

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΕΓΧΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ: ΠΡΟΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΕΝΑΡΙΑ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ

Α. Τσακανίκας^{1,*}, Ε. Βουτσάς², Σ. Κυρίμης¹, Π. Δήμας¹

¹Εργαστήριο Βιομηχανικής και Ενεργειακής Οικονομίας, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα
Ελλάδα

²Εργαστήριο Θερμοδυναμικής και Φαινομένων Μεταφοράς, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ,
Αθήνα Ελλάδα

(*atsaka@central.ntua.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ένταξη και καθιέρωση του υδρογόνου στην ενεργειακή αγορά αποτελεί έναν κύριο στόχο και μια πρόκληση τα τελευταία χρόνια, διότι, όταν παράγεται με «πράσινο» τρόπο, πρόκειται για ένα καθαρό καύσιμο με μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ιδανική λύση στην περιβαλλοντική κρίση, η οποία με το πέρασμα των χρόνων εντείνεται ολοένα και περισσότερο. Η χρήση του υδρογόνου επίσης, θα διαμορφώσει μια ποικιλόμορφη και πιο ευέλικτη ενεργειακή αγορά. Η έγχυση του υδρογόνου στο υφιστάμενο δίκτυο φυσικού αερίου αποτελεί ένα κομβικό σημείο στην πορεία για μια οικονομία υδρογόνου, με κύριο προτέρημα την αποφυγή δημιουργίας νέων υποδομών. Στην προσπάθεια αυτή είναι καθοριστικός ο ρόλος των stakeholders και των υποστηρικτικών πολιτικών, κυρίως από την Ευρωπαϊκή Ένωση.

Στη μελέτη διερευνώνται οι κρίσιμες παράμετροι σκοπιμότητας και δομείται ο σκελετός για μια ενδεχόμενη επένδυση. Με εργαλείο τον σκελετό αυτό, μπορεί να αναλυθεί σε πρώιμο στάδιο η κερδοφορία, μέσω δεικτών όπως το Περιθώριο Κέρδους, ο Ρυθμός Επιστροφής Κεφαλαίου, καθώς και το κοινωνικό-περιβαλλοντικό όφελος από την εξοικονόμηση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στο πλαίσιο της μετάβασης σε μια πιο «πράσινη» πηγή ενέργειας.

Τέλος μελετάται η επιρροή διακριθέντων παραμέτρων οι οποίες προέκυψαν από την ανάλυση της επένδυσης στα κέρδη του εν λόγω εγχειρήματος. Αρχικά, με βάση τα 15 γνωστά σενάρια ρυθμών ροής υδρογόνου και φυσικού αερίου, εξετάζονται και διερευνώνται οι βέλτιστες τιμές για τη δυναμικότητα του συστήματος και την περιεκτικότητα του υδρογόνου στο blend, όπου διαπιστώνεται ότι μπορεί να σημειωθεί κέρδος σε υψηλές δυναμικότητες φυσικού αερίου, για 10% υδρογόνο. Έπειτα, διενεργείται ανάλυση ευαισθησίας, κατά την οποία εφαρμόζονται ποσοστιαίες μεταβολές σε κρίσιμες μεταβλητές της επένδυσης και εξετάζεται η επιρροή τους στο κέρδος. Με αυτό τον τρόπο εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με το ποιες παράμετροι επηρεάζουν καθοριστικά την κερδοφορία του εγχειρήματος και χρήζουν μεγαλύτερης προσοχής κατά την εκκίνηση της επένδυσης. Καθοριστικό ρόλο στην κερδοφορία της επένδυσης διαδραματίζει η τιμολόγηση του υδρογόνου, επομένως πρέπει να καταστρωθεί μια στρατηγική για την προσέγγιση των πελατών και την αύξηση των εσόδων από την πώληση του υδρογόνου.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Πράσινο υδρογόνο, καινοτόμες ενεργειακές τεχνολογίες, κλιματική αλλαγή, ενεργειακή αγορά, μελέτη σκοπιμότητας

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

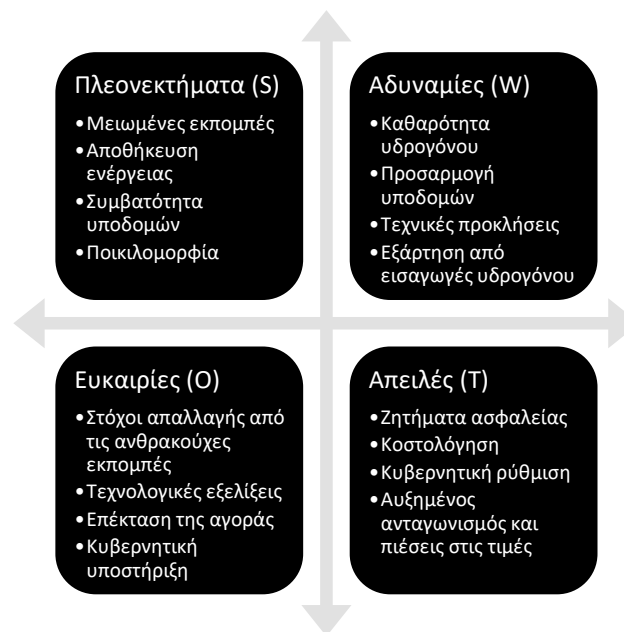
Η έγχυση υδρογόνου στο δίκτυο φυσικού αερίου αποτελεί ένα βήμα προς την απανθρακοποίηση, με το πλεονέκτημα ότι δεν χρειάζεται να καταβληθούν δαπάνες για την εξ'ολοκλήρου κατασκευή μιας νέας υποδομής μεταφοράς υδρογόνου, μια και πρόκειται να αξιοποιηθούν οι υφιστάμενες υποδομές φυσικού αερίου. Με αυτό το βήμα, μειώνεται η εξάρτηση από συμβατικές πηγές ενέργειας και αυξάνεται η ποικιλομορφία. Το υδρογόνο που έχει εγχυθεί στον αγωγό φυσικού αερίου μπορεί είτε να πωλείται ως blend υδρογόνου/φυσικού αερίου, είτε να διαχωρίζεται από το φυσικό αέριο σε άλλους σταθμούς και να πωλείται ως καθαρό υδρογόνο. Στην παρούσα εργασία μελετάται το πρώτο σενάριο.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει ευνοϊκό ρυθμιστικό πλαίσιο, μέσω υποστηρικτικών πολιτικών για το υδρογόνο, όπως τη Στρατηγική για το Υδρογόνο, την Οδηγία για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, τη Συμμαχία Καθαρού Υδρογόνου και την Οδηγία για την Αγορά Αερίου.^{[1], [2], [3], [4], [5], [6]}

Η μελλοντική αγορά υδρογόνου λαμβάνεται σημαντικά υπόψη και σε διάφορες χώρες της Ευρώπης, όπως και στην Ελλάδα (Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα). Υπό αυτό το πρίσμα, στο πλαίσιο της ένταξης του πράσινου υδρογόνου στην αγορά ενέργειας, είτε ως καθαρό καύσιμο είτε σε ανάμειξη με φυσικό αέριο, έχουν καταγραφεί κάποιες καλές πρακτικές, με ενδεικτικά παραδείγματα τα έργα HYFLEXPOWER, HISELECT, FenHYx, HyNTS FutureGrid, HyDeploy, H21 Leeds City Gate, HyREADY, H2Future και HRHYD, με πληθώρα ευρωπαϊκών χωρών να εμπλέκονται σε αυτά.^{[7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17]}

Οι ενδιαφερόμενοι φορείς (stakeholders) μπορούν να είναι εταιρείες που ασχολούνται με το φυσικό αέριο, πάροχοι ενεργειακών υποδομών, ερευνητικά ιδρύματα και εταιρείες, εθνικές στρατηγικές και πρωτοβουλίες για το υδρογόνο, αλλά και νεοφυείς καινοτόμες επιχειρήσεις.

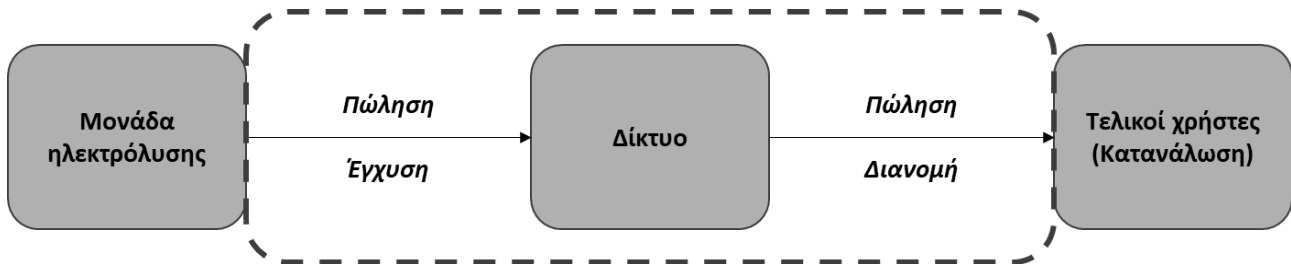
Στο πλαίσιο του στρατηγικού σχεδιασμού ενός έργου όπως η έγχυση υδρογόνου στο δίκτυο φυσικού αερίου, απαραίτητη είναι μια ανάλυση SWOT, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Ανάλυση SWOT για την έγχυση υδρογόνου στο δίκτυο φυσικού αερίου.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το διάγραμμα ροής της αλυσίδας εφοδιασμού του υδρογόνου από την παραγωγή μέχρι την πώληση στους τελικούς χρήστες, αλλά και ο όγκος ελέγχου της μελέτης, απεικονίζονται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Οριοθέτηση μελέτης στην αλυσίδα εφοδιασμού του υδρογόνου μέσω έγχυσης στο δίκτυο φυσικού αερίου.

Για την τιμολόγηση του υδρογόνου, θα χρησιμοποιηθεί στη μελέτη μοντέλο όμοιο με αυτό του φυσικού αερίου, όπως φαίνεται και στην Εξίσωση 1: ^[18]

$$K = K_{\delta} \cdot \Delta + K_{\varepsilon} \cdot E \quad (1)$$

όπου:

- K το κόστος του καυσίμου
- K_{δ} ο συντελεστής χρέωσης δυναμικότητας (€/kWh/h), θεωρείται ίσος με τους μέσους συντελεστές για το φυσικό αέριο ανά περιοχή
- Δ η δεσμευμένη δυναμικότητα καυσίμου από τον καταναλωτή (kWh/h), θεωρείται ίση με τη μέση δεσμευμένη δυναμικότητα ανά περιοχή
- K_{ε} ο συντελεστής χρέωσης ενέργειας (€/kWh), καθορίζεται μέσω ανάλυσης νεκρού σημείου για όλα τα πιθανά σενάρια.
- E η καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh)

Είναι αναμενόμενο ότι η τιμή της ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί με την προσθήκη υδρογόνου στο φυσικό αέριο, είναι απαραίτητες ορισμένες στρατηγικές παρεμβάσεις στην τιμολόγηση, ώστε το υδρογόνο να γίνει πιο ελκυστικό στους καταναλωτές. Τέτοιες παρεμβάσεις μπορεί να είναι εκπτώσεις όγκου, μακροπρόθεσμες συμβάσεις, δυναμική τιμολόγηση με βάση τις συνθήκες της αγοράς, περιβαλλοντικά κίνητρα, εγγύηση σταθερότητας τιμών, ειδικό τιμολόγιο για χρήση σε Βιομηχανικές Περιοχές ή δημόσια κτήρια και εκπτώσεις συνέπειας.

Κατά τη μελέτη έχουν καταστρωθεί συνολικά 15 σενάρια, βασισμένα στη ροή φυσικού αερίου και στην περιεκτικότητα υδρογόνου στο blend. Για τη ροή φυσικού αερίου έχει θεωρηθεί μονάδα FSRU (μονάδα αποθήκευσης και επαναεριοποίησης υγροποιημένου φυσικού αερίου), μέγιστης (100%) δυναμικότητας 5292 m³/h (5 σενάρια, 1: 5%, 2: 25%, 3: 50%, 4: 75%, 5: 100%), ενώ για τη ροή υδρογόνου έχουν θεωρηθεί 3 σενάρια, ως προς την ογκομετρική αναλογία υδρογόνου/φυσικού αερίου (α : 1%, β : 5%, γ : 10%).

Όσον αφορά στον σκελετό της επένδυσης, έχει θεωρηθεί μονάδα συμπίεσης και έγχυσης υδρογόνου 1.5 MW, με κόστος €20 εκατ. για το σενάριο 3 (50% δυναμικότητα), με εκτίμηση κόστους σύμφωνα με τον κανόνα των 2/3 για τα υπόλοιπα σενάρια. Στο κόστος συμπεριλαμβάνεται μονάδα συμπίεσης, μονάδα έγχυσης και λοιπά κόστη (άδειες, απρόοπτα, κ.α.). Για τα λειτουργικά κόστη έχει εκτιμηθεί κόστος ενέργειας ίσο με €75/MWh, ενώ το ετήσιο κόστος συντήρησης θεωρείται ίσο με το 6% του παγίου κόστους.

Για την κερδοφορία της επένδυσης, καθοριστικές είναι οι δύο τιμές πώλησης του υδρογόνου: από τον παραγωγό στον διανομέα και από τον διανομέα στον καταναλωτή. Η πρώτη τιμή έχει εκτιμηθεί ίση με €4/kg (ισοδύναμη με €0.09592/kWh), ίση με τη μέση τιμή που ορίζεται από το Συμβούλιο για το Υδρογόνο.^[19]

Η δεύτερη τιμή υπολογίζεται για κάθε σενάριο, μέσω ανάλυσης νεκρού σημείου και προσδιορίζεται η οριακή τιμή για την οποία μηδενίζεται το οικονομικό δυναμικό, το οποίο υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 2.

$$EP = Έσοδα - \left(Ετήσια Δαπάνη + \frac{1}{t} Αρχική Δαπάνη \right) \quad (2)$$

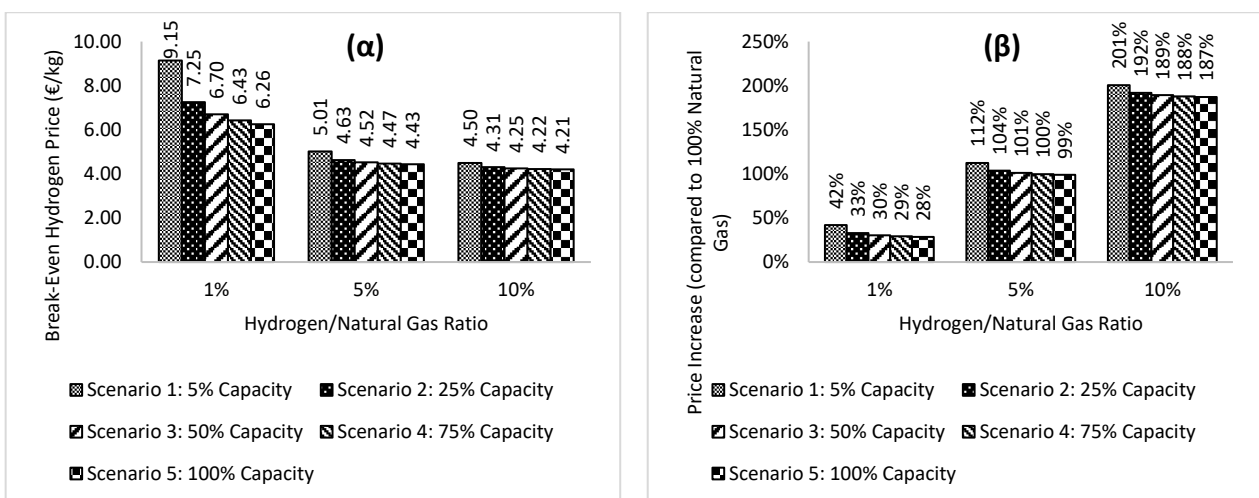
Κατά τη μελέτη έχουν ληφθεί υπόψη και παράμετροι όπως περιθώριο κέρδους, ρυθμός επιστροφής κεφαλαίου, περίοδος αποπληρωμής, όπως επίσης και η αναπροσαρμογή όλων των άνωθεν δεικτών λαμβάνοντας υπόψη και το κοινωνικό-περιβαλλοντικό όφελος από την εξοικονόμηση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (το υδρογόνο δεν περιέχει άτομα άνθρακα, επομένως η καύση του δεν εκπέμπει διοξείδιο του άνθρακα).

Τέλος, από την οριακή τιμή του υδρογόνου υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή του blend υδρογόνου/φυσικού αερίου, η οποία συγκρίνεται με την υφιστάμενη τιμή φυσικού αερίου, ώστε να αξιολογηθεί ο αντίκτυπος στους καταναλωτές.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

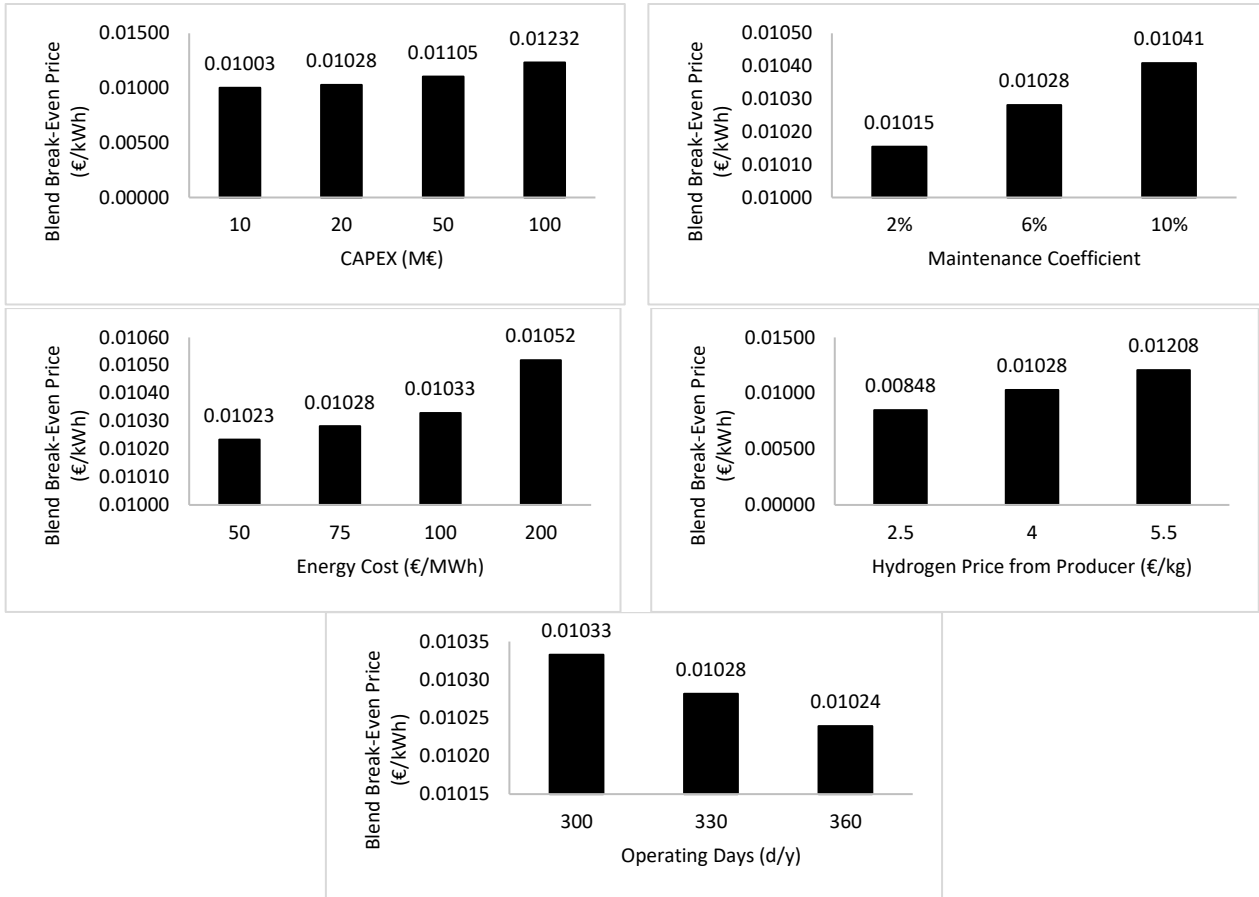
Σύμφωνα με το Σχήμα 3α το εγχείρημα είναι πιο κερδοφόρο για τον διανομέα όσο αυξάνεται η δυναμικότητα σε φυσικό αέριο και η περιεκτικότητα σε υδρογόνο, διότι η οριακή τιμή πώλησης του υδρογόνου είναι μικρότερη. Επίσης, τα όρια της τιμής Υδρογόνου είναι €2.5/kg έως €5.5/kg, σύμφωνα με το Συμβούλιο για το Υδρογόνο, επομένως υπό αυτό το πρίσμα το σενάριο για 1% υδρογόνο απορρίπτεται.

Παράλληλα, σύμφωνα με το Σχήμα 3β, όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε υδρογόνο, τόσο αυξάνεται και το κόστος πώλησης του blend στους καταναλωτές. Πιο συγκεκριμένα, στα σενάρια για 5% και 10% περιεκτικότητα υδρογόνου, η τιμή της ενέργειας αυξάνεται κατά 100% έως 200%, ανά kWh, επομένως κατά την εφαρμογή τέτοιων σεναρίων, πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη οι προαναφερθείσες στρατηγικές τιμολόγησης προκειμένου να μπορέσει το υδρογόνο να εισαχθεί με βιώσιμο τρόπο στην ενεργειακή αγορά.



Σχήμα 3. Οριακή τιμή υδρογόνου (α) και ποσοστιαία αύξηση του κόστους ενέργειας (β) για τα 5*3 σενάρια της μελέτης για την οριακή τιμή.

Τέλος πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας για ορισμένες κρίσιμες παραμέτρους και διαπιστώθηκε ότι το κόστος του υδρογόνου για τους καταναλωτές θα αυξάνεται όσο αυξάνεται το πάγιο κόστος της επένδυσης, ο συντελεστής συντήρησης εξοπλισμού, το κόστος ενέργειας και η τιμή πώλησης υδρογόνου, από τον παραγωγό στον διανομέα, αλλά και όσο μειώνονται οι ημέρες λειτουργίας της εγκατάστασης συμπίεσης και έγχυσης υδρογόνου, με την τελευταία παράμετρο να μπορεί να εξαλειφθεί εάν λειτουργήσουν δύο εγκαταστάσεις μικρότερης δυναμικότητας παράλληλα, ώστε να αποφεύγεται κατά το δυνατόν το ολικό shutdown της μονάδας. Τελικά διαπιστώθηκε ότι η επένδυση έχει μεγαλύτερη ευαισθησία στις μεταβολές τιμής αγοράς υδρογόνου από τον παραγωγό και στα διαφορετικά σενάρια παγίου κόστους.



Σχήμα 4. Οριακή τιμή υδρογόνου για διάφορα σενάρια ανάλυσης ευαισθησίας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου SHIMANAGAN – Ασφαλής Διαχείριση Έγχυσης Υδρογόνου σε Δίκτυα Φυσικού Αερίου, το οποίο συντονίστηκε από το Ενεργειακό Κέντρο Ικανοτήτων (ΕΚΙ).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] EC (2020), *Hydrogen*. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en
- [2] EC (2022) *Key actions of the EU Hydrogen Strategy*. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen/key-actions-eu-hydrogen-strategy_en
- [3] EC (2009), *Renewable Energy Directive*. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en
- [4] EC (2020), *European Clean Hydrogen Alliance*. https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/industrial-alliances/european-clean-hydrogen-alliance_en
- [5] EC (2009), *Concerning common rules for the internal market in natural gas and repealing Directive*. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:211:0094:0136:en:PDF>
- [6] Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (2019), *Εθνικό σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα*. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-01/el_final_necp_main_el_0.pdf
- [7] Siemens Energy (2022), *First tests for Power-to-Hydrogen-to-Power HYFLEXPOWER demonstrator successfully completed*. <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/press-releases/first-tests-power-hydrogen-power-hyflexpower-demonstrator-successfully-completed.html>
- [8] Linde Hydrogen, *Converting the Natural Gas Grid for Hydrogen Delivery*. <https://www.lindehydrogen.com/technology/natural-gas-grid-conversion>
- [9] Hydrogen Tech World (2022), *Air Liquide completes hydrogen pipeline to Germany's largest steel mill*. <https://hydrogentechworld.com/air-liquide-completes-hydrogen-pipeline-to-germanys-largest-steel-mill>
- [10] ENTSOG, *FenHYx*. <https://www.entsog.eu/fenhyx>
- [11] GRTgaz, *New FenHYx facilities inauguration*. <https://www.grtgaz.com/en/medias/press-releases/new-fenhyx-facilities-inauguration>
- [12] National Gas, *FutureGrid*. <https://www.nationalgas.com/insight-and-innovation/transmission-innovation/futuregrid>
- [13] HyDeploy. <https://hydeploy.co.uk/>
- [14] H21, *H21 Leeds City Gate*. <https://h21.green/projects/h21-leeds-city-gate/>
- [15] DNV, *HyREADY*. <https://www.dnv.com/article/hyready-219355>
- [16] H2Future Project. <https://www.h2future-project.eu/>
- [17] Engie, *The GRHYD demonstration project*. <https://www.engie.com/en/businesses/gas/hydrogen/power-to-gas/the-grhyd-demonstration-project>
- [18] Άρθρο 2: Ορισμοί - Απόφαση 589/2016, ΦΕΚ Β' 1969/01.06.2018. https://www.nomoskopio.gr/a_589_16_2.php?toc=0&printWindow&
- [19] Hydrogen Council (2021), *Policy Toolbox for Low Carbon and Renewable Hydrogen*. https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/11/Hydrogen-Council_Policy-Toolbox.pdf
- [20] Smith, R. *Chemical process design and integration*