11%.

3.3 Ενεργειακό αποτύπωμα των θαλάσσιων εμπορευματικών μεταφορών και μείωσή του μέσω της χρήσης υδρογόνου ως καύσιμο

Οι θαλάσσιες μεταφορές εκπέμπουν περίπου 940 εκατομμύρια τόνους CO₂ ετησίως και ευθύνονται για περίπου το 2,5% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου [41]. Το 2018, ο Διεθνής Οργανισμός Ναυτιλίας ανέφερε ότι οι εκπομπές από τη ναυτιλία θα πρέπει να μειωθούν τουλάχιστον κατά 50% έως το 2050 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2008 [42].

Το υγρό υδρογόνο θα μπορούσε να τροφοδοτήσει σχεδόν όλα τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που διασχίζουν τον Ειρηνικό ωκεανό, μια από τις πιο πολυσύχναστες ναυτιλιακές λωρίδες στον κόσμο, σύμφωνα με μια νέα μελέτη του Διεθνούς Συμβουλίου για τις Καθαρές Μεταφορές (ICCT) [43]. Πιο συγκεκριμένα, η έρευνα διαπίστωσε ότι περίπου το 43% των ταξιδιών του στόλου το 2015 θα μπορούσε να ολοκληρωθεί όταν τροφοδοτηθεί από κυψέλες καυσίμου υδρογόνου χωρίς αντικατάσταση του χώρου του φορτίου με καύσιμο και χωρίς πρόσθετο ανεφοδιασμό στην πορεία. Εάν τα πλοία αντικαταστήσουν το 2% του χώρου του φορτίου με καύσιμα, το 86% των ταξιδιών θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς περαιτέρω ανεφοδιασμό.

Εάν τα πλοία αντικαταστήσουν το 5% του χώρου φορτίου με καύσιμα, το 99% των ταξιδιών θα μπορούσε να επιτευχθεί. Τα μεσαίου μεγέθους πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων έχουν την ικανότητα για την ολοκλήρωση των ταξιδιών χωρίς μείωση του χώρου του φορτίου και χωρίς ενδιάμεσο ανεφοδιασμό. Τα ταξίδια χωρίς ενδιάμεσες στάσεις για ανεφοδιασμό από μεγαλύτερα πλοία ήταν πιο δύσκολο να πραγματοποιηθούν και εκτιμήθηκε ότι με τη χρήση ενός επιπλέον λιμανιού για ανεφοδιασμό, μπορούν να ολοκληρώσουν το 99% των ταξιδιών που πραγματοποιήθηκαν το 2015 χωρίς να απαιτείται μείωση του χώρου του φορτίου με καύσιμα [39], επίσης, οι Trillos et al [44] έδειξαν ότι η χρήση υδρογόνου που προέρχεται από αιολική ενέργεια σε συνδυασμό με κυψέλες καυσίμου για την πρόωση των πλοίων οδηγούν στη μείωση των αέριων εκπομπών του θερμοκηπίου έως και 89% σε σύγκριση με ένα συμβατικό πετρελαιοφόρο.

3.4 Ενεργειακό αποτύπωμα των σιδηροδρομικών εμπορικών μεταφορών και μείωσή του μέσω της χρήσης υδρογόνου ως καύσιμο

Οι σιδηροδρομικές μεταφορές είναι ένας από τους πιο «πράσινους» τρόπους μεταφοράς. Στοιχεία από το Γραφείο Σιδηροδρόμων και Οδικών συγκοινωνιών, που δημοσιεύθηκαν στην έκθεση του Rail Emissions 2019-2020 [45], δείχνουν ότι, για τα επιβατικά τρένα, η χρήση ντίζελ αυξήθηκε κατά 1,5% σε σύγκριση με το 2018-2019, αλλά οι προκύπτουσες εκπομπές CO_{2eq} έχουν μειωθεί σε 35,1 g CO_{2eq} ανά επιβάτη/km. Πρόκειται για το χαμηλότερο επίπεδο που έχει καταγραφεί από την έναρξη της καταγραφής συγκριτικών στοιχείων δηλαδή από το 2011-2012 [46]. Παρόλο που οι σιδηροδρομικές μεταφορές παρουσιάζουν τις μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σχέση με άλλους τρόπους μεταφοράς, η βιομηχανία των σιδηροδρομικών μεταφορών ερευνά συνεχώς εναλλακτικά καύσιμα που θα μπορούσαν να συμβάλλουν στην ακόμη μεγαλύτερη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των αμαξοστοιχιών. Ορισμένες εταιρείες έχουν επιλέξει κινητήρες με μπαταρία ως καθαρότερη εναλλακτική λύση, ενώ άλλες στρέφονται στο υδρογόνο για να τροφοδοτήσουν τα τρένα τους [45]. Οι σημαντικότεροι εμπορευματικοί σιδηρόδρομοι σε όλη τη Βόρεια Αμερική συνεχίζουν να πειραματίζονται με εναλλακτικά καύσιμα ατμομηχανών ως τρόπο μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Για παράδειγμα, η εταιρεία σιδηροδρόμων BNSF σχεδιάζει να δοκιμάσει μια ατμομηχανή υδρογόνου κατά μήκος των γραμμών της [46].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΥΔΡΟΓΟΚΙΝΗΣΗΣ ΣΕ ΕΥΡΩΠΗ, ΙΑΠΩΝΙΑ ΚΑΙ ΗΠΑ

Στο Κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί η τρέχουσα κατάσταση χρήσης υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών στην Ευρωπαϊκή Ένωση, την Ιαπωνία και τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής.

4.1 Υδρογονοκίνηση στην Ευρώπη

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) και πολλές ευρωπαϊκές χώρες έχουν θέσει στόχους όσον αφορά στη χρήση υδρογόνου και κυψελών καυσίμου. Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία περιλαμβάνει ένα σχέδιο δράσης για την ενίσχυση της αποδοτικότητας της χρήσης των διαθέσιμων πόρων με στόχο τη μετάβαση σε μια καθαρή κυκλική οικονομία, την αποκατάσταση της βιοποικιλότητας και τη μείωση των επιπέδων ρύπανσης με στόχο τη μηδενική εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου έως το 2050. Ένας τρόπος για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι και η χρήση του υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών. Ορισμένοι από τους στόχους της ΕΕ αλλά και ορισμένων κρατών ξεχωριστά σε σχέση με το υδρογόνο είναι [37]:

- Το Εθνικό Σχέδιο της Γαλλίας στοχεύει σε 5.000 επιβατικά αυτοκίνητα και επαγγελματικά ελαφρά οχήματα, 200 λεωφορεία και φορτηγά και 100 σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου έως το 2023. Οι στόχοι του 2028 περιλαμβάνουν 20.000–50.000 επιβατικά και εμπορικά αυτοκίνητα και 800–2.000 λεωφορεία και φορτηγά
- Η Κροατία στοχεύει σε 25 σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου έως το 2030, έως 50 το 2040 και έως 75 το 2050
- Η Γερμανία έθεσε ως στόχο την αύξηση των σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου σε 400 έως το 2025. Από το 2021 έχουν τεθεί σε κυκλοφορία επίσης 14 επιβατικά τρένα με τεχνολογία κυψελών καυσίμου και 27 επιπλέον έχουν προγραμματιστεί έως το 2023. Επίσης, το κρατίδιο της Βόρειας Ρηνανίας-Βεστφαλίας (NRW) στοχεύει να θέσει σε κυκλοφορία περισσότερα από 400 φορτηγά που λειτουργούν με κυψέλες καυσίμου, στη δημιουργία τουλάχιστον 20 σταθμών ανεφοδιασμού φορτηγών, στη δημιουργία 60 σταθμών ανεφοδιασμού αυτοκινήτων καθώς και στη κυκλοφορία 500 λεωφορείων υδρογόνου για τις δημόσιες συγκοινωνίες έως το 2025. Οι στόχοι για το 2030 περιλαμβάνουν την κυκλοφορία 11.000 φορτηγών άνω των 20 τόνων τα οποία θα χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου, τη δημιουργία 200 σταθμών ανεφοδιασμού φορτηγών και αυτοκινήτων, τη δημιουργία 1.000 κάδων για την

απόρριψη των κυψελών καυσίμου και τη κυκλοφορία 3.800 λεωφορείων κυψελών καυσίμου για χρήση από τις δημόσιες συγκοινωνίες

- Στην Ισπανία, οι στόχοι που ορίζονται για το έτος 2030 περιλαμβάνουν τη χρήση από 5.000–7.000 ελαφρών και βαρέων οχημάτων για μεταφορά εμπορευμάτων, 150–200 λεωφορείων, δύο γραμμές τρένων που θα λειτουργούν με κυψέλες καυσίμου και τη λειτουργία 100–150 σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου για δημόσια χρήση
- Στην Ελβετία, 1.600 βαρέα φορτηγά έχουν προγραμματιστεί να κυκλοφορήσουν ως το 2025
- Στην Ιταλία, η κυκλοφορία 290.000 επιβατικών αυτοκινήτων και 3.600 λεωφορείων είναι οι στόχοι για το 2030. Μέχρι τότε προγραμματίζονται επίσης 346 σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου για επιβατικά αυτοκίνητα και 96 για λεωφορεία. Επιπλέον, η Ιταλία στοχεύει σε 200.000 βαρέα φορτηγά για το 2030 και σε μια υποδομή 40 σταθμών ανεφοδιασμού για βαρέα οχήματα τα επόμενα έξι χρόνια

Τέλος, ο «χάρτης» για το υδρογόνο στην Ευρώπη ο οποίος αντιπροσωπεύει τις απόψεις της βιομηχανίας που εκπροσωπείται από την «Hydrogen Europe», προτείνει τα ακόλουθα [37]:

- Έως το 2030 τα οχήματα τα οποία θα λειτουργούν με κυψέλες καυσίμου θα μπορούσαν να αντιπροσωπεύουν 1 στα 22 επιβατικά οχήματα (συνολικό στόλος 3.7 εκατομμύρια οχήματα) και 1 στα 12 ελαφρά επαγγελματικά οχήματα (συνολικός στόλος 500.000) ενώ παράλληλα στην κυκλοφορία θα βρίσκονται 45.000 φορτηγά και λεωφορεία και 570 τρένα. Επίσης, αναμένεται αύξηση του αριθμού των σταθμών ανεφοδιασμού στην Ευρώπη.
- Έως το 2040 το παραπάνω ποσοστό θα αυξηθεί σε 1 στα 7 επιβατικά οχήματα και 1 στα 5 ελαφρά επαγγελματικά οχήματα ενώ παράλληλα στην κυκλοφορία θα βρίσκονται 450.000 φορτηγά και λεωφορεία, 2.000 τρένα και οι σταθμοί ανεφοδιασμού στην Ευρώπη θα ανέρχονται στους 15.000.
- Μέχρι το 2050, 45 εκατομμύρια επιβατικά αυτοκίνητα, 6.5 εκατομμύρια ελαφρά επαγγελματικά οχήματα, 1.7 εκατομμύρια φορτηγά και 250.000 θα υπάρχουν στην κυκλοφορία ένα σενάριο ωστόσο που είναι αρκετά φιλόδοξο.

4.2 Υδρογονοκίνηση στην Ιαπωνία

Μέχρι το τέλος του 2019, 3.757 επιβατικά οχήματα κυψελών καυσίμου κυκλοφορούσαν στην Ιαπωνία. Επίσης, υπάρχουν 154 σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου. Όσον αφορά το κομμάτι των μεταφορών η Ιαπωνία έχει θέσει τους εξής στόχους [53]:

1. Την κυκλοφορία 200.000 επιβατικών οχημάτων κυψελών καυσίμου έως το 2025 και 800.000 έως το 2030.
2. Την κυκλοφορία 1.200 λεωφορείων κυψελών καυσίμου έως το 2030
3. Τη λειτουργία 10.000 περνοφόρων ανυψωτικών με κυψέλες καυσίμου έως το 2030

Όσον αφορά τους Ιαπωνικούς κατασκευαστές οχημάτων οι δράσεις που έχουν λάβει σχετικά με τη χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο είναι οι εξής [47]:

Η «Toyota Motor Corporation» κυκλοφόρησε ένα ολοκαίνουργιο μοντέλο επιβατικού οχήματος κυψέλης καυσίμου τον Δεκέμβριο του 2020. Τον Φεβρουάριο του 2021, ανακοίνωσε την υλοποίηση μιας μονάδας ανάπτυξης συστημάτων κυψελών καυσίμου οι οποίες αναμένεται να βρουν χρήση σε φορτηγά, λεωφορεία, τρένα και πλοία. Διεξάγει, επίσης, έρευνα για την ανάπτυξη ενός οχήματος υδρογόνου με κινητήρα εσωτερικής καύσης.

Στον αντίποδα, τον Ιούνιο του 2018, η εταιρική σχέση μεταξύ της «Nissan Motor» και της γαλλικής «Renault» σταμάτησε την διάθεση οχημάτων κυψελών καυσίμου που αναπτύχθηκαν από κοινού με τη «Daimler» και τη «Ford Motor». Τον Ιούνιο του 2021 η «Honda» ανακοίνωσε ότι θα διακόψει την παραγωγή τους στα τέλη του 2021 λόγω χαμηλού αριθμού πωλήσεων. Ωστόσο θα συνεχίσει σε συνεργασία με την «General Motors (GM)» των Ηνωμένων Πολιτειών για την παραγωγή επαγγελματικών οχημάτων αυτού του τύπου.

Λόγω των χαμηλών πωλήσεων των επιβατικών οχημάτων κυψελών καυσίμου, είναι αρκετά δύσκολο να υπάρξουν νέοι κατασκευαστές αυτοκινήτων που θα στοχεύσουν να εισέλθουν στην ιαπωνική αγορά με επιβατικά αυτοκίνητα. Η διάδοσή τους είναι πιθανό να περιοριστεί σε επαγγελματικά οχήματα, όπως λεωφορεία και φορτηγά που κινούνται μεταξύ σταθερών τερματικών σταθμών.

Όσον αφορά τα λεωφορεία, η «Toyota» χρησιμοποίησε για πρώτη φορά ένα υβριδικό όχημα κυψελών καυσίμου στη δεκαετία του 2000. Τα λεωφορεία κυψελών καυσίμου αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 2010 και κυκλοφόρησαν μαζικά προς πώληση τον Μάρτιο του 2018. Η μητροπολιτική κυβέρνηση του Τόκιο, έχει θέσει σε κυκλοφορία 84 λεωφορεία με κυψέλες καυσίμου από τον Δεκέμβριο του 2020. Εξακολουθούν να υπάρχουν διάφορα εμπόδια να ξεπεραστούν, όπως: η υψηλή τιμή (πενταπλάσια από αυτή ενός συμβατικού τύπου λεωφορείου), η βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας και η καθιέρωση μιας τεχνολογίας μαζικής παραγωγής.

Τον Ιανουάριο του 2020, η «Honda» και η «Isuzu Motors Ltd.» συμφώνησαν να συνεργαστούν για την ανάπτυξη φορτηγών κυψελών καυσίμου. Τον Μάρτιο του 2020, η «Toyota» και η «Hino Motors, Ltd.» συμφώνησαν να αναπτύξουν από κοινού ένα φορτηγό κυψελών καυσίμου βαρέως τύπου. Η «Mitsubishi» έθεσε ως στόχο να κάνει

όλα τα νέα οχήματα που προορίζονται για την ιαπωνική αγορά με μηδενικές εκπομπές CO₂ έως το έτος 2039. Για να το πετύχει αυτό στοχεύει να ξεκινήσει τη σειρά παραγωγής φορτηγών κυψελών καυσίμου μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 2020. Η «Toyota» ανακοίνωσε, επίσης, τον Ιούνιο του 2018, ότι μαζί με τη «Seven-Eleven Japan Co. Ltd.» θα προχωρήσουν στην ανάπτυξη ένα νέου μικρού φορτηγού κυψελών καυσίμου. Τα γενικότερα σχέδια της Toyota για την ηλεκτροκίνηση φαίνονται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Σχέδια της Toyota για την ηλεκτροκίνηση [48].

Όσον αφορά τις σιδηροδρομικές μεταφορές η «East Japan Railway Company», υπέγραψε συμφωνία με την Toyota τον Σεπτέμβριο του 2018 για μια ολοκληρωμένη επιχειρηματική συνεργασία, με επίκεντρο τη χρήση υδρογόνου και συνεργάζονται για την εισαγωγή της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου στα σιδηροδρομικά οχήματα.

Η ναυτιλιακή βιομηχανία κάνει και αυτή προσπάθειες για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου για αυτό προχωρούν στην υιοθέτηση του υδρογόνου ως καύσιμο. Το προσχέδιο του «Στρατηγικού Ενεργειακού Σχεδιασμού» αναφέρει ότι η Ιαπωνία θα προωθήσει την τεχνολογική ανάπτυξη σκαφών μηδενικών εκπομπών με χρήση εναλλακτικών καυσίμων όπως το υδρογόνο και η αμμωνία και στοχεύει να ξεκινήσει πειράματα επίδειξης έως το 2025, να επιτύχει εμπορική λειτουργία πλοίων

μηδενικών εκπομπών νωρίτερα από τον αρχικό στόχο του 2028 και να επιφέρει περαιτέρω ανάπτυξη και διάδοση των πλοίων μηδενικών εκπομπών το 2030.

Τέλος, το καύσιμο υδρογόνου φαίνεται ότι θα αξιοποιηθεί και στον τομέα των αερομεταφορών προκειμένου να μειωθούν οι εκπομπές άνθρακα.

4.3 Υδρογονοκίνηση στις ΗΠΑ

Μία εικόνα της υδρογονοκίνησης στις ΗΠΑ έως το 2030 φαίνεται στον Πίνακα 4.1 και αφορά αποκλειστικά τη χρήση του υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών.

Πίνακας 4.1: Υδρογονοκίνηση στις ΗΠΑ για τα έτη 2022, 2025, 2030 [49].

Έτος	2022	2025	2030
Ανάγκες για H ₂ (τόνοι)	12 εκ.	13 εκ.	17 εκ.
Πωλήσεις οχημάτων κυψελών καυσίμου υδρογόνου	30.000	150.000	1.2 εκ.
Περονοφόρα οχήματα	50.000	125.000	300.000
Σταθμοί ανεφοδιασμού	465	1.600	5.800
Ετήσια επένδυση (\$)	1 δις	2 δις	8 δις
Νέες θέσεις εργασίας	50.000	100.000	500.000

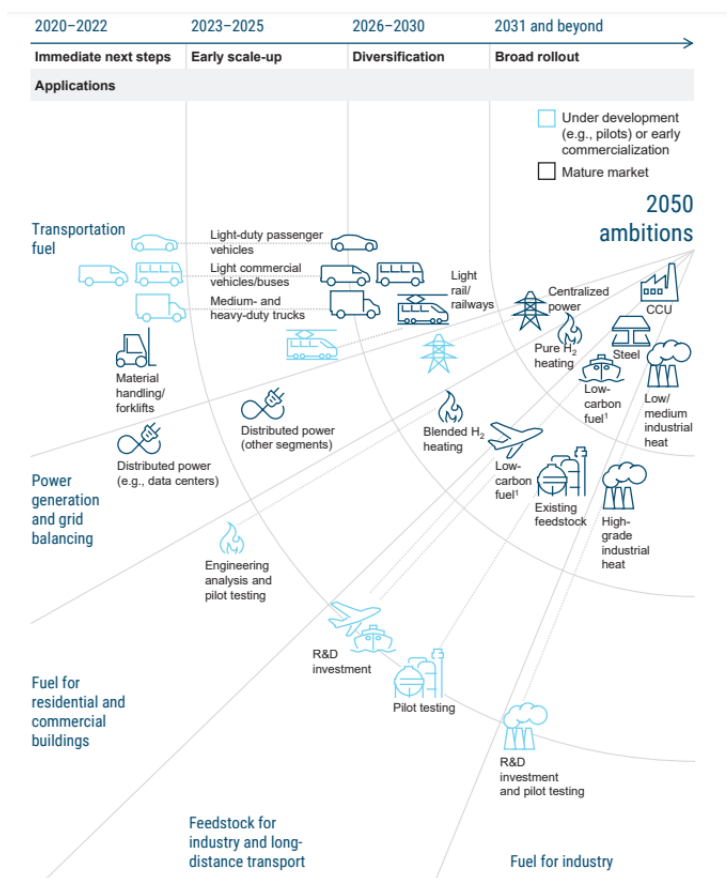
Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζεται το εκτιμώμενο ποσοστό πωλήσεων για διάφορες κατηγορίες οχημάτων υδρογόνου στις ΗΠΑ έως το 2030 και 2050 για διαφορετικά σενάρια.

Πίνακας 4.2: Ποσοστό πωλήσεων για διάφορες κατηγορίες οχημάτων υδρογόνου στις ΗΠΑ έως το 2030 και 2050 για διαφορετικά σενάρια [50].

Τύπος οχήματος	% Πωλήσεις Φιλόδοξο σενάριο (2030)	% Πωλήσεις Φιλόδοξο σενάριο (2050)	% Πωλήσεις Βασικό σενάριο (2030)	% Πωλήσεις Βασικό σενάριο (2050)
Δίκυκλα	1	6	0	1
Αυτοκίνητα κατηγορίας A και B	3	22	0	0

Αυτοκίνητα κατηγορίας Γ και Δ	6	39	0	1
Αυτοκίνητα κατηγορίας E+	7	50	2	10
Ταξί	15	61	1	2
Ελαφρά φορτηγά	9	50	2	10
Λεωφορεία	13	55	2	18
Βαν	9	33	1	7
Φορτηγά μεσαίας χρήσης	10	38	1	9
Φορτηγά βαριάς χρήσης	14	42	7	15
Περονόφορα ανυψωτικά	20	59	10	25
Σιδηροδρομικές μεταφορές	4	17	2	3

Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται η υιοθέτηση του υδρογόνου και σε άλλους τομείς εκτός από των μεταφορών.



Σχήμα 4.2: Υιοθέτηση του υδρογόνου σε διάφορους τομείς της οικονομίας στις ΗΠΑ [50].

Αυτή τη στιγμή στις ΗΠΑ το υδρογόνο παράγεται κυρίως από ορυκτά καύσιμα χωρίς να γίνεται κάποια χρήση τεχνολογιών για τη δέσμευση του άνθρακα, η χρήση των οποίων θα μπορούσε να προσφέρει χαμηλότερες εκπομπές σε σχέση με αυτά που κινούνται με βενζίνη κατά 40-50% [50]. Όταν το υδρογόνο παράγεται χρησιμοποιώντας κατά το 1/3 ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως συμβαίνει στην Καλιφόρνια, η μείωση των εκπομπών μπορεί να φτάσει και το 70% κάνοντας τα εξίσου ανταγωνιστικά, όσον αφορά το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα, με τα ηλεκτρικά που κινούνται με μπαταρίες.

Τα βαριά φορτηγά κυψελών καυσίμου θα μπορούσαν να αποτελέσουν περίπου το 10% των πωλήσεων έως το 2030 και 35% έως το 2050. Τα βαρέα οχήματα που χρησιμοποιούνται στα ορυχεία και τα λιμάνια, καθώς και τα βαρέα μηχανήματα στον κατασκευαστικό ή δασικό τομέα, αποτελούν ευκαιρίες ανάπτυξης για οχήματα υδρογόνου, δεδομένης της ανάγκης για εντατική χρήση, χαμηλούς χρόνους τροφοδοσίας καυσίμων και μηδενικές εκπομπές ρύπων [49], [50].

Τα οχήματα κυψελών καυσίμου υπολογίζεται ότι θα αποτελούν το 10% των πωλήσεων σε λεωφορεία και φορτηγά έως το 2030 και το 35% έως το 2050. Τα βαρέα φορτηγά που διανύουν μεγάλες αποστάσεις και οι εμπορικοί στόλοι αποτελούν μία από τις πιο ελκυστικές περιπτώσεις χρήσης του υδρογόνου λόγω της απαίτησης για κάλυψη πολλών χιλιομέτρων και της ανάγκης για μεγάλη κλίμακα παραγωγής υδρογόνου [50].

Τα οχήματα κυψελών καυσίμου θα μπορούσαν να αντιπροσωπεύουν πάνω από το 5% των πωλήσεων επιβατικών οχημάτων έως το 2030 και πιθανώς το 40% έως το 2050 [50]. Αυτά τα οχήματα είναι πιθανό να έχουν υψηλή ζήτηση μεταξύ των πελατών που θέλουν τη δυνατότητα να ανεφοδιάζονται γρήγορα, να καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις, να μεταφέρουν βαριά φορτία ή να θέλουν να έχουν περισσότερο χώρο στο όχημα. Αναμένεται να έχουν υψηλή ζήτηση και σε περιπτώσεις όπου συνήθως απαιτείται ανεφοδιασμός καυσίμου περισσότερες φορές μέσα στην ημέρα όπως είναι η περίπτωση των ταξί ή και σε αυτούς όπου δεν έχουν διαθέσιμη κοντά τους μία μονάδα ανεφοδιασμού (σε σύγκριση με τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα που απαιτείται) [49], [50]. Επιπροσθέτως, η προτίμηση των πολιτών των ΗΠΑ για μεγαλύτερα οχήματα όπως τα SUV θα μπορούσε να δημιουργήσει μια ακόμη μεγαλύτερη αγορά, δεδομένης της δυνατότητας υιοθέτησης της κυψέλης καυσίμου σε αυτά τα οχήματα [50].

Με περισσότερα από 25.000 περνοφόρα ανυψωτικά με κυψέλες καυσίμου σε λειτουργία, που αντιπροσωπεύουν το 0,4% όλων των περνοφόρων ανυψωτικών οχημάτων στις ΗΠΑ, η διαχείριση υλικών είναι ο μεγαλύτερος τομέας για τα οχήματα υδρογόνου σήμερα [50]. Τα περνοφόρα ανυψωτικά που κινούνται με υδρογόνο μπορούν να ανεφοδιαστούν γρήγορα, να παρέχουν σταθερή ισχύ εξόδου και να έχουν

χαμηλό κόστος λειτουργίας. Μέχρι το 2030, τα περονοφόρα ανυψωτικά που κινούνται με υδρογόνο θα μπορούσαν να αποτελούν το 20% των πωλήσεων περονοφόρων ανυψωτικών οχημάτων, με τον αριθμό αυτό να αυξάνεται στο 60% έως το 2050 [50].

Το υδρογόνο θα μπορούσε να βρει εφαρμογή και στις σιδηροδρομικές μεταφορές των ΗΠΑ και να τροφοδοτήσει το 4% αυτών των συγκοινωνιών έως το 2030 και το 17% έως το 2050 [50]. Επίσης, μπορεί να βρει εφαρμογή και στις θαλάσσιες μεταφορές όπως είναι για παράδειγμα τα επιβατικά πλοία, τα κρουαζιερόπλοια και τα ποταμόπλοια. Μερικά από τα πλεονεκτήματά τους είναι ο λιγότερος θόρυβος, οι χαμηλότερες αέριες εκπομπές και η μικρότερη μόλυνση των υδάτων.

Ερευνητική δραστηριότητα βρίσκεται σε εξέλιξη και για τη χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο σε Drone και σε εναέρια οχήματα τα οποία έχουν την ικανότητα κάθετης απογείωσης και προσγείωσης [50]. Λόγω της υψηλής ενεργειακής του πυκνότητας, το υδρογόνο είναι κατάλληλο για πτήσεις μεγάλων αποστάσεων και την εναέρια μεταφορά μεγάλων φορτίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ, ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Σε αυτό το Κεφάλαιο αναλύονται οι πολιτικές για την ανάπτυξη των υποδομών παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου στην ΕΕ, Ιαπωνία και τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Για κάθε γεωγραφική περιοχή αναλύονται τα προβλήματα που καλούνται να αντιμετωπίσουν και παρουσιάζεται το ρυθμιστικό πλαίσιο που έχει αναπτυχθεί μέχρι σήμερα. Ειδικά για την περίπτωση της ΕΕ υπογραμμίζονται οι πρωτοβουλίες που έχουν αναληφθεί σε επίπεδο κρατών μελών και αναφέρονται τα σημαντικότερα ερευνητικά προγράμματα που αφορούν την παραγωγή, αποθήκευση, τη μεταφορά και τη χρήση του υδρογόνου.

5.1 Πολιτικές για την ανάπτυξη δομών παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου στην Ευρώπη

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ανακοίνωσε μια στρατηγική για την υιοθέτηση του υδρογόνου στο δρόμο προς μία κλιματικά ουδέτερη Ευρώπη η οποία εγκρίθηκε στις 8 Ιουλίου 2020. Στόχος αυτής της στρατηγικής είναι να επιταχύνει την παραγωγή υδρογόνου με φιλικές προς το περιβάλλον διαδικασίες, διασφαλίζοντας τον ρόλο του σε ένα κλιματικά ουδέτερο ενεργειακό σύστημα έως το 2050. Η επίτευξη αυτού του στόχου θα γίνει σταδιακά και θα περιλαμβάνει αρχικά έργα για την παραγωγή «μπλε» υδρογόνου. Κάποιες από τις δράσεις που πρόκειται να εφαρμοστούν κατά τη διάρκεια τριών στρατηγικών φάσεων μεταξύ 2020 και 2050 περιγράφονται παρακάτω [51]:

Η πρώτη φάση επικεντρώνεται στην κλιμάκωση της κατασκευής μεγάλων (έως 100 MW) εγκαταστάσεων ηλεκτρόλυσης, στην απαλλαγή από τον άνθρακα των υφιστάμενων εγκαταστάσεων υδρογόνου και στη διευκόλυνση της απορρόφησης του υδρογόνου. Επίσης, ο σχεδιασμός για την ανάπτυξη υποδομών που σχετίζονται με τη μεταφορά του και ο καθορισμός ρυθμιστικών πλαισίων για τη διασφάλιση της εύρυθμης λειτουργίας της αγοράς υδρογόνου αποτελούν βασικές προτεραιότητες αυτής της φάσης.

Στη δεύτερη φάση (2024-2030), οι υποδομές θα αναπτύσσονται ολοένα και περισσότερο, ξεκινώντας με τοπικά δίκτυα σε νησιά και απομακρυσμένες περιοχές, όπου το υδρογόνο θα χρησιμοποιείται εκτός των άλλων και σε εφαρμογές στη βιομηχανία και στις μεταφορές καθώς και στη θέρμανση κατοικιών και επαγγελματικών χώρων. Αυτή η φάση προβλέπει, επίσης, την ανάπτυξη της υλικοτεχνικής υποδομής σε όλη την ΕΕ, τη δημιουργία εγκαταστάσεων αποθήκευσης μεγαλύτερης κλίμακας και το σχεδιασμό ενός πανευρωπαϊκού δικτύου υδρογόνου,

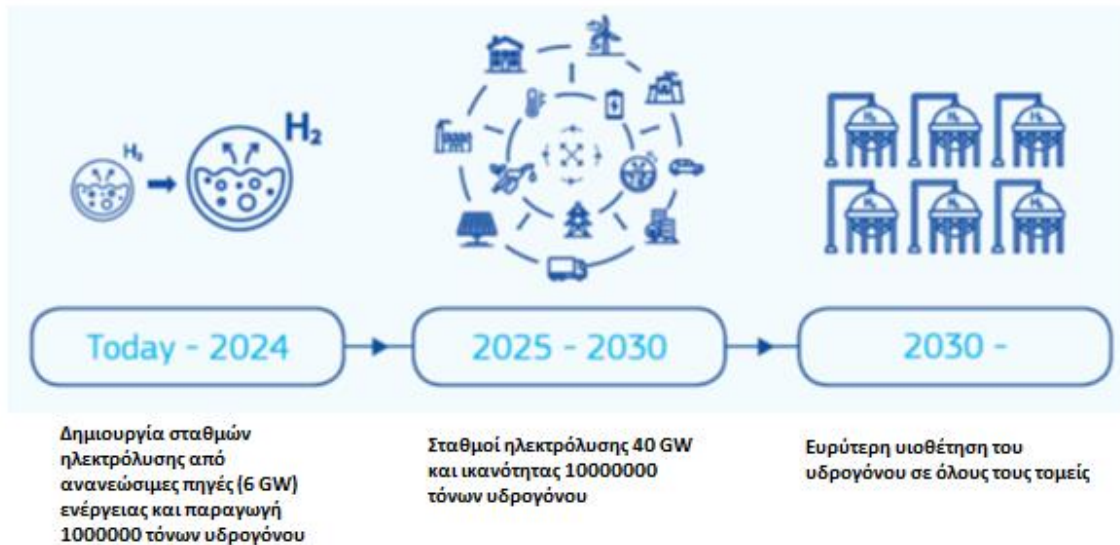
συμπεριλαμβανομένης της χρησιμοποίησης της υπάρχουσας υποδομής φυσικού αερίου. Η χρηματοδότηση της έρευνας και της καινοτομίας αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο την επόμενη δεκαετία για την ενίσχυση της απόδοσης και της κλίμακας των έργων, παρέχοντας οικονομικά αποδοτικές συσκευές ηλεκτρόλυσης σε κλίμακα gigawatt (GW) και φτάνοντας στην παραγωγή οικονομικά ανταγωνιστικού υδρογόνου παραγόμενο από ανανεώσιμες πηγές έως το 2030.

Μετά το 2030, εκτιμάται ότι οι τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα είναι αρκετά ώριμες και ικανές να ανταπεξέλθουν στην αυξανόμενη ζήτηση.

Όσον αφορά στην εγκατεστημένη παραγωγική δυναμικότητα στις δύο πρώτες φάσεις, ο στρατηγικός στόχος για το 2024 είναι εγκαταστάσεις τουλάχιστον 6 GW ηλεκτρόλυσης υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές με ικανότητα παραγωγής 1 εκατομμύριο τόνους, φτάνοντας στα 40 GW το 2030 με ικανότητα παραγωγής 10 εκατομμύρια τόνους. Στις 11 Δεκεμβρίου 2020, το Συμβούλιο ενέκρινε συμπεράσματα με τίτλο «Προς μια αγορά υδρογόνου για την Ευρώπη», καλώντας την Επιτροπή να επεξεργαστεί περαιτέρω και να θέσει σε λειτουργία τη στρατηγική της ΕΕ για το υδρογόνο. Στα συμπεράσματα, το Συμβούλιο δίνει ιδιαίτερη έμφαση στο υδρογόνο η παραγωγή του οποίου θα γίνεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στην απεξάρτηση από τον άνθρακα. Καλεί την Επιτροπή η «πράσινη» παραγωγή υδρογόνου να γίνει από οικονομικά αποδοτικές ανανεώσιμες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή να ληφθεί υπόψη σε μεγάλο βαθμό και ο λόγος της ενεργειακής απόδοσης προς το κόστος αποφεύγοντας με αυτό το τρόπο οι επενδύσεις της να μη φέρουν τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Επιπλέον, το Συμβούλιο τονίζει την ευκαιρία να μεγαλώσει η ενεργειακή ασφάλεια της ΕΕ μειώνοντας την εξάρτηση της από τις εισαγωγές. Το τελευταίο μέρος συνδέεται με την πρωτοβουλία 2x40 GW της ένωσης «Hydrogen Europe», η οποία πρόκειται να εγκαταστήσει ισχύ 40 GW ανανεώσιμης ενέργειας για την παραγωγή υδρογόνου στην ΕΕ και άλλα 40 GW σε όλη την Ουκρανία και τη Βόρεια Αφρική.

Επίσης, εκτός από τα σχέδια τα οποία εκπονούνται σε επίπεδο ΕΕ, υπάρχουν και μία σειρά από πολιτικές οι οποίες υιοθετούνται σε επίπεδο κρατών- μελών. Σύμφωνα με μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε από την κοινή επιχείρηση «Κυψέλες Καυσίμου και Υδρογόνο, (JU FCH)» και εξετάζει τα εθνικά σχέδια για την ενέργεια και το κλίμα (NECP) των κρατών μελών που υποβλήθηκαν έως τον Απρίλιο του 2020 (ή τα σχέδια NECP που υποβλήθηκαν από όσους έχασαν την προθεσμία), όλα τα σχέδια εκτός από δύο αναφέρουν το υδρογόνο και το πιθανό ρόλο στην απαλλαγή από τις εκπομπές άνθρακα [51]. Ωστόσο, μόνο τα μισά από τα σχέδια ορίζουν ρητούς στόχους. Άλλα είναι τεχνολογικά ουδέτερα, υποστηρίζοντας έργα επίδειξης «Power-to-X», τα οποία συχνά υποστηρίζουν έμμεσα το υδρογόνο. Οι μεταφορές είναι ο πρώτος τομέας εφαρμογής

του υδρογόνου στα περισσότερα από τα σχέδια, με τη βιομηχανία να ακολουθεί ως δεύτερος. Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι το 2021-2030 (Σχήμα 5.1) θεωρείται κυρίως μια προπαρασκευαστική φάση με το υδρογόνο να θεωρείται μεσοπρόθεσμη/μακροπρόθεσμη επιλογή.



Σχήμα 5.1: Στόχοι αναφορικά με τη παραγωγή και υιοθέτηση του υδρογόνου για την περίοδο 2021-2030 στην Ευρώπη [52].

Η χρήση της ηλεκτρόλυσης από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την παραγωγή υδρογόνου είναι ο κύριος στόχος των σχεδίων, αν και υπάρχει κάποια αναφορά στο υδρογόνο το οποίο θα παράγεται από μεθόδους οι οποίες μπορεί να εκπέμπουν χαμηλά ποσοστά άνθρακα [51]. Η Πολωνία αναφέρει συγκεκριμένα το υδρογόνο το οποίο θα παράγεται από αεριοποίηση άνθρακα. Ολόκληρη η «αλυσίδα» του υδρογόνου (παραγωγή, αποθήκευση, μεταφορά, διανομή, προμήθεια, τελική χρήση) σπάνια εξετάζεται στα σχέδια. Η πρωτοβουλία για το υδρογόνο, που ξεκίνησε από την αυστριακή Προεδρία του Συμβουλίου το 2018, υπεγράφη από 24 κράτη μέλη. Τον Ιούνιο του 2020, η Αυστρία, το Βέλγιο, η Γαλλία, η Γερμανία, το Λουξεμβούργο, η Ολλανδία και η Ελβετία δημοσίευσαν μια κοινή δήλωση πιέζοντας για την υιοθέτηση του υδρογόνου για την επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας. Αρκετά εθνικά κράτη προσχωρούν στην «Ευρωπαϊκή Συμμαχία για το Καθαρό Υδρογόνο» [51]. Στο «Δίκτυο Ενέργειας Υδρογόνου (HyENet)» [51], μια άτυπη πλατφόρμα που ξεκίνησε η Επιτροπή, εθνικοί εμπειρογνώμονες ανταλλάσσουν εμπειρίες και δίνουν συμβουλές στα κράτη μέλη σχετικά με τις βέλτιστες πρακτικές και τις τελευταίες εξελίξεις. Η Γερμανία ειδικότερα έχει δώσει μεγάλη έμφαση στο ρόλο του υδρογόνου στο πρόγραμμα απαλλαγής από τον άνθρακα της χώρας. Η γερμανική εθνική στρατηγική υδρογόνου

έχει στόχο την παραγωγική ικανότητα 5 GW έως το 2030 και 10 GW έως το 2040. Σημαντική χρηματοδότηση έχει προβλεφθεί για την έρευνα και τη μεταφορά τεχνολογίας από το εργαστήριο στην αγορά, συμπεριλαμβανομένης χωριστής χρηματοδότησης για τη βιομηχανία. Αναγνωρίζοντας τους περιορισμούς στην παραγωγή του υδρογόνου που απαιτείται για να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες της Γερμανίας, έχει προταθεί προϋπολογισμός 2 δισεκατομμυρίων ευρώ για την προώθηση διεθνών συνεργασιών [51]. Στις 23 Σεπτεμβρίου 2020, η Πορτογαλία και η Ολλανδία υπέγραψαν μνημόνιο σχετικά με τις προθέσεις τους να συνδυάσουν τις στρατηγικές που έχουν εκπονήσει σχετικά με το υδρογόνο. Το ολλανδικό εθνικό σχέδιο περιλαμβάνει την παραγωγή μπλε υδρογόνου από αέριο, η περιοχή της βόρειας Ολλανδίας ωστόσο επέλεξε στρατηγική παραγωγής υδρογόνου από 100% ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην πρόσφατη περιφερειακή στρατηγική για το υδρογόνο [51].

Στην ΕΕ υπάρχουν μία σειρά από ερευνητικά προγράμματα τα οποία έχουν ως στόχο την υιοθέτηση του υδρογόνου ως καύσιμο για τις μεταφορές. Κάποια από αυτά είναι:

Πρόγραμμα HECTOR (Hydrogen Waste Collection Vehicles in North West Europe) [53]: Αυτό το πρόγραμμα θα αναπτύξει και θα δοκιμάσει 7 απορριμματοφόρα κυψελών καυσίμου σε 7 πιλοτικές τοποθεσίες σε όλη την περιοχή της βορειοδυτικής Ευρώπης. Αυτές οι περιοχές είναι:

- Αμπερντίν (Σκωτία)
- Γκρόνινγκεν (Ολλανδία)
- Άρνεμ (Ολλανδία)
- Ντούισμπουργκ (Γερμανία)
- Χέρτεν (Γερμανία)
- Touraine Vallee de l'Indre (Γαλλία)
- Βρυξέλλες, (Βέλγιο)

Ο στόχος του προγράμματος είναι να δείξει ότι τα απορριμματοφόρα κυψελών καυσίμου αποτελούν μια αποτελεσματική λύση για τη μείωση των εκπομπών από τις οδικές μεταφορές στην περιοχή της Βορειοδυτικής Ευρώπης. Ορισμένα από τα φορτηγά θα λειτουργούν στα κέντρα των πόλεων και άλλα θα δοκιμαστούν σε αγροτικές περιοχές. Κάποια από τα οχήματα θα συλλέγουν τα αστικά απόβλητα με σταθερό χρονοδιάγραμμα ενώ άλλα θα συλλέγουν βιομηχανικά απόβλητα με ευέλικτο χρονοδιάγραμμα. Το έργο στοχεύει στη δοκιμή των οχημάτων σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Τα φορτηγά θα χρησιμοποιούν την υπάρχουσα υποδομή ανεφοδιασμού με υδρογόνο και όταν είναι δυνατόν, οι πιλοτικές τοποθεσίες θα χρησιμοποιούν «πράσινο» υδρογόνο για να τροφοδοτούν τα φορτηγά, μεγιστοποιώντας έτσι τις μειώσεις εκπομπών.

Πρόγραμμα SEAFUEL [55]: Το πρόγραμμα SEAFUEL στοχεύει να χρησιμοποιήσει τους ανανεώσιμους πόρους σε όλη την περιοχή του Ατλαντικού με στόχο να τροφοδοτήσει τον τοπικό στόλο μεταφορών και να υποστηρίξει τη στροφή προς μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Το έργο θα χρησιμοποιήσει την τεχνογνωσία και την υποδομή των εταιρών του προγράμματος στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με στόχο να καταδείξει τη βιωσιμότητα του υδρογόνου ως καυσίμου που θα χρησιμοποιηθεί από τις τοπικές αρχές μεταφορών. Η επιτυχία του έργου θα προωθήσει ένα φιλικότερο προς το περιβάλλον σύστημα μεταφορών το οποίο θα μπορεί να υιοθετηθεί από άλλες περιοχές του Ατλαντικού. Η περιοχή που θα λάβει χώρα το συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι η Τενερίφη.

Το σύστημα ανεφοδιασμού θα αποτελείται από τα εξής:

- Σύνδεση του σταθμού ανεφοδιασμού με ηλιακούς συλλέκτες, ανεμογεννήτριες χρήση της ωκεάνιας ενέργειας και παραγωγή του καυσίμου με βάση τη διαθεσιμότητα αυτών των πόρων. Η εγκατεστημένη ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές είναι 51 MW
- Εγκατάσταση μονάδας αφαλάτωσης ικανότητας 175 m³/ημέρα (2,4 kW/m³)
- Σταθμό ανεφοδιασμού H₂ (12kg H₂/ημέρα σε πίεση 350 bar): Μια πιλοτική μονάδα θα εγκατασταθεί στην Τενερίφη για την παραγωγή υδρογόνου για οχήματα και η ηλιακή ενέργεια θα τροφοδοτήσει τον σταθμό ανεφοδιασμού καυσίμων και τη μονάδα αφαλάτωσης. Στα πλαίσια του προγράμματος θα χρησιμοποιηθούν οχτώ οχήματα τα οποία θα κινούνται με υδρογόνο

Πρόγραμμα H2Haul (Hydrogen Fuel Cell Trucks for Heavy Duty Zero Emissions Logistics) [54]: Το H2Haul είναι ένα έργο που συγχρηματοδοτείται από την «FCHJU». Στοχεύει στην ανάπτυξη 16 φορτηγών κυψελών καυσίμου μηδενικών εκπομπών σε τέσσερις τοποθεσίες. Επιπλέον, θα εγκατασταθούν νέοι σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου υψηλής χωρητικότητας για την παροχή υδρογόνου με χαμηλές εκπομπές άνθρακα στα φορτηγά. Το έργο ξεκίνησε το 2019 και θα διαρκέσει πέντε χρόνια. Οι χώρες στις οποίες θα λάβει χώρα το παραπάνω πρόγραμμα είναι το Βέλγιο, η Ελβετία, η Γαλλία και η Γερμανία. Οι στόχοι του παραπάνω προγράμματος είναι οι εξής:

- Η ανάπτυξη φορτηγών κυψελών καυσίμου μεγάλων αποστάσεων βαρέως τύπου (26 και 44 t) που πληρούν τις απαιτήσεις των πελατών σε διάφορα περιβάλλοντα
- Η δημιουργία τριών πιστοποιημένων τύπων φορτηγών κυψελών καυσίμου
- Η εγκατάσταση μιας αξιόπιστης υποδομής ανεφοδιασμού υδρογόνου

- Τα φορτηγά θα διανύσουν από ένα εκατομμύριο χιλιόμετρα αποδεικνύοντας με αυτό τον τρόπο τη βιωσιμότητα της τεχνολογίας
- Θα αποδείξει την υψηλή αξιοπιστία των φορτηγών κυψελών καυσίμου βαρέως τύπου
- Η συνεχής παρακολούθηση της απόδοσης του οχήματος καθώς και της υπόλοιπης υποδομής θα δώσει στοιχεία σχετικά με την απόδοση και τα περιβαλλοντικά οφέλη των φορτηγών κυψελών καυσίμου
- Η προετοιμασία της ευρωπαϊκής αγοράς για την περαιτέρω ανάπτυξη φορτηγών κυψελών καυσίμου μέσω της ανάπτυξης καινοτόμων επιχειρηματικών μοντέλων και της διάδοσης πληροφοριών για το έργο

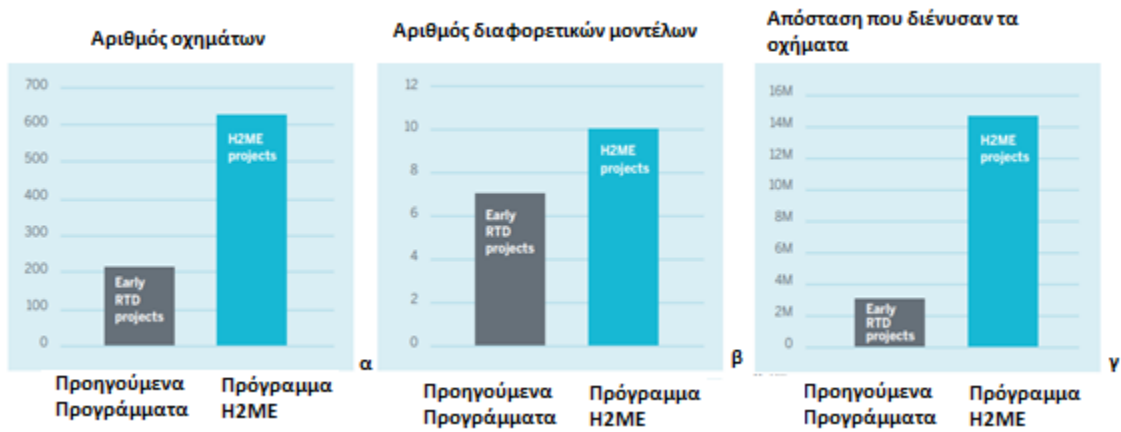
Πρόγραμμα H2 Share [56]: Ο στόχος του H2Share είναι να διευκολύνει την ανάπτυξη μιας αγοράς για βαρέα οχήματα χαμηλών εκπομπών άνθρακα με υδρογόνο για εφαρμογές εφοδιαστικής αλυσίδας. Το πρόγραμμα θα λάβει χώρα στην Ολλανδία, στο Βέλγιο και στη Δανία και στην ουσία θα δημιουργήσει μια βάση για την ανάπτυξη δικτύου φορτηγών μηδενικών ρύπων σε αυτές τις χώρες.

Πρόγραμμα H2 SHIPS [57]: Το H2SHIPS θα επιδείξει την προστιθέμενη αξία του H₂ για τις θαλάσσιες μεταφορές και θα αναπτύξει ένα σχέδιο για την υιοθέτησή του σε ολόκληρη τη Βορειοδυτική Ευρώπη (NWE).

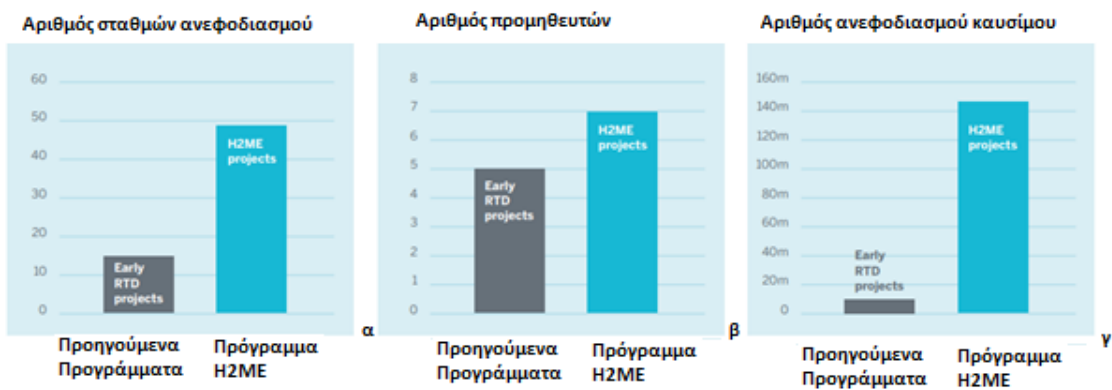
Πρόγραμμα H2ME (Hydrogen Mobility Europe) [58]: Αυτό το πρόγραμμα είναι ένα από τα σημαντικότερα προγράμματα που έχει ως στόχο τη δημιουργία του πρώτου πανευρωπαϊκού δικτύου σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου. Οι χώρες που συμμετέχουν σε αυτό το πρόγραμμα είναι η Γαλλία, η Γερμανία, η Σουηδία, το Βέλγιο, η Νορβηγία, η Αυστρία, η Ολλανδία, η Ισλανδία, η Δανία, το Λουξεμβούργο και το Ηνωμένο Βασίλειο. Για τη πρώτη φάση του προγράμματος (2015-2022) θα κατασκευαστούν σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου οι περιοχές και τα χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στον Πίνακα 5.1. Στα Σχήματα 5.2-5.3 γίνεται μία σύγκριση ανάμεσα σε αυτό το ερευνητικό πρόγραμμα και σε προηγούμενα ερευνητικά προγράμματα σε διάφορες κατηγορίες π.χ. αριθμός οχημάτων, αριθμός μοντέλων, αριθμός σταθμών ανεφοδιασμού κ.α.

Πίνακας 5.1: Περιοχές, αριθμός και χαρακτηριστικά σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου στα πλαίσια του προγράμματος H2ME [58].

Περιοχές	Αριθμός σταθμών	Χαρακτηριστικά
Γερμανία	20	700 bar
Σκανδιναβικές χώρες	9	700 bar
Γαλλία	13	350 bar και 700 bar
Ηνωμένο Βασίλειο	6	350 bar και 700 bar
Ολλανδία	1	700 bar



Σχήμα 5.2: Σύγκριση του προγράμματος H2ME σε σχέση με παλαιότερα προγράμματα όσον αφορά: α) τον αριθμό των οχημάτων, β) τον αριθμό των διαφορετικών μοντέλων οχημάτων, γ) την απόσταση που διένυσαν τα οχήματα κατά τη διάρκεια του προγράμματος [58].



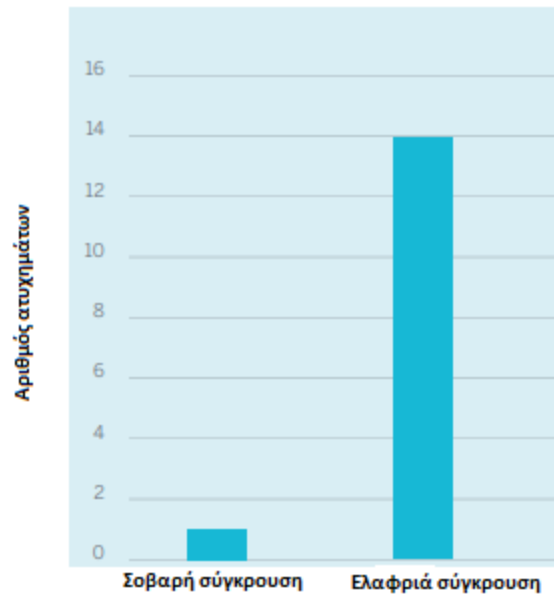
Σχήμα 5.3: Σύγκριση του προγράμματος H2ME σε σχέση με παλαιότερα προγράμματα όσον αφορά: α) τον αριθμό των σταθμών ανεφοδιασμού, β) τον αριθμό των προμηθευτών, γ) τον αριθμό των φορών που τα οχήματα χρειάστηκαν ανεφοδιασμό καυσίμου [58].

Η «Hydrogen Europe» θέτει ως στόχο 1.000 δημόσιους σταθμούς ανεφοδιασμού με υδρογόνο σε όλη την Ευρώπη έως το 2025. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται γρηγορότερη ανάπτυξη νέων σταθμών τα επόμενα 5 χρόνια. Τον Ιούλιο του 2020, υπήρχαν πάνω από 130 δημόσιοι σταθμοί στην Ευρώπη, η πλειοψηφία των οποίων ήταν είναι εγκατεστημένοι στη Γερμανία, τη Γαλλία, το Ηνωμένο Βασίλειο και τη Δανία. Άλλοι 44 σταθμοί είναι επί του παρόντος προγραμματισμένοι ή υπό κατασκευή. Αν και αυτό αντιπροσωπεύει την έναρξη ενός πανευρωπαϊκού δικτύου ανεφοδιασμού, πολλοί από τους υπάρχοντες σταθμούς έχουν τη δυνατότητα να ανεφοδιάζουν μόνο σχετικά μικρό αριθμό ελαφρών οχημάτων (π.χ. αυτοκίνητα), ενώ μόνο λίγοι σταθμοί έχουν τη δυνατότητα να εξυπηρετούν στόλους ταξί, λεωφορείων κ.α. Απαιτούνται σημαντικές περαιτέρω επενδύσεις για την ανάπτυξη επαρκούς δικτύου σταθμών ανεφοδιασμού για την κάλυψη των πιθανών αναγκών της αγοράς, ιδίως όταν εξετάζεται η υιοθέτηση βαρέων επαγγελματικών οχημάτων υδρογόνου, όπως φορτηγά, τα οποία θα απαιτούν επίσης εθνικά δίκτυα σταθμών ανεφοδιασμού υψηλής χωρητικότητας.

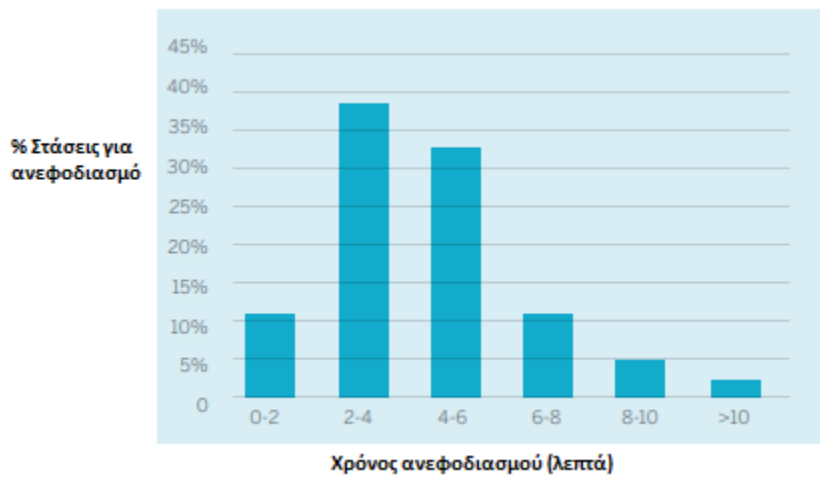
Στα πλαίσια του προγράμματος «H2ME» ζητήθηκε η άποψη των φορέων εκμετάλλευσης στόλου οχημάτων και των οδηγών που εργάζονται σε αυτές για τις πτυχές των οχημάτων κυψελών καυσίμου που απαιτούσαν βελτίωση [58]. Όσον αφορά τους πρώτους ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα αποτελούσε η τιμή αγοράς/μίσθωσης του οχήματος. Επίσης, το 68% θεώρησε ότι και η τιμή του H₂ θα έπρεπε να μειωθεί. Ακόμη ένα πρόβλημα που επισημάνθηκε είναι και ο χαμηλός αριθμός των διαθέσιμων μοντέλων. Ένας μεγαλύτερος αριθμός μοντέλων θα τους επέτρεπε να επιλέξουν ένα όχημα το οποίο θα ανταποκρίνεται περισσότερο στις ανάγκες τους. Η πλειονότητα των φορέων εκμετάλλευσης στόλου οχημάτων που αναφέρουν αυτό ως βασική απαίτηση ήταν αυτοί που χρησιμοποιούν φορτηγά τύπου βαν. Επί του παρόντος, το Renault Kangoo είναι το μόνο μοντέλο βαν κυψελών καυσίμου που διατίθεται στην αγορά, ενώ είναι διαθέσιμα αρκετά αυτοκίνητα κυψελών καυσίμου. Πολλοί, επίσης, φορείς εκμετάλλευσης στόλου βαν σημείωσαν ότι θα χρειάζονταν βελτιώσεις στην αυτονομία οδήγησης, στη συντήρηση του οχήματος και στην αξιοπιστία του οχήματος. Παρόμοιες απόψεις εκφράζουν και οι οδηγοί, ωστόσο έχουν κάποια σχετική άγνοια σχετικά με ζητήματα που σχετίζονται με τις τιμές των οχημάτων υδρογόνου σε σχέση με τους φορείς εκμετάλλευσης. Επίσης, οι οδηγοί είχαν πιο θετική άποψη για την αξιοπιστία του οχήματος και την ποιότητα συντήρησης σε σχέση με τους διαχειριστές του στόλου των οχημάτων. Αυτό είναι πιθανό να οφείλεται στο ότι οι τελευταίοι είναι υπεύθυνοι για τη συντήρηση των οχημάτων επομένως έχουν μία πιο σφαιρική εικόνα για θέματα που την αφορούν. Το 44% φορέων εκμετάλλευσης στόλου και το 36% των οδηγών δεν ήταν απόλυτα ικανοποιημένοι με την αυτονομία των οχημάτων. Τα σχόλια από τους φορείς

εκμετάλλευσης και τα δεδομένα που συλλέγονται από κατασκευαστές οχημάτων φανερώνουν ότι σε ορισμένες περιπτώσεις η αυτονομία των οχημάτων είναι χαμηλότερες από το αναμενόμενο. Αυτό εκτιμάται ότι μπορεί να οφείλεται σε μη επαρκή ανεφοδιασμό και κακή «οδηγική συμπεριφορά». Πριν από τη λειτουργία του οχήματος, όλοι οι φορείς εκμετάλλευσης δήλωσαν ότι δεν είχαν ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια των οχημάτων υδρογόνου σε σχέση με ένα όχημα βενζίνης/ντίζελ. Ωστόσο, ένας μικρός αριθμός (15%) των οδηγών είχε ανησυχίες. Οι κυριότερες από αυτές αφορούσαν τα συστήματα υψηλής πίεσης στο όχημα και την πιθανότητα κάποιας έκρηξης. Η πιθανότητα έκρηξης επισημάνθηκε για την περίπτωση ατυχήματος ή την περίπτωση που η δεξαμενή καυσίμου χρησιμοποιήθηκε πέρα από τη διάρκεια ζωής της ή επισκευάστηκε από μη ειδικευμένο άτομο. Άλλες ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια αφορούσαν την ασφάλεια των πεζών στις διαβάσεις λόγω του ότι το όχημα δεν παράγει κάποιο θόρυβο και τη μη συμμόρφωση των σταθμών ανεφοδιασμού με τα πρότυπα κάτι που μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση της δεξαμενής. Οι αριθμοί των σταθμών ανεφοδιασμού σε επαρχιακές περιοχές και κατά μήκος των μεγάλων δρόμων προσδιορίστηκαν ως οι δύο τομείς που απαιτούν τη μεγαλύτερη βελτίωση από τους φορείς εκμετάλλευσης στόλου, με πάνω από το 88% να δηλώνουν ότι αυτές οι πτυχές πρέπει να βελτιωθούν, κάτι που γίνεται εντονότερο στην περίπτωση των φορτηγών. Η αξιοπιστία των σταθμών ανεφοδιασμού θεωρήθηκε επίσης ως ένας τομέας όπου απαιτείται βελτίωση, αν και σε μικρότερο βαθμό σε σύγκριση με τον αριθμό των σταθμών. Ομοίως με τους φορείς εκμετάλλευσης στόλου, οι οδηγοί προσδιορίζουν τον αριθμό των σταθμών σε επαρχιακές περιοχές και σε μεγάλους δρόμους ως δύο τομείς που απαιτούν τις μεγαλύτερες βελτιώσεις. Τέλος, το 72% των οδηγών θεώρησε ότι απαιτείται αύξηση της αξιοπιστίας των σταθμών ανεφοδιασμού.

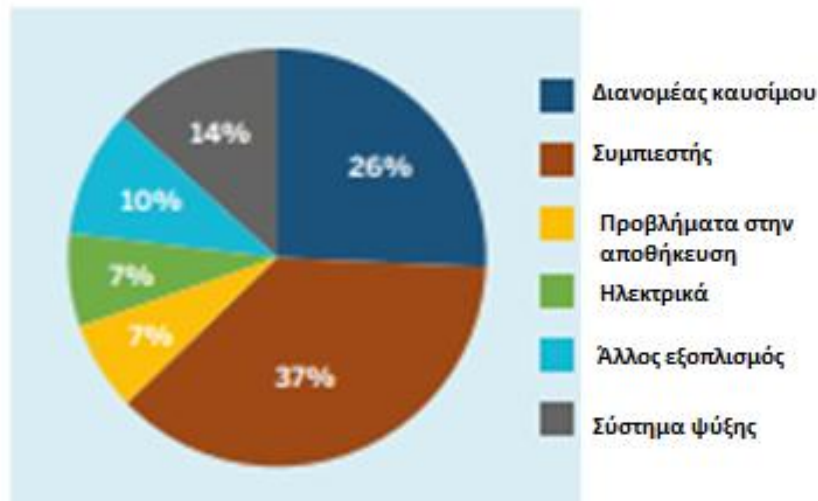
Στα Σχήματα 5.4-5.6 δίνεται μία εικόνα σχετικά με τον αριθμό των ατυχημάτων, το χρόνο ανεφοδιασμού των οχημάτων και πιθανά προβλήματα τα οποία θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη λειτουργία ενός σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου που προέκυψε από το πρόγραμμα H2ME, ενώ στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζεται η εκτιμώμενη ζήτηση υδρογόνου στην Ευρώπη για ελαφριά οχήματα.



Σχήμα 5.4: Σοβαρότητα των ατυχημάτων που ενεπλάκησαν τα οχήματα υδρογόνου κατά τη διάρκεια του προγράμματος H2ME [58].



Σχήμα 5.5: Χρόνος ανεφοδιασμού ανά στάση για τα οχήματα υδρογόνου κατά τη διάρκεια του προγράμματος H2ME [58].



Σχήμα 5.6: Πιθανές βλάβες που μπορεί να παρουσιαστούν σε σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου [58].

Πίνακας 5.2: Εκτιμώμενη ζήτηση υδρογόνου στην Ευρώπη για ελαφρά οχήματα στα πλαίσια του προγράμματος H2ME [58].

	Γερμανία	Γαλλία	Ηνωμένο Βασίλειο	Σκανδιναβικές περιοχές	Ολλανδία, Βέλγιο, Λουξεμβούργο
Αριθμός επιβατικών οχημάτων	750	180	200	300	300
Ανάγκες καυσίμου για κάθε επιβατικό όχημα (kg/ημέρα)	2	2	2	2	2
Αριθμός βαν	20	196	45	-	5
Ανάγκες καυσίμου για κάθε βαν (kg/ημέρα)	0,1	0,1	0,1	-	0,1
Συνολική κατανάλωση (kg)	1.502	380	404	600	600
Σταθμοί ανεφοδιασμού για επιβατικά και βαν	71	12	11	18	6
Ημερήσια απαίτηση για καύσιμο σε κάθε σταθμό (kg)	18	32	37	33	100

5.1.1 Προβλήματα προς αντιμετώπιση

Για να διασφαλιστεί ότι οι πελάτες μπορούν να χρησιμοποιήσουν πλήρως τις δυνατότητες των οχημάτων υδρογόνου κυψελών καυσίμου, θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί ο χρόνος που κάθε σταθμός είναι πλήρως λειτουργικός και διαθέσιμος στους πελάτες για ανεφοδιασμό. Το πρόγραμμα H2ME στοχεύει στην επίτευξη μέσης διαθεσιμότητας άνω του 98% έως το 2022 σε όλους τους σταθμούς του προγράμματος [58]. Η διαθεσιμότητα που έχει αναπτυχθεί μέχρι σήμερα ποικίλλει και δεν πληρούν όλοι οι σταθμοί αυτήν τη στιγμή αυτόν τον στόχο [58]. Είναι σύνηθες οι σταθμοί αυτοί να αντιμετωπίζουν προβλήματα στη λειτουργία τους όταν πρέπει να αντιμετωπιστούν διάφορα τεχνικά ζητήματα μετά το άνοιγμα του σταθμού και σε ορισμένες περιπτώσεις μετά από σημαντικές αναβαθμίσεις. Η διαθεσιμότητα τείνει να βελτιώνεται καθώς αυξάνεται ο συνολικός όγκος του διανεμόμενου υδρογόνου και αντιμετωπίζονται αυτά τα προβλήματα. Επίσης, ορισμένα εξαρτήματα (π.χ. συμπιεστές) είναι επιρρεπή σε ζημιές (συμπεριλαμβανομένης της ζημιάς από λάθος χειρισμό από τους χρήστες) και απαιτείται περαιτέρω ανάπτυξη της αλυσίδας εφοδιασμού για την παραγωγή πιο αξιόπιστων εξαρτημάτων [58]. Οι κατασκευαστές οχημάτων έχουν εντοπίσει βελτιώσεις στη διαθεσιμότητα των σταθμών. Ωστόσο προβλήματα με απομονωμένους σταθμούς θα μπορούσαν να προκαλέσουν αναστάτωση στους πελάτες καθώς δεν θα υπάρχουν άλλοι σταθμοί ανεφοδιασμού σε κοντινό σημείο. Ένα χαρακτηριστικό τέτοιο παράδειγμα αποτελούν οι Σκανδιναβικές χώρες. Η πλειονότητα των σκανδιναβικών σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου λειτουργούν από δύο εταιρείες: την Uno-X (των οποίων οι σταθμοί προμηθεύονται από τη NEL) και προηγουμένως τη HYOP [58]. Τον Σεπτέμβριο του 2018 η HYOP έκλεισε το δίκτυο των πρατηρίων ανεφοδιασμού της στη Νορβηγία (μετά την πτώχευσή τους), πράγμα που σημαίνει ότι όλοι οι σταθμοί προμηθεύονταν από τη NEL. Τον Ιούνιο του 2019, ένας σταθμός NEL στο Kjørbu της Νορβηγίας παρουσίασε διαρροή υδρογόνου που οδήγησε σε πυρκαγιά [58]. Η NEL ανταποκρίθηκε γρήγορα για να διασφαλίσει ότι ελήφθησαν όλα τα κατάλληλα μέτρα για την αποφυγή κλιμάκωσης ή περαιτέρω περιστατικών ασφάλειας. Μετά από αυτό το περιστατικό, όλα οι σταθμοί με τον ίδιο σχεδιασμό έκλεισαν ώστε να μπορούν να πραγματοποιηθούν επιθεωρήσεις και επαληθεύσεις. Αυτό περιλάμβανε και τους μοναδικούς τρεις σταθμούς στην Ισλανδία, αφήνοντας το νησί χωρίς τρόπο να ανεφοδιάσει τα οχήματά του [58]. Ο αντίκτυπος του κλεισίματος δείχνει τη σημασία του να υπάρχει πληθώρα σταθμών από διαφορετικές εταιρίες αλλά και διαφορετικού σχεδιασμού. Αυτό θα ελαχιστοποιήσει τον αντίκτυπο οικονομικών ή τεχνικών ζητημάτων και επακόλουθη ζημιά στη φήμη της υδρογοκίνησης σε αυτές τις περιοχές.

Επιπλέον, αυτό τονίζει την ανάγκη για διαδικασίες εκπαίδευσης που αφορούν την ασφάλεια που περιλαμβάνουν το σχεδιασμό, τη κατασκευή και τη λειτουργία του σταθμού, καθώς και την καθιέρωση διαδικασιών για την απόκριση σε περίπτωση συμβάντος ασφάλειας [58].

Ένα άλλο πρόβλημα αποτελεί η ίδρυση μιας κατάλληλης δομής ανεφοδιασμού η οποία μπορεί να είναι περίπλοκη. Οι κύριοι λόγοι για αυτό μπορεί να είναι: συζητήσεις για χρήση γης, πρόσθετες μελέτες που απαιτούνται λόγω της περιβαλλοντικής νομοθεσίας, αλλαγή τοποθεσίας μετά την αρχική επιλογή λόγω απρόβλεπτων εμποδίων (π.χ. αλλαγή σχεδίου για χρήση γης, ζητήματα με άδειες κ.λπ.). Ο χρόνος παράδοσης των αδειών μπορεί να ποικίλλει σημαντικά. Κατά μέσο όρο, οι άδειες λαμβάνονται μετά από 6 μήνες, με εξαίρεση τη Γαλλία με μέσο χρόνο παράδοσης 12 μήνες [58]. Ενώ ο χρόνος παράδοσης για την έκδοση αδειοδότησης αναμένεται να μειωθεί καθώς η τεχνολογία του υδρογόνου θα κερδίζει ολοένα και μεγαλύτερο έδαφος οι διαδικασίες για την εύρεση της κατάλληλης τοποθεσίας μπορεί να γίνουν πιο περίπλοκες καθώς οι επιλογές κατάλληλων τοποθεσιών θα μειώνονται. Η κατασκευή και η λειτουργία του σταθμού είναι γενικά η ταχύτερη φάση. Η εγκατάσταση συσκευής ηλεκτρόλυσης στον σταθμό αυξάνει τη διάρκεια αυτής της φάσης κατά 25% έως 50% σε σύγκριση με το σταθμό ο οποίος τροφοδοτείται με H_2 που μεταφέρεται από φορτηγά και αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη πολυπλοκότητα των εγκαταστάσεων στην πρώτη περίπτωση [58].

5.1.2 Ρυθμιστικό πλαίσιο σχετικά με το υδρογόνο

Η Οδηγία για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΕΕ) 2018/2001 ορίζει νομικά στο τι θεωρείται ανανεώσιμο καύσιμο (υγρό ή αέριο) μη βιολογικής προέλευσης. Σε αυτόν τον ορισμό περιλαμβάνεται και το υδρογόνο [44]. Η οδηγία 2014/94/ΕΕ για την υποδομή εναλλακτικών καυσίμων θεσπίζει ένα κοινό πλαίσιο και ορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις για την ανάπτυξη υποδομών εναλλακτικών καυσίμων στα κράτη μέλη συμπεριλαμβανομένων των σημείων ανεφοδιασμού για το υδρογόνο [51]. Η Οδηγία για την ποιότητα των καυσίμων 98/70/ΕΚ (ΕΚ) προωθεί έμμεσα τη χρήση υδρογόνου, απαιτώντας από τους προμηθευτές καυσίμων να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά μονάδα ενέργειας κατά 6% έως τις 31 Δεκεμβρίου 2020 [44]. Συμπληρώνεται από την Οδηγία (ΕΕ) 2015/652 η οποία ορίζει τον συντελεστή απόδοσης του ηλεκτρικού συστήματος κυψελών καυσίμου υδρογόνου στο 40% και καθορίζει την ποσότητα των αέριων ρύπων του καθαρού υδρογόνου και του υδρογόνου που παράγεται από τα ορυκτά καύσιμα και το μεθάνιο [51]. Επιπλέον, το έργο «HyLaw» εντόπισε περισσότερες από 50 νομοθετικές πράξεις της ΕΕ σε

ευρύτερους ρυθμιστικούς τομείς που επηρεάζουν έμμεσα την ανάπτυξη της τεχνολογίας υδρογόνου και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη, μεταξύ των οποίων η υγεία και η ασφάλεια, το περιβάλλον, η εργασία και οι μεταφορές [51].

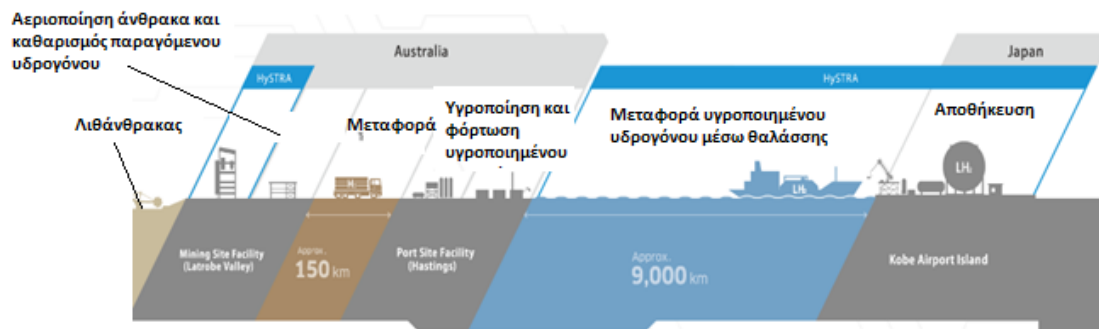
5.2 Πολιτικές για την ανάπτυξη δομών παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου στην Ιαπωνία

Η Ιαπωνία είναι μια από τις πιο προηγμένες χώρες σε σχέση με την ανάπτυξη έργων υδρογόνου και έχει το πλεονέκτημα ότι έχει μια καθορισμένη κυβερνητική πολιτική που υποστηρίζει την υιοθέτηση του υδρογόνου, σε συνδυασμό με τη δημόσια αποδοχή έργων υδρογόνου στο εγχώριο ενεργειακό μίγμα. Η Ιαπωνία βρίσκεται τώρα στο τρίτο κύμα παραγωγής υδρογόνου. Το πρώτο κύμα ήταν στις αρχές της δεκαετίας του 1990, το δεύτερο κύμα ήταν στις αρχές της δεκαετίας του 2000 και το τρίτο κύμα ξεκίνησε γύρω στο έτος 2015 [51]. Επιδιώκοντας να βρεθεί ένας τρόπος να είναι ανεξάρτητη από την παραγωγή ορυκτών καυσίμων από τη Μέση Ανατολή, αναγνωρίζοντας το γεγονός ότι διαθέτει περιορισμένους πόρους και με την επιθυμία να απελευθερώσει το ενεργειακό της μίγμα από άνθρακα, η Ιαπωνία επέλεξε να αναπτύξει μια κοινωνία βασισμένη στο υδρογόνο ήδη από τη δεκαετία του 1990 [51].

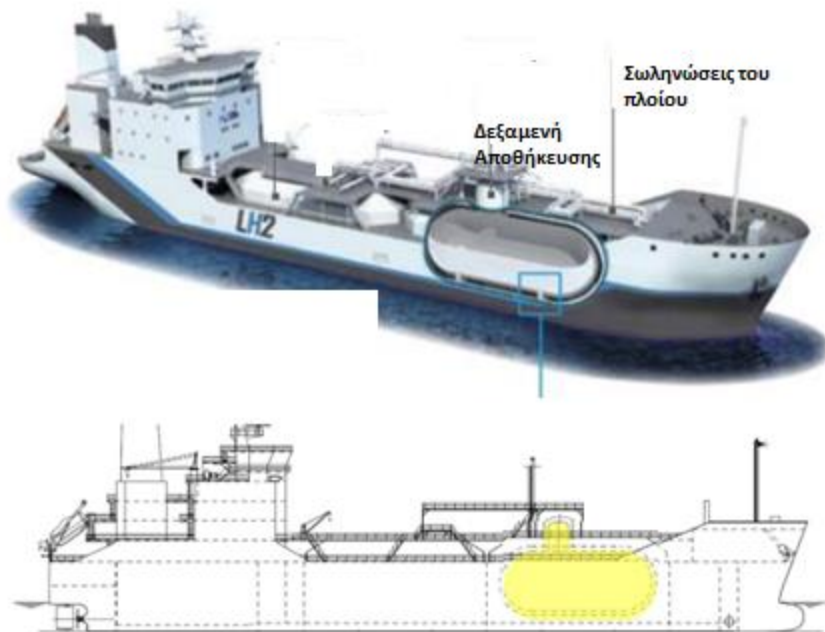
Το 2017, η Ιαπωνική κυβέρνηση διατύπωσε τη «Βασική Στρατηγική για το Υδρογόνο» θέτοντας ως στόχο τη μείωση των εκπομπών CO₂ το 2050 σε σχέση με αυτά του 2013 κατά 80% [47]. Τον Οκτώβριο του 2018, η Ιαπωνία πραγματοποίησε την πρώτη στον κόσμο «Υπουργική Σύνοδο Ενέργειας από το Υδρογόνο» θέμα της οποίας ήταν να τεθούν οι βάσεις για μία κοινωνία η οποία θα βασίζεται στο υδρογόνο. Το 2019 πραγματοποιήθηκε το δεύτερο συνέδριο με αυτό το θέμα με περίπου 600 συμμετέχοντες από 35 χώρες, περιφέρειες και οργανισμούς. Το τρίτο συνέδριο πραγματοποιήθηκε διαδικτυακά στις 14 Οκτωβρίου 2020 με στόχο να γίνει γνωστή η πρόοδος πάνω σε αυτό το θέμα [47]. Παράλληλα, η Ιαπωνία έχει, επίσης, συνάψει μνημόνια συνεργασίας με τη Νέα Ζηλανδία, την Αργεντινή και την Ολλανδία σχετικά με την υιοθέτηση του υδρογόνου [47]. Το τρίτο τρίμηνο του 2020, η Ιαπωνία αποφάσισε να κάνει ένα σημαντικό βήμα προς μια κοινωνία χωρίς άνθρακα. Στις 26 Οκτωβρίου 2020, η κυβέρνηση της Ιαπωνίας καθόρισε τα βήματα για απαλλαγή από τον άνθρακα έως το 2050 και σκοπεύει η παραγωγή υδρογόνου να φτάσει τα τρία εκατομμύρια τόνους πριν από το 2030 και τα 20 εκατομμύρια τόνους πριν από το 2050. Στις 21 Ιουλίου 2021 δημοσιεύτηκε το προσχέδιο του «6ου Στρατηγικού Ενεργειακού Σχεδιασμού», το οποίο αναφέρει ότι η Ιαπωνία στοχεύει να αυξήσει το ποσοστό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο εγχώριο ενεργειακό της μίγμα από 22-24% σε 36-38% για το οικονομικό έτος 2030 [47]. Μέσα στο ενεργειακό αυτό μίγμα περιλαμβάνεται πλέον και το υδρογόνο ως πηγή ενέργειας. Το προσχέδιο αναφέρεται

στη δημιουργία μίας διεθνούς αλυσίδας εφοδιασμού υδρογόνου, στην ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών παραγωγής υδρογόνου, στη μείωση του κόστους προμήθειας υδρογόνου και άλλα ειδικά μέτρα. Η Ιαπωνία έχει αρχίσει να αναπτύσσει γεννήτριες υδρογόνου ενώ παράλληλα δημιουργεί και μια αλυσίδα εφοδιασμού.

Για την υιοθέτηση του υδρογόνου ως καύσιμο, σημαντική είναι όπως προαναφέρθηκε η ανάπτυξη μίας αξιόπιστης και διεθνούς εφοδιαστικής αλυσίδας. Σε εξέλιξη βρίσκεται ένα έργο παραγωγής υδρογόνου από λιθάνθρακα, μεγάλα αποθέματα του οποίου υπάρχουν στην Αυστραλία, και υγροποίησης του για τη μεταφορά του στην Ιαπωνία μέσω θαλάσσης (Σχήμα 5.7). Σε αυτό το πλαίσιο, τον Δεκέμβριο του 2019, κυκλοφόρησε ένα πλοίο για τη μεταφορά του υγροποιημένου υδρογόνου, το «Suiso Frontier» και θα χρησιμοποιηθεί σε ένα πείραμα επίδειξης όπου το υδρογόνο που παράγεται στην Αυστραλία θα μεταφερθεί στην Ιαπωνία έως τα τέλη Μαρτίου 2022 [47], [59]. Οι εγκαταστάσεις ενός τέτοιου πλοίου φαίνονται στο Σχήμα 5.8. Στο Κόμπε, όπου θα παραληφθεί το υδρογόνο, μια δεξαμενή 2.500 m³ τέθηκε σε λειτουργία τον Ιούνιο του 2020. Ένα άλλο έργο το οποίο βρίσκεται σε εξέλιξη στο Μπρουνέι για την εξαγωγή υδρογόνου ως μεθυλοκυκλοεξάνιο (MCH), χρησιμοποιώντας τη μέθοδο οργανικού υδριδίου από αχρησιμοποίητο αέριο. Τον Δεκέμβριο του 2019, το υδρογόνο που παράγεται στο Μπρουνέι έφτασε στην Ιαπωνία για πρώτη φορά. Ως εκ τούτου, η ατζέντα εσωτερικής πολιτικής είναι να συνδυαστούν τα πλεονάζοντα ορυκτά καύσιμα από το εξωτερικό και να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή «μπλε» υδρογόνου δεσμεύοντας το CO₂ χρησιμοποιώντας τεχνολογίες δέσμευσης του CO₂ παράλληλα με τη δημιουργία διεθνών αλυσίδων εφοδιασμού [47], [59].



Σχήμα 5.7: Σχέδιο μεταφοράς υδρογόνου από την Αυστραλία στην Ιαπωνία [59].



Σχήμα 5.8: Εγκαταστάσεις πλοίου μεταφοράς υδρογόνου [59].

Στην Ιαπωνία, αναμένεται μεταφορά υδρογόνου με τη μορφή (i) υγρού υδρογόνου, (ii) MCH και (iii) αμμωνίας. Το μεταφερόμενο υδρογόνο με τη μορφή MCH χρησιμοποιείται πλέον ως καύσιμο για θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Επί του παρόντος, η εισαγωγή υδρογόνου βρίσκεται υπό μελέτη τα αποτελέσματα της οποίας αναμένονται σε εύθετο χρόνο [47], [59].

Επίσης, η Ιαπωνία λόγω της μεγάλης αύξησης της ενέργειας η οποία θα προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές εστιάζει την προσοχή της στην τεχνολογία power to gas ("P2G"), η οποία χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές για την παραγωγή αερίου καυσίμου (υδρογόνο) και στη συνέχεια ακολουθεί η αποθήκευσή του. Η εξέλιξη της τεχνολογίας της ηλεκτρόλυσης του νερού είναι απαραίτητη για την εμπορική εκμετάλλευση της παραπάνω τεχνολογίας. Τον Μάρτιο του 2020, η μεγαλύτερη (10 MW) μονάδα παραγωγής υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στον κόσμο ξεκίνησε τη λειτουργία της στη «Nami Town», στην επαρχία της Φουκουσίμα και μέχρι στιγμής έχει επιδείξει θετικά αποτελέσματα. Εκτός από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η διαχείριση αχρησιμοποίητων τοπικών πόρων, όπως τα απορρίμματα πλαστικών και η λυματολάσπη, θεωρείται ως πηγή υδρογόνου με χαμηλές εκπομπές άνθρακα [47].

5.2.1 Προβλήματα προς αντιμετώπιση

Επί του παρόντος, το κόστος του υδρογόνου στους σταθμούς ανεφοδιασμού στην Ιαπωνία είναι περίπου 100 Γιεν/ Nm^3 (0,76 Ευρώ/ Nm^3), το οποίο είναι σχετικά υψηλό. Για αυτό το λόγο απαιτείται περαιτέρω μελέτη για την ανάπτυξη μιας διεθνούς αλυσίδας εφοδιασμού, βελτίωση της απόδοσης της ηλεκτρόλυσης του νερού, μία διαδικασία η οποία είναι από τις φιλικότερες προς το περιβάλλον για την παραγωγή υδρογόνου και αύξηση της εγχώριας ζήτησης του υδρογόνου [47]. Επίσης, όσον αφορά τα οχήματα ο αριθμός των εξαρτημάτων στα οχήματα κυψελών καυσίμου είναι μεγαλύτερος από ότι στα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρίες και το κόστος μεμονωμένων εξαρτημάτων είναι υψηλό [47]. Επιπλέον, η ικανότητα παραγωγής είναι μειωμένη καθώς η κατασκευή ενός τέτοιου αυτοκινήτου απαιτεί μεγαλύτερο όγκο χειρωνακτικής εργασίας με αποτέλεσμα το κόστος των οχημάτων είναι αρκετά υψηλό. Η τρέχουσα τιμή ενός επιβατικού αυτοκινήτου αυτού του τύπου είναι περίπου 7.000.000 Γιεν (περίπου 54.000 Ευρώ), που είναι 3.000.000 Γιεν (περίπου 23.000 Ευρώ) πιο ακριβό από ένα υβριδικό όχημα. Η τιμή ενός λεωφορείου είναι 150.000.000 Γιεν [47]. Τα οχήματα κυψελών καυσίμου έχουν σχεδόν την ίδια αυτονομία με τα βενζινοκίνητα αυτοκίνητα, αλλά το κόστος του υδρογόνου είναι μεγαλύτερο από αυτό της βενζίνης. Τέλος, η έλλειψη σταθμών ανεφοδιασμού αποτρέπει τη διάδοσή τους. Αυτό με τη σειρά του, αποτρέπει τους κατασκευαστές οχημάτων από την εισαγωγή νέων επιβατικών αυτού του τύπου. Το προσχέδιο «Στρατηγικού Ενεργειακού Σχεδιασμού», που αφορά τη διάδοση των αυτοκινήτων, λεωφορείων και φορτηγών με κυψέλες καυσίμου, επιδιώκει τη δημιουργία 1.000 σταθμών υδρογόνου έως το 2030 σε διάφορες τοποθεσίες [47].

5.2.2 Ρυθμιστικό πλαίσιο σχετικά με το υδρογόνο

Δεν υπάρχουν ακόμη ειδικοί νόμοι για τη χρήση του υδρογόνου στην Ιαπωνία. Όσον αφορά το αέριο υδρογόνο, κεντρικό ρόλο διαδραματίζει ο νόμος για την ασφάλεια αερίων υψηλής πίεσης. Για παράδειγμα, για την κατασκευή μονάδας αποθήκευσης απαιτείται άδεια ή κοινοποίηση στον τοπικό κυβερνήτη, με συγκεκριμένες προδιαγραφές που σχετίζονται με την ποσότητα παραγωγής και αποθήκευσης. Επιπλέον, το υδρογόνο πρέπει να μεταφέρεται με τρόπο που να πληροί τα πρότυπα ασφαλείας που ορίζονται κατά το νόμο σχετικά με τα αέρια υψηλής πίεσης [47]. Ωστόσο, ισχύουν και επιπλέον κανονισμοί που σχετίζονται με την κατασκευή καθώς και περιβαλλοντικοί κανονισμοί.

Ο νόμος για την «Ασφάλεια Αερίων Υψηλής Πίεσης» απαιτεί άδεια ή κοινοποίηση προς τους τοπικούς άρχοντες ανάλογα με την ικανότητα επεξεργασίας των εγκαταστάσεων παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου. Ακόμα, παρέχει τεχνικούς κανονισμούς για να διασφαλίσει ότι το υδρογόνο δεν παραμένει στους χώρους όπου είναι εγκατεστημένες οι μονάδες παραγωγής υδρογόνου ή οι δεξαμενές όπου αυτό αποθηκεύεται. Αυτό συμβαίνει για την αποφυγή κάποιου ατυχήματος σε περίπτωση διαρροής υδρογόνου. Ο κανονισμός για την ασφάλεια των αερίων υψηλής πίεσης ορίζει, επίσης, λεπτομερείς κανονισμούς για τη θερμοκρασία καθώς και τη θέση των δεξαμενών αποθήκευσης [47].

Εφόσον κατά την παραγωγή υδρογόνου και των κυψελών καυσίμου παράγονται αέριοι ρύποι, απαιτείται η περιοδική μέτρηση αιθάλης και ΝΟx σύμφωνα με τον κανονισμό για τον «Έλεγχο της Ρύπανσης του Αέρα» [47].

Σύμφωνα με τον νόμο «περί ρύθμισης του θορύβου» και τον νόμο περί «ρύθμισης δονήσεων», εάν μια μονάδα που είναι εγκατεστημένη σε εργοστάσιο ή χώρο εργασίας προκαλεί σημαντικό θόρυβο και κραδασμούς, πρέπει να υποβληθεί αίτηση στην αρμόδια τοπική κυβέρνηση [47].

Η μεταφορά αερίου υδρογόνου με φορτηγά, βυτιοφόρα κλπ. υπόκειται στον νόμο για την «Ασφάλεια Αερίων Υψηλής Πίεσης», στον νόμο για τα «Οδικά Οχήματα» και άλλους κανονισμούς που ορίζουν τεχνικά πρότυπα, όπως μεθόδους φόρτωσης οχημάτων, μεθόδους μεταφοράς και μέτρα ασφαλείας για εμπορευματοκιβώτια [47].

Ο νόμος για την «Οδική Κυκλοφορία» απαγορεύει ή περιορίζει τη διέλευση οχημάτων φορτωμένων με επικίνδυνες ουσίες με εκρηκτικές ή εύφλεκτες ιδιότητες σε υποβρύχιες σήραγγες [47].

Οι σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη χρήση και τη διάδοση των οχημάτων υδρογόνου. Τα τεχνικά πρότυπα για τους σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου είναι, ουσιαστικά, σύμφωνα με εκείνα που ισχύουν για εγκαταστάσεις παραγωγής αερίου υψηλής πίεσης βάσει του νόμου για την «Ασφάλεια Αερίων Υψηλής Πίεσης». Ωστόσο, περιλαμβάνονται πιο αυστηρά τεχνικά πρότυπα για την προστασία των καταναλωτών. Ο νόμος περί «Δομικών Προτύπων» περιορίζει τις περιοχές όπου μπορούν να εγκατασταθούν σταθμοί ανεφοδιασμού με υδρογόνο [47].

Οι νόμοι για τα επικίνδυνα εμπορεύματα ρυθμίζουν τη θέση και τον εξοπλισμό που είναι εγκατεστημένος σε σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου, όπως συμπιεστές, συσσωρευτές και διανομείς. Όταν εγκαθίσταται σταθμός ανεφοδιασμού υδρογόνου σε πρατήριο καυσίμων, είναι απαραίτητο να συμμορφώνεται με τα μέτρα ασφαλείας που προβλέπονται στον νόμο περί «Πυροσβεστικών Υπηρεσιών» και στον νόμο για την «Ασφάλεια Αερίων Υψηλής Πίεσης» [47]. Η κυβέρνηση της Ιαπωνίας μέχρι τον Αύγουστο του 2020, είχε αναθεωρήσει τις σχετικές υπουργικές εντολές για να

επιτρέψει τη μη επανδρωμένη λειτουργία σταθμών υδρογόνου μέσω απομακρυσμένης παρακολούθησης [47].

5.3 Πολιτικές για την ανάπτυξη δομών παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου στις ΗΠΑ

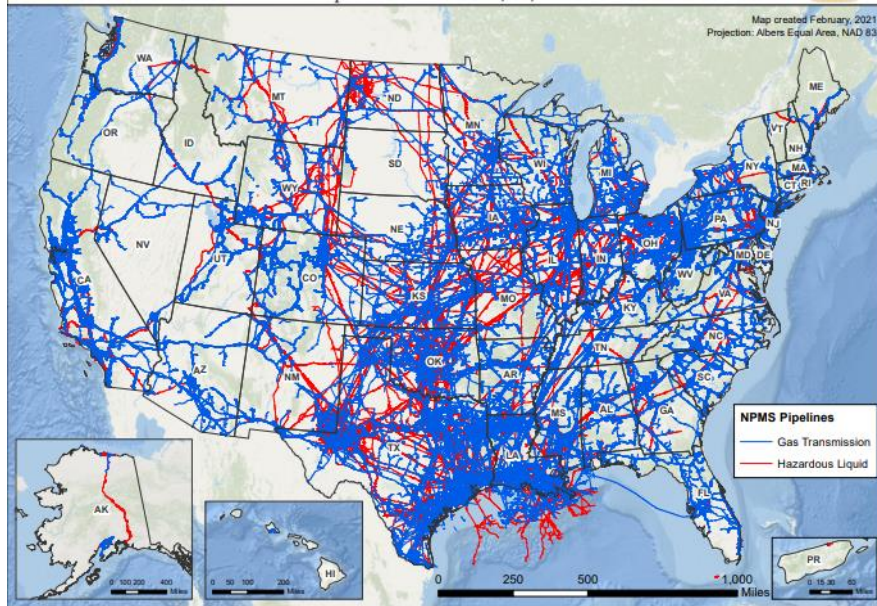
Στις ΗΠΑ υπάρχουν περίπου 1.600 μίλια αγωγών υδρογόνου η μεγάλη πλειονότητα των οποίων βρίσκεται στην ακτή του Κόλπου (Gulf Coast) και στις περιοχές FarmBelt. Σήμερα, το υδρογόνο που μεταφέρεται μέσω αγωγών χρησιμεύει ως πρώτη ύλη σε κοντινά διυλιστήρια και εργοστάσια παραγωγής αμμωνίας [49]. Αρκετά μικρότεροι αγωγοί υδρογόνου βρίσκονται σε όλη τη χώρα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων μικρότερων αγωγών αποτελεί αυτός της «HawaiiGas» ο οποίος μεταφέρει ένα αέριο το οποίο περιέχει περίπου 12% υδρογόνο. Επίσης, έχουν υπάρξει και παλαιότερες μεταφορές μιγμάτων αερίου υδρογόνου μέσω αγωγών όπως είναι για παράδειγμα οι αγωγοί που μετέφεραν αέριο άνθρακα, το οποίο χρησιμοποιήθηκε από το 1800 έως τις αρχές του 1950 και ήταν μίγμα αρκετών αερίων, συμπεριλαμβανομένου του υδρογόνου [49]. Αυτήν τη στιγμή υπάρχουν τρεις υπόγειες εγκαταστάσεις αποθήκευσης υδρογόνου στις Ηνωμένες Πολιτείες [49]. Η «Chevron Phillips Clemens Terminal» αποθηκεύει υδρογόνο σε αλατωρυχείο από τη δεκαετία του 1980. Το 2017, η «Lane Power & Energy Solutions Inc.» άρχισε να κατασκευάζει τη μεγαλύτερη εγκατάσταση αποθήκευσης υδρογόνου στον κόσμο στο Beaumont του Τέξας για λογαριασμό της «Air Liquide». Αυτή τη στιγμή βρίσκεται σε εξέλιξη ένα έργο που έχει ως στόχο την αποθήκευση 1.000 MW υδρογόνου στα υπόγεια σπήλαια αλατιού. Επιπροσθέτως, οι ΗΠΑ διαθέτουν περισσότερα από 2.8 εκατομμύρια μίλια αγωγών φυσικού αερίου και επικίνδυνων υγρών σε όλη τη χώρα, μερικοί από τους οποίους θα μπορούσαν να επαναχρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά υδρογόνου [49]. Από το 2020, οι Ηνωμένες Πολιτείες είχαν περίπου 2.3 εκατομμύρια μίλια αγωγών διανομής αερίου, 0.3 εκατομμύρια μίλια αγωγών μεταφοράς αερίου και 0.2 εκατομμύρια μίλια αγωγών για τη διανομή υγρών. Υπάρχουν επίσης περισσότερες από τετρακόσιες υπόγειες τοποθεσίες αποθήκευσης φυσικού αερίου [49]. Τέτοιες τοποθεσίες μπορεί να είναι τα πηγάδια, τα σπήλαια αλατιού κ.α.

Οι μεγαλύτερες προκλήσεις για τη μετατροπή της υπάρχουσας υποδομής αγωγών σε αγωγούς μεταφοράς υδρογόνου είναι οι εξής [49]:

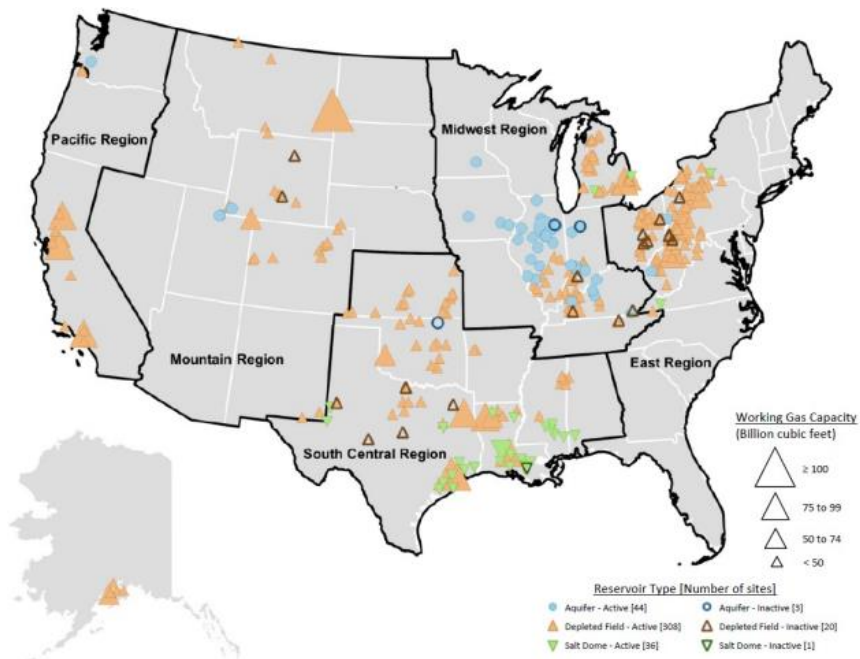
- (1) Ο προσδιορισμός των υλικών που χρησιμοποιούνται στις υπάρχουσες εγκαταστάσεις αγωγών
- (2) Η διασφάλιση της ακεραιότητας αυτών των εγκαταστάσεων
- (3) Ο προσδιορισμός των επιπτώσεων του υδρογόνου στα υλικά αυτών των αγωγών

- (4) Τοποθέτηση ή αντικατάσταση υλικών ανάλογα με την περίπτωση με υλικά κατάλληλα για τη μεταφορά του
- (5) Η ύπαρξη συστήματος για την παρακολούθηση της ακεραιότητας του αγωγού (π.χ. σύστημα ανίχνευσης ρωγμών)
- (6) Ηδασφάλιση της ύπαρξης επαρκούς προγράμματος ανίχνευσης και περιορισμού διαρροών
- (7) Αύξηση της ικανότητας του συμπιεστή των αγωγών για την υποστήριξη υψηλότερης συμπίεσης
- (8) Ύπαρξη συστήματος ελέγχου και μέτρησης

Τυχόν πρόσθετοι κίνδυνοι ασφάλειας που σχετίζονται με το υδρογόνο θα πρέπει επίσης να αξιολογηθούν και να αντιμετωπιστούν. Οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης αντιμετωπίζουν και αυτές παρόμοια προβλήματα. Παρόλο που είναι δυνατή η μεταφορά του υδρογόνου από τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις φυσικού αερίου δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί το σύνολο αυτών. Όπως δείχνουν πολλά παραδείγματα, είναι επίσης δυνατή η μεταφορά υδρογόνου σε υπάρχοντες αγωγούς φυσικού αερίου [49]. Τέτοιοι μικτοί αγωγοί αερίου θα μείωναν τις τρέχουσες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζονται με τη χρήση μόνο φυσικού αερίου και θα μπορούσαν ακόμα να χρησιμεύσουν ως μετάβαση στην ενδεχόμενη πλήρη μετατροπή τους σε αγωγούς μεταφοράς υδρογόνου. Μελέτες έχουν δείξει ότι μίγματα υδρογόνου και φυσικού αερίου με 5-20% περιεκτικότητα σε υδρογόνο θα απαιτούσαν ελάχιστες αλλαγές στις υπάρχουσες υποδομές [49]. Στα Σχήματα 5.9-5.10 φαίνονται το δίκτυο αγωγών φυσικού αερίου και επικίνδυνων υγρών στις ΗΠΑ οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά υδρογόνου και πιθανές περιοχές αποθήκευσης υδρογόνου (π.χ. περιοχές όπου βρίσκονται σπήλαια αλατιού, ξεράπηγάδια κλπ).



Σχήμα 5.9: Δίκτυο αγωγών φυσικού αερίου και επικίνδυνων υγρών στις ΗΠΑ [49].



Σχήμα 5.10: Πιθανές περιοχές αποθήκευσης υδρογόνου (π.χ. περιοχές όπου βρίσκονται σπήλαια αλατιού, ξερά πηγάδια κλπ.) [49].

Οι Ηνωμένες Πολιτείες έχουν ένα εξίσου εκτεταμένο σιδηροδρομικό δίκτυο μεταφοράς εμπορευμάτων, το οποίο καλύπτει 137.000 μίλια μέσω του οποίου διακινούνται περίπου 57 τόνοι εμπορευμάτων ανά Αμερικανό ετησίως. Σύμφωνα με

την Αμερικανική Ένωση Σιδηροδρόμων (AAR), το 70% του άνθρακα και της αιθανόλης των ΗΠΑ μεταφέρθηκε σιδηροδρομικώς το 2020 [49]. Την ίδια περίοδο το 3.2% της αμερικανικής παραγωγής αργού κινήθηκε μέσω του σιδηροδρομικού δικτύου.

Η Υπηρεσία Ασφάλειας Αγωγών και Επικίνδυνων Υλικών (PHMSA) του Υπουργείου Μεταφορών δημοσίευσε πρόσφατα κανόνες για να επιτρέπεται η μαζική μεταφορά του υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) σε βαγόνια σιδηροδρομικών οχημάτων. Η παραπάνω απόφαση θεωρείται ως πρόδρομος για πιθανή μεταφορά υγροποιημένου υδρογόνου. Συνολικά, 2.3 εκατομμύρια φορτία και εκατομμύρια τόνοι χημικών ουσιών, κάποιες από τις οποίες ήταν υψηλού κινδύνου, μεταφέρθηκαν σιδηροδρομικώς στις Ηνωμένες Πολιτείες το 2020 [49]. Ωστόσο ακόμα η μεταφορά υδρογόνου μέσω των σιδηροδρόμων θα είναι πιθανώς περιορισμένη, λόγω του ότι το κόστος και οι κίνδυνοι που υπάρχουν σχετικά με την ασφάλεια υπερβαίνουν εκείνα της μεταφοράς με αγωγούς.

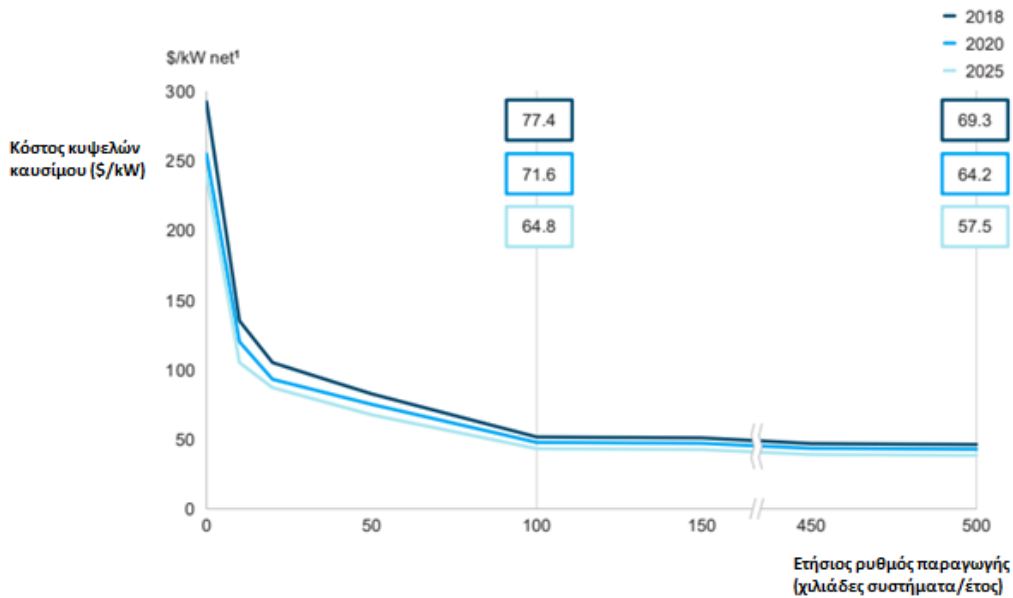
Οι Ηνωμένες Πολιτείες έχουν περίπου 360 λιμάνια τα οποία χρησιμοποιούν για εμπορικές θαλάσσιες μεταφορές, πέντε από τα οποία είναι μέσα στα κορυφαία 50 λιμάνια στον κόσμο. Αυτά τα λιμάνια θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά του υδρογόνου. Για τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου με πλοίο, θα ήταν απαραίτητο να αποθηκευτεί σε υγρή μορφή σε κρυογονικές θερμοκρασίες μέσα σε κατάλληλες δεξαμενές [49].

Οι Ηνωμένες Πολιτείες διαθέτουν, επίσης, ένα εκτεταμένο διαπολιτειακό εθνικό σύστημα αυτοκινητοδρόμων περίπου 160.000 μιλίων, που συνδέει αστικές και αγροτικές περιοχές. Επιπλέον, υπάρχει ένα δίκτυο περίπου 4 εκατομμυρίων μιλίων ομοσπονδιακών, πολιτειακών και τοπικών αυτοκινητοδρόμων και οδικών αρτηριών στο οποίο υπάρχει έντονη εμπορευματική δραστηριότητα. Σύμφωνα με την Αμερικανική Ένωση Φορτηγών, τα φορτηγά μετέφεραν περίπου το 72.5% των εμπορευμάτων των ΗΠΑ κατά βάρος το 2019, χρησιμοποιώντας 36.9 εκατομμύρια εγγεγραμμένα φορτηγά που διένυσαν περισσότερα από 3 τρισεκατομμύρια μίλια. Περισσότεροι από 96.000 μεταφορείς μεταφέρουν επικίνδυνα υλικά κάτι που αποτελεί ένδειξη ότι η βιομηχανία φορτηγών στις ΗΠΑ είναι προετοιμασμένη για τη μεταφορά υδρογόνου σε όλη τη χώρα [49].

5.3.1 Προβλήματα προς αντιμετώπιση

Για την εξάπλωση της υδρογονοκίνησης στις ΗΠΑ είναι απαραίτητη η ανάπτυξη δημοσίων και ιδιωτικών υποδομών όσον αφορά τη διανομή και τροφοδοσία του υδρογόνου. Η πρόκληση έγκειται στην αρχική υιοθέτηση αυτής της νέας υποδομής τροφοδοσίας, η οποία στη συνέχεια γίνεται ευκολότερη καθώς η αγορά μεγαλώνει.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που θα βοηθήσει στο να πάρει το υδρογόνο μεγαλύτερο μερίδιο στην αγορά των μεταφορών είναι η μείωση του κόστους. Αυτό το κόστος μπορεί να σχετίζεται με τις μεθόδους παραγωγής και αποθήκευσης ακόμα και με το κόστος παραγωγής των κυψελών καυσίμου. Για παράδειγμα, μελέτες έχουν δείξει ότι το κόστος του συστήματος κυψελών καυσίμου ανά kW θα μειωνόταν κατά περίπου 25% εάν η παραγωγή αυξανόταν από 1.000 σε 100.000 συστήματα ετησίως (Σχήμα 5.11) [50]. Μέχρι πρόσφατα, περίπου το 80% του κόστους του διανεμόμενου υδρογόνου οφειλόταν στους ίδιους τους σταθμούς ανεφοδιασμού και στην παράδοση του υδρογόνου [50]. Το κόστος τροφοδοσίας μπορεί να μειωθεί κατά 50% με τη χρήση των πρατηρίων λιανικής για ανεφοδιασμό, την αύξηση της ικανότητας του δικτύου κ.α. [50].



Σχήμα 5.11: Μεταβολή του κόστους των κυψελών καυσίμου σε σχέση με το ρυθμό παραγωγής [50].

5.3.2 Ρυθμιστικό πλαίσιο σχετικά με το υδρογόνο

Παρά την έλλειψη ενός ολοκληρωμένου ρυθμιστικού συστήματος, η κυβέρνηση των ΗΠΑ έχει αναγνωρίσει τις δυνατότητες του υδρογόνου ως πηγή καυσίμου. Μέχρι στιγμής, η κύρια πρωτοβουλία της ομοσπονδιακής κυβέρνησης σχετικά με το υδρογόνο ως πηγή καυσίμου ήταν η παροχή κινήτρων και κονδυλίων μέσω προγραμμάτων σε διάφορους φορείς [58]. Μία από τις πιο σημαντικές κινήσεις για την υιοθέτηση του υδρογόνου ως καύσιμο είναι η πρόθεση του Υπουργείου Ενέργειας να επενδύσει μέχρι 100.000.000 \$ σε δύο νέες κοινοπραξίες για την προώθηση της έρευνας, ανάπτυξης και

επίδειξης της τεχνολογίας υδρογόνου και κυψελών καυσίμου στα επόμενα πέντε χρόνια. Στα πλαίσια αυτού του προγράμματος η μία κοινοπραξία θα αναπτύξει οικονομικά προσιτούς ηλεκτρολύτες (απαραίτητοι για την ηλεκτρόλυση) και η άλλη κοινοπραξία θα βοηθήσει στην επιτάχυνση της ανάπτυξης κυψελών καυσίμου για οχήματα, ειδικά για φορτηγά μεγάλων αποστάσεων[60], [59]. Το Υπουργείο Ενέργειας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη και τη δοκιμή νέων τεχνολογιών υδρογόνου. Το σχέδιο για το υδρογόνο που εξέδωσε περιγράφει τη στρατηγική υψηλού επιπέδου για την προώθηση της οικονομίας του υδρογόνου με τη χρηματοδότηση έρευνας και ανάπτυξης. Αυτό το σχέδιο αναλύει πιθανές χρήσεις της χρηματοδότησης για την ανάπτυξη της οικονομίας του υδρογόνου εστιάζοντας κυρίως στον ρόλο του υδρογόνου, στην παραγωγή και μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας και στη πιθανή πρόοδο που πρέπει να σημειωθεί στις χημικές και βιομηχανικές διεργασίες, όπου παραδοσιακά χρησιμοποιείται υδρογόνο [60], [59]. Επίσης, αναμένεται ότι θα παίξει ρόλο στην παροχή κινήτρων για τη χρήση υδρογόνου στις κυψέλες καυσίμου, ειδικά για φορτηγά μεγάλων αποστάσεων. Επιπλέον, εξετάζει την παραγωγή, αποθήκευση και μεταφορά υδρογόνου και πιο συγκεκριμένα μεθόδους για να καταστεί το υδρογόνο ουδέτερο σε άνθρακα. Αυτό σημαίνει αξιολόγηση όλων των πιθανών μεθόδων παραγωγής υδρογόνου. Το υπουργείο επιδιώκει να κάνει δυνατή τη μετάβαση στο υδρογόνο, κυρίως μέσω έρευνας, ανάπτυξης και χρηματοδότησης, και φαίνεται να προετοιμάζεται για έναν ρόλο ως ηγέτης σχετικά με την ενσωμάτωση του υδρογόνου στο ευρύτερο ενεργειακό σύστημα. Εκτός από το Υπουργείο Ενέργειας άλλοι ρυθμιστικοί φορείς όσον αφορά το υδρογόνο είναι οι εξής:

OSHA (Οργανισμός Υγιεινής και Ασφάλειας στην Εργασία) [61], [62]: Ο OSHA είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία προτύπων υγείας και ασφάλειας στην εργασία, επομένως καλύπτει και τα πρότυπα υγιεινής και ασφάλειας στην εργασία για επικίνδυνα υλικά συμπεριλαμβανομένων των συμπιεσμένων αερίων και του υδρογόνου. Σε αυτά τα πρότυπα ρυθμίζονται διάφορες πτυχές που μπορούν να αφορούν μία εγκατάσταση υδρογόνου. Κάποιες από αυτές τις πτυχές μπορεί να είναι η τοποθεσία, τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν, τα χαρακτηριστικά δεξαμενών και σωληνώσεων κ.α. Επίσης θα μπορούσαν να εφαρμοστούν και άλλοι υπάρχοντες κανονισμοί οι οποίοι ισχύουν γενικά για τα συμπιεσμένα υγρά και αέρια καθώς και για τα εύφλεκτα υλικά και οι οποίοι δεν αναφέρονται ρητά στο υδρογόνο σε μία προσπάθεια γρήγορης ενσωμάτωσης του σε ένα ευρύτερο ρυθμιστικό πλαίσιο.

EPA (Οργανισμός Προστασίας του Περιβάλλοντος) [60], [63]: ΟΕΡΑ αποτελεί μία ρυθμιστική αρχή σχετικά με τις ουσίες που έχουν αντίκτυπο στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον. Σε αυτές τις ουσίες συμπεριλαμβάνεται και το υδρογόνο. Οι

κανονισμοί του EPA για το υδρογόνο είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα του «τυχαίου» τρόπου με τον οποίο το υδρογόνο έχει ρυθμιστεί μέχρι σήμερα από την ομοσπονδιακή κυβέρνηση των ΗΠΑ. Η αρχική ρύθμιση του υδρογόνου από τον EPA βρίσκεται στο πλαίσιο του προγράμματος «Υποχρεωτικής Αναφοράς Αερίων Θερμοκηπίου», σε διατάξεις σχετικά με το νερό και του προγράμματος «Πρόληψης Χημικών Ατυχημάτων». Σε κάθε μία από τις προηγούμενες περιπτώσεις, το υδρογόνο αναφέρεται όχι λόγω συστηματικής εξέτασης από τον EPA για τη δημιουργία ρυθμιστικού πλαισίου που να αφορά το υδρογόνο αλλά λόγω της σχέσης του υδρογόνου με αυτό το πρόγραμμα. Επίσης, αναφορά στο υδρογόνο γίνεται και σε κανονισμούς που αφορούν την επεξεργασία ορυκτών καυσίμων.

Ο EPA μπορεί να αναπτύξει νέα ρυθμιστικά πρότυπα για την παραγωγή υδρογόνου που διαφέρουν από αυτά που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των ορυκτών καυσίμων. Ωστόσο, δεν έχει ακόμη δώσει πληροφορίες σχετικά με το πώς βλέπει το ρόλο του σε μια οικονομία υδρογόνου και επί του παρόντος φαίνεται ότι οι κανονισμοί του EPA υποδηλώνουν ότι μπορεί να μην ταιριάζουν σε ένα μέλλον όπου το υδρογόνο έχει γίνει το κέντρο της προσοχής από τις εταιρείες ενέργειας. Για αυτό το λόγο μελλοντικά ο EPA μπορεί να αποφασίσει ότι πρέπει να επεκτείνει το κανονιστικό του πλαίσιο. Για παράδειγμα, οι απορρίψεις λυμάτων από την παραγωγή «γκρίζου υδρογόνου» σχετίζονται επί του παρόντος μόνο με υποπροϊόντα της διαδικασίας διύλισης πετρελαίου. Ωστόσο, εάν τα ήδη επεξεργασμένα ορυκτά καύσιμα κατευθύνονται ειδικά για την παραγωγή υδρογόνου, τότε οι τρέχοντες κανονισμοί του EPA δεν τις καλύπτουν. Ομοίως, οι απαιτήσεις αναφοράς αερίων του θερμοκηπίου του EPA για την παραγωγή υδρογόνου ισχύουν μόνο για το υδρογόνο που παράγεται από πρώτες ύλες και όχι από ηλεκτρόλυση. Εάν χρησιμοποιούνται ορυκτά καύσιμα ή ακόμα και ανανεώσιμες πηγές για την ηλεκτρόλυση, τότε το τυχόν περιβαλλοντικό αποτύπωμα αυτής της ενέργειας δεν περιλαμβάνεται επί του παρόντος στις απαιτήσεις αναφοράς που σχετίζονται με την παραγωγή υδρογόνου. Επίσης, ο EPA θα πρέπει να συμπεριλάβει σε μελλοντικό αναθεωρημένο ρυθμιστικό πλαίσιο τις πιθανές επιπτώσεις του υδρογόνου στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον, κάτι που μπορεί να απαιτεί τη δημιουργία λεπτομερέστερων και πιο περιεκτικών κανονισμών για το υδρογόνο.

PHMSA (Οργανισμός Ασφάλειας Σωληνώσεων και Επικίνδυνων Υλικών) [60], [64]: Ο στόχος του PHMSA είναι η προστασία της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος μέσω της ρύθμισης της ασφαλούς μεταφοράς της ενέργειας αλλά και επικίνδυνων υλικών. Αυτό το επιτυγχάνει με τη δημιουργία εθνικής πολιτικής, τον καθορισμό και την επιβολή βιομηχανικών προτύπων και τη διεξαγωγή έρευνας. Ο PHMSA ρυθμίζει επί του παρόντος περίπου 700 μίλια αγωγών υδρογόνου. Αυτοί οι κανονισμοί

επικεντρώνονται κυρίως στο φυσικό αέριο, αλλά μπορούν να ρυθμίσουν και το υδρογόνο. Ωστόσο, λόγω του γεγονότος ότι οι κανονισμοί αυτοί εστιάζουν στο φυσικό αέριο, ορισμένες από τις ιδιότητες του υδρογόνου δεν εξετάζονται λεπτομερώς και δεν λαμβάνονται υπόψη στις απαιτήσεις σχεδιασμού. Παρόλα αυτά, στόχος του PHMSA είναι αυτό να αλλάξει για αυτό το λόγο ήδη ερευνά τις επιπτώσεις του υδρογόνου στους χαλύβδινους αγωγούς.

Ακόμα, διαχειρίζεται και ορισμένους κανονισμούς που εστιάζουν πιο συγκεκριμένα στο υδρογόνο ωστόσο υπολείπεται της δημιουργίας ενός ολοκληρωμένου ρυθμιστικού καθεστώτος που θα καθοδηγεί την ανάπτυξη ολόκληρης της βιομηχανίας.

Ο PHMSA μπορεί να δημιουργήσει κανονισμούς αποθήκευσης και μεταφοράς αποκλειστικά για το υδρογόνο. Πιο συγκεκριμένα, έχει δηλώσει ότι θα επικεντρωθεί σε υποστηρικτικές δραστηριότητες για να διασφαλίσει την ασφαλή μεταφορά του υδρογόνου εστιάζοντας σε θέματα που αφορούν την ασφάλεια των υλικών, των σχεδίων και των συστημάτων υποδομής. Οι τωρινοί κανονισμοί του PHMSA, όπως προαναφέρθηκε, που διέπουν το υδρογόνο που μεταφέρεται στους αγωγούς δημιουργήθηκαν για τη διαχείριση του φυσικού αερίου. Ωστόσο, δεδομένων των διαφορετικών ιδιοτήτων και της μοριακής δομής των δύο ουσιών, οι κανονισμοί που επικεντρώνονται στο φυσικό αέριο ενδέχεται να μην επαρκούν για να καλύψουν πλήρως τις ανάγκες ενός συστήματος αγωγών υδρογόνου. Για παράδειγμα, το υδρογόνο μπορεί να επιταχύνει την ανάπτυξη ρωγμών στους αγωγούς και μπορεί να διαπεράσει πιο εύκολα τις ελαστομερείς σφραγίσεις και τους πλαστικούς σωλήνες σε σχέση με το φυσικό αέριο, κάτι που αυξάνει τον κίνδυνο αστοχίας του αγωγού. Επίσης, οι τωρινοί κανονισμοί ασφαλείας πρέπει να επεκταθούν για να εξασφαλίσουν την ασφαλή μεταφορά του υδρογόνου σε εμπορική κλίμακα. Με βάση αυτές τις ανησυχίες που προσδιορίζονται από τη βιομηχανία, ο PHMSA προσδιόρισε πολλά βασικά στοιχεία τα οποία απαιτείται να ερευνηθούν και που θα οδηγήσουν στην ανάπτυξη συγκεκριμένων προτύπων για τη μεταφορά υδρογόνου μέσω αγωγών. Κάποια από αυτά είναι τα εξής:

- Η σχέση μεταξύ της πίεσης, της θερμοκρασίας και της μείωσης των μηχανικών ιδιοτήτων των αγωγών υδρογόνου
- Η απώλεια αντοχής σε κόπωση και σε κρούση σε αγωγούς υδρογόνου
- Έρευνα για την κατανόηση ολόκληρου του συστήματος αγωγών που χρησιμοποιεί χάλυβες υψηλής αντοχής με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης των αγωγών υδρογόνου
- Έρευνα για την κατανόηση των επιπτώσεων του υδρογόνου στους αγωγούς φυσικού αερίου

Ο PHMSA μπορεί να χρειαστεί να δημιουργήσει νέους κανονισμούς ή να επεκτείνει τους υπάρχοντες κανονισμούς με βάση τα αποτελέσματα των ερευνητικών εργασιών που περιγράφονται παραπάνω προκειμένου να καταπολεμήσει τους κινδύνους που σχετίζονται με τη μεταφορά υδρογόνου μέσω αγωγών.

FERC (Ομοσπονδιακή Ρυθμιστική Επιτροπή Ενέργειας) [60], [65]: ΗFERC θα μπορούσε να επιδιώξει τη θέσπιση κανονιστικών διατάξεων για τη διακρατική μεταφορά υδρογόνου. Σύμφωνα με τον Νόμο για το Φυσικό Αέριο (NGA), η Ομοσπονδιακή Ρυθμιστική Επιτροπή Ενέργειας ρυθμίζει την τοποθεσία, την κατασκευή και τη λειτουργία των διαπολιτειακών αγωγών καθώς και τους όρους λειτουργίας αυτών των αγωγών. Αν και η FERC ενδέχεται να μην έχει δικαιοδοσία για αγωγούς που μεταφέρουν αποκλειστικά υδρογόνο βάσει της NGA ή άλλων υφιστάμενων καταστατικών, είναι πιθανό η FERC να μπορούσε να ρυθμίσει τη μεταφορά υδρογόνου εάν μεταφέρεται σε «μικτό ρεύμα» με φυσικό αέριο. Η μεταφορά και η κατασκευή των αγωγών φυσικού αερίου εμπίπτει πλήρως στις αρμοδιότητες της FERC στο πλαίσιο της NGA, και κατά συνέπεια, η μεταφορά υδρογόνου που «αναμιγνύεται» σε αυτούς τους αγωγούς βρίσκεται υπό το κανονιστικό πλαίσιο της FERC. Οι κανονισμοί της FERC για τους αγωγούς φυσικού αερίου εκτείνονται πέρα από τη ρύθμιση κατασκευής εγκαταστάσεων αγωγών και ισχύουν επίσης και για τους όρους και τις προϋποθέσεις των υπηρεσιών μεταφοράς. Οι κανονισμοί της απαιτούν από τις εταιρείες φυσικού αερίου να καθορίσουν τους όρους και τις προϋποθέσεις παροχής υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένων όρων και προϋποθέσεων που σχετίζονται με την ποιότητα του φυσικού αερίου που μεταφέρεται. Η μίξη μεγαλύτερων ποσοτήτων υδρογόνου σε αγωγούς φυσικού αερίου που ρυθμίζονται από τη FERC, της δίνει τη δυνατότητα να απαιτήσει τροποποίηση των υφιστάμενων διατάξεων για την ποιότητα του φυσικού αερίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αντιμετώπιση του προβλήματος της κλιματικής αλλαγής βρίσκεται ψηλά στην πολιτική ατζέντα της διεθνούς κοινότητας, η οποία έχει θέσει ως στόχο την απαλλαγή της από τα ορυκτά καύσιμα η επεξεργασία των οποίων συμβάλλει σε αυτό το πρόβλημα. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που παράγονται από τον τομέα των μεταφορών (εμπορευματικών και επιβατικών) συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στο πρόβλημα της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Για αυτόν τον λόγο η παγκόσμια κοινότητα στρέφει την προσοχή της στη χρήση εναλλακτικών καυσίμων.

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία μελετήθηκε ένα τέτοιο καύσιμο το οποίο είναι το υδρογόνο. Πιο συγκεκριμένα έγινε αναφορά στους τρόπους παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς του. Επίσης, αυτοί οι τρόποι συγκρίθηκαν μεταξύ τους σε όρους περιβαλλοντικού αποτυπώματος και κόστους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παραγωγή υδρογόνου με χρήση ορυκτών καυσίμων (π.χ. με αναμόρφωση με ατμό) έχουν το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα ωστόσο είναι πιο αποδοτικές και πιο οικονομικές σε σχέση με τις πιο φιλικές προς το περιβάλλον μεθόδους παραγωγής (π.χ. ηλεκτρόλυση υδρογόνου με χρήση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές). Όσον αφορά στους τρόπους διανομής η μεταφορά του με χρήση αγωγών (όπου αυτή είναι δυνατή) είναι αυτή που παρουσιάζει τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα.

Αυτή τη στιγμή η χρήση του υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών είναι αρκετά περιορισμένη ωστόσο αυτό αναμένεται να αλλάξει στο μέλλον. Για αυτό το λόγο τα κράτη σε συνεργασία με τη βιομηχανία έχουν αρχίσει να χρηματοδοτούν μία σειρά από προγράμματα με στόχο όχι μόνο της αύξησης της παραγωγής και τη βελτίωση αυτών των οχημάτων αλλά και την ανάπτυξη υποδομών αποθήκευσης, παραγωγής (κυρίως «πράσινου» υδρογόνου) και ανεφοδιασμού. Τέλος, για την υιοθέτηση του υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών είναι απαραίτητη και η δημιουργία ενός ρυθμιστικού πλαισίου το οποίο θα αφορά αποκλειστικά στο υδρογόνο και θα διέπει όλα του τα στάδια (από την παραγωγή μέχρι την τελική χρήση). Αυτό το πλαίσιο θα θέσει προδιαγραφές που έχουν να κάνουν με την ασφαλή παραγωγή, αποθήκευση, μεταφορά. Αυτές οι προδιαγραφές μπορεί να αφορούν τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν, τα μέτρα ασφαλείας που θα πρέπει να παρθούν κλπ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Lenntech, <https://www.lenntech.com/periodic/elements/h.htm>
2. Μαρνέλλος, Γ., Ειδικά Κεφάλαια Παραγωγής Ενέργειας, Ενότητα 5(α): Παραγωγή Υδρογόνου, Εκπαιδευτικό υλικό, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/MECH101/%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%97%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3/5%CE%B1_%CE%A0%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE%20%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF%CF%85_oc.pdf
3. Lapillonne B., SudriesL, Payan E, (2021), Energy efficiency trends in transport in EU countries, <https://www.odyssee-mure.eu/publications/policy-brief/transport-efficiency-trends-policy-brief.pdf>
4. U.S. Energy Information Administration <https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/transportation-in-depth.php>
5. Kalamaras, M., C., Efstathiou M.A. (2013), Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments, Vol.2013, <https://doi.org/10.1155/2013/690627>
6. Martino, M., Ruocco, C., Meloni, E., Pullumbi, P., Palma, V. (2021), Main Hydrogen Production Processes: An Overview, Catalysts, 11, 547, <https://doi.org/10.3390/catal11050547>
7. Alhajri, I., (2008), Integration of Hydrogen and CO₂ Management within Refinery Planning, Phd Thesis, University of Waterloo, Department of Chemical engineering, Ανακτήθηκε από :researchgate.net
8. G. Fierro, José Luis, (2011), Hydrogen: production methods, Lychnos. Notebooks of the Fundación General CSIC, https://fgcsic.es/lychnos/en_en/articles/hydrogen_production_methods
9. Industrial Gases company, UK, <https://www.boconline.co.uk/en/processes/petrochemical-processing/partial-oxidation/index.html>
10. Global SynGas Technology Council (GSTC), <https://globalsyngas.org/syngas-technology/syngas-production/auto-thermal-reforming/>
11. Αέρια και στερεά καύσιμα, Αναβάθμιση στερεών καυσίμων- Αεριοποίηση, Εργαστήριο καυσίμων και λιπαντικών ΕΜΠ, file://C:/Users/User/Downloads/Coal%20Gasification%20GSF.pdf
12. AZO Materials, (2016), Is On-Site Electrolysis Hydrogen Generation a Fit for Your Hydrogen Requirement?, <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=13298>

13. Yan, X., Gu, C., Furong L., Zang X. Weihao, H., (2018) Power to gas: addressing renewable curtailment by converting to hydrogen, *Frontiers in Energy*, 10.1007/s11708-018-0588-5.
14. Voutetakis, S., Stergiopoulos, F., Seferlis, P., Papadopoulou S., Ipsakis D., Ziogou, C., Papadopoulos, A., Elmasides, C., (2010), Design of a stand-alone power system using renewable energy sources and long-term hydrogen storage, Ανακτήθηκε από: researchgate.net
15. Bedon A. PhD thesis (2018), Ανακτήθηκε από: Innovative Materials and Processes for Advanced Environmental Clean Technologies (IMPACT group), <http://www.disc.chimica.unipd.it/impact/SOEC.html>
16. Hejazi, S, (2020), Utilization of noble metal co-catalysts on TiO₂ for photocatalytic H₂ production: from nanoparticle positioning to single-atom catalysis, Ανακτήθηκε από: researchgate.net
17. Acar., C., Dincer I., (2015), Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability, *International Journal of Hydrogen Energy*
18. TWI, What Is Hydrogen Storage And How Does It Work?, <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-hydrogen-storage#HowDoesitWorkisitStored>
19. Krishna R., Titus E., Salimian M., Okhay O., Rajendran S., Rajkumar A., Sousa J. M. G., Ferreira A. L. C., Gil J. C., Gracio J., (2012), Hydrogen Storage for Energy Application, IntechOpen Book Series, <https://www.intechopen.com/chapters/38711>, DOI: 10.5772/51238
20. U.S. Department of energy- Fuel cell technologies office, Hydrogen storage, <https://www.energy.gov/sites/default/files/2017/03/f34/fcto-h2-storage-fact-sheet.pdf>
21. Zhou L. (2005), Progress and problems in hydrogen storage methods, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 9 (4) pp. 395-408, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.05.005>
22. U.S. Department of energy-Alternative Fuels Data Center, Hydrogen Benefits and Considerations, https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_benefits.html
23. EUROPEAN HYDROGEN BACKBONE,(2021), Analysing future demand, supply, and transport of hydrogen
24. Ahmed I. Osman, Neha Mehta, Ahmed M. Elgarahy, Mahmoud Hefny, Amer Al-Hinai, Ala'a H. Al-Muhtaseb& David W. Rooney, (2021), Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review, *Environmental Chemistry Letters*, <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01322-8>

25. Dvoynikov, M.; Buslaev, G.; Kunshin, A.; Sidorov, D.; Kraslawski, A.; Budovskaya, M.(2021) New Concepts of Hydrogen Production and Storage in Arctic Region. *Resources* , 10, 3. <https://doi.org/10.3390/resources10010003>
26. Al-Qahtani A.,Parkinson B., HellgardtK.,Shah N.,Guillen-Gosalbez G., (2021) Uncovering the true cost of hydrogen production routes using life cycle monetisation, *Applied Energy*, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115958>
27. Won-Bi Han, Ik-Sun Kim, MinJoong Kim, Won Chul Cho, Sang-Kyung Kim, Jong HoonJoo, Young-Woo Lee, Younghyun Cho, Hyun-Seok Cho, Chang-Hee Kim, Directly sputtered nickel electrodes for alkaline water electrolysis, (2021) *Electrochimica Acta*, <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138458>
28. U.S. Department of energy-Alternative Fuels Data Center, Hydrogen Benefits and Considerations, https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_benefits.html
29. Sonal S., Shikha J., Venkateswaran PS, Avanish K. Tiwari, Mansa R. N., Jitendra K. P., Sanket G., (2015), Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,Vol.51,pp. 623-633, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.040>.
30. Simons A., Bauer C., (2011), Life cycle assessment of hydrogen production. 10.1017/CBO9781139018036.006.
31. Ramchandra B., Clemens A. Trudewind, Petra Z., (2012) Life Cycle Assessment of Hydrogen Production Methods – A Review, STE Research Report
32. Reddi K., Wang M., (2013), Argonne National Laboratory, XI.5 Life-Cycle Analysis of Hydrogen Onboard Storage Options, https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress13/xi_5_elgowainy_2013.pdf
33. Khzouz M., Gkanas E., ShaoJ., Sher F., BeherskyiD.,El-KharoufA.,Al Qubeissi , M., (2020), Life Cycle Costing Analysis: Tools and Applications for Determining Hydrogen Production Cost for Fuel Cell Vehicle Technology
34. Banerjee R., Life Cycle Analysis of Transport Options, 14 April 2021 – ITF Workshop Life Cycle Assessment Methods to Support India’s Efforts to Decarbonise Transport
35. ARUP, Hydrogen Transport - Fuelling The Future- The future of energy
36. Ευρωπαϊκή Στατιστική Υπηρεσία, <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/13394938/KS-EI-21-001-EN-N.pdf/ad9053c2-debd-68c0-2167-f2646efeaec1?t=1632300620367>
37. Samsun R. C., Laurent A., Rex M., Stolten D., (2021) Deployment Status of Fuel Cells in Road Transport: 2021 Update, *Energie& Umwelt /Energy & Environment*
38. Hannach Mohamed El , Ahmadi P., Guzman L., Pickup S., Kjeang E, (2019), Life cycle assessment of hydrogen and diesel dual-fuel class 8 heavy duty trucks,

- International Journal of Hydrogen Energy,
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.027>
39. Cargo Partner, How hydrogen-powered aircraft could change aviation -Climate-neutral up above the clouds, <https://www.cargo-partner.com/trendletter/issue-23/hydrogen-airplanes>
 40. Verstraete D., (2013), Long range transport aircraft using hydrogen fuel, International Journal of Hydrogen Energy, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.09.021>
 41. European Commission, Reducing emissions from the shipping sector, https://ec.europa.eu/clima/eu-action/transport-emissions/reducing-emissions-shipping-sector_en
 42. Collins L., (2020) Hydrogen 'can power virtually all container ships crossing the Pacific', Recharge
 43. Mao X., Rutherford D., Osipova L, Comer B., (2020), Refueling assessment of a zero-emission container corridor between China and the United States: Could hydrogen replace fossil fuels?, INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION
 44. Trillos J.C.G., Wilken D., Brand U., Vogt T. (2021) Life Cycle Assessment of a Hydrogen and Fuel Cell RoPax Ferry Prototype. In: Albrecht S., Fischer M., Leistner P., Schebek L. (eds) Progress in Life Cycle Assessment 2019. Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50519-6_2
 45. Youd F., (2021), Next stop, hydrogen? The future of train fuels, Railway Technology, <https://www.railway-technology.com/features/next-stop-hydrogen-the-future-of-train-fuels/>
 46. Freight railroads are experimenting with alternative fuels to reduce greenhouse-gas emissions, (2021), Associated Press
 47. Niunoya M., Shima M., Masaki K., (2021), Hydrogen Law and Regulation in Japan, CMS, <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/japan>
 48. Japan's Roadmap to "Beyond-Zero" Carbon, Ministry of Economy, Trade and Industry, https://www.meti.go.jp/english/policy/energy_environment/global_warming/roadmap/innovation/thep.html
 49. Atlantic Council, (2021), https://www.atlanticcouncil.org/wpcontent/uploads/2021/07/AC_HydrogenPolicySprint_3.pdf
 50. Reducing emissions and driving growth across the nation, Road Map to a Us Hydrogen Economy, <https://cafcp.org/sites/default/files/Road+Map+to+a+US+Hydrogen+Economy+Full+Report.pdf>

51. Erbach G., Jensen L., (2021), EU hydrogen policy Hydrogen as an energy carrier for a climate-neutral economy, European Parliament, [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)
52. Umbach M., (2021), The EU's Hydrogen Strategy and its Geopolitical Challenges, ISPI, <https://www.ispionline.it/en/pubblicazione/eus-hydrogen-strategy-and-its-geopolitical-challenges-30521>
53. Πρόγραμμα HECTOR (Hydrogen Waste Collection Vehicles in North West Europe), <https://www.nweurope.eu/projects/project-search/hector-hydrogen-waste-collection-vehicles-in-north-west-europe/#tab-1>
54. Πρόγραμμα SEAFUEL, <http://www.seafuel.eu/>
55. Πρόγραμμα H2Haul: (Hydrogen Fuel Cell Trucks for Heavy Duty Zero Emissions Logistics), <https://www.h2haul.eu/about/>, <https://hydrogeneurope.eu/industry/eu-projects/>
56. Πρόγραμμα H2Share, <https://www.nweurope.eu/projects/project-search/h2share-hydrogen-solutions-for-heavy-duty-transport/>
57. Πρόγραμμα H2SHIPS, <https://h2ships.org/>
58. Πρόγραμμα H2ME (Hydrogen mobility Europe), https://h2me.eu/wp-content/uploads/2021/01/H2ME_Emerging-Conclusions2020.pdf
59. HYSTRA (CO₂-free Hydrogen Energy Supply-chain Technology Research Association), <https://www.hystra.or.jp/en/project/>
60. Vinson & Elkins LLP, (2020), Federal Hydrogen Regulation In The United States: Where We Are And Where We Might Be Going, <https://www.jdsupra.com/legalnews/federal-hydrogen-regulation-in-the-54947/>
61. USA Department of Energy, <https://www.energy.gov/>
62. Occupational Safety and Health Administration, <https://www.osha.gov/>
63. U.S. Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/>
64. Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration of USA, <https://www.phmsa.dot.gov/>
65. Federal Energy Regulatory Commission, <https://www.ferc.gov/>