



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
«ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ»

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΘΑΡΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ Η ΣΤΑΔΙΑΚΗ
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ.

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΜΑΜΟΥΚΑΡΗΣ
Α.Μ.: 131703

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΦΡΑΓΚΙΑΔΑΚΗΣ ΜΙΧΑΛΗΣ

ΠΑΤΡΑ
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ, 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

**ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΘΑΡΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ Η ΣΤΑΔΙΑΚΗ
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΩΣ
ΚΑΥΣΙΜΟ.**

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΜΑΜΟΥΚΑΡΗΣ

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας
Επιβλέπων Καθηγητής:
Φραγκιαδάκης Μιχάλης
Καθηγητής
Πανεπιστήμιο Πατρών

Συν-Επιβλέπων Καθηγήτρια:
Δρ. Διονυσία-Πηνελόπη Κοντονή
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2026

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ από καρδιάς τη σύζυγό μου για τη διαρκή στήριξη, την υπομονή και την κατανόηση όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και τις τρεις κόρες μου, που αποτελούν την καθημερινή μου δύναμη και έμπνευση.

Η παρούσα εργασία αφιερώνεται στη μνήμη του πατέρα μου, ο οποίος δεν πρόλαβε να δει την ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας, αλλά υπήρξε καθοριστικός στη διαμόρφωση του ανθρώπου που είμαι σήμερα.

Περίληψη

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία εξετάζει τον ρόλο του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης και της απανθρακοποίησης των σύγχρονων ενεργειακών συστημάτων, με ιδιαίτερη έμφαση στις τεχνολογίες αποθήκευσης, μεταφοράς και ενσωμάτωσής του στις υφιστάμενες ενεργειακές υποδομές. Η αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, σε συνδυασμό με την ανάγκη περιορισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, καθιστούν το υδρογόνο έναν σημαντικό υποψήφιο ενεργειακό φορέα, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπου η άμεση ηλεκτροποίηση παρουσιάζει τεχνικούς ή οικονομικούς περιορισμούς.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα, συμπεριλαμβανομένων των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του, των διαθέσιμων μεθόδων παραγωγής (γκρίζο, μπλε και πράσινο υδρογόνο), καθώς και των συγκριτικών του πλεονεκτημάτων και περιορισμών έναντι συμβατικών καυσίμων. Στη συνέχεια, εξετάζονται οι κυριότερες τεχνολογίες αποθήκευσης, όπως η συμπιεσμένη αέρια μορφή, η υγροποιημένη κρυογενική αποθήκευση, η στερεά αποθήκευση μέσω μεταλλικών υδριδίων και η χρήση χημικών φορέων όπως η αμμωνία, με αξιολόγηση της τεχνολογικής τους ωριμότητας, της ενεργειακής απόδοσης και των τεχνικών περιορισμών τους.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μεταφορά υδρογόνου μέσω αγωγών υψηλής πίεσης και στη δυνατότητα αξιοποίησης υφιστάμενων δικτύων φυσικού αερίου μέσω της προσέγγισης hydrogen-ready infrastructure και της μεταβατικής στρατηγικής blending με μίγματα υδρογόνου–φυσικού αερίου. Παράλληλα, αναλύονται ζητήματα υδρογονοθραυστικότητας, συμβατότητας υλικών, λειτουργικής ασφάλειας και τεχνολογιών ανίχνευσης διαρροών, με αναφορά σε σύγχρονες τεχνολογίες αισθητήρων, MEMS και IoT-based monitoring systems.

Η εργασία περιλαμβάνει επίσης ανάλυση πραγματικών ή υπό ανάπτυξη ευρωπαϊκών έργων υποδομών υδρογόνου, όπως έργα μεγάλης κλίμακας αποθήκευσης και hydrogen valleys, καθώς και πιλοτικές εφαρμογές οικιακής χρήσης τύπου hydrogen village, με στόχο τη σύνδεση της θεωρητικής προσέγγισης με πρακτικά παραδείγματα εφαρμογής.

Μέσα από τη συγκριτική αξιολόγηση των περιπτώσεων αυτών, εξετάζονται οι τεχνικές, οικονομικές, θεσμικές και κοινωνικές προκλήσεις της μετάβασης.

Τα συμπεράσματα της εργασίας δείχνουν ότι το υδρογόνο μπορεί να αποτελέσει σημαντικό συμπληρωματικό πυλώνα του μελλοντικού ενεργειακού συστήματος, κυρίως σε εφαρμογές αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας, βιομηχανίας και δύσκολα εξηλεκτριζόμενων τομέων. Ωστόσο, η ευρεία αξιοποίησή του εξαρτάται από τη μείωση του κόστους παραγωγής, την ανάπτυξη κατάλληλων υποδομών, την τεχνολογική ωρίμανση επιμέρους εφαρμογών και τη διαμόρφωση σαφούς κανονιστικού και οικονομικού πλαισίου.

Λέξεις-κλειδιά: Υδρογόνο, αποθήκευση υδρογόνου, ενεργειακές υποδομές, hydrogen blending, ενεργειακή μετάβαση, απανθρακοποίηση.

Abstract

This postgraduate thesis investigates the role of hydrogen as an energy carrier within the context of energy transition and decarbonisation of modern energy systems, with particular emphasis on storage technologies, transportation infrastructure, and integration into existing energy networks. The increasing penetration of renewable energy sources, combined with the urgent need to reduce greenhouse gas emissions, positions hydrogen as a promising energy vector, particularly in sectors where direct electrification remains technically or economically challenging.

The first part of the study presents the theoretical background of hydrogen as an energy carrier, including its physicochemical properties, production pathways (grey, blue, and green hydrogen), and its comparative advantages and limitations relative to conventional fuels. Subsequently, the principal hydrogen storage technologies are examined, including compressed gaseous hydrogen, cryogenic liquid hydrogen, solid-state storage through metal hydrides, and indirect storage through chemical carriers such as ammonia. These technologies are assessed in terms of technological maturity, energy efficiency, and operational constraints.

Particular attention is given to hydrogen transport through high-pressure pipelines and to the potential utilisation of existing natural gas infrastructure through hydrogen-ready approaches and transitional hydrogen blending strategies. Technical challenges such as hydrogen embrittlement, material compatibility, operational safety, and leak detection are analysed, including reference to modern sensor technologies, MEMS systems, and IoT-based monitoring architectures.

The thesis also includes an analysis of existing and emerging European hydrogen infrastructure projects, including large-scale storage initiatives, hydrogen valleys, and residential pilot applications such as hydrogen village concepts. These case studies provide practical insight into the technical, economic, institutional, and social dimensions of hydrogen deployment.

The findings indicate that hydrogen can play an important complementary role in the future energy system, particularly in large-scale energy storage, industrial applications, and hard-to-abate sectors. However, its broader deployment depends on reducing

production costs, expanding dedicated infrastructure, improving technological maturity, and establishing a stable regulatory and economic framework.

Keywords: Hydrogen, hydrogen storage, energy infrastructure, hydrogen blending, energy transition, decarbonisation

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	9
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	12
1.1 Αντικείμενο και στόχοι εργασίας.....	12
1.2 Ερευνητικά ερωτήματα.....	13
1.3 Μεθοδολογία και πηγές.....	15
1.4 Δομή κεφαλαίων.....	16
Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό υπόβαθρο υδρογόνου.....	18
2.1 Το υδρογόνο ως ενεργειακός φορέας.....	18
2.2 Παραγωγή υδρογόνου (Grey, Blue, Green).....	20
2.3 Φυσικοχημικές ιδιότητες και κίνδυνοι του υδρογόνου.....	25
2.4 Ενεργειακή απόδοση και συγκριτικά πλεονεκτήματα.....	27
Κεφάλαιο 3: Τεχνολογίες αποθήκευσης υδρογόνου.....	29
3.1 Συμπιεσμένο υδρογόνο (Compressed Hydrogen – CH ₂).....	29
3.2 Υγροποιημένο υδρογόνο (Liquid Hydrogen – LH ₂).....	31
3.3 Αποθήκευση σε μεταλλικά υδρίδια.....	33
3.4 Αποθήκευση υδρογόνου μέσω αμμωνίας.....	35
3.5 Συγκριτική αξιολόγηση και τεχνολογική ετοιμότητα.....	37
Κεφάλαιο 4: Μεταφορά υδρογόνου και ενεργειακές υποδομές.....	41
4.1 Μεταφορά υδρογόνου μέσω αγωγών.....	41
4.2 Hydrogen-ready αγωγοί υψηλής πίεσης.....	43
4.3 Αξιολόγηση σχεδιασμού και λειτουργίας δικτύου.....	45
4.4 Ασφάλεια και τεχνικές προδιαγραφές.....	47
Κεφάλαιο 5: Ανάλυση έργων και υποδομών υδρογόνου στην Ελλάδα και την Ευρώπη.....	50
5.1 Ευρωπαϊκό πλαίσιο ανάπτυξης υποδομών υδρογόνου.....	50
5.2 Το έργο North Project 1 στη Δυτική Μακεδονία.....	51
5.3 Το έργο CRAVE-H2 στην Κρήτη.....	53
5.4 Συγκριτική αξιολόγηση ελληνικών έργων και ευρωπαϊκών πρωτοβουλιών.....	56
Κεφάλαιο 6: Ενσωμάτωση υδρογόνου στο υπάρχον δίκτυο.....	58
6.1 Μείγμα υδρογόνου–φυσικού αερίου (H ₂ blending έως 20%).....	58
6.2 Τεχνική ετοιμότητα τελικών συστημάτων κατανάλωσης (καυστήρες, λέβητες και βιομηχανικές εφαρμογές).....	61
6.3 Προσαρμογή δικτύων φυσικού αερίου για μεταφορά υδρογόνου.....	63
6.4 Τεχνοοικονομική αξιολόγηση και μεθοδολογικές προσεγγίσεις ενσωμάτωσης υδρογόνου.....	67
6.5 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ασφάλεια και συστήματα παρακολούθησης.....	69
Κεφάλαιο 7: Το “χωριό υδρογόνου” – πιλοτικές εφαρμογές.....	73
7.1 Περιγραφή έργου και τεχνική αρχιτεκτονική πιλοτικών εφαρμογών υδρογόνου ..	73
7.2 Τεχνική και κοινωνική αξιολόγηση.....	74
7.3 Συμπεράσματα από την πιλοτική εφαρμογή.....	76
7.4 Προοπτικές εφαρμογής σε ευρωπαϊκό επίπεδο.....	78
Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	80
8.1 Συνολική αποτίμηση των αποτελεσμάτων.....	80
8.2 Περιορισμοί της έρευνας.....	82
8.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	84

8.4 Τελική αποτίμηση	86
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	88

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Κατηγοριοποίηση του υδρογόνου με βάση τη μέθοδο παραγωγής.....	20
Σχήμα 2. Παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης νερού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	22
Σχήμα 3. Κύριες τεχνολογίες αποθήκευσης υδρογόνου.....	31
Σχήμα 4. Ενσωμάτωση υδρογόνου σε δίκτυο φυσικού αερίου μέσω διαδικασίας blending.....	60
Σχήμα 5. Βασική αρχιτεκτονική δικτύου και τελικών καταναλώσεων hydrogen-ready..	61

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Συγκριτική αξιολόγηση των κυριότερων μορφών υδρογόνου.....	24
Πίνακας 2. Συγκριτική αξιολόγηση βασικών τεχνολογιών αποθήκευσης υδρογόνου.	40
Πίνακας 3. Συγκριτική παρουσίαση των έργων North-1 και CRAVE-H2.....	58
Πίνακας 4. Σύγκριση τεχνικών χαρακτηριστικών φυσικού αερίου, H ₂ blends και 100% H ₂	63
Πίνακας 5. Συγκριτική τεchnοοικονομική αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων ενσωμάτωσης υδρογόνου στα δίκτυα φυσικού αερίου.....	69

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο και στόχοι εργασίας

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία πραγματεύεται τη διερεύνηση του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης και της σταδιακής απανθρακοποίησης των σύγχρονων ενεργειακών συστημάτων. Η αυξανόμενη ανάγκη περιορισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, σε συνδυασμό με τη διαρκώς αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, έχει αναδείξει το υδρογόνο ως έναν από τους σημαντικότερους υποψήφιους ενεργειακούς φορείς για την υποστήριξη ενός περισσότερο βιώσιμου και ευέλικτου ενεργειακού μοντέλου (Hosseini, 2023; IEA, 2023).

Σε αντίθεση με τα συμβατικά καύσιμα, το υδρογόνο δεν αποτελεί πρωτογενή πηγή ενέργειας αλλά ενεργειακό φορέα, γεγονός που σημαίνει ότι η συνολική του αξιολόγηση εξαρτάται από το σύνολο της ενεργειακής αλυσίδας που περιλαμβάνει την παραγωγή, την αποθήκευση, τη μεταφορά και την τελική του αξιοποίηση. Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει, όπως η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα μάζας και η δυνατότητα αξιοποίησης σε εφαρμογές χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών άνθρακα, η ευρεία εφαρμογή του συνοδεύεται από σημαντικές τεχνικές, οικονομικές και θεσμικές προκλήσεις, οι οποίες σχετίζονται με την αποθήκευση, τη μεταφορά, την ασφάλεια και τη συνολική οικονομική βιωσιμότητα των σχετικών υποδομών (Kothari et al., 2008; Hosseini et al., 2019).

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η τεχνική και τεχνοοικονομική διερεύνηση των βασικών υποδομών που απαιτούνται για την αξιοποίηση του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα, με ιδιαίτερη έμφαση στις τεχνολογίες αποθήκευσης, στις μεθόδους μεταφοράς και στη δυνατότητα ενσωμάτωσής του στις υφιστάμενες ενεργειακές υποδομές φυσικού αερίου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η δυνατότητα σταδιακής μετάβασης μέσω της αξιοποίησης υφιστάμενων δικτύων μεταφοράς και διανομής, είτε μέσω ανάμιξης υδρογόνου με φυσικό αέριο (hydrogen blending), είτε μέσω της ανάπτυξης υποδομών σχεδιασμένων με προδιαγραφές hydrogen-ready.

Παράλληλα, η εργασία εξετάζει τη σημερινή τεχνολογική ετοιμότητα των διαθέσιμων λύσεων αποθήκευσης υδρογόνου, συμπεριλαμβανομένης της συμπίεσμένης αποθήκευσης, της κρυογενικής υγροποιημένης μορφής, της αποθήκευσης σε στερεά

μέσα και της χρήσης χημικών φορέων, με στόχο την αξιολόγηση της καταλληλότητάς τους για διαφορετικές εφαρμογές. Επιπλέον, αναλύονται ζητήματα ασφάλειας λειτουργίας, όπως η συμβατότητα υλικών, η υδρογονοθραυστικότητα και οι τεχνολογίες ανίχνευσης διαρροών, τα οποία αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για την ασφαλή ένταξη του υδρογόνου σε πραγματικές ενεργειακές εφαρμογές.

Στο πλαίσιο της εφαρμοσμένης διάστασης της εργασίας, εξετάζονται επιλεγμένες ευρωπαϊκές υποδομές και πιλοτικά έργα υδρογόνου, με στόχο τη σύνδεση της θεωρητικής ανάλυσης με πραγματικές περιπτώσεις ανάπτυξης και λειτουργικής αξιολόγησης. Μέσω αυτής της προσέγγισης επιδιώκεται η αποτύπωση του σημερινού επιπέδου τεχνολογικής ωριμότητας, καθώς και των βασικών προκλήσεων που σχετίζονται με τη μετάβαση προς μια οικονομία υδρογόνου.

Βασικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αποτίμηση του βαθμού τεχνικής ετοιμότητας των ενεργειακών υποδομών για την ενσωμάτωση του υδρογόνου, η αξιολόγηση των διαθέσιμων τεχνολογικών επιλογών αποθήκευσης και μεταφοράς, καθώς και η διερεύνηση της ρεαλιστικότητας του υδρογόνου ως συμπληρωματικού ενεργειακού φορέα στο πλαίσιο της ευρωπαϊκής ενεργειακής μετάβασης.

1.2 Ερευνητικά ερωτήματα

Η διερεύνηση του ρόλου του υδρογόνου στο σύγχρονο ενεργειακό σύστημα απαιτεί πολυπαραγοντική προσέγγιση, καθώς η αξιολόγησή του δεν περιορίζεται μόνο στις τεχνολογίες παραγωγής, αλλά επεκτείνεται στην αποθήκευση, τη μεταφορά, την ασφάλεια, τη συμβατότητα με τις υφιστάμενες υποδομές και τη συνολική τεχνικοοικονομική βιωσιμότητα. Στο πλαίσιο αυτό, η εργασία οργανώνεται γύρω από συγκεκριμένα ερευνητικά ερωτήματα, τα οποία επιτρέπουν τη συστηματική αποτίμηση του βαθμού ετοιμότητας του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα.

Ένα πρώτο βασικό ερευνητικό ερώτημα αφορά τον βαθμό ωριμότητας των διαθέσιμων τεχνολογιών αποθήκευσης υδρογόνου και τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε διαφορετικές ενεργειακές κλίμακες. Ειδικότερα, εξετάζεται κατά πόσο οι τεχνολογίες αποθήκευσης σε συμπιεσμένη αέρια μορφή, υγροποιημένη κρυογενική μορφή, στερεά μέσα και χημικούς φορείς μπορούν να υποστηρίξουν πρακτικές εφαρμογές με αποδεκτό επίπεδο απόδοσης, ασφάλειας και οικονομικής βιωσιμότητας.

Δεύτερο κρίσιμο ερευνητικό ερώτημα αφορά τη δυνατότητα αξιοποίησης των υφιστάμενων ενεργειακών υποδομών για τη μεταφορά υδρογόνου. Πιο συγκεκριμένα, διερευνάται κατά πόσο τα σημερινά δίκτυα φυσικού αερίου μπορούν να προσαρμοστούν ώστε να υποστηρίξουν τη μεταφορά υδρογόνου ή μιγμάτων υδρογόνου–φυσικού αερίου, καθώς και ποιες τεχνικές προσαρμογές απαιτούνται για τη διασφάλιση της ασφαλούς και αξιόπιστης λειτουργίας τους.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η τεχνική ετοιμότητα του τελικού εξοπλισμού κατανάλωσης. Στο πλαίσιο αυτό εξετάζεται κατά πόσο οι υφιστάμενοι καυστήρες, λέβητες και λοιπά συστήματα καύσης φυσικού αερίου μπορούν να λειτουργήσουν με μίγματα υδρογόνου ή με καθαρό υδρογόνο, χωρίς σημαντικές επιπτώσεις στην απόδοση, στη σταθερότητα λειτουργίας ή στην ασφάλεια.

Παράλληλα, σημαντικό ερευνητικό ερώτημα αφορά τις τεχνολογίες ασφάλειας που απαιτούνται για την ανάπτυξη υποδομών υδρογόνου. Η υψηλή ευφλεκτότητα, η αυξημένη διαπερατότητα και η διαφορετική φυσικοχημική συμπεριφορά του υδρογόνου σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα δημιουργούν αυξημένες απαιτήσεις παρακολούθησης και διαχείρισης κινδύνου. Για τον λόγο αυτό εξετάζεται ο ρόλος των τεχνολογιών ανίχνευσης διαρροών, των αισθητήρων νέας γενιάς, καθώς και των έξυπνων συστημάτων παρακολούθησης που βασίζονται σε αρχιτεκτονικές MEMS και IoT.

Επιπλέον, η εργασία επιχειρεί να αξιολογήσει τον βαθμό τεχνολογικής ωριμότητας των σύγχρονων έργων υδρογόνου σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Μέσα από τη μελέτη χαρακτηριστικών υποδομών και πιλοτικών εφαρμογών, διερευνάται κατά πόσο το υδρογόνο έχει περάσει από το στάδιο της ερευνητικής ανάπτυξης σε πραγματικά εφαρμόσιμα ενεργειακά μοντέλα.

Τέλος, το κεντρικό ερευνητικό ερώτημα που διατρέχει το σύνολο της εργασίας αφορά το κατά πόσο το υδρογόνο μπορεί να αποτελέσει έναν ρεαλιστικό, τεχνικά εφαρμόσιμο και μακροπρόθεσμα βιώσιμο συμπληρωματικό πυλώνα του μελλοντικού ενεργειακού συστήματος, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπου η άμεση ηλεκτροποίηση δεν αποτελεί επαρκή ή τεχνικά εφικτή λύση.

1.3 Μεθοδολογία και πηγές

Η μεθοδολογική προσέγγιση της παρούσας μελέτης βασίζεται σε συνδυαστική βιβλιογραφική και τεχνικοαναλυτική προσέγγιση, με στόχο τη συστηματική αξιολόγηση του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα και τη διερεύνηση της δυνατότητας ενσωμάτωσής του στις σύγχρονες ενεργειακές υποδομές. Δεδομένου ότι το αντικείμενο της εργασίας αφορά ένα πεδίο που βρίσκεται σε διαρκή τεχνολογική και θεσμική εξέλιξη, κρίθηκε καταλληλότερη η αξιοποίηση δευτερογενών πηγών υψηλής αξιοπιστίας, σε συνδυασμό με συγκριτική ανάλυση πραγματικών έργων και τεχνολογικών εφαρμογών.

Η πρώτη φάση της μεθοδολογίας περιλαμβάνει εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση της διεθνούς επιστημονικής και τεχνικής βιβλιογραφίας, με στόχο τη θεμελίωση του θεωρητικού πλαισίου της έρευνας. Στο στάδιο αυτό εξετάζονται οι βασικές φυσικοχημικές ιδιότητες του υδρογόνου, οι μέθοδοι παραγωγής, οι διαθέσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης, καθώς και οι τεχνικές ιδιαιτερότητες που σχετίζονται με τη μεταφορά και την ασφαλή αξιοποίησή του. Η βιβλιογραφική τεκμηρίωση βασίζεται σε επιστημονικά άρθρα διεθνών περιοδικών, ακαδημαϊκές μονογραφίες, τεχνικές εκθέσεις και θεσμικά κείμενα διεθνών οργανισμών.

Η δεύτερη φάση της μελέτης αφορά τη συγκριτική τεχνική αξιολόγηση των βασικών τεχνολογιών αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου. Η ανάλυση αυτή πραγματοποιείται με βάση κριτήρια όπως η ενεργειακή απόδοση, η τεχνολογική ωριμότητα, η επιχειρησιακή αξιοπιστία, οι απαιτήσεις ασφάλειας, οι περιορισμοί εφαρμογής και η σχετική οικονομική επιβάρυνση. Μέσω αυτής της προσέγγισης καθίσταται δυνατή η συγκριτική αποτίμηση των διαθέσιμων τεχνολογικών επιλογών και η ανάδειξη των πλέον κατάλληλων λύσεων ανά εφαρμογή.

Στη συνέχεια εφαρμόζεται προσέγγιση μελέτης περίπτωσης (case study analysis), μέσω της εξέτασης επιλεγμένων ευρωπαϊκών έργων υποδομής και πιλοτικών εφαρμογών υδρογόνου. Η επιλογή των περιπτώσεων βασίζεται στη διαθεσιμότητα τεχνικών στοιχείων, στη συνάφεια με το αντικείμενο της εργασίας και στη δυνατότητα αντιπροσωπευτικής αποτύπωσης διαφορετικών μοντέλων ανάπτυξης υποδομών υδρογόνου, όπως έργα μεγάλης κλίμακας αποθήκευσης, hydrogen valleys και πιλοτικές αστικές εφαρμογές. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία επιτρέπει τη σύνδεση της θεωρητικής τεχνικής ανάλυσης με πραγματικές εφαρμογές και σύγχρονες στρατηγικές ανάπτυξης.

Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται επίσης στην αξιολόγηση τεχνικών ζητημάτων ασφάλειας, όπως η συμβατότητα υλικών, η υδρογονοθραυστικότητα, οι τεχνολογίες ανίχνευσης διαρροών και τα συστήματα έξυπνης παρακολούθησης υποδομών. Η προσέγγιση αυτή είναι απαραίτητη, καθώς η τεχνική εφικτότητα της μετάβασης στο υδρογόνο δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την ενεργειακή απόδοση, αλλά και από τη δυνατότητα ασφαλούς λειτουργίας των σχετικών υποδομών.

Οι πηγές που αξιοποιούνται περιλαμβάνουν επιστημονικές δημοσιεύσεις με σύστημα κριτών (peer-reviewed literature), εκθέσεις διεθνών οργανισμών όπως ο International Energy Agency (IEA), τεχνικά και κανονιστικά πρότυπα (ASME, ISO, EN), ευρωπαϊκά θεσμικά έγγραφα, καθώς και δημόσια διαθέσιμα τεχνικά δεδομένα από ενεργειακά έργα και φορείς ανάπτυξης υποδομών υδρογόνου. Η επιλογή των πηγών πραγματοποιήθηκε με κριτήρια επιστημονικής εγκυρότητας, τεχνικής αξιοπιστίας και επικαιρότητας, δεδομένης της ταχείας εξέλιξης του συγκεκριμένου τεχνολογικού πεδίου.

1.4 Δομή κεφαλαίων

Η εργασία οργανώνεται σε οκτώ κεφάλαια, ακολουθώντας μια λογική πορεία από τη θεωρητική θεμελίωση του αντικειμένου προς την τεχνική αξιολόγηση των υποδομών και τη σύνθεση συμπερασμάτων σχετικά με τον ρόλο του υδρογόνου στην ενεργειακή μετάβαση.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το αντικείμενο της μελέτης, οι βασικοί στόχοι, τα ερευνητικά ερωτήματα, η μεθοδολογική προσέγγιση και η συνολική δομή της εργασίας.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσει το θεωρητικό υπόβαθρο του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα. Εξετάζονται οι φυσικοχημικές ιδιότητές του, οι βασικές μέθοδοι παραγωγής, οι ενεργειακές του ιδιότητες, καθώς και τα κύρια τεχνικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα.

Το τρίτο κεφάλαιο επικεντρώνεται στις τεχνολογίες αποθήκευσης υδρογόνου. Παρουσιάζονται οι βασικές τεχνολογικές επιλογές, όπως η αποθήκευση σε συμπιεσμένη και υγροποιημένη μορφή, η χρήση μεταλλικών υδριδίων και η αξιοποίηση χημικών φορέων όπως η αμμωνία. Παράλληλα, αξιολογείται η τεχνολογική ωριμότητα κάθε προσέγγισης, οι περιορισμοί εφαρμογής και οι μελλοντικές προοπτικές.

Το τέταρτο κεφάλαιο εξετάζει τη μεταφορά υδρογόνου και τις σχετικές ενεργειακές υποδομές. Η ανάλυση επικεντρώνεται στη μεταφορά μέσω αγωγών, στην έννοια των υποδομών hydrogen-ready, στα ζητήματα συμβατότητας υλικών, στις τεχνικές απαιτήσεις σχεδιασμού και στις κρίσιμες παραμέτρους ασφαλείας που συνοδεύουν τη λειτουργία τέτοιων δικτύων.

Το πέμπτο κεφάλαιο αφορά την ανάλυση υφιστάμενων και υπό ανάπτυξη ευρωπαϊκών και ελληνικών υποδομών υδρογόνου. Εξετάζονται ενδεικτικά έργα αποθήκευσης, μεταφοράς και ολοκληρωμένων οικοσυστημάτων υδρογόνου, με στόχο την αποτύπωση της τρέχουσας κατάστασης ανάπτυξης στην Ευρώπη, των τεχνικών προσεγγίσεων που ακολουθούνται, καθώς και των βασικών οικονομικών και θεσμικών προκλήσεων που ανακύπτουν.

Το έκτο κεφάλαιο εστιάζει στη δυνατότητα ενσωμάτωσης του υδρογόνου στα υφιστάμενα δίκτυα φυσικού αερίου ως μεταβατική στρατηγική. Αναλύονται η χρήση μιγμάτων υδρογόνου–φυσικού αερίου, η τεχνική ετοιμότητα καυστήρων και δικτύων, οι απαιτούμενες προσαρμογές εξοπλισμού, καθώς και ζητήματα ασφάλειας, ανίχνευσης διαρροών και έξυπνης παρακολούθησης υποδομών.

Το έβδομο κεφάλαιο εξετάζει πιλοτικές εφαρμογές υδρογόνου σε τοπικό επίπεδο, με έμφαση σε έργα που προσομοιώνουν πραγματικές συνθήκες τελικής χρήσης, όπως τα λεγόμενα “hydrogen villages”. Η ανάλυση περιλαμβάνει την τεχνική αξιολόγηση, τη διάσταση της κοινωνικής αποδοχής, καθώς και τη συζήτηση γύρω από τη δυνατότητα ευρύτερης εφαρμογής αντίστοιχων μοντέλων.

Το όγδοο και τελευταίο κεφάλαιο συγκεντρώνει τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης, απαντά στα ερευνητικά ερωτήματα και παρουσιάζει τους περιορισμούς της εργασίας, καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα και τεχνολογική εξέλιξη στον τομέα του υδρογόνου.

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό υπόβαθρο υδρογόνου

2.1 Το υδρογόνο ως ενεργειακός φορέας

Το υδρογόνο αναγνωρίζεται διεθνώς ως ένας από τους πλέον σημαντικούς ενεργειακούς φορείς στο πλαίσιο της παγκόσμιας ενεργειακής μετάβασης προς συστήματα χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών άνθρακα. Η αυξανόμενη ανάγκη απανθρακοποίησης της βιομηχανίας, των μεταφορών και της παραγωγής ενέργειας έχει ενισχύσει το ενδιαφέρον για τεχνολογίες που επιτρέπουν την αποθήκευση, μεταφορά και αξιοποίηση καθαρής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. Σε αυτό το πλαίσιο, το υδρογόνο αποκτά ιδιαίτερη σημασία, καθώς μπορεί να λειτουργήσει ως ενδιάμεσο μέσο μετατροπής και αποθήκευσης ενέργειας, συνδέοντας διαφορετικούς ενεργειακούς τομείς.

Παρότι αποτελεί το αφθονότερο στοιχείο στο σύμπαν, το υδρογόνο δεν απαντάται στη φύση σε ελεύθερη μορφή σε αξιοποιήσιμες ποσότητες, αλλά κυρίως σε χημικά δεσμευμένες ενώσεις, όπως το νερό και οι υδρογονάνθρακες. Για τον λόγο αυτό δεν θεωρείται πρωτογενής ενεργειακή πηγή αλλά ενεργειακός φορέας, καθώς απαιτείται προηγούμενη κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή του (IEA, 2023).

Η σημασία του υδρογόνου προκύπτει κυρίως από τις ιδιαίτερες ενεργειακές του ιδιότητες. Διαθέτει εξαιρετικά υψηλή ειδική ενεργειακή πυκνότητα κατά μάζα, με κατώτερη θερμογόνο δύναμη περίπου 120 MJ/kg και ανώτερη θερμογόνο δύναμη περίπου 142 MJ/kg, τιμές σημαντικά υψηλότερες από εκείνες συμβατικών καυσίμων όπως η βενζίνη, το ντίζελ ή το φυσικό αέριο (Bossel, 2006). Το χαρακτηριστικό αυτό καθιστά το υδρογόνο ιδιαίτερα ελκυστικό για εφαρμογές όπου η ενεργειακή απόδοση ανά μονάδα μάζας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, όπως στις μεταφορές ή στην αεροδιαστημική.

Ωστόσο, η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα κατά μάζα συνοδεύεται από ιδιαίτερα χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα κατά όγκο σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η ιδιότητα αυτή αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνικές προκλήσεις για την πρακτική αξιοποίησή του, καθώς επιβάλλει τη χρήση ειδικών τεχνολογιών συμπίεσης, υγροποίησης ή χημικής αποθήκευσης, αυξάνοντας το ενεργειακό και οικονομικό κόστος της συνολικής αλυσίδας αξιοποίησης.

Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι κατά την τελική χρήση του, είτε μέσω καύσης είτε μέσω ηλεκτροχημικής μετατροπής σε κυψέλες καυσίμου, το υδρογόνο

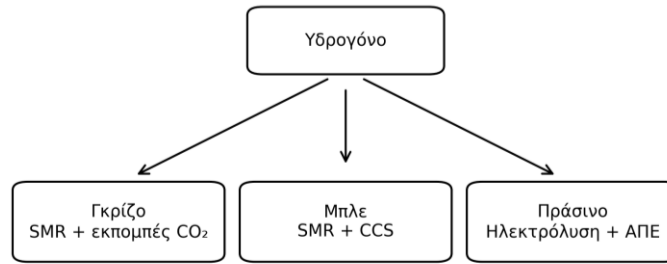
δεν παράγει διοξείδιο του άνθρακα στο σημείο κατανάλωσης. Το κύριο προϊόν της αντίδρασης με το οξυγόνο είναι το νερό, γεγονός που το καθιστά ελκυστικό για εφαρμογές απανθρακοποίησης. Παρ' όλα αυτά, το συνολικό περιβαλλοντικό του αποτύπωμα εξαρτάται αποφασιστικά από τη μέθοδο παραγωγής του, καθώς η παραγωγή από ορυκτά καύσιμα χωρίς δέσμευση άνθρακα εξακολουθεί να συνοδεύεται από σημαντικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου.

Σε σύγκριση με το φυσικό αέριο, το οποίο αποτελεί σήμερα βασικό στοιχείο των ενεργειακών συστημάτων, το υδρογόνο παρουσιάζει ουσιώδεις τεχνικές διαφοροποιήσεις. Η χαμηλότερη ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα σημαίνει ότι απαιτούνται μεγαλύτεροι όγκοι για την ίδια ενεργειακή παροχή, ενώ η αυξημένη διαπερατότητα και η υψηλή ταχύτητα διάχυσης επηρεάζουν άμεσα τις απαιτήσεις σχεδιασμού αγωγών, δεξαμενών και εξοπλισμού ασφαλείας. Παράλληλα, η ευρεία περιοχή ευφλεκτότητας και η χαμηλή απαιτούμενη ενέργεια ανάφλεξης δημιουργούν αυξημένες απαιτήσεις διαχείρισης κινδύνου.

Παρά τις τεχνικές αυτές προκλήσεις, το υδρογόνο διαθέτει σημαντικό στρατηγικό πλεονέκτημα: μπορεί να λειτουργήσει ως συνδετικός κρίκος μεταξύ διαφορετικών ενεργειακών τομέων (sector coupling). Η δυνατότητα παραγωγής του από πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια ανανεώσιμων πηγών και η μεταγενέστερη αξιοποίησή του σε μεταφορές, βιομηχανικές διεργασίες ή ηλεκτροπαραγωγή του προσδίδουν ιδιαίτερη αξία ως μέσο ενεργειακής αποθήκευσης μεγάλης διάρκειας και εξισορρόπησης δικτύων.

Συνεπώς, το υδρογόνο δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται ως καθολικό υποκατάστατο όλων των υφιστάμενων καυσίμων, αλλά ως εξειδικευμένος ενεργειακός φορέας με ιδιαίτερη χρησιμότητα σε εφαρμογές όπου η άμεση ηλεκτροποίηση είναι τεχνικά δύσκολη ή οικονομικά λιγότερο αποδοτική. Ο μελλοντικός του ρόλος θα εξαρτηθεί από την τεχνολογική πρόοδο, τη μείωση του κόστους παραγωγής και την ανάπτυξη ασφαλών και αποδοτικών υποδομών.

2.2 Παραγωγή υδρογόνου (Grey, Blue, Green)



**Σχήμα 1. Κατηγοριοποίηση του υδρογόνου με βάση τη μέθοδο παραγωγής.
Πηγή: Ίδια επεξεργασία βάσει IEA (2023) και European Commission (2020).**

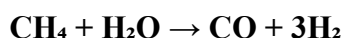
Η παραγωγή υδρογόνου αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ενεργειακή και περιβαλλοντική αξιολόγηση της τεχνολογίας, καθώς το συνολικό αποτύπωμα του υδρογόνου εξαρτάται άμεσα από τον τρόπο με τον οποίο παράγεται. Παρότι το υδρογόνο κατά την τελική χρήση του δεν εκπέμπει διοξείδιο του άνθρακα στο σημείο κατανάλωσης, η διαδικασία παραγωγής του μπορεί να συνοδεύεται από σημαντικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ανάλογα με την τεχνολογία και την πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται.

Σε διεθνές επίπεδο, οι μέθοδοι παραγωγής ταξινομούνται συχνά με χρωματική ορολογία, με τις συνηθέστερες κατηγορίες να είναι το γκρίζο (grey), το μπλε (blue) και το πράσινο (green) υδρογόνο. Η ταξινόμηση αυτή δεν αποτελεί αυστηρό τεχνικό πρότυπο, αλλά χρησιμοποιείται ευρέως για τη διάκριση των περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών κάθε μεθόδου (IEA, 2023).

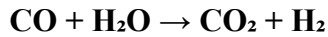
Γκρίζο υδρογόνο (Grey Hydrogen)

Η πλέον διαδεδομένη βιομηχανική μέθοδος παραγωγής υδρογόνου σήμερα είναι η αναμόρφωση φυσικού αερίου με ατμό (Steam Methane Reforming – SMR). Στη διεργασία αυτή, το φυσικό αέριο, το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH₄), αντιδρά με υδρατμούς σε υψηλές θερμοκρασίες, συνήθως μεταξύ 700 και 1.000 °C, παρουσία κατάλληλου καταλύτη.

Η βασική χημική αντίδραση μπορεί να αποδοθεί απλουστευμένα ως εξής:



Στη συνέχεια, το παραγόμενο μονοξείδιο του άνθρακα αντιδρά περαιτέρω με νερό σε δεύτερο στάδιο (water-gas shift reaction), παράγοντας επιπλέον υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα:



Η μέθοδος αυτή είναι τεχνολογικά ώριμη, οικονομικά ανταγωνιστική και ευρέως εφαρμοζόμενη στη χημική βιομηχανία και στη διύλιση πετρελαίου. Ωστόσο, συνοδεύεται από σημαντικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, γεγονός που οδηγεί στον χαρακτηρισμό του παραγόμενου προϊόντος ως «γκρίζου υδρογόνου». Εκτιμάται ότι για κάθε κιλό παραγόμενου υδρογόνου μπορούν να εκπέμπονται περίπου 9–12 kg CO₂, ανάλογα με την τεχνολογία και την ενεργειακή απόδοση της εγκατάστασης (Staffell et al., 2019).

Παρά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, το γκρίζο υδρογόνο εξακολουθεί να κυριαρχεί στην παγκόσμια αγορά λόγω του χαμηλότερου κόστους παραγωγής και της ήδη ανεπτυγμένης σχετικής υποδομής.

Μπλε υδρογόνο (Blue Hydrogen)

Το μπλε υδρογόνο βασίζεται στην ίδια βασική παραγωγική λογική με το γκρίζο, δηλαδή κυρίως στην αναμόρφωση φυσικού αερίου, αλλά με τη διαφορά ότι ενσωματώνονται τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα (Carbon Capture and Storage – CCS).

Στην περίπτωση αυτή, σημαντικό μέρος του παραγόμενου CO₂ συλλέγεται πριν απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα και είτε αποθηκεύεται σε γεωλογικούς σχηματισμούς είτε αξιοποιείται σε βιομηχανικές εφαρμογές. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται το καθαρό ανθρακικό αποτύπωμα της παραγωγικής διαδικασίας.

Η τεχνολογία αυτή θεωρείται μεταβατική λύση μεταξύ της συμβατικής παραγωγής και των πλήρως ανανεώσιμων μεθόδων. Παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι αξιοποιεί υφιστάμενη τεχνογνωσία και υποδομές φυσικού αερίου, επιτρέποντας ταχύτερη ανάπτυξη παραγωγικής δυναμικότητας.

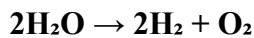
Ωστόσο, η περιβαλλοντική της απόδοση εξαρτάται από τον πραγματικό βαθμό δέσμευσης του CO₂, την ενεργειακή κατανάλωση των συστημάτων CCS και τις πιθανές εκπομπές μεθανίου κατά την εξόρυξη και μεταφορά του φυσικού αερίου. Για τον λόγο

αυτό, η συμβολή του μπλε υδρογόνου στην απανθρακοποίηση παραμένει αντικείμενο επιστημονικής και πολιτικής συζήτησης.

Πράσινο υδρογόνο (Green Hydrogen)

Το πράσινο υδρογόνο θεωρείται η πλέον περιβαλλοντικά βιώσιμη μορφή παραγωγής, καθώς βασίζεται στην ηλεκτρόλυση του νερού με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια.

Η ηλεκτρόλυση είναι διαδικασία κατά την οποία το νερό διασπάται σε υδρογόνο και οξυγόνο μέσω ηλεκτρικού ρεύματος:



Σχήμα 2. Παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης νερού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Πηγή: Ίδια επεξεργασία βάσει IEA (2023).

Η τεχνολογία αυτή δεν παράγει άμεσες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, υπό την προϋπόθεση ότι η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται πράγματι από καθαρές πηγές. Επιπλέον, προσφέρει στρατηγικό πλεονέκτημα, καθώς μπορεί να αξιοποιήσει πλεονάζουσα ηλεκτρική παραγωγή από ΑΠΕ, συμβάλλοντας στην αποθήκευση ενέργειας και στη σταθεροποίηση του ηλεκτρικού δικτύου.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, το πράσινο υδρογόνο συνοδεύεται σήμερα από υψηλότερο κόστος παραγωγής σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους, κυρίως λόγω του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας και του εξοπλισμού ηλεκτρόλυσης. Επιπλέον, η συνολική ενεργειακή απόδοση της αλυσίδας παραμένει κρίσιμο ζήτημα, καθώς η μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε υδρογόνο συνεπάγεται ενεργειακές απώλειες.

Εναλλακτικές μέθοδοι παραγωγής

Πέρα από τις τρεις κύριες κατηγορίες, έχουν προταθεί και άλλες τεχνολογικές προσεγγίσεις παραγωγής υδρογόνου. Σε αυτές περιλαμβάνονται η αεριοποίηση βιομάζας,

η θερμοχημική διάσπαση νερού, η ηλεκτροχημική επεξεργασία οργανικών αποβλήτων και η παραγωγή μέσω πυρηνικής ενέργειας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η χρήση της αμμωνίας ως έμμεσου φορέα υδρογόνου, καθώς μπορεί να μεταφερθεί και στη συνέχεια να αποσυντεθεί για παραγωγή καθαρού υδρογόνου στον τόπο χρήσης. Αν και οι τεχνολογίες αυτές δεν έχουν ακόμη ευρεία εμπορική εφαρμογή, ενδέχεται να αποκτήσουν μεγαλύτερη σημασία στο μέλλον.

Συγκριτική αξιολόγηση

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου παραγωγής δεν εξαρτάται αποκλειστικά από περιβαλλοντικά κριτήρια, αλλά και από οικονομικούς, τεχνολογικούς και γεωπολιτικούς παράγοντες. Το γκρίζο υδρογόνο παραμένει οικονομικά ανταγωνιστικό αλλά περιβαλλοντικά επιβαρυντικό. Το μπλε υδρογόνο προσφέρει μεταβατική μείωση εκπομπών, αλλά εξακολουθεί να βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα. Το πράσινο υδρογόνο εμφανίζει τη μεγαλύτερη συμβατότητα με τους στόχους μακροχρόνιας απανθρακοποίησης, αλλά απαιτεί σημαντική μείωση κόστους και ανάπτυξη νέων υποδομών.

Κατά συνέπεια, η μελλοντική ανάπτυξη της οικονομίας του υδρογόνου θα εξαρτηθεί σε μεγάλο βαθμό από τη σταδιακή μετάβαση προς τεχνολογίες χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος, με κυρίαρχη κατεύθυνση την ενίσχυση της παραγωγής πράσινου υδρογόνου.

Πίνακας 1. Συγκριτική αξιολόγηση των κυριότερων μορφών υδρογόνου.

Πηγή: Ίδια επεξεργασία βάσει Kothari et al. (2008), Staffell et al. (2019), IEA (2023) και European Commission (2020).

Παράμετρος	Grey Hydrogen	Blue Hydrogen	Green Hydrogen
Βασική τεχνολογία	Αναμόρφωση φυσικού αερίου με ατμό (SMR)	SMR + δέσμευση CO ₂ (CCS)	Ηλεκτρόλυση νερού με ΑΠΕ
Πηγή ενέργειας	Φυσικό αέριο	Φυσικό αέριο	Ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ
Εκπομπές CO₂	Υψηλές	Μέτριες έως χαμηλότερες	Πολύ χαμηλές / σχεδόν μηδενικές*
Τεχνολογική ωριμότητα	Πολύ υψηλή	Υψηλή	Μεσαία προς υψηλή
Κόστος παραγωγής (σήμερα)	Χαμηλό	Μεσαίο	Υψηλό
Εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα	Ναι	Ναι	Όχι
Ανάγκη νέων υποδομών	Περιορισμένη	Μέτρια (CCS υποδομές)	Υψηλή
Συμβατότητα με απανθρακοποίηση	Χαμηλή	Μεταβατική λύση	Υψηλή
Κύρια πρόκληση	Υψηλό ανθρακικό αποτύπωμα	Αβεβαιότητα πραγματικής μείωσης εκπομπών	Υψηλό κόστος και ενεργειακές απαιτήσεις

* εξαρτάται από το αν η ηλεκτρική ενέργεια είναι πράγματι ανανεώσιμη.

Από τη συγκριτική αξιολόγηση προκύπτει ότι, παρότι το γκρίζο και το μπλε υδρογόνο εμφανίζουν υψηλότερη τεχνολογική ωριμότητα και μικρότερο σημερινό κόστος παραγωγής, η μακροπρόθεσμη στρατηγική απανθρακοποίησης ευνοεί σαφώς το πράσινο υδρογόνο. Επομένως, η σημερινή ενεργειακή μετάβαση φαίνεται να διαμορφώνεται μέσα από έναν συνδυασμό μεταβατικών και μακροπρόθεσμα βιώσιμων τεχνολογικών επιλογών.

2.3 Φυσικοχημικές ιδιότητες και κίνδυνοι του υδρογόνου

Η αξιοποίηση του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα δεν εξαρτάται μόνο από τη δυνατότητα παραγωγής του, αλλά και από τις ιδιαίτερες φυσικοχημικές του ιδιότητες, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα την αποθήκευση, τη μεταφορά, τη χρήση και την ασφάλεια των σχετικών υποδομών. Σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα, το υδρογόνο εμφανίζει σημαντικές διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά του, γεγονός που απαιτεί ειδικό σχεδιασμό εξοπλισμού και αυστηρότερα μέτρα διαχείρισης κινδύνου.

Το υδρογόνο είναι το ελαφρύτερο χημικό στοιχείο, με μοριακή μάζα περίπου 2 g/mol, και υπό κανονικές συνθήκες εμφανίζεται ως άχρωμο, άοσμο και μη τοξικό αέριο. Η χαμηλή του πυκνότητα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του, καθώς ευνοεί την ταχεία ανύψωση και διάχυσή του στην ατμόσφαιρα σε περίπτωση διαρροής. Από τη μία πλευρά, αυτό μπορεί να μειώσει τον χρόνο παραμονής του κοντά στο έδαφος σε ανοιχτούς χώρους· από την άλλη, σε κλειστούς ή ανεπαρκώς αεριζόμενους χώρους μπορεί να οδηγήσει σε συσσώρευση κοντά σε υψηλά σημεία, αυξάνοντας τον κίνδυνο ανάφλεξης (DOE, 2023).

Ένα από τα βασικά ενεργειακά χαρακτηριστικά του υδρογόνου είναι η υψηλή ειδική ενεργειακή του πυκνότητα ανά μονάδα μάζας. Η κατώτερη θερμογόνο δύναμή του ανέρχεται περίπου στα 120 MJ/kg, τιμή σημαντικά υψηλότερη από εκείνη του φυσικού αερίου ή των υγρών καυσίμων. Ωστόσο, η ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου είναι ιδιαίτερα χαμηλή, γεγονός που αποτελεί έναν από τους βασικούς περιορισμούς της τεχνολογίας. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο απαιτούνται τεχνικές όπως η συμπίεση, η υγροποίηση ή η χημική αποθήκευση, ώστε να καταστεί πρακτικά αξιοποιήσιμο σε πραγματικά ενεργειακά συστήματα.

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά καύσης του υδρογόνου. Το καύσιμο αυτό διαθέτει πολύ χαμηλή απαιτούμενη ενέργεια ανάφλεξης, γεγονός που σημαίνει ότι μπορεί να αναφλεγεί ευκολότερα από πολλές άλλες καύσιμες ουσίες. Παράλληλα, παρουσιάζει εξαιρετικά ευρύ φάσμα ευφλεκτότητας στον αέρα, περίπου από 4% έως 75% κατ' όγκο, ενώ σε περιβάλλον καθαρού οξυγόνου το εύρος αυτό επεκτείνεται ακόμη περισσότερο. Το χαρακτηριστικό αυτό σημαίνει ότι το υδρογόνο μπορεί να σχηματίσει εύφλεκτα μίγματα σε πολύ μεγαλύτερο εύρος συγκεντρώσεων σε σχέση με το φυσικό αέριο.

Επιπλέον, η ταχύτητα διάδοσης της φλόγας του υδρογόνου είναι σημαντικά υψηλότερη από εκείνη του μεθανίου, γεγονός που επηρεάζει άμεσα τον σχεδιασμό καυστήρων, συστημάτων ανάφλεξης και μέτρων ασφαλείας. Η υψηλή ταχύτητα καύσης μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα όπως flashback, δηλαδή επιστροφή της φλόγας προς την πηγή καυσίμου, εάν ο εξοπλισμός δεν έχει σχεδιαστεί ειδικά για χρήση με υδρογόνο ή με μίγματα που το περιέχουν.

Ένας ακόμη κρίσιμος παράγοντας είναι η υψηλή διαπερατότητα του υδρογόνου μέσα από ορισμένα υλικά και στεγανωτικά στοιχεία. Λόγω του πολύ μικρού μοριακού μεγέθους του, το υδρογόνο μπορεί να διαφεύγει μέσω μικρορωγμών, ενώσεων ή υλικών που θεωρούνται αποδεκτά για άλλα αέρια. Αυτό αυξάνει τις απαιτήσεις στεγανότητας σε αγωγούς, βαλβίδες, συνδέσεις και δεξαμενές αποθήκευσης.

Ιδιαίτερη τεχνική σημασία έχει το φαινόμενο της υδρογονοθραυστικότητας (hydrogen embrittlement), το οποίο αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους περιορισμούς στη χρήση του υδρογόνου σε μεταλλικές υποδομές. Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με τη διάχυση ατόμων υδρογόνου στο εσωτερικό μεταλλικών υλικών, ιδιαίτερα χάλυβα υψηλής αντοχής, με αποτέλεσμα τη μείωση της ολκιμότητας, την ανάπτυξη μικρορωγμών και την αύξηση της πιθανότητας αστοχίας υπό μηχανική φόρτιση. Η υδρογονοθραυστικότητα αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε αγωγούς υψηλής πίεσης, δεξαμενές και εξοπλισμό συμπίεσης, όπου συνυπάρχουν υψηλές μηχανικές τάσεις και συνεχής έκθεση στο αέριο.

Από πλευράς ασφάλειας, πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η φλόγα του υδρογόνου είναι σχεδόν αόρατη στο ορατό φάσμα υπό ορισμένες συνθήκες, γεγονός που δυσκολεύει την άμεση οπτική αναγνώριση περιστατικών καύσης. Το χαρακτηριστικό αυτό αυξάνει την ανάγκη για χρήση συστημάτων ανίχνευσης φλόγας και κατάλληλων διαδικασιών επιχειρησιακής ασφάλειας.

Παρά τους κινδύνους αυτούς, είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι το υδρογόνο δεν είναι εγγενώς «πιο επικίνδυνο» από άλλα βιομηχανικά καύσιμα, αλλά παρουσιάζει διαφορετικό προφίλ κινδύνου. Η ασφαλής χρήση του εξαρτάται από τον σωστό σχεδιασμό, την επιλογή κατάλληλων υλικών, την εφαρμογή διεθνών προτύπων και τη χρήση προηγμένων συστημάτων παρακολούθησης και ανίχνευσης διαρροών.

Συνεπώς, η κατανόηση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του υδρογόνου αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για την τεχνική αξιολόγηση των τεχνολογιών αποθήκευσης, μεταφοράς και τελικής χρήσης που εξετάζονται στα επόμενα κεφάλαια.

2.4 Ενεργειακή απόδοση και συγκριτικά πλεονεκτήματα

Η αξιολόγηση του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στις θεωρητικές θερμοδυναμικές του ιδιότητες, αλλά πρέπει να εξετάζεται στο σύνολο της ενεργειακής αλυσίδας, από την παραγωγή έως την τελική χρήση. Παρότι το υδρογόνο παρουσιάζει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα μάζας, η συνολική ενεργειακή του απόδοση επηρεάζεται από τις απώλειες που προκύπτουν κατά τα επιμέρους στάδια μετατροπής, συμπίεσης, αποθήκευσης, μεταφοράς και τελικής αξιοποίησης.

Η έννοια της ενεργειακής απόδοσης στο πλαίσιο του υδρογόνου εξετάζεται συνήθως μέσω της προσέγγισης “well-to-use” ή “source-to-end-use”, δηλαδή της συνολικής ενεργειακής αλυσίδας από την πρωτογενή πηγή έως την τελική κατανάλωση. Στην περίπτωση του πράσινου υδρογόνου, η διαδικασία περιλαμβάνει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, την ηλεκτρόλυση του νερού, τη συμπίεση ή αποθήκευση του παραγόμενου αερίου, τη μεταφορά του και τελικά τη χρήση του είτε μέσω καύσης είτε μέσω κυψελών καυσίμου.

Σε κάθε ένα από αυτά τα στάδια εμφανίζονται ενεργειακές απώλειες. Η ηλεκτρόλυση, ανάλογα με την τεχνολογία και τις συνθήκες λειτουργίας, παρουσιάζει συνήθως ενεργειακή απόδοση περίπου 60–80%. Η συμπίεση του υδρογόνου σε υψηλές πιέσεις απαιτεί πρόσθετη ενεργειακή κατανάλωση, ενώ η υγροποίηση είναι ακόμη πιο ενεργοβόρα, καθώς μπορεί να καταναλώσει σημαντικό ποσοστό της αρχικής ενεργειακής αξίας του καυσίμου. Αν το υδρογόνο χρησιμοποιηθεί τελικά σε κυψέλες καυσίμου, η μετατροπή του ξανά σε ηλεκτρική ενέργεια συνοδεύεται επίσης από πρόσθετες απώλειες. Ως αποτέλεσμα, η συνολική απόδοση της πλήρους αλυσίδας είναι σημαντικά χαμηλότερη από την αρχική θεωρητική ενεργειακή περιεκτικότητα του καυσίμου (IEA, 2023; IRENA, 2022).

Το στοιχείο αυτό αποτελεί μία από τις συχνότερες τεχνικές κριτικές απέναντι στη χρήση του υδρογόνου ως γενικευμένου ενεργειακού φορέα. Σε εφαρμογές όπου η άμεση

χρήση ηλεκτρικής ενέργειας είναι εφικτή, η ηλεκτροδότηση θεωρείται συχνά ενεργειακά αποδοτικότερη λύση, καθώς αποφεύγονται οι διαδοχικές μετατροπές ενέργειας. Για παράδειγμα, σε ορισμένες εφαρμογές κτιριακής θέρμανσης ή επιβατικών μεταφορών, η άμεση ηλεκτροποίηση μέσω αντλιών θερμότητας ή ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να προσφέρει υψηλότερη συνολική απόδοση.

Ωστόσο, η ενεργειακή απόδοση δεν αποτελεί το μοναδικό κριτήριο αξιολόγησης. Το υδρογόνο παρουσιάζει σημαντικά συγκριτικά πλεονεκτήματα που σχετίζονται με την ευελιξία και τον στρατηγικό του ρόλο στο ενεργειακό σύστημα. Ένα από τα βασικότερα είναι η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης διάρκειας. Σε αντίθεση με τις συμβατικές μπαταρίες, οι οποίες είναι περισσότερο κατάλληλες για βραχυχρόνια αποθήκευση, το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ημερήσια, εβδομαδιαία ή ακόμη και εποχική αποθήκευση ενέργειας, προσφέροντας λύσεις εξισορρόπησης σε ενεργειακά συστήματα με υψηλή διεύθυνση ανανεώσιμων πηγών.

Επιπλέον, το υδρογόνο εμφανίζει ιδιαίτερη αξία σε τομείς όπου η άμεση ηλεκτροποίηση είναι δύσκολη ή τεχνικά περιορισμένη. Τέτοιοι τομείς περιλαμβάνουν τη βαριά βιομηχανία, τη χαλυβουργία, τη χημική βιομηχανία, τη ναυτιλία, την αεροπορία και ορισμένες βαριές μεταφορές μεγάλων αποστάσεων. Στις περιπτώσεις αυτές, το υδρογόνο μπορεί να λειτουργήσει είτε ως καύσιμο είτε ως πρώτη ύλη, καλύπτοντας ενεργειακές ανάγκες που δύσκολα εξυπηρετούνται από την απευθείας χρήση ηλεκτρικής ενέργειας.

Ένα ακόμη συγκριτικό πλεονέκτημα αφορά τη δυνατότητα αξιοποίησης υφιστάμενων ενεργειακών υποδομών, ιδίως μέσω της σταδιακής ενσωμάτωσης του υδρογόνου σε δίκτυα φυσικού αερίου ή της προσαρμογής υποδομών μεταφοράς και αποθήκευσης. Η δυνατότητα αυτή μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος μετάβασης σε σχέση με την πλήρη ανάπτυξη νέων δικτύων από μηδενική βάση.

Παράλληλα, το υδρογόνο προσφέρει στρατηγικά πλεονεκτήματα σε επίπεδο ενεργειακής ασφάλειας και διαφοροποίησης πηγών εφοδιασμού. Χώρες με υψηλό δυναμικό ανανεώσιμων πηγών μπορούν δυνητικά να μετατρέψουν πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια σε υδρογόνο, δημιουργώντας νέες μορφές ενεργειακής αποθήκευσης, εξαγωγών ή εγχώριας ενεργειακής αυτονομίας.

Ωστόσο, τα συγκριτικά αυτά πλεονεκτήματα συνοδεύονται από σημαντικές προκλήσεις. Το υψηλό κόστος παραγωγής πράσινου υδρογόνου, η ανάγκη ανάπτυξης νέων υποδομών, οι τεχνικές απαιτήσεις ασφάλειας και η σχετικά χαμηλή συνολική ενεργειακή απόδοση αποτελούν κρίσιμους περιορισμούς για την ευρεία εφαρμογή του.

Συνεπώς, το υδρογόνο δεν πρέπει να θεωρείται καθολικό υποκατάστατο όλων των ενεργειακών τεχνολογιών, αλλά εξειδικευμένος ενεργειακός φορέας με ιδιαίτερη αξία σε εφαρμογές όπου τα συγκριτικά του πλεονεκτήματα υπερτερούν των περιορισμών του. Η ορθολογική αξιοποίησή του προϋποθέτει επιλογή κατάλληλων πεδίων εφαρμογής και ενσωμάτωσή του σε ένα ευρύτερο πολυτεχνολογικό ενεργειακό σύστημα.

Κεφάλαιο 3: Τεχνολογίες αποθήκευσης υδρογόνου

3.1 Συμπιεσμένο υδρογόνο (Compressed Hydrogen – CH₂)

Η αποθήκευση υδρογόνου σε συμπιεσμένη αέρια μορφή αποτελεί σήμερα την πλέον ώριμη και ευρύτερα εφαρμοζόμενη τεχνολογία αποθήκευσης, ιδιαίτερα σε βιομηχανικές εφαρμογές, σταθμούς ανεφοδιασμού και οχήματα κυψελών καυσίμου. Η βασική αρχή της μεθόδου συνίσταται στη συμπίεση του αερίου υδρογόνου σε υψηλές πιέσεις, ώστε να αυξηθεί η ποσότητα καυσίμου που μπορεί να αποθηκευτεί σε συγκεκριμένο όγκο.

Η ανάγκη αυτής της προσέγγισης προκύπτει από τη χαμηλή ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα του υδρογόνου σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Παρότι το υδρογόνο παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλή ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα μάζας, η πρακτική αποθήκευσή του χωρίς συμπίεση θα απαιτούσε πολύ μεγάλους όγκους, γεγονός που καθιστά τη χρήση του επιχειρησιακά μη αποδοτική στις περισσότερες εφαρμογές.

Στην πράξη, η αποθήκευση συμπιεσμένου υδρογόνου πραγματοποιείται συνήθως σε πιέσεις μεταξύ 200 και 700 bar, ανάλογα με την εφαρμογή. Σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή σταθερά συστήματα αποθήκευσης χρησιμοποιούνται συχνά πιέσεις της τάξης των 200–350 bar, ενώ στις εφαρμογές μεταφορών, όπως τα επιβατικά οχήματα κυψελών καυσίμου, η αποθήκευση πραγματοποιείται συνήθως στα 700 bar ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ενεργειακή αυτονομία (IEA, 2023).

Η τεχνολογία βασίζεται σε δοχεία υψηλής πίεσης ειδικού σχεδιασμού, τα οποία πρέπει να πληρούν αυστηρές μηχανικές και λειτουργικές απαιτήσεις. Ανάλογα με την εφαρμογή, χρησιμοποιούνται μεταλλικά ή σύνθετα δοχεία πίεσης. Στις εφαρμογές όπου

το βάρος αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, όπως στα οχήματα, κυριαρχούν σύνθετα δοχεία (composite pressure vessels), τα οποία συνδυάζουν υψηλή μηχανική αντοχή με μειωμένη μάζα. Σε σταθερές εφαρμογές, όπου το βάρος είναι λιγότερο περιοριστικός παράγοντας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μεταλλικά δοχεία χαμηλότερου κόστους.

Το βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας είναι η υψηλή τεχνολογική της ωριμότητα. Πρόκειται για λύση που έχει ήδη υιοθετηθεί σε πραγματικές εφαρμογές, διαθέτει σαφές κανονιστικό πλαίσιο και υποστηρίζεται από υπάρχουσα βιομηχανική εμπειρία. Επιπλέον, η διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης είναι σχετικά απλή, ενώ επιτρέπει γρήγορο ανεφοδιασμό, στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό στις μεταφορές.

Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, η τεχνολογία συνοδεύεται από ουσιώδεις περιορισμούς. Ο σημαντικότερος αφορά τη σχετικά χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου ακόμη και μετά τη συμπίεση, γεγονός που σημαίνει ότι εξακολουθούν να απαιτούνται μεγάλοι όγκοι σε σύγκριση με συμβατικά υγρά καύσιμα.

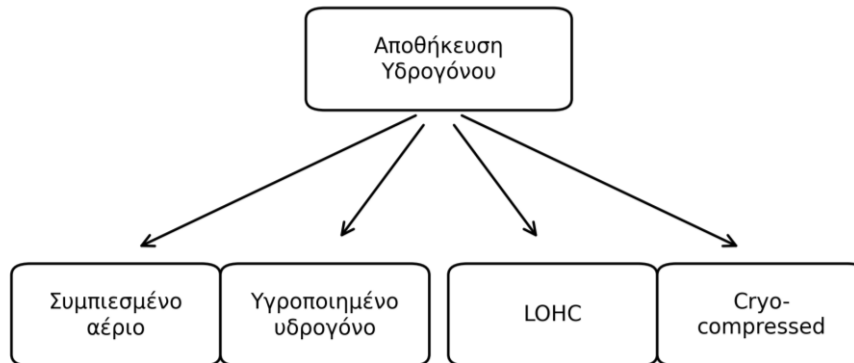
Επιπλέον, η συμπίεση του υδρογόνου απαιτεί σημαντική ενεργειακή κατανάλωση, η οποία μειώνει τη συνολική απόδοση της ενεργειακής αλυσίδας. Ανάλογα με την τελική πίεση και τη διαμόρφωση του συστήματος, η ενεργειακή απαίτηση για συμπίεση μπορεί να αντιστοιχεί σε περίπου 5–15% της ενεργειακής περιεκτικότητας του αποθηκευόμενου υδρογόνου (IRENA, 2022).

Η λειτουργία σε πολύ υψηλές πιέσεις συνεπάγεται επίσης αυξημένες απαιτήσεις ασφαλείας. Η πιθανότητα διαρροών, η ανάγκη διατήρησης υψηλής στεγανότητας και οι μηχανικές καταπονήσεις των δοχείων καθιστούν απαραίτητη τη χρήση αυστηρών προτύπων σχεδιασμού, συστημάτων επιτήρησης και διαδικασιών συντήρησης. Επιπλέον, λόγω των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του υδρογόνου, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή υλικών ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα υδρογονοθραυστικότητας.

Ένας ακόμη σημαντικός περιορισμός αφορά το κόστος των δοχείων υψηλής πίεσης, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται προηγμένα σύνθετα υλικά όπως ίνες άνθρακα. Το κόστος αυτό αποτελεί σήμερα έναν από τους βασικούς παράγοντες που περιορίζουν τη μαζική διείσδυση της τεχνολογίας σε ορισμένες εφαρμογές.

Συνολικά, η αποθήκευση συμπιεσμένου υδρογόνου αποτελεί σήμερα την πιο πρακτική και ώριμη τεχνολογική λύση για βραχυπρόθεσμη και μεσαίας κλίμακας αποθήκευση, ιδιαίτερα σε εφαρμογές κινητικότητας και αποκεντρωμένων ενεργειακών

συστημάτων. Ωστόσο, οι περιορισμοί που σχετίζονται με την ογκομετρική πυκνότητα, το ενεργειακό κόστος συμπίεσης και το κόστος εξοπλισμού περιορίζουν την αποτελεσματικότητά της σε εφαρμογές πολύ μεγάλης κλίμακας ή μακροχρόνιας αποθήκευσης.



Σχήμα 3. Κύριες τεχνολογίες αποθήκευσης υδρογόνου.

Πηγή: Ίδια επεξεργασία βάσει IEA (2023), IRENA (2022) και Ball & Weeda (2015).

3.2 Υγροποιημένο υδρογόνο (Liquid Hydrogen – LH₂)

Η αποθήκευση υδρογόνου σε υγρή μορφή αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνολογικές επιλογές για εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου σε σύγκριση με τη συμπιεσμένη αέρια αποθήκευση. Η βασική αρχή της μεθόδου συνίσταται στην ψύξη του υδρογόνου σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, έως το σημείο υγροποίησής του, περίπου στους -253°C υπό ατμοσφαιρική πίεση.

Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιδιώκει να αντιμετωπίσει έναν από τους σημαντικότερους περιορισμούς του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα, δηλαδή τη χαμηλή ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα στην αέρια φάση. Με την υγροποίηση, η πυκνότητα του υδρογόνου αυξάνεται σημαντικά, επιτρέποντας την αποθήκευση πολύ μεγαλύτερης ποσότητας ενέργειας σε μικρότερο όγκο. Το χαρακτηριστικό αυτό καθιστά την τεχνολογία ιδιαίτερα ελκυστική σε εφαρμογές όπου ο διαθέσιμος χώρος αποτελεί κρίσιμο περιορισμό, όπως στις αεροδιαστημικές εφαρμογές, στις βαριές μεταφορές μεγάλων αποστάσεων και δυνητικά στη ναυτιλία.

Η τεχνολογία υγροποιημένου υδρογόνου έχει ήδη χρησιμοποιηθεί επί δεκαετίες σε εξειδικευμένες εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων, ιδιαίτερα στον αεροδιαστημικό τομέα,

γεγονός που αποδεικνύει την τεχνική της εφικτότητα. Ωστόσο, η ευρύτερη ενεργειακή αξιοποίησή της συνοδεύεται από σημαντικούς τεχνικούς και οικονομικούς περιορισμούς.

Ο σημαντικότερος περιορισμός αφορά το υψηλό ενεργειακό κόστος της διαδικασίας υγροποίησης. Η ψύξη του υδρογόνου σε κρυογενικές θερμοκρασίες απαιτεί σύνθετα θερμοδυναμικά συστήματα και υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Σύμφωνα με διεθνείς εκτιμήσεις, η διαδικασία υγροποίησης μπορεί να καταναλώσει περίπου το 25–40% της ενεργειακής περιεκτικότητας του ίδιου του υδρογόνου, ποσοστό σημαντικά υψηλότερο από το αντίστοιχο κόστος συμπίεσης για αέρια αποθήκευση (IEA, 2023; IRENA, 2022). Η παράμετρος αυτή επηρεάζει άμεσα τη συνολική ενεργειακή απόδοση της αλυσίδας.

Επιπλέον, η αποθήκευση υγροποιημένου υδρογόνου απαιτεί ειδικές κρυογενικές δεξαμενές υψηλής θερμικής μόνωσης. Οι δεξαμενές αυτές κατασκευάζονται συνήθως ως διπλού τοιχώματος δοχεία, με ενδιάμεσο κενό ή προηγμένα μονωτικά υλικά, ώστε να περιορίζεται όσο το δυνατόν περισσότερο η θερμική εισροή από το περιβάλλον.

Παρά τα συστήματα μόνωσης, η πλήρης εξάλειψη της θερμικής μεταφοράς δεν είναι εφικτή. Ως αποτέλεσμα, εμφανίζεται το φαινόμενο των απωλειών εξάτμισης (boil-off losses), κατά το οποίο μέρος του αποθηκευμένου υδρογόνου εξατμίζεται σταδιακά λόγω απορρόφησης θερμότητας από το περιβάλλον. Οι απώλειες αυτές μπορεί να είναι περιορισμένες σε μεγάλα βιομηχανικά συστήματα με συνεχή κατανάλωση, αλλά αποτελούν σημαντικό πρόβλημα σε εφαρμογές μακροχρόνιας αποθήκευσης ή διακοπτόμενης χρήσης.

Από πλευράς υλικών, οι εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες επιβάλλουν αυστηρές απαιτήσεις σχεδιασμού. Πολλά συμβατικά μεταλλικά υλικά παρουσιάζουν απώλεια ολκιμότητας και αυξημένη ευθραυστότητα σε κρυογενικές συνθήκες, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη χρήση ειδικών κραμάτων και ανοξείδωτων χαλύβων κατάλληλων για χαμηλές θερμοκρασίες. Παράλληλα, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στη στεγανότητα των συστημάτων, καθώς το υδρογόνο λόγω του μικρού μοριακού του μεγέθους εμφανίζει αυξημένη τάση διαρροής.

Από επιχειρησιακή σκοπιά, η τεχνολογία προσφέρει σαφές πλεονέκτημα ως προς την ογκομετρική απόδοση έναντι της συμπίεσμένης αποθήκευσης, γεγονός που μπορεί να δικαιολογήσει τη χρήση της σε ειδικές εφαρμογές όπου η εξοικονόμηση χώρου είναι

κρίσιμη. Αντίθετα, σε εφαρμογές γενικής ενεργειακής αποθήκευσης, το υψηλό κόστος και η τεχνική πολυπλοκότητα περιορίζουν την ανταγωνιστικότητά της.

Συνολικά, η αποθήκευση υδροποιημένου υδρογόνου αποτελεί τεχνολογικά ώριμη αλλά ενεργειακά απαιτητική λύση. Η εφαρμογή της είναι τεχνικά εφικτή και ήδη αποδεδειγμένη σε ειδικές χρήσεις, ωστόσο η ευρύτερη υιοθέτησή της εξαρτάται από τη μείωση του κόστους υδροποίησης, τη βελτίωση των συστημάτων θερμικής μόνωσης και τη βελτιστοποίηση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης.

3.3 Αποθήκευση σε μεταλλικά υδρίδια

Η αποθήκευση υδρογόνου σε στερεά μορφή μέσω μεταλλικών ή σύνθετων υδριδίων αποτελεί μία εναλλακτική τεχνολογική προσέγγιση που διαφοροποιείται ουσιαστικά από τις συμβατικές μεθόδους αποθήκευσης υπό πίεση ή σε κρυογενικές συνθήκες. Η βασική αρχή της τεχνολογίας αυτής στηρίζεται στην ικανότητα ορισμένων μεταλλικών ή σύνθετων υλικών να απορροφούν υδρογόνο στη δομή τους μέσω αντιστρεπτής χημικής ή φυσικοχημικής αλληλεπίδρασης, σχηματίζοντας υδρίδια. Με τον τρόπο αυτό, το υδρογόνο δεν αποθηκεύεται ως ελεύθερο αέριο, αλλά ενσωματώνεται σε στερεό μέσο, γεγονός που διαφοροποιεί σημαντικά τόσο τα λειτουργικά χαρακτηριστικά όσο και το προφίλ ασφάλειας της μεθόδου (Züttel, 2003; Andersson & Grönkvist, 2019).

Η διαδικασία αποθήκευσης περιλαμβάνει αρχικά την προσρόφηση του μοριακού υδρογόνου στην επιφάνεια του υλικού, τη διάσπαση του μορίου σε ατομικό υδρογόνο και στη συνέχεια τη διάχυση των ατόμων στο εσωτερικό της μεταλλικής δομής. Κατά την αποφόρτιση, η διαδικασία αντιστρέφεται, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση του αποθηκευμένου υδρογόνου υπό ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Η θερμοδυναμική συμπεριφορά του κάθε υλικού καθορίζει τη λειτουργική περιοχή στην οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί πρακτικά, γεγονός που αποτελεί κρίσιμο κριτήριο επιλογής (IEA, 2019).

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας είναι η υψηλή ογκομετρική πυκνότητα αποθήκευσης. Σε σύγκριση με τη συμπιεσμένη αέρια αποθήκευση, τα μεταλλικά υδρίδια επιτρέπουν τη συγκέντρωση σημαντικής ποσότητας υδρογόνου σε μικρότερο όγκο χωρίς την ανάγκη εξαιρετικά υψηλών πιέσεων ή εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών. Επιπλέον, από πλευράς ασφάλειας, η απουσία

μεγάλων ποσοτήτων ελεύθερου συμπιεσμένου αερίου μειώνει θεωρητικά τον κίνδυνο ταχείας εκτόνωσης ή βίαιης αστοχίας δεξαμενής (DOE, 2023).

Τα υλικά που έχουν μελετηθεί για αυτή τη χρήση διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες. Τα κλασικά μεταλλικά υδρίδια περιλαμβάνουν κράματα όπως LaNi_5 , TiFe και Mg -based systems, ενώ στις πιο προηγμένες ερευνητικές κατηγορίες εντάσσονται σύνθετα υδρίδια όπως sodium alanate (NaAlH_4), lithium borohydride (LiBH_4) και sodium borohydride (NaBH_4). Ορισμένα από αυτά τα υλικά παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλές θεωρητικές ικανότητες αποθήκευσης. Ενδεικτικά, το LiBH_4 εμφανίζει θεωρητική χωρητικότητα περίπου 18,4% κ.β., ενώ το NaBH_4 περίπου 10,6% κ.β. (Schlapbach & Züttel, 2001).

Παρά τις εντυπωσιακές θεωρητικές επιδόσεις, η πρακτική αξιοποίηση των υλικών αυτών είναι σημαντικά πιο σύνθετη. Σε πολλές περιπτώσεις απαιτούνται αυξημένες θερμοκρασίες για την αποδέσμευση του υδρογόνου, γεγονός που επιβαρύνει την ενεργειακή απόδοση του συνολικού συστήματος. Για παράδειγμα, ορισμένα σύνθετα υδρίδια παρουσιάζουν ικανοποιητική απελευθέρωση υδρογόνου μόνο σε θερμοκρασίες που υπερβαίνουν τους 200°C , καθιστώντας δύσκολη την ενσωμάτωσή τους σε εφαρμογές όπου απαιτείται άμεση ή χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργία (Andersson & Grönkvist, 2019).

Επιπλέον, η κινητική της απορρόφησης και αποδέσμευσης δεν είναι πάντοτε επαρκώς γρήγορη για δυναμικές εφαρμογές. Η φόρτιση και η εκφόρτιση συνοδεύονται από έντονα θερμικά φαινόμενα, καθώς η απορρόφηση υδρογόνου είναι γενικά εξώθερμη, ενώ η απελευθέρωσή του ενδόθερμη. Αυτό σημαίνει ότι ένα πρακτικό σύστημα αποθήκευσης απαιτεί αποτελεσματικό θερμικό σχεδιασμό, όπως εναλλάκτες θερμότητας ή συστήματα ενεργού θερμικής διαχείρισης, αυξάνοντας την πολυπλοκότητα και το κόστος (IEA, 2019).

Ένα ακόμη σημαντικό μειονέκτημα είναι η χαμηλή gravimetric efficiency σε επίπεδο συστήματος. Παρότι το ενεργό υλικό μπορεί να εμφανίζει υψηλή θεωρητική αποθηκευτική ικανότητα, το συνολικό σύστημα περιλαμβάνει περίβλημα, θερμική μόνωση, εναλλάκτες, δομικά υλικά και βοηθητικό εξοπλισμό, αυξάνοντας αισθητά το συνολικό βάρος. Το στοιχείο αυτό περιορίζει τη χρησιμότητα της τεχνολογίας σε

εφαρμογές όπου το βάρος αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, όπως οι οδικές μεταφορές ή η αεροναυπηγική.

Παρά τους περιορισμούς, τα μεταλλικά υδρίδια παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως σταθερά ενεργειακά συστήματα, φορητές ενεργειακές διατάξεις μικρής κλίμακας ή εφαρμογές όπου η ασφάλεια υπερέχει της απαίτησης για υψηλή ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα μάζας. Η συνεχής πρόοδος στη νανοτεχνολογία, στα σύνθετα υλικά και στους καταλύτες ενδέχεται να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση και να επεκτείνει το πεδίο εφαρμογής τους τα επόμενα χρόνια (DOE, 2023).

Συνολικά, η αποθήκευση υδρογόνου σε μεταλλικά υδρίδια αποτελεί τεχνολογία με υψηλό θεωρητικό δυναμικό, ιδιαίτερα από άποψη ασφάλειας και ογκομετρικής αποδοτικότητας. Ωστόσο, οι θερμικές απαιτήσεις, το αυξημένο βάρος, η πολυπλοκότητα του συστήματος και το υψηλό κόστος περιορίζουν προς το παρόν την ευρεία εμπορική αξιοποίησή της, διατηρώντας την κυρίως σε εξειδικευμένες ή ερευνητικές εφαρμογές.

3.4 Αποθήκευση υδρογόνου μέσω αμμωνίας

Η αμμωνία (NH_3) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εναλλακτικές προσεγγίσεις για την έμμεση αποθήκευση και μεταφορά υδρογόνου, καθώς λειτουργεί ως χημικός φορέας υδρογόνου (hydrogen carrier). Αν και δεν πρόκειται για άμεση φυσική αποθήκευση του υδρογόνου, όπως συμβαίνει με τη συμπίεση ή την υγροποίηση, η χρήση της αμμωνίας επιτρέπει την αποθήκευση σημαντικής ποσότητας υδρογόνου σε χημικά δεσμευμένη μορφή, με χαρακτηριστικά που μπορούν να καταστήσουν τη λύση αυτή ιδιαίτερα ελκυστική για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας και διεθνούς μεταφοράς ενέργειας (IEA, 2019; Valera-Medina et al., 2021).

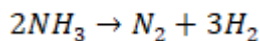
Η βασική λογική της προσέγγισης στηρίζεται στο γεγονός ότι η αμμωνία περιέχει υψηλή συγκέντρωση υδρογόνου στη μοριακή της δομή. Συγκεκριμένα, περίπου το 17,6% της μάζας της αμμωνίας αντιστοιχεί σε υδρογόνο, γεγονός που της προσδίδει σημαντική θεωρητική αποθηκευτική ικανότητα. Η παραγωγή της πραγματοποιείται μέσω της διεργασίας Haber-Bosch, κατά την οποία άζωτο και υδρογόνο αντιδρούν υπό υψηλή πίεση και θερμοκρασία παρουσία καταλύτη. Εφόσον το χρησιμοποιούμενο υδρογόνο

παράγεται από ανανεώσιμες πηγές, προκύπτει το λεγόμενο “green ammonia”, το οποίο θεωρείται δυνητικά χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος (IRENA, 2022).

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της αμμωνίας είναι η ευκολότερη αποθήκευση και μεταφορά σε σύγκριση με το καθαρό υδρογόνο. Ενώ το υγρό υδρογόνο απαιτεί θερμοκρασίες περίπου -253°C για διατήρηση σε υγρή μορφή, η αμμωνία υγροποιείται σε πολύ ηπιότερες συνθήκες, είτε σε θερμοκρασία περίπου -33°C σε ατμοσφαιρική πίεση είτε σε μέτριες πιέσεις σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό μειώνει σημαντικά την πολυπλοκότητα και το ενεργειακό κόστος της αποθήκευσης, ενώ επιτρέπει την αξιοποίηση υφιστάμενης βιομηχανικής τεχνογνωσίας και υποδομών, δεδομένου ότι η αμμωνία χρησιμοποιείται ήδη εκτεταμένα στη χημική βιομηχανία και στη βιομηχανία λιπασμάτων (IEA, 2019).

Ιδιαίτερο πλεονέκτημα παρουσιάζει και η δυνατότητα χρήσης της αμμωνίας σε διεθνείς αλυσίδες μεταφοράς ενέργειας. Η ύπαρξη ήδη ανεπτυγμένων λιμενικών εγκαταστάσεων, δεξαμενών αποθήκευσης, πλοίων μεταφοράς και σχετικής τεχνογνωσίας δημιουργεί σημαντικό στρατηγικό πλεονέκτημα έναντι της ανάπτυξης πλήρως νέας υποδομής για το καθαρό υδρογόνο. Για τον λόγο αυτό, η αμμωνία θεωρείται σήμερα ένας από τους επικρατέστερους ενεργειακούς φορείς για διακρατικό εμπόριο υδρογόνου μεγάλης κλίμακας, ιδιαίτερα μεταξύ περιοχών με υψηλό δυναμικό παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας και περιοχών αυξημένης ζήτησης (IRENA, 2022).

Η αξιοποίηση της αμμωνίας μπορεί να ακολουθήσει δύο διαφορετικές στρατηγικές. Η πρώτη αφορά την άμεση χρήση της ως καυσίμου ή χημικής πρώτης ύλης, χωρίς προηγούμενη ανάκτηση του υδρογόνου. Η δεύτερη, η οποία είναι περισσότερο σχετική με τις ενεργειακές εφαρμογές υδρογόνου, αφορά την αποσύνθεση της αμμωνίας (ammonia cracking) ώστε να παραχθεί υδρογόνο στον τόπο τελικής χρήσης. Η αντίδραση αυτή πραγματοποιείται μέσω θερμικής αποσύνθεσης:



Η διαδικασία απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες, συνήθως της τάξης των $500\text{--}800^{\circ}\text{C}$, καθώς και καταλυτικά συστήματα για αποδεκτές αποδόσεις μετατροπής. Το στοιχείο αυτό αποτελεί έναν από τους βασικούς περιορισμούς της τεχνολογίας, καθώς επιβαρύνει σημαντικά τη συνολική ενεργειακή απόδοση του κύκλου (Valera-Medina et al., 2021).

Επιπλέον, η αμμωνία παρουσιάζει σοβαρές προκλήσεις ασφάλειας. Πρόκειται για τοξική, διαβρωτική και επικίνδυνη χημική ουσία, η οποία μπορεί να προκαλέσει σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον σε περίπτωση διαρροής. Επομένως, η χρήση της απαιτεί αυστηρές διαδικασίες ασφαλείας, εξειδικευμένο εξοπλισμό χειρισμού και κατάλληλα πρωτόκολλα λειτουργίας. Παρότι η βιομηχανία διαθέτει σημαντική εμπειρία στον χειρισμό της, η ευρύτερη ενεργειακή χρήση της σε αποκεντρωμένα συστήματα ή οικιακές εφαρμογές παραμένει ιδιαίτερα απαιτητική (DOE, 2023).

Ένα επιπλέον τεχνικό ζήτημα αφορά την καθαρότητα του παραγόμενου υδρογόνου μετά την αποσύνθεση. Σε εφαρμογές όπως οι κυψέλες καυσίμου PEM, ακόμη και πολύ μικρές συγκεντρώσεις υπολειμματικής αμμωνίας μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή υποβάθμιση της απόδοσης ή βλάβη στον εξοπλισμό. Αυτό σημαίνει ότι απαιτούνται πρόσθετα στάδια καθαρισμού, τα οποία αυξάνουν περαιτέρω την πολυπλοκότητα και το κόστος του συστήματος (IEA, 2019).

Παρά τους περιορισμούς αυτούς, η αμμωνία εμφανίζει ισχυρό στρατηγικό ενδιαφέρον για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπου το ζητούμενο δεν είναι μόνο η αποθήκευση αλλά και η οικονομικά βιώσιμη μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Η σημασία της ενισχύεται ιδιαίτερα στο πλαίσιο της δημιουργίας παγκόσμιων αγορών πράσινου υδρογόνου, όπου η μεταφορά του καθαρού αερίου είναι συχνά τεχνικά δυσκολότερη και οικονομικά ακριβότερη.

Συνολικά, η αποθήκευση υδρογόνου μέσω αμμωνίας δεν αποτελεί καθολική λύση για όλες τις εφαρμογές, αλλά μία ιδιαίτερα σημαντική στρατηγική επιλογή για ενεργειακά συστήματα μεγάλης κλίμακας και διεθνείς αλυσίδες εφοδιασμού. Το βασικό της πλεονέκτημα είναι η ευκολότερη διαχείριση και μεταφορά σε σχέση με το καθαρό υδρογόνο, ενώ οι βασικοί περιορισμοί σχετίζονται με την τοξικότητα, τις ενεργειακές απαιτήσεις αποσύνθεσης και την ανάγκη καθαρισμού του τελικού υδρογόνου.

3.5 Συγκριτική αξιολόγηση και τεχνολογική ετοιμότητα

Η αποθήκευση υδρογόνου αποτελεί έναν από τους πλέον καθοριστικούς παράγοντες για την ανάπτυξη της οικονομίας του υδρογόνου, καθώς επηρεάζει άμεσα τη δυνατότητα μεταφοράς, διανομής και τελικής αξιοποίησης του καυσίμου σε διαφορετικές εφαρμογές.

Παρότι έχουν αναπτυχθεί πολλαπλές τεχνολογικές προσεγγίσεις, καμία από αυτές δεν υπερτερεί απόλυτα σε όλες τις παραμέτρους. Η επιλογή κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται από το απαιτούμενο μέγεθος αποθήκευσης, τη χρονική διάρκεια, τις ενεργειακές απώλειες, τις απαιτήσεις ασφαλείας, καθώς και το οικονομικό πλαίσιο της εφαρμογής (IEA, 2023; DOE, 2023).

Η αποθήκευση σε συμπιεσμένη αέρια μορφή (compressed hydrogen, CH₂) αποτελεί σήμερα την πλέον ώριμη και εμπορικά διαθέσιμη λύση. Η τεχνολογία εφαρμόζεται ήδη εκτεταμένα τόσο σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις όσο και σε οχήματα κυψελών καυσίμου, κυρίως λόγω της τεχνολογικής της απλότητας, της σχετικά προβλέψιμης λειτουργίας και της δυνατότητας γρήγορου ανεφοδιασμού. Ωστόσο, το υψηλό κόστος προηγμένων δοχείων πίεσης, ιδίως εκείνων που χρησιμοποιούν σύνθετα υλικά υψηλής αντοχής, καθώς και η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου, εξακολουθούν να αποτελούν σημαντικούς περιορισμούς (Abe et al., 2019).

Η υγροποιημένη μορφή (LH₂) προσφέρει σαφώς καλύτερη ογκομετρική πυκνότητα και επομένως παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για εφαρμογές όπου ο διαθέσιμος χώρος είναι περιορισμένος ή όπου απαιτείται μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Παρ' όλα αυτά, η ενεργειακή επιβάρυνση της υγροποίησης παραμένει σημαντική, καθώς η διαδικασία απαιτεί εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Παράλληλα, οι απώλειες λόγω εξάτμισης (boil-off losses) περιορίζουν την αποδοτικότητα σε εφαρμογές μεγάλης χρονικής διάρκειας αποθήκευσης (IEA, 2019).

Η αποθήκευση μέσω μεταλλικών υδριδίων βρίσκεται σε χαμηλότερο επίπεδο τεχνολογικής ωρίμανσης, παρά το σημαντικό θεωρητικό ενδιαφέρον της. Η δυνατότητα υψηλής ογκομετρικής πυκνότητας και η λειτουργία σε σχετικά ήπιες πιέσεις αποτελούν ουσιαστικά πλεονεκτήματα, ιδιαίτερα από άποψη ασφάλειας. Ωστόσο, οι απαιτήσεις θερμικής διαχείρισης, το υψηλό βάρος των συστημάτων και το κόστος των υλικών καθιστούν τη χρήση τους προς το παρόν περισσότερο κατάλληλη για εξειδικευμένες εφαρμογές παρά για μαζική ενεργειακή αξιοποίηση (Schlapbach & Züttel, 2001; Züttel, 2003).

Η χρήση αμμωνίας ως φορέα υδρογόνου αποκτά αυξανόμενο στρατηγικό ενδιαφέρον, κυρίως για διεθνείς ενεργειακές αλυσίδες και εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Το βασικό πλεονέκτημα είναι ότι αξιοποιεί ώριμες υποδομές μεταφοράς και

αποθήκευσης, μειώνοντας τις τεχνικές δυσκολίες που συνοδεύουν τη διαχείριση καθαρού υδρογόνου. Παρ' όλα αυτά, οι ενεργειακές απαιτήσεις αποσύνθεσης, η ανάγκη υψηλής καθαρότητας του τελικού υδρογόνου και κυρίως οι κίνδυνοι λόγω τοξικότητας της αμμωνίας αποτελούν κρίσιμους περιορισμούς (Valera-Medina et al., 2021; IRENA, 2022).

Πέρα από τις παραπάνω τεχνολογίες, ιδιαίτερη σημασία αποκτούν και οι υποδομές μεγάλης κλίμακας, όπως η υπόγεια αποθήκευση σε αλατούχες κοιλότητες (salt caverns), η οποία θεωρείται ιδιαίτερα υποσχόμενη για εποχική αποθήκευση και εξισορρόπηση ενεργειακών συστημάτων υψηλής διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών. Η συγκεκριμένη τεχνολογία δεν εξετάζεται ως κύρια μέθοδος του παρόντος κεφαλαίου, καθώς αφορά κυρίως συστημική ενεργειακή υποδομή, ωστόσο αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην ευρωπαϊκή στρατηγική ανάπτυξης υδρογόνου (IEA, 2023).

Η σημερινή εικόνα δείχνει ότι οι τεχνολογίες αποθήκευσης βρίσκονται σε διαφορετικά επίπεδα ωριμότητας. Ορισμένες, όπως η συμπίεση και η υγροποίηση, έχουν ήδη περάσει σε εμπορική εφαρμογή, ενώ άλλες παραμένουν σε πιλοτικό ή ερευνητικό στάδιο. Συνεπώς, η επιλογή τεχνολογίας δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στη θεωρητική αποθηκευτική ικανότητα, αλλά πρέπει να αξιολογείται με βάση το συνολικό ενεργειακό, οικονομικό και λειτουργικό ισοζύγιο.

Η συγκριτική αποτύπωση των βασικών χαρακτηριστικών των τεχνολογιών παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 2. Συγκριτική αξιολόγηση βασικών τεχνολογιών αποθήκευσης υδρογόνου.

Πηγή: Προσαρμογή από IEA (2023), IRENA (2022) και Ball & Weeda (2015).

Τεχνολογία	Βασική αρχή	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί	Τεχνολογική ωριμότητα
Συμπιεσμένο υδρογόνο (CH₂)	Αποθήκευση σε υψηλή πίεση	Ωριμη τεχνολογία, γρήγορος ανεφοδιασμός, εμπορική εφαρμογή	Υψηλές πιέσεις, αυξημένες απαιτήσεις ασφάλειας, χαμηλή ογκομετρική πυκνότητα	Υψηλή
Υγροποιημένο υδρογόνο (LH₂)	Κρυογενική αποθήκευση	Υψηλή ογκομετρική πυκνότητα, κατάλληλο για μεγάλες ποσότητες	Υψηλό ενεργειακό κόστος, boil-off losses, πολύπλοκη υποδομή	Υψηλή–μέση
Cryo-compressed	Συνδυασμός ψύξης και πίεσης	Μεγαλύτερη πυκνότητα αποθήκευσης, μειωμένες απώλειες	Υψηλή πολυπλοκότητα, αυξημένο κόστος, περιορισμένη εφαρμογή	Μέση
Μεταλλικά υδρίδια	Χημική απορρόφηση σε στερεό μέσο	Αυξημένη ασφάλεια, υψηλή ογκομετρική πυκνότητα	Μεγάλη μάζα, θερμική διαχείριση, υψηλό κόστος	Χαμηλή–μέση
Αμμωνία (NH₃)	Χημικός φορέας υδρογόνου	Υφιστάμενη υποδομή, εύκολη μεταφορά, στρατηγική χρήση	Τοξικότητα, cracking, ενεργειακές απώλειες	Μέση–υψηλή

Συνολικά, προκύπτει ότι η αποθήκευση υδρογόνου δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται ως ένα ενιαίο τεχνικό πρόβλημα με μία καθολική λύση, αλλά ως πεδίο τεχνολογικών επιλογών με διαφορετικό βαθμό καταλληλότητας ανά περίπτωση χρήσης. Οι μελλοντικές εξελίξεις στην επιστήμη υλικών, στη θερμική διαχείριση, στους χημικούς φορείς και στις ενεργειακές υποδομές αναμένεται να επηρεάσουν καθοριστικά την τελική θέση κάθε τεχνολογίας στο ενεργειακό σύστημα.

Κεφάλαιο 4: Μεταφορά υδρογόνου και ενεργειακές υποδομές

4.1 Μεταφορά υδρογόνου μέσω αγωγών

Η μεταφορά υδρογόνου αποτελεί έναν από τους πλέον κρίσιμους κρίκους στην αλυσίδα αξίας του, καθώς από αυτήν εξαρτάται η δυνατότητα αξιοποίησής του σε βιομηχανικές, ενεργειακές και τελικές καταναλωτικές εφαρμογές. Για μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων σε μεσαίες και μεγάλες αποστάσεις, οι αγωγοί υψηλής πίεσης θεωρούνται η πλέον τεχνικά αποδοτική και οικονομικά βιώσιμη λύση, ιδιαίτερα όταν συγκρίνονται με εναλλακτικές επιλογές όπως η οδική μεταφορά συμπιεσμένου υδρογόνου ή η μεταφορά υγροποιημένου υδρογόνου με ειδικά κρυογενικά μέσα (IEA, 2023; European Hydrogen Backbone, 2023).

Η χρήση αγωγών για μεταφορά υδρογόνου δεν αποτελεί νέα τεχνολογία. Βιομηχανικά δίκτυα μεταφοράς υδρογόνου λειτουργούν εδώ και δεκαετίες σε χώρες όπως η Γερμανία, οι Ηνωμένες Πολιτείες και το Βέλγιο, κυρίως για την εξυπηρέτηση χημικών και διυλιστηριακών εφαρμογών. Ωστόσο, η σύγχρονη ενεργειακή μετάβαση μεταβάλλει σημαντικά την κλίμακα και τον ρόλο αυτών των υποδομών, καθώς πλέον εξετάζεται η ανάπτυξη εκτεταμένων δικτύων μεταφοράς υδρογόνου που θα λειτουργούν ως ενεργειακοί διάδρομοι μεγάλης κλίμακας, ανάλογοι των σημερινών δικτύων φυσικού αερίου (Melaina et al., 2013).

Η βασική αρχή λειτουργίας ενός αγωγού υδρογόνου είναι παρόμοια με εκείνη των αγωγών φυσικού αερίου: η μεταφορά πραγματοποιείται μέσω διαφοράς πίεσης, με χρήση συμπιεστών που διατηρούν την απαιτούμενη παροχή και εξασφαλίζουν τη συνεχή ροή του αερίου. Παρά τη λειτουργική αυτή ομοιότητα, το υδρογόνο παρουσιάζει φυσικοχημικές ιδιότητες που διαφοροποιούν ουσιαστικά τον σχεδιασμό και τη λειτουργία του δικτύου.

Το υδρογόνο διαθέτει σημαντικά χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου σε σχέση με το φυσικό αέριο. Αυτό σημαίνει ότι, για τη μεταφορά της ίδιας ενεργειακής ποσότητας, απαιτείται σημαντικά μεγαλύτερος όγκος αερίου ή υψηλότερες παροχές. Παράλληλα, λόγω του μικρού μοριακού μεγέθους, παρουσιάζει υψηλότερη διαπερατότητα μέσω υλικών στεγανοποίησης και μεγαλύτερη τάση διαρροής από συνδέσεις, βαλβίδες και αρμούς. Επιπλέον, η χαμηλή πυκνότητά του επηρεάζει τη ρευστομηχανική συμπεριφορά της ροής και τις απαιτήσεις συμπίεσης, γεγονός που αυξάνει τις ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος (ASME, 2020; IEA, 2023).

Ένας ακόμη κρίσιμος παράγοντας είναι η αλληλεπίδραση του υδρογόνου με τα υλικά των αγωγών. Η παρουσία υδρογόνου μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα υδρογονοθραυστικότητας (hydrogen embrittlement), ιδιαίτερα σε χάλυβες υψηλής αντοχής, οδηγώντας σε μείωση της ολκιμότητας, ανάπτυξη μικρορωγμών και επιτάχυνση φαινομένων κόπωσης. Για τον λόγο αυτό, η επιλογή κατάλληλων υλικών, η ποιότητα συγκολλήσεων και ο έλεγχος των μηχανικών καταπονήσεων αποτελούν βασικές παραμέτρους του σχεδιασμού (San Marchi et al., 2020).

Παρά τις τεχνικές αυτές προκλήσεις, η αξιοποίηση υφιστάμενων δικτύων φυσικού αερίου για μεταφορά υδρογόνου ή μιγμάτων υδρογόνου–φυσικού αερίου θεωρείται στρατηγικά ιδιαίτερα σημαντική, καθώς μπορεί να μειώσει σημαντικά το απαιτούμενο επενδυτικό κόστος σε σύγκριση με την πλήρη ανάπτυξη νέων αποκλειστικών υποδομών. Η ευρωπαϊκή στρατηγική για το υδρογόνο βασίζεται σε μεγάλο βαθμό ακριβώς σε αυτή τη λογική, μέσω της σταδιακής δημιουργίας του European Hydrogen Backbone, ενός πανευρωπαϊκού δικτύου που θα συνδυάζει νέους αγωγούς και επαναχρησιμοποίηση υφιστάμενων υποδομών φυσικού αερίου (European Hydrogen Backbone, 2023).

Στην ελληνική περίπτωση, το ενδιαφέρον για ανάπτυξη hydrogen-ready ενεργειακών υποδομών είναι αυξανόμενο, ιδιαίτερα στο πλαίσιο του ενεργειακού μετασχηματισμού περιοχών όπως η Δυτική Μακεδονία. Η προοπτική μεταφοράς υδρογόνου μέσω νέων ή προσαρμοσμένων αγωγών συνδέεται τόσο με τη μελλοντική παραγωγή πράσινου υδρογόνου όσο και με τη δυνατότητα ενσωμάτωσής του στις εθνικές και διασυνοριακές ενεργειακές υποδομές. Το στοιχείο αυτό καθιστά τη μελέτη των αγωγών μεταφοράς όχι μόνο τεχνικό αλλά και στρατηγικό ζήτημα ενεργειακού σχεδιασμού.

Συνολικά, οι αγωγοί αποτελούν σήμερα τη βασικότερη υποδομή για τη μεταφορά υδρογόνου μεγάλης κλίμακας. Ωστόσο, η επιτυχής εφαρμογή τους προϋποθέτει προσαρμογή των τεχνικών προδιαγραφών, κατάλληλη επιλογή υλικών, προηγμένα συστήματα παρακολούθησης και σαφές κανονιστικό πλαίσιο, ώστε να διασφαλιστεί ασφαλής και αξιόπιστη λειτουργία.

4.2 Hydrogen-ready αγωγοί υψηλής πίεσης

Η έννοια των αγωγών hydrogen-ready αναφέρεται σε υποδομές μεταφοράς που έχουν σχεδιαστεί είτε για άμεση χρήση με υδρογόνο είτε για μελλοντική μετατροπή από φυσικό αέριο σε υδρογόνο με περιορισμένες τεχνικές παρεμβάσεις. Η προσέγγιση αυτή αποτελεί βασικό στοιχείο της ευρωπαϊκής ενεργειακής στρατηγικής, καθώς επιτρέπει τη σταδιακή μετάβαση προς την οικονομία του υδρογόνου χωρίς την ανάγκη πλήρους αντικατάστασης του υφιστάμενου δικτύου μεταφοράς (European Hydrogen Backbone, 2023).

Η επιλογή της στρατηγικής hydrogen-ready βασίζεται κυρίως σε τεchnοοικονομικά κριτήρια. Η ανάπτυξη αποκλειστικά νέων αγωγών μεταφοράς 100% υδρογόνου συνεπάγεται ιδιαίτερα υψηλό επενδυτικό κόστος, χρονοβόρες διαδικασίες αδειοδότησης και σημαντικές απαιτήσεις σε πρώτες ύλες και τεχνικούς πόρους. Αντίθετα, η αξιοποίηση υφιστάμενων ή νέων αγωγών σχεδιασμένων εξ αρχής με προδιαγραφές συμβατότητας υδρογόνου μπορεί να επιταχύνει σημαντικά τη μετάβαση και να μειώσει το συνολικό κόστος ανάπτυξης του δικτύου (IEA, 2023).

Ωστόσο, ο χαρακτηρισμός ενός αγωγού ως hydrogen-ready δεν αποτελεί απλή τεχνική δήλωση συμβατότητας. Απαιτείται συστηματική αξιολόγηση ενός ευρέος συνόλου παραμέτρων, που περιλαμβάνουν τη μηχανική συμπεριφορά των υλικών, τις συνθήκες πίεσης, την ποιότητα των συγκολλήσεων, τη συμβατότητα βοηθητικού εξοπλισμού και τα συστήματα παρακολούθησης.

Ο σχεδιασμός τέτοιων υποδομών βασίζεται σε διεθνή πρότυπα και τεχνικά πλαίσια. Μεταξύ των σημαντικότερων συγκαταλέγονται το πρότυπο ASME B31.12, που αφορά ειδικά συστήματα σωληνώσεων και αγωγών υδρογόνου, το EN 1594, το οποίο καλύπτει αγωγούς φυσικού αερίου υψηλής πίεσης, καθώς και το ISO 3183, που καθορίζει τις απαιτήσεις για χαλύβδινους σωλήνες μεταφοράς (ASME, 2020; ISO, 2019).

Η μεγαλύτερη τεχνική πρόκληση αφορά τη συμβατότητα των μεταλλικών υλικών με το υδρογόνο. Σε αντίθεση με το φυσικό αέριο, το υδρογόνο μπορεί να διεισδύσει στο μικροδομικό πλέγμα μεταλλικών υλικών, οδηγώντας σε φαινόμενα υδρογονοθραυστικότητας (hydrogen embrittlement). Το φαινόμενο αυτό προκαλεί σταδιακή υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων, όπως μείωση της ολκιμότητας, αύξηση της ψαθυρότητας και επιτάχυνση της ανάπτυξης ρωγμών λόγω κυκλικής φόρτισης (San Marchi et al., 2020).

Η ευαισθησία αυτή είναι ιδιαίτερα αυξημένη σε χάλυβες υψηλής αντοχής, γεγονός που σημαίνει ότι δεν είναι όλοι οι αγωγοί φυσικού αερίου κατάλληλοι για άμεση μεταφορά καθαρού υδρογόνου. Αντίθετα, χάλυβες χαμηλότερης αντοχής ή ειδικά επιλεγμένα υλικά εμφανίζουν συχνά καλύτερη συμπεριφορά. Η καταλληλότητα εξαρτάται όχι μόνο από το βασικό υλικό αλλά και από τη θερμική ιστορία του σωλήνα, τις συγκολλήσεις, την ύπαρξη εσωτερικών ατελειών και τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Πέρα από το ίδιο το σωληνωτό σώμα, εξίσου σημαντική είναι η αξιολόγηση του βοηθητικού εξοπλισμού. Βαλβίδες, στεγανοποιητικά, φλάντζες, μετρητές, ρυθμιστές πίεσης και συμπιεστές ενδέχεται να παρουσιάσουν διαφορετική συμπεριφορά με υδρογόνο λόγω της αυξημένης διαπερατότητας και των διαφορετικών θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του αερίου. Συνεπώς, ένας αγωγός μπορεί να είναι δομικά κατάλληλος, αλλά λειτουργικά ανεπαρκής χωρίς συνολική προσαρμογή του συστήματος (Melaina et al., 2013).

Στην πράξη, πολλοί hydrogen-ready αγωγοί σχεδιάζονται ώστε να υποστηρίζουν αρχικά μεταφορά μιγμάτων υδρογόνου–φυσικού αερίου (hydrogen blending), συνήθως έως ποσοστά περίπου 10–20% κατ' όγκο. Η επιλογή αυτή επιτρέπει σταδιακή ένταξη του υδρογόνου στο σύστημα, περιορίζοντας τους τεχνικούς κινδύνους και προσφέροντας επιχειρησιακή εμπειρία πριν από ενδεχόμενη πλήρη μετάβαση σε καθαρό υδρογόνο (NREL, 2013).

Επιπλέον, οι αγωγοί υψηλής πίεσης απαιτούν ενισχυμένα συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου. Η χρήση SCADA, συστημάτων ανίχνευσης διαρροών, τηλεμετρίας και μη καταστροφικών επιθεωρήσεων αποκτά ιδιαίτερη σημασία, καθώς η

ταχύτερη διάχυση του υδρογόνου και η μικρότερη ενεργειακή ανάφλεξη αυξάνουν τις απαιτήσεις ασφαλείας.

Σε στρατηγικό επίπεδο, η ανάπτυξη hydrogen-ready αγωγών θεωρείται σήμερα μεταβατική αλλά αναγκαία λύση. Δεν αποτελεί απαραίτητα την τελική μορφή του ενεργειακού δικτύου υδρογόνου, αλλά λειτουργεί ως ενδιάμεσο στάδιο που επιτρέπει τη σταδιακή ανάπτυξη της αγοράς, τη μείωση επενδυτικού κινδύνου και τη δημιουργία τεχνικής εμπειρίας.

Συνολικά, ένας hydrogen-ready αγωγός δεν πρέπει να θεωρείται απλώς ένας συμβατικός αγωγός φυσικού αερίου με μικρές τροποποιήσεις, αλλά μια υποδομή που σχεδιάζεται με διαφορετικές τεχνικές απαιτήσεις, αυστηρότερα κριτήρια υλικών και αυξημένη έμφαση στην επιχειρησιακή ασφάλεια.

4.3 Αξιολόγηση σχεδιασμού και λειτουργίας δικτύου

Η αξιολόγηση ενός δικτύου μεταφοράς υδρογόνου δεν περιορίζεται στην επιλογή σωλήνων και υλικών, αλλά αποτελεί μια πολυπαραγοντική διαδικασία που περιλαμβάνει τεχνικό σχεδιασμό, επιχειρησιακή αξιοπιστία, ασφάλεια, περιβαλλοντικές παραμέτρους και οικονομική βιωσιμότητα. Σε αντίθεση με τα συμβατικά δίκτυα φυσικού αερίου, όπου η τεχνολογία θεωρείται ώριμη και εκτεταμένα δοκιμασμένη, τα δίκτυα υδρογόνου απαιτούν επιπλέον αξιολόγηση λόγω των διαφορετικών φυσικοχημικών ιδιοτήτων του καυσίμου και των αυξημένων απαιτήσεων ασφαλείας (IEA, 2023).

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες σχεδιασμού είναι η επιλογή της όδευσης του αγωγού. Η διαδικασία αυτή βασίζεται σε συνδυασμό τεχνικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικοοικονομικών κριτηρίων. Από τεχνικής πλευράς, εξετάζονται γεωτεχνικές συνθήκες, σεισμικότητα, μορφολογία εδάφους και σταθερότητα πρανών, καθώς οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν τόσο την κατασκευή όσο και τη μακροχρόνια ακεραιότητα του δικτύου. Σε περιοχές υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας, όπως η Ελλάδα, η αξιολόγηση αυτή αποκτά ακόμη μεγαλύτερη σημασία, καθώς οι μηχανικές καταπονήσεις μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχίες ή επιτάχυνση φαινομένων κόπωσης (ASME, 2020).

Παράλληλα, η περιβαλλοντική αξιολόγηση αποτελεί βασικό τμήμα του σχεδιασμού. Η διέλευση αγωγών μπορεί να επηρεάσει οικοσυστήματα, υδάτινους πόρους, γεωργικές εκτάσεις και περιοχές ανθρώπινης δραστηριότητας. Για τον λόγο αυτό, τα μεγάλα έργα

συνοδεύονται από Μελέτες Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων, οι οποίες εξετάζουν τόσο τη φάση κατασκευής όσο και τη λειτουργική περίοδο του έργου. Η περιβαλλοντική διάσταση δεν σχετίζεται μόνο με τη συμμόρφωση με τη νομοθεσία, αλλά και με τη συνολική κοινωνική αποδοχή του έργου.

Ιδιαίτερη σημασία έχει επίσης η έννοια του *Right of Way (ROW)*, δηλαδή της ζώνης διέλευσης του αγωγού. Η ζώνη αυτή καθορίζει τον φυσικό χώρο μέσα στον οποίο επιτρέπεται η εγκατάσταση, η επιθεώρηση και η συντήρηση του συστήματος, ενώ παράλληλα περιορίζει άλλες δραστηριότητες που θα μπορούσαν να δημιουργήσουν κίνδυνο για την υποδομή. Η σωστή διαχείριση του ROW επηρεάζει άμεσα τόσο την ασφάλεια όσο και τη δυνατότητα μακροχρόνιας λειτουργίας του δικτύου.

Από λειτουργικής πλευράς, ένα σύγχρονο δίκτυο μεταφοράς υδρογόνου απαιτεί υποστηρικτικές υποδομές πέρα από τον ίδιο τον αγωγό. Αυτές περιλαμβάνουν σταθμούς συμπίεσης, βαλβίδες απομόνωσης, σταθμούς καθαρισμού (*pigging stations*), μονάδες μέτρησης παροχής και ποιότητας αερίου, καθώς και συστήματα τηλεμετρίας και απομακρυσμένου ελέγχου. Η ολοκλήρωση αυτών των υποσυστημάτων καθορίζει την επιχειρησιακή αξιοπιστία του δικτύου και την ικανότητά του να ανταποκρίνεται σε δυναμικές μεταβολές φορτίου ή έκτακτα περιστατικά (European Hydrogen Backbone, 2023).

Η λειτουργία του δικτύου υποστηρίζεται πλέον σε μεγάλο βαθμό από συστήματα **SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)**, τα οποία επιτρέπουν συνεχή παρακολούθηση κρίσιμων παραμέτρων, όπως πίεση, παροχή, θερμοκρασία και κατάσταση βαλβίδων. Στην περίπτωση υδρογόνου, η ανάγκη για συνεχή επιτήρηση είναι ακόμη μεγαλύτερη λόγω της αυξημένης διαπερατότητας του αερίου και της ταχύτερης διάδοσης πιθανών διαρροών. Η ενσωμάτωση SCADA συμβάλλει σημαντικά στη μείωση λειτουργικού κινδύνου και στη βελτίωση της επιχειρησιακής απόκρισης.

Επιπλέον, η τεχνική αξιολόγηση πρέπει να περιλαμβάνει μηχανισμούς ελέγχου της δομικής ακεραιότητας του αγωγού. Οι σύγχρονες πρακτικές βασίζονται στη χρήση μη καταστροφικών ελέγχων (*Non-Destructive Testing – NDT*) και επιθεωρήσεων μέσω έξυπνων συσκευών επιθεώρησης (*intelligent pigs*), οι οποίες μπορούν να ανιχνεύσουν διάβρωση, τοπικές απώλειες πάχους, μηχανικές παραμορφώσεις και μικρορωγμές πριν αυτές εξελιχθούν σε κρίσιμες αστοχίες (API, 2021).

Ένας επιπλέον παράγοντας που πρέπει να αξιολογείται είναι η ενεργειακή απόδοση της μεταφοράς. Το υδρογόνο, λόγω της χαμηλής πυκνότητάς του, απαιτεί υψηλότερο έργο συμπίεσης σε σχέση με το φυσικό αέριο για τη μεταφορά ισοδύναμης ενεργειακής ποσότητας. Αυτό σημαίνει ότι η ενεργειακή κατανάλωση των συμπιεστών μπορεί να αποτελέσει σημαντικό τμήμα του λειτουργικού κόστους του συστήματος, επηρεάζοντας τη συνολική οικονομική βιωσιμότητα της υποδομής (IEA, 2023).

Σε στρατηγικό επίπεδο, η αξιολόγηση ενός δικτύου δεν πρέπει να περιορίζεται μόνο στην τεχνική λειτουργικότητα, αλλά και στη δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης και διασύνδεσης. Η αξία ενός αγωγού υδρογόνου αυξάνεται σημαντικά όταν μπορεί να ενταχθεί σε μεγαλύτερο περιφερειακό ή διασυνοριακό σύστημα μεταφοράς, επιτρέποντας μεγαλύτερη ευελιξία, διαφοροποίηση πηγών τροφοδοσίας και ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας.

Συνολικά, ο σχεδιασμός και η λειτουργία δικτύων μεταφοράς υδρογόνου απαιτούν μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που συνδυάζει μηχανολογικό σχεδιασμό, διαχείριση κινδύνου, ψηφιακή παρακολούθηση και στρατηγικό ενεργειακό σχεδιασμό. Η επιτυχής ανάπτυξη τέτοιων υποδομών εξαρτάται όχι μόνο από τη σωστή τεχνική επιλογή, αλλά και από τη δυνατότητα αξιοπιστίας, ασφαλούς και οικονομικά βιώσιμης μακροχρόνιας λειτουργίας.

4.4 Ασφάλεια και τεχνικές προδιαγραφές

Η ασφάλεια αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα στον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία δικτύων μεταφοράς υδρογόνου. Παρότι η τεχνολογία μεταφοράς αερίων μέσω αγωγών είναι ώριμη, οι ιδιαιτερότητες του υδρογόνου επιβάλλουν αυστηρότερες απαιτήσεις σχεδιασμού και λειτουργικού ελέγχου. Το μικρό μοριακό μέγεθος, η υψηλή διαπερατότητα, η χαμηλή απαιτούμενη ενέργεια ανάφλεξης και το ευρύ εύρος ευφλεκτότητας καθιστούν το υδρογόνο καύσιμο που απαιτεί διαφορετική φιλοσοφία διαχείρισης κινδύνου σε σχέση με το φυσικό αέριο (IEA, 2023; ASME, 2020).

Η τεχνική ασφάλεια ενός αγωγού υδρογόνου ξεκινά ήδη από το στάδιο του σχεδιασμού. Η επιλογή υλικών, οι επιτρεπόμενες τάσεις λειτουργίας, η ποιότητα συγκολλήσεων και η διαστασιολόγηση του συστήματος καθορίζονται βάσει διεθνών προτύπων και κανονισμών. Μεταξύ των σημαντικότερων τεχνικών πλαισίων

συγκαταλέγονται το **ASME B31.12** για σωληνώσεις και αγωγούς υδρογόνου, το **EN 1594** για δίκτυα υψηλής πίεσης και τα πρότυπα της σειράς **API** για επιθεώρηση, ακεραιότητα και λειτουργική ασφάλεια αγωγών (ASME, 2020; API, 2021).

Ιδιαίτερη σημασία έχει η εφαρμογή συστηματικών μεθοδολογιών ανάλυσης κινδύνου. Στη βιομηχανική πρακτική χρησιμοποιούνται εργαλεία όπως η **HAZOP (Hazard and Operability Study)**, η **Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)** και οι ποσοτικές αναλύσεις κινδύνου (**Quantitative Risk Assessment – QRA**), οι οποίες επιτρέπουν την αναγνώριση πιθανών σεναρίων αστοχίας, την αξιολόγηση των συνεπειών τους και τον καθορισμό κατάλληλων μέτρων προστασίας. Στα συστήματα υδρογόνου η χρήση τέτοιων εργαλείων είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, καθώς ακόμη και μικρές διαρροές μπορούν να οδηγήσουν σε επικίνδυνα εύφλεκτα μίγματα υπό συγκεκριμένες συνθήκες (ISO, 2018).

Ένα από τα βασικά τεχνικά μέτρα προστασίας είναι η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας του αγωγού. Η συνεχής έκθεση μεταλλικών στοιχείων σε υδρογόνο μπορεί να οδηγήσει σε μηχανική υποβάθμιση, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με κυκλικές φορτίσεις πίεσης. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζονται προγράμματα επιθεώρησης με μη καταστροφικές μεθόδους (*Non-Destructive Testing – NDT*), όπως υπερηχητικοί έλεγχοι, μαγνητικός έλεγχος και *in-line inspection* μέσω *intelligent pigs*, που επιτρέπουν τον εντοπισμό ρωγμών, διάβρωσης και τοπικών ατελειών πριν εξελιχθούν σε κρίσιμες αστοχίες (API, 2021).

Παράλληλα, η προστασία από εξωτερική διάβρωση παραμένει κρίσιμο στοιχείο, ιδίως για υπόγειους αγωγούς. Για τον σκοπό αυτό εφαρμόζονται συστήματα **καθοδικής προστασίας (cathodic protection)** σε συνδυασμό με εξωτερικές αντιδιαβρωτικές επιστρώσεις. Αν και η υδρογονοθραυστικότητα αποτελεί ξεχωριστό μηχανισμό από την κλασική διάβρωση, η γενική υποβάθμιση της μεταλλικής ακεραιότητας μπορεί να ενισχύσει τη συνολική ευαισθησία του συστήματος.

Η λειτουργική ασφάλεια ενισχύεται μέσω συστημάτων αυτοματοποιημένης παρακολούθησης και απομακρυσμένου ελέγχου. Τα συστήματα **SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)** επιτρέπουν συνεχή επιτήρηση πίεσης, ροής, θερμοκρασίας και κατάστασης κρίσιμων εξαρτημάτων, παρέχοντας τη δυνατότητα ταχείας παρέμβασης σε περίπτωση ανωμαλίας. Η ύπαρξη αυτόματων βαλβίδων

απομόνωσης είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επιτρέπει τον γρήγορο περιορισμό μιας πιθανής διαρροής και τη μείωση των συνεπειών ενός συμβάντος.

Η ανίχνευση διαρροών αποτελεί επίσης κρίσιμο στοιχείο της αρχιτεκτονικής ασφάλειας. Το υδρογόνο, λόγω της υψηλής ταχύτητας διάχυσής του και της σχεδόν αόρατης φλόγας του, μπορεί να καταστήσει δυσκολότερη την άμεση αναγνώριση περιστατικών χωρίς κατάλληλα τεχνικά μέσα. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται εξειδικευμένα συστήματα ανίχνευσης, τα οποία βασίζονται σε αισθητήρες διαφορετικών τεχνολογιών, όπως καταλυτικοί, ηλεκτροχημικοί, ημιαγωγοί και οπτικοί αισθητήρες. Η επιλογή εξαρτάται από την απαιτούμενη ευαισθησία, τον χρόνο απόκρισης και τις περιβαλλοντικές συνθήκες λειτουργίας (Chakraborty et al., 2023). Η εκτενέστερη τεχνολογική ανάλυση των αισθητήρων παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6, στο πλαίσιο των έξυπνων συστημάτων παρακολούθησης υποδομών.

Εξίσου σημαντική είναι η επιχειρησιακή ετοιμότητα για αντιμετώπιση εκτάκτων περιστατικών. Η ύπαρξη σχεδίων απόκρισης, εκπαιδευμένου προσωπικού, σαφών διαδικασιών απομόνωσης τμημάτων δικτύου και συνεργασίας με υπηρεσίες πολιτικής προστασίας αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της συνολικής στρατηγικής ασφάλειας. Η ασφαλής λειτουργία ενός συστήματος υδρογόνου δεν εξαρτάται μόνο από τον εξοπλισμό, αλλά και από την οργανωτική επάρκεια του φορέα διαχείρισης.

Συνολικά, η ασφάλεια στα δίκτυα μεταφοράς υδρογόνου δεν αποτελεί πρόσθετο χαρακτηριστικό αλλά βασική παράμετρο σχεδιασμού. Η επιτυχής ανάπτυξη τέτοιων υποδομών προϋποθέτει συνδυασμό κατάλληλων τεχνικών προδιαγραφών, προληπτικής συντήρησης, ψηφιακής επιτήρησης και ολοκληρωμένης διαχείρισης κινδύνου, ώστε να διασφαλίζεται επίπεδο λειτουργικής αξιοπιστίας αντίστοιχο ή και υψηλότερο από εκείνο των υφιστάμενων ενεργειακών υποδομών.

Κεφάλαιο 5: Ανάλυση έργων και υποδομών υδρογόνου στην Ελλάδα και την Ευρώπη

5.1 Ευρωπαϊκό πλαίσιο ανάπτυξης υποδομών υδρογόνου

Η ανάπτυξη του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα στην Ευρώπη δεν περιορίζεται στην τεχνολογική πρόοδο της παραγωγής του, αλλά προϋποθέτει τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος υποδομών που να υποστηρίζει την αποθήκευση, τη μεταφορά, τη διανομή και την τελική αξιοποίησή του. Η ανάγκη αυτή έχει αναδειχθεί ιδιαίτερα έντονα στο πλαίσιο της ευρωπαϊκής ενεργειακής μετάβασης, καθώς η απανθρακοποίηση τομέων όπως η βαριά βιομηχανία, οι μεταφορές μεγάλων αποστάσεων και η εποχική αποθήκευση ενέργειας απαιτεί ενεργειακούς φορείς πέραν της άμεσης ηλεκτροποίησης (European Commission, 2020; IEA, 2023).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει ήδη αναγνωρίσει το υδρογόνο ως στρατηγικό στοιχείο του μελλοντικού ενεργειακού συστήματος μέσω της European Hydrogen Strategy, η οποία δημοσιεύθηκε το 2020 και θέτει ως στόχο τη σταδιακή ανάπτυξη μιας ανταγωνιστικής αγοράς ανανεώσιμου υδρογόνου. Η στρατηγική αυτή προβλέπει αρχικά πιλοτικές εφαρμογές και έργα επίδειξης, ακολουθούμενα από σταδιακή κλιμάκωση σε βιομηχανικό επίπεδο και τελικά τη διαμόρφωση διασυνοριακού δικτύου μεταφοράς και αποθήκευσης (European Commission, 2020).

Η σημασία του υδρογόνου ενισχύθηκε περαιτέρω μετά την ενεργειακή κρίση και τη γεωπολιτική αβεβαιότητα που ακολούθησε το 2022, όταν το σχέδιο REPowerEU έθεσε ακόμη πιο φιλόδοξους στόχους για την επιτάχυνση της παραγωγής και χρήσης ανανεώσιμου υδρογόνου εντός της Ευρώπης. Στο πλαίσιο αυτό, το υδρογόνο αντιμετωπίζεται όχι μόνο ως εργαλείο απανθρακοποίησης αλλά και ως μέσο ενίσχυσης της ενεργειακής ασφάλειας, μέσω της μείωσης της εξάρτησης από εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα (European Commission, 2022).

Κρίσιμο στοιχείο της στρατηγικής αυτής είναι η ανάπτυξη κατάλληλων υποδομών μεταφοράς. Η πρωτοβουλία European Hydrogen Backbone (EHB) προτείνει τη σταδιακή δημιουργία ενός πανευρωπαϊκού δικτύου μεταφοράς υδρογόνου, αξιοποιώντας σε μεγάλο βαθμό υφιστάμενους αγωγούς φυσικού αερίου που μπορούν να μετατραπούν σε hydrogen-ready ή dedicated hydrogen pipelines. Σύμφωνα με τα διαθέσιμα σενάρια, το μελλοντικό αυτό δίκτυο αναμένεται να διασυνδέσει κύριες περιοχές παραγωγής,

βιομηχανικούς καταναλωτές και διασυνοριακά ενεργειακά hubs, μειώνοντας το κόστος μεταφοράς και ενισχύοντας τη λειτουργία μιας ενιαίας αγοράς υδρογόνου (European Hydrogen Backbone, 2023).

Παράλληλα με τις υποδομές μεταφοράς, ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται και στην αποθήκευση. Η μεταβλητότητα της παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη λύσεων μεγάλης κλίμακας που να επιτρέπουν την εξισορρόπηση του ενεργειακού συστήματος σε ημερήσιο αλλά και εποχικό επίπεδο. Για τον λόγο αυτό, αναπτύσσονται έργα υπόγειας αποθήκευσης σε αλατούχα κοιλάματα, δεξαμενές υψηλής πίεσης και ολοκληρωμένα περιφερειακά hydrogen valleys, όπου το υδρογόνο λειτουργεί ως στοιχείο ενός ευρύτερου ενεργειακού οικοσυστήματος (IEA, 2023; Clean Hydrogen Partnership, 2024).

Η ανάπτυξη των hydrogen valleys αποτελεί επίσης βασικό άξονα της ευρωπαϊκής πολιτικής. Πρόκειται για περιφερειακά οικοσυστήματα όπου συνδυάζονται παραγωγή, αποθήκευση, μεταφορά και τελική χρήση υδρογόνου, με στόχο την επιτάχυνση της εμπορικής ωρίμανσης της τεχνολογίας. Τα έργα αυτά επιτρέπουν την αξιολόγηση όχι μόνο της τεχνικής λειτουργίας, αλλά και της οικονομικής βιωσιμότητας, της κοινωνικής αποδοχής και της διαλειτουργικότητας διαφορετικών τεχνολογικών λύσεων σε πραγματικές συνθήκες.

Συνολικά, το ευρωπαϊκό πλαίσιο δείχνει ότι η μετάβαση στην οικονομία του υδρογόνου δεν βασίζεται σε μία μεμονωμένη τεχνολογία ή εφαρμογή, αλλά σε ένα πολυεπίπεδο δίκτυο υποδομών, θεσμικών παρεμβάσεων και πιλοτικών έργων. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η Ελλάδα επιχειρεί να τοποθετηθεί μέσω έργων όπως το North-1 και το CRAVE-H2, τα οποία εξετάζονται στις επόμενες ενότητες ως ενδεικτικές περιπτώσεις εφαρμογής.

5.2 Το έργο North Project 1 στη Δυτική Μακεδονία

Το έργο **North Project1** αποτελεί μία από τις σημαντικότερες ελληνικές πρωτοβουλίες στον τομέα του πράσινου υδρογόνου και εντάσσεται στο ευρύτερο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης της Δυτικής Μακεδονίας μετά την απολιγνιτοποίηση. Σε αντίθεση με έργα που επικεντρώνονται αποκλειστικά στη μεταφορά ή αποθήκευση, το North-1 προσεγγίζει το υδρογόνο ως μέρος ενός ολοκληρωμένου περιφερειακού

ενεργειακού οικοσυστήματος, συνδέοντας την παραγωγή, τη χρήση και τη μελλοντική διασύνδεση με ενεργειακές υποδομές (Hellenic Hydrogen, n.d.).

Η εγκατάσταση σχεδιάζεται στην περιοχή του πρώην λιγνιτικού σταθμού **Αμυνταίου–Φιλώτα**, αξιοποιώντας υφιστάμενες βιομηχανικές υποδομές, διαθέσιμους ενεργειακούς πόρους και την τεχνογνωσία της περιοχής. Η επιλογή της τοποθεσίας δεν είναι τυχαία, αλλά εντάσσεται στη στρατηγική της «δίκαιης μετάβασης» (*Just Transition*), δηλαδή της σταδιακής αντικατάστασης της λιγνιτικής οικονομίας με καθαρότερες ενεργειακές δραστηριότητες υψηλότερης τεχνολογικής προστιθέμενης αξίας.

Σύμφωνα με τα διαθέσιμα τεχνικά στοιχεία, το έργο προβλέπει εγκατάσταση μονάδας ηλεκτρόλυσης με **αρχική ισχύ 50 MW**, με δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης έως **200 MW**, γεγονός που το καθιστά έργο με εμπορικό και όχι απλώς πιλοτικό χαρακτήρα (Hellenic Hydrogen, n.d.). Η παραγωγή του υδρογόνου προβλέπεται να βασίζεται σε ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές, με χρήση τεχνολογίας ηλεκτρόλυσης νερού, ακολουθώντας το μοντέλο του πράσινου υδρογόνου που αναλύθηκε στο θεωρητικό μέρος της εργασίας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η προβλεπόμενη χρήση του παραγόμενου υδρογόνου. Ένας από τους βασικούς τελικούς αποδέκτες αναφέρεται ότι θα είναι μονάδα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού (CHP) στην περιοχή της Καρδιάς, όπου το υδρογόνο θα χρησιμοποιείται σε μείγμα με φυσικό αέριο. Η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερη σημασία, καθώς συνδέεται άμεσα με τη λογική του **hydrogen blending**, δηλαδή της σταδιακής ενσωμάτωσης υδρογόνου σε υπάρχοντα ενεργειακά συστήματα, που εξετάζεται στο Κεφάλαιο 6. Παράλληλα, εξετάζεται η χρήση του και σε εφαρμογές βαρέων μεταφορών, ενισχύοντας τη διατομεακή χρησιμότητα του έργου.

Από πλευράς υποδομών μεταφοράς, το North-1 παρουσιάζει πρόσθετο ενδιαφέρον λόγω της προβλεπόμενης σύνδεσής του με νέα **hydrogen-ready ενεργειακή υποδομή**, σε συνεργασία με τον ΔΕΣΦΑ. Το στοιχείο αυτό είναι στρατηγικά σημαντικό, καθώς υποδηλώνει ότι το έργο δεν σχεδιάζεται ως απομονωμένη μονάδα παραγωγής, αλλά ως δυνητικός κόμβος σε μελλοντικό ελληνικό ή διασυνοριακό δίκτυο υδρογόνου. Με αυτή τη λογική, το North-1 προσεγγίζει το μοντέλο των ευρωπαϊκών hydrogen valleys, όπου η

αξία δεν βρίσκεται μόνο στην παραγωγή καυσίμου αλλά στη διασύνδεση διαφορετικών κρίκων της αλυσίδας αξίας.

Παρά τις σημαντικές προοπτικές, το έργο αντιμετωπίζει και ουσιώδεις τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις. Πρώτον, η παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης εξακολουθεί να χαρακτηρίζεται από υψηλό επενδυτικό κόστος, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις. Το κόστος των ηλεκτρολυτών, η ανάγκη εξασφάλισης χαμηλού κόστους ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας και η απαίτηση για σταθερή λειτουργία αποτελούν βασικούς παράγοντες οικονομικής βιωσιμότητας (IEA, 2023).

Δεύτερον, η αβεβαιότητα ως προς τη μελλοντική ζήτηση υδρογόνου δημιουργεί επιχειρηματικό ρίσκο. Αν και η στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης προωθεί τη χρήση υδρογόνου σε βιομηχανία και μεταφορές, η πραγματική ανάπτυξη της αγοράς παραμένει σε πρώιμο στάδιο. Έτσι, η επιτυχία του έργου εξαρτάται όχι μόνο από την τεχνική του υλοποίηση αλλά και από τη δημιουργία σταθερών αγορών κατανάλωσης.

Τρίτον, η τεχνική ολοκλήρωση ενός τέτοιου έργου απαιτεί συντονισμό διαφορετικών τεχνολογικών υποσυστημάτων: παραγωγή μέσω ηλεκτρόλυσης, αποθήκευση, συμπίεση, έλεγχο καθαρότητας, μεταφορά και τελική χρήση. Η πολυπλοκότητα αυτή αυξάνει τις απαιτήσεις μηχανικού σχεδιασμού, λειτουργικής αξιοπιστίας και ασφάλειας.

Συνολικά, το North Project 1 αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα έργου που επιχειρεί να μεταφέρει την τεχνολογία του υδρογόνου από το στάδιο της θεωρητικής στρατηγικής σε πραγματική περιφερειακή εφαρμογή. Η σημασία του για την παρούσα εργασία είναι ιδιαίτερη, καθώς συνδέει τα θεωρητικά ζητήματα παραγωγής, blending, ενεργειακών υποδομών και τεχνολογικής ετοιμότητας με μια ελληνική εφαρμογή υψηλού ενδιαφέροντος.

5.3 Το έργο CRAVE-H2 στην Κρήτη

Το έργο **CRAVE-H2 (Crete-Aegean Hydrogen Valley)** αποτελεί μία από τις σημαντικότερες ελληνικές πρωτοβουλίες για την ανάπτυξη ολοκληρωμένου οικοσυστήματος υδρογόνου και εντάσσεται στο ευρωπαϊκό πλαίσιο ανάπτυξης των λεγόμενων *hydrogen valleys*, δηλαδή περιφερειακών ενεργειακών οικοσυστημάτων στα οποία το υδρογόνο αξιοποιείται σε πολλαπλά στάδια της αλυσίδας αξίας, από την

παραγωγή έως την τελική χρήση. Σε αντίθεση με έργα που εστιάζουν αποκλειστικά στην παραγωγή ή στη μεταφορά, το συγκεκριμένο έργο υιοθετεί συστημική προσέγγιση, επιδιώκοντας την ενσωμάτωση του υδρογόνου σε ένα πραγματικό περιφερειακό ενεργειακό σύστημα (Clean Hydrogen Partnership, 2024; European Commission, 2024).

Το έργο αναπτύσσεται στην Κρήτη, με επίκεντρο την περιοχή του **Αθερινόλακκου**, και χρηματοδοτείται στο πλαίσιο του **Horizon Europe** μέσω της **Clean Hydrogen Partnership**, με συνολικό προϋπολογισμό περίπου **11 εκατ. ευρώ**, εκ των οποίων περίπου **7,9 εκατ. ευρώ** προέρχονται από ευρωπαϊκή χρηματοδότηση. Η διάρκεια υλοποίησης εκτείνεται από το **2023 έως το 2028**, γεγονός που υποδηλώνει ότι πρόκειται για έργο επίδειξης και τεχνολογικής ωρίμανσης με μεσοπρόθεσμο ορίζοντα αξιολόγησης (European Commission, 2024).

Η βασική φιλοσοφία του έργου είναι η δημιουργία του πρώτου ολοκληρωμένου πράσινου υδρογονο-οικοσυστήματος στην Ελλάδα, στο οποίο το υδρογόνο θα λειτουργεί όχι μόνο ως ενεργειακό καύσιμο αλλά και ως μέσο αποθήκευσης, εξισορρόπησης δικτύου και υποστήριξης μεταφορών. Σύμφωνα με την τεχνική περιγραφή του έργου, η βασική υποδομή περιλαμβάνει:

- **αλκαλικό ηλεκτρολύτη ισχύος άνω των 3 MW,**
- **δυνατότητα παραγωγής περίπου 500 τόνων πράσινου υδρογόνου ανά έτος,**
- **σύστημα συμπίεσης και αποθήκευσης υψηλής πίεσης,**
- **σταθμό ανεφοδιασμού υδρογόνου (Hydrogen Refuelling Station),**
- **κυστέλη καυσίμου PEM ισχύος 0,4 MW,**
- **εφαρμογές μετακίνησης με οχήματα υδρογόνου, συμπεριλαμβανομένων λεωφορείων και άλλων οχημάτων (European Commission, 2024; CRAVE-H2, n.d.).**

Η δομή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι καλύπτει ουσιαστικά το σύνολο της αλυσίδας αξίας του υδρογόνου: παραγωγή, αποθήκευση, μετατροπή ενέργειας, διανομή και τελική χρήση. Από ακαδημαϊκή άποψη, αυτό καθιστά το CRAVE-H2 περισσότερο σύνθετο από ένα απλό έργο παραγωγής, καθώς επιτρέπει την αξιολόγηση της λειτουργικής συνεργασίας πολλών διαφορετικών τεχνολογικών υποσυστημάτων σε πραγματικό περιβάλλον.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η επιλογή της **Κρήτης** ως γεωγραφικής περιοχής εφαρμογής. Πρόκειται για ενεργειακό σύστημα με χαρακτηριστικά σχετικής νησιωτικής απομόνωσης, υψηλή εξάρτηση από εισαγόμενα καύσιμα και σημαντικές δυνατότητες αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σε τέτοια περιβάλλοντα, το υδρογόνο αποκτά ιδιαίτερη αξία ως μέσο ενεργειακής αποθήκευσης και ενίσχυσης της ευελιξίας του συστήματος, ειδικά όταν η ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ παρουσιάζει διακυμάνσεις.

Το έργο αποκτά ακόμη μεγαλύτερη στρατηγική σημασία λόγω της προβλεπόμενης σύνδεσής του με ευρύτερες ενεργειακές εξελίξεις στην Ανατολική Μεσόγειο, συμπεριλαμβανομένων διασυνδέσεων ηλεκτρικής ενέργειας και της πιθανής μελλοντικής χρήσης υδρογόνου σε ναυτιλιακές εφαρμογές. Αυτό σημαίνει ότι το έργο δεν αντιμετωπίζεται απλώς ως τοπική πιλοτική εφαρμογή, αλλά ως πιθανός κόμβος ευρύτερης ενεργειακής ανάπτυξης.

Ωστόσο, όπως κάθε έργο hydrogen valley, το CRAVE-H2 συνοδεύεται από σημαντικές τεχνικές και επιχειρησιακές προκλήσεις. Η πρώτη αφορά την **ολοκλήρωση διαφορετικών τεχνολογιών** σε ενιαίο λειτουργικό σχήμα. Η συνδυασμένη λειτουργία ηλεκτρόλυσης, αποθήκευσης, κυψελών καυσίμου και μεταφορικών εφαρμογών αυξάνει σημαντικά την τεχνική πολυπλοκότητα και τις απαιτήσεις αξιοπιστίας.

Η δεύτερη αφορά την **οικονομική βιωσιμότητα**. Αν και η ευρωπαϊκή χρηματοδότηση μειώνει το αρχικό επενδυτικό βάρος, η μακροχρόνια βιωσιμότητα εξαρτάται από τη δημιουργία πραγματικής αγοράς κατανάλωσης υδρογόνου και από τη μείωση του κόστους παραγωγής πράσινου υδρογόνου.

Η τρίτη αφορά τη **θεσμική και κοινωνική διάσταση**. Τα hydrogen valleys δεν αποτελούν αποκλειστικά τεχνικά έργα αλλά απαιτούν κοινωνική αποδοχή, περιφερειακό συντονισμό, ρυθμιστική προσαρμογή και επιχειρησιακή ετοιμότητα πολλών εμπλεκόμενων φορέων.

Συνολικά, το CRAVE-H2 αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα έργου εφαρμοσμένης ενεργειακής μετάβασης, στο οποίο το υδρογόνο εξετάζεται όχι ως μεμονωμένη τεχνολογία αλλά ως οργανικό στοιχείο ενός ευρύτερου ενεργειακού οικοσυστήματος. Για την παρούσα εργασία, παρουσιάζει ιδιαίτερη αξία, καθώς επιτρέπει τη σύνδεση των θεωρητικών ζητημάτων παραγωγής, αποθήκευσης, μεταφοράς και τελικής χρήσης με μία ελληνική εφαρμογή πραγματικής κλίμακας.

5.4 Συγκριτική αξιολόγηση ελληνικών έργων και ευρωπαϊκών πρωτοβουλιών

Η συγκριτική εξέταση των έργων **North-1** και **CRAVE-H2** αναδεικνύει δύο διαφορετικές αλλά συμπληρωματικές προσεγγίσεις στην ανάπτυξη της οικονομίας του υδρογόνου στην Ελλάδα. Παρότι και τα δύο έργα εντάσσονται στο ευρύτερο ευρωπαϊκό πλαίσιο ενεργειακής μετάβασης, εξυπηρετούν διαφορετικούς στρατηγικούς στόχους και βασίζονται σε διαφορετικές τεχνολογικές και επιχειρησιακές λογικές.

Το **North-1** προσεγγίζει το υδρογόνο κυρίως ως καύσιμο βιομηχανικής ή ημικεντρικής ενεργειακής χρήσης, με έμφαση στην παραγωγή πράσινου υδρογόνου μεγάλης κλίμακας και στη διασύνδεσή του με υφιστάμενες ενεργειακές υποδομές. Η λογική του έργου είναι σαφώς περισσότερο προσανατολισμένη προς την ανάπτυξη υποδομών κορμού (*infrastructure-oriented approach*), καθώς η αξία του δεν περιορίζεται στην ίδια την παραγωγή, αλλά επεκτείνεται στη μελλοντική ένταξή του σε δίκτυα μεταφοράς, στη χρήση του σε τηλεθέρμανση και στην υποστήριξη της βιομηχανικής μετάβασης της Δυτικής Μακεδονίας.

Αντίθετα, το **CRAVE-H2** ακολουθεί περισσότερο τη φιλοσοφία ενός ολοκληρωμένου *hydrogen valley*, όπου το υδρογόνο εξετάζεται ως στοιχείο τοπικού ενεργειακού οικοσυστήματος. Το έργο δεν περιορίζεται στην παραγωγή, αλλά συνδυάζει αποθήκευση, μετατροπή ενέργειας μέσω κυψελών καυσίμου, εφαρμογές μεταφορών και ενσωμάτωση σε περιφερειακό ενεργειακό σύστημα. Με αυτή την έννοια, η προσέγγισή του είναι περισσότερο *system-integration oriented*, καθώς εστιάζει στη λειτουργική διασύνδεση πολλών επιμέρους τεχνολογιών.

Η βασική τεχνική διαφοροποίηση των δύο έργων αφορά το επίπεδο πολυπλοκότητας και τον χαρακτήρα εφαρμογής. Το North-1 είναι τεχνικά περισσότερο συγκεντρωμένο σε έναν κύριο τεχνολογικό άξονα, δηλαδή την παραγωγή πράσινου υδρογόνου μεγάλης κλίμακας και την αξιοποίησή του μέσω ενεργειακών υποδομών. Αυτό το καθιστά συγκριτικά πιο “καθαρό” ως μηχανολογικό έργο παραγωγής και διανομής. Το CRAVE-H2, αντίθετα, είναι πιο σύνθετο ως ενεργειακό σύστημα, καθώς απαιτεί ταυτόχρονη επιτυχή λειτουργία ηλεκτρόλυσης, αποθήκευσης, συμπίεσης, κυψελών καυσίμου, ανεφοδιασμού οχημάτων και επιχειρησιακού συντονισμού πολλών φορέων.

Από οικονομικής πλευράς, και τα δύο έργα εμφανίζουν χαρακτηριστικά προ-εμπορικής ωρίμανσης. Η οικονομική βιωσιμότητά τους εξακολουθεί να εξαρτάται σημαντικά από εξωτερική χρηματοδοτική υποστήριξη, δημόσια κίνητρα και τη μελλοντική ανάπτυξη αγοράς υδρογόνου. Ωστόσο, η φύση του οικονομικού κινδύνου διαφοροποιείται. Στην περίπτωση του North-1, ο κίνδυνος σχετίζεται κυρίως με τη διαμόρφωση επαρκούς σταθερής ζήτησης για το παραγόμενο υδρογόνο. Στην περίπτωση του CRAVE-H2, η αβεβαιότητα συνδέεται περισσότερο με τη βιώσιμη λειτουργική ολοκλήρωση πολλών τεχνολογικών κρίκων σε ενιαίο επιχειρησιακό μοντέλο.

Σε επίπεδο στρατηγικής σημασίας, τα δύο έργα λειτουργούν συμπληρωματικά. Το North-1 εκφράζει τη λογική της μετάβασης της βαριάς ενεργειακής υποδομής προς καθαρότερα καύσιμα, ενώ το CRAVE-H2 αναδεικνύει τη δυνατότητα αποκεντρωμένων ενεργειακών εφαρμογών σε περιφερειακή κλίμακα. Με άλλα λόγια, το πρώτο απαντά περισσότερο στο ερώτημα *«πώς παράγουμε και διακινούμε υδρογόνο σε βιομηχανική κλίμακα;»*, ενώ το δεύτερο στο *«πώς ενσωματώνουμε το υδρογόνο σε πραγματικά ενεργειακά οικοσυστήματα;»*.

Πέραν των έργων North-1 και CRAVE-H2, στην ελληνική αγορά εμφανίζονται και νέες πρωτοβουλίες που συνδέουν το υδρογόνο με την ενεργειακή μετάβαση των λιγνιτικών περιοχών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το ενεργειακό οικοσύστημα του Αμυνταίου, όπου εξετάζεται η ανάπτυξη μονάδας παραγωγής πράσινου υδρογόνου σε συνδυασμό με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τοπικές ενεργειακές υποδομές. Η προσέγγιση αυτή αναδεικνύει τον ρόλο του υδρογόνου ως εργαλείου περιφερειακής ανασυγκρότησης και απανθρακοποίησης.

Η εικόνα αυτή συμβαδίζει με τις ευρωπαϊκές τάσεις ανάπτυξης υποδομών υδρογόνου. Σε πανευρωπαϊκό επίπεδο, παρατηρούνται δύο παράλληλες στρατηγικές κατευθύνσεις: αφενός η ανάπτυξη μεγάλων δικτύων παραγωγής και μεταφοράς, όπως το European Hydrogen Backbone, και αφετέρου η ανάπτυξη περιφερειακών hydrogen valleys που λειτουργούν ως πεδία τεχνολογικής επίδειξης και επιτάχυνσης της αγοράς (European Commission, 2020; IEA, 2023).

Συνολικά, η συγκριτική αξιολόγηση δείχνει ότι η μετάβαση στην οικονομία του υδρογόνου δεν θα στηριχθεί σε ένα ενιαίο μοντέλο ανάπτυξης. Αντίθετα, θα απαιτήσει συνδυασμό έργων κεντρικής υποδομής, περιφερειακών ενεργειακών οικοσυστημάτων

και μεταβατικών τεχνολογικών λύσεων. Για την παρούσα εργασία, το συμπέρασμα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς υποστηρίζει τη θέση ότι η σταδιακή ενσωμάτωση του υδρογόνου στα υπάρχοντα ενεργειακά δίκτυα —όπως εξετάζεται στο επόμενο κεφάλαιο— αποτελεί ρεαλιστικό ενδιάμεσο στάδιο προς μια πιο ώριμη οικονομία υδρογόνου.

Πίνακας 3. Συγκριτική παρουσίαση των έργων North-1 και CRAVE-H2.

Πηγή: Προσαρμογή από Hellenic Hydrogen (2024), CRAVE-H2 Project (2024) και Energyworld (2024).

Παράμετρος	North-1	CRAVE-H2
Τύπος έργου	Παραγωγή πράσινου υδρογόνου	Hydrogen Valley
Γεωγραφική περιοχή	Δυτική Μακεδονία	Κρήτη
Κύρια τεχνολογία	Ηλεκτρόλυση μεγάλης κλίμακας	Ηλεκτρόλυση + storage + fuel cells
Αρχική ισχύς	50 MW	>3 MW
Επέκταση	έως 200 MW	πιλοτική κλιμάκωση
Τελική χρήση	CHP, τηλεθέρμανση, μεταφορές	mobility, storage, grid services
Μοντέλο ανάπτυξης	centralized infrastructure	decentralized ecosystem
Βαθμός τεχνικής πολυπλοκότητας	μέτριος–υψηλός	υψηλός
Στρατηγικός ρόλος	industrial transition	regional demonstration

Κεφάλαιο 6: Ενσωμάτωση υδρογόνου στο υπάρχον δίκτυο

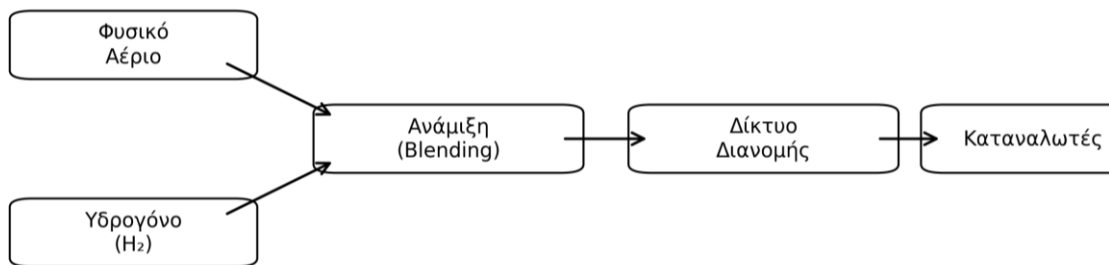
6.1 Μείγμα υδρογόνου–φυσικού αερίου (H₂ blending έως 20%)

Η σταδιακή ενσωμάτωση του υδρογόνου στα υφιστάμενα ενεργειακά συστήματα αποτελεί μία από τις πλέον ρεαλιστικές μεταβατικές στρατηγικές για την ανάπτυξη της οικονομίας του υδρογόνου. Αντί της άμεσης μετάβασης σε αποκλειστική χρήση καθαρού υδρογόνου, η πρακτική της ανάμιξης υδρογόνου με φυσικό αέριο (*hydrogen blending*) επιτρέπει την αξιοποίηση υφιστάμενων υποδομών μεταφοράς, διανομής και τελικής κατανάλωσης, περιορίζοντας τις αρχικές επενδυτικές απαιτήσεις και επιταχύνοντας την πρακτική ένταξη του υδρογόνου στην αγορά (IEA, 2023; Melaina et al., 2013).

Η λογική της προσέγγισης βασίζεται στην εισαγωγή συγκεκριμένου ποσοστού υδρογόνου στο ρεύμα φυσικού αερίου, ώστε το τελικό μίγμα να μπορεί να μεταφερθεί μέσω των υπαρχόντων δικτύων χωρίς άμεση πλήρη ανακατασκευή τους. Στη διεθνή βιβλιογραφία και πρακτική, ως ανώτατο πρακτικό όριο για γενικευμένη εφαρμογή αναφέρεται συχνά το **20% κατ' όγκο**, αν και το πραγματικό επιτρεπόμενο ποσοστό εξαρτάται από τον τύπο του δικτύου, τον εξοπλισμό τελικής χρήσης, τις απαιτήσεις ασφαλείας και το ισχύον κανονιστικό πλαίσιο (Dodds & Demoullin, 2013; IEA, 2019).

Το όριο αυτό δεν είναι αυθαίρετο, αλλά προκύπτει από τις ουσιώδεις φυσικοχημικές διαφορές μεταξύ υδρογόνου και φυσικού αερίου. Το υδρογόνο διαθέτει σημαντικά χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου σε σχέση με το μεθάνιο, γεγονός που σημαίνει ότι ίσος όγκος μίγματος μεταφέρει μικρότερη ενεργειακή ποσότητα όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε υδρογόνο. Για παράδειγμα, ενώ το φυσικό αέριο παρουσιάζει κατώτερη θερμογόνο δύναμη περίπου **35–40 MJ/Nm³**, το υδρογόνο εμφανίζει περίπου **10–12 MJ/Nm³**, δηλαδή περίπου το ένα τρίτο σε ογκομετρική βάση (IEA, 2019).

Αυτό έχει άμεση τεχνική σημασία. Ένα μίγμα με **20% υδρογόνο κατ' όγκο** δεν συνεπάγεται αντίστοιχη ενεργειακή συμμετοχή 20%, αλλά σημαντικά χαμηλότερη, συνήθως περίπου **6–8% ενεργειακή υποκατάσταση**, ανάλογα με τη σύνθεση του φυσικού αερίου. Με άλλα λόγια, το blending προσφέρει μεν άμεση δυνατότητα εισαγωγής υδρογόνου, αλλά το πραγματικό δυναμικό απανθρακοποίησης είναι περιορισμένο όταν η συγκέντρωση παραμένει σε χαμηλά επίπεδα.



Σχήμα 4. Ενσωμάτωση υδρογόνου σε δίκτυο φυσικού αερίου μέσω διαδικασίας blending.
Πηγή: Ίδια επεξεργασία βάσει European Hydrogen Backbone (2023) και HyDeploy Consortium (2023).

Πέρα από την ενεργειακή πυκνότητα, ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζουν και οι ιδιότητες καύσης. Το υδρογόνο χαρακτηρίζεται από:

- υψηλότερη ταχύτητα φλόγας,
- πολύ ευρύτερο εύρος ευφλεκτότητας,
- χαμηλότερη απαιτούμενη ενέργεια ανάφλεξης,
- διαφορετικό δείκτη Wobbe,
- αυξημένη διάχυση στο περιβάλλον.

Η αυξημένη ταχύτητα φλόγας είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα **flashback**, δηλαδή επιστροφής της φλόγας εντός του καυστήρα, εάν ο σχεδιασμός του εξοπλισμού δεν είναι κατάλληλος (Turns, 2012). Παράλληλα, οι μεταβολές στον δείκτη **Wobbe**, ο οποίος χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της καταλληλότητας αερίων καυσίμων σε συστήματα καύσης, επηρεάζουν τη συμπεριφορά των καυστήρων και τη θερμική απόδοση του εξοπλισμού.

Παρά τους περιορισμούς αυτούς, η στρατηγική blending παρουσιάζει σημαντικά πρακτικά πλεονεκτήματα. Το σημαντικότερο είναι ότι επιτρέπει σταδιακή μετάβαση χωρίς την ανάγκη άμεσης αντικατάστασης του συνόλου των υποδομών. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για χώρες με εκτεταμένα δίκτυα φυσικού αερίου, όπου η πλήρης μετατροπή σε αποκλειστικό δίκτυο υδρογόνου θα απαιτούσε εξαιρετικά υψηλό κεφαλαιουχικό κόστος και μακροχρόνιο σχεδιασμό.

Σε επίπεδο διεθνούς εφαρμογής, έχουν ήδη πραγματοποιηθεί αρκετές πιλοτικές εφαρμογές blending. Στην Ευρώπη, έργα όπως το **HyDeploy** στο Ηνωμένο Βασίλειο έδειξαν ότι η εισαγωγή έως περίπου 20% υδρογόνου μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς σημαντικές παρεμβάσεις σε μεγάλο μέρος του υφιστάμενου τελικού εξοπλισμού

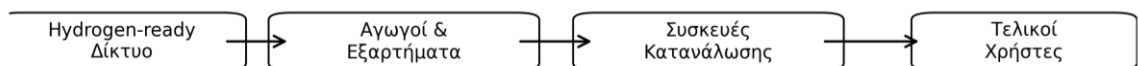
(HyDeploy, 2023). Αντίστοιχα, ευρωπαϊκοί διαχειριστές δικτύων εξετάζουν blending ως μεταβατική επιλογή προς hydrogen-ready υποδομές.

Ωστόσο, η στρατηγική αυτή δεν αποτελεί τελικό μοντέλο ενεργειακής μετάβασης. Το blending προσφέρει λειτουργική ευελιξία και ταχεία είσοδο του υδρογόνου στο σύστημα, αλλά δεν υποκαθιστά την ανάγκη για εξειδικευμένες υποδομές καθαρού υδρογόνου σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Η περιορισμένη ενεργειακή υποκατάσταση, οι τεχνικές επιπτώσεις στον εξοπλισμό και οι απαιτήσεις προσαρμογής των δικτύων σημαίνουν ότι πρόκειται κυρίως για **μεταβατική τεχνολογική στρατηγική** και όχι για μακροπρόθεσμη καθολική λύση.

Για την παρούσα εργασία, η σημασία της προσέγγισης blending είναι ιδιαίτερα υψηλή, καθώς συνδέει άμεσα τη θεωρητική ανάπτυξη της οικονομίας του υδρογόνου με ένα τεχνικά εφαρμόσιμο σενάριο αξιοποίησης των υφιστάμενων ενεργειακών υποδομών.

6.2 Τεχνική ετοιμότητα τελικών συστημάτων κατανάλωσης (καυστήρες, λέβητες και βιομηχανικές εφαρμογές)

Η ενσωμάτωση υδρογόνου στα ενεργειακά συστήματα δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την καταλληλότητα των δικτύων μεταφοράς και διανομής, αλλά και από την ικανότητα των τελικών συστημάτων κατανάλωσης να λειτουργήσουν με ασφάλεια και αποδοτικότητα με μίγματα υδρογόνου–φυσικού αερίου ή με καθαρό υδρογόνο. Τα τελικά αυτά συστήματα περιλαμβάνουν οικιακούς λέβητες, καυστήρες θέρμανσης, βιομηχανικούς καυστήρες, μονάδες συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού (CHP), καθώς και ειδικές εφαρμογές θερμικής καύσης στη βιομηχανία (IEA, 2023; ASME, 2019).



Σχήμα 5. Βασική αρχιτεκτονική δικτύου και τελικών καταναλώσεων hydrogen-ready.
Πηγή: Ίδια επεξεργασία βάσει European Commission (2020) και European Hydrogen Backbone (2023).

Η τεχνική πρόκληση προκύπτει από το γεγονός ότι το υδρογόνο εμφανίζει σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες καύσης σε σχέση με το φυσικό αέριο. Ειδικότερα, παρουσιάζει

υψηλότερη ταχύτητα φλόγας, χαμηλότερη ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης, ευρύτερο εύρος ευφλεκτότητας και διαφορετική θερμική συμπεριφορά κατά την καύση (Turns, 2012). Οι ιδιότητες αυτές επηρεάζουν άμεσα τον σχεδιασμό και τη λειτουργία των συστημάτων καύσης.

Σε συμβατικούς καυστήρες φυσικού αερίου, η παρουσία υδρογόνου σε χαμηλά ποσοστά blending —συνήθως έως περίπου 10–20% κατ' όγκο— μπορεί να είναι τεχνικά διαχειρίσιμη χωρίς εκτεταμένες τροποποιήσεις. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι, σε αυτά τα επίπεδα, οι βασικές θερμοδυναμικές και λειτουργικές παράμετροι του καυσίμου παραμένουν εντός αποδεκτών ορίων για πολλά υπάρχοντα συστήματα. Ωστόσο, ακόμη και σε αυτές τις περιπτώσεις, ενδέχεται να απαιτούνται επαναρυθμίσεις στον λόγο αέρα–καυσίμου, στον έλεγχο φλόγας ή στις παραμέτρους καύσης, ανάλογα με τον εξοπλισμό (HyDeploy, 2023).

Η αύξηση του ποσοστού υδρογόνου δημιουργεί πιο έντονες τεχνικές απαιτήσεις. Η υψηλότερη ταχύτητα καύσης μπορεί να οδηγήσει σε **flashback**, δηλαδή επιστροφή της φλόγας προς το εσωτερικό του καυστήρα, με αποτέλεσμα αυξημένο κίνδυνο θερμικής βλάβης ή αστοχίας εξοπλισμού. Παράλληλα, η διαφοροποίηση του δείκτη Wobbe επηρεάζει τη θερμική ισχύ του συστήματος και την ποιότητα της καύσης. Αυτό σημαίνει ότι ένας καυστήρας σχεδιασμένος αποκλειστικά για φυσικό αέριο δεν είναι κατ' ανάγκη κατάλληλος για υψηλές συγκεντρώσεις υδρογόνου χωρίς τροποποίηση.

Επιπλέον, η καύση υδρογόνου συνοδεύεται από διαφορετική συμπεριφορά εκπομπών. Αν και δεν παράγεται διοξείδιο του άνθρακα από το ίδιο το καύσιμο, οι υψηλότερες θερμοκρασίες φλόγας μπορούν να ενισχύσουν τον σχηματισμό **οξειδίων του αζώτου (NOx)**, εάν δεν εφαρμοστούν κατάλληλες τεχνικές ελέγχου καύσης, όπως staged combustion ή ειδικός σχεδιασμός καυστήρα (IEA, 2019).

Στον οικιακό τομέα, αρκετοί σύγχρονοι κατασκευαστές έχουν ήδη αναπτύξει εξοπλισμό *hydrogen-ready*, δηλαδή λέβητες και θερμικά συστήματα που μπορούν να λειτουργήσουν αρχικά με φυσικό αέριο ή μίγματα και να μετατραπούν με σχετικά περιορισμένες παρεμβάσεις σε λειτουργία 100% υδρογόνου. Η προσέγγιση αυτή θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική ως μεταβατική στρατηγική, καθώς μειώνει τον κίνδυνο τεχνολογικής απαξίωσης του εξοπλισμού.

Στις βιομηχανικές εφαρμογές, οι απαιτήσεις είναι συχνά αυστηρότερες. Βιομηχανικοί καυστήρες που χρησιμοποιούνται σε διεργασίες υψηλής θερμοκρασίας, όπως μεταλλουργία, κεραμικά ή χημικές διεργασίες, παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στις αλλαγές των χαρακτηριστικών καύσης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η χρήση υδρογόνου απαιτεί συχνά πλήρη επανασχεδιασμό καυστήρων, ακροφυσίων, συστημάτων ελέγχου και υλικών αντοχής.

Αντίστοιχα, στις μονάδες **CHP**, η χρήση μιγμάτων ή καθαρού υδρογόνου εξαρτάται από τον τύπο της τεχνολογίας. Αεριοστρόβιλοι και κινητήρες εσωτερικής καύσης μπορούν υπό προϋποθέσεις να λειτουργήσουν με συγκεκριμένα ποσοστά blending, αλλά η πλήρης μετάβαση σε καθαρό υδρογόνο απαιτεί εκτεταμένες τεχνικές τροποποιήσεις λόγω διαφορετικής συμπεριφοράς ανάφλεξης, θερμικών φορτίων και ελέγχου εκπομπών.

Συνολικά, η τεχνική ετοιμότητα των τελικών συστημάτων μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική για χαμηλά έως μέτρια επίπεδα blending, αλλά σαφώς περιορισμένη για γενικευμένη χρήση καθαρού υδρογόνου χωρίς ειδικό εξοπλισμό. Αυτό ενισχύει τη θέση ότι η σταδιακή προσέγγιση μέσω blending αποτελεί ρεαλιστικό μεταβατικό βήμα, ενώ η πλήρης μετάβαση προϋποθέτει σημαντική τεχνολογική αναβάθμιση των τελικών ενεργειακών καταναλώσεων.

Πίνακας 4. Σύγκριση τεχνικών χαρακτηριστικών φυσικού αερίου, H₂ blends και 100% H₂.

Πηγή: Ίδια επεξεργασία βάσει HyDeploy Consortium (2023), Hy4Heat Programme (2023), GERG (2019) και European Commission (2020).

Παράμετρος	Φυσικό αέριο	H ₂ blend	100% Υδρογόνο
Ταχύτητα φλόγας	χαμηλή	μέτρια αύξηση	υψηλή
Flashback risk	χαμηλός	αυξανόμενος	υψηλός
NO _x emissions	ελεγχόμενες	μέτρια αύξηση	πιθανή αύξηση
Συμβατότητα υπάρχοντος καυστήρα	πλήρης	συχνά αποδεκτή	περιορισμένη
Ανάγκη τροποποίησης	όχι	μικρή–μέτρια	υψηλή
Hydrogen-ready εξοπλισμός	όχι απαραίτητος	επιθυμητός	απαραίτητος

6.3 Προσαρμογή δικτύων φυσικού αερίου για μεταφορά υδρογόνου

Η αξιοποίηση των υφιστάμενων δικτύων φυσικού αερίου για τη μεταφορά υδρογόνου αποτελεί μία από τις σημαντικότερες στρατηγικές επιλογές για τη σταδιακή ανάπτυξη της οικονομίας του υδρογόνου, καθώς δύναται να μειώσει σημαντικά το κόστος ανάπτυξης νέων ενεργειακών υποδομών. Ωστόσο, η τεχνική δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των δικτύων αυτών δεν μπορεί να θεωρείται δεδομένη, καθώς το υδρογόνο παρουσιάζει ουσιώδεις διαφοροποιήσεις ως προς τη φυσική συμπεριφορά, τη χημική αλληλεπίδραση με τα υλικά και τις λειτουργικές απαιτήσεις του συστήματος μεταφοράς (Melaina et al., 2013; IEA, 2019).

Η βασική αρχή της προσέγγισης έγκειται στην προσαρμογή υφιστάμενων αγωγών, σταθμών συμπίεσης, μετρητικών διατάξεων, βαλβίδων και συστημάτων ασφαλείας ώστε να μπορούν να λειτουργήσουν με μίγματα υδρογόνου–φυσικού αερίου ή, σε προχωρημένο στάδιο, με καθαρό υδρογόνο. Παρότι σε ορισμένες περιπτώσεις αυτό είναι τεχνικά εφικτό, η καταλληλότητα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ηλικία του δικτύου, τα υλικά κατασκευής, τα επίπεδα πίεσης λειτουργίας και τον τύπο των εξαρτημάτων (ASME, 2019; EN 1594).

Συμβατότητα υλικών και υδρογονοθραυστικότητα

Ένα από τα σημαντικότερα τεχνικά ζητήματα είναι η συμβατότητα των υλικών με το υδρογόνο. Οι χαλύβδινοι αγωγοί υψηλής πίεσης, που χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στα δίκτυα μεταφοράς φυσικού αερίου, ενδέχεται να εμφανίσουν ευαισθησία στο φαινόμενο της **υδρογονοθραυστικότητας (hydrogen embrittlement)**.

Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με τη διάχυση ατόμων υδρογόνου στο εσωτερικό της μεταλλικής μικροδομής, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της ολκιμότητας, επιτάχυνση της ανάπτυξης μικρορωγμών, αυξημένη ευαισθησία σε φαινόμενα κόπωσης και πρόωρη μηχανική αστοχία υπό κυκλική φόρτιση..

Η σοβαρότητα του προβλήματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η ποιότητα του χάλυβα, το επίπεδο αντοχής του υλικού, η ποιότητα των συγκολλήσεων, η λειτουργική πίεση, η συγκέντρωση υδρογόνου και το ιστορικό καταπόνησης του αγωγού.

Γενικά, αγωγοί υψηλής αντοχής και παλαιότερες υποδομές εμφανίζουν αυξημένη ευαισθησία, ενώ νεότερα δίκτυα σχεδιασμένα με hydrogen-ready προδιαγραφές παρουσιάζουν σημαντικά καλύτερη συμπεριφορά (IEA, 2019; ASME B31.12).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η συμπεριφορά των συγκολλήσεων και των θερμικά επηρεασμένων ζωνών (Heat Affected Zones – HAZ), καθώς οι περιοχές αυτές ενδέχεται να εμφανίζουν αυξημένη ευαισθησία στην παρουσία διαχεόμενου υδρογόνου. Υπό συγκεκριμένες συνθήκες μεταλλουργικής δομής, εφελκυστικών τάσεων και συγκέντρωσης υδρογόνου, μπορεί να εμφανιστεί υδρογονορηγμάτωση (hydrogen cracking), φαινόμενο που αποτελεί γνωστό μηχανισμό αστοχίας σε συγκολλητές κατασκευές. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση υφιστάμενων αγωγών και εξαρτημάτων δεν περιορίζεται μόνο στο βασικό υλικό αλλά επεκτείνεται και στην ποιότητα των συγκολλήσεων, στις διαδικασίες κατασκευής και στις απαιτήσεις επιθεώρησης των δικτύων υδρογόνου (ASME B31.12; San Marchi et al., 2020).

Δίκτυα πολυαιθυλενίου

Σε αντίθεση με τα μεταλλικά δίκτυα μεταφοράς, τα δίκτυα διανομής χαμηλής πίεσης που χρησιμοποιούν πολυαιθυλένιο (PE) εμφανίζουν γενικά μεγαλύτερη αντοχή απέναντι σε μηχανισμούς διάβρωσης και δεν επηρεάζονται από υδρογονοθραυστικότητα.

Αυτό τα καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικά για εφαρμογές blending ή ακόμη και για υψηλότερες συγκεντρώσεις υδρογόνου.

Ωστόσο, εμφανίζεται διαφορετικό τεχνικό ζήτημα: η **διαπερατότητα (permeation)**. Αυτό σημαίνει ότι λόγω του μικρού μοριακού μεγέθους του υδρογόνου, η διάχυσή του μέσω πολυμερικών υλικών είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με το μεθάνιο. Αυτό συνεπάγεται αυξημένη πιθανότητα μικροδιαρροών, αυστηρότερες απαιτήσεις σχεδιασμού των συνδέσεων και πιθανή επανεκτίμηση των επιτρεπόμενων λειτουργικών ορίων λειτουργίας. Παρόλα αυτά, στη διεθνή πρακτική τα σύγχρονα δίκτυα πολυαιθυλενίου θεωρούνται από τις πιο συμβατές κατηγορίες για σταδιακή ενσωμάτωση υδρογόνου.

Συμπιεστές και λειτουργία πίεσης

Η λειτουργία των δικτύων φυσικού αερίου βασίζεται στη διατήρηση πίεσης και ελεγχόμενης ροής μέσω σταθμών συμπίεσης. Το υδρογόνο παρουσιάζει χαμηλότερη πυκνότητα, υψηλότερη συμπιεστότητα, διαφορετικό ιξώδες και διαφορετική θερμοδυναμική συμπεριφορά σε σχέση με το φυσικό αέριο. Αυτό έχει πρακτική σημασία, διότι για μεταφορά ίσης ενεργειακής ποσότητας απαιτείται μεγαλύτερη ογκομετρική ροή.

Ως αποτέλεσμα, οι υπάρχοντες συμπίεστες ενδέχεται να λειτουργούν εκτός του βέλτιστου σημείου λειτουργίας τους, οι ενεργειακές απαιτήσεις συμπίεσης μεταβάλλονται και σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται ανασχεδιασμός των impellers, των στεγανοποιητικών συστημάτων και των συστημάτων λίπανσης.

Μετρητικά και ρυθμιστικά συστήματα

Ένα λιγότερο προφανές αλλά ιδιαίτερα κρίσιμο ζήτημα αφορά τα συστήματα μέτρησης και ρύθμισης.

Τα περισσότερα υφιστάμενα συστήματα έχουν σχεδιαστεί με βάση χαρακτηριστικά του φυσικού αερίου, όπως η θερμογόνος δύναμη, η πυκνότητα, ο δείκτης Wobbe και η τυπική συμπεριφορά ροής του μεθανίου. Η εισαγωγή υδρογόνου μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα τιμολόγησης, λανθασμένες ενδείξεις παροχής και αποκλίσεις στους ενεργειακούς υπολογισμούς. Για τον λόγο αυτό, συχνά απαιτείται προσαρμογή ή αντικατάσταση μετρητών ροής, ρυθμιστών πίεσης, αεριο-χρωματογράφων και συστημάτων υπολογισμού θερμογόνου δύναμης.

Βαλβίδες, εξαρτήματα και στεγανότητα

Το υδρογόνο επιβάλλει αυξημένες απαιτήσεις και στα επιμέρους εξαρτήματα δικτύου. Ιδιαίτερα επηρεάζονται οι βαλβίδες απομόνωσης, οι φλάντζες, τα παρεμβύσματα, τα στεγανοποιητικά στοιχεία, τα συστήματα στεγανότητας των συμπίεστών και τα εξαρτήματα σύνδεσης του δικτύου. Η μικρή μοριακή διάσταση του υδρογόνου αυξάνει την πιθανότητα διαρροής ακόμη και από σημεία που θεωρούνται αποδεκτά για φυσικό αέριο.

Αυτό σημαίνει ότι η μετατροπή υφιστάμενου δικτύου δεν είναι μόνο θέμα κύριου αγωγού αλλά πλήρους αξιολόγησης ολόκληρης της υποδομής.

Συνολική τεχνική αξιολόγηση

Η προσαρμογή των υφιστάμενων δικτύων φυσικού αερίου μπορεί να αποτελέσει τεχνικά και οικονομικά ελκυστική λύση, ιδιαίτερα ως μεταβατικό στάδιο μέσω blending. Ωστόσο, η δυνατότητα αυτή εξαρτάται από λεπτομερή τεχνική αξιολόγηση ανά περίπτωση.

Συνολικά, τα νεότερα δίκτυα εμφανίζουν υψηλότερη συμβατότητα με το υδρογόνο, τα δίκτυα πολυαιθυλενίου θεωρούνται συχνά ευνοϊκότερη επιλογή για εφαρμογές blending, ενώ τα χαλύβδινα δίκτυα υψηλής πίεσης απαιτούν αυστηρότερη αξιολόγηση.

Επιπλέον, σε πολλές περιπτώσεις ο περιοριστικός παράγοντας δεν είναι ο ίδιος ο αγωγός αλλά ο βοηθητικός εξοπλισμός του συστήματος. Η συνολική εικόνα δείχνει ότι η επαναχρησιμοποίηση των υφιστάμενων υποδομών είναι ρεαλιστική υπό προϋποθέσεις, αλλά δεν μπορεί να θεωρείται καθολική ή αυτόματη λύση.

6.4 Τεχνοοικονομική αξιολόγηση και μεθοδολογικές προσεγγίσεις ενσωμάτωσης υδρογόνου

Η ενσωμάτωση του υδρογόνου στα υφιστάμενα ενεργειακά δίκτυα δεν αποτελεί αποκλειστικά τεχνικό ζήτημα, αλλά πολυπαραγοντική απόφαση που επηρεάζεται από οικονομικά, λειτουργικά και στρατηγικά κριτήρια. Παρότι η τεχνική δυνατότητα χρήσης μιγμάτων υδρογόνου–φυσικού αερίου ή ακόμη και καθαρού υδρογόνου έχει αποδειχθεί σε αρκετές πιλοτικές εφαρμογές, η πραγματική βιωσιμότητα της μετάβασης εξαρτάται από τη σχέση μεταξύ επενδυτικού κόστους, λειτουργικού κόστους, περιβαλλοντικού οφέλους και αναμενόμενης ζήτησης (IEA, 2023; Hydrogen Europe, 2023).

Η τεχνοοικονομική αξιολόγηση τέτοιων συστημάτων βασίζεται συνήθως σε συγκριτική ανάλυση εναλλακτικών σεναρίων ανάπτυξης. Στην περίπτωση της ενσωμάτωσης υδρογόνου στα δίκτυα φυσικού αερίου, μπορούν να διακριθούν τρεις βασικές στρατηγικές προσεγγίσεις:

- **σταδιακή εισαγωγή μέσω blending,**
- **μερική μετατροπή επιλεγμένων υποδομών σε hydrogen-ready λειτουργία,**
- **πλήρης ανάπτυξη αποκλειστικού δικτύου υδρογόνου.**

Η πρώτη προσέγγιση παρουσιάζει το χαμηλότερο αρχικό επενδυτικό κόστος, καθώς αξιοποιεί σε μεγάλο βαθμό υπάρχουσες υποδομές. Ωστόσο, η ενεργειακή της αποτελεσματικότητα είναι περιορισμένη, επειδή η προσθήκη υδρογόνου μειώνει τη θερμογόνο αξία του μίγματος ανά μονάδα όγκου, απαιτώντας αυξημένες ροές για ισοδύναμη ενεργειακή παροχή (Melaina et al., 2013). Επιπλέον, το blending δεν αποτελεί μόνιμη λύση πλήρους απανθρακοποίησης, αλλά μεταβατικό στάδιο.

Η δεύτερη προσέγγιση, δηλαδή η σταδιακή αναβάθμιση επιλεγμένων δικτύων και εξοπλισμού σε hydrogen-ready μορφή, απαιτεί υψηλότερες αρχικές επενδύσεις αλλά προσφέρει καλύτερη στρατηγική προσαρμοστικότητα. Σε αυτή την περίπτωση, το κόστος αφορά κυρίως:

- αντικατάσταση ή αναβάθμιση συμπιεστών,
- αντικατάσταση sealing systems,
- προσαρμογή βαλβίδων και ρυθμιστών πίεσης,
- αναβάθμιση μετρητικών συστημάτων,
- εγκατάσταση συστημάτων παρακολούθησης και ανίχνευσης διαρροών.

Παρά το αυξημένο CAPEX, η προσέγγιση αυτή επιτρέπει ομαλότερη μετάβαση προς υψηλότερες συγκεντρώσεις υδρογόνου.

Η τρίτη επιλογή, δηλαδή η δημιουργία αποκλειστικού δικτύου μεταφοράς και διανομής υδρογόνου, θεωρείται τεχνικά η βέλτιστη λύση για μακροπρόθεσμη χρήση, αλλά συνοδεύεται από το υψηλότερο επενδυτικό κόστος και σημαντικές αβεβαιότητες ως προς την ταχύτητα ανάπτυξης της αγοράς.

Από οικονομική άποψη, ιδιαίτερη σημασία έχει το κόστος παραγωγής υδρογόνου, το οποίο σήμερα εξακολουθεί να αποτελεί βασικό περιοριστικό παράγοντα. Το πράσινο υδρογόνο, αν και περιβαλλοντικά προτιμητέο, παραμένει ακριβότερο από το φυσικό αέριο σε πολλές αγορές, κυρίως λόγω του κόστους ηλεκτρόλυσης και της τιμής της ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας (IRENA, 2023). Αυτό σημαίνει ότι ακόμη και εάν η τεχνική ενσωμάτωση είναι εφικτή, η οικονομική ανταγωνιστικότητα δεν είναι δεδομένη.

Επιπλέον, η τεχνοοικονομική αξιολόγηση πρέπει να λαμβάνει υπόψη και τις έμμεσες οικονομικές επιπτώσεις, όπως:

- κόστος εκπαίδευσης προσωπικού,
- προσαρμογή κανονιστικών διαδικασιών,
- λειτουργικό κόστος επιθεωρήσεων,
- αυξημένες απαιτήσεις συντήρησης,
- κυβερνοασφάλεια σε smart monitoring systems.

Σε επίπεδο μεθοδολογίας, η διεθνής πρακτική χρησιμοποιεί συχνά δείκτες όπως:

- **CAPEX (Capital Expenditure),**
- **OPEX (Operational Expenditure),**
- **LCOH (Levelized Cost of Hydrogen),**
- **κόστος αποφυγής CO₂ (€ / tCO₂ avoided),**
- **NPV (Net Present Value),**
- **IRR (Internal Rate of Return).**

Οι δείκτες αυτοί επιτρέπουν αντικειμενική σύγκριση διαφορετικών σεναρίων και βοηθούν στη λήψη στρατηγικών αποφάσεων.

Συνολικά, η τεχνοοικονομική εικόνα δείχνει ότι η αξιοποίηση υφιστάμενων δικτύων μέσω blending ή selective retrofitting είναι σήμερα η πιο ρεαλιστική μεταβατική προσέγγιση, ενώ η πλήρης ανάπτυξη αποκλειστικών υποδομών υδρογόνου αποτελεί περισσότερο μακροπρόθεσμο στρατηγικό στόχο. Η τελική επιλογή εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα φθηνού καθαρού υδρογόνου, τη γεωγραφική διάρθρωση της ζήτησης, τις πολιτικές στήριξης και τη χρονική στρατηγική ενεργειακής μετάβασης.

Πίνακας 5. Συγκριτική τεχνοοικονομική αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων ενσωμάτωσης υδρογόνου στα δίκτυα φυσικού αερίου.

Πηγή: Προσαρμογή από European Commission (2020), IEA (2023), IRENA (2022) και European Hydrogen Backbone (2023).

Σενάριο	Τεχνική δυσκολία	CAPEX	OPEX	Απανθρακοποίηση	Χρονικός ορίζοντας
Blending έως 20%	χαμηλή	χαμηλό	μέτριο	περιορισμένη	βραχυπρόθεσμος
Hydrogen -ready retrofit	μέτρια–υψηλή	μέτριο– υψηλό	μέτριο	υψηλότερη	μεσοπρόθεσμος
Νέο δίκτυο 100% H ₂	υψηλή	πολύ υψηλό	μεταβλητό	πλήρης	μακροπρόθεσμος

6.5 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ασφάλεια και συστήματα παρακολούθησης

Η ενσωμάτωση του υδρογόνου στα ενεργειακά δίκτυα συνδέεται άμεσα με τον στόχο της απανθρακοποίησης του ενεργειακού τομέα, ωστόσο η περιβαλλοντική και λειτουργική αξιολόγηση της τεχνολογίας απαιτεί πιο σύνθετη προσέγγιση από την απλή διαπίστωση ότι το υδρογόνο δεν παράγει διοξείδιο του άνθρακα κατά την τελική του χρήση. Η πραγματική περιβαλλοντική επίδοση εξαρτάται από το σύνολο της ενεργειακής αλυσίδας, δηλαδή από τη μέθοδο παραγωγής, τη μεταφορά, την αποθήκευση και τις απώλειες κατά τη λειτουργία του συστήματος (IEA, 2023; IRENA, 2023).

Από περιβαλλοντικής άποψης, το βασικό πλεονέκτημα του υδρογόνου είναι η δυνατότητα δραστηκής μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου όταν παράγεται από ανανεώσιμες πηγές μέσω ηλεκτρόλυσης (*green hydrogen*). Στην περίπτωση αυτή, η τελική χρήση του καυσίμου δεν οδηγεί σε άμεσες εκπομπές CO₂, καθιστώντας το ιδιαίτερα ελκυστικό για εφαρμογές όπου η πλήρης απανθρακοποίηση είναι δύσκολη με άλλα μέσα. Αντίθετα, όταν το υδρογόνο παράγεται από φυσικό αέριο χωρίς δέσμευση άνθρακα, το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα μπορεί να παραμένει σημαντικό.

Στην περίπτωση blending, η περιβαλλοντική ωφέλεια είναι πραγματική αλλά περιορισμένη. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ένα ποσοστό 20% υδρογόνου κατ' όγκο δεν αντιστοιχεί σε ισόποση ενεργειακή υποκατάσταση φυσικού αερίου, λόγω της χαμηλότερης ογκομετρικής ενεργειακής πυκνότητας του υδρογόνου. Συνεπώς, η πραγματική μείωση εκπομπών είναι μικρότερη από την ογκομετρική συμμετοχή του υδρογόνου και εξαρτάται έντονα από την προέλευσή του.

Πέρα από τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, ιδιαίτερη σημασία έχει και η ασφάλεια λειτουργίας. Το υδρογόνο παρουσιάζει χαρακτηριστικά που το διαφοροποιούν ουσιαστικά από το φυσικό αέριο και επιβάλλουν αυξημένες απαιτήσεις σχεδιασμού και επιτήρησης. Συγκεκριμένα, χαρακτηρίζεται από:

- πολύ χαμηλή ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης,
- ευρύ φάσμα ευφλεκτότητας στον αέρα,
- υψηλή ταχύτητα διάχυσης,
- χαμηλό μοριακό βάρος,
- αυξημένη ικανότητα διαρροής μέσω μικρών ανοιγμάτων.

Οι ιδιότητες αυτές σημαίνουν ότι ακόμη και μικρές διαρροές μπορούν να οδηγήσουν σε επικίνδυνες συγκεντρώσεις υπό ορισμένες συνθήκες, ιδίως σε κλειστούς ή ανεπαρκώς αεριζόμενους χώρους (ISO/TR 15916; DOE Hydrogen Safety).

Για τον λόγο αυτό, η ανίχνευση διαρροών αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο κάθε υποδομής υδρογόνου. Οι τεχνολογίες αισθητήρων που χρησιμοποιούνται σήμερα περιλαμβάνουν:

- καταλυτικούς αισθητήρες,
- ηλεκτροχημικούς αισθητήρες,
- αισθητήρες ημιαγωγών (MOS sensors),

- **θερμικούς αισθητήρες,**
- **οπτικούς αισθητήρες,**
- **αισθητήρες MEMS νέας γενιάς.**

Οι καταλυτικοί αισθητήρες αποτελούν μία από τις παλαιότερες και πιο ώριμες τεχνολογίες. Η λειτουργία τους βασίζεται στην καταλυτική οξείδωση του υδρογόνου και στην ανίχνευση της επακόλουθης θερμικής μεταβολής. Παρουσιάζουν καλή αξιοπιστία, αλλά η απόδοσή τους μπορεί να επηρεάζεται από περιβαλλοντικές συνθήκες και από παρουσία άλλων αερίων.

Οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες προσφέρουν υψηλή ευαισθησία και σχετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, ενώ οι αισθητήρες ημιαγωγών παρουσιάζουν πλεονεκτήματα ως προς το μικρό κόστος και την ευκολία ενσωμάτωσης. Αντίστοιχα, οι οπτικοί αισθητήρες εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια και ανθεκτικότητα σε απαιτητικά περιβάλλοντα, αλλά συνοδεύονται από υψηλότερο κόστος εγκατάστασης.

Η σύγχρονη τάση στον τομέα των ενεργειακών υποδομών είναι η μετάβαση από παθητικά συστήματα ασφάλειας σε έξυπνα συστήματα συνεχούς παρακολούθησης (*smart monitoring systems*). Στο πλαίσιο αυτό, αισθητήρες υδρογόνου μπορούν να ενσωματωθούν σε αρχιτεκτονικές **IoT (Internet of Things)**, επιτρέποντας συνεχή συλλογή δεδομένων και παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο.

Επιπλέον, η αξιοποίηση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) και μηχανικής μάθησης (Machine Learning – ML) αναμένεται να ενισχύσει σημαντικά τη λειτουργική ασφάλεια και την αποδοτικότητα των μελλοντικών υποδομών υδρογόνου. Μέσω της συνεχούς ανάλυσης δεδομένων από αισθητήρες πίεσης, θερμοκρασίας, παροχής και ανίχνευσης διαρροών, αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να εντοπίζουν ανωμαλίες λειτουργίας, να προβλέπουν πιθανές αστοχίες εξοπλισμού και να υποστηρίζουν στρατηγικές προγνωστικής συντήρησης (*predictive maintenance*). Η προσέγγιση αυτή μειώνει την πιθανότητα μη προγραμματισμένων διακοπών λειτουργίας, ενισχύει την επιχειρησιακή αξιοπιστία και επιτρέπει πιο αποδοτική διαχείριση των ενεργειακών υποδομών. Παράλληλα, η χρήση τέτοιων συστημάτων απαιτεί υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας δεδομένων, επαρκή κυβερνοασφάλεια και κατάλληλη κανονιστική υποστήριξη, ιδίως σε κρίσιμες ενεργειακές εγκαταστάσεις (IEA, 2023; Zhang et al., 2023).

Τέτοιες αρχιτεκτονικές μπορεί να βασίζονται σε τεχνολογίες επικοινωνίας όπως:

- LoRaWAN,
- NB-IoT,
- Wi-Fi,
- industrial Ethernet,
- SCADA integration.

Η διασύνδεση αυτή επιτρέπει:

- συνεχή επιτήρηση κρίσιμων σημείων δικτύου,
- έγκαιρη ανίχνευση μικροδιαρροών,
- predictive maintenance,
- καταγραφή ιστορικών δεδομένων λειτουργίας,
- ταχύτερη απόκριση σε συμβάντα.

Σε πιο προηγμένες εφαρμογές, τα δεδομένα αυτά μπορούν να αναλυθούν με αλγορίθμους τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης για πρόβλεψη αστοχιών πριν από την εμφάνισή τους.

Ωστόσο, η ψηφιοποίηση αυτή εισάγει και νέες προκλήσεις. Η εξάρτηση από διασυνδεδεμένα ψηφιακά συστήματα αυξάνει την έκθεση σε κινδύνους κυβερνοασφάλειας, σφάλματα αισθητήρων ή προβλήματα αξιοπιστίας επικοινωνίας. Κατά συνέπεια, η ασφαλής ανάπτυξη δικτύων υδρογόνου απαιτεί όχι μόνο μηχανολογική ασφάλεια αλλά και ανθεκτικότητα των πληροφοριακών συστημάτων.

Συνολικά, η περιβαλλοντική και λειτουργική αξιολόγηση δείχνει ότι το υδρογόνο διαθέτει σημαντικές δυνατότητες συμβολής στην ενεργειακή μετάβαση, υπό την προϋπόθεση ότι συνοδεύεται από κατάλληλη παραγωγική στρατηγική, αξιόπιστα συστήματα ασφάλειας και σύγχρονες τεχνολογίες παρακολούθησης. Η ασφαλής και αποδοτική ενσωμάτωσή του δεν αποτελεί απλώς θέμα καυσίμου, αλλά ολοκληρωμένο ζήτημα ενεργειακού σχεδιασμού και διαχείρισης υποδομών.

Κεφάλαιο 7: Το “χωριό υδρογόνου” – πιλοτικές εφαρμογές

7.1 Περιγραφή έργου και τεχνική αρχιτεκτονική πιλοτικών εφαρμογών υδρογόνου

Η ανάπτυξη πιλοτικών εφαρμογών υδρογόνου σε τοπικά ενεργειακά συστήματα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στάδια μετάβασης από τη θεωρητική και εργαστηριακή αξιολόγηση στην πραγματική λειτουργία ενεργειακών υποδομών. Τα έργα αυτά δεν αποσκοπούν μόνο στην τεχνική απόδειξη της δυνατότητας χρήσης του υδρογόνου, αλλά και στη διερεύνηση της λειτουργίας ολόκληρης της αλυσίδας αξίας σε πραγματικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένων των ζητημάτων ασφάλειας, αξιοπιστίας, λειτουργικού κόστους και κοινωνικής αποδοχής (IEA, 2023).

Στο πλαίσιο αυτό αναπτύχθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο το έργο **H100 Fife**, το οποίο αποτελεί μία από τις πλέον γνωστές και τεκμηριωμένες πιλοτικές εφαρμογές χρήσης υδρογόνου σε οικιακό επίπεδο. Το έργο υλοποιείται από την εταιρεία SGN στη Σκωτία και έχει σχεδιαστεί ως ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής, αποθήκευσης, διανομής και τελικής κατανάλωσης πράσινου υδρογόνου. Στόχος του είναι η τροφοδότηση έως περίπου 300 κατοικιών στις περιοχές Buckhaven και Denbeath με υδρογόνο για ανάγκες θέρμανσης και μαγειρέματος, μέσω ειδικού δικτύου διανομής αποκλειστικά υδρογόνου.

Η βασική αρχιτεκτονική του έργου περιλαμβάνει ηλεκτρολύτη που τροφοδοτείται από ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια, σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου, δίκτυο διανομής χαμηλής πίεσης και οικιακές συσκευές σχεδιασμένες ή προσαρμοσμένες για χρήση υδρογόνου. Με αυτόν τον τρόπο, το έργο λειτουργεί ως πλήρης δοκιμή ενός τοπικού ενεργειακού οικοσυστήματος υδρογόνου και όχι ως μεμονωμένη τεχνική εγκατάσταση. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αξιολόγηση τόσο της τεχνολογικής λειτουργίας όσο και της αλληλεπίδρασης μεταξύ υποδομών, φορέων λειτουργίας και τελικών χρηστών.

Η σημασία τέτοιων πιλοτικών εφαρμογών είναι ιδιαίτερα μεγάλη, διότι παρέχουν πραγματικά λειτουργικά δεδομένα για ζητήματα που δεν μπορούν να αξιολογηθούν επαρκώς σε εργαστηριακό επίπεδο. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται η συμπεριφορά των οικιακών εγκαταστάσεων, η λειτουργία τοπικών δικτύων υδρογόνου, οι απαιτήσεις συντήρησης, οι διαδικασίες έκτακτης απόκρισης και η κοινωνική αποδοχή της τεχνολογίας.

Αντίστοιχες προσεγγίσεις έχουν συζητηθεί και στην Ελλάδα. Ενδεικτικά, η Δημόσια Επιχείρηση Δικτύων Διανομής Αερίου (ΔΕΔΑ) παρουσίασε τα προηγούμενα έτη την ιδέα δημιουργίας ενός πιλοτικού «χωριού υδρογόνου» στη Δυτική Μακεδονία, με στόχο την κάλυψη ενεργειακών αναγκών μέσω χρήσης υδρογόνου και την αξιολόγηση δεδομένων παραγωγής, μεταφοράς και τελικής κατανάλωσης σε πραγματικές συνθήκες. Σύμφωνα με τις δημόσιες αναφορές, το εγχείρημα εξετάστηκε ως πιλοτικό έργο μικρής κλίμακας, με πληθυσμιακά χαρακτηριστικά έως περίπου 800 κατοίκους και εκτιμώμενο επενδυτικό κόστος της τάξης των 1,5–2,5 εκατ. ευρώ.

Ωστόσο, σε αντίθεση με το H100 Fife, τα δημόσια διαθέσιμα τεχνικά στοιχεία για το ελληνικό εγχείρημα παραμένουν περιορισμένα, ενώ δεν υπάρχουν μέχρι σήμερα εκτεταμένα δημοσιευμένα λειτουργικά δεδομένα που να επιτρέπουν πλήρη τεχνική αξιολόγηση. Για τον λόγο αυτό, η παρούσα εργασία χρησιμοποιεί κυρίως το H100 Fife ως τεκμηριωμένο παράδειγμα πιλοτικής εφαρμογής, ενώ η ελληνική περίπτωση παρουσιάζεται περισσότερο ως ένδειξη της αυξανόμενης σημασίας που αποκτούν τα έργα υδρογόνου και στον ελληνικό ενεργειακό σχεδιασμό.

Συνολικά, τα έργα τύπου *hydrogen village* ή τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων υδρογόνου αποτελούν ουσιαστικά πεδία δοκιμής για την αξιολόγηση της δυνατότητας ένταξης του υδρογόνου στην καθημερινή ενεργειακή κατανάλωση. Η αξία τους δεν έγκειται μόνο στην τεχνική λειτουργία των υποδομών, αλλά κυρίως στην παροχή πραγματικών δεδομένων για τη μετάβαση από τις πιλοτικές εφαρμογές σε ενδεχόμενες ευρύτερες ενεργειακές στρατηγικές.

7.2 Τεχνική και κοινωνική αξιολόγηση

Η αξιολόγηση πιλοτικών εφαρμογών υδρογόνου δεν περιορίζεται αποκλειστικά στην τεχνική λειτουργία του εξοπλισμού, αλλά επεκτείνεται στη συνολική λειτουργία ενός κοινωνικοτεχνικού συστήματος. Σε αντίθεση με βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή απομονωμένες υποδομές μεταφοράς και αποθήκευσης, τα έργα τύπου *hydrogen village* ενσωματώνουν το υδρογόνο στην καθημερινή κατανάλωση ενέργειας, γεγονός που καθιστά εξίσου σημαντικές τόσο τις τεχνικές όσο και τις κοινωνικές παραμέτρους αξιολόγησης (IEA, 2023).

Από τεχνικής πλευράς, το έργο H100 Fife παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον επειδή αποτελεί ένα από τα πρώτα ολοκληρωμένα παραδείγματα εφαρμογής δικτύου 100% υδρογόνου για οικιακή χρήση. Η αρχιτεκτονική του περιλαμβάνει παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης, αποθήκευση, δίκτυο διανομής χαμηλής πίεσης και τελική κατανάλωση σε κατοικίες μέσω ειδικά εγκατεστημένων λεβήτων και συσκευών. Η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος επιτρέπει την αξιολόγηση κρίσιμων τεχνικών παραμέτρων, όπως η σταθερότητα τροφοδοσίας, η αξιοπιστία του δικτύου, η συμπεριφορά του υδρογόνου σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και η απόδοση των οικιακών συσκευών.

Ιδιαίτερη σημασία έχει το γεγονός ότι το έργο δεν βασίζεται σε blending αλλά σε αποκλειστική χρήση υδρογόνου, γεγονός που επιτρέπει την αξιολόγηση συνθηκών λειτουργίας οι οποίες δεν μπορούν να διερευνηθούν επαρκώς σε εργαστηριακό περιβάλλον. Παράλληλα, η ύπαρξη ειδικής εγκατάστασης αποθήκευσης και dedicated distribution network προσφέρει δεδομένα για τη λειτουργία ενός πλήρους τοπικού ενεργειακού οικοσυστήματος υδρογόνου.

Ένα ακόμη σημαντικό τεχνικό στοιχείο είναι η ανάπτυξη νέων διαδικασιών λειτουργίας και συντήρησης. Σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία του έργου, απαιτήθηκε εκπαίδευση εξειδικευμένου προσωπικού και ανάπτυξη νέων πρωτοκόλλων για εγκατάσταση, επιθεώρηση και λειτουργία εξοπλισμού υδρογόνου. Ενδεικτικά, στο πλαίσιο του έργου εκπαιδεύτηκαν δεκάδες πιστοποιημένοι τεχνικοί και μηχανικοί για εργασίες σχετικές με δίκτυα και οικιακές εγκαταστάσεις υδρογόνου.

Παρά τα τεχνικά πλεονεκτήματα, η λειτουργία τέτοιων πιλοτικών έργων αναδεικνύει και σημαντικές προκλήσεις. Η παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης εξακολουθεί να παρουσιάζει υψηλό κόστος σε σύγκριση με το φυσικό αέριο, ενώ η ανάγκη δημιουργίας ξεχωριστών δικτύων, αποθηκευτικών εγκαταστάσεων και εξειδικευμένου εξοπλισμού αυξάνει σημαντικά τις επενδυτικές απαιτήσεις. Επιπλέον, η διατήρηση υψηλών επιπέδων ασφάλειας προϋποθέτει συνεχή παρακολούθηση, προηγμένα συστήματα ανίχνευσης διαρροών και αυστηρές διαδικασίες λειτουργίας.

Εξίσου κρίσιμη είναι η κοινωνική αξιολόγηση των έργων αυτών. Η επιτυχία ενός ενεργειακού συστήματος δεν εξαρτάται μόνο από την τεχνική του απόδοση αλλά και από τον βαθμό αποδοχής του από τους τελικούς χρήστες. Στην περίπτωση του H100 Fife, η

προσέγγιση βασίστηκε σε εθελοντική συμμετοχή των κατοίκων, με παροχή δωρεάν εγκατάστασης εξοπλισμού υδρογόνου, αντικατάσταση συσκευών και διατήρηση αντίστοιχου ενεργειακού κόστους με αυτό του φυσικού αερίου κατά τη διάρκεια του πιλοτικού προγράμματος.

Η κοινωνική διάσταση σχετίζεται άμεσα με ζητήματα αντίληψης κινδύνου και εμπιστοσύνης. Παρότι το υδρογόνο χρησιμοποιείται επί δεκαετίες στη βιομηχανία, η οικιακή χρήση του παραμένει σχετικά άγνωστη για το ευρύ κοινό. Για τον λόγο αυτό, το έργο ενσωμάτωσε δράσεις ενημέρωσης, χώρους επίδειξης κατοικιών (*demonstration homes*) και διαδικασίες αλληλεπίδρασης με την τοπική κοινωνία, ώστε να ενισχυθεί η εξοικείωση των πολιτών με τη νέα τεχνολογία.

Παράλληλα, η διεθνής συζήτηση γύρω από τα έργα οικιακής χρήσης υδρογόνου παραμένει έντονη. Ορισμένες αναλύσεις υποστηρίζουν ότι τέτοιες εφαρμογές μπορούν να συμβάλουν στη μελλοντική απανθρακοποίηση της θέρμανσης αξιοποιώντας μέρος των υφιστάμενων υποδομών φυσικού αερίου. Άλλες προσεγγίσεις θεωρούν ότι το υψηλό κόστος παραγωγής υδρογόνου και η αυξανόμενη διείσδυση τεχνολογιών όπως οι αντλίες θερμότητας ενδέχεται να περιορίσουν τον μελλοντικό ρόλο του υδρογόνου στον οικιακό τομέα.

Κατά συνέπεια, η αξιολόγηση ενός έργου όπως το H100 Fife δεν πρέπει να γίνεται αποκλειστικά με βάση την τεχνική επιτυχία λειτουργίας του δικτύου. Η πραγματική του αξία έγκειται κυρίως στη δυνατότητα παραγωγής λειτουργικών, οικονομικών και κοινωνικών δεδομένων που μπορούν να υποστηρίξουν μελλοντικές αποφάσεις ενεργειακής πολιτικής. Υπό αυτή την έννοια, τα έργα τύπου *hydrogen village* λειτουργούν περισσότερο ως πλατφόρμες δοκιμής και αξιολόγησης παρά ως άμεσο πρότυπο μαζικής εφαρμογής.

7.3 Συμπεράσματα από την πιλοτική εφαρμογή

Η ανάλυση του έργου H100 Fife αναδεικνύει τόσο τις δυνατότητες όσο και τους περιορισμούς που συνοδεύουν την ενσωμάτωση του υδρογόνου σε τοπικά ενεργειακά συστήματα. Παρότι το έργο βρίσκεται ακόμη σε φάση πιλοτικής ανάπτυξης και δεν έχουν δημοσιευθεί εκτεταμένα μακροχρόνια λειτουργικά αποτελέσματα, η μέχρι σήμερα

πορεία του παρέχει σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τη τεχνική εφικτότητα, τις απαιτήσεις υποδομών και τις κοινωνικές προκλήσεις τέτοιων εφαρμογών.

Ένα από τα βασικότερα συμπεράσματα είναι ότι η τεχνολογική αλυσίδα παραγωγής, αποθήκευσης, διανομής και τελικής χρήσης υδρογόνου μπορεί να υλοποιηθεί σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας με υψηλό επίπεδο τεχνικής ασφάλειας. Η χρήση εξειδικευμένων δικτύων πολυαιθυλενίου, η εγκατάσταση κατάλληλων συστημάτων ανίχνευσης και η εφαρμογή νέων πρωτοκόλλων λειτουργίας δείχνουν ότι είναι δυνατή η ανάπτυξη τοπικών ενεργειακών συστημάτων βασισμένων στο υδρογόνο, υπό την προϋπόθεση ύπαρξης αυστηρού κανονιστικού και τεχνικού πλαισίου. Η εμπειρία αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία για χώρες που εξετάζουν μελλοντικά σενάρια αξιοποίησης υδρογόνου σε δίκτυα διανομής ή σε ενεργειακές κοινότητες μικρής κλίμακας.

Παράλληλα, το έργο επιβεβαιώνει ότι η μετάβαση σε υποδομές υδρογόνου δεν αποτελεί απλή τεχνολογική αντικατάσταση του φυσικού αερίου. Απαιτούνται νέες εγκαταστάσεις παραγωγής, συστήματα αποθήκευσης, προσαρμοσμένος εξοπλισμός τελικής κατανάλωσης, εξειδικευμένο προσωπικό και διαφορετικές διαδικασίες λειτουργίας. Ως αποτέλεσμα, η ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων συνδέεται με σημαντικές επενδυτικές απαιτήσεις και υψηλό αρχικό κόστος, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για δίκτυα αποκλειστικής χρήσης υδρογόνου. Το στοιχείο αυτό αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την οικονομική βιωσιμότητα αντίστοιχων έργων.

Ιδιαίτερα σημαντικό είναι επίσης το συμπέρασμα ότι η κοινωνική αποδοχή αποτελεί κρίσιμο παράγοντα επιτυχίας. Η εμπειρία του H100 Fife δείχνει ότι η αποδοχή νέων ενεργειακών τεχνολογιών συνδέεται άμεσα με την ενημέρωση των χρηστών, την εμπιστοσύνη προς τους φορείς υλοποίησης και την αντίληψη ασφάλειας των κατοίκων. Η ενεργός συμμετοχή της τοπικής κοινωνίας, οι δράσεις ενημέρωσης και η εθελοντική ένταξη των κατοίκων στο πρόγραμμα αποτέλεσαν βασικά στοιχεία της πιλοτικής προσέγγισης. Η διαπίστωση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς υπογραμμίζει ότι η ενεργειακή μετάβαση δεν αποτελεί αποκλειστικά τεχνικό ζήτημα αλλά και κοινωνική διαδικασία.

Ένα ακόμη σημαντικό συμπέρασμα αφορά τον πραγματικό ρόλο των έργων τύπου *hydrogen village*. Τα έργα αυτά δεν θα πρέπει να θεωρούνται άμεσα πρότυπα μαζικής

εφαρμογής, αλλά κυρίως πλατφόρμες δοκιμών που επιτρέπουν τη συλλογή τεχνικών, λειτουργικών και οικονομικών δεδομένων σε πραγματικές συνθήκες. Μέσω αυτών των εφαρμογών μπορούν να αξιολογηθούν παράμετροι που δεν είναι δυνατόν να προσεγγιστούν πλήρως μέσω θεωρητικών μοντέλων ή εργαστηριακών δοκιμών, όπως η συμπεριφορά των χρηστών, η απόδοση ολοκληρωμένων συστημάτων και οι απαιτήσεις λειτουργίας σε βάθος χρόνου.

Στην ελληνική περίπτωση, οι δημόσιες συζητήσεις σχετικά με πιλοτικά έργα υδρογόνου, όπως η πρόταση της ΔΕΔΑ για ανάπτυξη «χωριού υδρογόνου» στη Δυτική Μακεδονία, καταδεικνύουν ότι η τεχνολογία αρχίζει να εντάσσεται σταδιακά στον εθνικό ενεργειακό σχεδιασμό. Ωστόσο, η περιορισμένη διαθεσιμότητα τεχνικών δεδομένων και η απουσία ολοκληρωμένων αποτελεσμάτων δεν επιτρέπουν προς το παρόν την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με την πρακτική εφαρμογή τέτοιων έργων στην Ελλάδα. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση παραμένει κυρίως θεωρητική και εξαρτάται από τη μελλοντική εξέλιξη αντίστοιχων πρωτοβουλιών.

Συνολικά, η εμπειρία από τις πιλοτικές εφαρμογές υποδεικνύει ότι το υδρογόνο μπορεί να αποτελέσει τεχνικά εφαρμόσιμη λύση σε επιλεγμένες ενεργειακές χρήσεις, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στρατηγικές απανθρακοποίησης. Παράλληλα, αναδεικνύεται ότι η μελλοντική αξιοποίησή του δεν θα εξαρτηθεί μόνο από τις τεχνολογικές εξελίξεις αλλά και από οικονομικούς, κοινωνικούς και κανονιστικούς παράγοντες, οι οποίοι θα καθορίσουν τον βαθμό και το εύρος της ενσωμάτωσής του στα ενεργειακά συστήματα των επόμενων δεκαετιών.

7.4 Προοπτικές εφαρμογής σε ευρωπαϊκό επίπεδο

Η εμπειρία από τις πιλοτικές εφαρμογές υδρογόνου που αναπτύσσονται τα τελευταία χρόνια στην Ευρώπη παρέχει πολύτιμα στοιχεία για τον μελλοντικό ρόλο του υδρογόνου στο ενεργειακό σύστημα. Παρότι οι περισσότερες εφαρμογές βρίσκονται ακόμη σε στάδιο επίδειξης ή πρώιμης εμπορικής ανάπτυξης, η συσσώρευση τεχνογνωσίας και λειτουργικών δεδομένων συμβάλλει στη σταδιακή ωρίμανση των τεχνολογιών παραγωγής, αποθήκευσης, μεταφοράς και τελικής χρήσης υδρογόνου. Στο πλαίσιο αυτό, τα πιλοτικά έργα λειτουργούν ως ενδιάμεσο στάδιο μεταξύ της ερευνητικής ανάπτυξης και της ευρείας εμπορικής αξιοποίησης (European Commission, 2020).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει αναγνωρίσει το υδρογόνο ως έναν από τους βασικούς πυλώνες της ενεργειακής μετάβασης και της επίτευξης κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050. Η Ευρωπαϊκή Στρατηγική για το Υδρογόνο προβλέπει σημαντική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος ηλεκτρόλυσης, ανάπτυξη διασυνοριακών υποδομών μεταφοράς και δημιουργία μιας ολοκληρωμένης ευρωπαϊκής αγοράς υδρογόνου. Παράλληλα, χρηματοδοτικά εργαλεία όπως το Innovation Fund, τα έργα Κοινού Ευρωπαϊκού Ενδιαφέροντος (IPCEI) και οι πρωτοβουλίες της Hydrogen Europe υποστηρίζουν την ανάπτυξη μεγάλων έργων παραγωγής και χρήσης πράσινου υδρογόνου (European Commission, 2020; Hydrogen Europe, 2024).

Σημαντικό μέρος των ευρωπαϊκών σχεδιασμών αφορά την αξιοποίηση υφιστάμενων υποδομών φυσικού αερίου. Μελέτες ευρωπαϊκών διαχειριστών δικτύων δείχνουν ότι μεγάλα τμήματα των σύγχρονων δικτύων μπορούν, υπό προϋποθέσεις, να προσαρμοστούν για μεταφορά μειγμάτων φυσικού αερίου και υδρογόνου ή ακόμη και καθαρού υδρογόνου σε ορισμένες περιπτώσεις. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να περιορίσει τις επενδυτικές απαιτήσεις σε σχέση με την ανάπτυξη νέων δικτύων αποκλειστικά για υδρογόνο, επιταχύνοντας παράλληλα την ένταξη της τεχνολογίας στο ενεργειακό σύστημα (ENTSOG & European Hydrogen Backbone, 2023).

Παρά τις θετικές προοπτικές, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικές προκλήσεις. Η οικονομική ανταγωνιστικότητα του πράσινου υδρογόνου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, το κόστος των ηλεκτρολυτών και την εξέλιξη των αγορών άνθρακα. Επιπλέον, η ενεργειακή απόδοση της συνολικής αλυσίδας παραγωγής και χρήσης υδρογόνου παραμένει χαμηλότερη σε σύγκριση με ορισμένες εναλλακτικές τεχνολογίες άμεσου εξηλεκτρισμού, γεγονός που δημιουργεί συνεχή συζήτηση σχετικά με τις βέλτιστες περιοχές εφαρμογής του.

Για τον λόγο αυτό, η σύγχρονη ευρωπαϊκή προσέγγιση τείνει να επικεντρώνει τη χρήση του υδρογόνου κυρίως σε τομείς όπου η άμεση ηλεκτροδότηση παρουσιάζει τεχνικές δυσκολίες. Τέτοιοι τομείς περιλαμβάνουν τη βαριά βιομηχανία, τη χαλυβουργία, τη χημική βιομηχανία, τη ναυτιλία, τις αερομεταφορές και τις εφαρμογές μεγάλης διάρκειας ενεργειακής αποθήκευσης. Αντίθετα, στον οικιακό τομέα και στις εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών, η μελλοντική έκταση χρήσης του υδρογόνου εξακολουθεί να αποτελεί αντικείμενο επιστημονικής και πολιτικής συζήτησης (IEA, 2023).

Για την Ελλάδα, οι ευρωπαϊκές εξελίξεις δημιουργούν σημαντικές ευκαιρίες αλλά και προκλήσεις. Η υψηλή διαθεσιμότητα ηλιακού και αιολικού δυναμικού μπορεί να υποστηρίξει την παραγωγή πράσινου υδρογόνου σε ανταγωνιστικό κόστος, ιδιαίτερα σε περιοχές που επηρεάζονται από την απολιγνιτοποίηση, όπως η Δυτική Μακεδονία. Παράλληλα, η γεωγραφική θέση της χώρας προσφέρει δυνατότητες συμμετοχής σε μελλοντικούς διαδρόμους μεταφοράς υδρογόνου της Νοτιοανατολικής Ευρώπης. Ωστόσο, η ανάπτυξη της αγοράς θα εξαρτηθεί από την ωρίμανση του κανονιστικού πλαισίου, τη διαθεσιμότητα επενδυτικών κεφαλαίων και την επιτυχή υλοποίηση των πρώτων πιλοτικών και εμπορικών έργων.

Συνολικά, οι πιλοτικές εφαρμογές που υλοποιούνται σήμερα στην Ευρώπη δεν αποτελούν μόνο τεχνολογικές δοκιμές αλλά και εργαλεία διαμόρφωσης της μελλοντικής ενεργειακής πολιτικής. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τα έργα αυτά αναμένεται να καθορίσουν σε σημαντικό βαθμό τον ρόλο που θα διαδραματίσει το υδρογόνο στο ευρωπαϊκό ενεργειακό μίγμα των επόμενων δεκαετιών. Η μελλοντική διείσδυσή του θα εξαρτηθεί από τον συνδυασμό τεχνολογικής ωρίμανσης, οικονομικής βιωσιμότητας, κοινωνικής αποδοχής και αποτελεσματικής υποστήριξης από τις ευρωπαϊκές και εθνικές πολιτικές ενέργειας.

Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

8.1 Συνολική αποτίμηση των αποτελεσμάτων

Η παρούσα εργασία εξέτασε τον ρόλο του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης και της προσπάθειας απανθρακοποίησης των σύγχρονων ενεργειακών συστημάτων. Μέσα από τη διερεύνηση των τεχνολογιών παραγωγής, αποθήκευσης, μεταφοράς και τελικής χρήσης, καθώς και μέσω της ανάλυσης υφιστάμενων και πιλοτικών εφαρμογών, αναδείχθηκαν τόσο οι δυνατότητες όσο και οι περιορισμοί που συνοδεύουν την ευρύτερη αξιοποίηση του υδρογόνου.

Από τη βιβλιογραφική ανάλυση προκύπτει ότι το υδρογόνο μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για την επίτευξη των στόχων κλιματικής ουδετερότητας, ιδιαίτερα σε τομείς όπου η άμεση ηλεκτροδότηση παρουσιάζει τεχνικές ή οικονομικές δυσκολίες. Η βαριά βιομηχανία, οι ενεργοβόρες παραγωγικές διαδικασίες, οι μεταφορές μεγάλων

αποστάσεων και οι εφαρμογές μεγάλης κλίμακας αποθήκευσης ενέργειας αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα τομέων στους οποίους το υδρογόνο μπορεί να προσφέρει ουσιαστικές λύσεις απανθρακοποίησης (IEA, 2023; European Commission, 2020).

Η ανάλυση των τεχνολογιών παραγωγής κατέδειξε ότι η ηλεκτρόλυση με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές αποτελεί τη βασική τεχνολογική διαδρομή για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου με μηδενικές ή σχεδόν μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι το κόστος παραγωγής εξακολουθεί να αποτελεί τον σημαντικότερο περιοριστικό παράγοντα για τη μαζική ανάπτυξη της αγοράς υδρογόνου, αν και η συνεχής μείωση του κόστους των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των ηλεκτρολυτών δημιουργεί θετικές προοπτικές για τα επόμενα χρόνια.

Σημαντικά συμπεράσματα προέκυψαν επίσης από τη διερεύνηση των τεχνολογιών αποθήκευσης και μεταφοράς. Οι διαφορετικές μέθοδοι αποθήκευσης, όπως η συμπίεσμένη μορφή, η υγροποίηση και οι χημικοί φορείς υδρογόνου, παρουσιάζουν διαφορετικά τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά, χωρίς να υφίσταται μία ενιαία βέλτιστη λύση για όλες τις εφαρμογές. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται από τις απαιτήσεις κάθε έργου, την κλίμακα εφαρμογής και τις διαθέσιμες υποδομές.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσίασε η διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης των υφιστάμενων δικτύων φυσικού αερίου για τη μεταφορά υδρογόνου. Η ανάλυση έδειξε ότι η προσθήκη περιορισμένων ποσοστών υδρογόνου σε δίκτυα φυσικού αερίου μπορεί να αποτελέσει ένα μεταβατικό βήμα προς την ανάπτυξη μιας οικονομίας υδρογόνου, μειώνοντας παράλληλα το κόστος δημιουργίας νέων υποδομών. Ωστόσο, η εκτεταμένη χρήση υψηλών ποσοστών ή καθαρού υδρογόνου προϋποθέτει σημαντικές τεχνικές προσαρμογές σε αγωγούς, εξοπλισμό και συστήματα τελικής κατανάλωσης.

Η μελέτη των πιλοτικών εφαρμογών, με χαρακτηριστικό παράδειγμα το έργο H100 Fife στη Σκωτία, κατέδειξε ότι η τεχνολογία είναι ήδη σε θέση να εφαρμοστεί σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Ταυτόχρονα, αναδείχθηκε ότι η επιτυχία τέτοιων έργων δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τεχνικούς παράγοντες αλλά και από ζητήματα κοινωνικής αποδοχής, κανονιστικού πλαισίου, οικονομικής βιωσιμότητας και συμμετοχής των τελικών χρηστών.

Στην ελληνική πραγματικότητα, η σταδιακή ανάπτυξη σχεδίων και πρωτοβουλιών σχετικών με το υδρογόνο υποδηλώνει ότι η τεχνολογία αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία στον εθνικό ενεργειακό σχεδιασμό. Η υψηλή διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η γεωγραφική θέση της χώρας και η ανάγκη αναπτυξιακού μετασχηματισμού περιοχών που επηρεάζονται από την απολιγνιτοποίηση δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για μελλοντικές επενδύσεις στον τομέα του υδρογόνου.

Συνολικά, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το υδρογόνο δεν αποτελεί καθολική λύση για όλες τις ενεργειακές χρήσεις, αλλά μπορεί να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο σε συγκεκριμένους τομείς της ενεργειακής μετάβασης. Η μελλοντική διεξόδυσή του θα εξαρτηθεί από την τεχνολογική εξέλιξη, τη μείωση του κόστους παραγωγής, την ανάπτυξη κατάλληλων υποδομών και τη διαμόρφωση ενός σταθερού κανονιστικού και επενδυτικού περιβάλλοντος που θα υποστηρίζει την ευρεία εφαρμογή του.

8.2 Περιορισμοί της έρευνας

Παρά την εκτενή βιβλιογραφική διερεύνηση και την ανάλυση σύγχρονων τεχνολογιών και εφαρμογών υδρογόνου, η παρούσα εργασία υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ερμηνεία των συμπερασμάτων.

Αρχικά, η εργασία βασίστηκε κυρίως σε δευτερογενή δεδομένα, τα οποία προέρχονται από επιστημονικές δημοσιεύσεις, τεχνικές εκθέσεις διεθνών οργανισμών, ευρωπαϊκές στρατηγικές και διαθέσιμα στοιχεία από έργα επίδειξης. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα εξαρτώνται από την ποιότητα, την πληρότητα και την επικαιρότητα των διαθέσιμων πηγών και δεν προέρχονται από πρωτογενή πειραματική έρευνα ή επιτόπιες μετρήσεις.

Ένας δεύτερος σημαντικός περιορισμός αφορά τη δυναμική εξέλιξη του τομέα του υδρογόνου. Οι τεχνολογίες παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου βρίσκονται σε φάση ταχείας ανάπτυξης, ενώ παράλληλα μεταβάλλονται συνεχώς οι οικονομικές παράμετροι που επηρεάζουν τη βιωσιμότητά τους, όπως το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, το κόστος των ηλεκτρολυτών και τα διαθέσιμα χρηματοδοτικά εργαλεία. Συνεπώς, ορισμένα τεχνικοοικονομικά δεδομένα που παρουσιάζονται στην

εργασία ενδέχεται να διαφοροποιηθούν τα επόμενα χρόνια λόγω της εξέλιξης της αγοράς και της τεχνολογίας.

Επιπλέον, η ανάλυση των πιλοτικών εφαρμογών περιορίστηκε από τη διαθεσιμότητα δημοσιευμένων στοιχείων. Παρότι εξετάστηκε διεξοδικά η περίπτωση του έργου H100 Fife, πολλά από τα έργα υδρογόνου που υλοποιούνται σήμερα στην Ευρώπη βρίσκονται ακόμη σε αρχικά στάδια ανάπτυξης ή δεν διαθέτουν επαρκή δημοσιοποιημένα λειτουργικά δεδομένα. Ως αποτέλεσμα, η αξιολόγηση βασίστηκε σε στοιχεία σχεδιασμού, τεχνικές αναφορές και ενδιάμεσα αποτελέσματα και όχι σε πλήρεις κύκλους λειτουργίας μεγάλης χρονικής διάρκειας.

Αντίστοιχα, η διερεύνηση της ελληνικής πραγματικότητας επηρεάστηκε από την περιορισμένη διαθεσιμότητα τεχνικών πληροφοριών σχετικά με ορισμένα έργα και πρωτοβουλίες υδρογόνου. Παρά το αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη υποδομών υδρογόνου στην Ελλάδα, αρκετές προτάσεις και σχεδιαζόμενες επενδύσεις βρίσκονται ακόμη σε στάδιο σχεδιασμού ή αδειοδότησης, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν επαρκή δεδομένα για πλήρη τεχνική και οικονομική αξιολόγηση.

Ένας ακόμη περιορισμός αφορά το εύρος της εργασίας. Η έρευνα επικεντρώθηκε κυρίως στις τεχνολογίες παραγωγής, αποθήκευσης, μεταφοράς και ενσωμάτωσης του υδρογόνου στις ενεργειακές υποδομές και δεν προχώρησε σε αναλυτική ποσοτική μοντελοποίηση συγκεκριμένων ενεργειακών συστημάτων. Δεν πραγματοποιήθηκαν, για παράδειγμα, προσομοιώσεις λειτουργίας δικτύων, αναλυτικές μελέτες βελτιστοποίησης ή λεπτομερείς οικονομικές αναλύσεις για συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές ή έργα.

Τέλος, η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων βασίστηκε κυρίως στη διεθνή βιβλιογραφία και στα διαθέσιμα στοιχεία από ευρωπαϊκές εφαρμογές. Η κοινωνική αποδοχή του υδρογόνου μπορεί να διαφοροποιείται σημαντικά μεταξύ χωρών και περιοχών, ανάλογα με τα τοπικά χαρακτηριστικά, τις ενεργειακές συνθήκες και το επίπεδο ενημέρωσης των πολιτών. Για τον λόγο αυτό, τα συμπεράσματα που αφορούν τη δημόσια αποδοχή της τεχνολογίας θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με τη δέουσα προσοχή.

Παρά τους παραπάνω περιορισμούς, η εργασία παρέχει μία ολοκληρωμένη επισκόπηση της υφιστάμενης κατάστασης στον τομέα του υδρογόνου και συμβάλλει στην κατανόηση των τεχνικών, οικονομικών και θεσμικών παραμέτρων που επηρεάζουν

τη μελλοντική ανάπτυξή του. Παράλληλα, αναδεικνύει πεδία στα οποία απαιτείται περαιτέρω έρευνα και συλλογή δεδομένων, ιδιαίτερα σε πραγματικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας.

8.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η ταχεία εξέλιξη των τεχνολογιών υδρογόνου, σε συνδυασμό με τους φιλόδοξους στόχους απανθρακοποίησης που έχουν τεθεί σε ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο, δημιουργεί ένα ευρύ πεδίο περαιτέρω επιστημονικής έρευνας. Παρότι τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος σε τεχνολογικό, κανονιστικό και επενδυτικό επίπεδο, εξακολουθούν να υπάρχουν κρίσιμα ερωτήματα σχετικά με τη βέλτιστη ενσωμάτωση του υδρογόνου στα μελλοντικά ενεργειακά συστήματα.

Ένα πρώτο πεδίο μελλοντικής έρευνας αφορά την τεχνοοικονομική αξιολόγηση της χρήσης υδρογόνου σε διαφορετικούς τομείς εφαρμογής. Η εξέλιξη του κόστους των ηλεκτρολυτών, των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των συστημάτων αποθήκευσης αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά τη μελλοντική ανταγωνιστικότητα του πράσινου υδρογόνου. Για τον λόγο αυτό, απαιτούνται επικαιροποιημένες αναλύσεις κόστους-οφέλους που να λαμβάνουν υπόψη διαφορετικά σενάρια τιμών ενέργειας, τεχνολογικής ωρίμανσης και πολιτικών στήριξης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η περαιτέρω διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης των υφιστάμενων δικτύων φυσικού αερίου για τη μεταφορά υδρογόνου. Αν και οι διαθέσιμες μελέτες υποδεικνύουν ότι η ανάμιξη υδρογόνου με φυσικό αέριο μπορεί να εφαρμοστεί σε περιορισμένα ποσοστά χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις των υποδομών, απαιτούνται πρόσθετα δεδομένα σχετικά με τη μακροχρόνια συμπεριφορά υλικών, τη γήρανση εξοπλισμού, τα φαινόμενα υδρογονοευθραυστότητας και τις επιπτώσεις στις τελικές συσκευές κατανάλωσης. Η διεξαγωγή πιλοτικών εφαρμογών μεγαλύτερης διάρκειας θα μπορούσε να συμβάλει ουσιαστικά στην κάλυψη αυτού του ερευνητικού κενού.

Ένα ακόμη σημαντικό αντικείμενο έρευνας αφορά την ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας. Η εποχιακή αποθήκευση ενέργειας αποτελεί μία από τις πλέον υποσχόμενες εφαρμογές του υδρογόνου, ιδιαίτερα σε

ενεργειακά συστήματα με υψηλή διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η αξιολόγηση τεχνολογιών όπως οι υπόγειες αποθήκες, τα συστήματα υγρού υδρογόνου, οι χημικοί φορείς υδρογόνου (LOHCs) και οι νέες μορφές στερεάς αποθήκευσης αποτελεί πεδίο με σημαντικές προοπτικές επιστημονικής και τεχνολογικής εξέλιξης.

Παράλληλα, ιδιαίτερη βαρύτητα αναμένεται να αποκτήσουν οι εφαρμογές ψηφιακών τεχνολογιών στη διαχείριση υποδομών υδρογόνου. Η αξιοποίηση τεχνητής νοημοσύνης, μηχανικής μάθησης και προηγμένων συστημάτων ανάλυσης δεδομένων μπορεί να συμβάλει στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας δικτύων, στην πρόβλεψη αστοχιών, στην ανάπτυξη συστημάτων προγνωστικής συντήρησης και στη βελτίωση της συνολικής ασφάλειας εγκαταστάσεων υδρογόνου. Η σύνδεση τεχνολογιών υδρογόνου με έξυπνα ενεργειακά δίκτυα (*smart grids*) αποτελεί ένα από τα πλέον δυναμικά ερευνητικά πεδία των επόμενων ετών.

Σημαντικό πεδίο μελλοντικής έρευνας αποτελεί επίσης η κοινωνική διάσταση της ενεργειακής μετάβασης. Η διερεύνηση της κοινωνικής αποδοχής τεχνολογιών υδρογόνου, η κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την αντίληψη κινδύνου και η αξιολόγηση της συμμετοχής των πολιτών σε πιλοτικά έργα μπορούν να συμβάλουν στη διαμόρφωση αποτελεσματικότερων στρατηγικών ενημέρωσης και εφαρμογής. Η εμπειρία από έργα όπως το H100 Fife καταδεικνύει ότι η επιτυχία των τεχνολογικών λύσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από την αποδοχή τους από την κοινωνία.

Για την ελληνική πραγματικότητα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εκπόνηση εξειδικευμένων μελετών σχετικά με τον ρόλο του υδρογόνου στις περιοχές μετάβασης μετά την απολιγνιτοποίηση, όπως η Δυτική Μακεδονία και η Μεγαλόπολη. Η αξιοποίηση του υψηλού δυναμικού ανανεώσιμων πηγών ενέργειας της χώρας, σε συνδυασμό με πιθανές μελλοντικές υποδομές μεταφοράς υδρογόνου, δημιουργεί ανάγκη για στοχευμένες τεχνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές αναλύσεις προσαρμοσμένες στις ελληνικές συνθήκες.

Τέλος, ιδιαίτερα χρήσιμη θα ήταν η μελλοντική αξιολόγηση πραγματικών δεδομένων από έργα που σήμερα βρίσκονται σε φάση ανάπτυξης ή πρώιμης λειτουργίας. Καθώς περισσότερα έργα υδρογόνου τίθενται σε λειτουργία στην Ευρώπη και διεθνώς, η διαθεσιμότητα λειτουργικών δεδομένων θα επιτρέψει ακριβέστερες συγκρίσεις μεταξύ τεχνολογικών επιλογών και θα συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση των συνθηκών υπό

τις οποίες το υδρογόνο μπορεί να προσφέρει τη μεγαλύτερη προστιθέμενη αξία στο ενεργειακό σύστημα.

Συνοψίζοντας, το υδρογόνο αποτελεί ένα πεδίο με σημαντικές ερευνητικές προοπτικές, όπου η τεχνολογική πρόοδος, η οικονομική βιωσιμότητα, η κοινωνική αποδοχή και η ψηφιακή καινοτομία αναμένεται να διαμορφώσουν το μέλλον της ενεργειακής μετάβασης. Οι εξελίξεις των επόμενων ετών θα καθορίσουν σε μεγάλο βαθμό τον τελικό ρόλο που θα διαδραματίσει το υδρογόνο στο ευρωπαϊκό και παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα.

8.4 Τελική αποτίμηση

Η μετάβαση προς ένα ενεργειακό σύστημα χαμηλών εκπομπών άνθρακα αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις του 21ου αιώνα. Η ανάγκη περιορισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η επιδίωξη ενεργειακής ασφάλειας οδηγούν στην αναζήτηση νέων τεχνολογικών λύσεων που μπορούν να υποστηρίξουν τη μετάβαση προς ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό μέλλον.

Στο πλαίσιο αυτό, το υδρογόνο αναδεικνύεται ως ένας ιδιαίτερα σημαντικός ενεργειακός φορέας, με δυνατότητα σύνδεσης διαφορετικών ενεργειακών τομέων και υποστήριξης εφαρμογών στις οποίες η άμεση ηλεκτροδότηση δεν αποτελεί πάντοτε τη βέλτιστη επιλογή. Η δυνατότητα παραγωγής του από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η αξιοποίησή του ως μέσου αποθήκευσης ενέργειας και η χρήση του σε βιομηχανικές, μεταφορικές και ενεργειακές εφαρμογές δημιουργούν σημαντικές προοπτικές για τη μελλοντική του ανάπτυξη.

Η παρούσα εργασία ανέδειξε ότι η τεχνολογία του υδρογόνου έχει πλέον υπερβεί το στάδιο της καθαρά ερευνητικής προσέγγισης και εισέρχεται σταδιακά σε φάση πιλοτικών και πρώιμων εμπορικών εφαρμογών. Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι εξακολουθούν να υφίστανται τεχνικές, οικονομικές και θεσμικές προκλήσεις που επηρεάζουν τον ρυθμό υιοθέτησής της. Η μείωση του κόστους παραγωγής πράσινου υδρογόνου, η ανάπτυξη κατάλληλων υποδομών μεταφοράς και αποθήκευσης, η διαμόρφωση σαφούς κανονιστικού πλαισίου και η ενίσχυση της κοινωνικής αποδοχής αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για την ευρύτερη αξιοποίησή του.

Για την Ελλάδα, το υδρογόνο μπορεί να αποτελέσει μία σημαντική ευκαιρία στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης και της μεταλιγνιτικής ανάπτυξης. Η υψηλή διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η γεωγραφική θέση της χώρας και οι ευρωπαϊκές πρωτοβουλίες για τη δημιουργία διασυνοριακών υποδομών υδρογόνου δημιουργούν ευνοϊκές προϋποθέσεις για την ανάπτυξη σχετικών επενδύσεων τα επόμενα χρόνια.

Καταληκτικά, το υδρογόνο δεν θα πρέπει να θεωρείται ως η μοναδική λύση για την ενεργειακή μετάβαση, αλλά ως ένα από τα βασικά εργαλεία ενός πολυδιάστατου ενεργειακού συστήματος που θα συνδυάζει ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, εξηλεκτρισμό, αποθήκευση ενέργειας και έξυπνες υποδομές. Η τελική έκταση της αξιοποίησής του θα εξαρτηθεί από τις τεχνολογικές εξελίξεις, τις οικονομικές συνθήκες και τις πολιτικές επιλογές των επόμενων δεκαετιών. Ωστόσο, τα διαθέσιμα στοιχεία δείχνουν ότι το υδρογόνο αναμένεται να διαδραματίσει ουσιαστικό ρόλο στη διαμόρφωση του ενεργειακού συστήματος του μέλλοντος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abe, J.O., Popoola, A.P.I., Ajenifuja, E., & Popoola, O.M. (2019). Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(29), 15072–15086.

American Petroleum Institute (API) (2021). *Pipeline Integrity Management and Inspection Guidelines*. Washington DC: API.

American Society of Mechanical Engineers (ASME) (2020). *ASME B31.12: Hydrogen Piping and Pipelines*. New York: ASME.

Andersson, J., & Grönkvist, S. (2019). Large-scale storage of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23), 11901–11919.

Ball, M., & Weeda, M. (2015). The hydrogen economy – Vision or reality? *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(25), 7903–7919.

Bossel, U. (2006). Does a hydrogen economy make sense? *Proceedings of the IEEE*, 94(10), 1826–1837.

BusinessNews (2022). ΔΕΔΑ: Πρότυπο χωριό υδρογόνου στη Δυτική Μακεδονία. Διαθέσιμο στο: <https://www.businessnews.gr>

Chakraborty, S., Roy, S., & Dhara, A. (2023). Hydrogen leak detection technologies and safety monitoring systems: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*.

Clean Hydrogen Joint Undertaking (2021). *Hydrogen Valleys Platform Report*. Brussels.

Clean Hydrogen Partnership (2024). *Annual Work Programme 2024*. Brussels. Διαθέσιμο στο: <https://www.clean-hydrogen.europa.eu>

CRAVE-H2 Project (2024). *Crete Valley for Renewable Energy and Hydrogen Technologies (CRAVE-H2)*. Διαθέσιμο στο: <https://crave-h2.eu>

Department of Energy (DOE) (2023). *Hydrogen Storage*. Washington DC: U.S. Department of Energy. Διαθέσιμο στο: <https://www.energy.gov>

ΔΕΔΑ (2022). Πρότυπο χωριό υδρογόνου στη Δυτική Μακεδονία. Διαθέσιμο στο: <https://www.deda.gr>

Energyworld (2024). North Project 1: Ξεκινά το πρώτο μεγάλο έργο πράσινου υδρογόνου στην Ελλάδα. Διαθέσιμο στο: <https://energyworld.gr>

Energypress (2024). Έργα υδρογόνου και ενεργειακές υποδομές στην Ελλάδα. Διαθέσιμο στο: <https://energypress.gr>

European Commission (2020). A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe. Brussels: European Commission. Διαθέσιμο στο: <https://eur-lex.europa.eu>

European Commission (2022). REPowerEU Plan. Brussels: European Commission. Διαθέσιμο στο: <https://commission.europa.eu>

European Hydrogen Backbone (2023). European Hydrogen Backbone: A European Hydrogen Infrastructure Vision Covering 28 Countries. Brussels. Διαθέσιμο στο: <https://ehb.eu>

GERG (2019). *Hydrogen Injection into Natural Gas Networks*. Brussels: European Gas Research Group.

Hellenic Hydrogen (n.d.). North Project 1 – Green Hydrogen Development Project. Διαθέσιμο στο: <https://hellenichydrogen.gr>

Hosseini, S.E. (2023). Hydrogen economy: Opportunities and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*.

Hosseini, S.E., & Wahid, M.A. (2016). Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 850–866.

Hydrogen Council (2021). *Hydrogen Insights 2021*. Brussels. Διαθέσιμο στο: <https://hydrogencouncil.com>

Hydrogen Council (2023). *Hydrogen Insights 2023*. Brussels. Διαθέσιμο στο: <https://hydrogencouncil.com>

Hydrogen Europe (2024). *Hydrogen Europe Position Paper 2024*. Brussels. Διαθέσιμο στο: <https://hydrogeneurope.eu>

HyDeploy Consortium (2023). *HyDeploy Final Project Report*. United Kingdom. Διαθέσιμο στο: <https://hydeploy.co.uk>

Hy4Heat Programme (2023). *Hy4Heat Programme Overview*. London. Διαθέσιμο στο: <https://www.gov.uk>

International Energy Agency (IEA) (2019). *The Future of Hydrogen*. Paris: International Energy Agency. Διαθέσιμο στο: <https://www.iea.org>

International Energy Agency (IEA) (2023). Global Hydrogen Review 2023. Paris: International Energy Agency. Διαθέσιμο στο: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>

International Organization for Standardization (ISO) (2018). ISO 31000: Risk Management – Guidelines. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization (ISO) (2019). ISO 3183: Petroleum and Natural Gas Industries – Steel Pipe for Pipeline Transportation Systems. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization (ISO) (2020). ISO 19880-1: Gaseous Hydrogen – Fueling Stations – Part 1: General Requirements. Geneva: ISO.

International Renewable Energy Agency (IRENA) (2022). Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor. Abu Dhabi: IRENA. Διαθέσιμο στο: <https://www.irena.org>

International Renewable Energy Agency (IRENA) (2023). World Energy Transitions Outlook 2023. Abu Dhabi: IRENA. Διαθέσιμο στο: <https://www.irena.org>

Kothari, R., Buddhi, D., & Sawhney, R.L. (2008). Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12(2), 553–563.

LiFO (2022). Πρώτο χωριό υδρογόνου στην Ελλάδα. Διαθέσιμο στο: <https://www.lifo.gr>

Melaina, M.W., Antonia, O., & Penev, M. (2013). Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory.

San Marchi, C., Somerday, B.P., & Robinson, S.L. (2020). Hydrogen embrittlement of pipeline steels: Challenges and mitigation strategies. Journal of Pipeline Engineering.

Schlapbach, L., & Züttel, A. (2001). Hydrogen-storage materials for mobile applications. Nature, 414, 353–358.

SGN (2024). H100 Fife Project Overview. Διαθέσιμο στο: <https://www.h100fife.co.uk>

Staffell, I., Scamman, D., Abad, A.V., Balcombe, P., Dodds, P.E., Ekins, P., Shah, N., & Ward, K.R. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 12(2), 463–491.

Valera-Medina, A., Xiao, H., Owen-Jones, M., David, W.I.F., & Bowen, P.J. (2021). Ammonia for power. *Progress in Energy and Combustion Science*, 69, 63–102.

Zhang, Y., Wang, J., Li, X., & Chen, H. (2023). Artificial intelligence applications in hydrogen infrastructure monitoring and predictive maintenance. *International Journal of Hydrogen Energy*.

Züttel, A. (2003). Materials for hydrogen storage. *Materials Today*, 6(9), 24–33.