

Αποθήκευση και Μεταφορά Υδρογόνου για την Παραγωγή Καθαρής Ενέργειας και η Σταδιακή Εισαγωγή ως Καύσιμο.

Κωνσταντίνος Μαμούκαρης

Πολιτικός Μηχανικός, Μηχανικός Συγκολλήσεων
και Μεταπτ. Φοιτητής ΔΧΤ/ΣΘΕΤ, ΕΑΠ

std131703@ac.eap.gr

Δρ. Μιχαήλ Φραγκιαδάκης Καθηγητής ΕΜΠ

Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

fragkiadakis.michalis@ac.eap.gr

Περίληψη – Η μετάβαση προς ένα ενεργειακό σύστημα χαμηλών εκπομπών άνθρακα αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις των τελευταίων δεκαετιών, καθώς η ανάγκη περιορισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και η σταδιακή απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα οδηγούν στην ανάπτυξη νέων ενεργειακών τεχνολογιών. Στο πλαίσιο αυτό, το υδρογόνο αναδεικνύεται ως ένας ιδιαίτερα σημαντικός ενεργειακός φορέας, με δυνατότητα συμβολής στην απανθρακοποίηση της βιομηχανίας, των μεταφορών και των ενεργειακών υποδομών. Η παρούσα εργασία εξετάζει ολοκληρωμένα τις τεχνολογίες παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου, με ιδιαίτερη έμφαση στη σταδιακή ενσωμάτωσή του στα υφιστάμενα δίκτυα φυσικού αερίου μέσω της πρακτικής του hydrogen blending και στην ανάπτυξη hydrogen-ready υποδομών. Μέσα από συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση και συγκριτική τεχνικοοικονομική αξιολόγηση αναλύονται οι κυριότερες τεχνολογίες αποθήκευσης και μεταφοράς, οι τεχνικές προκλήσεις που σχετίζονται με τη συμβατότητα των υλικών, την υδρογονοθραυστικότητα, τη λειτουργία των τελικών συστημάτων κατανάλωσης και τη συνολική αξιοπιστία των ενεργειακών δικτύων. Παράλληλα, παρουσιάζονται και αξιολογούνται σύγχρονες εφαρμογές, όπως τα έργα North Project 1 και CRAVE-H₂, καθώς και η έννοια των Hydrogen Villages, τα οποία αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα της σταδιακής μετάβασης προς μια οικονομία υδρογόνου. Από την ανάλυση προκύπτει ότι η αξιοποίηση του υδρογόνου μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην ενεργειακή μετάβαση, ωστόσο η ευρεία εφαρμογή του προϋποθέτει την αντιμετώπιση σημαντικών τεχνικών, οικονομικών και κανονιστικών προκλήσεων. Η σταδιακή εφαρμογή τεχνολογιών blending και η ανάπτυξη hydrogen-ready υποδομών αποτελούν ρεαλιστικές μεταβατικές λύσεις, οι οποίες μπορούν να διευκολύνουν την ασφαλή και αποδοτική ενσωμάτωση του υδρογόνου στο μελλοντικό ενεργειακό σύστημα.

Λέξεις-Κλειδιά: Υδρογόνο, ενεργειακή μετάβαση, αποθήκευση υδρογόνου, μεταφορά υδρογόνου, hydrogen blending.

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επίτευξη των στόχων για την κλιματική ουδετερότητα και η σταδιακή απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα αποτελούν βασικές προτεραιότητες της ευρωπαϊκής και διεθνούς ενεργειακής πολιτικής. Η

αυξανόμενη διεύθυνση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δημιουργεί νέες απαιτήσεις για την αποθήκευση ενέργειας, την ευελιξία των ενεργειακών συστημάτων και την ανάπτυξη εναλλακτικών καυσίμων που μπορούν να συμβάλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Στο πλαίσιο αυτό, το υδρογόνο αναγνωρίζεται ως ένας από τους σημαντικότερους ενεργειακούς φορείς για την υποστήριξη της ενεργειακής μετάβασης, καθώς μπορεί να αξιοποιηθεί σε τομείς όπου η άμεση ηλεκτροδότηση παρουσιάζει τεχνικούς ή οικονομικούς περιορισμούς (European Commission, 2020· IEA, 2023).

Η παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη κατάλληλων τεχνολογιών αποθήκευσης και μεταφοράς, δημιουργεί νέες δυνατότητες για την απανθρακοποίηση της βιομηχανίας, των μεταφορών και των ενεργειακών υποδομών. Ωστόσο, η ευρεία αξιοποίησή του συνοδεύεται από σημαντικές τεχνικές προκλήσεις που αφορούν την ενεργειακή απόδοση των τεχνολογιών παραγωγής, τις μεθόδους αποθήκευσης, τη μεταφορά μέσω αγωγών ή άλλων μέσων, καθώς και τη συμβατότητα των υφιστάμενων δικτύων φυσικού αερίου με μίγματα υδρογόνου ή μελλοντικά με καθαρό υδρογόνο (IRENA, 2022· Hydrogen Europe, 2024).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σταδιακή ενσωμάτωση του υδρογόνου στα υφιστάμενα δίκτυα φυσικού αερίου μέσω της πρακτικής του hydrogen blending, καθώς και η ανάπτυξη υποδομών hydrogen-ready, οι οποίες σχεδιάζονται ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν τη μελλοντική μετάβαση σε δίκτυα μεταφοράς και διανομής καθαρού υδρογόνου. Παράλληλα, η αξιοποίηση του υδρογόνου προϋποθέτει την αντιμετώπιση τεχνικών ζητημάτων που σχετίζονται με τη συμβατότητα των υλικών, την υδρογονοθραυστικότητα, τη λειτουργία του τελικού εξοπλισμού κατανάλωσης, την ασφάλεια των εγκαταστάσεων και τη συνολική αξιοπιστία των ενεργειακών υποδομών (ASME, 2020· GERG, 2019).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η συγκριτική αξιολόγηση των κυριότερων τεχνολογιών παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου, καθώς και η διερεύνηση της δυνατότητας σταδιακής ενσωμάτωσής του στις υφιστάμενες ενεργειακές υποδομές. Ιδιαίτερη

έμφαση δίνεται στην αξιολόγηση των τεχνολογιών hydrogen blending και hydrogen-ready, στην ανάλυση των τεχνικών περιορισμών και προκλήσεων που προκύπτουν από την εφαρμογή τους, καθώς και στην παρουσίαση αντιπροσωπευτικών εφαρμογών από τον ελληνικό χώρο, με έμφαση στα έργα North Project 1 και CRAVE-H₂, τα οποία αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα της αναπτυσσόμενης οικονομίας του υδρογόνου στην Ελλάδα.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων πραγματοποιήθηκε συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση διεθνών επιστημονικών δημοσιεύσεων, τεχνικών προτύπων, ευρωπαϊκών στρατηγικών και εκθέσεων διεθνών οργανισμών. Παράλληλα, εφαρμόστηκε συγκριτική τεχνικοοικονομική αξιολόγηση των διαθέσιμων τεχνολογιών παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου, καθώς και των τεχνικών λύσεων που προτείνονται για την προσαρμογή των υφιστάμενων ενεργειακών υποδομών, με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις δυνατότητες και τις προοπτικές της σταδιακής εισαγωγής του υδρογόνου ως καυσίμου.

II. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η παρούσα εργασία βασίζεται σε συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση με στόχο τη συγκέντρωση, αξιολόγηση και σύνθεση της σύγχρονης επιστημονικής γνώσης σχετικά με την παραγωγή, αποθήκευση, μεταφορά και αξιοποίηση του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα. Για την ανάπτυξη της μελέτης αξιοποιήθηκαν επιστημονικά άρθρα, μονογραφίες, τεχνικές εκθέσεις, διεθνή πρότυπα, ευρωπαϊκές στρατηγικές και επίσημες δημοσιεύσεις διεθνών οργανισμών, όπως ο International Energy Agency (IEA), ο International Renewable Energy Agency (IRENA), η European Commission, το Hydrogen Europe και ο European Hydrogen Backbone, καθώς και τεχνικά πρότυπα και κανονισμοί που αφορούν τις υποδομές υδρογόνου.

Η μεθοδολογική προσέγγιση περιλάμβανε αρχικά την καταγραφή και ταξινόμηση των διαθέσιμων τεχνολογιών παραγωγής υδρογόνου, με ιδιαίτερη έμφαση στη διάκριση μεταξύ γκρίζου, μπλε και πράσινου υδρογόνου και στην αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων και περιορισμών κάθε μεθόδου. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε συγκριτική τεχνική αξιολόγηση των κυριότερων τεχνολογιών αποθήκευσης, όπως το συμπιεσμένο και το υγροποιημένο υδρογόνο, η κρυοσυμπιεσμένη αποθήκευση, τα μεταλλικά υδρίδια και η αμμωνία ως χημικός φορέας υδρογόνου, λαμβάνοντας υπόψη τεχνικά χαρακτηριστικά, βαθμό τεχνολογικής ωριμότητας, πλεονεκτήματα και περιορισμούς.

Στο επόμενο στάδιο εξετάστηκαν οι διαθέσιμες τεχνολογίες μεταφοράς υδρογόνου, με έμφαση στη χρήση αγωγών, στις δυνατότητες μετατροπής των υφιστάμενων δικτύων φυσικού αερίου και στις απαιτήσεις ανάπτυξης νέων υποδομών αποκλειστικής μεταφοράς υδρογόνου. Παράλληλα, αξιολογήθηκαν οι τεχνικές προκλήσεις που σχετίζονται με τη συμβατότητα των υλικών, την υδρογονοθηραστικότητα, τη λειτουργία των τελικών συστημάτων κατανάλωσης και την εφαρμογή της τεχνολογίας hydrogen blending, καθώς και η έννοια των hydrogen-ready υποδομών ως μεταβατικής στρατηγικής

για την ενσωμάτωση του υδρογόνου στα υφιστάμενα ενεργειακά συστήματα.

Τέλος, η θεωρητική ανάλυση συμπληρώθηκε με τη μελέτη αντιπροσωπευτικών εφαρμογών από τον ελληνικό χώρο, μέσω της αξιολόγησης των έργων North Project 1 και CRAVE-H₂, τα οποία παρουσιάζουν διαφορετικές προσεγγίσεις στην παραγωγή, αποθήκευση και αξιοποίηση του πράσινου υδρογόνου. Η συγκριτική ανάλυση των τεχνολογιών και των εφαρμογών αυτών επέτρεψε την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη σημερινή τεχνολογική ωριμότητα του υδρογόνου, τις δυνατότητες αξιοποίησής του στις ενεργειακές υποδομές και τις βασικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την ευρύτερη εφαρμογή του.

III. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

A. Παραγωγή Υδρογόνου και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε ότι η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου παραγωγής υδρογόνου αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη συμβολή του στην ενεργειακή μετάβαση. Παρότι το γκρίζο υδρογόνο εξακολουθεί να κυριαρχεί στη σημερινή παγκόσμια παραγωγή λόγω του χαμηλού κόστους και της υψηλής τεχνολογικής ωριμότητας, η διαδικασία αυτή συνοδεύεται από σημαντικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και δεν συνάδει με τους μακροπρόθεσμους στόχους απανθρακοποίησης. Αντίστοιχα, το μπλε υδρογόνο αποτελεί μεταβατική λύση, καθώς η εφαρμογή τεχνολογιών δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα μειώνει σημαντικά τις εκπομπές, χωρίς όμως να εξαλείφει την εξάρτηση από το φυσικό αέριο.

Αντίθετα, η παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης νερού με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές αναδείχθηκε ως η πλέον βιώσιμη επιλογή για την επίτευξη ενός ενεργειακού συστήματος μηδενικών εκπομπών. Ωστόσο, η ευρεία εφαρμογή της εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας, τη μείωση του κόστους των ηλεκτρολυτών και τη συνεχή βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των σχετικών τεχνολογιών. Η συγκριτική αξιολόγηση έδειξε ότι, παρά το υψηλότερο σημερινό κόστος παραγωγής, το πράσινο υδρογόνο συγκεντρώνει τις μεγαλύτερες προοπτικές ανάπτυξης, καθώς αποτελεί τη μοναδική λύση που μπορεί να υποστηρίξει την πλήρη απανθρακοποίηση της ενεργειακής αλυσίδας.

Η ανάλυση των τεχνολογιών αποθήκευσης κατέδειξε ότι δεν υφίσταται μία καθολικά βέλτιστη λύση, αλλά ότι η επιλογή εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή, την απαιτούμενη ποσότητα αποθήκευσης, τον χρονικό ορίζοντα και τις απαιτήσεις μεταφοράς. Η αποθήκευση ως συμπιεσμένο υδρογόνο (CH₂) αποτελεί σήμερα την πλέον ώριμη και ευρέως εφαρμοζόμενη τεχνολογία, ιδιαίτερα στις μεταφορές και στις βιομηχανικές εφαρμογές, ενώ η υγροποίηση (LH₂) προσφέρει σημαντικά μεγαλύτερη ογκομετρική πυκνότητα με αντάλλαγμα αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις και τεχνική πολυπλοκότητα. Παράλληλα, τεχνολογίες όπως η κρυοσυμπιεσμένη αποθήκευση, τα μεταλλικά υδρίδια και η αμμωνία ως χημικός φορέας υδρογόνου παρουσιάζουν σημαντικές προοπτικές για εξειδικευμένες εφαρμογές, χωρίς όμως να έχουν ακόμη αποκτήσει την ίδια τεχνολογική ωριμότητα.

Η συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών παραγωγής και αποθήκευσης ανέδειξε ότι η ανάπτυξη της οικονομίας του υδρογόνου δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τη βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας, αλλά από τον αποτελεσματικό συνδυασμό των επιμέρους τεχνολογιών σε ολόκληρη την ενεργειακή αλυσίδα. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας παραγωγής επηρεάζει άμεσα τις απαιτήσεις αποθήκευσης, μεταφοράς και τελικής αξιοποίησης του υδρογόνου, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ολοκληρωμένη αξιολόγηση όλων των σταδίων του κύκλου ζωής του ως ενεργειακού φορέα.

B. Μεταφορά Υδρογόνου και Προσαρμογή Ενεργειακών Υποδομών

Η συγκριτική αξιολόγηση των διαθέσιμων τεχνολογιών μεταφοράς ανέδειξε ότι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος διακίνησης υδρογόνου αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνικές προκλήσεις για την ευρεία εφαρμογή του ως ενεργειακού φορέα. Η επιλογή του κατάλληλου μέσου μεταφοράς εξαρτάται από την απόσταση, την απαιτούμενη ποσότητα υδρογόνου, την τελική χρήση και το συνολικό κόστος του κύκλου εφοδιασμού. Για μικρές και μεσαίες αποστάσεις η μεταφορά μέσω αγωγών εμφανίζεται ως η πλέον αποδοτική λύση, ενώ για μεγάλες αποστάσεις ή διεθνείς μεταφορές αξιοποιούνται εναλλακτικές μορφές, όπως το υδροποιημένο υδρογόνο, η αμμωνία ή άλλοι χημικοί φορείς υδρογόνου.

Η ανάλυση της διεθνούς βιβλιογραφίας έδειξε ότι η αξιοποίηση υφιστάμενων δικτύων φυσικού αερίου μπορεί να επιταχύνει σημαντικά την ανάπτυξη της οικονομίας του υδρογόνου, περιορίζοντας τις ανάγκες για νέες υποδομές και μειώνοντας το απαιτούμενο επενδυτικό κόστος. Στο πλαίσιο αυτό, η τεχνολογία hydrogen blending, δηλαδή η ανάμιξη υδρογόνου με φυσικό αέριο σε ελεγχόμενες αναλογίες, αναδεικνύεται ως μία ρεαλιστική μεταβατική λύση, καθώς επιτρέπει τη σταδιακή εισαγωγή του υδρογόνου στα υφιστάμενα ενεργειακά συστήματα χωρίς την άμεση αντικατάσταση του συνόλου του δικτύου. Παρά τα πλεονεκτήματά της, η πρακτική αυτή εμφανίζει περιορισμένο δυναμικό απανθρακοποίησης, δεδομένου ότι η ενεργειακή συμμετοχή του υδρογόνου παραμένει σημαντικά μικρότερη από τη συμμετοχή του κατ' όγκο στο μίγμα.

Η αξιολόγηση των τεχνικών επιπτώσεων της εισαγωγής υδρογόνου στα δίκτυα φυσικού αερίου κατέδειξε ότι οι ιδιαίτερες φυσικοχημικές ιδιότητές του επηρεάζουν ουσιαστικά τη λειτουργία των υποδομών. Η υψηλότερη ταχύτητα φλόγας, το ευρύτερο εύρος ευφλεκτότητας, η χαμηλότερη απαιτούμενη ενέργεια ανάφλεξης και οι μεταβολές του δείκτη Wobbe επηρεάζουν τόσο τη συμπεριφορά των συστημάτων καύσης όσο και τη λειτουργία του τελικού εξοπλισμού κατανάλωσης. Παράλληλα, η αυξημένη διαπερατότητα του υδρογόνου και η διαφορετική συμπεριφορά του κατά τη συμπίεση και μεταφορά δημιουργούν πρόσθετες απαιτήσεις για τον σχεδιασμό αγωγών, συμπίεστών, βαλβίδων, μετρητικών διατάξεων και συστημάτων στεγανότητας.

Ιδιαίτερη σημασία αποδόθηκε στη συμβατότητα των μεταλλικών υλικών με το υδρογόνο. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε ότι η υδρογονοθραυστικότητα (hydrogen embrittlement) αποτελεί έναν από τους

σημαντικότερους μηχανισμούς υποβάθμισης της μηχανικής συμπεριφοράς χαλύβδινων κατασκευών, ιδιαίτερα σε χάλυβες υψηλής αντοχής και σε εγκαταστάσεις υψηλής πίεσης. Επιπλέον, στις συγκολλήσεις και στις θερμικά επηρεασμένες ζώνες είναι δυνατόν, υπό συγκεκριμένες μεταλλουργικές και μηχανικές συνθήκες, να εμφανιστεί υδρογονορηγμάτωση (hydrogen cracking), γεγονός που καθιστά κρίσιμη την επιλογή κατάλληλων υλικών, διαδικασιών συγκόλλησης και πρακτικών επιθεώρησης κατά τον σχεδιασμό και τη λειτουργία υποδομών υδρογόνου.

Παράλληλα, η ανάλυση των τελικών συστημάτων κατανάλωσης ανέδειξε ότι η μετάβαση προς υψηλότερες συγκεντρώσεις υδρογόνου προϋποθέτει τη σταδιακή αναβάθμιση του υφιστάμενου εξοπλισμού. Οι σύγχρονες υποδομές hydrogen-ready, όπως λέβητες, καυστήρες και λοιπός εξοπλισμός που μπορούν να λειτουργήσουν αρχικά με φυσικό αέριο ή μίγματα και μελλοντικά με καθαρό υδρογόνο, αποτελούν μία ιδιαίτερα σημαντική μεταβατική στρατηγική. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη σταδιακή προσαρμογή των ενεργειακών συστημάτων, περιορίζοντας το οικονομικό κόστος και μειώνοντας τον κίνδυνο τεχνολογικής απαξίωσης του υφιστάμενου εξοπλισμού.

Συνολικά, η τεχνική αξιολόγηση έδειξε ότι η μετάβαση προς την οικονομία του υδρογόνου δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την ανάπτυξη αποδοτικότερων τεχνολογιών παραγωγής, αλλά κυρίως από την ολοκληρωμένη προσαρμογή των ενεργειακών υποδομών. Η σταδιακή εφαρμογή τεχνολογιών hydrogen blending και η ανάπτυξη hydrogen-ready δικτύων και εγκαταστάσεων αποτελούν ρεαλιστικά ενδιάμεσα βήματα, τα οποία μπορούν να υποστηρίξουν την ασφαλή και οικονομικά βιώσιμη ενσωμάτωση του υδρογόνου στο ενεργειακό σύστημα έως την πλήρη ανάπτυξη υποδομών αποκλειστικής χρήσης υδρογόνου.

C. Ελληνικές Εφαρμογές και Προοπτικές Ανάπτυξης της Οικονομίας του Υδρογόνου

Η διερεύνηση της ελληνικής πραγματικότητας ανέδειξε ότι η χώρα βρίσκεται σε μεταβατικό στάδιο όσον αφορά την ανάπτυξη της οικονομίας του υδρογόνου, με τις πρώτες οργανωμένες πρωτοβουλίες να επικεντρώνονται κυρίως στην παραγωγή πράσινου υδρογόνου, στην ανάπτυξη πιλοτικών εφαρμογών και στη δημιουργία ολοκληρωμένων ενεργειακών οικοσυστημάτων. Η ανάλυση των έργων North Project 1 και CRAVE-H₂ έδειξε ότι, παρότι ακολουθούν διαφορετικές τεχνολογικές και αναπτυξιακές προσεγγίσεις, εξυπηρετούν έναν κοινό στρατηγικό στόχο, δηλαδή τη σταδιακή ενσωμάτωση του υδρογόνου στο ελληνικό ενεργειακό σύστημα και την απόκτηση τεχνογνωσίας σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Το North Project 1 αντιπροσωπεύει μια προσέγγιση μεγάλης κλίμακας, με επίκεντρο την παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης και τη σύνδεσή του με βιομηχανικές εφαρμογές, συστήματα συμπαραγωγής και δίκτυα τηλεθέρμανσης στη Δυτική Μακεδονία. Αντίθετα, το CRAVE-H₂ εστιάζει στην ανάπτυξη ενός περιφερειακού οικοσυστήματος υδρογόνου στην Κρήτη, συνδυάζοντας την παραγωγή, την αποθήκευση και την αξιοποίηση του υδρογόνου σε εφαρμογές μεταφορών, ηλεκτροπαραγωγής και παροχής ενεργειακών υπηρεσιών.

Η συγκριτική αξιολόγηση των δύο έργων ανέδειξε ότι οι διαφορετικές αυτές προσεγγίσεις είναι συμπληρωματικές και αντανακλούν δύο διακριτές στρατηγικές ανάπτυξης: αφενός τη δημιουργία κεντρικών υποδομών μεγάλης κλίμακας και αφετέρου την ανάπτυξη αποκεντρωμένων ενεργειακών οικοσυστημάτων.

Παράλληλα, η βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε ότι η έννοια των Hydrogen Villages αποτελεί μία από τις πλέον ενδιαφέρουσες εφαρμογές της σταδιακής ενεργειακής μετάβασης. Η ανάπτυξη τέτοιων ενεργειακών κοινοτήτων επιτρέπει την πιλοτική αξιολόγηση τεχνολογιών παραγωγής, αποθήκευσης, διανομής και τελικής χρήσης υδρογόνου σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, παρέχοντας πολύτιμα δεδομένα για την τεχνική αξιοπιστία, την ασφάλεια, την κοινωνική αποδοχή και τη συνολική οικονομική βιωσιμότητα των σχετικών υποδομών. Η εμπειρία που αποκτάται από τις εφαρμογές αυτές συμβάλλει ουσιαστικά στη σταδιακή μετάβαση από πιλοτικά έργα σε ευρύτερη εμπορική αξιοποίηση του υδρογόνου.

Συνολικά, η ανάλυση των ελληνικών εφαρμογών καταδεικνύει ότι η μετάβαση προς μια οικονομία υδρογόνου δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την τεχνολογική πρόοδο, αλλά απαιτεί τον συντονισμό ενεργειακής πολιτικής, επενδύσεων, κανονιστικού πλαισίου και ανάπτυξης κατάλληλων υποδομών. Τα υπό εξέλιξη έργα αποτελούν σημαντικά βήματα προς αυτήν την κατεύθυνση και αναμένεται να συμβάλουν καθοριστικά στη δημιουργία της απαραίτητης τεχνογνωσίας και εμπειρίας για την ευρύτερη αξιοποίηση του υδρογόνου στην Ελλάδα.

D. Συνολική Αξιολόγηση

Η συνολική αξιολόγηση των διαθέσιμων τεχνολογιών και των σύγχρονων εφαρμογών καταδεικνύει ότι το υδρογόνο διαθέτει τις προϋποθέσεις να αποτελέσει βασικό πυλώνα του μελλοντικού ενεργειακού συστήματος, ιδιαίτερα στους τομείς όπου η άμεση ηλεκτροδότηση δεν αποτελεί τεχνικά ή οικονομικά βιώσιμη επιλογή. Η δυνατότητα παραγωγής του από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η αξιοποίησή του ως μέσου αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης διάρκειας και η χρήση του στη βιομηχανία, στις μεταφορές και στην ηλεκτροπαραγωγή αναδεικνύουν τον πολυδιάστατο ρόλο του στην ενεργειακή μετάβαση.

Η ανάλυση ανέδειξε ότι η ευρεία εφαρμογή του υδρογόνου δεν εξαρτάται από μία μεμονωμένη τεχνολογική εξέλιξη, αλλά από τη συνδυασμένη πρόοδο σε ολόκληρη την αλυσίδα αξίας, η οποία περιλαμβάνει την παραγωγή, την αποθήκευση, τη μεταφορά, τη διανομή και την τελική κατανάλωση. Παράλληλα, η τεχνική και τεχνοοικονομική αξιολόγηση έδειξε ότι κάθε στάδιο παρουσιάζει διαφορετικό βαθμό τεχνολογικής ωριμότητας, διαφορετικές απαιτήσεις επένδυσης και διαφορετικές τεχνικές προκλήσεις, γεγονός που καθιστά αναγκαία την επιλογή λύσεων προσαρμοσμένων στις ιδιαίτερες απαιτήσεις κάθε εφαρμογής.

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία ανέδειξε ότι το υδρογόνο αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους ενεργειακούς φορείς για την υποστήριξη της ενεργειακής μετάβασης και της επίτευξης των στόχων απανθρακοποίησης. Η δυνατότητα

παραγωγής του από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σε συνδυασμό με την αξιοποίησή του σε τομείς όπου ο άμεσος εξηλεκτρισμός παρουσιάζει περιορισμούς, του προσδίδει ιδιαίτερη στρατηγική σημασία για τα μελλοντικά ενεργειακά συστήματα. Ωστόσο, η αξιοποίησή του δεν αποτελεί αυτόνομη λύση, αλλά μέρος ενός ευρύτερου ενεργειακού πλαισίου που συνδυάζει τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τις τεχνολογίες αποθήκευσης και τις κατάλληλες ενεργειακές υποδομές.

Η συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών παραγωγής κατέδειξε ότι το πράσινο υδρογόνο αποτελεί τη μοναδική μακροπρόθεσμα βιώσιμη επιλογή για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας, παρά το υψηλότερο σημερινό κόστος παραγωγής και τις αυξημένες απαιτήσεις σε ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Αντίστοιχα, η ανάλυση των τεχνολογιών αποθήκευσης και μεταφοράς ανέδειξε ότι δεν υφίσταται μία καθολικά βέλτιστη τεχνική λύση, αλλά ότι η επιλογή εξαρτάται από τις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής, την απαιτούμενη κλίμακα, τον χρονικό ορίζοντα αποθήκευσης και το συνολικό κόστος του ενεργειακού κύκλου.

Παράλληλα, η αξιολόγηση των υφιστάμενων ενεργειακών υποδομών έδειξε ότι η σταδιακή ενσωμάτωση του υδρογόνου μέσω τεχνολογιών hydrogen blending και η ανάπτυξη εξοπλισμού και δικτύων hydrogen-ready αποτελούν ρεαλιστικές μεταβατικές στρατηγικές. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αξιοποίηση σημαντικού μέρους των υφιστάμενων υποδομών, περιορίζοντας τις αρχικές επενδυτικές απαιτήσεις και διευκολύνοντας τη σταδιακή διείσδυση του υδρογόνου στην ενεργειακή αγορά. Ωστόσο, η επιτυχής εφαρμογή της προϋποθέτει την αντιμετώπιση τεχνικών ζητημάτων που σχετίζονται με τη συμβατότητα των υλικών, την υδρογονοθραυστικότητα, τη λειτουργία των τελικού εξοπλισμού, την ασφάλεια και τη συνολική αξιοπιστία των δικτύων.

Η ανάλυση των ελληνικών εφαρμογών επιβεβαίωσε ότι η Ελλάδα διαθέτει σημαντικές δυνατότητες ανάπτυξης της οικονομίας του υδρογόνου, αξιοποιώντας τόσο το υψηλό δυναμικό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όσο και τις υφιστάμενες ενεργειακές υποδομές. Τα έργα North Project 1 και CRAVE-H₂ αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα διαφορετικών αλλά συμπληρωματικών προσεγγίσεων, οι οποίες μπορούν να συμβάλουν στην απόκτηση τεχνογνωσίας και στη δημιουργία των απαραίτητων προϋποθέσεων για τη σταδιακή ανάπτυξη μιας εθνικής αγοράς υδρογόνου.

Συνολικά, προκύπτει ότι η μετάβαση προς την οικονομία του υδρογόνου αποτελεί μια σύνθετη και μακροχρόνια διαδικασία, η οποία απαιτεί συνδυασμό τεχνολογικής εξέλιξης, κατάλληλου θεσμικού πλαισίου, επενδύσεων σε υποδομές και συνεχούς επιστημονικής έρευνας. Η αξιοποίηση του υδρογόνου αναμένεται να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση ενός ασφαλέστερου, περισσότερο ευέλικτου και περιβαλλοντικά βιώσιμου ενεργειακού συστήματος, συμβάλλοντας ουσιαστικά στην επίτευξη των ευρωπαϊκών και διεθνών στόχων για την κλιματική ουδετερότητα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- American Society of Mechanical Engineers (ASME). (2020). ASME B31.12: Hydrogen Piping and Pipelines. New York: ASME.
- CRAVE-H2 Project. (2024). Crete Valley for Renewable Energy and Hydrogen Technologies (CRAVE-H2). Διαθέσιμο στο: <https://crave-h2.eu>
- European Commission. (2020). A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe. Brussels: European Commission. Διαθέσιμο στο: <https://eur-lex.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>
- 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>
- 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 Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor. Abu Dhabi: IRENA. Διαθέσιμο στο: <https://www.irena.org>
- San Marchi, C., Somerday, B. P., & Robinson, S. L. (2020). Hydrogen embrittlement of pipeline steels: Challenges and mitigation strategies. Journal of Pipeline Engineering.