



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τομέας Σύνθεσης και Ανάπτυξης Βιομηχανικών
Διαδικασιών

Πρόσμιξη Υδρογόνου σε δίκτυα Φυσικού Αερίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛΙΔΗ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ



Επιβλέπων : Φανούριος Ζαννίκος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα

2023

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί μια σχολαστική διερεύνηση του κομβικού ρόλου του υδρογόνου στο σύγχρονο ενεργειακό τοπίο, αναδεικνύοντας το ως βασικό άξονα στην επιδίωξη της ενεργειακής μετάβασης, μέσα από μια εκτεταμένη εξέταση των πολύπλευρων ιδιοτήτων και των ευέλικτων εφαρμογών του. Αρχικά περιγράφονται οι δυνατότητες του υδρογόνου ως παράγοντα επίτευξης της κλιματικής ουδετερότητας, εξετάζοντας παράλληλα τις ποικίλες μεθόδους παραγωγής του με βάση το αποτύπωμα άνθρακα

Στη συνέχεια, η εργασία κατευθύνεται στο περίπλοκο πεδίο των δικτύων φυσικού αερίου, εμβαθύνοντας στη δυνατότητα ανάμειξης υδρογόνου στα δίκτυα φυσικού αερίου. Αυτή η προσπάθεια αποκαλύπτει την πολυπλοκότητα της προσαρμογής των υφιστάμενων υποδομών για την πρόσμειξη υδρογόνου που περιλαμβάνει αξιολογήσεις συμβατότητας υλικών, τροποποιήσεις υποδομής και τα αυστηρά πρωτόκολλα ασφαλείας που είναι απαραίτητα για την εφαρμογή. Εξετάζονται οι ιδιότητες των υλικών και των αγωγών και η συμβατότητα τους με το υδρογόνο καθώς και η επίδραση του υδρογόνου στους συμπιεστές, στις βαλβίδες κ.α.

Σημαντικός παράγοντας στην χρήση υδρογόνου στα δίκτυα φυσικού αερίου αποτελεί επίσης η δυνατότητα αποθήκευσης υδρογόνου. Εξετάστηκαν οι μέθοδοι αποθήκευσης και οι προοπτικές τους, συμπεριλαμβανομένων των υπόγειων δεξαμενών και των εναλλακτικών λύσεων αποθήκευσης σε στερεά κατάσταση εστιάζοντας στον κεντρικό ρόλο τους στη διασφάλιση αξιόπιστου και προσαρμοσίμου ενεργειακού εφοδιασμού.

Οι οικονομικές πτυχές αποτελούν επίσης μέρος της ανάλυσης της δυνατότητας ανάμειξης υδρογόνου σε δίκτυα φυσικού αερίου εστιάζοντας στην αναβάθμιση του υφιστάμενου δικτύου. Είναι σαφής η ανάγκη για ολιστικές οικονομικές αξιολογήσεις λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς κόστους, τις τροποποιήσεις των αγωγών και τη δυνατότητα μακροπρόθεσμης ή και βραχυπρόθεσμης μετάβασης στη μεταφορά καθαρού υδρογόνου. .

Συμπερασματικά η ανάγκη για μια κατά περίπτωση προσέγγιση τονίζει την πολυπλοκότητα της ενσωμάτωσης υδρογόνου στους αγωγούς φυσικού αερίου. Αυτή η προσέγγιση αναγνωρίζει ότι κάθε δίκτυο αγωγών είναι μοναδικό, με ξεχωριστά χαρακτηριστικά, υλικά και συνθήκες λειτουργίας. Επομένως, οι γενικές λύσεις είναι ανεπαρκείς. Η αυστηρή αξιολόγηση της ετοιμότητας κάθε δικτύου αγωγών για ανάμειξη υδρογόνου είναι απαραίτητη. Παράγοντες όπως η ηλικία και η κατάσταση των αγωγών, η

θέση των σημείων έγχυσης και η επιδιωκόμενη συγκέντρωση υδρογόνου πρέπει να αξιολογούνται διεξοδικά.

ABSTRACT

This thesis attempts a thorough investigation of the pivotal role of hydrogen in the modern energy landscape, highlighting it as a key axis in the pursuit of the energy transition, through an extensive examination of its multifaceted properties and versatile applications. Initially, the potential of hydrogen as a factor in achieving climate neutrality is described, while examining the various methods of its production based on the carbon footprint.

The thesis then turns to the complex field of natural gas networks, delving into the possibility of hydrogen blending in natural gas networks. This effort reveals the complexity of adapting existing infrastructure for hydrogen blending that includes material compatibility assessments, infrastructure modifications, and the stringent safety protocols necessary for implementation. The properties of materials and pipelines and their compatibility with hydrogen are examined, as well as the effect of hydrogen on compressors, valves, etc. An important factor in the use of hydrogen in natural gas networks is also the possibility of hydrogen storage. Storage methods and their prospects were examined, including underground reservoirs and solid-state storage alternatives focusing on their central role in ensuring a reliable and adaptable energy supply.

Economic aspects are also part of the analysis of the possibility of blending hydrogen into natural gas networks focusing on upgrading the existing network. There is a clear need for holistic economic assessments considering cost constraints, pipeline modifications and the possibility of a long-term or even short-term transition to clean hydrogen transport. In conclusion the need for a case-by-case approach highlights the complexity of incorporating hydrogen into natural gas pipelines. This approach recognizes that each pipeline network is unique, with distinct characteristics, materials, and operating conditions. Therefore, general solutions are insufficient. Rigorous assessment of the readiness of each pipeline network for hydrogen blending is essential. Factors such as the age and condition of pipelines, the location of injection points and the intended hydrogen concentration must be thoroughly evaluated.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την παρουσίαση της παρούσας διπλωματικής ολοκληρώνεται ένας ακόμη κύκλος γνώσης και εμπειρίας. Οι συνθήκες αυτού του κύκλου ήταν εξαιρετικά απαιτητικές, ωστόσο το συναίσθημα που λαμβάνεις στο τέλος, με την επίτευξη ολοκλήρωσης των σπουδών σου, είναι κάτι που σε συγκινεί και σε αποζημιώνει για όλες τις θυσίες που έκανες, όσες φορές και αν το έχεις κάνει.

Στο ταξίδι αυτό, αρωγός της προσπάθειας μου ήταν, από το ακαδημαϊκό μέρος, οι καθηγητές και οι συμφοιτητές μου και από το οικογενειακό, η σύζυγός μου που ανέχτηκε τις πολλές ώρες ενασχόλησής μου για μελέτη και συγγραφή εργασιών. Προσωπικές ευχαριστίες λοιπόν θα ήθελα να δώσω στον κο Ζαννίκο όντας ο επιβλέπωντας καθηγητής αυτής της διπλωματικής, και φυσικά την κα Κομιώτου πού μέσω της καθοδήγησής της και των επιστημονικών γνώσεών της, συνέδραμε στην ολοκλήρωση και αυτής της δοκιμασίας.

Ταυτόχρονα, θα ήθελα να δώσω ευχαριστίες και στους συναδέλφους μου, στα Ελληνικά Πετρέλαια για την αγόγγυστη συμπαράστασή τους και την πρόσβασή μου στις πληροφορίες αναφορικά με τις διεργασίες στον χώρο του διυλιστηρίου.

Τέλος, θα ήθελα να απονείμω ιδιαίτερη μνεία και ευχαριστίες σε δύο ανθρώπους που η παρουσία τους στη ζωή μου είναι καταλυτική: ο ένας είναι ο πεθερός μου, κος Γιάννης Μαγκανιώτης, που ως εκπαιδευτικός με παρότρυνε να σπουδάσω εκ νέου σε δεύτερο κύκλο σπουδών και ο δεύτερος είναι η σύζυγός μου Καλομοίρα, που με την υπομονή της, κατάφερα να ολοκληρώσω αυτό το ταξίδι γνώσεων.

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Το υδρογόνο και η ενεργειακή μετάβαση	- 11 -
1.1 Το υδρογόνο ως παράγοντας προς την κλιματική ουδετερότητα.....	- 11 -
1.2 Ευελιξία και πολύπλευρες εφαρμογές του υδρογόνου	- 12 -
1.3 Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου-ταξινόμηση με βάση το αποτύπωμα άνθρακα ..	- 14 -
1.4 Δίκτυα Φυσικού Αερίου και Προοπτικές Ανάμειξης Υδρογόνου.....	- 17 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Επιδράσεις του υδρογόνου στις ιδιότητες του HBNG	- 22 -
2.1 Κριτήρια ποιότητας καύσης μίγματος υδρογόνου-φυσικού αερίου.....	- 22 -
2.2 Ιδιότητες φυσικού αερίου-υδρογόνου	- 24 -
2.3 Βασικά χαρακτηριστικά καύσης και ποιότητας μειγμάτων CH ₄ /H ₂	- 25 -
2.3 Επίδραση της πρόσμειξης υδρογόνου στη στοιχειομετρία της καύσης.....	- 28 -
2.4 Ταχύτητες στρωτής καύσης	- 31 -
2.5 Θερμοφυσικές ιδιότητες μειγμάτων υδρογόνου-φυσικού αερίου.....	- 37 -
2.6 Θερμοδυναμική αξιολόγηση στα χαρακτηριστικά Joule-Thomson του αναμειγμένου με υδρογόνο φυσικού αερίου.	- 40 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Προσαρμογές υποδομής χρήσης δικτύου.....	- 45 -
3.1 Προκλήσεις ενσωμάτωσης υδρογόνου στα δίκτυα φυσικού αερίου.....	- 45 -
3.2 Δίκτυα Μεταφοράς Αερίου: Βασική Υποδομή, Δυναμική Μεταφοράς Αερίου και Ενσωμάτωση Υδρογόνου	- 46 -
3.3 Συμβατότητα Υδρογόνου με Υλικά σε Αγωγούς Χάλυβα: Επιπτώσεις στην Κόπωση και την Αντοχή σε Θραύση	- 49 -
3.3.1 Κόπωση με ταχύτητα ανάπτυξης θραυστικής ρωγμής: Επιδράσεις και Χαρακτηριστικά	- 49 -
3.4 Μεταφορά σε αγωγούς	- 52 -
3.5 Συμπύεση φυσικού αερίου.....	- 54 -
3.5.1 Γενικές επιδράσεις στη συμπύεση	- 55 -
3.5.2 Επιδράσεις σε φυγόκεντρους συμπιεστές.....	- 56 -
3.6 Μείωση Πίεσης.....	- 58 -
3.7 Βαλβίδες	- 58 -
3.8 Ανάλυση σύνθεσης αερίου.....	- 60 -
3.9 Δίκτυα αγωγών διανομής	- 61 -
3.9.1 Συμβατότητα υδρογόνου με αγωγούς διανομής πολυμερών υλικών	- 63 -
3.9.2 Μεταφορά στα δίκτυα διανομής.....	- 64 -
3.9.3 Διαρροή σε αγωγούς διανομής	- 65 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Αποθήκευση υδρογόνου	- 67 -
4.1 Χαρακτηριστικά αποθήκευσης υδρογόνου	- 67 -
4.2 Υπόγειες Δεξαμενές	- 68 -

4.3 Αποθήκευση υδρογόνου σε στερεή μορφή: Μια ασφαλής και ευέλικτη επιλογή ..	- 69 -
4.4 Αποθήκευση Υδρογόνου σε Υγρή Μορφή	- 70 -
4.5 Σημασία αποθήκευσης υδρογόνου – φυσικού αερίου	- 72 -
4.6 Προκλήσεις στην υπόγεια αποθήκευση υδρογόνου	- 73 -
4.7 Εξαντλημένες δεξαμενές πετρελαίου - φυσικού αερίου και υδροφορείς	- 75 -
4.8 Σπήλαια αλάτων	- 76 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Τεχνοοικονομικές προκλήσεις ανάμειξης υδρογόνου-φυσικού αερίου.....	- 77 -
5.1 Τεχνοοικονομικές μελέτες ανάμειξης Υδρογόνου σε αγωγούς φυσικού Αερίου	- 77 -
5.2 Οικονομικά χαρακτηριστικά της ανάμειξης υδρογόνου	- 79 -
5.3 Οικονομικά χαρακτηριστικά αναβάθμισης υφιστάμενων αγωγών φυσικού αερίου	- 81 -
5.4 Επιτάχυνση της υποδομής υδρογόνου για την ενεργοποίηση πανευρωπαϊκών διαδρόμων εφοδιασμού και εισαγωγής έως το 2030.....	- 83 -
5.5 Δημιουργία Πανευρωπαϊκής Υποδομής Υδρογόνου (2021-2035)	- 85 -
5.6 Υπάρχουσα υποδομή δικτύου φυσικού αερίου στην Ελλάδα	- 87 -
5.7 Ανάπτυξη υποδομών υδρογόνου στην Ελλάδα.....	- 88 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Συμπεράσματα	- 89 -
Αναφορές.....	- 95 -

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Χρωματική κατηγοριοποίηση των τρόπων παραγωγής του υδρογόνου (Global Energy Infrastructure, 2022).....	- 17 -
Εικόνα 2: Ποσοστιαία σύνοψη των έργων με υδρογόνο βάση των δεδομένων Global Energy Infrastructure-GEI	- 17 -
Εικόνα 3: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας από την παραγωγή στην ανάμειξη στους αγωγούς και την διανομή σε διαφορετικούς τελικούς χρήστες (Cristello, et al., 2023). -	20 -
Εικόνα 4: Επιπτώσεις περιεκτικότητας σε υδρογόνο στην ελάχιστη απαίτηση αέρα και στην καθαρή και ακαθάριστη θερμογόνο ισχύ (Leicher, et al., 2020).....	- 26 -
Εικόνα 5: Θερμογόνος ισχύς με βάση τη μάζα και τη πυκνότητα διαφόρων μιγμάτων CH ₂ /H ₂ (Leicher, et al., 2020)	- 26 -
Εικόνα 6: Μεταβολή των κύριων παραμέτρων ποιότητας καύσης αερίου ως συνάρτηση της πρόσμειξης υδρογόνου στο μεθάνιο (Leicher, και συν., 2020).....	- 27 -
Εικόνα 7: Θερμοκρασίες αδιαβατικής καύσης CH ₄ , 50 % CH ₄ / 50 % H ₂ και H ₂ ως συναρτήση του λόγου περίσσειας αέρα, με αέρα ως οξειδωτικό. T _{καύσιμο} = 15 °C, T _{air} = 15 °C, p = 1 atm (Leicher, και συν., 2020).	- 28 -
Εικόνα 8: Επίδραση της πρόσμειξης υδρογόνου στη σχετική στοιχειομετρία ενός συστήματος καύσης (Leicher, και συν., 2020).....	- 30 -
Εικόνα 9: CARI και Airmin σε μίγματα CH ₄ /H ₂ ως συναρτήση της συγκέντρωσης H ₂ (Leicher, και συν., 2020)	- 31 -
Εικόνα 10: Ταχύτητα ροής του μείγματος καυσίμου-οξειδωτικού u και ταχύτητας στρωτής καύσης sL (Leicher, και συν., 2020)	- 32 -
Εικόνα 11: Σύγκριση στρωτών ταχυτήτων καύσης μεθανίου, υδρογόνου και διαφορετικών μιγμάτων CH ₄ /H ₂ (Leicher, και συν., 2020).....	- 34 -
Εικόνα 12: Σύγκριση στρωτών ταχυτήτων καύσης μεθανίου, 70% CH ₄ / 30 % H ₂ και 50 % CH ₄ / 50 % H ₂ (Leicher, et al., 2020).....	- 35 -
Εικόνα 13: Επίδραση της πρόσμειξης υδρογόνου στη στρωτή ταχύτητα καύσης για ένα σύστημα με σταθερή ροή αέρα και σταθερή πίεση στο ακροφύσιο (Leicher, και συν., 2020).	- 36 -
Εικόνα 14: Καμπύλες P-T για διάφορες περιεκτικότητες H ₂ (Li, και συν., 2022).....	- 37 -
Εικόνα 15: Θερμοφυσικές ιδιότητες του αναμεμιγμένου με υδρογόνο φυσικού σε διάφορες περιεκτικότητες – Συντελεστής συμπίεστικότητας (Z) (Li, et al., 2023)	- 38 -

Εικόνα 16: Θερμοφυσικές ιδιότητες του αναμεμειγμένου με υδρογόνο φυσικού σε διάφορες περιεκτικότητες –Πυκνότητα (ρ) (Li, και συν., 2023)	- 39 -
Εικόνα 17: Θερμοφυσικές ιδιότητες του αναμεμειγμένου με υδρογόνο φυσικού σε διάφορες περιεκτικότητες –Θερμοχωρητικότητα (Cp) (Li, et al., 2023).....	- 39 -
Εικόνα 18: Θερμοφυσικές ιδιότητες του αναμεμειγμένου με υδρογόνο φυσικού σε διάφορες περιεκτικότητες –Ιξώδες (μ) (Li, και συν., 2023).	- 40 -
Εικόνα 19: Ισοενθαλπικές καμπύλες μειγμάτων υδρογόνου-φυσικού αερίου σε διαφορετικές περιεκτικότητες % H ₂ (Li, et al., 2023).....	- 42 -
Εικόνα 20: Διαφορές θερμοκρασίας εξόδου σε μείγματα υδρογόνου-φυσικού αερίου (Li, και συν., 2023)	- 43 -
Εικόνα 21: Συντελεστής Joule-Thomson μειγμάτων υδρογόνου-φυσικού αερίου για διαφορετικές περιεκτικότητες H ₂ (Li, και συν., 2023)	- 44 -
Εικόνα 22: Σύστημα αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου των ΗΠΑ, 2009 (U.S. Energy Information Administration , 2009)	- 47 -
Εικόνα 23: Ευρωπαϊκό δίκτυο αγωγών φυσικού αερίου. Το πάχος των γραμμών είναι αντίστοιχο με τη διάμετρο του αγωγού (Robinson, et al., 1995)	- 48 -
Εικόνα 24: Αντοχή σε θραύση βασικών μετάλλων και ζώνες σύντηξης συγκόλλησης μιας σειράς χάλυβων αγωγών ποιότητας του Αμερικανικού Ινστιτούτου Πετρελαίου (API) σε αέριο υδρογόνο σε πίεση 21 MPa (Ronevich, και συν., 2022).....	- 50 -
Εικόνα 25: Αντοχή σε θραύση βασικών μετάλλων και ζώνες τήξης συγκόλλησης μιας σειράς αγωγών χάλυβα σειράς ποιότητας Αμερικανικού Ινστιτούτου Πετρελαίου (API) σε αέριο υδρογόνο σε πίεση 21 MPa (Hydrogen Compatibility of Structural Materials in Natural Gas Networks, 2021).	- 51 -
Εικόνα 26: Βαλβίδες διαχείρισης ροής σε σύστημα μεταφοράς φυσικού αερίου	- 60 -
Εικόνα 27: Διαφορετικοί τύποι υπόγειας αποθήκευσης υδρογόνου (Infrastructure, 2021)-	69
-	
Εικόνα 28: Κατανομή ατόμων υδρογόνου μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα ενός μετάλλου, κατά την απορρόφησή τους από αυτό (sciencenews.gr)	- 70 -
Εικόνα 29: Εθνικές υποδομές κορμού υδρογόνου που εξελίσσονται σε πανευρωπαϊκή υποδομή υδρογόνου	- 86 -
Εικόνα 30: Αριστερά- Κεντρικός διάδρομος μεταφορών TEN-T , Δεξιά- Σταθμοί ανεφοδιασμού κατά μήκος του διαδρόμου.....	- 87 -

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Κατάλογος σημαντικών έργων σχετικά με τη μεταφορά μείγματος υδρογόνου-φυσικού αερίου (Cristello, και συν., 2023).....	- 20 -
Πίνακας 2: Σύγκριση ορισμένων ιδιοτήτων μεταξύ του υδρογόνου και του μεθανίου (European Committee for Standardization (CEN), 2021).....	- 24 -
Πίνακας 3:Ελάχιστη διάμετρος σβέσης για διάφορα αέρια καύσιμα (Jones, 1989).....	- 32 -
Πίνακας 4: Τιμές διαμέτρου σβέσης (mm) για κυκλικές θύρες καυστήρα σε μείγμα CH ₄ -H ₂ (Leicher, et al., 2020)	- 33 -
Πίνακας 5: Προκλήσεις που σχετίζονται με την ανάμειξη υδρογόνου σε δίκτυα μεταφοράς και διανομής.....	- 45 -
Πίνακας 6: Υφιστάμενες εγκαταστάσεις αποθήκευσης υδρογόνου και μελλοντικά έργα όπως καταγράφονται στην ιστοσελίδα της IEA (IEA, 2021).....	- 72 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Το υδρογόνο και η ενεργειακή μετάβαση

1.1 Το υδρογόνο ως παράγοντας προς την κλιματική ουδετερότητα.

Ο παγκόσμιος ενεργειακός χώρος βρίσκεται σε ένα κρίσιμο σταυροδρόμι, που χαρακτηρίζεται από μια πρωτοφανή σύγκλιση προκλήσεων που απαιτούν γρήγορη και αποφασιστική δράση. Η καύση των ορυκτών καυσίμων, παρόλο που συνέβαλε στην ταχεία βιομηχανοποίηση και την τεχνολογική πρόοδο του παρελθόντος αιώνα, έχει επιβάλει βαρύ φόρο στο περιβάλλον. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, κυρίως του διοξειδίου του άνθρακα, έχουν συσσωρευτεί στην ατμόσφαιρα, οδηγώντας σε μια σειρά από οικολογικές και κλιματικές αλλαγές, από πιο συχνά και έντονα φαινόμενα όπως καύσωνες μέχρι ανόδους στάθμης θάλασσας που απειλούν παράκτιες περιοχές (Hansen, et al., 2012)

Απέναντι σε αυτή τη κατάσταση, η ανάγκη για μια θεμελιώδη μετάβαση στα ενεργειακά συστήματα έχει γίνει όχι μόνον κοινή επιστημονική θέση αλλά και κοινωνική αναγκαιότητα. Η αναγνώριση ότι οι παραδοσιακές πρακτικές δεν είναι βιώσιμες, έχει πυροδοτήσει μια παγκόσμια αναζήτηση για εναλλακτικές και καθαρές ενεργειακές λύσεις. Οι ανανεώσιμες πηγές, όπως η ηλιακή, η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια, έχουν αναδυθεί ως βασικοί διεκδικητές σε αυτήν τη μετάβαση, προσφέροντας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς εκπομπές. Ωστόσο, η μετάβαση στις ανανεώσιμες ενέργειες δεν είναι χωρίς προκλήσεις, περιλαμβανομένων της μη σταθερής παραγωγής και της δυσκολίας στην αποθήκευση ενέργειας καθώς και της ανάγκης για σημαντικές αλλαγές στις υπάρχουσες υποδομές (Jacobson, 2009).

Το υδρογόνο, με την ασύγκριτη δυναμική του, έχει αναδυθεί σ' έναν κρίσιμο παράγοντα στο θέμα της καθαρής ενέργειας. Ενσωματώνει τη προσδοκία που εκτείνεται πέρα από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, προσφέροντας έναν ευέλικτο και υψηλής ενεργειακής πυκνότητας φορέα που μπορεί να αναδιαμορφώσει ολόκληρα ενεργειακά συστήματα. Η καθαρή καύση του υδρογόνου, το μηδενικό προφίλ εκπομπών και η δυνατότητα παραγωγής μέσω ηλεκτρόλυσης με ανανεώσιμη ενέργεια, το καθιστούν βασικό στοιχείο στη μείωση εκπομπών CO₂ σε τομείς που είναι δύσκολο να ηλεκτροκινηθούν άμεσα, όπως η βαριά βιομηχανία, οι μεταφορές μεγάλων φορτίων και η θέρμανση (Leach, et al., 2018)

Στο πλαίσιο αυτού του μεταβαλλόμενου ενεργειακού τοπίου, η ιδέα της ανάμειξης του υδρογόνου με το φυσικό αέριο παρουσιάζεται ως μία ρεαλιστική προσέγγιση. Το φυσικό αέριο είναι ένα καύσιμο χαμηλότερων εκπομπών άνθρακα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα συμβατικά (π.χ. πετρέλαιο) και σήμερα διατίθεται στα περισσότερα κράτη μέσα από ένα καλά εγκατεστημένο και εκτενές δίκτυο. Το δίκτυο αυτό περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο

αγωγούς και εγκαταστάσεις αποθήκευσης, ενώ παράλληλα υποστηρίζεται από την τεχνογνωσία πολλών ετών στο χειρισμό και τη μεταφορά αερίων καυσίμων. Με την ένταξη του υδρογόνου σε αυτήν την υπάρχουσα υποδομή, η μετάβαση στην ενέργεια κερδίζει ένα κρίσιμο πλεονέκτημα: την άμεση εφαρμογή. Αντί να δαπανηθεί χρόνος και χρηματικό κόστος για την ανάπτυξη και την ευρεία εφαρμογή μιας νέας υποδομής υδρογόνου, η ανάμειξη υδρογόνου-φυσικού αερίου μπορεί να εφαρμοσθεί σχετικά γρήγορα, επιταχύνοντας τη μείωση των εκπομπών άνθρακα σε τομείς που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το φυσικό αέριο (European Commission, 2020).

Καθώς η εφαρμογή της ανάμειξης υδρογόνου στα δίκτυα φυσικού αερίου αποκτά δυναμική μία σειρά προβλημάτων πρέπει να αναλυθούν και να αντιμετωπιστούν. Τεχνικά προβλήματα, μεταβολή των ιδιοτήτων του μείγματος σε σχέση με το φυσικό αέριο, προβλήματα ασφαλείας, οικονομικά και κοινωνικά προβλήματα, είναι ορισμένα πεδία προβληματισμού και αναζήτησης αποτελεσματικών λύσεων. Εκτός από τα δυνητικά οφέλη στόχος της παρούσης εργασίας είναι να προσδιορισθούν σαφώς οι προκλήσεις και οι προοπτικές της άμεσης εφαρμογής της ανάμειξης του υδρογόνου στο δίκτυο του φυσικού αερίου.

1.2 Ευελιξία και πολύπλευρες εφαρμογές του υδρογόνου

Η ευελιξία του υδρογόνου το καθιστά πέρα από το να είναι απλώς ένας φορέας ενέργειας, σε ένα παράγοντα μετασχηματισμού με πολύπλευρες εφαρμογές σε κρίσιμους τομείς του παγκόσμιου ενεργειακού τοπίου. Η αξιοσημείωτη προσαρμοστικότητα του προκύπτει από τις χαρακτηριστικές χημικές και φυσικές του ιδιότητες, καθιστώντας το καταλύτη για καινοτόμες λύσεις που υπερβαίνουν τα συμβατικά πρότυπα ενέργειας.

Ένα κομβικό πεδίο όπου αναδεικνύεται η ευελιξία του υδρογόνου είναι η αποθήκευση ενέργειας. Καθώς οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποκτούν εξέχουσα θέση, η ανάγκη για αποδοτική αποθήκευση ενέργειας γίνεται πρωταρχική. Το δυναμικό του υδρογόνου ως ευέλικτο ενεργειακό παράγοντας υπογραμμίζεται από τους Schietekat et al. (2018), διευκρινίζοντας τον ρόλο του στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας προς υδρογόνο (power-to-hydrogen). Μέσω της διαδικασίας της ηλεκτρόλυσης, η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή υδρογόνου, το οποίο στη συνέχεια λειτουργεί ως φορέας ενέργειας υψηλής πυκνότητας ικανός να μετατραπεί εκ νέου σε ηλεκτρική ενέργεια, γεφυρώνοντας αποτελεσματικά τα χρονικά κενά στην παροχή ενέργειας (Schietekat, et al., 2018).

Ο βιομηχανικός τομέας επηρεάζεται σημαντικά από την πολύπλευρη ικανότητα του υδρογόνου. Συγκεκριμένα, το υδρογόνο είναι σπουδαίας σημασίας για τη βιώσιμη χημική

σύνθεση. Οι Wörner et al. (2020) αναφέρουν τον ρόλο του υδρογόνου στην ανακύκλωση άνθρακα και στην αποθήκευση ενέργειας με βάση την αμμωνία. Με την ικανότητα της μετατροπής της ανανεώσιμης ενέργειας σε χημικούς δεσμούς, το υδρογόνο επιτρέπει τη δημιουργία ουδέτερων σε άνθρακα κύκλων, ενισχύοντας τη βιώσιμη χρήση των πόρων (Wörner, et al., 2020).

Η ευελιξία του υδρογόνου εκφράζεται στον τομέα των μεταφορών, ιδιαίτερα στην τεχνολογία κυψελών καυσίμου. Azoti et al. (2019) εμβαθύνουν σε μεθόδους αποθήκευσης υδρογόνου, αποκαλύπτοντας τις δυνατότητές του ως καθαρού καυσίμου για ηλεκτρικά οχήματα. Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν τη χημική ενέργεια του υδρογόνου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, προσφέροντας ένα σύστημα πρόωσης μηδενικών εκπομπών που μετριάσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της μεταφοράς και αποτελεί εναλλακτική λύση σε σχέση με τους συμβατικούς κινητήρες εσωτερικής καύσης (Azoti, et al., 2019).

Στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το υδρογόνο επιδεικνύει την προσαρμοστικότητά του μέσω της ταυτόχρονης καύσης με φυσικό αέριο. Οι Bauer et al. (2021) παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη σύνθετη δυναμική της ενσωμάτωσης του υδρογόνου στην υπάρχουσα υποδομή φυσικού αερίου. Αυτή η προσέγγιση ανάμειξης όχι μόνο μειώνει τις εκπομπές άνθρακα αλλά παρουσιάζει επίσης μια εφικτή ενδιάμεση λύση κατά τη διάρκεια της μετάβασης στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Bauer, et al., 2021) .

Επιπλέον, ο τομέας της αεροδιαστημικής παρουσιάζει μια συναρπαστική αρένα για την πολύπλευρη χρησιμότητα του υδρογόνου. Οι Riva et al. (2020) εξετάζουν εξονυχιστικά τη βιωσιμότητά του ως καύσιμο αεροσκαφών, σημειώνοντας τις δυνατότητές του να τροφοδοτούν αεροσκάφη με μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και τα χαρακτηριστικά καθαρής καύσης του υδρογόνου το τοποθετούν ως μια λύση για τον μετριασμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τις αερομεταφορές, μια κρίσιμη σκέψη για την επιδίωξη βιώσιμων αεροπορικών ταξιδιών (Riva , et al., 2020).

Συμπερασματικά, η ευελιξία και οι πολύπλευρες εφαρμογές του υδρογόνου υπερβαίνουν τα συμβατικά όρια, ενισχύοντας την καινοτομία και οδηγώντας την εξέλιξη των ενεργειακών συστημάτων σε όλους τους τομείς. Καθώς η έρευνα συνεχίζει να αποκαλύπτει τις δυνατότητές του, το υδρογόνο αναδεικνύεται ως ακρογωνιαίος λίθος στρατηγικών βιώσιμης ενέργειας, φέρνοντας επανάσταση στις βιομηχανίες, τις μεταφορές και την παραγωγή ενέργειας στη διαρκή αναζήτηση ενός μέλλοντος ουδέτερου από άνθρακα.

1.3 Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου-ταξινόμηση με βάση το αποτύπωμα άνθρακα

Το υδρογόνο μπορεί να σχηματιστεί από ένα πλήθος πρώτων υλών, γεγονός που καθορίζει το ανθρακικό του αποτύπωμα, και χρησιμοποιώντας μια μεγάλη ποικιλία διεργασιών, οι οποίες διαφέρουν ως προς την τεχνολογική τους ωριμότητα. Προκειμένου να αναδειχθεί η περιβαλλοντική επιβάρυνση που προκαλείται από την διαδικασία παραγωγής υδρογόνου, πραγματοποιείται μια κατηγοριοποίηση των τύπων υδρογόνου ανάλογα με την μορφή της ενεργειακής πηγής που χρησιμοποιείται. Όπως γίνεται αντιληπτό και από την Εικόνα 1, διακρίνονται οι εξής αποχρώσεις υδρογόνου :

1. **Το πράσινο υδρογόνο (Green Hydrogen).** Το "πράσινο υδρογόνο" χαρακτηρίζεται ως η αποτελεσματικότερη μορφή της βιώσιμης παραγωγής υδρογόνου και παράγεται από το συνδυασμό της ηλεκτρόλυσης με πηγές ανανεώσιμης ενέργειας (Sun, et al., 2013). Σε αυτή τη μέθοδο, ηλεκτρική ενέργεια προερχόμενη από ανανεώσιμες πηγές όπως ηλιακή, αιολική ή υδροηλεκτρική κατευθύνεται στην ηλεκτρόλυση του νερού, με αποτέλεσμα τον διαχωρισμό του υδρογόνου και του οξυγόνου με τρόπο πλήρως απαλλαγμένο από τις εκπομπές άνθρακα (Alili, et al., 2019). Το κύριο πλεονέκτημα του "πράσινου υδρογόνου" δεν βρίσκεται μόνο στην άμεση παραγωγή καθαρού υδρογόνου, αλλά και στο στρατηγικό του ρόλο ως δυναμικό μέσο μεταφοράς και αποθήκευσης ενέργειας. Επιπλέον, το "πράσινο υδρογόνο" ενδυναμώνει το δίκτυο παρέχοντας δυνατότητες ισορροπίας φορτίου, συμβάλλοντας στην ολοκλήρωση των διακριτικών πηγών ανανεώσιμης ενέργειας, προάγοντας την ανθεκτικότητα της ενέργειας (Ma, et al., 2020). Αξίζει να σημειωθεί ότι, εκτός από την ηλεκτρόλυση του νερού χρησιμοποιώντας ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια, υπάρχουν και άλλες μέθοδοι δημιουργίας υδρογόνου πολύ χαμηλού έως και μηδενικού ανθρακικού αποτυπώματος, όπως η αεριοποίηση βιομάζας, η πυρόλυση βιομάζας, η θερμοχημική διάσπαση του νερού, οι οποίες όμως δεν βρίσκονται σε στάδιο εμπορικής χρήσης.
2. Το **ροζ/κόκκινο/μωβ.** Οι τρεις αυτοί τύποι υδρογόνου παρουσιάζονται στην ίδια κατηγορία, καθώς η ενέργεια που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του υδρογόνου προέρχεται σε κάθε περίπτωση από πυρηνικές μονάδες. Οι διαφορές τους σχετίζονται με την διαδικασία που χρησιμοποιείται για την παραγωγή κάθε τύπου υδρογόνου. Ως ροζ υδρογόνο προσδιορίζεται το παραγόμενο μέσω ηλεκτρόλυσης

του νερού, σε ένα εύρος χαμηλών θερμοκρασιών, αξιοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια που παρέχεται από πυρηνική μονάδα. Το κόκκινο υδρογόνο παράγεται μέσω θερμοχημικών κύκλων διάσπασης του νερού με τη βοήθεια της παραγόμενης θερμότητας από την πυρηνική σχάση. Τέλος, το υδρογόνο που δημιουργείται από ηλεκτρόλυση υψηλής θερμοκρασίας απαιτεί παροχή τόσο ηλεκτρισμού όσο και θερμότητας, η τροφοδότηση των οποίων πραγματοποιείται από την πυρηνική μονάδα και χαρακτηρίζεται μωβ υδρογόνο. Η πυρηνική ενέργεια που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση δεν περικλείει εκπομπές CO₂ οπότε το υδρογόνο που εξάγεται έχει μηδενικό ανθρακικό αποτύπωμα (Kim, 2018)

3. **Το μπλε υδρογόνο (Blue Hydrogen).** Το "μπλε υδρογόνο" εμφανίζεται ως μια ρεαλιστική λύση για τη μείωση των εκπομπών άνθρακα που συνοδεύουν την παραγωγή υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα. Με την εφαρμογή της ευρέως αποδεκτής διαδικασίας αναμόρφωσης του μεθανίου με ατμό, η παραγωγή του μπλε υδρογόνου συνοδεύεται από την συλλογή και την αποθήκευση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτουν. Αυτή η μέθοδος παραγωγής υδρογόνου σε συνδυασμό με τεχνολογίες αποθήκευσης άνθρακα (Carbon Capture, Storage & Utilization-CCS) μειώνει αποτελεσματικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα άνθρακα, καθιστώντας το "μπλε υδρογόνο" ένα σημαντικό βήμα στη μετάβαση προς μηδενικές εκπομπές CO₂. Η λειτουργία της τεχνολογίας CCUS οδηγεί σε μείωση των ποσοτήτων CO₂ που τελικά απελευθερώνονται σε το ποσοστό που μπορεί να φτάσει 85-95%. Πρέπει, όμως, να σημειωθεί ότι η εγκατάσταση CCUS επιφέρει αύξηση των ενεργειακών αναγκών της διαδικασίας παραγωγής υδρογόνου καθώς και επιπρόσθετα επενδυτικά και λειτουργικά κόστη (Kakoulaki, et al., 2021). Το "μπλε υδρογόνο" αποτελεί έναν βιώσιμο συνδυασμό μεταξύ της παραγωγής υδρογόνου και της διαχείρισης του άνθρακα, αν και απαιτεί την ανάπτυξη των υποδομών CCS και των διαδρομών χρήσης του άνθρακα (Gimini, et al., 2021).
4. **Το τικουάζ υδρογόνο.** Παράγεται μέσω της διαδικασίας της πυρόλυσης, κατά την οποία το μεθάνιο διασπάται κατευθείαν σε υδρογόνο και στερεό άνθρακα, με τη χρήση ηλεκτρισμού ως μοναδική πηγή ενέργειας για την διεκπεραίωση της αντίδρασης. Αν και για την δημιουργία του χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη φυσικό αέριο ή μεθάνιο, δεν παράγεται CO₂. Επομένως η συμβολή της μεθόδου στην επιδείνωση της κλιματικής αλλαγής εξαρτάται από την προέλευση και το ανθρακικό αποτύπωμα του ηλεκτρισμού που απορροφάται. Λόγω της ήδη υπάρχουσας αγοράς στερεού άνθρακα, οι παραγόμενες ποσότητες μπορούν να αξιοποιηθούν παρέχοντας

μια επιπρόσθετη ροή εσόδων. Ωστόσο η μέθοδος αυτή δε βρίσκεται ακόμα σε ώριμο στάδιο και δε χρησιμοποιείται ευρέως.

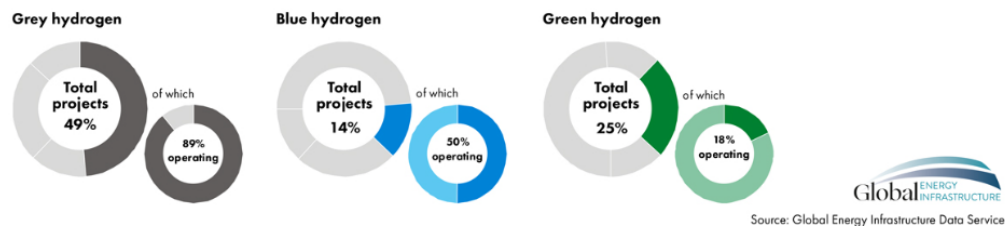
5. Το γκρι υδρογόνο (Grey Hydrogen). Το "γκρι υδρογόνο," που προέρχεται από την παραδοσιακή αποσύνθεση μεθανίου (αναμόρφωση μεθανίου-ατμού, Steam Methane Reforming-SMR) αντιπροσωπεύει μια οικονομικά βιώσιμη προσέγγιση παραγωγής υδρογόνου. Όπως φανερώνει και η ονομασία της, η διεργασία SMR έχει ως αντιδρώντα φυσικό αέριο και νερό σε μορφή ατμού. Ωστόσο, στη θέση του φυσικού αερίου μπορεί να βρεθεί το μεθάνιο καθώς και άλλοι αέριοι υδρογονάνθρακες όπως αιθάνιο, προπάνιο, βουτάνιο και ελαφριά και βαριά νάφθα. Αρχικά γίνεται επεξεργασία του φυσικού αερίου για απομάκρυνση θειικών προσμίξεων που μπορεί να υπάρχουν. Ύστερα, ακολουθεί το βήμα της αναμόρφωσης ή αλλιώς δημιουργίας αερίου σύνθεσης, το οποίο είναι ένα μείγμα CO και H₂. Τέλος το αέριο μείγμα περνάει από το στάδιο που ονομάζεται water-gas shift, όπου το CO αντιδρά με ατμό και παράγεται επιπρόσθετη ποσότητα H₂ και παράλληλα εκλύεται CO₂ στην ατμόσφαιρα (Nikolaidis, et al., 2017). Συνολικά, πρόκειται για μια ενδόθερμη αντίδραση που πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες 800-900 °C με την παρουσία καταλύτη, συνήθως νικελίου (Ni). Για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών θερμότητας, χρησιμοποιείται επιπλέον ποσότητα φυσικού αερίου, παίζοντας έτσι τόσο το ρόλο του αντιδρώντος όσο και της πηγής ενέργειας Η οικονομική προσιτότητα του γκρι υδρογόνου οφείλεται στην υπάρχουσα υποδομή και εμπειρογνωμοσύνη στην παραγωγή μεθανίου, καθιστώντας τη μέθοδο αυτή εύκολα εφαρμόσιμη και αποδοτική (Navas-Anguila, et al., 2021)
6. Μαύρο/καφέ υδρογόνο (Black/Brown Hydrogen). Η χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη σ' αυτή τη κατηγορία είναι ο στερεός άνθρακας, με τη διαφοροποίηση στην απόχρωση να είναι αντίστοιχη στην επιλογή μεταξύ λιθάνθρακα (μαύρο) και λιγνίτη (καφέ). Ο στερεός άνθρακας υποβάλλεται στην διαδικασία της αεριοποίησης μέσω της οποίας παράγεται αέριο υδρογόνο και εκλύονται στην ατμόσφαιρα, ως παραπροϊόντα της αντίδρασης, διοξείδιο (CO₂) και μονοξείδιο του άνθρακα (CO) σε μεγάλες ποσότητες. Πρόκειται για έναν τρόπο παραγωγής υδρογόνου που συμβάλλει ιδιαίτερος στην ρύπανση της ατμόσφαιρας.

	Terminology	Technology	Feedstock/ Electricity source	GHG footprint*
PRODUCTION VIA ELECTRICITY	Green Hydrogen	Electrolysis	Wind Solar Hydro Geothermal Tidal	Minimal
	Purple/Pink Hydrogen		Nuclear	
	Yellow Hydrogen		Mixed-origin grid energy	Medium
PRODUCTION VIA FOSSIL FUELS	Blue Hydrogen	Natural gas reforming + CCUS Gasification + CCUS	Natural gas coal	Low
	Turquoise Hydrogen	Pyrolysis	Natural gas	Solid carbon (by-product)
	Grey Hydrogen	Natural gas reforming		Medium
	Brown Hydrogen	Gasification	Brown coal (lignite)	High
	Black Hydrogen		Black coal	

* GHG footprint given as a general guide but it is accepted that each category can be higher in some cases.

Εικόνα 1: Χρωματική κατηγοριοποίηση των τρόπων παραγωγής του υδρογόνου (Global Energy Infrastructure, 2022)

Η βάση δεδομένων GEI (Global Energy Infrastructure) παρουσιάζει σε αντίστοιχη έκθεση ότι σχεδόν το 25% όλων των έργων υδρογόνου είναι με χρήση «πράσινου υδρογόνου», ωστόσο μόνο ένα κλάσμα αυτών των έργων λειτουργεί (18%) και αυτά που υπάρχουν είναι σε μικρή κλίμακα. Γεωγραφικά το «πράσινο υδρογόνο» επικεντρώνεται στην Ευρώπη και την Αυστραλία, αυτό μπορεί να είναι αποτέλεσμα της μεγαλύτερης διάθεσης για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στόχους εκπομπών που έχουν τεθεί από τις αντίστοιχες κυβερνήσεις.



Εικόνα 2: Ποσοστιαία σύνοψη των έργων με υδρογόνο βάση των δεδομένων Global Energy Infrastructure-GEI

1.4 Δίκτυα Φυσικού Αερίου και Προοπτικές Ανάμειξης Υδρογόνου

Τα δίκτυα φυσικού αερίου αποτελούν ένα σημαντικό στοιχείο της ενεργειακής υποδομής, διαδραματίζοντας ουσιαστικό ρόλο στη διανομή των ενεργειακών πόρων σε διάφορους τελικούς χρήστες. Αυτά τα δίκτυα περιλαμβάνουν έναν περίπλοκο ιστό από αγωγούς, εγκαταστάσεις αποθήκευσης, σταθμούς συμπίεσης και μηχανισμούς διανομής που έχουν αναπτυχθεί σταδιακά με τα χρόνια. Η εκτεταμένη εμβέλεια και η διασύνδεση αυτών των

δικτύων συμβάλλουν στην αξιοπιστία και την ανθεκτικότητα του ενεργειακού εφοδιασμού, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα τομέων, όπως η θέρμανση κατοικιών, οι βιομηχανικές διεργασίες, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και οι μεταφορές.

Η περιβαλλοντική επιταγή για τον μετριασμό των εκπομπών άνθρακα έχει ωθήσει την διερεύνηση καινοτόμων στρατηγικών για τον μετασχηματισμό των υπαρχόντων ενεργειακών συστημάτων. Μεταξύ αυτών των στρατηγικών, η ανάμειξη του υδρογόνου σε δίκτυα φυσικού αερίου έχει αναδειχθεί ως επιτακτική οδός για τη μείωση εκπομπών CO₂. Το υδρογόνο, όταν ενσωματώνεται στο φυσικό αέριο σε διάφορες συγκεντρώσεις, μπορεί να δώσει ένα μείγμα αερίων που έχει χαμηλότερες εκπομπές σε σύγκριση με το καθαρό φυσικό αέριο. Αυτή η προσέγγιση αξιοποιεί την υπάρχουσα υποδομή, επιτρέποντας μια σταδιακή μετάβαση προς ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό τοπίο.

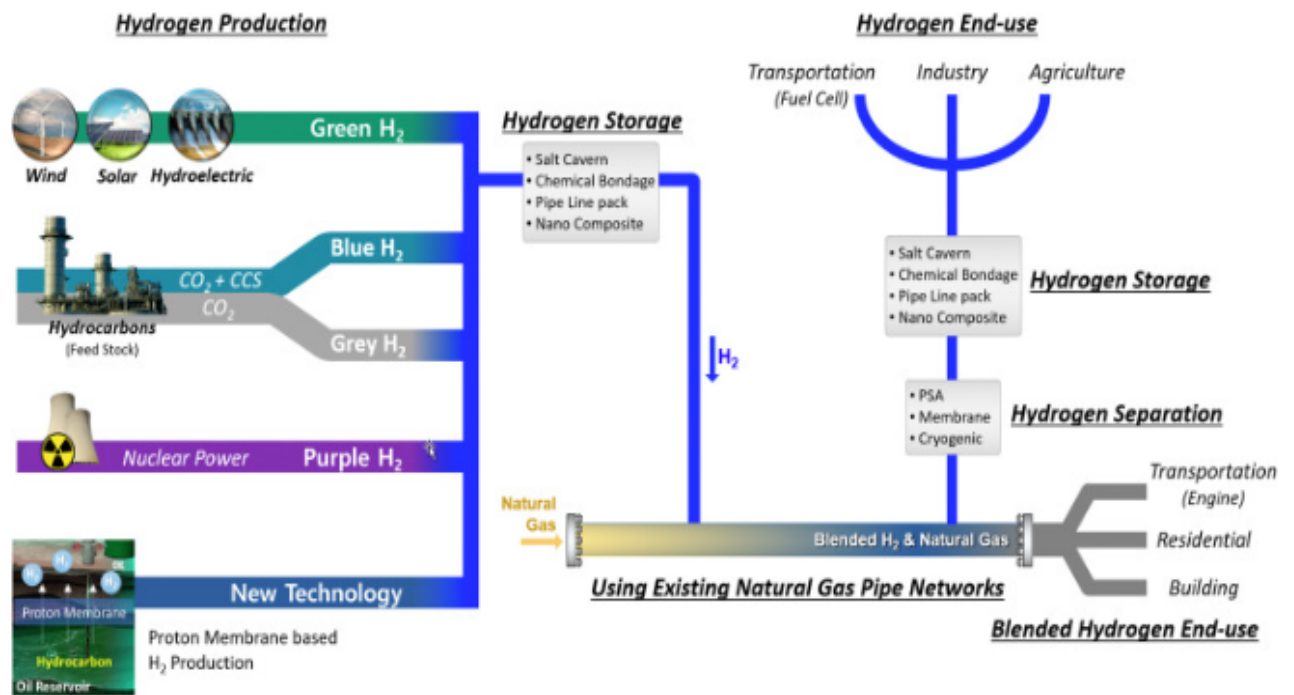
Τα κυριότερα πλεονεκτήματα ανάμειξης του υδρογόνου στα δίκτυα φυσικού αερίου είναι :

- Μείωση εκπομπών: Το υδρογόνο, όταν καίγεται, παράγει μόνο υδρατμούς, με αποτέλεσμα να μειωθούν σημαντικά οι εκπομπές άνθρακα. Η ανάμειξη υδρογόνου με φυσικό αέριο μπορεί να οδηγήσει σε αξιοσημείωτη μείωση των εκπομπών CO₂ ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας. Για παράδειγμα, ένα μείγμα που περιέχει 20% υδρογόνο κατ' όγκο έχει τη δυνατότητα να μειώσει τις εκπομπές CO₂ κατά περίπου 15-20%, ανάλογα με τη συγκεκριμένη σύνθεση και εφαρμογή.
- Συμβατότητα υποδομής: Η προσαρμοστικότητα της υπάρχουσας υποδομής φυσικού αερίου για την προσαρμογή της ανάμειξης υδρογόνου αποτελεί βασικό πλεονέκτημα. Το τρέχον δίκτυο αγωγών, οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης και τα συστήματα διανομής μπορούν να φιλοξενήσουν κάτω από ορισμένες συνθήκες μίγματα υδρογόνου-φυσικού αερίου με σχετικά μικρές τροποποιήσεις. Αυτή η συμβατότητα ελαχιστοποιεί την ανάγκη για εκτεταμένες επισκευές ή την κατασκευή εντελώς νέας υποδομής.
- Ενεργειακή ασφάλεια και ανθεκτικότητα: Η ανάμειξη υδρογόνου διαφοροποιεί το ενεργειακό μείγμα εντός του δικτύου φυσικού αερίου, ενισχύοντας την ενεργειακή ασφάλεια και μετριάζοντας τις διακοπές του εφοδιασμού. Αυτή η αυξημένη ανθεκτικότητα είναι ιδιαίτερα πολύτιμη για τη διασφάλιση συνεπούς ενεργειακού εφοδιασμού σε περιόδους υψηλής ζήτησης ή απρόβλεπτων διαταραχών.
- Σταδιακή μετάβαση: Η σταδιακή φύση της ανάμειξης υδρογόνου επιτρέπει μια σταδιακή μετάβαση που ευθυγραμμίζεται με τις εξελισσόμενες τεχνολογικές εξελίξεις και τη δυναμική της αγοράς. Αυτή η προσέγγιση ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο απότομων αλλαγών στα πρότυπα παροχής και κατανάλωσης ενέργειας.

Προκλήσεις και προβληματισμοί:

- Συμβατότητα υλικών: Η αλληλεπίδραση μεταξύ υδρογόνου και υλικών που χρησιμοποιούνται στην υπάρχουσα υποδομή φυσικού αερίου απαιτεί προσεκτική αξιολόγηση. Ιδιότητες του υδρογόνου, όπως το δυναμικό ευθραυστότητας, απαιτούν μελέτες για την αξιολόγηση της συμβατότητας των υλικών και των πιθανών επιπτώσεων στην ακεραιότητα του αγωγού.
- Πρωτόκολλα ασφαλείας: Η εισαγωγή του υδρογόνου εγείρει ανησυχίες για την ασφάλεια λόγω της ευφλεκτότητάς του και της χαμηλής ενέργειας ανάφλεξής του. Αυστηρά πρωτόκολλα ασφαλείας, ολοκληρωμένες αξιολογήσεις κινδύνου και επιχειρησιακές κατευθυντήριες γραμμές είναι επιτακτική ανάγκη για τη διασφάλιση ασφαλούς χειρισμού, μεταφοράς και χρήσης.
- Ρυθμιστικά πλαίσια: Η ενσωμάτωση του υδρογόνου στα δίκτυα φυσικού αερίου επιβάλλει προσαρμογές στα ρυθμιστικά πλαίσια, τους κώδικες και τα πρότυπα. Αυτά τα πλαίσια πρέπει να καλύπτουν τις τεχνικές προδιαγραφές, τις κατευθυντήριες γραμμές για την ασφάλεια και τις απαιτήσεις αναφοράς για να διασφαλιστεί η συμμόρφωση και η λειτουργική ασφάλεια.
- Εφοδιαστική Αλυσίδα και Παραγωγή: Η επεκτασιμότητα και η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας της παραγωγής υδρογόνου είναι πρωταρχικής σημασίας. Η διαθεσιμότητα πηγών υδρογόνου με χαμηλές εκπομπές άνθρακα ή ανανεώσιμων πηγών σε επαρκή κλίμακα είναι απαραίτητη για την υποστήριξη εκτεταμένων προσπαθειών ανάμειξης.

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί σε μια ολοκληρωμένη ανάλυση της ανάμειξης υδρογόνου σε δίκτυα φυσικού αερίου. Εστιάζοντας στη τεχνική σκοπιμότητα, στην οικονομική βιωσιμότητα, στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και σε πτυχές ασφάλειας, η εργασία αυτή προσπαθεί να συνεισφέρει στον συνεχιζόμενο διάλογο για τις βιώσιμες ενεργειακές μεταβάσεις. Τα επόμενα κεφάλαια θα εμβαθύνουν σε συγκεκριμένες πτυχές της ανάμειξης υδρογόνου, εξετάζοντας τις επιπτώσεις της στην καύση, τις τεχνολογίες καυστήρων και τις ευρύτερες επιπτώσεις των δικτύων μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου.



Εικόνα 3: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας από την παραγωγή στην ανάμειξη στους αγωγούς και την διανομή σε διαφορετικούς τελικούς χρήστες (Cristello, et al., 2023)

Έχουν γίνει πολυάριθμες μελέτες για τη μεταφορά υδρογόνου σε αγωγούς φυσικού αερίου. Από το έργο Fort Saskatchewan Hydrogen Blending, το οποίο χρησιμοποιεί συγκέντρωση 5% H₂ (Canadian Energy Research Institute (CERI), 2021), έως το έργο H21 το οποίο χρησιμοποιεί συγκέντρωση 100% H₂ (H21, 2019). Ο Πίνακας 1 απεικονίζει έναν συνοπτικό κατάλογο έργων μεταφοράς μείγματος υδρογόνου-φυσικού αερίου.

Πίνακας 1: Κατάλογο σημαντικών έργων σχετικά με τη μεταφορά μείγματος υδρογόνου-φυσικού αερίου (Cristello, και συν., 2023)

Project	Κράτος	Περιγραφή έργου	Ανάμειξη υδρογόνου (%H ₂)
HyDeploy	UK	Ανάμειξη υδρογόνου σε αγωγούς φυσικού αερίου	20%
Fort Saskatchewan Hydrogen Blending Project (ATCO)	Canada	Ανάμειξη υδρογόνου σε αγωγούς φυσικού αερίου που εξυπηρετούν κατοικίες και εμπορικά κτίρια στο Fort Saskatchewan.	5%
H21	UK	Διερεύνηση 100% χρήσης υδρογόνου με υπάρχον σύστημα φυσικού αερίου	100%
Hyblend	US	Τεχνική αξιολόγηση για την ανάμειξη υδρογόνου σε αγωγούς φυσικού αερίου	-
GRHYD	France	Ανάμειξη υδρογόνου σε γραμμές διανομής αερίου	20%
Snam	Italy	Ανάμειξη υδρογόνου σε γραμμές μεταφοράς αερίου	10%
HypSA	Australia	Πράσινο υδρογόνο που αναμειγνύεται σε γραμμές διανομής αερίου	5%
Enbridge and Cummins Hydrogen-blending Project	Canada	Ανάμειξη υδρογόνου σε γραμμές διανομής αερίου στο Markham, Οντάριο και εκτέλεση μελέτης δρομολόγησης	<2%
Hy4Heat	UK	Ολοκληρωμένη αξιολόγηση της χρήσης υδρογόνου ως καυσίμου σε οικιστικά και εμπορικά κτίρια	100%
Hydrogen injection in the gas grid	Denmark	Ανάμειξη υδρογόνου στη διανομή αερίου στο Varde της Δανίας και αξιολόγηση ασφάλειας	15%
Cleangas Turkey	Turkey	Έγχυση ανανεώσιμου υδρογόνου σε φυσικό αέριο και αξιολόγηση του μείγματος αερίου	20%

Πολλές μελέτες και έργα έχουν εξετάσει τα γενικά ζητήματα που αφορούν τη μεταφορά μείγματος υδρογόνου-φυσικού αερίου μέσω των υπάρχοντων αγωγών φυσικού αερίου και έχουν εντοπίσει πιθανούς κινδύνους κατά τη λειτουργία και συμβάντα αστοχίας. Ωστόσο, υπάρχει ανάγκη για πιο εμπειριστατωμένη έρευνα σε θέματα λειτουργίας, υλικών και ασφάλειας.

Ένα βασικό ερώτημα στη μεταφορά μείγματος υδρογόνου-φυσικού αερίου είναι εάν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι υπάρχοντες αγωγοί φυσικού αερίου, λαμβάνοντας υπόψη τα όρια συγκέντρωσης υδρογόνου και τις αντίστοιχες μεταβολές των ιδιοτήτων του αερίου λόγω της υψηλής πίεσης λειτουργίας. Αυτοί οι παράγοντες μπορούν να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στη συμπίεση, την τριβή, τη θερμοκρασία και την παροχή ενέργειας (Saeedmanesh, και συν., 2018). Επιπλέον, τα συμβατικά υλικά των αγωγών φυσικού αερίου μπορεί να είναι ευαίσθητα σε «ευθραυστότητα υδρογόνου» και να απαιτούν μείωση της

πίεσης λειτουργίας. Η χαμηλή πυκνότητα υδρογόνου μπορεί επίσης να οδηγήσει σε διαφορετική δυναμική αερίου στην περίπτωση συμβάντων διαρροών, καθιστώντας τα συμβατικά συστήματα ανίχνευσης διαρροών δυνητικά αναποτελεσματικά στους αγωγούς μείγματος υδρογόνου-φυσικού αερίου. Επιπλέον, η διαρροή υδρογόνου σε μια περιορισμένη περιοχή έχει τη δυνατότητα να προκαλέσει σημαντικές ζημιές λόγω των μεγάλων ορίων έκρηξης του υδρογόνου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Επιδράσεις του υδρογόνου στις ιδιότητες του HBNG

2.1 Κριτήρια ποιότητας καύσης μίγματος υδρογόνου-φυσικού αερίου

Η επίδραση στην ελάχιστη απαίτηση αέρα κατά τη πρόσμειξης υδρογόνου στο φυσικό αέριο, είναι ιδιαίτερα σημαντική. Η ιδιότητα αυτή επηρεάζει άμεσα μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους διεργασίας οποιασδήποτε διαδικασίας καύσης, την αναλογία περίσσειας αέρα λ .

Αν και θεωρητικά είναι δυνατό να παρέχεται μόνο ο ελάχιστος αέρας που απαιτείται για μια διαδικασία καύσης, αυτό δεν είναι σκόπιμο στην πράξη, καθώς αυτό θα απαιτούσε τέλεια ανάμειξη καυσίμου και οξειδωτικού εντός του προμείγματος ή του θαλάμου καύσης προκειμένου να επιτευχθεί πλήρης κατανάλωση του καυσίμου. Ως εκ τούτου, σχεδόν όλες οι σχετικές τεχνολογικά διεργασίες καύσης τροφοδοτούνται με περισσότερο αέρα από ό,τι θεωρητικά απαιτείται. Ένας ακόμα λόγος είναι ότι σε μια πραγματική εφαρμογή η σύνθεση του παρεχόμενου φυσικού αερίου μπορεί να μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου, όπως και η σύνθεση του αέρα καύσης (π.χ. λόγω αλλαγών υγρασίας). Μια επαρκής ποσότητα περίσσειας αέρα διασφαλίζει ότι ακόμη και με κυμαινόμενες συνθέσεις καυσίμου και οξειδωτικού, μπορεί να επιτευχθεί πλήρης καύση.

Η αναλογία περίσσειας αέρα (λ) εκφράζεται ως ο λόγος της πραγματικά παρεχόμενης ποσότητας αέρα προς τη θεωρητικά απαιτούμενη ποσότητα αέρα.

$$\lambda = \frac{\dot{V}_{air,actual}}{\dot{V}_{air,min}} = \frac{\dot{V}_{air,actual}}{\dot{V}_{fuel} Air_{min}}$$

Ως προς την τελική χρήση, η επίδραση της ανάμειξης υδρογόνου σε φυσικό αέριο σε μια συσκευή (ή ακόμη και σε οποιοδήποτε είδους εξοπλισμό καύσης) είναι ουσιαστικά ένα πρόβλημα ποιότητας αερίου. Η σύνθεση και οι ιδιότητες του αερίου καυσίμου αλλάζουν, σε

σύγκριση με το αέριο για το οποίο σχεδιάστηκε και προσαρμόστηκε αρχικά η συσκευή, και οι συνέπειες αυτής της αλλαγής στην απόδοση της συσκευής καύσης, π.χ. όσον αφορά τις εκπομπές ή την απόδοση, πρέπει να αξιολογηθούν κάθε φορά ξεχωριστά.

Ένας δείκτης ο οποίος χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό της ποιότητας του αερίου καυσίμου είναι ο δείκτης Wobbe (Wobbe Index, WI) (WS). Ο (ανώτερος ή ακαθάριστος) δείκτης Wobbe ορίζεται ως εξής :

$$W_s = \frac{H_s}{\sqrt{\frac{\rho_{n,fuel}}{\rho_{n,air}}}} = \frac{H_s}{\sqrt{d}}$$

Όπου

H_s : μεικτή θερμογόνος ισχύς

$\rho_{n,fuel}, \rho_{n,air}$: πυκνότητα του καυσίμου και του αέρα αντίστοιχα

d : σχετική πυκνότητα

Θεωρητικά, δύο καύσιμα με τον ίδιο δείκτη Wobbe θα απελευθερώνουν την ίδια ποσότητα θερμότητας ανά μονάδα χρόνου σε ένα σύστημα καύσης, υπό την προϋπόθεση ότι η γεωμετρία και η πίεση του ακροφυσίου δεν αλλάζουν. Αυτές οι υποθέσεις ισχύουν γενικά για οικιακές συσκευές, αν και τα συστήματα καύσης για άλλες εφαρμογές, ιδιαίτερα τις βιομηχανίες θερμικής επεξεργασίας, μπορεί να απαιτούν διαφορετική προσέγγιση.

Λόγω της σημασίας του δείκτη Wobbe, ιδιαίτερα για συσκευές στον οικιακό τομέα, οι εθνικοί και διεθνείς κανονισμοί ποιότητας αερίου συνήθως βασίζονται σε αυτήν την ιδιότητα ως το κύριο κριτήριο ποιότητας αερίου για την αξιολόγηση της εναλλαξιμότητας των αερίων καυσίμων (Statistical Surveys on the Sensitivities of Industrial End-Users to Gas Quality Fluctuations in Germany, 2017).

Για οποιαδήποτε διαδικασία καύσης, οι θερμοκρασίες που εμφανίζονται είναι υψίστης σημασίας. Οι θερμοκρασίες έχουν άμεσο αντίκτυπο στη μεταφορά θερμότητας και στην αποτελεσματικότητα της διαδικασίας, αλλά και στο σχηματισμό ρύπων, π.χ. οξειδία του αζώτου (NO_x). Για μια πρώτη θεωρητική αξιολόγηση της επίδρασης της πρόσμειξης υδρογόνου στις διεργασίες καύσης που έχουν σχεδιαστεί για φυσικό αέριο, είναι χρήσιμο να εξετάσουμε τις αδιαβατικές θερμοκρασίες καύσης. Η αδιαβατική θερμοκρασία καύσης είναι η θεωρητική μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να επιτευχθεί σε μια διαδικασία καύσης, χωρίς απώλειες. Αυτό σημαίνει ότι ολόκληρη η θερμότητα που απελευθερώνεται από τη χημική αντίδραση μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια στα καυσαέρια. Η θερμοκρασία αδιαβατικής καύσης είναι συνάρτηση των συνθέσεων και των θερμοκρασιών του καυσίμου και του οξειδωτικού, της πίεσης και της αναλογίας περίσσειας αέρα της διαδικασίας. Ως εκ

τούτου, είναι ένα προφανές πρώτο μέσο για να δούμε πώς η πρόσμειξη υδρογόνου θα επηρεάσει τις θερμοκρασίες σε μια συσκευή, παρόλο που οι πραγματικές θερμοκρασίες στη συσκευή πιθανότατα θα είναι σημαντικά χαμηλότερες από τις αδιαβατικές θερμοκρασίες.

2.2 Ιδιότητες φυσικού αερίου-υδρογόνου

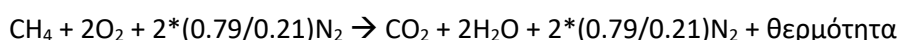
Οι διαφορές στις ιδιότητες καύσης μεταξύ υδρογόνου και φυσικού αερίου μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα στην λειτουργία των αγωγών μεταφοράς και τις τελικές εφαρμογές του χρήστη, κατά την ανάμειξη υδρογόνου στο φυσικό αέριο. Ο Πίνακας 2 παρέχει μια επισκόπηση των χαρακτηριστικών που σχετίζονται με την καύση για το υδρογόνο και το μεθάνιο (το οποίο είναι το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου) που μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία κινητήρων, τουρμπινών και καυστήρων ανάλογα τη περιεκτικότητα σε υδρογόνο. Αυτές οι διαφορές στα χαρακτηριστικά μπορούν επίσης να επηρεάσουν τη λειτουργία των σταθμών συμπίεσης αγωγών, επειδή ορισμένοι σταθμοί συμπίεσης αγωγών φυσικού αερίου τροφοδοτούνται από κινητήρες φυσικού αερίου που αντλούν μικρή ποσότητα καυσίμου από τον αγωγό.

Πίνακας 2: Σύγκριση ορισμένων ιδιοτήτων μεταξύ του υδρογόνου και του μεθανίου (European Committee for Standardization (CEN), 2021)

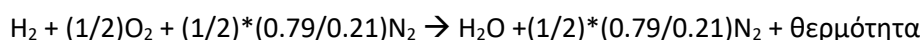
Παράμετρος	Μεθάνιο	Υδρογόνο
Σχετική πυκνότητα (air=1)	0.55	0.07
Όριο ανάφλεξης (mol%)	4.4-17	4-77
Ενέργεια ανάφλεξης (mJ)	0.26	0.017
Θερμογόνος ισχύς (MJ/m ³)	Gross : 37.8 Net : 34.0	Gross: 12.1 Net: 10.2
Δείκτης Wobbe (MJ/m ³)	Upper: 53 Lower : 48	Upper: 48 Lower: 41
Μοριακό βάρος (g/mol)	16	2
Συντελεστής διάχυσης στον αέρα (10 ⁻⁴ m ² /s)	0.61	0.20
Συντελεστής Joule-Thomson (K/bar)	0.4	-0.03
Αδιαβατική στοιχειομετρική θερμοκρασία καύσης (°C)	1950	2100
Στρωτή ταχύτητα καύσης (cm/s)	38	209
Σημείωση : Η θερμογόνος ισχύς και ο δείκτης Wobbe ορίζονται για το πραγματικό ξηρό σε συνθήκες αναφοράς ISO		

2.3 Βασικά χαρακτηριστικά καύσης και ποιότητας μειγμάτων CH₄/H₂

Για το μεθάνιο, η διαδικασία καύσης με αέρα μπορεί να περιγραφεί με απλοποιημένο τρόπο ως:



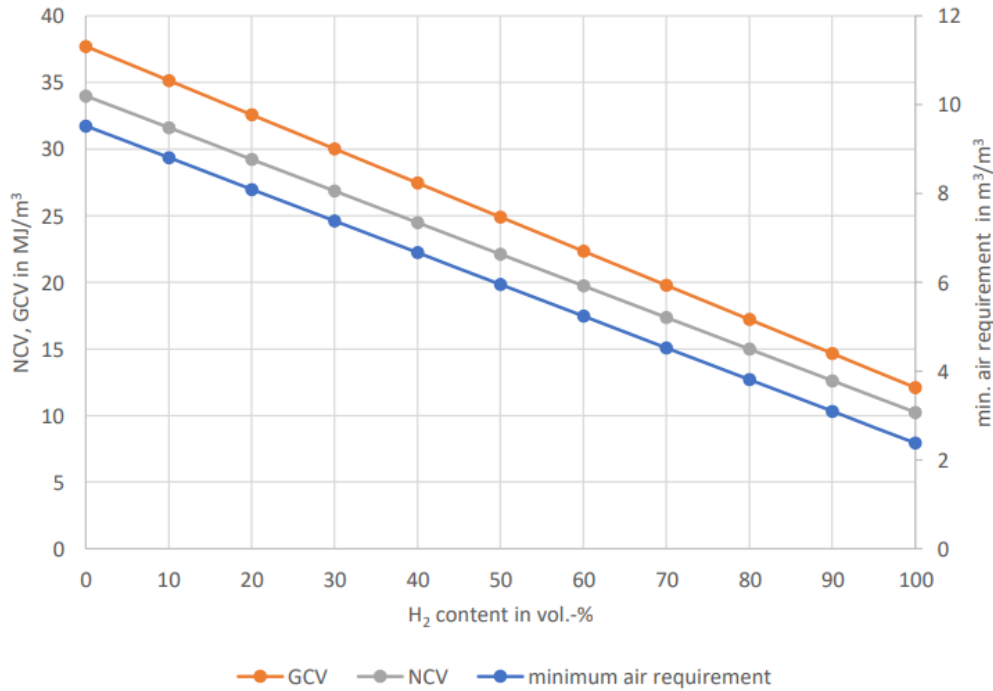
Σε σύγκριση η εξίσωση αντίδρασης καύσης υδρογόνου-αέρα είναι η εξής:



Οι εξισώσεις αντίδρασης που δίνονται εδώ περιγράφουν τη λεγόμενη στοιχειομετρική καύση. Μια στοιχειομετρική διαδικασία καύσης είναι μια διαδικασία κατά την οποία το καύσιμο τροφοδοτείται με την ελάχιστη ποσότητα οξειδωτικού που απαιτείται για την επίτευξη πλήρους μετατροπής. Αν και αυτός είναι ένας πολύ απλοποιημένος τρόπος για να περιγραφούν οι πραγματικές χημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την καύση, μπορεί είναι χρήσιμες για τον προσδιορισμό ορισμένων σημαντικών ιδιοτήτων καύσης του μεθανίου και του υδρογόνου. Ιδιότητες όπως οι ελάχιστες απαιτήσεις οξυγόνου και αέρα, η καθαρή και ακαθάριστη θερμογόνος ισχύς (NCV και GCV), ο δείκτης Wobbe και η θερμοκρασία αδιαβατικής καύσης μπορούν εύκολα να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας αυτές οι εξισώσεις αντίδρασης και τα αντίστοιχα ενεργειακά τους ισοζύγια.

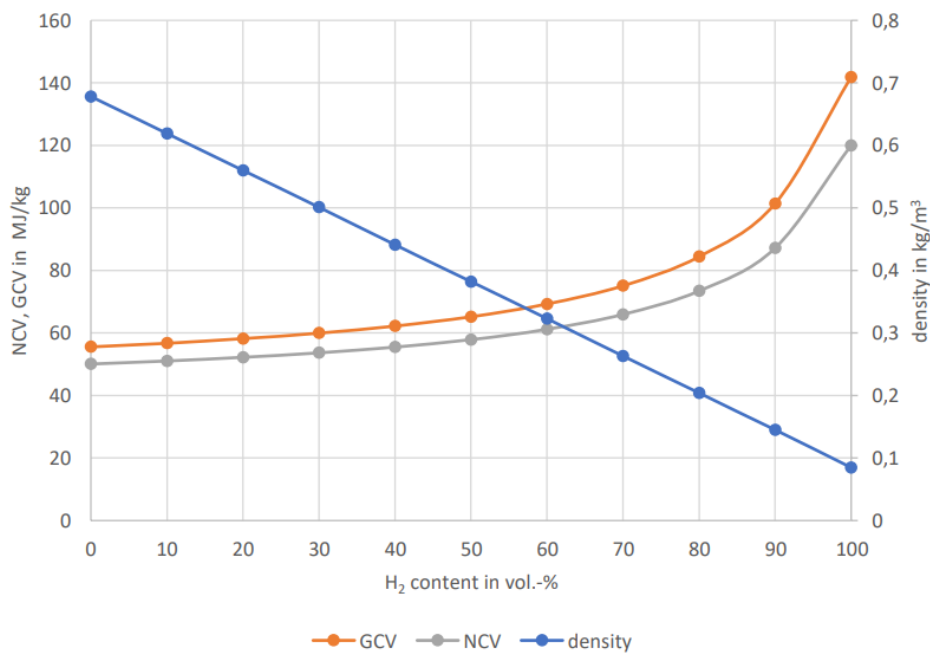
Η πρώτη σημαντική διαφορά μεταξύ μεθανίου και υδρογόνου όσον αφορά την καύση είναι ότι το υδρογόνο απαιτεί λιγότερο οξυγόνο για να επιτευχθεί η πλήρης μετατροπή σε σχέση με το μεθάνιο. Η ελάχιστη απαίτηση οξυγόνου για το H₂ είναι 0,5 mol O₂ / mol H₂, ενώ το μεθάνιο απαιτεί 2 mol O₂ ανά mole CH₄. Αντίστοιχα, οι ελάχιστες απαιτήσεις αέρα είναι 2.381 mol αέρα / mol H₂ και 9.524 mol αέρα / mol CH₄.

Αυτή η διαφορά στις απαιτήσεις οξυγόνου αντικατοπτρίζεται επίσης στις ογκομετρικές καθαρές και ακαθάριστες θερμογόνους αξίες των μιγμάτων CH₄/H₂, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4. Με αύξηση της συγκέντρωσης υδρογόνου στο μίγμα, τόσο οι απαιτήσεις αέρα όσο και οι ογκομετρικές θερμογόνοι αξίες μειώνονται με γραμμικό τρόπο. Αυτό σημαίνει επίσης ότι με τις αυξανόμενες συγκεντρώσεις υδρογόνου στο μείγμα CH₄/H₂, χρειάζεται περισσότερο αέριο καυσίμου για την παροχή της απαιτούμενης θερμότητας σε μια συσκευή.



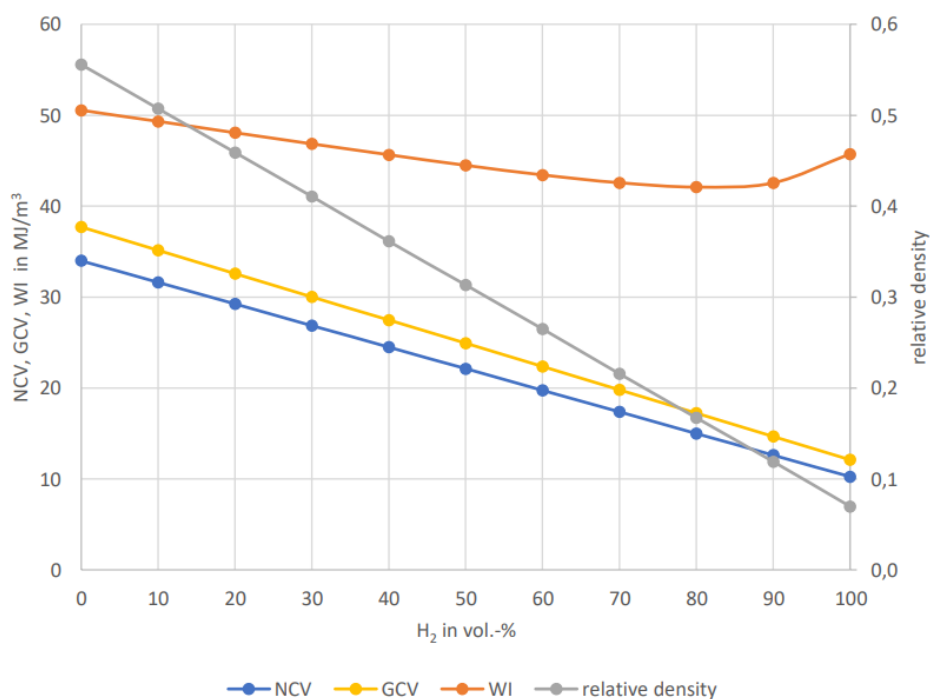
Εικόνα 4: Επιπτώσεις περιεκτικότητας σε υδρογόνο στην ελάχιστη απαίτηση αέρα και στην καθαρή και ακαθάριστη θερμότητα (Leicher, et al., 2020)

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όρους μάζας, η θερμότητα στη πραγματικότητα αυξάνεται όσο υψηλότερη είναι περιεκτικότητα σε υδρογόνο, καθώς η πυκνότητα του υδρογόνου είναι εξαιρετικά χαμηλή (Εικόνα 5).



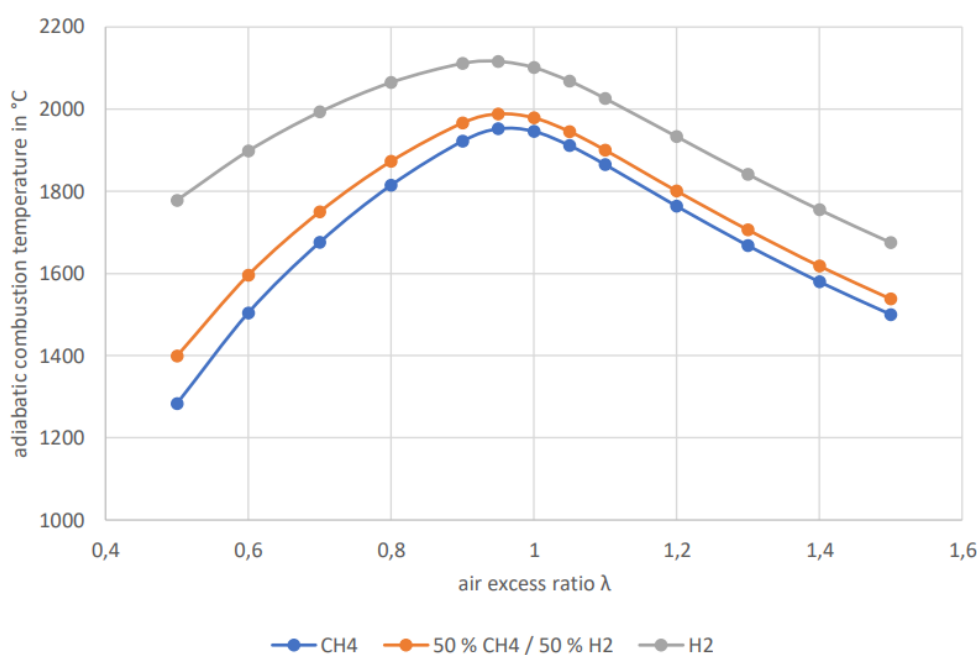
Εικόνα 5: Θερμότητα με βάση τη μάζα και τη πυκνότητα διαφόρων μιγμάτων CH₂/H₂ (Leicher, et al., 2020)

Η Εικόνα 6 δείχνει την επίδραση της πρόσμειξης υδρογόνου στο μεθάνιο για ορισμένα κριτήρια ποιότητας καυσίμου όπως η σχετική πυκνότητα, η καθαρή και η μεικτή θερμογόνο ισχύς και ο δείκτης Wobbe. Παρατηρείται ότι το ογκομετρικό ενεργειακό περιεχόμενο του καυσίμου αερίου (δηλαδή η θερμογόνο δύναμη) μειώνεται γραμμικά με την αύξηση των συγκεντρώσεων υδρογόνου. Σε σύγκριση με το μεθάνιο, το NCV και το GCV του καθαρού υδρογόνου μειώνονται στο 30 % και 32 % αντίστοιχα. Η επίδραση της πρόσμειξης υδρογόνου στη σχετική πυκνότητα είναι ακόμη πιο έντονη: η σχετική πυκνότητα του H₂ είναι περίπου οκτώ φορές μικρότερη από αυτή του CH₄. Ως αποτέλεσμα, η αλλαγή του δείκτη Wobbe από καθαρό μεθάνιο σε καθαρό υδρογόνο είναι πολύ λιγότερο σοβαρή, καθώς η αλλαγή στη θερμογόνο δύναμη αντισταθμίζεται σε μεγάλο βαθμό από την αλλαγή στις πυκνότητες. Έτσι, η διαφορά στους δείκτες Wobbe μεταξύ CH₄ και H₂ είναι μόνο περίπου 9,5 %, ενώ η μεταβολή στη μεικτή θερμογόνο δύναμη ανέρχεται σε περίπου 68 %. Επίσης, ο δείκτης Wobbe – σε αντίθεση με τις θερμογόνο ισχύς ή την πυκνότητα – δεν μειώνεται μονότονα σε όλο το εύρος περιεκτικότητας υδρογόνου. Αντίθετα, στην πραγματικότητα αυξάνεται με την αύξηση των συγκεντρώσεων υδρογόνου για μείγματα καυσίμων με πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε υδρογόνο.



Εικόνα 6: Μεταβολή των κύριων παραμέτρων ποιότητας καύσης αερίου ως συνάρτηση της πρόσμειξης υδρογόνου στο μεθάνιο (Leicher, και συν., 2020).

Στην Εικόνα 7 συγκρίνονται οι τιμές της θερμοκρασίας αδιαβατικής καύσης του μεθανίου, ενός μείγματος 50 vol. % CH₄ και 50 % H₂ και του καθαρού H₂ σε ένα ευρύ φάσμα αναλογιών περίσσειας αέρα. Το H₂ και τα μείγματα μεθανίου/υδρογόνου παράγουν υψηλότερες θερμοκρασίες καύσης σε ολόκληρο το εύρος τιμών περίσσειας αέρα λ έναντι του μεθανίου. Η αύξηση της αδιαβατικής θερμοκρασίας καύσης του μείγματος υδρογόνου/μεθανίου έναντι του μεθανίου είναι σχετικά μέτρια (περίπου 30 °C σε λ=1). Ωστόσο, η διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών αδιαβατικής καύσης του μεθανίου και του καθαρού υδρογόνου είναι σημαντικά υψηλότερη (πάνω από 150 °C).



Εικόνα 7: Θερμοκρασίες αδιαβατικής καύσης CH₄, 50 % CH₄ / 50 % H₂ και H₂ ως συναρτήση του λόγου περίσσειας αέρα, με αέρα ως οξειδωτικό. T_{καύσιμο} = 15 °C, T_{air} = 15 °C, p = 1 atm (Leicher, και συν., 2020).

2.3 Επίδραση της πρόσμειξης υδρογόνου στη στοιχειομετρία της καύσης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η αναλογία περίσσειας αέρα λ είναι μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους διεργασίας για κάθε είδους σύστημα καύσης και σχετίζεται στενά με τη σύνθεση του αερίου καυσίμου. Θα επηρεάσει όχι μόνο τις θερμοκρασίες που εμφανίζονται στο σύστημα καύσης, αλλά και την ενεργειακή απόδοση και τις εκπομπές ρύπων. Ωστόσο, το πώς ακριβώς επηρεάζεται η στοιχειομετρία σε μια διαδικασία καύσης δεν εξαρτάται μόνο από τη σύνθεση του καυσίμου, αλλά και από άλλους παράγοντες, π.χ. τον τρόπο με τον οποίο ελέγχονται οι ογκομετρικές παροχές καυσίμου και οξειδωτικού και εάν υπάρχει κάποιο είδος ελέγχου της ενεργού καύσης. Καθώς το υδρογόνο έχει χαμηλότερη

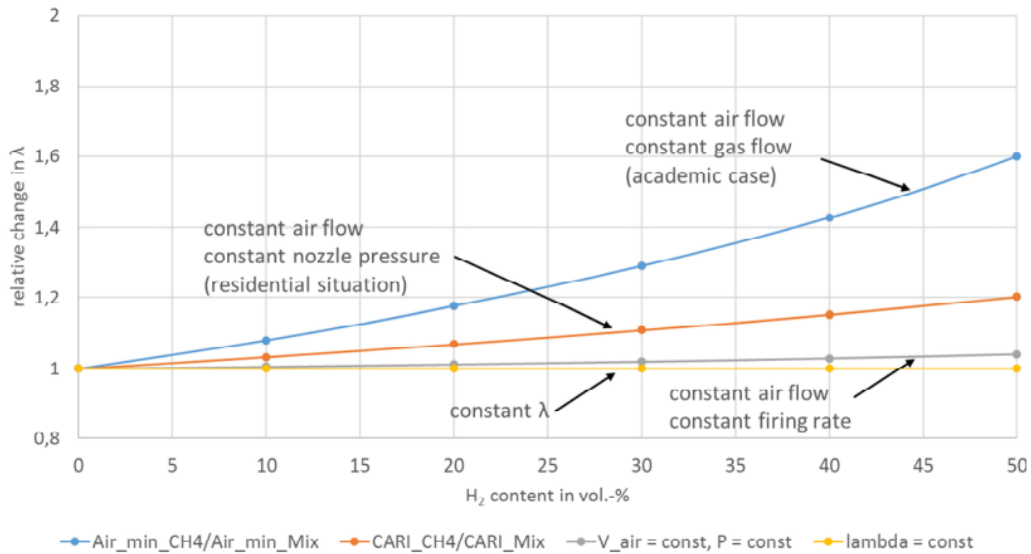
ελάχιστη απαίτηση αέρα σε σύγκριση με το μεθάνιο, οποιοδήποτε μείγμα CH₄ και H₂ θα απαιτεί επίσης λιγότερο αέρα ανά μοριακή μονάδα καυσίμου από το καθαρό μεθάνιο για πλήρη καύση. Έτσι, εάν ληφθεί υπόψη μόνο η χημεία της καύσης, η ανάμειξη υδρογόνου με μεθάνιο θα έχει ως αποτέλεσμα μια μεταβολή του λόγου περίσσειας αέρα σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\lambda_{mix} = \frac{Air_{min,CH_4}}{Air_{min,mix}} \lambda_{CH_4}$$

Αυτή η σχέση αντιστοιχεί σε μια κατάσταση όπου μεταβάλλεται μόνο η σύνθεση του καυσίμου, αλλά οι ροές όγκου τόσο του καυσίμου όσο και του οξειδωτικού παραμένουν σταθερές. Αυτή είναι μία θεωρητική προσέγγιση που θα μπορούσε επίσης σημαίνει ότι μειώνεται και η εισροή θερμότητας στο σύστημα καύσης, λόγω της μειωμένης θερμογόνου δύναμης του μίγματος μεθανίου/υδρογόνου. Μια άλλη επίσης θεωρητική προσέγγιση θα ήταν εάν τόσο η ροή όγκου του αέρα όσο και η εισερχόμενη θερμότητα στο σύστημα, δηλαδή ο ρυθμός καύσης, να διατηρούνταν σταθερές. Σε αυτή την περίπτωση, η μεταβολή της στοιχειομετρίας θα μπορούσε να εκφραστεί με την εξίσωση:

$$\lambda_{mix} = \frac{Air_{min,CH_4}}{Air_{min,mix}} \frac{H_{i,mix}}{H_{i,CH_4}}$$

Σε ένα τέτοιο σύστημα, η περίσσεια αέρα θα μειωνόταν σημαντικά καθώς οι αλλαγές στις ελάχιστες απαιτήσεις αέρα αντισταθμίζονται σε μεγάλο βαθμό από τις μεταβαλλόμενες τιμές θερμογόνου δύναμης. Πιο κατάλληλη για την κατάσταση σε οικιακές και εμπορικές συσκευές χωρίς κανενός είδους έλεγχος καύσης είναι η περίπτωση όπου τόσο η ροή αέρα όσο και η πίεση στο ακροφύσιο παραμένουν σταθερές. Σε ένα τέτοιο σύστημα, η ροή όγκου του καυσίμου αερίου είναι συνάρτηση του δείκτη Wobbe (ο οποίος βασίζεται στην υπόθεση της σταθερής πίεσης και διαμέτρου ακροφυσίου) και έτσι, η περίσσεια αέρα μειώνεται σημαντικά (βλ. Εικόνα 6). αφού αλλάζει και η ροή του όγκου του αερίου αυτό επίσης σημαίνει ότι ο ρυθμός καύσης αλλάζει.



Εικόνα 8: Επίδραση της πρόσμιξης υδρογόνου στη σχετική στοιχειομετρία ενός συστήματος καύσης (Leicher, και συν., 2020).

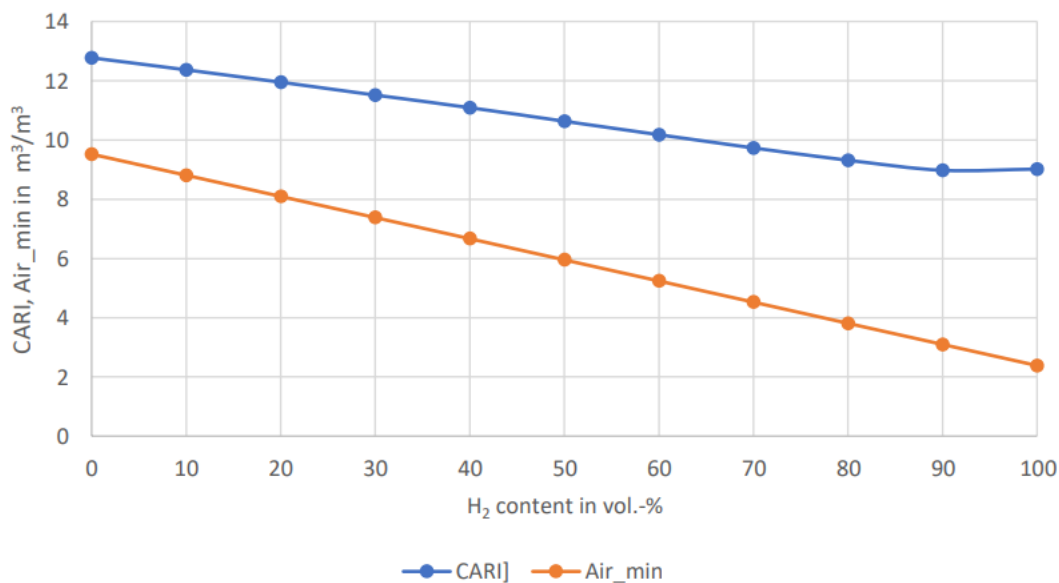
Για τέτοια συστήματα, ο υπολογισμός της απαιτούμενης ποσότητας αέρα χρησιμοποιώντας την καθαρά χημική ελάχιστη απαίτηση αέρα Air_{min} θα ήταν ακατάλληλος. Αντίθετα, χρησιμοποιείται μια ιδιότητα που ονομάζεται Δείκτης Απαίτησης Αέρα Καύσης (Combustion Air Requirement Index, CARI), η οποία ορίζεται κατ' αναλογία με τον δείκτη Wobbe:

$$CARI = \frac{Air_{min}}{\sqrt{d}} = \frac{Air_{min}}{\sqrt{\frac{\rho_{n,fuel}}{\rho_{n,air}}}}$$

Για μια τέτοια κατάσταση (που ισχύει για τις περισσότερες οικιακές συσκευές καύσης αερίου), η μετατόπιση των αναλογιών περίσσειας αέρα θα ακολουθεί θεωρητικά την αναλογία των τιμών CARI για τα διαφορετικά καύσιμα:

$$\lambda_{mix} = \frac{CARI_{CH_4}}{CARI_{mix}} \lambda_{CH_4}$$

Η Εικόνα 9 συγκρίνει τις μεταβολές τόσο του Air_{min} όσο και του CARI ως τη περιεκτικότητα του υδρογόνου στο μείγμα. Αντίστοιχα με τον δείκτη Wobbe, αυτή η μεταβολή δεν είναι γραμμική, λόγω της επίδρασης της πυκνότητας.



Εικόνα 9: CARI και Airmin σε μίγματα CH₄/H₂ ως συναρτήση της συγκέντρωσης H₂ (Leicher, και συν., 2020)

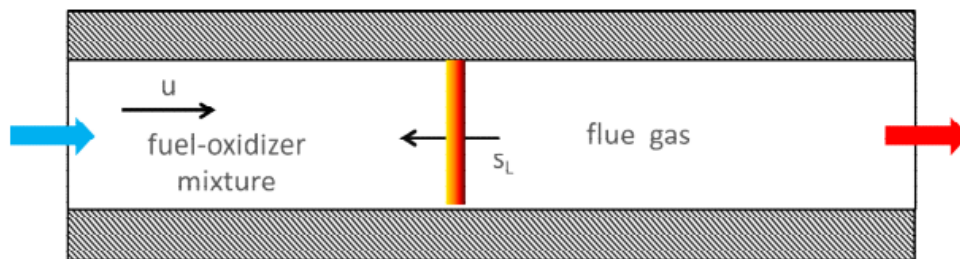
2.4 Ταχύτητες στρωτής καύσης

Οι περισσότερες οικιακές συσκευές θέρμανσης χρησιμοποιούν καυστήρες με προάναμειξη για την παραγωγή θερμότητας, δηλαδή το καύσιμο και ο αέρας αναμιγνύονται πριν εγχυθούν στο χώρο καύσης. Σε αυτούς τους καυστήρες, η στρωτή ταχύτητα καύσης sL παίζει σημαντικό ρόλο για τη σταθερότητα και το σχήμα της φλόγας. Στρωτή ταχύτητα καύσης, ορίζεται ως η ταχύτητα με την οποία το μέτωπο της φλόγας διαδίδεται στο άκαυστο μίγμα καυσίμου/οξειδωτικού και εξαρτάται από τη σύνθεση τόσο του καυσίμου όσο και του οξειδωτικού, τη θερμοκρασία, την πίεση και την αναλογία περίσσειας αέρα.

Η ισορροπία μεταξύ της ταχύτητας ροής του μείγματος καυσίμου/οξειδωτικού u και της ταχύτητας στρωτής καύσης sL (βλ. Εικόνα 10) καθορίζει πού εγκαθίσταται η φλόγα με σταθερό τρόπο:

1. Εάν το sL είναι πολύ μικρό σε σύγκριση με το u ($sL \ll u$), η φλόγα θα μεταφερθεί από το θάλαμο καύσης προς τον αγωγό καυσαερίων, το λεγόμενο φύσημα.
2. Όταν η ταχύτητα ροής u και η στρωτή ταχύτητα καύσης είναι ίσου μεγέθους ($u = sL$), αλλά αντίθετου προσανατολισμού, η φλόγα είναι σταθερή.
3. Από τη διαμόρφωση «σταθερής φλόγας», εάν το sL αυξηθεί και πλησιάσει πολύ το u , η φλόγα σταθεροποιείται πιο κοντά στον καυστήρα, προκαλώντας πιθανή υπερθέρμανση.

4. Εάν η ταχύτητα καύσης γίνει μεγαλύτερη από την ταχύτητα ροής ($s_L > u$), η φλόγα θα κινηθεί ανάντη, θα βρει ένα σημείο σταθεροποίησης κοντά στον εγχυτήρα και πιθανώς θα καταστρέψει τον ίδιο τον καυστήρα (flashback)



Εικόνα 10: Ταχύτητα ροής του μείγματος καυσίμου-οξειδωτικού u και ταχύτητας στρωτής καύσης s_L (Leicher, και συν., 2020)

Στην περίπτωση ενός προαναμεμιγμένου καυστήρα αερίου, όταν η ταχύτητα της στρωτής καύσης αυξάνεται σταδιακά (π.χ. με προσθήκη υδρογόνου), η ζώνη της αντίδρασης σταθεροποιείται προοδευτικά πιο κοντά στον καυστήρα και η απώλεια θερμότητας στον καυστήρα θα αρχίσει να αυξάνεται. Εάν το μέγεθος της θύρας του καυστήρα είναι μεγάλο, δημιουργείται το φαινόμενο flashback εάν όμως η θύρα του καυστήρα είναι αρκετά μικρή, η φλόγα σβήνει. Αυτή η κατάσταση είναι σχετική στο πλαίσιο της πρόσμειξης υδρογόνου, καθώς η ελάχιστη διάμετρος σβέσης για την καύση υδρογόνου είναι σημαντικά μικρότερη από ό,τι για την καύση μεθανίου. Οι ελάχιστες διαμέτροι σβέσης έχουν μετρηθεί για πολλά αέρια και για κυκλικές θύρες (Jones, 1989).

Πίνακας 3: Ελάχιστη διάμετρος σβέσης για διάφορα αέρια καύσιμα (Jones, 1989)

Αέριο	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈
Ελάχιστη διάμετρος σβέσης (mm)	0.8	3.5	2.5	2.9

Αυτές οι τιμές για τις ελάχιστες διαμέτρους σβέσης θα πρέπει να λαμβάνονται ως θεωρητικές επειδή ισχύουν μόνο για πλήρως ανεπτυγμένες (παραβολικές) στρωτές ροές. Επιπλέον, η μείωση της διαμέτρου της θύρας καυστήρα για την αποφυγή του φαινομένου flashback μπορεί να έχει ορισμένες επιπτώσεις, όπως η μείωση του εύρους ισχύος του καυστήρα ή η πρόκληση φαινομένου εκτόνωσης για ορισμένα αέρια (blow off effect). Ωστόσο, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι όσο μικρότερες είναι οι θύρες καυστήρα, τόσο πιο ανθεκτικός

θα πρέπει να είναι ο καυστήρας στο flashback. Από την άλλη πλευρά, τα ακροφύσια του καυστήρα που είναι αρκετά μικρά για προαναμεμιγμένη καύση μεθανίου-αέρα μπορεί να είναι ανεπαρκή μεθανίου-υδρογόνου.

Η ελάχιστη διάμετρος σβέσης υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (Jones, 1989):

$$\frac{s_L d_q}{a} = constant$$

s_L : η στρωτή ταχύτητα του άκαυτου μείγματος αερίων (mm/s)

d_q : η διάμετρος σβέσης (mm)

a : συντελεστής θερμικής διάχυσης του μείγματος αερίων (mm²/s)

Με αυτή τη σχέση δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός της διαμέτρου σβέσης για έναν νέο καυστήρα, αλλά επιτρέπει την εκτίμηση της μείωσής του όταν προστίθεται υδρογόνο στο φυσικό αέριο. Έτσι για μείγματα CH₄/H₂ ένας στοιχειομετρικός καυστήρας με διάμετρο σβέσης 1mm για καθαρό CH₄ δεν θα εμφανίζει flashback σε μείγμα 40% CH₄/60% H₂ εάν η διάμετρος του είναι μειωμένη έως 0.68 mm. Εκτός από την ανάγκη να αυξηθεί ο αριθμός των θυρών στον καυστήρα για να αντισταθμιστεί η μείωση της διαμέτρου τους, θα υπάρξουν και κάποιες άλλες επιπτώσεις (π.χ. blow off limit, heating power range).

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι υπολογισμοί για της διαμέτρου σβέσης για διάφορες περιεκτικότητες μείγματος CH₄/H₂.

Πίνακας 4: Τιμές διαμέτρου σβέσης (mm) για κυκλικές θύρες καυστήρα σε μείγμα CH₄-H₂ (Leicher, et al., 2020)

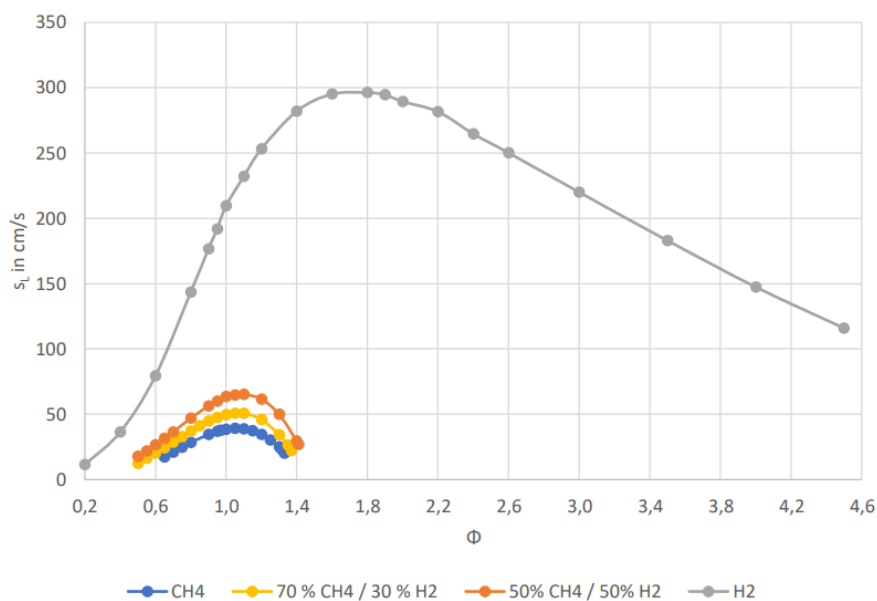
		% vol. περιεκτικότητα H ₂									
Περίσσεια αέρα	CH ₄ (0% H ₂)	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
0.6	1.00	0.95	0.88	0.81	0.74	0.65	0.55	0.43	0.27	0.10	0.05
1	1.00	0.96	0.92	0.87	0.82	0.76	0.68	0.60	0.51	0.41	0.32
1.3	1.00	1.46	0.91	0.86	0.81	0.74	0.67	0.59	0.50	0.40	0.29

Από τον Πίνακα 4 προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

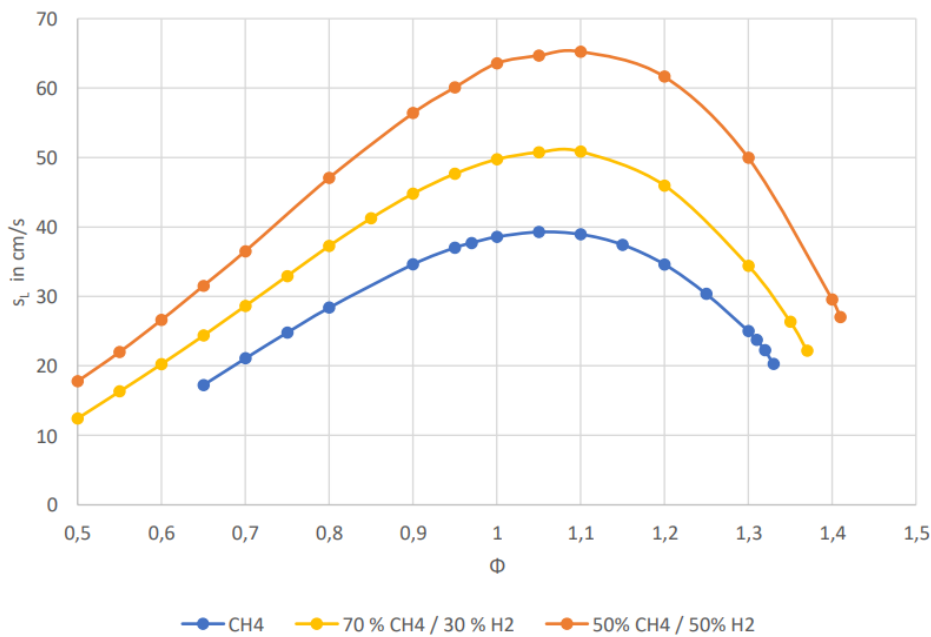
- Η διάμετρος σβέσης εξακολουθεί να είναι περίπου 90% της αρχικής διαμέτρου όταν 20% H₂ προστίθεται στο φυσικό αέριο.
- Η διάμετρος σβέσης πρέπει να μειωθεί στο 60 % περίπου της αρχικής διαμέτρου όταν προστίθεται 60 % H₂ στο φυσικό αέριο.

- Η μείωση της διαμέτρου σβέσης εξαρτάται από την περίσσεια αέρα του καυστήρα. Για μικρή περίσσεια αέρα, η μείωση είναι ταχύτερη από ό,τι για υψηλή περίσσεια

Στην Εικόνα 11 απεικονίζεται η στρωτή ταχύτητα καύσης του μεθανίου, του υδρογόνου και δύο μειγμάτων CH_4/H_2 . Το διάγραμμα βασίζεται σε μία σειρά μονοδιάστατων προσομοιώσεων χρησιμοποιώντας μεσαίου μεγέθους μηχανισμό αντίδρασης (GRI 3.0 – 325 εξισώσεις αντίδρασης). Η Εικόνα 12 παρουσιάζει τα ίδια αποτελέσματα εστιάζοντας μόνο στο μεθάνιο και στα μείγματα CH_4/H_2 . Σε κάθε περίπτωση τα διαγράμματα δείχνουν την ίδια τάση: υψηλότερες περιεκτικότητες υδρογόνου στο καύσιμο αυξάνουν τη στρωτή ταχύτητα καύσης, ενώ το μέγιστο μετατοπίζεται προς την υποστοιχειομετρική αναλογία αέρα ($\Phi < 1$).



Εικόνα 11: Σύγκριση στρωτών ταχυτήτων καύσης μεθανίου, υδρογόνου και διαφορετικών μειγμάτων CH_4/H_2 (Leicher, και συν., 2020)



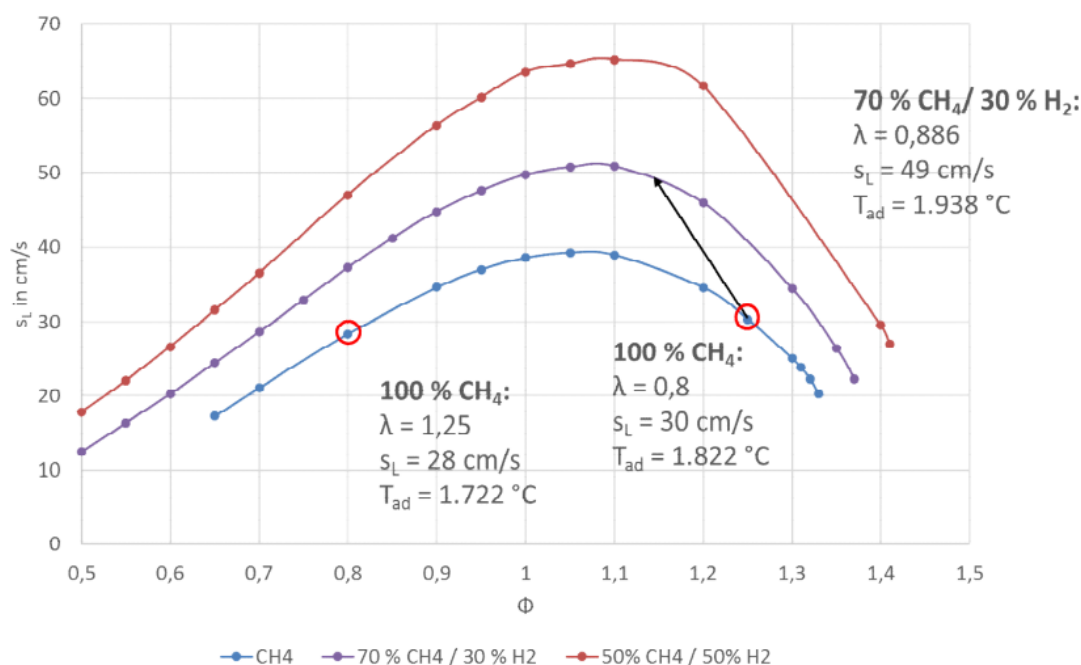
Εικόνα 12: Σύγκριση στρωτών ταχυτήτων καύσης μεθανίου, 70% CH₄ / 30 % H₂ και 50 % CH₄ / 50 % H₂ (Leicher, et al., 2020).

Οι παρατηρήσεις αυτές σε συνδυασμό με το ότι οι υψηλότερες στρωτές ταχύτητες καύσης αυξάνουν τον κίνδυνο υπερθέρμανσης ή ακόμα και δημιουργία flashback, καθώς αλλάζει η ισορροπία μεταξύ της ταχύτητας ροής και της ταχύτητας καύσης οδηγούν σε προβληματισμό όσο αφορά τις εγκαταστάσεις καυστήρων. Σε αντίθεση με ιδιότητες όπως η πυκνότητα, η θερμογόνος ισχύς και ο δείκτης Wobbe που μπορούν εύκολα να υπολογιστούν με βάση τη σύνθεση του καυσίμου, ο προσδιορισμός της στρωτής ταχύτητας καύσης ενός καυσίμου είναι πιο περίπλοκος. Απαιτεί είτε μια ειδική συσκευή μέτρησης είτε τη εφαρμογή μεθόδων προσομοίωσης.

Όταν ένας προαναμεμειγμένος καυστήρας που έχει αρχικά ρυθμιστεί για μεθάνιο (ή φυσικό αέριο) τροφοδοτείται με μείγμα μεθανίου/υδρογόνου (ή φυσικού αερίου/υδρογόνου), η απόκριση του συστήματος καύσης όσο αφορά την πραγματική στρωτή ταχύτητα καύσης καθορίζεται από διάφορους παράγοντες. Η υψηλότερη περιεκτικότητα σε υδρογόνο προκαλεί αύξηση της s_L , αλλά ταυτόχρονα μπορεί να αλλάξει τη στοιχειομετρία του συστήματος, εάν δεν υπάρχει ενεργό σύστημα ελέγχου για τη διατήρηση σταθερής αναλογίας περίσσειας αέρα. Οι θερμοκρασίες καύσης αλλάζουν επίσης. Στην περίπτωση της περίσσειας οξυγόνου καύσης ($\lambda > 1$, κοινή για συστήματα θέρμανσης), αυτά τα φαινόμενα θα αλληλοεξουδετερωθούν σε κάποιο βαθμό. Η αύξηση της s_L αντισταθμίζεται σε μεγάλο βαθμό από την αυξανόμενη αναλογία περίσσειας αέρα, η οποία τείνει να μειώσει τη στρωτή ταχύτητα καύσης (και τη θερμοκρασία). Στην περίπτωση ενός συστήματος χωρίς περίσσεια

($\lambda < 1$) τα αποτελέσματα της αλλαγής της στοιχειομετρίας και της υψηλότερης περιεκτικότητας σε υδρογόνο θα συσσωρευτούν, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση της στρωτής ταχύτητας καύσης.

Η Εικόνα 13 παρουσιάζει αυτή την αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών παραγόντων σε δύο παραδείγματα. Και τα δύο παραδείγματα υποθέτουν σταθερή πίεση στο ακροφύσιο και σταθερή ροή αέρα, κάτι που είναι μια λογική υπόθεση για οικιακές συσκευές. Επίσης, δεν χρησιμοποιείται σύστημα ελέγχου καύσης. Το πρώτο παράδειγμα αντιπροσωπεύει ένα συμβατικό σύστημα θέρμανσης κατοικιών που ρυθμίστηκε για καθαρό μεθάνιο ώστε να λειτουργεί με αναλογία περίσσειας αέρα 1.25 (δηλαδή $\Phi = 0,8$). Εάν αυτή η συσκευή τροφοδοτείται με καύσιμο 70 vol.-% CH_4 και 30 vol.-% H_2 , η αναλογία περίσσειας αέρα μετατοπίζεται προς υψηλότερη τιμή $\lambda = 1,385$ ($\Phi = 0,722$). Αυτή η μεταβολή ελέγχεται από την αναλογία των αντίστοιχων τιμών CARI και για τις δύο συνθέσεις καυσίμου, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Έτσι, η αύξηση λόγω της υψηλότερης συγκέντρωσης υδρογόνου του καυσίμου αντισταθμίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη μεταβολή προς την υψηλότερη στοιχειομετρία, με αποτέλεσμα τη συνολική αύξηση του s_L κατά περίπου 7%. Ταυτόχρονα, η θερμοκρασία αδιαβατικής καύσης μειώνεται επίσης, λόγω της υψηλότερης αναλογίας περίσσειας αέρα.

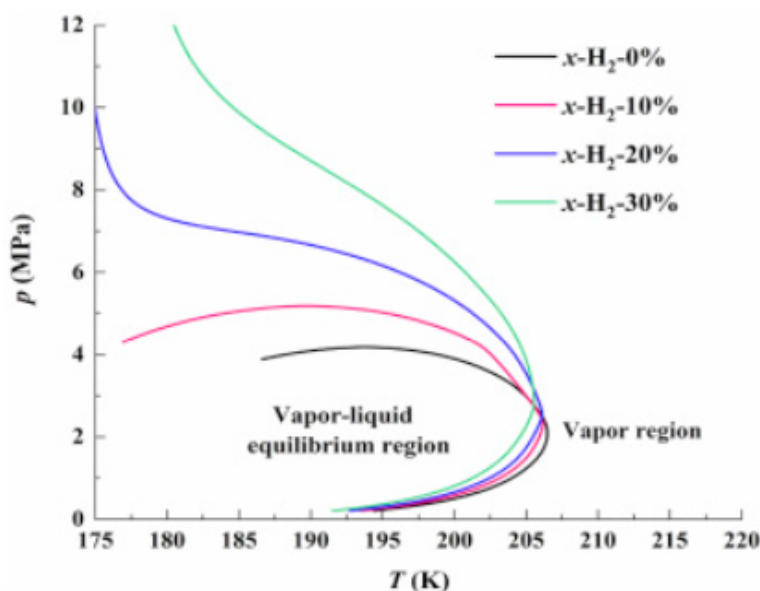


Εικόνα 13: Επίδραση της πρόσμιξης υδρογόνου στη στρωτή ταχύτητα καύσης για ένα σύστημα με σταθερή ροή αέρα και σταθερή πίεση στο ακροφύσιο (Leicher, και συν., 2020).

2.5 Θερμοφυσικές ιδιότητες μειγμάτων υδρογόνου-φυσικού αερίου

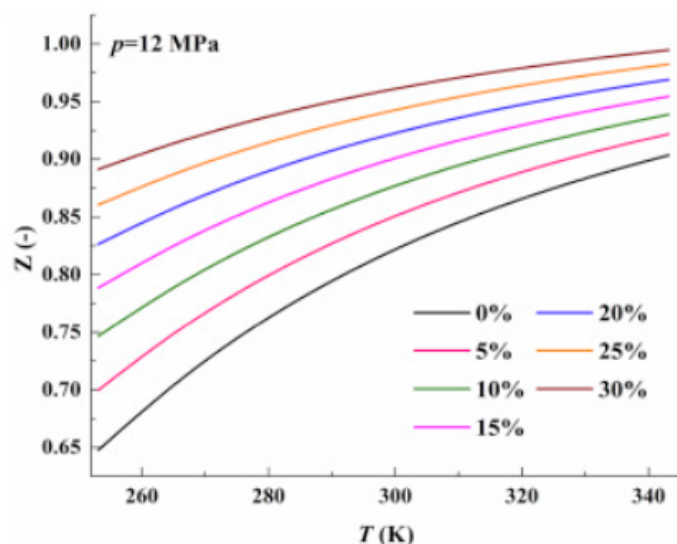
Οι μετασηματισμοί φάσης και οι θερμοφυσικές ιδιότητες των μειγμάτων υδρογόνου-φυσικού αερίου περιγράφονται από τον συντελεστή συμπίεστος (Z), την πυκνότητα, την ειδική θερμότητα και το ιξώδες και είναι απαραίτητα για τη ανάλυση της μεταφοράς του HBNG εντός των δικτύων (Farzaneh-Gord, et al., 2012). Υπάρχουν ορισμένες εργασίες που έχουν υπολογίσει τις θερμοφυσικές ιδιότητες μειγμάτων υδρογόνου-φυσικού αερίου. Ειδικότερα οι Li et al. (2023) έκαναν υπολογισμούς βασισμένους σε υπολογιστικά μοντέλα καταστατικών εξισώσεων.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 14, όταν η πίεση είναι υψηλότερη/χαμηλότερη από την πίεση που αντιστοιχεί στη μέγιστη θερμοκρασία ισορροπίας φάσης, η γραμμή σημείου δρόσου του HBNG μετατοπίζεται στην πλευρά υψηλής πίεσης/χαμηλής θερμοκρασίας σε σύγκριση με αυτή του φυσικού αερίου. Ωστόσο, η μετατόπιση της γραμμής του σημείου δρόσου προς την πλευρά της υψηλής πίεσης είναι υψηλότερη από εκείνη προς την πλευρά της χαμηλής θερμοκρασίας, γεγονός που δείχνει ότι το εύρος της περιοχής ισορροπίας ατμού-υγρού διευρύνεται. Επιπλέον, όσο υψηλότερο είναι το $x\text{-H}_2$, τόσο ευρύτερη είναι η περιοχή ισορροπίας ατμού-υγρού. Για παράδειγμα, στη θερμοκρασία των 190 K, η πίεση ισορροπίας φάσης του HBNG με $x\text{-H}_2$ 10%, 20% και 30% είναι 1,27, 1,65 και 2,15 φορές μεγαλύτερη από αυτή του φυσικού αερίου, αντίστοιχα.



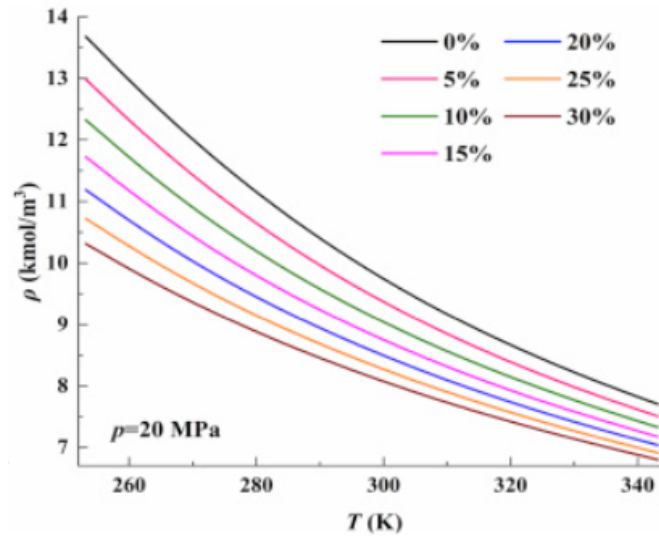
Εικόνα 14: Καμπύλες P-T για διάφορες περιεκτικότητες H₂ (Li, και συν., 2022)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 15, ο συντελεστής συμπίεστος (Z) του HBNG αυξάνεται σε σύγκριση με αυτόν του φυσικού αερίου και συσχετίζεται θετικά με το $x\text{-H}_2$, υποδεικνύοντας ότι το HBNG είναι πιο κοντά στο ιδανικό αέριο από το φυσικό αέριο υπό τις ίδιες συνθήκες. Συγκεκριμένα, σε θερμοκρασία 293,15 K και πίεση 12 MPa, ο συντελεστής Z του HBNG με $x\text{-H}_2$ 10% και 30% αυξάνεται κατά 7,38% και 18,60% σε σχέση με αυτόν του φυσικού αερίου.

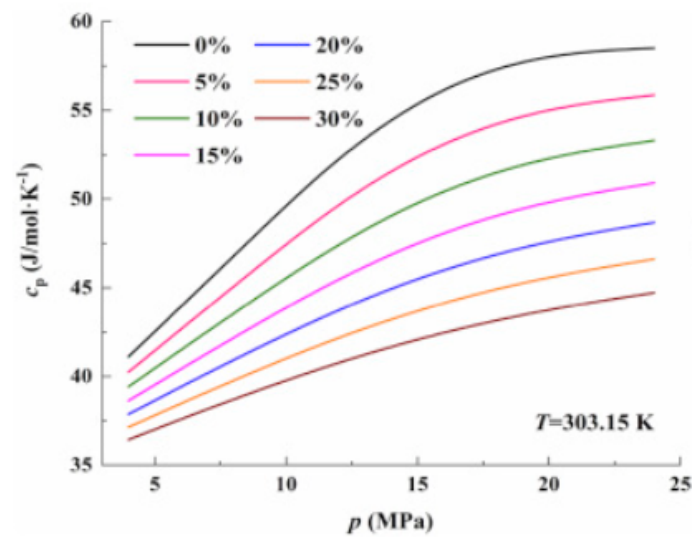


Εικόνα 15: Θερμοφυσικές ιδιότητες του αναμεμιγμένου με υδρογόνο φυσικού σε διάφορες περιεκτικότητες – Συντελεστής συμπίεστος (Z) (Li, et al., 2023)

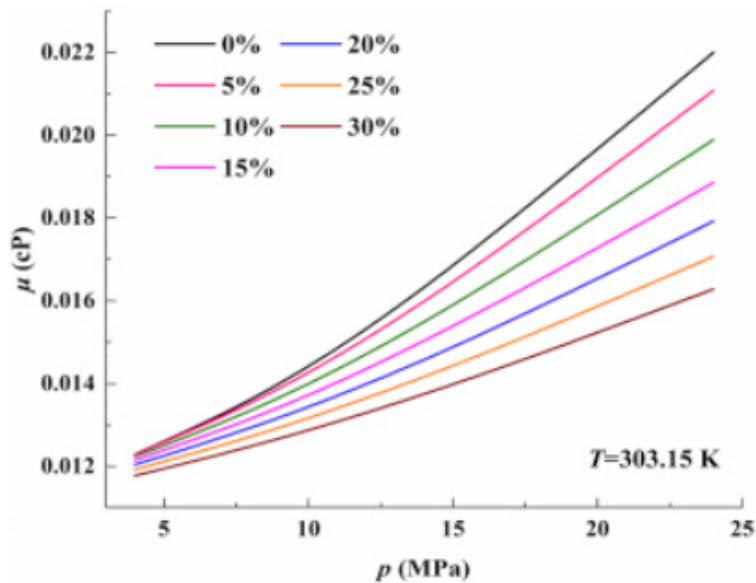
Όπως επίσης απεικονίζεται στις Εικόνες 16,17,18, μετά την ανάμειξη υδρογόνου σε φυσικό αέριο, η πυκνότητα, η ειδική θερμότητα σε σταθερή πίεση και το ιξώδες του HBNG μειώνονται και η μείωση αυτών των ιδιοτήτων είναι πιο σημαντική σε υψηλότερο $x\text{-H}_2$. Για παράδειγμα, για HBNG με $x\text{-H}_2$ 10% και 30%, η πυκνότητα του οποίου μειώνεται κατά 7,03% και 16,62% σε σύγκριση με το φυσικό αέριο σε θερμοκρασία και πίεση 303,15 K και 20 MPa και η ειδική θερμότητα σε σταθερή η πίεση του οποίου μειώνεται κατά 10,43% και 24,75% σε σύγκριση με το φυσικό αέριο σε θερμοκρασία και πίεση 303,15 K και 16 MPa. Αυτό το φαινόμενο προκύπτει από τη χαμηλότερη πυκνότητα του υδρογόνου, τη χαμηλότερη ειδική θερμότητα και τη μικρότερη διάμετρο μορίου από το φυσικό αέριο. Επιπλέον, ο ρυθμός αύξησης ή μείωσης των θερμοφυσικών ιδιοτήτων μειώνεται με την αύξηση του $x\text{-H}_2$



Εικόνα 16: Θερμοφυσικές ιδιότητες του αναμεμιγμένου με υδρογόνο φυσικού σε διάφορες περιεκτικότητες – Πυκνότητα (ρ) (Li, και συν., 2023)



Εικόνα 17: Θερμοφυσικές ιδιότητες του αναμεμιγμένου με υδρογόνο φυσικού σε διάφορες περιεκτικότητες – Θερμοχωρητικότητα (C_p) (Li, et al., 2023).



Εικόνα 18: Θερμοφυσικές ιδιότητες του αναμεμιγμένου με υδρογόνο φυσικού σε διάφορες περιεκτικότητες – Ιξώδες (μ) (Li, και συν., 2023).

2.6 Θερμοδυναμική αξιολόγηση στα χαρακτηριστικά Joule-Thomson του αναμεμιγμένου με υδρογόνο φυσικού αερίου.

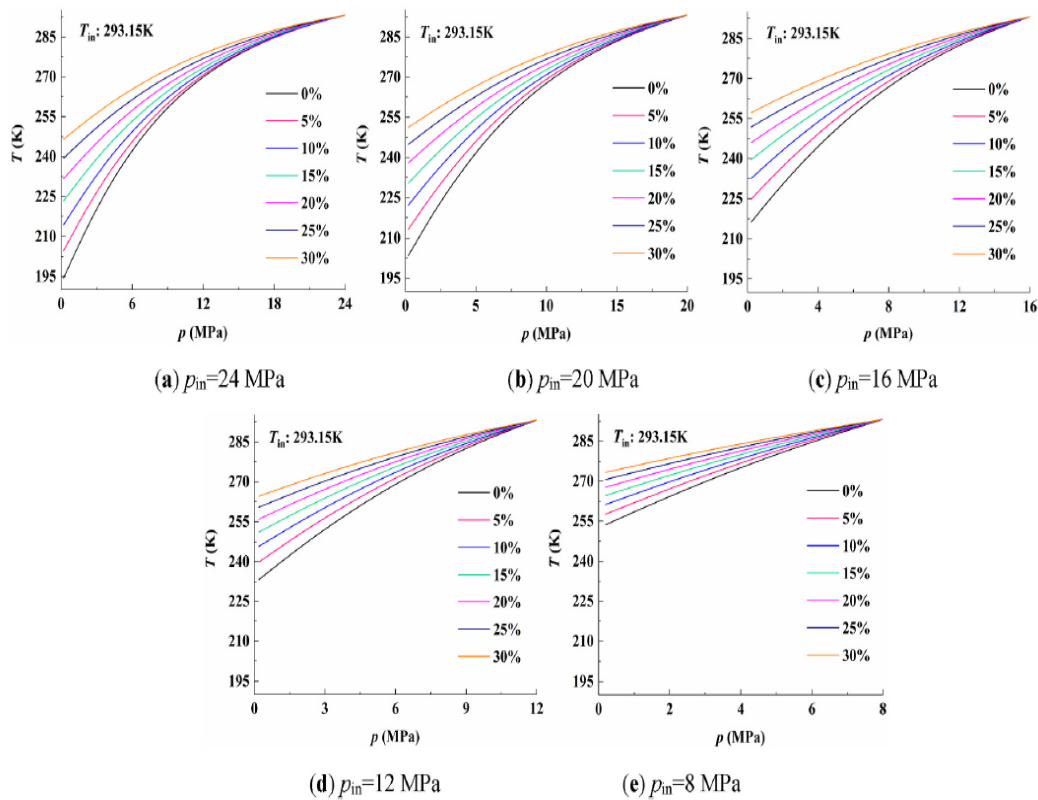
Η μεταφορά υδρογόνου είναι ο ουσιαστικός σύνδεσμος μεταξύ της παραγωγής και της χρήσης του υδρογόνου. Η ανάμιξη υδρογόνου σε φυσικό αέριο σε επιτρεπόμενη συγκέντρωση είναι μια βιώσιμη προσέγγιση, όπως έχει ήδη αναφερθεί για να καταστεί δυνατή η μεταφορά υδρογόνου σε μεγάλες αποστάσεις, μέσω του υπάρχοντος δικτύου αγωγών φυσικού αερίου. Αυτή η λύση όχι μόνο εξοικονομεί το κόστος μίας ενδεχόμενης κατασκευής αγωγών μεταφοράς υδρογόνου αλλά αυξάνει επίσης την περιεκτικότητα σε καθαρότερο καύσιμο στο φυσικό αέριο. Υπάρχουν στις υποδομές του δικτύου αγωγών φυσικού αερίου σημεία κατά μήκος όπου οι διατομές μειώνονται σημαντικά, όπως στις βαλβίδες ρύθμισης πίεσης, στα μετρητικά ροής κ.α. Το κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι σημεία «στραγγαλισμού» της ροής ή διαφορετικά σημεία ισοενθαλπικής εκτόνωσης (Li, et al., 2022). Όταν το φυσικό αέριο ρέει μέσα από τα σημεία στραγγαλισμού, η ταχύτητα αυξάνεται, αλλά η πίεση και η θερμοκρασία πέφτουν λόγω του φαινομένου Joule-Thomson (Maytal, et al., 2013), το οποίο μπορεί να προκαλέσει συμπύκνωση υδρογονανθράκων (Bian, et al., 2018) και σχηματισμό υδρίτη μετά τον «στραγγαλισμό». Οι ιδιότητες του υδρογόνου και του φυσικού αερίου διαφέρουν σημαντικά, προκαλώντας διαφορά στις θερμοφυσικές ιδιότητες όπως η πυκνότητα, ο συντελεστής συμπίεστικότητας, το ιξώδες και η ειδική θερμότητα. Αυτές οι αλλαγές επηρεάζουν αναπόφευκτα τα χαρακτηριστικά Joule-Thomson που αφορούν την ισοενθαλπική

καμπύλη, τον συντελεστή Joule Thomson (JTC) και την καμπύλη αναστροφή Joule Thomson (Joule Thomson inverse curve, JTIC). Τα χαρακτηριστικά Joule Thomson της ανάμειξης υδρογόνου στο φυσικό αέριο είναι επιθυμητό να διερευνηθούν ώστε να προσδιορισθούν οι επιδράσεις του υδρογόνου και η συμβατότητα με τις υπάρχουσες συνθήκες στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής στα σημεία που υφίσταται «στραγγαλισμός» της ροής.

Είναι σχετικά λίγες οι εργασίες σχετικές τα χαρακτηριστικά Joule-Thomson του HBNG. Στις περισσότερες από αυτές το JTC του HBNG και του μείγματος CH_4/H_2 υπολογίζονται χρησιμοποιώντας ένα θεωρητικό μοντέλο με διαφορετικές καταστατικές εξισώσεις υπό διαφορετικές θερμοδυναμικές συνθήκες. Η καταστατική BWRS EOS (Benedict-Webb-Rubin Equation of state) δείχνει ικανοποιητική απόδοση στην πρόβλεψη του JTC του HBNG. Σε σύγκριση με το φυσικό αέριο, το JTC του HBNG μειώνεται κατά 40% -50% όταν η περιεκτικότητα του H_2 φτάνει το 30% (Li, et al., 2021). Ωστόσο σε αυτές τις εργασίες η πίεση και η θερμοκρασία του HBNG βρίσκονται εντός 0.1-10 MPa και 283.15-323.15 K, αντίστοιχα, ενώ η πίεση σχεδιασμού των αγωγών φυσικού αερίου κατά τη λειτουργία έχει φτάσει τα 22 MPa, όπως ο αγωγός Nord Stream 2 της Ρωσίας (Wu, et al., 2022). Σε άλλη εργασία οι Zhou et al. εξέτασαν την ισοενθαλπική καμπύλη, το JTIC και την πίεση αναστροφής του HBNG με διαφορετικές περιεκτικότητες H_2 (Zhou, et al., 2022). Σ αυτή την εργασία παρουσιάζονται σημαντικά συμπεράσματα όπως ότι η πίεση αναστροφής του HBNG είναι μεταξύ 52 και 60 MPa για περιεκτικότητα σε H_2 μέχρι και 30%. Η πίεση αναστροφής μεταβάλλεται σε τιμές 43 MPa, 33 MPa, 22 MPa και 12 MPa για περιεκτικότητες H_2 κάτω του 40%, 50%, 60% και 70% αντίστοιχα. Ωστόσο, η ακρίβεια πρόβλεψης της πίεσης αναστροφής είναι 1.0 MPa, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβή κρίση των θετικών και αρνητικών επιπτώσεων κοντά στο JTIC.

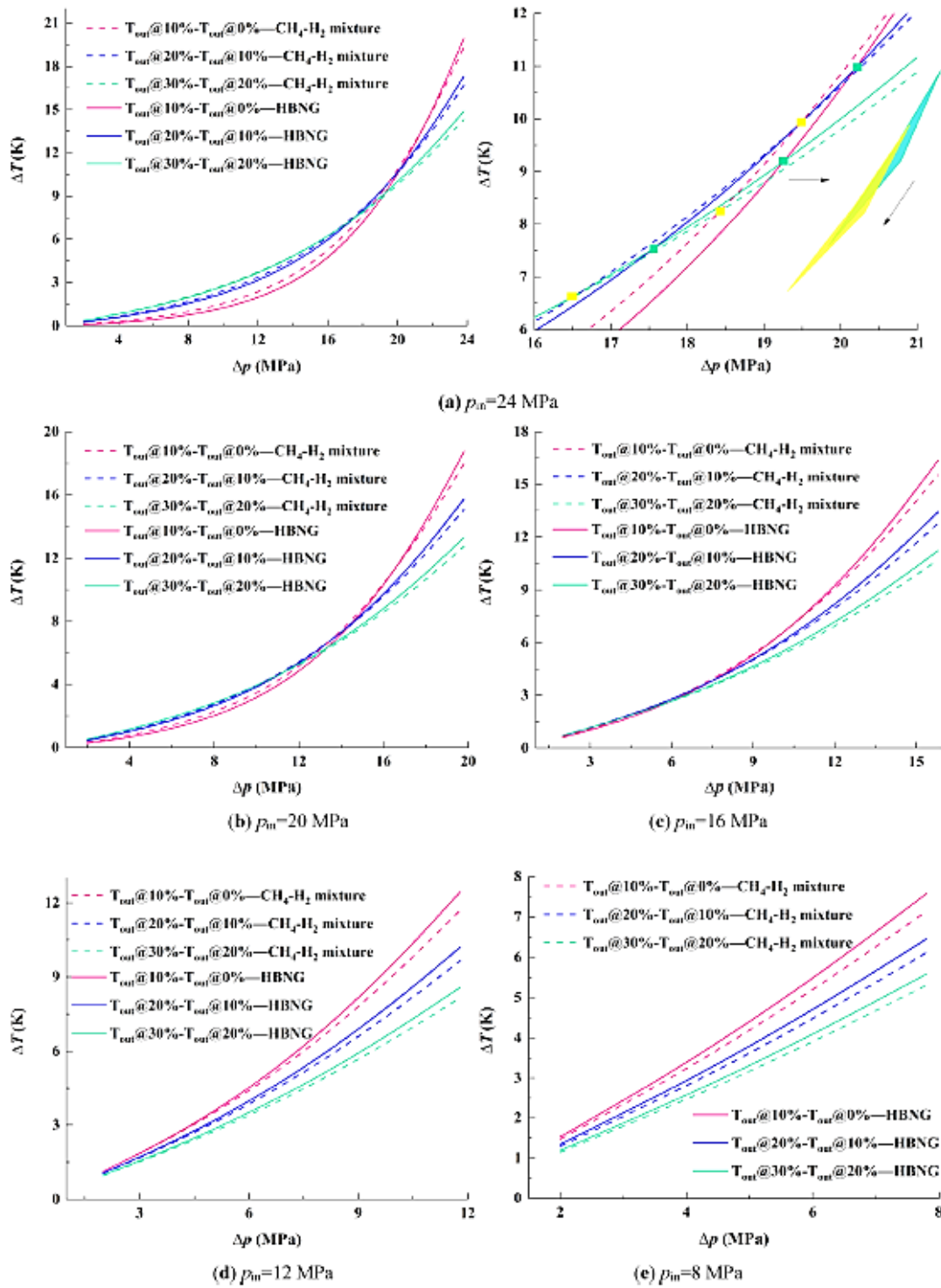
Σε πρόσφατη εργασία οι Li et al. (Li, et al., 2023) παρουσιάζεται μία σειρά εστιασμένων υπολογισμών των χαρακτηριστικών Joule Thomson για διάφορες περιεκτικότητες H_2 σε HBNG. Η διαφορά των υπολογισμών αυτών είναι πως εστιάζουν στις συνθήκες εισόδου και τις μεταβολές στην έξοδο κατά τη διέλευση μείγματος HBNG σε «στραγγαλισμό». Στην Εικόνα 19 παρουσιάζεται η ισοενθαλπική καμπύλη του HBNG στην περιοχή πίεσης εισόδου 8-24 MPa και θερμοκρασία εισόδου 293,15 K. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 19 (a) παρατηρείται αύξηση της ισοενθαλπικής καμπύλης όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε H_2 για τα 24 MPa. Επίσης παρατηρείται (Εικόνα 19 (b) και (d)) ότι για πίεση εισόδου 20 MPa και πτώση πίεσης 8 MPa, η θερμοκρασία εξόδου του HBNG με περιεκτικότητες σε H_2 0%, 10%, 20% και 30% είναι αντίστοιχα 275,14 K, 277,10 K, 279,70 K και 282,49 K (Εικόνα 19 (b)) και 269,25 K, 273,70 K, 277,62 K και 281,10 K αντίστοιχα (Εικόνα 19 (d)) στη πίεση εισόδου 12 MPa και πτώση

πίεσης 6 MPa. Ως εκ τούτου φαίνεται πως η θερμοκρασία εξόδου αυξάνεται με μη γραμμικό ρυθμό.



Εικόνα 19: Ισοενθαλπικές καμπύλες μειγμάτων υδρογόνου-φυσικού αερίου σε διαφορετικές περιεκτικότητες % H_2 (Li, et al., 2023)

Η διαφορά θερμοκρασίας εξόδου του HBNG μετά από στραγγαλισμό παρουσιάζεται και στην Εικόνα 20. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 20(a), για το HBNG, η διαφορά θερμοκρασίας εξόδου συσχετίζεται θετικά με την περιεκτικότητα σε H_2 όταν η πτώση πίεσης είναι χαμηλότερη από περίπου 17,5 MPa και αρνητικά όταν η πτώση πίεσης είναι υψηλότερη από περίπου 20 MPa. Αλλά η σχέση μεταξύ της διαφοράς θερμοκρασίας εξόδου και της περιεκτικότητας H_2 δεν είναι πλέον μονοτονική όταν η πτώση πίεσης εισέρχεται στην πράσινη τριγωνική περιοχή (17,5-20 MPa) στην Εικόνα 20 (a). Έτσι, η διαφορά θερμοκρασίας εξόδου συσχετίζεται θετικά και αρνητικά με τη περιεκτικότητα σε H_2 όταν η πτώση πίεσης βρίσκεται στην αριστερή και δεξιά πλευρά της τριγωνικής περιοχής.

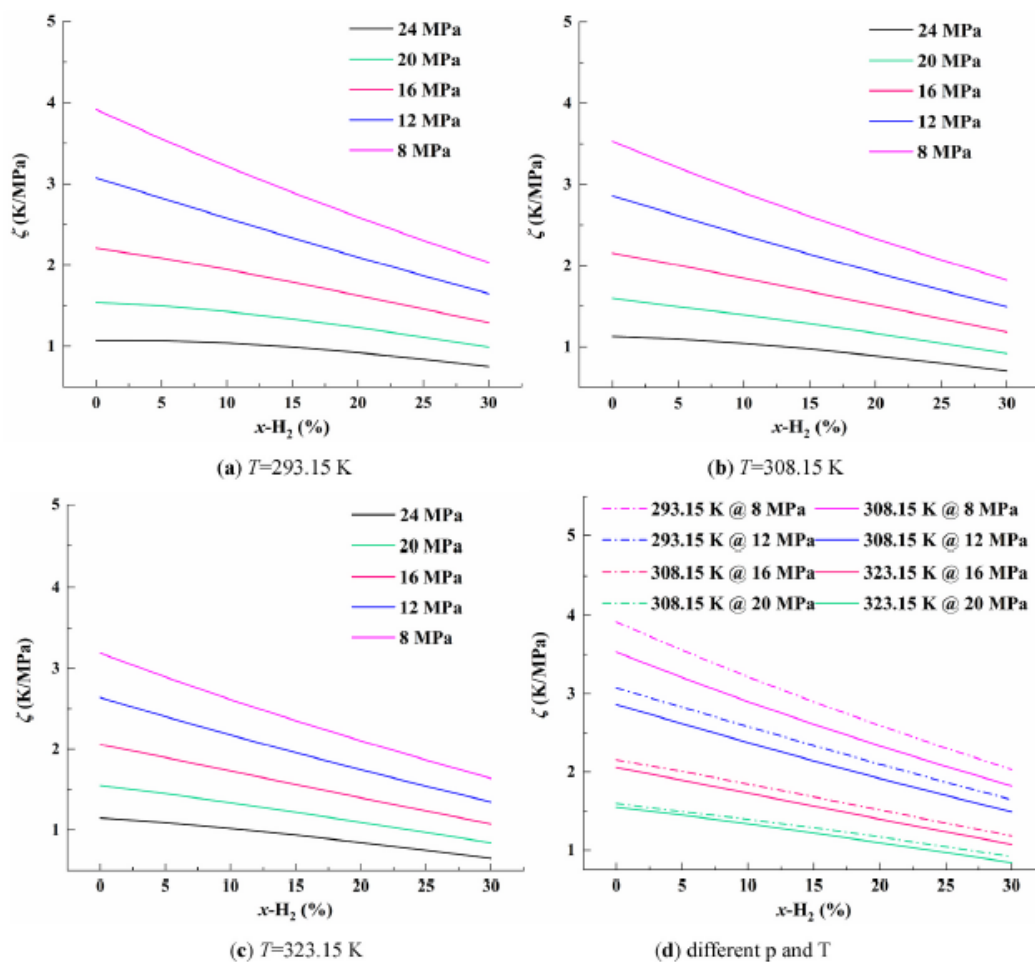


Εικόνα 20: Διαφορές θερμοκρασίας εξόδου σε μείγματα υδρογόνου-φυσικού αερίου (Li, και συν., 2023)

Η Εικόνα 21 παρουσιάζει τις τιμές του JTC του HBNG στην περιοχή πίεσης εισόδου 8-24MPa και θερμοκρασία εισόδου 293.15-323.15 K. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 21 (a) - 21 (c),

ανεξάρτητα από τις θερμοδυναμικές συνθήκες, το JTC μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας H_2 , η οποία είναι σύμφωνη με την άνοδο της καμπύλης ισονθαλπικής που προκαλείται από την αύξηση της περιεκτικότητας H_2 . Επιπλέον, το JTC συσχετίζεται αρνητικά με την πίεση και η σχέση μεταξύ του JTC και της πίεσης είναι μη γραμμική. Μέσα στην ίδια περιοχή περιεκτικότητας H_2 , όσο χαμηλότερη είναι η πίεση, τόσο περισσότερο μειώνεται η JTC και τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα μείωσης.

Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 21 (d), το JTC του HBNG μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, με την πίεση των 12 MPa και περιεκτικότητα H_2 10%, το JTC είναι 2.58 K/MPa και 2.37 K/MPa σε θερμοκρασία 293,15 K και 308,15 K, αντίστοιχα.



Εικόνα 21: Συντελεστής Joule-Thomson μειγμάτων υδρογόνου-φυσικού αερίου για διαφορετικές περιεκτικότητες H_2 (Li, και συν., 2023)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Προσαρμογές υποδομής χρήσης δικτύου

3.1 Προκλήσεις ενσωμάτωσης υδρογόνου στα δίκτυα φυσικού αερίου

Η ενσωμάτωση του υδρογόνου στα αγωγούς φυσικού αερίου έχει εμφανιστεί ως μια ελπιδοφόρα προσέγγιση για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και τη διευκόλυνση της μετάβασης σε έναν πιο καθαρό ενεργειακό πεδίο δραστηριοτήτων. Ο καθορισμός των επιπτώσεων της εισαγωγής υδρογόνου στο σύστημα αγωγών φυσικού αερίου δεν είναι απλό θέμα, καθώς οι σημαντικές αλλαγές στις θερμοδυναμικές ιδιότητες του μίγματος αερίου και στις μεταφορικές του ιδιότητες μπορούν να δημιουργήσουν προκλήσεις για την υπάρχουσα υποδομή δικτύου και τις συσκευές τελικής χρήσης. Αυτές οι προκλήσεις και τα αντίστοιχα σημεία όπου εμφανίζονται εντός του συστήματος αγωγών φυσικού αερίου περιγράφονται στον Πίνακα 5. Χωρίς την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, η εισαγωγή υδρογόνου στις αγωγούς αερίου μπορεί να οδηγήσει σε αρνητικές οικονομικές επιπτώσεις και σε θέματα ασφαλείας και αξιοπιστίας. Η εξέταση των ευκαιριών ανάμειξης υδρογόνου πρέπει να λάβει υπόψη τις απαραίτητες τροποποιήσεις στον εξοπλισμό και τις αλλαγές στις διαδικασίες λειτουργίας του δικτύου για την επίτευξη της ασφάλειας, της αξιοπιστίας και της οικονομικής βιωσιμότητας. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται αυτές οι προκλήσεις από την κλίμακα τμήματος δικτύου μέχρι τη βάση του επιμέρους εξοπλισμού τόσο για τα δίκτυα μεταφοράς όσο και για τα δίκτυα διανομής.

Πίνακας 5: Προκλήσεις που σχετίζονται με την ανάμειξη υδρογόνου σε δίκτυα μεταφοράς και διανομής

Προκλήσεις Ανάμειξης Υδρογόνου	Τμήμα Αγωγού Φυσικού Αερίου που Επηρεάζεται
Ανάπτυξη ρωγμών κόπωσης στον χάλυβα αγωγού	Δίκτυα μεταφοράς και διανομής
Μειωμένη αντοχή ολίσθησης στον χάλυβα αγωγού	Δίκτυα μεταφοράς και διανομής
Μειωμένη χωρητικότητα μεταφοράς ενέργειας	Δίκτυα μεταφοράς και διανομής
Αύξηση της πτώσης πίεσης κατά την εξυπηρέτηση της ενεργειακής ζήτησης	Δίκτυα μεταφοράς και διανομής
Αύξηση των ταχυτήτων του αερίου	Δίκτυα μεταφοράς και διανομής
Αύξηση της απαιτούμενης ισχύος συμπίεσης	Δίκτυα μεταφοράς
Αύξηση της περιστροφικής ταχύτητας του συμπιεστή	Δίκτυα μεταφοράς
Μετατόπιση του λειτουργικού περιβλήματος του συμπιεστή	Δίκτυα μεταφοράς

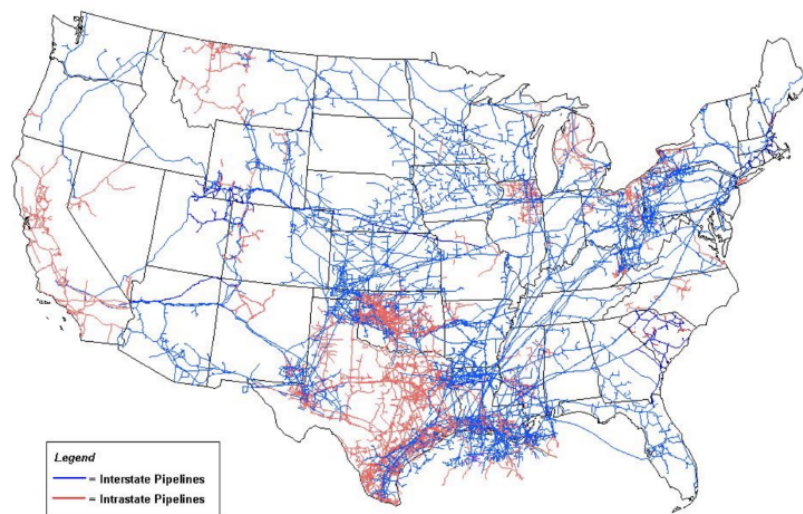
Προκλήσεις Ανάμειξης Υδρογόνου	Τμήμα Αγωγού Φυσικού Αερίου που Επηρεάζεται
Αύξηση εκπομπών NOx για τους κινητήρες και τους τελικούς χρήστες	Δίκτυα μεταφοράς και διανομής
Υπερβολική δυναμική καύσης, απομάκρυνση της φλόγας, ανατροπή της φλόγας	Δίκτυα μεταφοράς και διανομής
Προ-ανάφλεξη καυσίμου σε κινητήρες εσωτερικής καύσης	Δίκτυα μεταφοράς
Ακρίβεια και ανθεκτικότητα μετρητικών οργάνων	Δίκτυα μεταφοράς και διανομής
Διαρροή και ανθεκτικότητα βαλβίδων	Δίκτυα μεταφοράς και διανομής
Ακρίβεια ανάλυσης της σύστασης του αερίου	Δίκτυα μεταφοράς και διανομής
Διαρροή υδρογόνου σε πολυμερή σωληνώσεις	Δίκτυα διανομής
Βιοχημική μετατροπή υδρογόνου σε υπόγεια αποθήκευση	Δίκτυα μεταφοράς
Απώλεια υδρογόνου μέσω του καπ-ροκ σε υπόγεια αποθήκευση	Δίκτυα μεταφοράς

3.2 Δίκτυα Μεταφοράς Αερίου: Βασική Υποδομή, Δυναμική Μεταφοράς Αερίου και Ενσωμάτωση Υδρογόνου

Τα δίκτυα μεταφοράς αερίου αποτελούν τις αρτηρίες των συστημάτων διανομής φυσικού αερίου, λειτουργώντας ως κύριοι αγωγοί για την αποτελεσματική και αξιόπιστη μεταφορά μεγάλων όγκων αερίου σε μεγάλες αποστάσεις, τόσο εντός κρατικών συνόρων όσο και ανάμεσα σε κρατικά όρια. Κυρίως αποτελούνται από ανθεκτικούς αγωγούς χάλυβα με διαμέτρους που κυμαίνονται από 4 έως 48 ίντσες, αυτοί οι αγωγοί αποτελούν τη δομική βάση του δικτύου μεταφοράς, εξασφαλίζοντας την ασφαλή και συνεχή μεταφορά φυσικού αερίου προς διάφορους τελικούς χρήστες. Αξίζει να σημειώσουμε ότι μια μικρή ποσότητα, περίπου 0.5%, του συνολικού μήκους αποτελείται από εναλλακτικά υλικά, όπως σίδηρο και πλαστικό, όπως αναφέρεται σε δημοσιευμένες μελέτες (Melaina , et al., 2013).

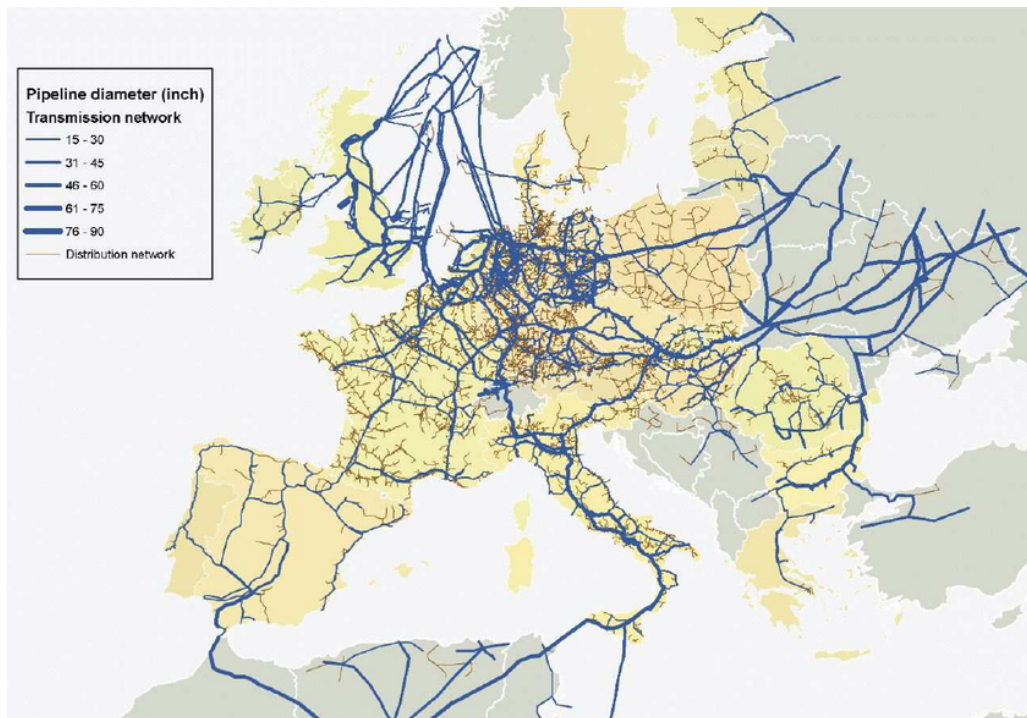
Ουσιώδεις για την αποτελεσματικότητα των δικτύων μεταφοράς είναι διάφορες κρίσιμες εγκαταστάσεις που διανέμονται κατά μήκος τους. Οι σταθμοί συμπίεσης διαδραματίζουν καίριο ρόλο στη διατήρηση της ροής του αερίου, αυξάνοντας την πίεσή του και διευκολύνοντας τη μεταφορά του σε μεγάλες αποστάσεις. Οι σταθμοί βαλβίδων αποτελούν κλειδί για τον έλεγχο της ροής και τον αποκλεισμό τμημάτων του αγωγού, επιτρέποντας τη διεξαγωγή συντήρησης και την άμεση αντίδραση σε έκτακτες καταστάσεις. Οι σταθμοί μέτρησης μετρούν ακριβώς τους όγκους του μεταφερόμενου αερίου, ένας κρίσιμος παράγοντας για την ακρίβεια της τιμολόγησης και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας.

Η θεμελιώδης λειτουργία των δικτύων μεταφοράς αερίου περιστρέφεται γύρω από την αποτελεσματική και αξιόπιστη μεταφορά του επεξεργασμένου φυσικού αερίου από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας αερίου προς μια ποικιλία τελικών χρηστών. Αυτοί περιλαμβάνουν δίκτυα διανομής, εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και μεγάλα βιομηχανικά συγκροτήματα[[^]AGA_2022]. Στην Εικόνα 22 εμφανίζεται η παρούσα γεωγραφική εμβέλεια του δικτύου μεταφοράς αερίου σε όλο τον ηπειρωτικό χώρο των Ηνωμένων Πολιτειών. Αυτό το περίπλοκο δίκτυο εξασφαλίζει την αποτελεσματική μεταφορά αερίου από απομακρυσμένους τόπους παραγωγής προς περιοχές με υψηλή ζήτηση.



Εικόνα 22: Σύστημα αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου των ΗΠΑ, 2009 (U.S. Energy Information Administration , 2009)

Η αντίστοιχη απεικόνιση για την Ευρώπη παρουσιάζεται στην Εικόνα 23



Εικόνα 23: Ευρωπαϊκό δίκτυο αγωγών φυσικού αερίου. Το πάχος των γραμμών είναι αντίστοιχο με τη διάμετρο του αγωγού (Robinson, et al., 1995)

Οι «πύλες εισόδου» city gates είναι οι κρίσιμοι κόμβοι εντός του δικτύου μεταφοράς, λειτουργώντας ως σημεία διασταύρωσης όπου οι αγωγοί μεταφοράς διασταυρώνονται με τα δίκτυα διανομής. Αυτά τα σημεία παρέχουν υπηρεσίες μεταφοράς με ποικίλες ευθύνες, συμπεριλαμβανομένων της ρύθμισης πίεσης, της μέτρησης αερίου, της καλοριμετρίας και της έγχυσης αρωματικών ουσιών. Η ρύθμιση πίεσης είναι ζωτικής σημασίας για τη μείωση των υψηλών πιέσεων στους αγωγούς μεταφοράς σε επίπεδα που είναι ευνοϊκά για την ασφαλή διανομή και κατανάλωση από τους τελικούς χρήστες. Οι μηχανισμοί ακριβούς μέτρησης και ελέγχου αερίου διασφαλίζουν την ακριβή παρακολούθηση και διαχείριση των όγκων αερίου. Επιπλέον, η έγχυση αρωματικών ουσιών προσδίδει ένα χαρακτηριστικό άρωμα στο αέριο, βελτιώνοντας την ασφάλεια των καταναλωτών και επιτρέποντας τον ανιχνευτικό εντοπισμό ακόμα και των χαμηλών συγκεντρώσεων φυσικού αερίου.

Στο πλαίσιο του εξελισσόμενου ενεργειακού τοπίου, που χαρακτηρίζεται από την προσπάθεια για μείωση των εκπομπών CO₂, η ενσωμάτωση του υδρογόνου στους αγωγούς μεταφοράς έχει κερδίσει το ενδιαφέρον. Οι δυναμικές επιπτώσεις της ανάμειξης του υδρογόνου στα συστήματα μεταφοράς φυσικού αερίου αποτελούν σημαντικό θέμα με θετικές και αρνητικές όψεις. Η επιστημονική έρευνα υπογραμμίζει την κρίσιμη ανάγκη για μεθοδική αξιολόγηση των επιπτώσεων στα υλικά των αγωγών, στη συμπεριφορά της ροής

κατά τη μεταφορά και στην απόδοση των συστημάτων, προκειμένου να διασφαλιστεί η ανεμπόδιση ένταξη του υδρογόνου.

3.3 Συμβατότητα Υδρογόνου με Υλικά σε Αγωγούς Χάλυβα: Επιπτώσεις στην Κόπωση και την Αντοχή σε Θραύση

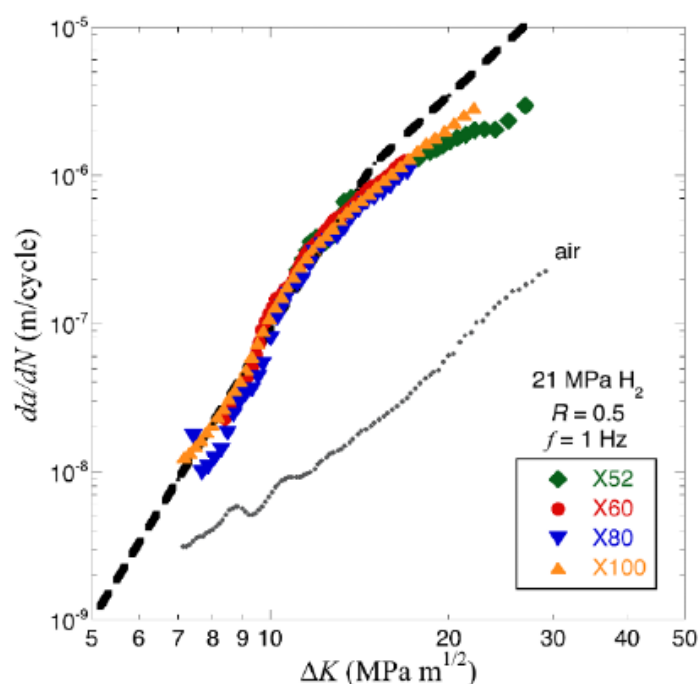
Η αλληλεπίδραση του αερίου υδρογόνου με υλικά από χάλυβα, συμπεριλαμβανομένων των αγωγών χάλυβα, που λειτουργούν υπό πίεση, έχει σημαντικές επιπτώσεις στην κόπωση και στην αντοχή σε θραύση. Αυτός είναι ένας σημαντικός παράγοντας, καθώς αυτές οι ιδιότητες επηρεάζουν απευθείας τις αξιολογήσεις καταλληλότητας για αγωγούς υπό πίεση, όπως περιγράφεται στο API 579/ASME FFS-1 (American Society of Mechanical Engineers και American Petroleum Institute, 2021) και το ASME B31.12 (American Society of Mechanical Engineers, 2019). Η ενσωμάτωση του υδρογόνου σε τέτοια συστήματα συνεπάγεται συγκεκριμένες επιδράσεις σε αυτές τις χαρακτηριστικές ιδιότητες, απαιτώντας προσεκτική ανάλυση. Αξίζει να σημειωθεί ότι, ενώ η διαδικασία αξιολόγησης καταλληλότητας παραμένει σχεδόν αναλλοίωτη για συστήματα που περιλαμβάνουν υδρογόνο, οι επιλογές των υλικών ως προς τις ιδιότητες διαφέρουν σημαντικά από εκείνες των συμβατικών συστημάτων. Επίσης, οι ιδιότητες των υλικών των χαλυβδοσωλήνων γραμμής σε περιβάλλον αερίου υδρογόνου εμφανίζουν σχετική συνέπεια μεταξύ των κατηγοριών του American Petroleum Institute. Παρόλα αυτά, απαιτούνται εκτενείς ερευνητικές εργασίες για τον καθορισμό των ορίων αυτής της συνοχής στις ιδιότητες κόπωσης και αντοχής στη θραύση σε περιβάλλοντα με υδρογόνο. Εάν μπορούν να καθοριστούν τα γενικά χαρακτηριστικά λειτουργίας, τότε οι παράμετροι που παραμένουν άγνωστοι μετατίθενται στην κατάσταση της δομής του αγωγού από χάλυβα (π.χ. ελλατώματα, ζημιές, κατάσταση των συγκολλήσεων) και στις εξωτερικές εφαρμοζόμενες τάσεις και παραμορφώσεις.

3.3.1 Κόπωση με ταχύτητα ανάπτυξης θραυστικής ρωγμής: Επιδράσεις και Χαρακτηριστικά

Είναι γνωστό ότι η παρουσία υδρογόνου αυξάνει σημαντικά τις ταχύτητες ανάπτυξης θραυστικών ρωγμών σε διάφορα υλικά (Cialone, et al., 1985) (Nanninga, et al., 2010) (San Marchi, et al., 2010) (Meng, et al., 2017). Αυτό το φαινόμενο επιδεινώνεται ακόμα και σε χαμηλές μερικές πιέσεις υδρογόνου, εξαιτίας της σημαντικής επίδρασης του υδρογόνου στην ανάπτυξη θραυστικών ρωγμών σε μερική πίεση κοντά στην τιμή των 1 bar, όπως αναφέρουν οι Ronevich και San Marchi (2021) (Ronevich, et al., 2022). Σε υψηλές τάσεις και ειδικότερα σε τιμές παράγοντα έντασης (intensity factor) $\Delta K > 20 \text{ MPa m}^{1/2}$, η ανάπτυξη των

θραυστικών ρωγμών παραμένει ανεξάρτητη από την πίεση, έτσι η μερική πίεση υδρογόνου 1 bar έχει το ίδιο περίπου αποτέλεσμα με τη μερική πίεση υδρογόνου 200 bar (Ronevich, et al., 2022). Παρόμοια αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν από τους Meng et al. (Meng, et al., 2017). Ωστόσο, η πίεση αερίου υδρογόνου επηρεάζει την κόπωση σε χαμηλή περιοχή παράγοντα έντασης (χαμηλό ΔK), όπου η ανάπτυξη της θραυστικής ρωγμής κλιμακώνεται περίπου με την τετραγωνική ρίζα της πίεσης.

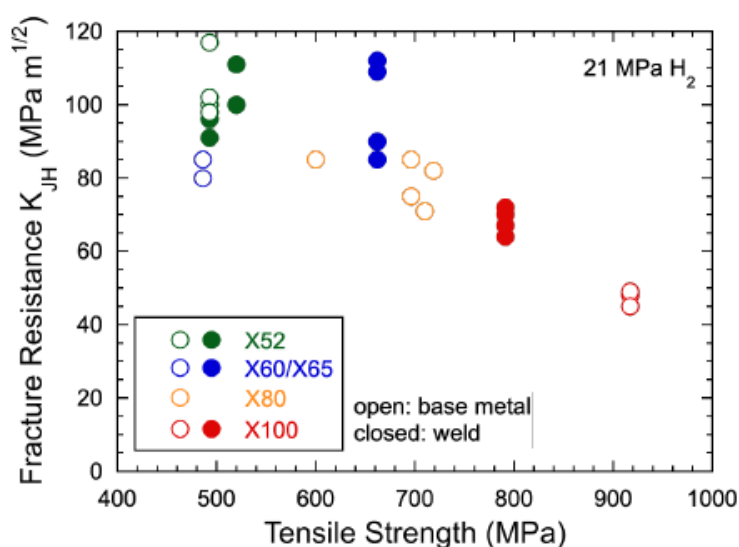
Παρατηρείται επίσης ότι η ανάπτυξη θραυστικών ρωγμών από μίγμα φυσικού αερίου-υδρογόνου δεν εξαρτάται σημαντικά από το είδος του χάλυβα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 24. Όλα τα είδη φαίνεται να εμφανίζουν παρόμοιους ρυθμούς ανάπτυξης θραυστικών ρωγμών για την ίδια πίεση αερίου υδρογόνου. Συνεπώς, έχουν αναπτυχθεί γενικές σχέσεις για την ανάπτυξη θραυστικών ρωγμών σε χάλυβες που εκτίθενται σε αέριο υδρογόνο (Ronevich, και συν., 2022) (San Marchi, et al., 2019), όπως αναπαρίσταται από τη διακεκομμένη γραμμή στην Εικόνα 24.



Εικόνα 24: Αντοχή σε θραύση βασικών μετάλλων και ζώνες σύντηξης συγκόλλησης μιας σειράς χάλυβων αγωγών ποιότητας του Αμερικανικού Ινστιτούτου Πετρελαίου (API) σε αέριο υδρογόνο σε πίεση 21 MPa (Ronevich, και συν., 2022).

Η αντοχή στη θραύση (ή η ανθεκτικότητα στη θραύση) παρουσία υδρογόνου στο φυσικό αέριο παρουσιάζει μεγαλύτερη μεταβλητότητα που συνδέεται με την προέλευση του χάλυβα σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση ανάπτυξης ρωγμών κόπωσης. Γενικά, οι νεότεροι, υψηλής ποιότητας χάλυβες τείνουν να έχουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στη

θραύση, αν και τόσο οι παλαιότεροι χάλυβες όσοι και οι σύγχρονοι χάλυβες εμφανίζουν σχετικά παρόμοιες συμπεριφορές όταν εκτίθενται στο υδρογόνο (Ronevich, και συν., 2022). Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα διαθέσιμα δεδομένα θραύσης σε περιβάλλοντα υδρογόνου είναι μάλλον περιορισμένα. Ωστόσο, αυτά τα δεδομένα δείχνουν μια σταθερή τάση συμπεριφοράς: η αντίσταση στη θραύση τείνει να μειώνεται με την αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 25. Η επίδραση της πίεσης στην αντίσταση στη θραύση υποτίθεται ότι ακολουθεί μια σχέση τετραγωνικής ρίζας ως προς τη φυγιμότητα (fugacity) (San Marchi, et al., 2010) (Hydrogen Compatibility of Structural Materials in Natural Gas Networks, 2021). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια απότομη μείωση της αντοχής σε θραύση σε χαμηλές μερικές πιέσεις και μια σχετικά μέτρια μείωση σε υψηλότερες μερικές πιέσεις (San Marchi, και συν., 2010) (Brriottet, et al., 2018).



Εικόνα 25: Αντοχή σε θραύση βασικών μετάλλων και ζώνες τήξης συγκόλλησης μιας σειράς αγωγών χάλυβα σειράς ποιότητας Αμερικανικού Ινστιτούτου Πετρελαίου (API) σε αέριο υδρογόνο σε πίεση 21 MPa (Hydrogen Compatibility of Structural Materials in Natural Gas Networks, 2021).

Όταν πρόκειται για τις ιδιότητες κόπωσης και θραύσης των συγκολλήσεων, γενικά ευθυγραμμίζονται με αυτές των βασικών μετάλλων. Λαμβάνοντας υπόψη την υπολειπόμενη τάση στα δοκίμια, οι ρυθμοί ανάπτυξης ρωγμών κόπωσης των συγκολλήσεων είναι ουσιαστικά πανομοιότυποι με εκείνους των βασικών μετάλλων (Ronevich, et al., 2018). Αυτό το αποτέλεσμα δεν προκαλεί έκπληξη, καθώς η απόκριση σε κόπωση δεν επηρεάζεται σημαντικά από τα ειδικά χαρακτηριστικά του χάλυβα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 24. Η αντοχή στη θραύση των συγκολλήσεων θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την τοπική αντοχή της συγκόλλησης. Στην Εικόνα 25 η αντοχή των συγκολλήσεων μετρήθηκε ή συνάγεται από τη

σκληρότητα και η συμπεριφορά φαίνεται να συμπίπτει με εκείνη των βασικών μετάλλων. Ωστόσο, ο τρόπος με τον οποίο συμπεριφέρεται μια συγκόλληση εντός μιας κατασκευής θα εξαρτηθεί από διάφορες δομικές λεπτομέρειες, όπως η υπολειπόμενη τάση εντός της κατασκευής και η παρουσία πιθανών ελαττωμάτων συγκόλλησης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η πλειονότητα των δοκιμασμένων χάλυβων και συγκολλήσεων είναι σύγχρονοι, συνήθως μετά τη δεκαετία του 1990. Ωστόσο, ορισμένοι παλαιοί χάλυβες έχουν υποβληθεί σε δοκιμές σε περιβάλλοντα υδρογόνου και παρουσιάζουν παρόμοιες συμπεριφορές. Συγκεκριμένα, αυτοί οι χάλυβες σωλήνων έχουν συχνά πιο λανθάνοντα ελαττώματα στις διαμήκεις ραφές τους λόγω των μεθόδων κατασκευής και της τότε διαθέσιμης τεχνολογίας ποιοτικού ελέγχου. Δεδομένου ότι περισσότερα από 1.600 μίλια αποκλειστικών αγωγών αερίου υδρογόνου λειτουργούν στις Ηνωμένες Πολιτείες, είναι προφανές ότι η μεταφορά υδρογόνου μέσω αγωγών είναι εφικτή. Όπως τονίστηκε προηγουμένως, οι ιδιότητες κόπωσης και θραύσης των χάλυβων σωληνώσεων και των συγκολλήσεών τους δεν ποικίλλουν σημαντικά ανάλογα με την προέλευση του υλικού..

Τα δομικά ελαττώματα και οι συνθήκες λειτουργίας μπορεί να διαφέρουν ουσιαστικά από τον ένα αγωγό στον άλλο και αυτοί οι παράγοντες καθορίζουν την καταλληλότητα μιας κατασκευής για μεταφορά υδρογόνου (American Society of Mechanical Engineers, 2005). Επιπλέον, το υδρογόνο έχει αξιοσημείωτη επίδραση στις ιδιότητες κόπωσης και θραύσης, αλλά η επίδραση της μερικής πίεσης είναι σχετικά μέτρια. Επομένως, είναι απίθανο η συγκέντρωση υδρογόνου στο σύστημα να είναι καθοριστικός παράγοντας για τη δομική ακεραιότητα του αγωγού.

3.4 Μεταφορά σε αγωγούς

Ακριβώς όπως μεταβάλλονται οι θερμοδυναμικές ιδιότητες και οι ιδιότητες μεταφοράς με την αύξηση της περιεκτικότητας του μείγματος σε υδρογόνο (βλ. Κεφάλαιο 2) έτσι μεταβάλλονται οι συνθήκες λειτουργίας των αγωγών μεταφοράς. Οι παράμετροι σχεδιασμού όπως η εσωτερική διάμετρος του αγωγού, η τραχύτητά του και η υψομετρική μεταβολή επηρεάζουν τις συνθήκες λειτουργίας του. Οι επιπτώσεις που παρουσιάζονται σε αυτήν την παράγραφο περιλαμβάνουν τις τάσεις μεταβολής που παρατηρούνται στη χωρητικότητα του δικτύου, την πτώση πίεσης και τη μεταβολή της θερμοκρασίας.

Η ανάμειξη υδρογόνου στο φυσικό αέριο μπορεί να έχει συστηματικές επιπτώσεις στην απόδοση, στη λειτουργία και στην τελική χρήση του αερίου λόγω των διαφορών στις φυσικές ιδιότητες του φυσικού αερίου και του υδρογόνου. Για παράδειγμα, η ικανότητα μεταφοράς ενέργειας για έναν μεμονωμένο αγωγό μειώνεται καθώς αναμιγνύεται περισσότερο υδρογόνο σε αυτόν (Bainier, et al., 2019). Αυτή η επίδραση θα μπορούσε να δημιουργήσει

σημεία συμφόρησης στη λειτουργία του ευρύτερου δικτύου αγωγών και αποδίδεται κυρίως στη χαμηλότερη ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα του υδρογόνου σε σύγκριση με αυτή του φυσικού αερίου. Σημειώνεται, ωστόσο, ότι ενώ το φυσικό αέριο είναι περίπου τρεις φορές πιο πυκνό σε ενέργεια από το υδρογόνο σε ογκομετρική βάση, βρέθηκε ότι με σταθερή πτώση πίεσης, η ικανότητα μεταφοράς ενέργειας σε συγκέντρωση υδρογόνου 100% είναι μόνο 15%–20 % χαμηλότερη από την ικανότητα μεταφοράς ενέργειας του καθαρού φυσικού αερίου, υποδεικνύοντας έτσι ότι η ταχύτητα ροής αυξάνεται με την αναλογία μείγματος υδρογόνου σε τέτοιες περιπτώσεις (Bainer, et al., 2019) . Η διατήρηση σταθερής ικανότητας μεταφοράς ενέργειας πιθανότατα θα απαιτούσε αύξηση της πίεσης λειτουργίας του αγωγού για να οδηγήσει σε υψηλότερο ρυθμό ροής (Tabkhi, et al., 2008). Ωστόσο, η πίεση λειτουργίας του αγωγού πιθανότατα θα χρειαστεί να μειωθεί λόγω των επιπτώσεων που έχει το υδρογόνο στην ακεραιότητα των υλικών (κυρίως στο χάλυβα) όπως αναφέρθηκε στη προηγούμενη παράγραφο. Το Line pack (αντιπροσωπεύει τον όγκο της ουσίας που είναι διαθέσιμη για άμεση παράδοση από το σύστημα αγωγών χωρίς να απαιτείται πρόσθετη συμπίεση) έχει πιο ουσιαστική μείωση της συνολικής χωρητικότητας από τη μεταφορά ενέργειας στους αγωγούς. Οι Haeseldonckx and D'haeseleer (2007) και οι Gondal and Sahir (2012) μοντελοποίησαν την αποθήκευση ενέργειας σε πακέτα γραμμής (line pack) ως συνάρτηση της αναλογίας μείγματος υδρογόνου και βρήκαν ότι η αποθηκευμένη ενέργεια πακέτου γραμμής μειώνεται με την αύξηση της σύνθεσης υδρογόνου έως και 60% κατ' όγκο (Haeseldonckx, et al., 2007). Οι μειώσεις στη χωρητικότητα του πακέτου γραμμής μπορούν να εμποδίσουν την ευελιξία του δικτύου μεταφοράς επειδή μπορεί να αποθηκευτεί λιγότερη ενέργεια στο δίκτυο αγωγών. Για να αντισταθμίσουν τη μείωση της ικανότητας μεταφοράς, οι φορείς εκμετάλλευσης αγωγών μπορούν να αυξήσουν τους ρυθμούς ροής αερίου για να διατηρήσουν συνεπή παροχή ενέργειας. Ωστόσο, η αύξηση των ρυθμών ροής έχει ως αποτέλεσμα αυξημένες πτώσεις πίεσης κατά μήκος του αγωγού, οι οποίες θα μπορούσαν με τη σειρά τους να απαιτήσουν υψηλότερη πίεση στον αγωγό για να διατηρηθεί η πίεση παροχής που απαιτείται στις πύλες εισόδου (city gates) από τους τελικούς χρήστες (Allison, et al., 2021). Η ικανότητα διατήρησης της ικανότητας μεταφοράς ενέργειας θα εξαρτηθεί εν τέλει από τους περιορισμούς του εξοπλισμού και του δικτύου. Η διατήρηση ενός σταθερού ρυθμού μεταφοράς ενέργειας με παράλληλη αύξηση της συγκέντρωσης υδρογόνου θα αυξήσει τις απαιτήσεις ισχύος συμπίεσης, οι οποίες πιθανότατα θα απαιτήσουν τροποποιήσεις ή αντικαταστάσεις σε σταθμούς συμπίεσης αγωγών και/ή πρόσθετες τοποθεσίες σταθμών συμπίεσης για τη διαχείριση της μέγιστης επιτρεπόμενης πίεσης του αγωγού. Αυτό είναι σημαντικό επειδή η συμπίεση αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος της

ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά φυσικού αερίου και την κάλυψη των απαιτήσεων πίεσης και ροής του τελικού χρήστη. Η πτώση πίεσης είναι συνάρτηση μιας ποικιλίας ιδιοτήτων και συνθηκών του αγωγού που αλλάζουν ανάλογα με τη σύνθεση του αερίου, συμπεριλαμβανομένου του ρυθμού ροής ρευστού, της πυκνότητας του αερίου, του συντελεστή τριβής και της μέσης θερμοκρασίας αερίου. Αρκετές προηγούμενες δημοσιεύσεις έχουν αναφέρει την επίδραση του υδρογόνου στην πτώση πίεσης του αγωγού είτε με σταθερό ογκομετρικό ρυθμό ροής (Blacharski et al. 2016) (Witkowski et al. 2018) (Kuczynski et al. 2019), είτε με βάση τη σταθερή μεταφορά ενέργειας (Allison, και συν., 2021) ή είτε και με τα δύο (Schouten 2004) (Blacharski et al. 2016) και (Witkowski et al. 2018) και μελέτησαν την επίδραση διαφορετικών συνθέσεων ανάμειξης στην πτώση πίεσης του αγωγού μεταφοράς. Τα αποτελέσματα των μελετών τους δείχνουν ότι με σταθερό τυπικό ογκομετρικό ρυθμό ροής αερίου, η αύξηση της περιεκτικότητας σε υδρογόνο μειώνει την πτώση πίεσης. Αυτό αποδίδεται κυρίως στη χαμηλότερη πυκνότητα μείγματος, στον υψηλότερο συντελεστή συμπιεστότητας και στο χαμηλότερο ιξώδες μείγματος με αυξανόμενη περιεκτικότητα σε υδρογόνο (Blacharski et al. 2016) (Witkowski et al. 2018). Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ωστόσο, ότι αν και η πτώση πίεσης μειώνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης υδρογόνου σε σταθερό ογκομετρικό ρυθμό ροής, ο συνολικός ρυθμός ροής ενέργειας μειώνεται επίσης λόγω της χαμηλότερης ογκομετρικής ενεργειακής πυκνότητας του υδρογόνου.

3.5 Συμπίεση φυσικού αερίου

Οι φυγόκεντροι και οι παλινδρομικοί συμπιεστές είναι οι δύο τεχνολογίες που παρέχουν την απαραίτητη συμπίεση για την αντιστάθμιση της πτώσης πίεσης κατά μήκος των αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου. Οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την επιλογή τεχνολογίας μεταξύ των δύο τύπων συμπιεστών περιλαμβάνουν την ικανότητα παροχής και τη λειτουργική ευελιξία που απαιτείται για τη συμπίεση (Interstate Natural Gas Association of America, 2010) (Diez, et al., 2020). Οι φυγόκεντροι συμπιεστές ευνοούνται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλούς ρυθμούς ροής, μέσο βαθμό συμπίεσης και σχετικά σταθερές συνθήκες ροής. Αντίθετα, οι παλινδρομικοί συμπιεστές χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με χαμηλούς ρυθμούς ροής, υψηλό βαθμό συμπίεσης και ενδεχόμενα μεταβλητές συνθήκες ροής. Οι παλινδρομικοί συμπιεστές έχουν καθιερωθεί για τη συμπίεση υδρογόνου και βρίσκουν εκτεταμένη χρήση στα διυλιστήρια λόγω της εξαιρετικής προσαρμοστικότητάς τους στο χειρισμό αερίων διαφορετικών μοριακών βαρών, αν και απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στα σφραγίσματα τους, όταν πρόκειται για αέρια χαμηλού μοριακού βάρους όπως το υδρογόνο.

Οι συμπιεστές αυτοί μπορούν να έχουν ή όχι λίπανση, με το τελευταίο να προτιμάται σε εφαρμογές υδρογόνου υψηλής καθαρότητας για την πρόληψη της μόλυνσης από το έλαιο (Diez, et al., 2020).

Κατά την αξιολόγηση οποιουδήποτε τύπου συμπιεστή για εφαρμογές υδρογόνου, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη η συμβατότητα των υλικών του συμπιεστή με το υδρογόνο υπό συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας της διεργασίας, η επίδραση του υδρογόνου στην απόδοση και το εύρος λειτουργίας του συμπιεστή, η αποδοχή μόλυνσης από υδρογόνο στο λιπαντικό (πιο κρίσιμη σε εφαρμογές καθαρού υδρογόνου), και η ανοχή για διαρροή υδρογόνου μέσω των σφραγισμάτων (Diez, et al., 2020). Οι περιορισμοί που σχετίζονται με την ταχύτητα του συμπιεστή και την ισχύ εισόδου μπορούν επίσης να επηρεάσουν και τους δύο τύπους συμπιεστών. Παρακάτω γίνεται αναφορά στις γενικές επιδράσεις της ανάμειξης υδρογόνου και στους δύο τύπους συμπιεστών, καθώς και στις ειδικές επιδράσεις που σχετίζονται με τους φυγόκεντρους συμπιεστές.

3.5.1 Γενικές επιδράσεις στη συμπίεση

Αρκετές επιδράσεις της ανάμειξης υδρογόνου με φυσικό αέριο σχετίζονται με τη θερμοδυναμική της συμπίεσης και μπορούν επηρεάσουν τόσο την παλινδρομική όσο και τη φυγόκεντρική τεχνολογία. Το έργο συμπίεσης και η θεωρητική αύξηση θερμοκρασίας μπορούν να αυξηθούν εξίσου με την αύξηση της συγκέντρωσης υδρογόνου όταν πρόκειται η συμπίεση να γίνει με σταθερή αύξηση πίεσης και σταθερή θερμοκρασία εισόδου (Bainier, et al., 2019) (Zabrzewski, et al., 2017). Η αύξηση του έργου συμπίεσης αποδίδεται κυρίως στη μείωση της πυκνότητας, ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας οφείλεται σε αύξηση του λόγου θερμοχωρητικότητας (ο λόγος της ειδικής θερμότητας σε σταθερή πίεση προς την ειδική θερμότητα σε σταθερό όγκο) καθώς αλλάζει η σύσταση του αερίου σε υδρογόνο. Και τα δύο αυτά αποτελέσματα θα μπορούσαν να περιορίσουν τη δυναμικότητα του σταθμού συμπίεσης. Το αυξημένο έργο συμπίεσης μπορεί να οδηγήσει σε σενάρια όπου ένας σταθμός συμπίεσης λειτουργεί υπό συνθήκες περιορισμένης ισχύος. Ομοίως, η αύξηση της θερμοκρασίας από τη συμπίεση για μείγματα αερίων με υψηλότερη σύσταση υδρογόνου μπορεί να οδηγήσει σε σενάρια περιορισμένης λειτουργίας ψύξης εάν οι συμπιεστές τοποθετηθούν σε σειρά ώστε να επιτευχθεί μια δεδομένη πίεση εξόδου. Η επίδραση αυτών των σεναρίων μπορεί να περιορίσει ή και όχι τη συνολική ικανότητα του δικτύου αγωγών για ανάμειξη, ανάλογα με το εάν οι φορείς εκμετάλλευσης του δικτύου μπορούν ή όχι να μετατοπίσουν τα φορτία συμπίεσης από τον έναν σταθμό στον άλλο.

3.5.2 Επιδράσεις σε φυγόκεντρους συμπιεστές

Η υπερσυμπίεση και ο «πνιγμός» (surge and choke) είναι δύο πιθανά φαινόμενα που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τους φυγόκεντρικούς συμπιεστές φυσικού αερίου με την προσθήκη υδρογόνου, ανάλογα με τον τρόπο σχεδιασμού και λειτουργίας του συμπιεστή. Η υπερσυμπίεση είναι μία ασταθής κατάσταση που χαρακτηρίζεται από κυκλικές και συχνά απότομες αναστροφές της ροής του αερίου. Συμβαίνει όταν ο ρυθμός ροής του αερίου στην είσοδο του συμπιεστή δεν είναι επαρκής για να διατηρηθεί η συμπίεση. Η υπερσυμπίεση μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες, συμπεριλαμβανομένων μηχανικών βλαβών στον συμπιεστή, μείωση της αποδοτικότητας και κραδασμούς. Από την άλλη πλευρά ο πνιγμός (choke ή stonewalling) είναι μια κατάσταση που εμφανίζεται στους φυγόκεντρους συμπιεστές όταν ο ρυθμός ροής του συμπιεσμένου αερίου πλησιάζει μία κρίσιμη τιμή (όριο). Στη κατάσταση αυτή η ταχύτητα του αερίου σε κάποιο σημείο εντός του συμπιεστή φτάνει την ταχύτητα του ήχου δημιουργώντας το λεγόμενο «πνιγμό». Οι επιπτώσεις που μπορεί να επιφέρει αυτή η κατάσταση είναι σημαντικές και σχετίζονται με την μείωση της απόδοσης του συμπιεστή.

Οι φυγόκεντροι συμπιεστές μεταβλητής ταχύτητας, ειδικά εκείνοι που τροφοδοτούνται από ηλεκτρικούς κινητήρες, ενδέχεται να παρέχουν αρκετή ευελιξία ώστε να αποφευχθεί η υπέρσυμπιεση και ο «πνιγμός». Οι Bainier και Kurz (2019) αναφέρουν ότι ένας φυγόκεντρικός συμπιεστής μεταβλητής ταχύτητας μπορεί να παρέχει σταθερή άνοδο πίεσης αυξάνοντας την ταχύτητα, χωρίς να πλησιάζει τις συνθήκες υπερσυμπίεσης ή πνιγμού. Για συμπιεστές σταθερής ταχύτητας ένα εναλλακτικό μέσο ευελιξίας είναι η προσαρμογή των πτερυγίων. Γενικότερα η εκτέλεση ελεγχόμενης δοκιμής υπερσυμπίεσης σε νέες συνθήκες λειτουργίας, όπως η τροφοδοσία μίγματος υδρογόνου-φυσικού αερίου, είναι κρίσιμη για την αποφυγή δυσμενών συνθηκών λειτουργίας (Revamp / Re-rate Design Considerations, 2014). Η μέγιστη ταχύτητα πτερωτής είναι ένα άλλο χαρακτηριστικό του φυγόκεντρικού συμπιεστή που θα μπορούσε να περιορίσει την ανάμειξη υδρογόνου. Οι Bainier and Kurz (2019) και Alban (2022) αναφέρουν το πώς η ταχύτητα πτερωτής μπορεί να μεταβληθεί με την αύξηση της συγκέντρωσης υδρογόνου (Blending Hydrogen into Existing Gas Grid: Opportunities and Challenges for Pipeline e-Motor Compressor System Design, 2022). Οι δύο μελέτες μοντελοποιούν φυγόκεντρους συμπιεστές για σενάρια με αυξανόμενη συγκέντρωση υδρογόνου σε ένα μείγμα υδρογόνου και φυσικού αερίου. Ο Alban (2022) αναφέρει ότι για ένα σενάριο με σταθερό ογκομετρικό ρυθμό ροής, η ταχύτητα πτερωτής αλλάζει οριακά όταν συμπιέζεται το μείγμα αερίων με αυξανόμενη σύνθεση υδρογόνου έως και 20% κατ' όγκο. Στην ίδια εργασία επίσης αναφέρεται ότι για ένα σενάριο σταθερής παροχής ενέργειας, η

ταχύτητα της πτερωτής πρέπει να αυξηθεί σημαντικά και να υπερβεί τα ασφαλή όρια λειτουργίας κατά τη συμπίεση μιγμάτων φυσικού αερίου με σύνθεση 10% υδρογόνου. Ειδικότερα με βάση την ταχύτητα σχεδιασμού κατά API 617 η μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας αυξάνεται κατά 105%. Ομοίως, οι Bainier και Kurz (2019) καταγράφουν μια σημαντική αύξηση στην απαιτούμενη ταχύτητα πτερωτής για την προσαρμογή των αυξανόμενων μιγμάτων υδρογόνου όταν διατηρείται σταθερή η αύξηση της πίεσης του συμπιεστή. Ωστόσο, ο συγκεκριμένος συμπιεστής που μοντελοποιήθηκε στη μελέτη τους μπορούσε να λειτουργεί με λιγότερο από 20% υδρογόνο πριν ξεπεράσει τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα λειτουργίας. Κοινό συμπέρασμα αυτών των μελετών ήταν ότι η αύξηση της συγκέντρωσης υδρογόνου στο 100% απαιτεί σημαντικά περισσότερη ισχύ λειτουργίας για σταθερή αύξηση της πίεσης.

Οι Zhang et al. (2021) ανέλυσαν την απόδοση του φυγόκεντρου συμπιεστή στο πλαίσιο της ανάμειξης υδρογόνου σε αγωγούς φυσικού αερίου και διαπίστωσαν ότι η ταχύτητα περιστροφής του συμπιεστή πρέπει να αυξηθεί για να διατηρηθεί σταθερός ρυθμός ροής ενέργειας. Η μείωση του μοριακού βάρους του αερίου του μείγματος (και επομένως της πυκνότητας) είναι ο κύριος λόγος της αύξησης της ισχύος του φυγόκεντρου συμπιεστή, επιπλέον παράγοντες που επηρεάζουν είναι οι επιπτώσεις του υδρογόνου στην πτώση πίεσης του αγωγού και στο ρυθμό αύξησης της πίεσης στο συμπιεστή (compressor head rise) (Zhang, et al., 2021). Η ευθραυστότητα υδρογόνου (ευαισθησία των υλικών στο περιβάλλον υδρογόνου με συνέπεια την ανάπτυξη ρωγμών-Hydrogen embrittlement) που μπορεί να αναπτυχθεί στη πτερωτή περιορίζει περαιτέρω τη μέγιστη ταχύτητα του συμπιεστή και την ακεραιότητα του συμπιεστή (στην έννοια ακεραιότητα περιλαμβάνονται θέματα λειτουργικά όπως απόδοσης και θέματα τεχνικά όπως διάβρωσης κ.α.) (Diez, et al., 2020). Οι Adam et al. (2020) προτείνουν την αντικατάσταση της πτερωτής και άλλων εσωτερικών στοιχείων του συμπιεστή με εκείνα που έχουν σχεδιαστεί για μεγαλύτερες συνθέσεις υδρογόνου ως μια φθηνή εναλλακτική λύση με πλήρη ανακατασκευή του συμπιεστή (Adam, et al., 2020). Ο Alban (2022) σημειώνει ότι ο κανονισμός API 617 απαγορεύει τη χρήση υλικών χάλυβα με αντοχές διαρροής μεγαλύτερες από 827 MPa (ή 120 ksi) για φυγόκεντρους συμπιεστές που επεξεργάζονται αέρια με μερικές πιέσεις υδρογόνου μεγαλύτερες από 6,89 bar. Τέλος η δημιουργία φυσαλίδων, μέσω των οποίων το υδρογόνο διαχέεται στο υλικό δημιουργώντας τοπική συσσώρευση πίεσης στα εγκλείσματα ή στα όρια των κόκκων προάγοντας τη διάδοση των ρωγμών, αποτελεί ένα επιπλέον πρόβλημα για τους φυγόκεντρους συμπιεστές που επεξεργάζονται μείγματα αερίων που περιέχουν υδρογόνο (Alban 2022).

3.6 Μείωση Πίεσης

Τα δίκτυα μεταφοράς φυσικού αερίου χρησιμοποιούν συστήματα μείωσης πίεσης σε σημεία του δικτύου όπου η γραμμή μεταφοράς υψηλής πίεσης συνδέεται με άλλα συστήματα χαμηλότερης πίεσης για τη διανομή ή την τελική χρήση. Η προσθήκη υδρογόνου θα επηρεάσει τη τιμή της μεταβολής θερμοκρασίας που παρατηρείται σε αυτά τα συστήματα. Ο λόγος αυτής της μεταβολής είναι οι διαφορετικοί συντελεστές Joule-Thompson του υδρογόνου και του φυσικού αερίου. Ο συντελεστής Joule-Thompson εκφράζει τη μεταβολή της θερμοκρασίας σε σχέση με τη μεταβολή της πίεσης. Το φυσικό αέριο συνήθως υφίσταται πτώση θερμοκρασίας με μείωση της πίεσης και ως εκ τούτου απαιτεί θέρμανση για να αντισταθμιστεί η πιθανή συμπύκνωση υδρογονανθράκων στον αγωγό (Schouten, 2004). Το υδρογόνο, από την άλλη πλευρά, έχει αρνητικό συντελεστή Joule-Thompson και παρουσιάζει αύξηση της θερμοκρασίας με μείωση της πίεσης (Bainier, et al., 2019). Ο Schouten (2004) διαπιστώνει ότι ένα μείγμα αερίων με 25 mol % υδρογόνο έχει ως αποτέλεσμα 33% χαμηλότερη αλλαγή θερμοκρασίας σε σχέση με αυτή του φυσικού αερίου χωρίς υδρογόνο. Οι Li et al. (2021) διερεύνησαν περαιτέρω την επίδραση του υδρογόνου στο συντελεστή Joule-Thompson μίγματος φυσικού αερίου μεταβάλλοντας τη σύνθεση υδρογόνου έως και 30 vol%. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης συμφωνούν με τα ευρήματα του Schouten (2004) και υποδεικνύουν ότι ο συντελεστής Joule-Thompson για μείγματα φυσικού αερίου και υδρογόνου μειώνεται με την αύξηση των συνθέσεων υδρογόνου για το εύρος σύνθεσης που μελετήθηκε.

3.7 Βαλβίδες

Στον τομέα της μεταφοράς υδρογόνου μέσω αγωγών, η στρατηγική τοποθέτηση των σταθμών βαλβίδων κύριας γραμμής αποκτά κρίσιμη σημασία. Αυτοί οι σταθμοί βαλβίδων, ανάλογα με τις ρυθμιστικές κατευθυντήριες γραμμές και τα ειδικά χαρακτηριστικά του αγωγού, βρίσκονται συνήθως σε διαστήματα που κυμαίνονται από 5 έως 20 μίλια. Η κύρια λειτουργία τους είναι να διευκολύνουν την απομόνωση των τμημάτων του αγωγού όταν απαιτούνται δραστηριότητες συντήρησης, επισκευής ή επιθεώρησης (American Society of Mechanical Engineers and American Petroleum Institute, 2021).

Ωστόσο, η εισαγωγή του υδρογόνου, με τις χαρακτηριστικές μοριακές του ιδιότητες και ειδικότερα ως το μικρότερο μόριο, εισάγει χαρακτηριστικές προκλήσεις που απαιτούν προσεκτική εξέταση. Ένα από τα κεντρικά ζητήματα αφορά τη διαχείριση πιθανών διαρροών σε αυτές τις βαλβίδες. Η διαρροή μπορεί να εκδηλωθεί με δύο κύριους τρόπους: μέσω της έδρας της βαλβίδας και μέσω του στελέχους της βαλβίδας. Κάθε ένα από αυτούς τους

τρόπους παρουσιάζει το δικό του σύνολο προκλήσεων, ο ένας σχετίζεται με την απομόνωση του εξοπλισμού και ο άλλος σχετικά με τον έλεγχο των εκπομπών (Sequeira, 2012).

Για την αντιμετώπιση και τον περιορισμό της διαρροής στην έδρα της βαλβίδας, υιοθετείται η λεγόμενη τεχνολογία «από μέταλλο σε μέταλλο» (metal-to-metal technology). Αυτή η τεχνολογία απαιτεί την ενσωμάτωση ενός μεταλλικού δίσκου που δεν είναι μόνο εύκαμπτος αλλά και ελαστικός, επιτρέποντάς του να σχηματίσει μια αξιόπιστη σφράγιση (Sequeira 2012). Αυτός ο στιβαρός μηχανισμός στεγανοποίησης βοηθά στην αποφυγή διαρροής υδρογόνου στην έδρα της βαλβίδας, ενισχύοντας έτσι την ασφάλεια και την αξιοπιστία της υποδομής του αγωγού.

Η πρόληψη διαρροών στο στέλεχος της βαλβίδας είναι εξίσου σημαντική. Η επίτευξη απόδοσης χωρίς διαρροές εξαρτάται από το σχολαστικό έλεγχο στο παρέμβυσμα των βαλβίδων και τον σχεδιασμό της φλάντζας. Τα παραδοσιακά υλικά, όπως ο μαλακός γραφίτης, δεν είναι αποτελεσματικά για το υδρογόνο, καθιστώντας τα ακατάλληλα για αυτόν τον σκοπό. Συνεπώς, υπάρχει επιτακτική ανάγκη μετάβασης σε μεταλλικά εξαρτήματα και κατεργασμένα παρεμβύσματα για την επίτευξη σφραγιστικότητας στις βαλβίδες.

Σε σενάρια όπου οι θερμοκρασίες του υδρογόνου παραμένουν κάτω από τους 200°C, ο σχεδιασμός βαλβίδων (έδρα-στέλεχος) που διαθέτουν ελαστικούς δακτυλίους O (O-rings) ή τύπου chevron έχουν υψηλή αποτελεσματικότητα. Οι διατάξεις αυτές προσφέρουν το πλεονέκτημα της δημιουργίας πολλαπλών σφραγισμάτων, ενισχύοντας περαιτέρω τον περιορισμό του υδρογόνου και ελαχιστοποιώντας τον κίνδυνο διαρροής.

Μια αξιοσημείωτη περίπτωση εφαρμογής αυτών των συστημάτων βαλβίδων με υψηλή αποτελεσματικότητα παρέχοντας ασφάλεια και αξιοπιστία στην μεταφορά υδρογόνου προέρχεται από την Ολλανδία. Η Gasunie, μια εξέχουσα εταιρεία μεταφοράς φυσικού αερίου, διεξήγαγε μια εκτεταμένη σειρά δοκιμών, συμπεριλαμβανομένων αξιολογήσεων διαρροών σε βαλβίδες που είχαν σχεδιαστεί αρχικά για εξυπηρέτηση φυσικού αερίου. Το αποτέλεσμα αυτών των δοκιμών ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικό, καθώς όχι μόνο πληρούσαν αυστηρά πρότυπα ασφαλείας αλλά επιβεβαίωσαν επίσης την καταλληλότητά τους για χειρισμό περιεκτικότητας 100% υδρογόνου (Huising, et al., 2020).

Επιπλέον, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της ευθραυστότητας του υδρογόνου κατά τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την επιλογή βαλβίδων. Η ευθραυστότητα υδρογόνου καθιστά σημαντική την ελαχιστοποίηση των συγκεντρώσεων τάσεων που μπορεί να προκύψουν λόγω των αιχμηρών ακμών και των απότομων γωνιών που σχηματίζονται κατά τη διαδικασία κατασκευής της βαλβίδας (Sequeira 2012). Τέλος, η συνετή διαχείριση

των δραστηριοτήτων συγκόλλησης στις βαλβίδες είναι απαραίτητη, καθώς είναι πιο πιθανό να εμφανιστεί ευθραυστότητα υδρογόνου σε αυτές τις θέσεις.

Συμπερασματικά, η επιλογή και ο σωστός σχεδιασμός των βαλβίδων είναι ύψιστης σημασίας στη μεταφορά με αγωγούς μείγματος υδρογόνου-φυσικού αερίου ή και καθαρού υδρογόνου. Τα εξαρτήματα αυτά όχι μόνο διασφαλίζουν την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία της υποδομής, αλλά συμβάλλουν επίσης στη μείωση των διαφυγόντων εκπομπών και τη συνολική ακεραιότητα του συστήματος.



Εικόνα 26: Βαλβίδες διαχείρισης ροής σε σύστημα μεταφοράς φυσικού αερίου

3.8 Ανάλυση σύνθεσης αερίου

Τα σενάρια ανάμειξης υδρογόνου μπορούν να περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα ποσοτήτων έγχυσης, από 1% κατ' όγκο έως επίπεδα που υπερβαίνουν το 50%, ακόμη και έως καθαρό 100% υδρογόνο. Είναι επιτακτική ανάγκη να προσδιοριστεί με ακρίβεια η σύνθεση του αερίου σε όλα αυτά τα σενάρια μεταφοράς κατά μήκος των αγωγών. Αυτή η ακρίβεια διασφαλίζει ότι το μείγμα υδρογόνου παραμένει εντός καθορισμένων τεχνικών ορίων, λαμβάνοντας υπόψη τυχόν τροποποιήσεις του συστήματος και διευκολύνει την ακριβή τιμολόγηση και την παρακολούθηση του θερμικού περιεχομένου. Η αέρια χρωματογραφία είναι η κύρια μέθοδος για την αξιολόγηση της σύστασης του αερίου και της θερμογόνου δύναμης εντός του αγωγού, διαδραματίζοντας κεντρικό ρόλο στις διαδικασίες χρέωσης και ελέγχου του δικτύου (Diez et al. 2020).

Η αναλυτική τεχνολογία αυτή λειτουργεί ανιχνεύοντας διακυμάνσεις στη θερμική αγωγιμότητα και κινητικότητα των συστατικών του μείγματος αερίων. Στις τρέχουσες μεθόδους αέριας χρωματογραφίας που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα φυσικού αερίου, το ήλιο χρησιμεύει ως αέριο μεταφοράς. Ωστόσο, η χρήση ηλίου μπορεί να δημιουργήσει ανακρίβειες στις μετρήσεις, δεδομένης της στενής ομοιότητάς του με το υδρογόνο στη θερμική αγωγιμότητα (Weidner, et al., 2016). Για να αντιμετωπιστεί αυτός ο προβληματισμός, έχουν διερευνηθεί εναλλακτικές τεχνικές για τη μέτρηση του υδρογόνου σε μείγματα φυσικού αερίου.

Μια προσέγγιση περιλαμβάνει τη χρήση ενός αερίου χρωματογράφου μίας στήλης με αργό ως φέρον αέριο, ενώ μια άλλη χρησιμοποιεί έναν αέριο χρωματογράφο διπλής στήλης που χρησιμοποιεί και ήλιο και αργό ως αέρια μεταφοράς (Domptail, et al., 2020). Αυτές οι εναλλακτικές μέθοδοι προσφέρουν πιο ακριβείς μετρήσεις υδρογόνου. Επιπλέον, οι αναδυόμενες τεχνολογίες αισθητήρων ενσωματώνονται στην ανάλυση σύνθεσης αερίου. Αυτοί οι αισθητήρες είναι ικανοί να ανιχνεύουν υδρογόνο είτε σε συνδυασμό με συμβατικές μεθόδους ανάλυσης σύνθεσης αερίων είτε σε συνδυασμό με αισθητήρες που έχουν σχεδιαστεί για την αναγνώριση άλλων ενώσεων υδρογονανθράκων (Sweelssen, et al., 2020). Μια αξιοσημείωτη πρόοδος σε αυτόν τον τομέα είναι η ανάπτυξη ενός αισθητήρα με βάση την πλατίνα (Blokland, et al., 2021). Αυτός ο αισθητήρας έχει την ικανότητα να ανιχνεύει το υδρογόνο μέσα στο φυσικό αέριο σε συνθήκες ροής για διάφορες περιεκτικότητες. Η επιτυχημένη εφαρμογή του παρουσιάστηκε στο έργο HyDeploy, όπου έδειξε την ικανότητα ανίχνευσης υδρογόνου σε μείγματα αερίων με συνθέσεις έως και 30 vol% σε πιέσεις έως και 10 bar.

3.9 Δίκτυα αγωγών διανομής

Τα δίκτυα αγωγών διανομής αποτελούν ένα σύνθετο σύστημα που περιλαμβάνει ένα δίκτυο από χαλύβδινους και πλαστικούς σωλήνες, ενσωματωμένο με κατάλληλα τοποθετημένους σταθμούς βαλβίδων, εγκαταστάσεις ρύθμισης πίεσης και υποδομές μετρήσεων (Melaina, και συν., 2013). Η λειτουργική σταθερότητα αυτών των δικτύων εξαρτάται από την ακριβή διατήρηση της αντίθετης πίεσης (back pressure), που επιτυγχάνεται μέσω μιας πολύπλευρης διάταξης που ξεκινά από τα city gates και εκτείνεται σε όλο το δίκτυο. Μέσα σε αυτόν τον περίπλοκο ιστό, οι σταθμοί ρύθμισης πίεσης προσαρμόζουν τα επίπεδα πίεσης ώστε να ταυτίζονται με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις των τελικών χρηστών. Ένα σημαντικό μέρος των συσκευών μέτρησης βρίσκεται στρατηγικά τοποθετημένο σε τοποθεσίες τελικών χρηστών, κυρίως για τη διευκόλυνση των ακριβών διαδικασιών χρέωσης. Αυτό απαιτεί την ενσωμάτωση μετρητών που διακρίνονται για την αξιοσημείωτη ακρίβεια και αξιοπιστία τους.

Αρκετές βασικές διακρίσεις ξεχωρίζουν τα δίκτυα διανομής φυσικού αερίου από τα αντίστοιχα των αγωγών μεταφοράς (Melaina , και συν., 2013) . Για παράδειγμα τα δίκτυα διανομής εντός των Ηνωμένων Πολιτειών λειτουργούν χαρακτηριστικά σε σημαντικά χαμηλότερα όρια πίεσης, τα οποία συνήθως καλύπτονται στα 300 psi. Αυτά τα δίκτυα επίσης διαθέτουν κυρίως μικρότερες διαμέτρους σωλήνων, με τυπικές διαστάσεις που κυμαίνονται από 1 έως 2 ίντσες, και χρησιμοποιούν κυρίως υλικά όπως πολυαιθυλένιο και χάλυβα για την κατασκευή τους. Συγκεκριμένα στις Ηνωμένες Πολιτείες τα δίκτυα διανομής έχουν κύριους αγωγούς με εύρος διαμέτρου 1,5 έως 8 ίντσες, παράλληλα με γραμμές εξυπηρέτησης με διαμέτρους που κυμαίνονται συνήθως από 0,5 έως 2 ίντσες. Επιπλέον, οι γραμμές εξυπηρέτησης διανομής εντός των Ηνωμένων Πολιτειών λειτουργούν συνήθως σε μια ποικιλία επιπέδων πίεσης, που κυμαίνονται από 0,25 psig (17,5 mbar) έως 60 psig (4,1 bar), ενώ ορισμένα τμήματα λειτουργούν ακόμη και στα 100 psig (6,9 bar). Σε πλήρη αντίθεση, οι γραμμές μεταφοράς εμφανίζουν σημαντικά υψηλότερες πιέσεις λειτουργίας, που συνήθως κυμαίνονται από 1.200 psig (84 bar) έως 600 psig (42 bar) (Melaina , και συν., 2013). Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι διάμετροι των σωλήνων και οι πιέσεις λειτουργίας μπορεί να αποκλίνουν σε άλλες περιοχές σε όλο τον κόσμο.

Στην Ευρώπη, τα δίκτυα διανομής κυρίως αποτελούνται από αγωγούς κατασκευασμένους από χάλυβα ή πλαστικό, παρόμοια με τους αμερικανικούς. Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικές διαφορές όσον αφορά τη διάμετρο των σωλήνων και τις πιέσεις λειτουργίας. Οι κύριοι αγωγοί διανομής, οι οποίοι αποτελούν τους κύριους μεταφορείς του φυσικού αερίου, εμφανίζουν διάφορες διαμέτρους που κυμαίνονται συνήθως από 1,5 έως 8 ίντσες, αν και ενδέχεται να υπάρχουν τοπικές παραλλαγές. Αυτοί οι κύριοι αγωγοί είναι υπεύθυνοι για τη μεταφορά του φυσικού αερίου από τους μεγάλους αγωγούς μεταφοράς σε τοπικά σημεία διανομής.

Οι γραμμές εξυπηρέτησης στα ευρωπαϊκά δίκτυα διανομής συνήθως έχουν διαμέτρους που κυμαίνονται από 0,5 έως 2 ίντσες. Αυτές οι γραμμές εξυπηρέτησης αποτελούν το τελικό τμήμα του συστήματος διανομής και συνδέονται απευθείας με τις ιδιοκτησίες των τελικών χρηστών. Αυτές διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη μεταφορά του φυσικού αερίου σε οικίες, επιχειρήσεις και βιομηχανίες.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των ευρωπαϊκών δικτύων διανομής είναι το εύρος των πιέσεων λειτουργίας. Διαφορετικά από τις Ηνωμένες Πολιτείες, όπου οι γραμμές εξυπηρέτησης διανομής μπορεί να λειτουργούν σε χαμηλές πιέσεις 0,25 psig (17,5 mbar) έως 60 psig (4,1 bar), τα ευρωπαϊκά δίκτυα συχνά χρησιμοποιούν ένα ευρύτερο φάσμα επιπέδων πίεσης. Αυτό μπορεί να κυμαίνεται από χαμηλές πιέσεις, παρόμοιες με αυτές των

Ηνωμένων Πολιτειών, έως μεσαίες πιέσεις ή ακόμη και σε ορισμένα τμήματα με υψηλές πιέσεις. Ενδεικτικά ορισμένα τμήματα των γραμμών εξυπηρέτησης στην Ευρώπη λειτουργούν σε πιέσεις έως και 100 psig (6,9 bar).

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένες ρυθμίσεις και παράμετροι λειτουργίας των δικτύων διανομής μπορεί να διαφέρουν μεταξύ των ευρωπαϊκών χωρών και περιφερειών, αντανακλώντας διαφορές στην ανάπτυξη υποδομών, νομοθετικά πλαίσια και τοπικά πρότυπα ζήτησης.

3.9.1 Συμβατότητα υδρογόνου με αγωγούς διανομής πολυμερών υλικών

Η αξιολόγηση της συμβατότητας του υδρογόνου και των μιγμάτων υδρογόνου με τα υπάρχοντα υλικά αγωγών πολυαιθυλενίου (PE) είναι κρίσιμη για την λειτουργία των αγωγών διανομής και περιλαμβάνει την εξέταση των βραχυπρόθεσμων μηχανικών, φυσικών και χημικών επιδράσεων καθώς και τη μακροπρόθεσμη αντοχή σχεδιασμού του δικτύου για διάστημα 50 ετών λειτουργίας. Σε αυτή τη παράγραφο εξετάζονται ορισμένα διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με την επίδραση του υδρογόνου σε υλικά πολυαιθυλενίου και προσδιορίζονται τα πεδία που απαιτείται περαιτέρω δοκιμή ή ανάλυση.

Ορισμένες αναφορές παρουσιάζουν δεδομένα σχετικά με βραχυπρόθεσμες μηχανικές δοκιμές και αφορούν κυρίως καταστάσεις μονοαξονικής τάσης. Οι οιονεί στατικές δοκιμές εφελκυσμού δεν δείχνουν σημαντικές επιδράσεις του υδρογόνου σε χαμηλές πιέσεις. Ωστόσο, οι υψηλότερες πιέσεις φαίνεται να προκαλούν μια ελαφρά μείωση της εφελκυστικής αντοχής (Castagnet et al. 2012; Alvine et al. 2014; Castagnet et al. 2010; Klopffer et al. 2010; Menon et al. 2016). Παραμένει ασαφές εάν αυτό το φαινόμενο οφείλεται στις επιδράσεις της πίεσης ή του υδρογόνου. Περιορισμένα δεδομένα σχετικά με δοκιμές γρήγορης έκρηξης, ενέργειας θραύσης λειτουργίας τύπου I (mode I fracture energy) και δοκιμές εφελκυσμού-κόπωσης δεν δείχνουν σημαντικές επιδράσεις του υδρογόνου (Castagnet et al. 2010, Simmons et al. 2021). Σε δοκιμή ερπυσμού παρατηρήθηκε ελαφρώς χαμηλότερη παραμόρφωση που συνδέεται με την έκθεση στο υδρογόνο (Castagnet et al. 2012). Ωστόσο, τα αποτελέσματα από αυτή τη μελέτη δεν είναι αμιγώς πειραματικά και εξετάστηκε μόνο ένα επίπεδο τάσεων. Συνιστάται για αυτή τη δοκιμή η εφαρμογή διαφόρων επιπέδων τάσεων σε δοκίμια με εγκοπές για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση των επιπτώσεων ερπυσμού σε συνθήκες λειτουργίας παρουσία υδρογόνου. Η αξιολόγηση θα πρέπει επίσης να περιλαμβάνει καταστάσεις πολυαξονικής καταπόνησης σε συνθήκες οιονεί στατικής, κόπωσης και φόρτισης ερπυσμού, επιπλέον των μακροπρόθεσμων δοκιμών για αξιολογήσεις εφ' όρου ζωής με υδρογόνο.

Υπάρχουν ορισμένες μελέτες που ασχολήθηκαν με την επίδραση του υδρογόνου στις φυσικές ιδιότητες των υλικών πολυαιθυλενίου, συμπεριλαμβανομένου του βαθμού κρυσταλλικότητας και πυκνότητας. Παρατηρήθηκαν μικρές αλλαγές σε αυτές τις ιδιότητες μετά από έκθεση σε υδρογόνο με τα αποτελέσματα να ποικίλλουν μεταξύ διαφορετικών ποιοτήτων υλικών πολυαιθυλενίου (Fujiwara et al. 2020; Fujiwara et al. 2021; Ono et al. 2019). Περαιτέρω εξέταση της κρυσταλλικής δομής μπορεί να είναι απαραίτητη για να αποκτηθεί μια βαθύτερη κατανόηση των φυσικών αλλοιώσεων. Μια μελέτη που χρησιμοποιεί τεχνικές μη καταστροφικού χαρακτηρισμού δείχνει λιγότερες αλλοιώσεις σε μικροσκοπικό επίπεδο σε υλικά πολυαιθυλενίου υψηλότερης πυκνότητας σε σύγκριση με αυτά χαμηλότερης πυκνότητας μετά από έκθεση σε υδρογόνο υπό πίεση (Ono et al. 2019). Ο συνδυασμός πολλαπλών τεχνικών χαρακτηρισμού μπορεί να απαιτείται για μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση των αλλαγών του πολυαιθυλενίου σε μοριακό επίπεδο λόγω της έκθεσης σε υδρογόνο. Είναι σημαντικό να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση αυτών των αλλαγών υλικού στη μηχανική απόδοση και στη διάρκεια ζωής των σωλήνων.

Όσον αφορά την υποβάθμιση του υλικού (δηλ. την υποβάθμιση των ιδιοτήτων του λόγω διαφόρων παραγόντων όπως περιβαλλοντικές συνθήκες, χημικές αντιδράσεις, μηχανική καταπόνηση ή άλλες εξωτερικές επιδράσεις), αναφέρεται ότι το υδρογόνο δεν συμβάλλει σημαντικά στην εξάντληση των αντιοξειδωτικών στα υλικά σωλήνων πολυαιθυλενίου (Iskon 2010) με την επισήμανση ότι τα αποτελέσματα αυτά αντιστοιχούν σε περιορισμένο έλεγχο της μεταβολής των περιβαλλοντικών συνθηκών. Περαιτέρω δοκιμές οξειδωτικής επαγωγής (oxidative induction) θα πρέπει να περιλαμβάνουν όλο το φάσμα των περιβαλλοντικών παραγόντων που σχετίζονται με το λειτουργικό πλαίσιο των αγωγών πολυαιθυλενίου, συμπεριλαμβανομένης της θερμοκρασίας, της πίεσης και της παρουσίας αερίων ρύπων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα δεδομένα που συνοψίζονται εδώ αφορούν τα κυρίως τμήματα σωλήνων διανομής πολυαιθυλενίου. Η σύνδεση σωλήνων με θερμική σύντηξη είναι μια κοινή πρακτική πεδίου και είναι επιτακτική ανάγκη να αξιολογηθούν πλήρως οι επιπτώσεις της έκθεσης σε υδρογόνο στα των συνδέσεων. Επιπλέον, τα περισσότερα από τα δεδομένα που συζητήθηκαν στερούνται ιχνηλασιμότητας σε συγκεκριμένα σκευάσματα πολυαιθυλενίου. Ως εκ τούτου, η αξιολόγηση της επίδρασης διαφορετικών σκευασμάτων πολυαιθυλενίου στη συμβατότητα με υδρογόνο είναι επίσης μια κρίσιμη παράμετρος προς εξέταση.

3.9.2 Μεταφορά στα δίκτυα διανομής

Όπως οι αγωγοί μεταφοράς που αναφέρθηκαν σε προηγούμενες παραγράφους έτσι και οι αγωγοί διανομής πρέπει να διατηρούν πιέσεις παράδοσης στα σημεία τελικής χρήσης για να

πληρούν τις προδιαγραφές των πελατών. Οι τεχνικές λειτουργίας για την τήρηση αυτών των προδιαγραφών ενδέχεται να απαιτούν προσαρμογές, ανάλογα με τον βαθμό ανάμειξης υδρογόνου και τους απαιτούμενους ρυθμούς ροής αερίου. Οι Smith et al. (2017) αναλύουν την πτώση πίεσης σε μήκους 100 m χαλύβδινου σωλήνα ονομαστικής διαμέτρου 25 mm που παρέχει σταθερό ρυθμό ροής ενέργειας αερίου. Αναφέρουν ότι με 30% κατ' όγκο υδρογόνο, η πτώση πίεσης του μείγματος είναι 25% υψηλότερη από αυτή του καθαρού φυσικού αερίου. Η αύξηση της πτώσης πίεσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό των λειτουργιών του δικτύου διανομής για να διασφαλιστεί ότι το σύστημα εξακολουθεί να πληροί τις απαιτήσεις τελικής χρήσης.

3.9.3 Διαρροή σε αγωγούς διανομής

Η σύσταση του υδρογόνου σε μείγμα με φυσικό αέριο εγείρει ανησυχίες σχετικά με τη διαρροή στους αγωγούς διανομής, λόγω των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων του υδρογόνου και ιδιαίτερα της χαμηλής πυκνότητάς του και της υψηλής ικανότητας διάχυσης μέσω των στερεών επιφανειών. Οι βάσιμες ανησυχίες εστιάζονται ειδικότερα στην διάχυση μέσω των τοιχωμάτων του σωλήνα πολυαιθυλενίου (PE). Οι περισσότερες διαρροές υδρογόνου στα δίκτυα διανομής συμβαίνουν με διείσδυση μορίων υδρογόνου μέσω των τοιχωμάτων του σωλήνα, δεδομένης της εκτεταμένης επιφάνειας αυτών των σωλήνων αυτών εντός του συστήματος (Melaina et al. 2013).

Έρευνα των Melaina et al. (2013) αναφέρει σε σενάριο που περιλαμβάνει ένα μίγμα υδρογόνου 20% υπό πίεση 60 psig, ότι η διαρροή υδρογόνου μέσω σωλήνων πολυαιθυλενίου θα μπορούσε να είναι 1.7 φορές μεγαλύτερη από τη διαρροή φυσικού αερίου. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο πραγματικός όγκος υδρογόνου που χάνεται, ακόμη και σε έναν σωλήνα πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας διαμέτρου 1 ίντσας, παραμένει οικονομικά ασήμαντος.

Στο Ηνωμένο Βασίλειο, οι Haeseldonckx και D'haeseleer (2007) διεξήγαγαν έρευνα σχετικά με την επίδραση των υψηλότερων επιπέδων ανάμειξης υδρογόνου στους αγωγούς διανομής φυσικού αερίου. Διαπίστωσαν ότι ενώ το υδρογόνο διαχέεται μέσω των τοιχωμάτων του σωλήνα πολυαιθυλενίου πέντε φορές πιο γρήγορα από το φυσικό αέριο, η συνολική ποσότητα διαρροής υδρογόνου παραμένει αμελητέα. Οι ετήσιες απώλειες αντιπροσώπευαν μόνο το 0,0005%-0,001% του συνολικού μεταφερόμενου όγκου ενώ αν αξιολογηθούν σε ενεργειακή βάση, οι απώλειες είναι ακόμη μικρότερες.

Αξίζει όμως να εξεταστεί πώς η εισαγωγή υδρογόνου στα δίκτυα διανομής επηρεάζει και τις διαρροές φυσικού αερίου. Οι Melaina et al (2013) παρατηρούν ότι ένα μίγμα υδρογόνου

20% σε δίκτυα διανομής πολυαιθυλενίου στις ΗΠΑ που λειτουργεί στα 60 psig διπλασιάζει τους ρυθμούς απώλειας φυσικού αερίου σε 77 ft³/μίλι/έτος. Ωστόσο, σε μελέτη από τους Subani, Amin και Agaie (2017) αναφέρεται ότι η αύξηση των μιγμάτων υδρογόνου πέρα από το 20% μπορεί στην πραγματικότητα να μειώσει τους ρυθμούς διαρροής του φυσικού αερίου. Διαπιστώνουν επίσης ότι η γωνία του αγωγού παίζει ρόλο στον ρυθμό διαρροής, με τους αγωγούς με κλίση 15° να παρουσιάζουν υψηλότερους ρυθμούς διαρροής σε παρόμοια επίπεδα μίγματος υδρογόνου.

Οι διαρροές μέσω των αρμών των σωληνώσεων διανομής προκαλούν επίσης ανησυχία, αν και σε μικρότερο βαθμό από τη διαρροή μέσω των τοιχωμάτων σωλήνων πολυαιθυλενίου. Το υδρογόνο διαπερνά τα ελαστομερή περισσότερο από τα πλαστικά, με τους συντελεστές διείσδυσης στα ελαστομερή να είναι τέσσερις έως πέντε φορές υψηλότεροι από αυτόν του φυσικού αερίου σε πλαστικούς σωλήνες (Melaina, Antonia και Penev 2013). Τα ελαστομερή υλικά, συμπεριλαμβανομένων των δακτυλίων O (O-rings), των διαφραγμάτων, των παρεμβυσμάτων, των φλάντζών κ.α., χρησιμοποιούνται στη μεταφορά αερίου. Η διείσδυση υδρογόνου σε ελαστομερή υλικά μειώνει την αντοχή τους σε εφελκυσμό, αυξάνοντας τον κίνδυνο διαρροής.

Οι κίνδυνοι ασφάλειας που συνδέονται με τη διαρροή υδρογόνου προκύπτουν κυρίως σε σημεία τελικής χρήσης, ειδικά σε περιορισμένους ή ανεπαρκώς αεριζόμενους χώρους. Η συσσώρευση υδρογόνου σε τέτοιες περιοχές μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο εκρήξεων ή πυρκαγιών. Οι στρατηγικές για τον μετριασμό αυτών των κινδύνων περιλαμβάνουν τη χρήση συστημάτων ανίχνευσης διαρροών και αρωματικών εντός του μίγματος (Melaina et al. 2013). Οι συσκευές ή οι αισθητήρες ανίχνευσης αερίων που βασίζονται σε ημιαγωγούς διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην ανίχνευση διαρροών τόσο στους αγωγούς μεταφοράς όσο και στους αγωγούς διανομής. Ωστόσο, η επίδραση του υδρογόνου σε αυτούς τους αισθητήρες μπορεί να ποικίλλει. Ορισμένοι αισθητήρες παρουσιάζουν αυξημένες ευαισθησίες στο υδρογόνο, ενώ άλλοι ανταποκρίνονται μόνο στα αραιωμένα αέρια συστατικά ενός μείγματος (Altfeld και Pinchbeck 2013). Απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την κατανόηση αυτών των παραλλαγών του αισθητήρα.

Σε έργα που έχουν εφαρμοσθεί στη πράξη όπως το έργο Hy4Heat στο Ηνωμένο Βασίλειο, έχει διερευνηθεί η χρήση οσμικών για την ανίχνευση διαρροών υδρογόνου. Μια μελέτη που ανατέθηκε από το έργο ανέλυσε πέντε υποψήφια αρωματικά κατάλληλα για ένα δίκτυο αερίου υδρογόνου 100%. Από αυτά, το αρωματικό NB (που περιλαμβάνει 78% 2-μεθυλοπροπανοθειόλη και 22% διμεθυλοσουλφίδιο) κρίθηκε κατάλληλο. Το NB παρέχει μια χαρακτηριστική μυρωδιά διαρροής αερίου και ενώ δεν φαίνεται να προκαλεί φθορά στον

αγωγό ή σε συσκευές τελικής χρήσης. Ωστόσο, υπάρχουν ανησυχίες ότι μπορεί να χρειαστεί ένα πρόσθετο βήμα καθαρισμού για την αποφυγή βλαβών στις κυψέλες καυσίμου που προκαλούνται από το αρωματικό. Η καταλληλότητα ενός αρωματικού λαμβάνει επίσης υπόψη τον αντίκτυπό του στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον. Στο έργο Hy4Heat αναφέρεται πως όλα τα αρωματικά αξιολογήθηκαν χρησιμοποιώντας τις οδηγίες του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Χημικών Προϊόντων (ECHA). Τα αρωματικά θεωρήθηκαν κατάλληλα για τη χρήση, είτε επειδή δεν πληρούσαν τα πρότυπα τοξικότητας του ECHA είτε επειδή, όταν αραιώθηκαν σε ρεύμα μίγματος υδρογόνου-φυσικού αερίου, θέτουν αμελητέους κινδύνους για την υγεία ή το περιβάλλον. Ωστόσο, η έκθεση τονίζει ότι όλα τα αρωματικά πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή όταν βρίσκονται σε καθαρή μορφή, όπως κατά τη διάρκεια της έγχυσης σε αγωγό αερίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Αποθήκευση υδρογόνου

4.1 Χαρακτηριστικά αποθήκευσης υδρογόνου

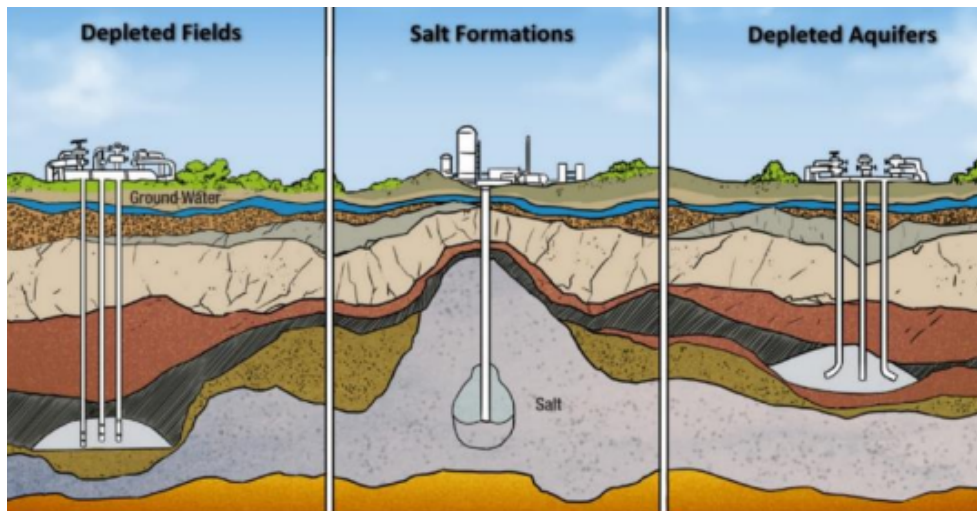
Σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας περιβάλλοντος ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $P=0.987\text{ atm}$), το υδρογόνο βρίσκεται υπό μορφή αερίου. Σαν αέριο, χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλους όγκους για περιορισμένες ποσότητες μάζας του, γεγονός που οφείλεται στην πολύ χαμηλή του πυκνότητα. Είναι γνωστό, ότι 1 kg αερίου υδρογόνου, καταλαμβάνει όγκο ίσο με 11 m^3 περίπου, πολύ μεγάλο για να αξιοποιηθεί πρακτικά από τον άνθρωπο. Για τον λόγο αυτό, θα πρέπει να μειωθεί ο όγκος του υπό συγκεκριμένες συνθήκες, ουσιαστικά να αυξηθεί η πυκνότητά του. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση διαφόρων τεχνικών αποθήκευσής του σε κατάλληλες διατάξεις ή σε διάφορα υλικά. Η αύξηση της πυκνότητας της αέριας μάζας του (ή αντίστοιχα η μείωση του αερίου όγκου του), επιτυγχάνεται με τρεις διαφορετικούς τρόπους: είτε μέσω της αύξησης της πίεσης, είτε μέσω της μείωσης της θερμοκρασίας, είτε, τέλος, μέσω της μείωσης της άπωσης που ασκείται μεταξύ των μορίων του, κατά τη διοχέτευσή του σε διάφορα στερεά υλικά (μεταλλικά υδρίδια, νανοσωλήνες κ.τ.λ.). Ένα πολύ σημαντικό κριτήριο είναι κατά πόσο η διαδικασία της αποθήκευσης είναι αντιστρεπτή, δηλαδή κατά πόσο το αποθηκευμένο υδρογόνο δύναται να ανακτηθεί στη συνέχεια, κατά την φάση της κατανάλωσής του

Η αποθήκευση υδρογόνου είναι ζωτικής σημασίας και για την ανάπτυξη του πράσινου υδρογόνου και η καταλληλότητά του για αποθήκευση είναι πολύτιμη για όλο τον ενεργειακό κλάδο. Το υδρογόνο μπορεί να παρέχει εποχιακή αποθήκευση στο σύστημα ισχύος, μια υπηρεσία που παρέχεται σε περιορισμένο εύρος των τεχνολογιών. Επιπλέον, η αποθήκευση

υδρογόνου είναι απαραίτητη για τη διατήρηση σταθερής εισροής ενέργειας σε εφαρμογές αδιάλειπτης λειτουργίας (π.χ. χαλυβουργία). Οι μορφές αποθήκευσης υδρογόνου παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

4.2 Υπόγειες Δεξαμενές

Το υδρογόνο μπορεί να συμπιεστεί και να αποθηκευτεί ως αέριο υπό πίεση σε φιάλες, δεξαμενές ή υπόγεια σπήλαια, με πίεση έως και 700 bar. Ενδεικτικά, για κατανάλωση κάτω των 50 m³/h, διατηρείται σε αέρια μορφή σε φιάλες. Στα οχήματα με κυψέλες καυσίμου στις μεταφορές, το αέριο υδρογόνο αποθηκεύεται στα 700 bar. Δεδομένου ότι η ενεργειακή πυκνότητά του κατ' όγκο είναι χαμηλή, είναι απαραίτητο να συμπιέζεται σε πολύ υψηλές πιέσεις για να μειωθεί το μέγεθος της αποθήκευσής του. Η συμπίεση του αντιπροσωπεύει περίπου το 7% της θερμογόνου δύναμής του για να μεταβεί από το 1 στα 200 bar και 10% για να φτάσει στα 700 bar. Αποθηκεύοντας αέριο υδρογόνο υπόγεια, είναι συχνά δυνατόν να αποθηκευτεί πολύ μεγαλύτερος όγκος καθώς και να επιτευχθούν υψηλότερες πιέσεις από ό,τι επίγεια (Zivar, et al., 2020). Στα τέλη του 2016, υπήρχαν περίπου 672 εγκατεστημένες υπόγειες εγκαταστάσεις αποθήκευσης φυσικού αερίου παγκοσμίως, που συνολικά περιείχαν περίπου 424 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα φυσικού αερίου (Wolf, 2015). Στην Εικόνα 27, απεικονίζονται διάφοροι τύποι υπόγειων αποθηκευτικών χώρων, όπως κοιτάσματα φυσικού αερίου και πετρελαίου, υδροφόροι ορίζοντες, εγκαταλελειμμένα ορυχεία, πετρώματα και αλατοσπήλαια (Infrastructure, 2021). Τα τελευταία, τα σπήλαια άλατος, είναι γενικά η καλύτερη λύση για την αποθήκευση υδρογόνου και αυτό λόγω των παρακάτω ωφέλιμων ιδιοτήτων τους: 1) ταχείς ρυθμοί έγχυσης και άντλησης, 2) χαμηλά ποσοστά διαρροής, 3) χαμηλός κίνδυνος μόλυνσης του υδρογόνου, 4) χαμηλό κόστος κατασκευής μαξιλάρι. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι υπόγειες τεχνολογίες αποθήκευσης δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οπουδήποτε δεδομένου ότι οι κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες είναι δύσκολο να εντοπισθούν (Lemieux, et al., 2020). Οι επιλογές υπέργειας αποθήκευσης υδρογόνου μεγάλης κλίμακας είναι πολυάριθμες, αν και καμία από αυτές δεν είναι τέλεια και οι περισσότερες από αυτές απαιτούν περαιτέρω ανάπτυξη και τελειοποίηση προτού γίνουν οικονομικά βιώσιμες (Andersson, et al., 2019).



Εικόνα 27: Διαφορετικοί τύποι υπόγειας αποθήκευσης υδρογόνου (Infrastructure, 2021)

4.3 Αποθήκευση υδρογόνου σε στερεή μορφή: Μια ασφαλής και ευέλικτη επιλογή

Η διαδικασία της υδρογόνωσης, όπου το αέριο υδρογόνο αντιδρά με μέταλλα, οδηγεί στο σχηματισμό μεταλλικών υδριδίων (Andersson, et al., 2019). Αυτή η μέθοδος επιτρέπει την αποθήκευση υδρογόνου υψηλής πυκνότητας λόγω των χημικών δεσμών που σχηματίζονται μεταξύ των ατόμων μετάλλου και των μορίων υδρογόνου (Tarasov, et al., 2021). Αυτή η αποθήκευση σε στερεά κατάσταση θεωρείται ένας από τους ασφαλέστερους τρόπους αποθήκευσης υδρογόνου, που επιτυγχάνεται μέσω φυσικών ή χημικών διαδικασιών απορρόφησης.

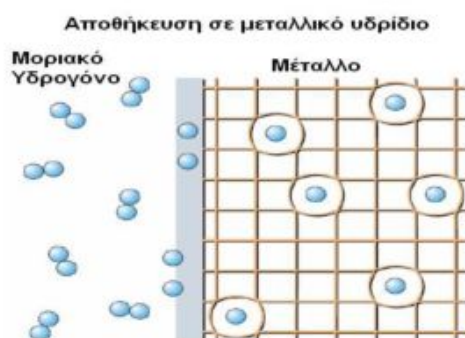
Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα της αποθήκευσης σε στερεά κατάσταση είναι η αντιστρεψιμότητά της, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για να καταστεί η διαδικασία αποθήκευσης οικονομικά βιώσιμη. Επιπλέον, απλοποιεί τη μεταφορά και τη θερμική διαχείριση του υδρογόνου κατά τις διαδικασίες απορρόφησης και εκρόφησης (Moradi, et al., 2019).

Υπάρχουν πολλές μεταλλικές επιλογές για αποθήκευση υδρογόνου, με το μαγνήσιο να είναι μια εξέχουσα επιλογή. Ξεχωρίζει λόγω της ευρείας διαθεσιμότητάς του σε χαμηλό κόστος, της μακροπρόθεσμης χωρητικότητας αποθήκευσης περίπου 7,6% κατά βάρος και της υψηλής αντιστρεψιμότητας (Sun, et al., 2018). Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι ορισμένα μεταλλικά υδρίδια θέτουν προκλήσεις λόγω του βάρους τους και της απαιτούμενης θερμικής διαχείρισης για την απορρόφηση και εκρόφηση υδρογόνου.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα προσέγγιση για την ενίσχυση της πυκνότητας αποθήκευσης περιλαμβάνει τη χημική σύνδεση υδρογόνου σε φορείς υδρογόνου, όπως η αμμωνία, η

μεθανόλη και το μυρμηκικό οξύ. Αυτοί οι φορείς είναι συνήθως σε υγρή μορφή, απλοποιώντας τόσο την υποδομή αποθήκευσης όσο και τις σχετικές διαδικασίες. Η μεθανόλη και η αμμωνία είναι δύο από τους πιο ευρέως χρησιμοποιούμενους χημικούς φορείς υδρογόνου. Η μεθανόλη διαθέτει ικανότητα αποθήκευσης περίπου 12,5% κατά βάρος, ενώ η αμμωνία μπορεί να φτάσει περίπου το 17,7% κατά βάρος (Andersson, et al., 2019). Και τα δύο μπορούν να παραχθούν μέσω της σύνθεσης φυσικού αερίου, αν και έχουν προκύψει και νεότερες, φιλικές προς το περιβάλλον προσεγγίσεις που βασίζονται στην ηλεκτρόλυση νερού.

Συμπερασματικά, η αποθήκευση υδρογόνου σε στερεά κατάσταση μέσω υδριδίων μετάλλων και χημικών φορέων υδρογόνου σε υγρή μορφή παρουσιάζει ευέλικτες και ασφαλείς επιλογές για την αντιμετώπιση των προκλήσεων αποθήκευσης υδρογόνου. Αυτές οι μέθοδοι προσφέρουν υψηλές πυκνότητες αποθήκευσης, αναστρεψιμότητα και δυνατότητες βιώσιμης παραγωγής, καθιστώντας τις κατάλληλες για διάφορες εφαρμογές στην εξελισσόμενη οικονομία υδρογόνου.



Εικόνα 28: Κατανομή ατόμων υδρογόνου μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα ενός μετάλλου, κατά την απορρόφηση τους από αυτό (sciencenews.gr)

4.4 Αποθήκευση Υδρογόνου σε Υγρή Μορφή

Η αποθήκευση υδρογόνου σε υγρή κατάσταση είναι μια άλλη μέθοδος για την αύξηση της πυκνότητάς του, καθώς το υγρό υδρογόνο έχει πυκνότητα περίπου 70 kg/m^3 (Godula-Jorek, et al., 2012). Αυτή η τεχνική αποθήκευσης απαιτεί σημαντικές ποσότητες ενέργειας κατά τη διαδικασία ψύξης, καθώς το υδρογόνο έχει πολύ χαμηλό σημείο βρασμού (Κανονικό σημείο βρασμού : -253°C) . Απαιτείται επίσης δεξαμενή με μόνωση κενού που από άποψη τεχνολογικής εφαρμογής θεωρείται μία περίπλοκη κατασκευή. Ωστόσο, αυτή η τεχνική έχει

καθιερωθεί και εφαρμοσθεί εκτεταμένα, είναι σημαντικό όμως να σημειωθεί ότι η αποθήκευση υδρογόνου σε υγρή μορφή δεν είναι οικονομικά εφικτή για μακροχρόνια αποθήκευση λόγω της σταδιακής μείωσης του όγκου που προκύπτει από το σταδιακό βρασμό που παρατηρείται (Zhang, et al., 2021). Στην πραγματικότητα, η δεξαμενή αποθήκευσης απορροφά θερμότητα, προκαλώντας την εξάτμιση του υγρού υδρογόνου, το οποίο πρέπει να εκτονωθεί για να αποφευχθεί η υπερπίεση στις δεξαμενές, οδηγώντας τελικά σε απώλεια περιεχομένου.

Επί του παρόντος, υπάρχουν δύο κύριες επιλογές αποθήκευσης υδρογόνου σε υγρή κατάσταση: δεξαμενές και υπόγειοι γεωλογικοί σχηματισμοί. Δεξαμενές διαφόρων μεγεθών και πιέσεων χρησιμοποιούνται ήδη στη βιομηχανία. Είναι πιο κατάλληλες για μικρούς όγκους (έως περίπου 10.000 m³), για συχνή χρήση (καθημερινά) και σε υψηλές πιέσεις (περίπου 1000 bar). Από την άλλη πλευρά, η υπόγεια αποθήκευση είναι εφικτή σε διάφορους τύπους δεξαμενών, αλλά η πιο πρακτική επιλογή μέχρι σήμερα είναι τα σπήλαια αλατιού, τα οποία χρησιμοποιούνται επίσης για την αποθήκευση ορυκτών αερίων. Η υπόγεια αποθήκευση είναι κατάλληλη για μεγάλους όγκους, για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα (εβδομάδες έως μήνες) και σε χαμηλότερες πιέσεις (50–250 bar).

Τα σπήλαια αλατιού είναι διαδεδομένα σε όλο τον κόσμο, αλλά ορισμένες χώρες έχουν περιορισμένη χωρητικότητα. Για παράδειγμα, η Ασία-Ειρηνικός, η Νότια Αμερική, η Νότια Ευρώπη και η δυτική ακτή της Βόρειας Αμερικής έχουν λίγα σπήλαια αλατιού. Τα σπήλαια αλατιού που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για αποθήκευση υδρογόνου βρίσκονται μόνο σε δύο χώρες, τις Ηνωμένες Πολιτείες και το Ηνωμένο Βασίλειο. Η συνολική ισχύς σε χρήση ανήλθε σε περίπου 250 γιγαβατώρες (GWh) το 2019 (Blanco, et al., 2018) (Caglayan, et al., 2019). Μέχρι το 2021, αυτή η δυναμικότητα είχε αυξηθεί σε 512 GWh, όπως αναφέρεται στον Πίνακα 6 του IEA (Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας) (IEA, 2021).

Πίνακας 6: Υφιστάμενες εγκαταστάσεις αποθήκευσης υδρογόνου και μελλοντικά έργα όπως καταγράφονται στην ιστοσελίδα της IEA (IEA, 2021)

Name	Country	Project start year	Operator/ developer	Working storage (GWh)	Type	Status
Teeside	United Kingdom	1972	Sabic	27	Salt cavern	Operational
Clemens Dome	United States	1983	Conoco Philips	82	Salt cavern	Operational
Moss Bluff	United States	2007	Praxair	125	Salt cavern	Operational
Spindletop	United States	2016	Air Liquide	278	Salt cavern	Operational
Underground Sun Storage	Austria	2018	RAG	10% H ₂ blend	Depleted field	Demo
HyChico	Argentina	2016	HyChico, BRGM	10% H ₂ blend	Depleted field	Demo
HyStock	The Netherlands	2021	EnergyStock	-	Salt cavern	Pilot
HYBRIT	Sweden	2022	Vattenfall SSAB, LKAB	-	Rock cavern	Pilot
Rüdersdorf	Germany	2022	EWE	0.2	Salt cavern	Under construction
HyPster	France	2023	Storengy	0.07-1.5	Salt cavern	Engineering study
HyGéo	France	2024	HDF, Teréga	1.5	Salt cavern	Feasibility study
HySecure	United Kingdom	mid-2020s	Storengy, Inovent	40	Salt cavern	Phase 1 feasibility study
Energiepark Bad Lauchstädt Storage	Germany	-	Uniper, VNG ONTRAS, DBI Terrawatt	150	Salt cavern	Feasibility study
Advanced Clean Energy Storage	United States	mid-2020s	Mitsubishi Power Americas Magnum Development	150	Salt cavern	Proposed

4.5 Σημασία αποθήκευσης υδρογόνου – φυσικού αερίου

Η υπόγεια αποθήκευση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην εξασφάλιση εφεδρικής χωρητικότητας φυσικού αερίου. Από το 2013, υπήρχαν 688 λειτουργικές υπόγειες εγκαταστάσεις αποθήκευσης παγκοσμίως, με συνολική ικανότητα αποθήκευσης αερίου 377 δισεκατομμυρίων κυβικών μέτρων (Judd, et al., 2016). Συγκεκριμένα, οι Ηνωμένες Πολιτείες και ο Καναδάς κατείχαν τη μερίδα του λέοντος, αντιπροσωπεύοντας το 40% αυτής της χωρητικότητας, με 414 και 59 χώρους αποθήκευσης, αντίστοιχα. Ο συνδυασμός των υπόγειων εγκαταστάσεων αποθήκευσης με έγχυση υδρογόνου στο φυσικό αέριο έχει ζωτικές επιπτώσεις για τα έργα ανάμειξης υδρογόνου στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής. Κατά την αξιολόγηση της καταλληλότητας ενός χώρου για αποθήκευση αερίου με έγχυση υδρογόνου, οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι:

- Χωρητικότητα αποθήκευσης: Πρέπει να αξιολογηθεί πώς η έγχυση υδρογόνου επηρεάζει τη συνολική ικανότητα αποθήκευσης αυτών των εγκαταστάσεων.
- Επιπτώσεις στην υποδομή: Αξιολόγηση της επίδρασης στην ακεραιότητα του μετάλλου και του σκυροδέματος σε διάφορα σημεία του φρεατίου λόγω διάχυσης υδρογόνου.
- Δραστηκότητα ορυκτών: Αξιολόγηση της πιθανής αντιδραστικότητας του υδρογόνου με ορυκτά στο υπέδαφος, η οποία θα μπορούσε να επηρεάσει την ασφάλεια αποθήκευσης.

- Μικροβιακή επίδραση: Εξέταση της παρουσίας μικροοργανισμών, οι οποίοι μπορεί να αντιδράσουν με το υδρογόνο και να οδηγήσουν δυνητικά στην κατανάλωση του.
- Κόστος έρευνας και ανάπτυξης: Διερεύνηση των οικονομικών πτυχών που σχετίζονται με την έρευνα και την ανάπτυξη νέων τόπων αποθήκευσης υδρογόνου.

Η γεωλογική αποθήκευση περιλαμβάνει τέσσερις κύριους τύπους: σπήλαια αλατιού, σπήλαια σκληρών πετρωμάτων, εξαντλημένες δεξαμενές πετρελαίου και αερίου και υδροφορείς (Lord, et al., 2014) (Shi, et al., 2020). Το 2013, το 74% των παγκόσμιων γεωλογικών αποθηκευτικών χώρων βρίσκονταν σε εξαντλημένους ταμειυτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου και ειδικά στη Βόρεια Αμερική, το 90% των τοποθεσιών αποθήκευσης ήταν πορώδεις δεξαμενές. Αυτές οι πορώδεις δεξαμενές περιλαμβάνουν τόσο εξαντλημένες δεξαμενές πετρελαίου και φυσικού αερίου όσο και υδροφορείς (Judd, et al., 2016).

Κάθε τύπος αποθήκευσης έχει τα διακριτά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα όσον αφορά την αποθήκευση υδρογόνου. Είτε αποθηκεύεται καθαρό υδρογόνο είτε μείγματα υδρογόνου-φυσικού αερίου, εκτενής αναφορές έχουν περιγράψει τα χαρακτηριστικά αποθήκευσης.

4.6 Προκλήσεις στην υπόγεια αποθήκευση υδρογόνου

Ανεξάρτητα από τη μέθοδο αποθήκευσης, πρέπει να αντιμετωπιστούν αρκετές κοινές προκλήσεις. Κατά την αξιολόγηση της καταλληλότητας ενός χώρου για αποθήκευση αερίου με έγχυση υδρογόνου, οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι:

- Βραχώδης σφράγιση (Caprock): Η διασφάλιση της ικανότητας σφράγισης σε βραχώδη πετρώματα είναι εξαιρετικά σημαντική (Zivar, και συν., 2020). Η υψηλή ικανότητα διάχυσης του υδρογόνου μπορεί να δημιουργήσει δυσκολίες προκαλώντας πιθανή διάχυση του υδρογόνου στο πέτρωμα (Reitenbach, et al., 2015). Επιπλέον, η χαμηλότερη ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα του υδρογόνου σημαίνει ότι η έγχυση υδρογόνου θα μειώσει τη συνολική χωρητικότητα αποθήκευσης.
- Συμβατότητα εξοπλισμού: Η υψηλή διαχυτότητα και το χαμηλό ιξώδες του υδρογόνου μπορεί να οδηγήσουν σε διαρροή μέσω του εξοπλισμού των φρεατίων. Επιπλέον, η ευθραυστότητα του υδρογόνου θα μπορούσε να επηρεάσει μεταλλικά εξαρτήματα όπως σωλήνες, περιβλήματα κ.α. (Shi, και συν., 2020) (Reitenbach, και συν., 2015). Κατά συνέπεια, τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του

φρεατίου πρέπει να αξιολογούνται αυστηρά ως προς τη συμβατότητά τους με το υδρογόνο.

- **Μικροβιακή Δραστηριότητα:** Η παρουσία μικροοργανισμών στο υπέδαφος μπορεί δυνητικά να οδηγήσει σε χημικές αντιδράσεις και απώλεια υδρογόνου. Αυτό το φαινόμενο είναι πιο πιθανό σε εξαντλημένους ταμιευτήρες πετρελαίου, αερίου και υδροφορείς (Judd, και συν., 2016). Η μικροβιακή ανάπτυξη σε πορώδη βράχο μπορεί να αλλάξει το μέγεθος των πόρων, να αυξήσει τη τριχοειδή διαδρομή ροής, να μειώσει τη διαπερατότητα και τελικά να μειώσει την ικανότητα αποθήκευσης υδρογόνου (Thaysen, et al., 2021).
- **Περιβαλλοντικοί Παράγοντες:** Διάφοροι περιβαλλοντικοί παράγοντες επηρεάζουν την ανάπτυξη μικροβίων και την κατανάλωση υδρογόνου κάτω από την επιφάνεια, συμπεριλαμβανομένης της θερμοκρασίας, της αλατότητας, του pH, της πίεσης και της παρουσίας θρεπτικών ουσιών (Thaysen, et al., 2021). Η θερμοκρασία και η αλατότητα είναι ιδιαίτερα κρίσιμες για τον περιορισμό της ανάπτυξης μικροοργανισμών όπως ομοακετογόνων, μεθανογόνων και θειικών αναγωγών.
- **Επιλογή τοποθεσίας:** Η επιλογή κατάλληλων υδροφορέων και εξαντλημένων κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου με ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας και αλατότητας αφιλόξενες για τη μικροβιακή ανάπτυξη μπορεί να μετριάσει τα προβλήματα κατανάλωσης και μετατροπής υδρογόνου. Οι Thaysen et al. υποδεικνύουν ότι τοποθεσίες με ιδανικές συνθήκες για ανάπτυξη μπορεί να παρουσιάσουν απώλειες υδρογόνου μεταξύ 2%-4%. Ως εκ τούτου, η προσεκτική επιτόπια έρευνα και έλεγχος για μικροβιακή ανάπτυξη πριν από την ανάπτυξη ή την έγχυση υδρογόνου είναι ζωτικής σημασίας (Thaysen, και συν., 2021).
- **Λειτουργικό κόστος:** Η εξέταση της επιλογής τοποθεσίας και ο αντίκτυπος των τροποποιήσεων στο λειτουργικό κόστος είναι απαραίτητη (Thaysen, και συν., 2021).

Όσον αφορά τα σπήλαια αλατιού, ενώ μπορεί να συμβαίνουν μικροβιακές αλληλεπιδράσεις στο νερό της άλμης μέσα στις δεξαμενές τους, η υψηλή αλατότητα συνήθως αποτρέπει τη σημαντική κατανάλωση υδρογόνου και άλλους μετασχηματισμούς, καθιστώντας τα σπήλαια αλατιού έναν από τους πιο αδρανείς τύπους υπόγειας αποθήκευσης (Aftab, και συν., 2022). Σε όλους τους υπόγειους τύπους αποθήκευσης, η παρουσία νερού αποτελεί πρόκληση. Η επίτευξη 100% ανάκτησης άλμης σε σπήλαια αλατιού είναι δύσκολη, επίσης μπορεί να υπάρχει νερό σε υπολειμματικό πετρέλαιο σε εξαντλημένες δεξαμενές πετρελαίου και αερίου ή εγγενές στους υδροφόρους ορίζοντες. Μέρος αυτού του νερού μπορεί να

εξατμιστεί και να αναμιχθεί με το υδρογόνο, προσθέτοντας στο κόστος με την εφαρμογή διαδικασίας αφυδάτωσης αερίου σε εγκαταστάσεις στην επιφάνεια (Aftab, και συν., 2022). Αυτές οι προκλήσεις υπογραμμίζουν την πολυπλοκότητα της αποθήκευσης υδρογόνου και την ανάγκη για μια ολοκληρωμένη κατανόηση των συγκεκριμένων παραγόντων για το σχεδιασμό και τη λειτουργία αποτελεσματικών συστημάτων αποθήκευσης υδρογόνου.

4.7 Εξαντλημένες δεξαμενές πετρελαίου - φυσικού αερίου και υδροφορείς

Οι πορώδεις ταμειυτήρες, συμπεριλαμβανομένων των εξαντλημένων δεξαμενών πετρελαίου, φυσικού αερίου και των υδροφορέων, αποτελούν την πλειοψηφία των υπαρχόντων υπόγειων χώρων αποθήκευσης αερίου. Οι εξαντλημένες δεξαμενές πετρελαίου και φυσικού αερίου προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα:

- Μεγάλοι όγκοι αποθήκευσης: Αυτές οι δεξαμενές παρέχουν σημαντική χωρητικότητα αποθήκευσης σε σύγκριση με άλλες επιλογές.
- Καλά καθορισμένα γεωλογικά χαρακτηριστικά: Οι εξαντλημένες δεξαμενές πετρελαίου και φυσικού αερίου έχουν σαφώς καθορισμένα γεωλογικά χαρακτηριστικά λόγω προηγούμενων ερευνών για εξόρυξη πετρελαίου ή/και φυσικού αερίου.
- Αποδεδειγμένη ικανότητα παγίδευσης αερίου: Αυτές οι δεξαμενές έχουν αποδείξει την ικανότητά τους να παγιδεύουν αέρια, έχοντας αποθηκεύσει πετρέλαιο ή/και φυσικό αέριο κατά τη διάρκεια πάρα πολύ μεγάλων περιόδων (Lord, και συν., 2014) (Aftab, και συν., 2022).

Ωστόσο, η αποθήκευση υδρογόνου σε εξαντλημένες δεξαμενές πετρελαίου και αερίου παρουσιάζει ορισμένες προκλήσεις:

- Υπολειμματικοί υδρογονάνθρακες: Η πιθανότητα οι υπολειμματικοί υδρογονάνθρακες να επηρεάσουν την καθαρότητα του υδρογόνου κατά την απόσυρση είναι ανησυχητική, ειδικά για την αποθήκευση καθαρού υδρογόνου.
- Δραστικότητα με ορυκτά: Το υδρογόνο μπορεί να αντιδράσει με ορυκτά υπόγεια, ιδιαίτερα παρουσία μικροοργανισμών (Aftab, και συν., 2022).

Η επίδραση των ακαθαρσιών που σχετίζονται με το υπολειμματικό λάδι και αέρια εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της σύνθεσης των υπολειμματικών αερίων, των απαιτήσεων καθαρότητας για την προβλεπόμενη εφαρμογή και του κόστους επίτευξης της απαραίτητης καθαρότητας. Για παράδειγμα, το υπολειμματικό μεθάνιο μπορεί

να μην είναι προβληματικό για εφαρμογές καύσης που χρησιμοποιούν επί του παρόντος αποθηκευμένο φυσικό αέριο που στοχεύει λιγότερο από 100% υδρογόνο. Ωστόσο, εφαρμογές που απαιτούν 100% υδρογόνο, όπως οι κυψέλες καυσίμου PEM, θα χρειαστούν πρόσθετο καθαρισμό εάν υπάρχουν υπολειμματικά αέρια.

Οι εξαντλημένες δεξαμενές πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι γενικά πιο εύκολο να αναπτυχθούν και να διατηρηθούν λόγω της υπάρχουσας υποδομής (Lord, και συν., 2014). Αντίθετα, οι υδροφόροι ορίζοντες τείνουν να είναι πιο ακριβοί στην ανάπτυξη λόγω της γεωλογικής αβεβαιότητας και της ανάγκης για εκτεταμένες ερευνητικές δραστηριότητες για τη διασφάλιση των δυνατοτήτων σφράγισης της δεξαμενής (Lord, και συν., 2014) (Aftab, και συν., 2022). Επιπλέον, οι υδροφόροι ορίζοντες συχνά απαιτούν υψηλότερες απαιτήσεις σε αέριο απόσβεσης σε σύγκριση με τις δεξαμενές αερίου που έχουν εξαντληθεί, επειδή δεν διαθέτουν υπολειμματικά αέρια που μπορούν να αντισταθμίσουν τις συνολικές απαιτήσεις όγκου. Ενώ οι εξαντλημένες δεξαμενές αερίου μπορεί να απαιτούν περίπου 50% αέριο απόσβεσης, οι υδροφορείς μπορεί να απαιτούν έως και 80% (Lord, και συν., 2014)

4.8 Σπήλαια αλάτων

Τα σπήλαια αλατιού δημιουργούνται μέσω της εξόρυξης διαλύματος, μια διαδικασία που περιλαμβάνει τη διάλυση μεγάλων κοιλοτήτων μέσα σε θόλους αλατιού ή επιστρωμένα αποθέματα αλατιού με έγχυση γλυκού νερού (Lord, και συν., 2014). Το αλάτι που περιβάλλει αυτά τα σπήλαια είναι σχεδόν αδιαπέραστο, καθιστώντας τα σπήλαια αλατιού εξαιρετικά ανθεκτικά στη μεταφορά αερίων (Lord, και συν., 2014) (Aftab, και συν., 2022) (Paradias, et al., 2021). Επιπλέον, το περιβάλλον υψηλής αλατότητας εντός των σπηλαίων αλατιού μειώνει την πιθανότητα μετατροπής υδρογόνου από μικροοργανισμούς (Aftab, et al., 2022) (Panfilov, 2016).

Τα σπήλαια αλατιού θεωρούνται γενικά αδρανείς και ασφαλείς επιλογές αποθήκευσης (Aftab, et al., 2022). Η κύρια οδός για πιθανή διαρροή ή απώλεια υδρογόνου είναι μέσω του φρεατίου (Lord, et al., 2014). Αυτά τα σπήλαια προσφέρουν πολύ υψηλή απόδοση αποθήκευσης, συνήθως γύρω στο 98%, και παρουσιάζουν χαμηλό κίνδυνο μόλυνσης λόγω της περιορισμένης παρουσίας μικροοργανισμών και της απουσίας υπολειμματικών υδρογονανθράκων που συνήθως βρίσκονται σε εξαντλημένες δεξαμενές πετρελαίου και αερίου (IEA, 2021).

Η αποθήκευση υδρογόνου σε σπήλαια αλατιού είναι μια καθιερωμένη τεχνολογία. Από το 2016, υπήρχαν τρεις τέτοιες εγκαταστάσεις στο Τέξας, μία στο Ηνωμένο Βασίλειο και δύο στη Γερμανία (Panfilov, 2016). Η βιομηχανία χημικής επεξεργασίας χρησιμοποιεί σπήλαια

αλατιού για αποθήκευση υδρογόνου στο Ηνωμένο Βασίλειο από τη δεκαετία του 1970 και στις Ηνωμένες Πολιτείες από τη δεκαετία του 1980 (Paradias, et al., 2021). Τα σπήλαια αλατιού είναι από τις πιο οικονομικές μορφές αποθήκευσης υδρογόνου, ικανές να επιτύχουν το εγκατεστημένο κόστος κεφαλαίου περίπου \$20 ανά κιλό όταν τα σπήλαια είναι αρκετά μεγάλα (Paradias, et al., 2021).

Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις που σχετίζονται με την αποθήκευση στο σπήλαιο αλατιού:

- Περιορισμένο μέγεθος και χωρητικότητα: Τα σπήλαια αλατιού έχουν συνήθως μικρότερο μέγεθος και χωρητικότητα αποθήκευσης σε σύγκριση με τις εξαντλημένες δεξαμενές πετρελαίου και αερίου (Aftab et al. 2022).
- Γεωγραφική Διαθεσιμότητα: Τα σπήλαια αλατιού είναι γεωγραφικά περιορισμένα, με τα περισσότερα να βρίσκονται σε περιοχές όπως αυτές των ΗΠΑ: Ακτή του Κόλπου (Τέξας, Λουιζιάνα, Μισισιπή και Αλαμπάμα), οι κεντρικές πεδιάδες (Οκλαχόμα, Κάνσας, Νεμπράσκα, Βόρεια Ντακότα και ανατολική Μοντάνα) και Midwest and Northeast (Μίσιγκαν, Οχάιο, Πενσυλβάνια, Δυτική Βιρτζίνια και Νέα Υόρκη) (Lord, και συν., 2014) (Paradias, και συν., 2021).
- Παραλλαγές κόστους: Το συνολικό κόστος κεφαλαίου αποθήκευσης μπορεί να ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με το μέγεθος και την τοποθεσία του σπηλαίου.

Τα σπήλαια αλατιού έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση μιγμάτων υδρογόνου και φυσικού αερίου ή καθαρού υδρογόνου. Μπορούν να χρησιμεύσουν ως ρυθμιστικό για να επιτρέψουν τη σταθερή έγχυση υδρογόνου στους αγωγούς φυσικού αερίου (IEA 2019).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Τεχνοοικονομικές προκλήσεις ανάμειξης υδρογόνου-φυσικού αερίου

5.1 Τεχνοοικονομικές μελέτες ανάμειξης Υδρογόνου σε αγωγούς φυσικού Αερίου

Αρκετές μελέτες έχουν αναλάβει το έργο της αξιολόγησης των οικονομικών πτυχών της ενσωμάτωσης υδρογόνου σε υπάρχοντα συστήματα αγωγών φυσικού αερίου. Αυτές οι μελέτες παρουσιάζουν σημαντική ποικιλομορφία ως προς το εύρος και τους στόχους τους. Συγκεκριμένα, το εύρος των χαρακτηριστικών τους μπορεί να περιλαμβάνει:

- Φυσική Μοντελοποίηση Δικτύων Αγωγών Φυσικού Αερίου: Ορισμένες μελέτες εμβαθύνουν στη φυσική μοντελοποίηση της υποδομής του αγωγού φυσικού αερίου.
- Φυσική μοντελοποίηση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας: Άλλοι επεκτείνουν την ανάλυσή τους για να συμπεριλάβουν τη φυσική μοντελοποίηση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, αναγνωρίζοντας τη διασυνδεδεμένη φύση των ενεργειακών συστημάτων.
- Τεχνοοικονομική Μοντελοποίηση Τεχνολογιών Παραγωγής Υδρογόνου: Ορισμένες μελέτες εμβαθύνουν στην τεχνοοικονομική μοντελοποίηση για την αξιολόγηση των τεχνολογιών παραγωγής υδρογόνου. Αυτές οι αξιολογήσεις συχνά περιλαμβάνουν τεχνολογίες όπως η ηλεκτρόλυση, οι οποίες είναι καθοριστικές στη διαδικασία ανάμειξης υδρογόνου.
- Τεχνο-οικονομική μοντελοποίηση αναβαθμίσεων αγωγών: Μια άλλη πτυχή αυτών των ερευνών περιλαμβάνει την τεχνοοικονομική μοντελοποίηση για την εκτίμηση των δαπανών που σχετίζονται με την αναβάθμιση του δικτύου αγωγών φυσικού αερίου, καθιστώντας το συμβατό με διάφορες αναλογίες υδρογόνου.

Αυτές οι δημοσιεύσεις γενικά εμπίπτουν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, καθεμία από τις οποίες επικεντρώνεται σε ξεχωριστές πτυχές της διαδικασίας ανάμειξης υδρογόνου:

1. Ενίσχυση της ολοκλήρωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της μείωσης των εκπομπών: Η πρώτη κατηγορία επικεντρώνεται στα οικονομικά οφέλη από τη χρήση της ανάμειξης υδρογόνου ως μέσου για την ενίσχυση της ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό τοπίο, ενώ ταυτόχρονα περιορίζονται οι εκπομπές.
2. Κόστος που σχετίζεται με αναβαθμίσεις αγωγών: Η δεύτερη κατηγορία μελετών ασχολείται κυρίως με την ποσοτικοποίηση του κόστους που συνδέεται με την αναβάθμιση των αγωγών φυσικού αερίου για την υποδοχή ποικίλων ποσοτήτων υδρογόνου.

Αυτές οι έρευνες παρέχουν συλλογικά πολύτιμες γνώσεις για τις τεχνοοικονομικές πτυχές της ανάμειξης υδρογόνου σε αγωγούς φυσικού αερίου, συμβάλλοντας σε μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση της οικονομικής βιωσιμότητας και των περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων αυτής της προσέγγισης. Στις επόμενες παραγράφους επιχειρείται μία συνοπτική παρουσίαση αναφορών σχετικά με τα τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά της ανάμειξης υδρογόνου σε αγωγούς φυσικού αερίου.

5.2 Οικονομικά χαρακτηριστικά της ανάμειξης υδρογόνου

Πολυάριθμες μελέτες έχουν εμβαθύνει στα οικονομικά χαρακτηριστικά της χρήσης αγωγών φυσικού αερίου ως μέσου για την απορρόφηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, προσπαθώντας να ποσοτικοποιήσουν τη περιεκτικότητα υδρογόνου που μπορεί να αναμειχθεί. Αυτές οι έρευνες λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως η ζήτηση, οι διαθέσιμοι ανανεώσιμοι πόροι και τα όρια ανάμειξης. Συχνά υποθέτουν ότι θα απαιτηθούν ελάχιστες ή καθόλου τροποποιήσεις στην υποδομή κατά την εφαρμογή χαμηλών αναλογιών ανάμειξης. Οι Qadrdan, Abeysekera, et al. (2015), για παράδειγμα, εξέτασαν τη δυνατότητα ενσωμάτωσης ηλεκτρολυτών στο δίκτυο φυσικού αερίου του Ηνωμένου Βασιλείου για να επιτρέπεται αποτελεσματικά η έγχυση υδρογόνου. Βελτιστοποιώντας το συνδυασμένο μοντέλο των δικτύων φυσικού αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας της Μεγάλης Βρετανίας, στόχευσαν στον προσδιορισμό του ελάχιστου κόστους κάλυψης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου τόσο σε ημέρες χαμηλής όσο και υψηλής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, συνυπολογίζοντας όμως σημαντική παραγωγή αιολικής ενέργειας. Στη εργασία αυτή εξετάζονται τρία σενάρια ανάμειξης: ένα χωρίς υδρογόνο, ένα με έγχυση υδρογόνου με ανώτατο όριο το 5% κατ' όγκο και ένα με απεριόριστη ανάμειξη υδρογόνου, χωρίς ποσοτικό προσδιορισμό του πιθανού κόστους αναβάθμισης των αγωγών. Τα ευρήματά τους υποδεικνύουν ότι το σενάριο ορίου ανάμειξης 5% οδηγεί σε μείωση 1% του λειτουργικού κόστους και 0.7% μείωση των εκπομπών για περιπτώσεις χαμηλής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίθετα, το σενάριο απεριόριστης ανάμειξης επιτυγχάνει μείωση 7% στο λειτουργικό κόστος και 2% μείωση των εκπομπών. Ωστόσο, αυτές οι μέτριες μειώσεις εκπομπών αντισταθμίζονται από την χρήση πηγών υψηλότερου αποτυπώματος άνθρακα (π.χ. λιγνίτης) για την κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας τις ημέρες υψηλής ζήτησης (Qadrdan, et al., 2015).

Οι Qadrdan et al. (2017) ενισχύουν το προηγούμενο μοντέλο υιοθετώντας μια προσέγγιση κυλιόμενου προγραμματισμού, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς δέσμευσης μονάδων και συγκρίνοντας διάφορα μέσα παροχής ευελιξίας του δικτύου, όπως ευέλικτες εγκαταστάσεις αερίου, αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και ηλεκτρική ενέργεια προς αέριο (power to gas). Η ανάλυσή τους στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας τόσο των δικτύων αερίου όσο και των ηλεκτρικών δικτύων. Τα ευρήματά τους υπογραμμίζουν ότι όλες οι προσεγγίσεις ευελιξίας αυξάνουν τη συμβολή της αιολικής ενέργειας. Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει την πιο ουσιαστική αύξηση στην παραγωγή ενέργειας, ενώ η ηλεκτρική ενέργεια προς αέριο επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη διείσδυση της αιολικής ενέργειας. Όσον αφορά το λειτουργικό κόστος, η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας μειώνει περισσότερο το κόστος, κατά περίπου 1,5% το χειμώνα και

0,9% το καλοκαίρι, ενώ η ηλεκτρική ενέργεια προς αέριο (power to gas) μειώνει το κόστος κατά 0,3% το χειμώνα και 0,2% το καλοκαίρι (Qadrdan, et al., 2017).

Οι Timmerberg και Kaltschmitt (2019) διερευνούν το κόστος παραγωγής υδρογόνου στη Βόρεια Αφρική και τη μεταφορά του στην κεντρική Ευρώπη μέσω υφιστάμενων αγωγών που συνδέουν την Αλγερία και την Ισπανία, την Αλγερία και την Ιταλία και τη Λιβύη και την Ιταλία. Η μελέτη τους επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση του μεγέθους των εγκαταστάσεων αιολικής και ηλιακής ενέργειας καθώς και της ηλεκτρόλυσης, ποσοτικοποιώντας το δυναμικό παραγωγής υδρογόνου, το κόστος παραγωγής υδρογόνου και το κόστος μεταφοράς που σχετίζεται με την ανάμειξη υδρογόνου. Αποδεικνύουν ότι το κόστος μεταφοράς για το υδρογόνο είναι 2.6–3.6 φορές υψηλότερο από ό,τι για το φυσικό αέριο στα εξεταζόμενα σενάρια, αν και δεν λαμβάνουν υπόψη πιθανές δαπάνες που σχετίζονται με την τροποποίηση των υφιστάμενων γραμμών μεταφοράς φυσικού αερίου, όπως η αντικατάσταση σωλήνων (Timmerberg, et al., 2019).

Οι Pellegrini, Guzzini και Sacconi (2020) στοχεύουν στον προσδιορισμό του μέγιστου ορίου ανάμειξης πράσινου υδρογόνου που μπορεί να εγχυθεί στο ιταλικό δίκτυο φυσικού αερίου χωρίς να απαιτούνται τροποποιήσεις δικτύου ή να προκληθούν προβλήματα στους τελικούς χρήστες. Καθορίζουν μια προσέγγιση για την εκτίμηση αυτού του ορίου με βάση παράγοντες όπως το επιτρεπόμενο ποσοστό ανάμειξης, τη πυκνότητα υδρογόνου και φυσικού αερίου, τον ελάχιστο ρυθμό ροή φυσικού αερίου και παράγοντες ασφάλειας. (Pellegrini, et al., 2020)

Οι Clegg και Mancarella (2016) χρησιμοποιούν ένα ολοκληρωμένο μοντέλο δικτύου φυσικού αερίου και ηλεκτρικού ρεύματος για να αξιολογήσουν τα πλεονεκτήματα της ενέργειας προς αέριο (power to gas) εντός του δικτύου φυσικού αερίου της Μεγάλης Βρετανίας. Η ανάλυσή τους, που διενεργείται με βήματα μισής ώρας, προσδιορίζει τις βέλτιστες ροές ισχύος για το δίκτυο, μεγιστοποιεί τα οφέλη του συστήματος ενέργειας προς αέριο και εξετάζει διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και όρια ανάμειξης υδρογόνου. Διαπιστώνουν ότι η ηλεκτρική ενέργεια προς αέριο μπορεί να διευκολύνει μια πρόσθετη ενσωμάτωση 35.6 TWe/έτος παραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και μια μείωση 4% στο ετήσιο κόστος του φυσικού αερίου σε σενάρια με υψηλή διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ωστόσο, η αύξηση της περιεκτικότητας σε υδρογόνο στο δίκτυο μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη ικανότητα ροής στα άκρα του δικτύου λόγω αυξημένων πτώσεων πίεσης, ιδιαίτερα για υψηλότερα όρια περιεκτικότητας σε υδρογόνο (Clegg, et al., 2016).

5.3 Οικονομικά χαρακτηριστικά αναβάθμισης υφιστάμενων αγωγών φυσικού αερίου

Αρκετές οικονομικές μελέτες σχετικά με την ανάμειξη υδρογόνου χρησιμοποιούν με μια σταθερή μέγιστη αναλογία ανάμειξης, η οποία τυπικά κυμαίνεται από 5% έως 20% κατ' όγκο. Ορισμένες μελέτες σε αντιδιαστολή υποθέτουν ότι το υδρογόνο δεν μπορεί να εισαχθεί στους αγωγούς μεταφοράς λόγω παραγόντων όπως η υψηλή πίεση (Ma, et al., 2015) ή η ύπαρξη χάλυβα στις κατασκευές (Dodds, et al., 2013).

Ωστόσο, πολλές δημοσιεύσεις αναγνωρίζουν ότι το πραγματικό όριο εξαρτάται από συγκεκριμένες περαμέτρους (GRTgaz, et al., 2019) (Wang, et al., 2018), (Abeysekera, et al., 2016) (Timmerberg, et al., 2019). Σε αυτές τις εργασίες τονίζεται ότι τα δίκτυα αγωγών αποτελούνται από διάφορα εξαρτήματα, το καθένα με την αντίστοιχη ανοχή του στο υδρογόνο ανάλογα με τα υλικά και το σχεδιασμό. Σε αυτά περιλαμβάνονται οι αγωγοί μεταφοράς, οι σταθμοί συμπίεσης, οι σταθμοί μείωσης της πίεσης, οι δεξαμενές αποθήκευσης, οι πολλαπλές σωληνώσεις, οι βαλβίδες, άλλα εξαρτήματα και σταθμοί μετρήσεων (Menon, 2016).

Οι Cerniauskas et al. διερευνήσαν το πιθανό κόστος που σχετίζεται με την εκ νέου εκχώρηση αγωγών στο γερμανικό δίκτυο ώστε να λειτουργούν με 100% υδρογόνο, εστιάζοντας κυρίως στους αγωγούς μεταφοράς. Εξετάζουν διάφορες μεθόδους επανατοποθέτησης, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης αναστολέων για την πρόληψη της προσρόφησης υδρογόνου, της επικάλυψης αγωγών, της εγκατάστασης νέων αγωγών εντός των υπαρχόντων και της λειτουργίας αγωγών χωρίς ουσιαστικές τροποποιήσεις αλλά αυξημένη συντήρηση για την αντιμετώπιση της υποβάθμισης των υλικών. Οι αναστολείς που μελετήθηκαν περιλαμβάνουν το O₂, SO₂ και CO₂. Σημειώνουν ότι οι αναστολείς, ενώ απαιτούν ελάχιστες τροποποιήσεις του αγωγού, έχουν μειονεκτήματα όπως τοξικότητα, κινδύνους ασφάλειας και πιθανά πρόσθετα στάδια καθαρισμού στο σημείο της τελικής χρήσης. Η μελέτη συγκρίνει κυρίως αυτές τις επιλογές με τη μεταφορά αερίου και υγρού υδρογόνου μέσω οχημάτων (hydrogen trailers) και νεόδμητους αγωγούς υδρογόνου. Οι επιστρώσεις αγωγών και οι επιλογές σύνδεσης αγωγού με αγωγό εξετάζονται μόνο ποιοτικά, με την υπόθεση ότι αυτές οι μέθοδοι θα απαιτούσαν εκσκαφή αγωγού, καθιστώντας τις απαγορευτικά δαπανηρές. Οι συγγραφείς διαπιστώνουν ότι η χωρίς τροποποίηση αγωγού είναι 60% λιγότερο δαπανηρή λύση από την κατασκευή νέων αγωγών υδρογόνου για σωλήνες μεγάλης διαμέτρου. Αντίθετα, η χωρίς τροποποίηση χρήση αγωγών με αναστολείς αποδεικνύεται πιο δαπανηρή από την κατασκευή νέων αγωγών υδρογόνου. Ωστόσο, όταν πρόκειται για μικρούς αγωγούς, η χρήση αναστολέων οδηγεί σε παρόμοιες μειώσεις κόστους σε σύγκριση με τη χρήση αγωγών χωρίς τροποποίηση. Όσον αφορά τις οικονομικές

επιπτώσεις για εφαρμογή σε ολόκληρη τη χώρα, η χρήση των αγωγών χωρίς τροποποίηση θα μπορούσε να μειώσει το κόστος κατά 20%-60% σε σύγκριση με την κατασκευή νέων αγωγών υδρογόνου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι σωλήνες κατασκευασμένοι από X70 μπορεί να είναι κατάλληλοι για λειτουργία υδρογόνου λόγω της χαμηλής ευαισθησίας στην ανάπτυξη υποκρίσιμης ρωγμής που προκαλείται από το υδρογόνο και της ικανότητας μετριασμού της διάδοσης των ρωγμών κόπωσης. Ωστόσο, άλλες μελέτες έχουν βρει ότι το X70 είναι ευαίσθητο στην ευθραυστότητα υδρογόνου (Cerniauskas, et al., 2020).

Οι B. Wang et al. δίνουν έμφαση στην αξιολόγηση των ζητημάτων που προκύπτουν από την ανάμειξη υδρογόνου με αναφορά σε κατευθυντήριες γραμμές για το σχεδιασμό αγωγών καθαρού υδρογόνου. Χρησιμοποιούν το ASME B31.12-2014 για να αξιολογήσουν την καταλληλότητα των αγωγών φυσικού αερίου για τη μεταφορά διαφορετικών μιγμάτων υδρογόνου. Σημειώνουν ότι η κύρια διαφορά μεταξύ του σχεδιασμού του αγωγού υδρογόνου και του φυσικού αερίου είναι ο παράγοντας απόδοσης υλικού H_f , που εξηγεί τις δυσμενείς επιπτώσεις του υδρογόνου στους αγωγούς από ανθρακούχο χάλυβα. Παρέχουν τιμές H_f για διάφορες αντοχές διαρροής και πιέσεις σχεδιασμού σύμφωνα με το ASME B31.12-2014. Τονίζουν επίσης ότι ο συντελεστής σχεδιασμού F , που ποικίλλει ανάλογα με την κατηγορία τοποθεσίας με βάση παράγοντες όπως η εγγύτητα κτιρίου, διαφέρει μεταξύ υδρογόνου και φυσικού αερίου. Με αυτούς τους παράγοντες, οι υπάρχοντες αγωγοί μπορούν να αξιολογηθούν για να καθοριστεί εάν πληρούν τις απαιτήσεις ASME B31.12-2014 για αγωγούς υδρογόνου. Αυτοί που δεν το ικανοποιούν τις απαιτήσεις πρέπει είτε να αντικατασταθούν είτε να μειωθεί σε αποδεκτή τιμή η πίεση τους. Πολλές υπάρχουσες γραμμές μεταφοράς φυσικού αερίου στις ΗΠΑ λειτουργούν στο 72% ή κοντά στην καθορισμένη ελάχιστη ισχύ απόδοσης, απαιτώντας σημαντικές προσαρμογές για να ευθυγραμμιστούν με τους συντελεστές σχεδιασμού υδρογόνου 0.4–0.5 κατά ASME B31.12-2019. Η υποβάθμιση ή η αντικατάσταση σωλήνων έχει σημαντικές επιπτώσεις στα οικονομία του έργου (Wang, και συν., 2018)

Οι B. Wang et al. (2018) χρησιμοποίησαν τον κώδικα ASME B31.12 για να προσδιορίσουν τους αγωγούς που χρειάζονται αντικατάσταση, τη διάμετρο και το πάχος του τοιχώματος, τις πιθανές τοποθεσίες σταθμών συμπίεσης, τους ρυθμούς ροής, τις πιέσεις λειτουργίας και το συνολικό κόστος κατασκευής. Στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του συνολικού ετήσιου λειτουργικού κόστους, συμπεριλαμβανομένου του κόστους απόσβεσης των υποκατεστημένων αγωγών, των σταθμών συμπίεσης και των λειτουργικών εξόδων συμπίεστων. Οι περιορισμοί περιλαμβάνουν ροές αγωγών, πιέσεις, πτώσεις πίεσης, αντικαταστάσεις αγωγών, κατασκευή και λειτουργία σταθμών συμπίεσης. Η ανάλυσή τους

καλύπτει δύο περιπτώσιολογικές μελέτες: ένα δίκτυο αγωγών χωρίς διακλάδωση και ένα άλλο με δύο κλάδους. Εξετάζουν πώς οι ποικίλοι ρυθμοί έγχυσης υδρογόνου και οι παράγοντες σχεδιασμού επηρεάζουν τα οικονομικά της ανάμειξης. Για το δίκτυο χωρίς διακλάδωση, η ανάμειξη 5% υδρογόνου στο δίκτυο με συντελεστή σχεδιασμού 0.6 οδηγεί σε οριακή αύξηση του κόστους. Ωστόσο η ανάμειξη 10% υδρογόνου οδηγεί σε αύξηση του κόστους κατά 68% σε σύγκριση με το υπάρχον δίκτυο. Η ανάμειξη υδρογόνου 5% ή 10% σε ένα δίκτυο με συντελεστή σχεδιασμού 0.5 αυξάνει το συνολικό κόστος κατά 4.8% και 5%, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματά τους είναι παρόμοια για το σενάριο του δικτύου διακλαδώσεων. Συγκεκριμένα, η μελέτη δεν συγκρίνει αυτά τα αποτελέσματα με τα οικονομικά της κατασκευής νέων αποκλειστικών αγωγών υδρογόνου. Υποθέτει ότι η αναβάθμιση της υπάρχουσας υποδομής είναι πάντα πιο αποδοτική λόγω του χαμηλότερου συναφούς κόστους, όπως η απαλλοτρίωση γης και το κόστος επιτόπιας τοπογραφίας. Επιπλέον, το μοντέλο είναι ειδικό για δίκτυα μεταφοράς και δεν λαμβάνει υπόψη τα υλικά σωλήνων που χρησιμοποιούνται σε δίκτυα διανομής ή εξαρτήματα όπως βαλβίδες, σταθμούς ρύθμισης πίεσης ή σταθμούς μέτρησης.

Συνοπτικά, ενώ υπάρχει σημαντικό ενδιαφέρον για τη χρήση της ανάμειξης υδρογόνου για την αύξηση της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την απανθρακοποίηση τομέων που εξαρτώνται από το φυσικό αέριο, δεν υπάρχει απόλυτη συμφωνία σχετικά με την αναλογία μείγματος ή τα στοιχεία του δικτύου που μπορούν να δεχθούν χωρίς λειτουργικά προβλήματα το υδρογόνο. Ένα μοντέλο ανά περίπτωση προσαρμοσμένο σε συγκεκριμένα δίκτυα μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου θα ήταν πολύτιμο για την αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας της ανάμειξης υδρογόνου.

5.4 Επιτάχυνση της υποδομής υδρογόνου για την ενεργοποίηση πανευρωπαϊκών διαδρόμων εφοδιασμού και εισαγωγής έως το 2030

Το σχέδιο REPowerEU της Ευρωπαϊκής Επιτροπής έχει θέσει φιλόδοξους στόχους για την επίτευξη επιπλέον 15 εκατομμυρίων τόνων (Mt) παραγωγής υδρογόνου πέρα από τα 5,6 Mt που περιγράφονται στην πρωτοβουλία Fit for 55. Κατά συνέπεια, ο συνολικός αναμενόμενος όγκος υδρογόνου μέχρι το 2030 προβλέπεται να φθάσει τα 20,6 Mt. Αυτή η σημαντική αύξηση πιθανότατα θα περιλαμβάνει μια ποικιλία πηγών εφοδιασμού. Αυτές οι πηγές μπορεί να περιλαμβάνουν την ηλεκτρόλυση από την πλευρά της ζήτησης, την κεντρική παραγωγή υδρογόνου με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, την παραγωγή μπλε υδρογόνου μεγάλης κλίμακας, τις εισαγωγές από αγωγούς και την εισαγωγή παραγώγων υδρογόνου όπως η αμμωνία και η μεθανόλη. Η απαραίτητη υποδομή μεταφορών για τη

σύνδεση αυτών των περιοχών προσφοράς με τη ζήτηση θα ποικίλλει ανάλογα με τη συγκεκριμένη περίπτωση χρήσης.

Προηγούμενη ανάλυση που διεξήχθη από το EHB (European Hydrogen Backbone) έδειξε ότι ένας αγωγός υδρογόνου έχει την ικανότητα να μεταφέρει περίπου 65 τεραβατώρες (TWh) υδρογόνου ετησίως. Για να γίνει αυτό σε προοπτική, η εκπλήρωση του μισού του στόχου REPowerEU των 10 Mt, που ισοδυναμεί με 330 TWh, θα απαιτούσε την ανάπτυξη περίπου πέντε διαδρόμων αγωγών μεγάλης κλίμακας. Μια αρχική εκτίμηση, λαμβάνοντας υπόψη τις δυνατότητες προσφοράς, τα κέντρα ζήτησης και τις αξιολογήσεις των Διαχειριστών Συστημάτων Μεταφοράς (ΔΣΜ) σχετικά με την προσαρμοστικότητα της υπάρχουσας υποδομής φυσικού αερίου και την κατασκευή νέων αγωγών υδρογόνου, προτείνει την πιθανή εμφάνιση έως και πέντε διαδρόμων τροφοδοσίας έως το 2030.

Αυτοί οι διασυνοριακοί διάδρομοι, που απεικονίζονται στον επιταχυνόμενο χάρτη δικτύου EHB που φαίνεται στο Σχήμα 2, έχουν την ικανότητα να ενσωματώνουν σημαντικές ποσότητες ανανεώσιμων πηγών και υδρογόνου χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Οι ηλιακοί πόροι στις χώρες της νότιας και ανατολικής Ευρώπης και οι αιολικοί πόροι γύρω από τη Βόρεια, τη Βαλτική και τη Μεσόγειο Θάλασσα μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά σε αυτό το εγχείρημα. Σε περιοχές όπου τόσο τα ηλιακά φωτοβολταϊκά (PV) όσο και το αιολικό δυναμικό είναι άφθονο, τα υβριδικά φωτοβολταϊκά και αιολικά συστήματα προσφέρουν μια βιώσιμη επιλογή για ανταγωνιστική παραγωγή υδρογόνου, αξιοποιώντας το ισχυρό δυναμικό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η προβλεπόμενη υποδομή υδρογόνου μέχρι το 2030, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, περιλαμβάνει συνολικό μήκος περίπου 28.000 χιλιομέτρων. Η δημιουργία συνδέσεων μεταξύ αυτών των περιοχών που είναι πλούσιες σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και των καταναλωτών υδρογόνου που βρίσκονται στην κεντρική Ευρώπη μέσω διασυνοριακών διαδρόμων αγωγών γίνεται όλο και πιο επιτακτική. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς η υιοθέτηση του υδρογόνου στους τομείς των μεταφορών, της βιομηχανίας και της ενέργειας κερδίζει δυναμική, οδηγώντας δυνητικά σε καταστάσεις όπου η ζήτηση υπερβαίνει την προσφορά σε περιοχές με μέτριες δυνατότητες παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας.

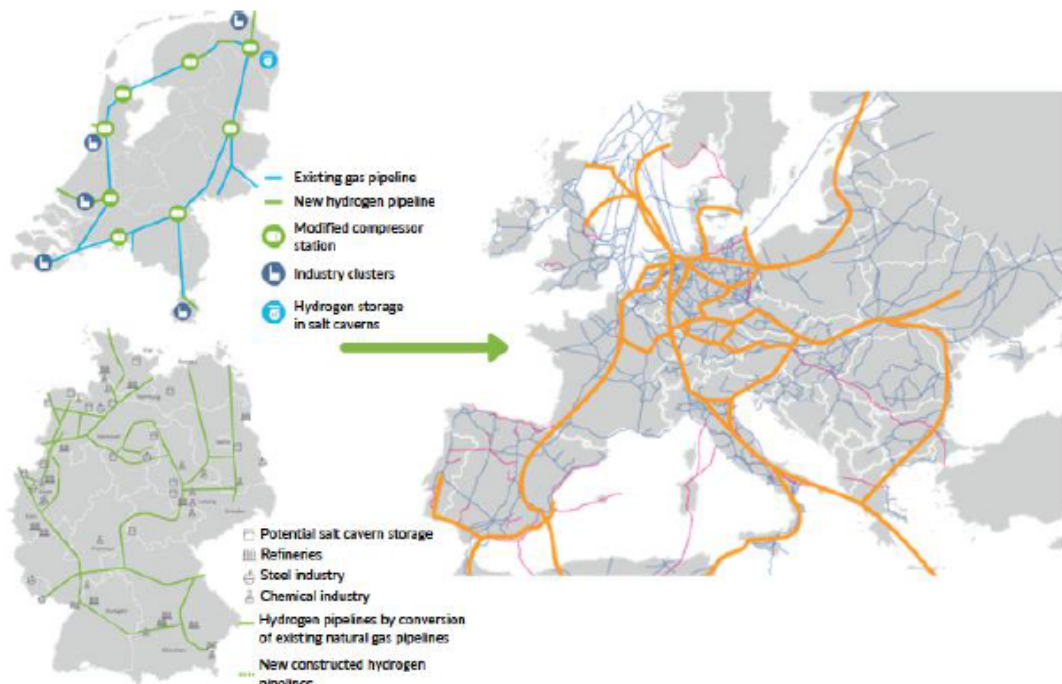
Επιπλέον, αυτές οι εξελίξεις υποδομής θέτουν τις βάσεις για τη μελλοντική δυνατότητα εισαγωγών αγωγών υδρογόνου. Αυτές οι εισαγωγές θα μπορούσαν να προέρχονται από τη Βόρεια Αφρική, πιθανώς μέσω Ισπανίας ή Ιταλίας ή από την Ουκρανία, με πιθανά σημεία εισόδου μέσω της Πολωνίας, της Σλοβακίας ή της Ουγγαρίας. Εξετάζονται επίσης οι εισαγωγές παραγωγών υδρογόνου από πλοία, με σχέδια για νέους ή επαναπροοριζόμενους τερματικούς σταθμούς εισαγωγής στον ορίζοντα.

5.5 Δημιουργία Πανευρωπαϊκής Υποδομής Υδρογόνου (2021-2035)

Αυτή η πρωτοβουλία συνεπάγεται την κατασκευή εθνικών κόμβων υδρογόνου που συνδέουν εγκαταστάσεις παραγωγής υδρογόνου μεγάλης κλίμακας, χαμηλών εκπομπών άνθρακα και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με εγκαταστάσεις αποθήκευσης σε σπήλαιο αλατιού. Αυτές οι εγκαταστάσεις καλύπτουν την υψηλή βιομηχανική ζήτηση για υδρογόνο στους τομείς των χημικών, πετροχημικών και χάλυβα. Στη συνέχεια, αυτοί οι εθνικοί κόμβοι υδρογόνου θα διασυνδεθούν σε πανευρωπαϊκή κλίμακα, ενισχύοντας την παραγωγή υδρογόνου σε γειτονικές χώρες.

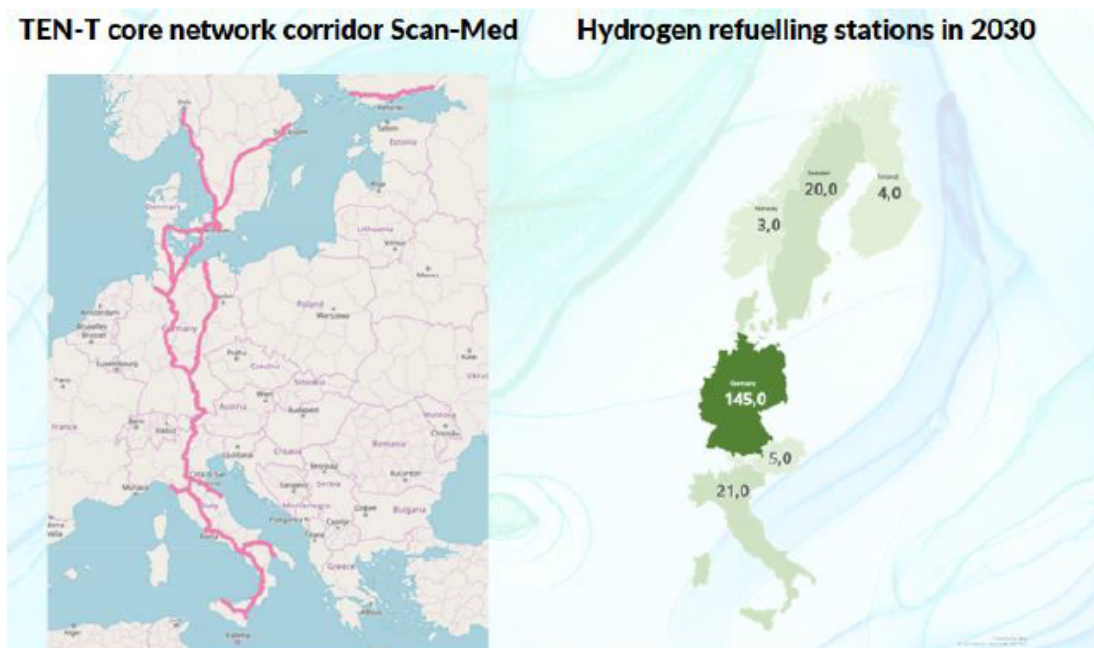
Το υδρογόνο, ως πρώτη ύλη στις χημικές, πετροχημικές και χαλυβουργικές βιομηχανίες, καθώς και για τις μεταφορές, αναμένεται να είναι καθαρό και «πράσινο». Οι αγωγοί κορμού υδρογόνου συνδέουν χαμηλού κόστους περιοχές παραγωγής καθαρού υδρογόνου με κέντρα αποθήκευσης και κατανάλωσης υψηλής ζήτησης αλλού. Η ανάπτυξη αυτών των αγωγών κορμού υδρογόνου θα πρέπει να δοθεί προτεραιότητα, με στόχο τη δημιουργία ενός πανευρωπαϊκού δικτύου κόμβων υδρογόνου με συνδέσεις με γειτονικές χώρες έως το 2035. Αυτοί οι κόμβοι μπορεί να περιλαμβάνουν νεοκατασκευασμένους αγωγούς ή την επαναχρησιμοποίηση υφιστάμενων αγωγών φυσικού αερίου.

Στις περισσότερες περιπτώσεις αναμένεται, η ευρωπαϊκή υποδομή φυσικού αερίου, με λίγες εξαιρέσεις, να μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά 100% υδρογόνου. Ωστόσο, οι συμπιεστές και οι μετρητές ροής πρέπει να προσαρμοστούν ή να αντικατασταθούν. Επιπλέον, τα σπήλαια αλατιού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση υδρογόνου και η Ευρώπη διαθέτει σημαντική χωρητικότητα για το σκοπό αυτό. Αρκετές ευρωπαϊκές χώρες έχουν ήδη περιγράψει οδικούς χάρτες για μια υποδομή υδρογόνου που θα μπορούσε τελικά να ενσωματωθεί σε μια πανευρωπαϊκή υποδομή υδρογόνου, όπως φαίνεται στην έκθεση «Green Hydrogen for a European Green Deal, A 2x40 GW Initiative» των van Wijk και Chatzimarkakis (2020).



Εικόνα 29: Εθνικές υποδομές κορμού υδρογόνου που εξελίσσονται σε πανευρωπαϊκή υποδομή υδρογόνου

Όσον αφορά τη βέλτιστη ενσωμάτωση των δικτύων TEN-E (Διευρωπαϊκά Δίκτυα για την Ενέργεια) και TEN-T (Διευρωπαϊκό Δίκτυο Μεταφορών), οι συνέργειες μεταξύ των δικτύων ενέργειας και μεταφορών μπορούν να διευκολύνουν την ταχεία μετάβαση από καύσιμα έντασης άνθρακα στον τομέα των μεταφορών. Για παράδειγμα, μέχρι το 2030, εάν το 50% των συνολικών μεταφορών βαρέως τύπου κατά μήκος του διαδρόμου Scan-Med TEN-T (Εικόνα 30-αριστερά) τροφοδοτούνταν με υδρογόνο, θα μεταφραζόταν σε περίπου 40.000-50.000 βαρέα οχήματα που κινούνται με υδρογόνο, που απαιτούν 218 σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου (Εικόνα 30- δεξιά). Αυτό θα απαιτούσε περαιτέρω 328 εκατομμύρια τόνους ανανεώσιμου υδρογόνου ετησίως, με αποτέλεσμα μια ετήσια μείωση κατά 4,6 εκατομμύρια τόνους εκπομπών CO₂.



Εικόνα 30: Αριστερά- Κεντρικός διάδρομος μεταφορών TEN-T, Δεξιά- Σταθμοί ανεφοδιασμού κατά μήκος του διαδρόμου

5.6 Υπάρχουσα υποδομή δικτύου φυσικού αερίου στην Ελλάδα

Η ΔΕΣΦΑ είναι ο πάροχος φυσικού αερίου της Ελλάδας και λειτουργεί ένα σχετικά νέο δίκτυο 1456 χλμ. Οι εξαιρετικές συνθήκες της Ελλάδας τόσο για την αιολική όσο και για την ηλιακή ενέργεια θα επιτρέψουν την πλήρη σταδιακή κατάργηση των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με βάση τον άνθρακα έως το 2028 ή και νωρίτερα. Υπάρχουν σχέδια για αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος της Αιολικής Ενέργειας στα 28.6 GW και της Ηλιακής Φ/Β στα 19.8 GW, όπως αναφέρεται στο τελευταίο προσχέδιο πρότασης για την αναθεώρηση του NECP. Η τρέχουσα ικανότητα παραγωγής υδρογόνου στην Ελλάδα είναι περίπου 150 χιλιάδες τόνοι/έτος, όλα προέρχονται από ορυκτά καύσιμα, καλύπτοντας ζήτηση 5 TWh (κυρίως από διυλιστήρια και βιομηχανίες παραγωγής αμμωνίας).

Οι τρεις κύριες βιομηχανικές ομάδες, σε Αθήνα, Κόρινθο και Θεσσαλονίκη, αποτελούν πιθανά κέντρα μεγάλης ζήτησης υδρογόνου. Επιπλέον, σύμφωνα με το Ρυθμιστικό Σχέδιο που εκπονήθηκε πρόσφατα για την απανθρακοποίηση της λιγνιτικής περιοχής παραγωγής της Δυτικής Μακεδονίας, υπάρχει μεγάλη δυνατότητα παραγωγής υδρογόνου στην περιοχή. Το δυναμικό αυτό πηγάζει από την αναμενόμενη εγκατάσταση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων μεγάλης κλίμακας, καθώς και τη δυνατότητα τοπικής χρήσης υδρογόνου ή μεταφοράς του μέσω του νέου αγωγού υδρογόνου αγωγού που αναπτύσσει ο ΔΕΣΦΑ στην περιοχή.

Παράλληλα, αρκετοί ενεργειακοί παράγοντες της χώρας σχεδιάζουν τις δράσεις τους για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου, ενισχύοντας τις προσπάθειες για τη μετάβαση του ελληνικού ενεργειακού τομέα.

Είναι προφανές ότι θα χρειαστεί να δημιουργηθεί ένα «κορμός Υδρογόνου» (Hydrogen backbone) για να συμβιβαστούν οι ουσιαστικές διαφορές στο δυναμικό προσφοράς υδρογόνου και της ζήτησης υδρογόνου σε ολόκληρη τη χώρα. Αυτή η «ραχοκοκαλιά» θα χρησιμεύσει επίσης για τη σύνδεση του εθνικού συστήματος υδρογόνου με γειτονικές περιοχές, παρέχοντας έτσι ασφάλεια εφοδιασμού και ολοκλήρωση της αγοράς (EHB-European Hydrogen BackBone, 2023).

5.7 Ανάπτυξη υποδομών υδρογόνου στην Ελλάδα

Μέχρι το 2030, τα κύρια βιομηχανικά συγκροτήματα της Ελλάδας σε Αθήνα, Κόρινθο και Θεσσαλονίκη θα συνδεθούν, με νέους αποκλειστικούς αγωγούς υδρογόνου που θα ακολουθούν την υπάρχουσα διαδρομή φυσικού αερίου. Το δυνητικό σύμπλεγμα υδρογόνου στη Δυτική Μακεδονία θα συνδεθεί και με τη Θεσσαλονίκη, κοντά στην υφιστάμενη σύνδεση με τον TAP, μέσω του νέου, έτοιμου για υδρογόνο αγωγού στην περιοχή, που βρίσκεται υπό ανάπτυξη.

Η αποθήκευση θα μπορούσε να είναι διαθέσιμη με τη μορφή «εξαντλημένης δεξαμενής» κοντά στο νησί της Θάσου. Αυτός ο αποκλειστικός αγωγός υδρογόνου θα προσφέρει την ευκαιρία σε δυνητικούς μεγάλους καταναλωτές υδρογόνου σε όλη τη χώρα (π.χ. διυλιστήρια, χημικές βιομηχανίες κ.λπ.) να έχουν πρόσβαση στις απαιτούμενες ποσότητες πράσινου υδρογόνου. Εκτός από τη βιομηχανία, το μεγαλύτερο δυναμικό υδρογόνου, από την άποψη του τελικού χρήστη, αναμένεται να είναι ο τομέας των μεταφορών, και πιο συγκεκριμένα τα βαρέα επαγγελματικά οχήματα και τρένα.

Μέχρι το 2040, ο αποκλειστικός αγωγός υδρογόνου θα μπορούσε να διασυνδεθεί με παρακείμενα συστήματα, έτσι ώστε το υδρογόνο να μπορεί να ρέει από την Ελλάδα προς τη Νοτιοανατολική, τη Νοτιοδυτική και την Κεντρική Ευρώπη. Καθώς ο TAP θα συνδεθεί απευθείας με το σύστημά, θα υπάρξει διασύνδεση με το ιταλικό σύστημα μεταφοράς και στη συνέχεια με την Κεντρική Ευρώπη, όπου προβλέπεται σημαντική ζήτηση καθαρού υδρογόνου.

Ταυτόχρονα, η διασύνδεση από την Ελλάδα στη Βόρεια Μακεδονία και από εκεί στο Κόσοβο θα είναι έτοιμη για μελλοντική χρήση υδρογόνου. Τέλος, θα μπορούσαν να συνδεθούν και λιμάνια κοντά στον αγωγό, με μελλοντική υποδομή εισαγωγής υδρογόνου (ή οποιασδήποτε μορφής αυτού) (EHB-European Hydrogen BackBone, 2023).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Συμπεράσματα

Στα προηγούμενα κεφάλαια, της παρούσης εργασίας έγινε προσπάθεια εμβάθυνσης στο πολύπλευρο πλαίσιο της ενσωμάτωσης υδρογόνου στους αγωγούς φυσικού αερίου. Η μελέτη αυτή περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα προβληματισμών, από τη συμβατότητα των υλικών και τις θερμοδυναμικές ιδιότητες έως τις οικονομικές επιπτώσεις και τις προοπτικές βιωσιμότητας. Παρακάτω συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας αυτής που μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για την ανάδειξη του υδρογόνου ως σημαντικού παράγοντα στο πλαίσιο μιας βιώσιμης ενεργειακής μετάβασης.

1. Προσέγγιση κατά περίπτωση: Μια πραγματιστική στρατηγική

Η ανάγκη για μια κατά περίπτωση προσέγγιση υπογραμμίζει την πολυπλοκότητα της ενσωμάτωσης υδρογόνου στους αγωγούς φυσικού αερίου. Αυτή η προσέγγιση αναγνωρίζει ότι κάθε δίκτυο αγωγών είναι μοναδικό, με ξεχωριστά χαρακτηριστικά, υλικά και συνθήκες λειτουργίας. Επομένως, οι γενικές λύσεις είναι ανεπαρκείς. Η αυστηρή αξιολόγηση της ετοιμότητας κάθε δικτύου αγωγών για ανάμειξη υδρογόνου είναι απαραίτητη. Παράγοντες όπως η ηλικία και η κατάσταση των αγωγών, η θέση των σημείων έγχυσης και η επιδιωκόμενη συγκέντρωση υδρογόνου πρέπει να αξιολογούνται διεξοδικά. Αυτή η λεπτομερής προσέγγιση διασφαλίζει ότι οι τροποποιήσεις υποδομής προσαρμόζονται στις συγκεκριμένες απαιτήσεις κάθε δικτύου.

2. Ολοκληρωμένη αξιολόγηση

Οι εκτενείς αξιολογήσεις αποτελούν τον βασικό άξονα για τον προσδιορισμό της συμβατότητας του αγωγού με το υδρογόνο. Λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τα σημεία έγχυσης, τα υλικά αγωγών, τον εξοπλισμό και τις εγκαταστάσεις είναι ζωτικής σημασίας από αυτή την άποψη. Οι αξιολογήσεις θα πρέπει να καλύπτουν ολόκληρο το δίκτυο, συμπεριλαμβανομένων μεμονωμένων εξαρτημάτων και συσκευών τελικής χρήσης. Αυτή η ολιστική προοπτική επιτρέπει τον εντοπισμό περιοχών που μπορεί να απαιτούν τροποποίηση ή ενίσχυση για την ασφαλή και αποτελεσματική υποδοχή του υδρογόνου.

3. Επιδράσεις υλικών - χάλυβες αγωγών

Τα ευρήματα της παρούσης εργασίας υπογραμμίζουν ότι η παρουσία υδρογόνου επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα αγωγών. Οι ρυθμοί ανάπτυξης ρωγμών κόπωσης και η αντοχή σε θραύση επηρεάζονται ιδιαίτερα. Συγκεκριμένα, ακόμη και σε σχετικά χαμηλές μερικές πιέσεις υδρογόνου, η ακεραιότητα του χάλυβα μπορεί να επιδεινωθεί. Αυτή η υποβίβαση των μηχανικών ιδιοτήτων είναι πιο έντονη σε μερικές πιέσεις

υδρογόνου γύρω στο 1 bar, υπογραμμίζοντας την ανάγκη στενής παρακολούθησης των αγωγών σε συνθήκες ροής.

Είναι σαφές ότι οι συνθήκες υψηλής καταπόνησης, η κατάσταση του αγωγού και οι λειτουργικοί παράγοντες παίζουν αλληλένδετους ρόλους στον προσδιορισμό της δομικής ακεραιότητας των αγωγών όταν εκτίθενται σε υδρογόνο.

4. Κατανόηση των επιπτώσεων του υδρογόνου στα υλικά σωλήνων πολυαιθυλενίου

Με όσα αναφέρθηκαν στην παρούσα εργασία για τις επιπτώσεις του υδρογόνου στα υλικά σωλήνων πολυαιθυλενίου προκύπτει το συμπέρασμα ότι η μελέτη για το συγκεκριμένο ενδεχόμενο πρόβλημα συμβατότητας είναι ακόμη σε εξέλιξη. Ενώ έχει διαπιστωθεί ότι το υδρογόνο επηρεάζει την επιφανειακή πυκνότητα του υλικού στις εσωτερικές επιφάνειες των αγωγών, τον βαθμό κρυσταλλικότητας και ορισμένες μηχανικές ιδιότητες, οι ακριβείς συνέπειες για την απόδοση και την μακροχρόνια λειτουργία απαιτούν περαιτέρω ποσοτικοποίηση.

5. Θέματα συμπίεσής

Η αλληλεπίδραση του υδρογόνου με το φυσικό αέριο μπορεί να δημιουργήσει προκλήσεις για τους συμπίεστρες. Λόγω του χαμηλότερου μοριακού βάρους του υδρογόνου, οι συμπίεστρες μπορεί να χρειαστεί να λειτουργούν σε υψηλότερες ταχύτητες για να συντηρήσουν τη δυνατότητα της αύξησης της πίεσης.

Οι περιορισμοί των φυγόκεντρων συμπίεστων στον χειρισμό υψηλών συγκεντρώσεων υδρογόνου εξαρτώνται από παράγοντες όπως τα περιθώρια ταχύτητας και τα υλικά κατασκευής. Η προσεκτική εξέταση αυτών των παραγόντων είναι απαραίτητη κατά το σχεδιασμό συστημάτων για περιβάλλοντα πλούσια σε υδρογόνο.

6. Λειτουργική και Οικονομική Πολυπλοκότητα

Οι μελλοντικές οικονομικές αξιολογήσεις πρέπει να αντιμετωπίζουν μια σύνθετη αλληλεπίδραση λειτουργικών παραγόντων και κόστους. Η μείωση της πίεσης, οι αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις συμπίεσης και η υψηλότερη συχνότητα επιθεώρησης πρέπει να σταθμιστούν έναντι του κεφαλαιουχικού κόστους που σχετίζεται με τις αναβαθμίσεις και τις μετασκευές αγωγών.

Είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη το κόστος που συνδέεται με τη μειωμένη ικανότητα μεταφοράς ενέργειας, ειδικά όταν εξετάζεται η μακροπρόθεσμη οικονομική βιωσιμότητα της ανάμειξης υδρογόνου.

Προτάσεις

1. Ο ρόλος της προηγμένης μοντελοποίησης δικτύου αγωγών

Η προηγμένη μοντελοποίηση δικτύου αγωγών χρησιμεύει ως κρίσιμο εργαλείο για τον προσδιορισμό και την ανάπτυξη πρακτικών σεναρίων και τεχνικών. Η συντονισμένη μοντελοποίηση των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας και των δικτύων φυσικού αερίου παρέχει πολύτιμες γνώσεις σχετικά με τις ευρύτερες επιπτώσεις της μετάβασης στο υδρογόνο.

2. Πρότυπα και κατευθυντήριες γραμμές για τη βιομηχανία διύλισης

Τα πρότυπα και οι κατευθυντήριες γραμμές του κλάδου, όπως το ASME B31.12, προσφέρουν κρίσιμες πληροφορίες για τη λειτουργία του χαλύβδινου αγωγού υπό την παρουσία υδρογόνου. Ωστόσο, τείνουν να είναι συντηρητικοί όταν επαναχρησιμοποιούν υπάρχοντες αγωγούς για υδρογόνο.

Η έρευνα αφιερωμένη στην αξιολόγηση των επιπτώσεων του υδρογόνου στα υλικά των αγωγών είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση αυτών των προτύπων και των κατευθυντήριων γραμμών σχεδιασμού. Αυτή η διαδικασία θα θέσει τις βάσεις για βελτιωμένες πρακτικές του κλάδου.

3. Μόχλευση προηγμένων προσεγγίσεων μοντελοποίησης

Η χρήση ώριμων προσεγγίσεων μοντελοποίησης είναι μια πολύτιμη στρατηγική για την κατανόηση του αντίκτυπου του υδρογόνου στις λειτουργίες του δικτύου αγωγών. Αυτά τα μοντέλα παρέχουν τη βάση για εξελιγμένες τεchnοοικονομικές αναλύσεις. Συνδυάζοντας αυτά τα μοντέλα με δεδομένα για τις επιπτώσεις του υδρογόνου στα υλικά, οι μηχανικοί και οι αναλυτές μπορούν να λάβουν τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με το βαθμό στον οποίο η ανάμειξη υδρογόνου είναι εφικτή και οικονομικά βιώσιμη για συγκεκριμένα δίκτυα αγωγών

Θέματα που απαιτούν περαιτέρω έρευνα για την ανάμειξη υδρογόνου σε αγωγούς φυσικού αερίου

Η παρούσα εργασία υπογραμμίζει την ανάγκη για ουσιαστική έρευνα πριν από την ευρεία εφαρμογή της ανάμειξης υδρογόνου σε αγωγούς φυσικού αερίου. Εδώ, επισημαίνονται κρίσιμοι τομείς για περαιτέρω έρευνα:

1. Έρευνα υλικών για τους αγωγούς

Είναι επιτακτική ανάγκη να γίνουν πρόσθετες δοκιμές, εστιάζοντας τόσο σε υλικά αγωγών από χάλυβα όσο και σε πλαστικά που είναι ενσωματωμένα στο σύστημα αγωγών φυσικού αερίου. Αυτή η έρευνα θα στοχεύει να εντοπίσει και να επιβεβαιώσει τις σχέσεις μεταξύ της παρουσίας υδρογόνου και κρίσιμων παραγόντων όπως η κόπωση, η ανάπτυξη ρωγμών και τα ποσοστά αστοχίας.

Επιπλέον, η αξιολόγηση της επίδρασης του υδρογόνου σε προηγουμένως εγκατεστημένα εξαρτήματα όπως βαλβίδες, μετρητές και ρυθμιστές πίεσης είναι απαραίτητη. Αυτή η μελέτη θα παρέχει πληροφορίες για τη βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη λειτουργικότητά τους υπό διαφορετικές συνθήκες.

2. Ποιότητα χάλυβα

Η πλειονότητα του συστήματος αγωγών φυσικού αερίου τόσο στην Ευρώπη όσο ειδικότερα στις ΗΠΑ ενδέχεται να αποτελείται από παλαιό χάλυβα (πριν από τη δεκαετία του 1970 για τις ΗΠΑ), ο οποίος μπορεί να περιέχει μεγαλύτερη ποσότητα ελαττωμάτων λόγω της χαμηλότερης ποιότητας κατασκευής και των ετών λειτουργίας.

Η έρευνα που θα επικεντρώνεται στην επίδραση του υδρογόνου σε τέτοιους αγωγούς, ειδικά σε συγκολλήσεις ραφής και σκληρά σημεία, είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της καταλληλότητάς τους για ανάμειξη υδρογόνου και τον χρόνο λειτουργίας τους.

3. Υλικά πέρα από τον χάλυβα

Ενώ έχει διεξαχθεί έρευνα για τις επιδράσεις του υδρογόνου στους χάλυβες και στις συγκολλήσεις σωλήνων μεταφοράς, απαιτούνται παρόμοιες έρευνες για άλλα υλικά που βρίσκονται εντός των αγωγών, όπως ελαστομερή και υλικά σφράγισης. Η κατανόηση της απόδοσής τους σε περιβάλλοντα πλούσια σε υδρογόνο είναι ζωτικής σημασίας για τη μεταφορά μείγματος υδρογόνου-φυσικού αερίου.

4. Συνέπειες στη συντήρηση και στην επισκευή

Οι τρέχουσες διαδικασίες συντήρησης και επισκευής για αγωγούς φυσικού αερίου ενδέχεται να απαιτούν προσαρμογές λόγω της επίδρασης του υδρογόνου στην κόπωση του χάλυβα και στη διάδοση των ρωγμών.

Οι συστάσεις για την προσαρμογή των μεθόδων επισκευής και αποκατάστασης για αγωγούς που εξυπηρετούν μείγματα φυσικού αερίου-υδρογόνου δεν έχουν ακόμη καθιερωθεί και θα ωφεληθούν από περαιτέρω έρευνα.

5. Στρατηγικές απανθρακοποίησης

Η κατανόηση του δυναμικού της ανάμειξης υδρογόνου στην απαλλαγή από τον άνθρακα σε ολόκληρη την οικονομία είναι μια κρίσιμη οδός έρευνας. Χρησιμεύει ως ενδιάμεσο βήμα μεταξύ της υπάρχουσας υποδομής φυσικού αερίου και των μελλοντικών συστημάτων καθαρού υδρογόνου. Ενώ οι χαμηλές συνθέσεις υδρογόνου στο αέριο του αγωγού προσφέρουν σταδιακές μειώσεις εκπομπών, σημαντικές μειώσεις εκπομπών άνθρακα είναι εφικτές όταν οι συγκεντρώσεις υδρογόνου υπερβαίνουν ακόμα και το 80%.

6. Μετάβαση στο Καθαρό Υδρογόνο

Η ταχεία απαλλαγή από τον άνθρακα ή οι εκτεταμένες τροποποιήσεις στα δίκτυα αγωγών μπορεί να καταστήσουν πλεονεκτική τη μετατροπή των αγωγών φυσικού αερίου για μεταφορά καθαρού υδρογόνου αντί της σταδιακής ανάμειξης υδρογόνου.

Η έρευνα σχετικά με τις προκλήσεις συμβατότητας υλικού, εξοπλισμού και τελικού χρήστη που σχετίζονται με αυτή τη μετάβαση είναι ζωτικής σημασίας, όπως και η αντιμετώπιση των ελλειμμάτων ακριβούς γνώσης που σχετίζονται με την ανάμειξη υδρογόνου.

7. Οικονομικά της ανάμειξης υδρογόνου

Οι σε βάθος οικονομικές μελέτες πρέπει να λάβουν υπόψη διάφορους περιορισμούς κόστους, όπως η επίδραση του υδρογόνου στην πίεση λειτουργίας του αγωγού, η ανοχή του σταθμού συμπίεσης, το κόστος επιθεώρησης, το κόστος συντήρησης βαλβίδων και μετρητών και κόστος ευκαιρίας.

Η διερεύνηση των επιπτώσεων του υδρογόνου στη διάρκεια ζωής του αγωγού και των επιπτώσεών του στα οικονομικά του έργου είναι απαραίτητη.

8. Συγκριτικές Εκτιμήσεις

Οι συγκριτικές μελέτες που αξιολογούν τη σκοπιμότητα και τα οικονομικά των διαφορετικών μεθόδων απανθρακοποίησης του τομέα του φυσικού αερίου (ανάμιξη υδρογόνου, υποδομή καθαρού υδρογόνου, παραγωγή συνθετικού φυσικού αερίου) είναι περιορισμένες αλλά κρίσιμες. Αυτές οι αξιολογήσεις θα πρέπει να αναλύουν διεξοδικά όλα τα κόστη και τις

εκτιμήσεις, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τις πιο αποτελεσματικές στρατηγικές απαλλαγής από τον άνθρακα για συγκεκριμένα πλαίσια.

Η αντιμετώπιση αυτών των ερευνητικών περιοχών θα είναι καθοριστική για την προώθηση της πρακτικής εφαρμογής της ανάμειξης υδρογόνου σε αγωγούς φυσικού αερίου, διασφαλίζοντας παράλληλα την ασφάλεια, την αποτελεσματικότητα και τα περιβαλλοντικά οφέλη. Περαιτέρω έρευνα και καινοτομία σε αυτούς τους τομείς θα οδηγήσει στη μετάβαση προς καθαρότερα ενεργειακά συστήματα.

Αναφορές

- Abeysekera, M., και συν. 2016.** Steady State Analysis of Gas Networks with Distributed Injection of Alternative Gas. *Applied Energy*. 2016, 164, σσ. 991-1002.
- Adam, P.R., Bode, R. και Groissboeck, M. 2020.** Readying Pipeline Compressor Stations for 100% Hydrogen. *Turbomachinery Magazine*. 2020.
- Aftab, A., και συν. 2022.** Toward a Fundamental Understanding of Geological Hydrogen Storage. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2022, 61, σσ. 3233–3253.
- Alili, L. και Serevina, V. 2019.** Renewable energy sources in hydrogen production by electrolysis of water. IOP Conference Series. *Materials Science and Engineering*. 2019, Τόμ. 659, 1.
- Allison, T.C., και συν. 2021.** Power and Compression Analysis of Power-To-Gas Implementations in Natural Gas Pipelines With Up to 100% Hydrogen Concentration. *Oil and Gas Applications; Steam Turbine*. Virtual, Online: American Society of Mechanical Engineers, 2021, Τόμ. 8.
- American Society of Mechanical Engineers and American Petroleum Institute. 2021.** Fitness-For-Service. APIA Publishing Services, 2021.
- American Society of Mechanical Engineers. 2005.** Hydrogen Standardization Interim Report for Tanks, Piping, and Pipelines. *Technical report STP-PT-003*. 2005.
- Andersson, Joakim και Gronkvist, Stefan. 2019.** Large-scale storage of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. April 2019, σσ. 11901-11919.
- Azoti, W.L. και Park, S.H. 2019.** Recent progress and challenges of hydrogen storage methods using various forms of carbon. *Energy & Environmental Science*. 2019, Τόμ. 12, 2, σσ. 433-472.
- Bainer, F. και Kurz, R. 2019.** Impacts of H₂ Blending on Capacity and Efficiency on a Gas Transport Network. *Oil and Gas Applications; Supercritical CO₂ Power Cycles*. Wind Energy, 2019, Τόμ. 9.
- Bauer, S., Schlagermann, P. και Banike, J. 2021.** Hydrogen transport via existing natural gas grids—a review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021, Τόμ. 46, 18, σσ. 12031-12041.
- Bian, J., Cao, X.W. και Yang, W. 2018.** Supersonic liquefaction properties of natural gas in the Laval nozzle. *Energy* 159. 2018, σσ. 705-706.
- Blanco, Herib και Faaij, Andre. 2018.** A review at the role of storage in energy systems with a focus on Power to Gas and long-term storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, 81, σσ. 1049-1086.
- Blending Hydrogen into Existing Gas Grid: Opportunities and Challenges for Pipeline e-Motor Compressor System Design.* **Alban, T. 2022.** Berlin : EITEP Institute, 2022. 17th Pipeline Technology Conference.
- Blokland, H., και συν. 2021.** Detecting Hydrogen Concentrations during Admixing Hydrogen in Natural Gas Grids. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021.

- Briottet, L. και Ez-Zaki, H. 2018.** Influence of Hydrogen and Oxygen Impurity Content in a Natural Gas / Hydrogen Blend on the Toughness of an API X70 Steel. *Materials and Fabrication*. American Society of Mechanical Engineers, 2018, Τόμ. 6B.
- Brown, D. και Sigrin, B. 2010.** Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: A review of key issues. *NREL Technical Report*. 2010, Τόμ. TP-5600-52801.
- Caglayan, Dilara, και συν. 2019.** Technical Potential of Salt Caverns for Hydrogen Storage in Europe. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019.
- Canadian Energy Research Institute (CERI). 2021.** *Canadian natural gas market supply and demand pathways of change*. Calgary : CERI, 2021.
- Cerniauskas, A., και συν. 2020.** Options of Natural Gas Pipeline Reassignment for Hydrogen: Cost Assessment for a Germany Case Study. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020, 45, σσ. 12095-12107.
- Cialone, H.J. και Holbrook, J.H. 1985.** "Effects of Gaseous Hydrogen on Fatigue Crack Growth in Pipeline Steel. *Metallurgical Transactions A*. 1985, 16, σσ. 115-122.
- Clegg, S. και Mancarella, P. 2016.** Storing Renewables in the Gas Network: Modelling of Power-to-gas Seasonal Storage Flexibility in Low-carbon Power Systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2016, 10, σσ. 566-575.
- Cristello, Josmar B., και συν. 2023.** Feasibility analysis of blending hydrogen into natural gas networks. *International Journal of Hydrogen Energy*. May 2023, Τόμ. 48, 46, σσ. 17605-17629.
- Diez, N.G., και συν. 2020.** *Technical Assessment of Hydrogen Transport, Compression, Processing Offshore*. s.l. : North Sea Energy,, 2020.
- Dodds, P.E. και Demoullin, S. 2013.** Conversion of the UK Gas System to Transport Hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013, 38, σσ. 7189-7200.
- Domptail, K., και συν. 2020.** *Emerging Fuels -Hydrogen SOTA, Gap Analysis Future Project Roadmap*. s.l. : Pipeline Research Council International, Inc., 2020. Technical report.
- EHB-European Hydrogen BackBone. 2023.** European Hydrogen BackBone-Country Narratives. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://ehb.eu/page/country-specific-developments#greece-desfa>.
- Ekhtiari, Ali, και συν. 2022.** *Testing of Blends of Hydrogen and Natural Gas (HyTest)*. s.l. : Gas Networks Ireland, 2022.
- European Commision. 2020.** *Hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*. Brussels : European Commision, 2020.
- European Commission. 2021.** *Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe*. Βρυξέλλες : Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2021.
- European Committee for Standardization (CEN). 2021.** *Gas infrastructure —Consequences of hydrogen in the gas infrastructure and identification of related standardisation need in the scope of CEN/TC 234*. s.l. : CEN, 2021.

- Eyers, Daniel και Potter, Andrew Thomas. 2017.** Industrial Additive Manufacturing: a manufacturing systems perspective. *Computers in Industry* 92-93. 2017, σσ. 208-215.
- Farzaneh-Gord, M. και Rahbari, H.R. 2012.** Numerical procedures for natural gas accurate thermodynamic properties calculation. *J. Eng. Thermophys.* 2012, σσ. 213-234.
- Global Energy Infrastructure. 2022.** *Global Energy Infrastructure.* 2022.
- Godula-Jopek, A, Jehke, W. και Wellnitz, J. 2012.** Storage of pure hydrogen in different states. *Hydrog. Storage technol.* 2012, σσ. 97-170.
- GRTgaz, και συν. 2019.** Technical and Economic Conditions for Injecting Hydrogen into Natural Gas Networks. 2019.
- H21. 2019.** *H21 leeds city gate report.* Westminster, UK. s.l. : <https://h21.green/projects/h21-leeds-city-gate/>, 2019.
- Haeseldonckx, D. και D'haeseleer, W. 2007.** The Use of the Natural-Gas Pipeline Infrastructure for Hydrogen Transport in a Changing Market Structure. *International Journal of Hydrogen Energy.* 2007, 32, σσ. 1381-1386.
- Han, J., Wang, K. και Shi, J. 2015 .** Mechanism of triethanolamine on Portland cement hydration process and microstructure characteristics. *Constr. Build Mater (93).* 2015 , σσ. 457-462.
- Hansen, J., Sato, M. και Ruedy, R. 2012.** Perception of climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 109, 2012, σσ. 14726-14727, E2415-E2423.
- Hattori, Y. 2014.** In vivo siRNA delivery system for targeting to the liver by poly-L-glutamic acid-coated lipoplex. *Results in Pharma Sciences 4 (.* 2014, σσ. 1-7.
- Huising, O.J.C. και Krom, A.H. 2020.** H2 in an Existing Natural Gas Pipeline. *Pipeline and Facilities Integrity.* American Society of Mechanical Engineers, 2020, Τόμ. 1.
- Hydrogen Compatibility of Structural Materials in Natural Gas Networks.* **San Marchi, C., Shrestha, R. και Rovenich, J. 2021.** 2021. International Conference on Hydrogen Safety.
- IEA. 2021.** Hydrogen e Analysis - IEA. [Ηλεκτρονικό] 2021. <https://www.iea.org/reports/hydrogen>.
- Infrastructure, Global Energy. 2021.** *Global Energy Infrastructure.* 30 3 2021.
- International Energy Agency (IEA). 2019.** The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. [Ηλεκτρονικό] 2019.
- Interstate Natural Gas Association of America. 2010.** *Interstate Natural Gas Pipeline Efficiency.* Washington D.C. : Interstate Natural Gas Association of America, 2010.
- Jacobson, M. 2009.** Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy & Environmental Science.* 2(2), 2009, σσ. 148-173.
- Jones, H.R.N. 1989.** *The Application of Combustion Principles to Domestic Burner Design.* s.l. : Taylor & Francis, 1989.
- Judd, R. και Pinchbeck, D. 2016.** Hydrogen Admixture to the Natural Gas Grid. *Compendium of Hydrogen Energy.* 2016, σσ. 165-192.

- Kakoulaki, G., και συν. 2021.** Green hydrogen in Europe – A regional assessment: Substituting existing. *Energy Conversion and Management*. 2021, Τόμ. 228.
- Kim, H. 2018.** Examining the Techno-Economics of Nuclear Hydrogen Production and Benchmark Analysis of the IAEA HEEP Software (Republic of Korea). *International Atomic Energy Agency*. 2018.
- Leach, M. και Read, A. 2018.** Hydrogen and clean energy transition pathways. *Energy Policy*. 117, 2018, σσ. 434-443.
- Leicher, Jorg, και συν. 2020.** *Impact of hydrogen admixture on combustion processes – Part I*. s.l. : Testing Hydrogen admixture for Gas Applications, 2020.
- Leiva-Dueñas, C. και Pardo-Bosch, F. 2019.** Potential reduction of GHG emissions in a natural gas power plant using hydrogen enrichment. *ournal of CO2 Utilization*. 2019, 32, σσ. 1-9.
- Lemieux, A., Shkarupin, A. και Sharp, K. 2020.** Geologic feasibility of underground hydrogen storage in Canada. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020.
- Li, J.F., και συν. 2021.** Influences of hydrogen blending on the joule-thomson coefficient of natural gas. *ACS Omega*. 2021, Τόμ. 6, 26, σσ. 16722-16735.
- Li, Z.R., και συν. 2022.** Thermodynamic study on the natural gas condensation in the throttle valve for the efficiency of the natural gas transport system. *Appl. Energy*. 2022, 322.
- Li, Zhuoran, και συν. 2023.** Thermodynamic evaluation of the effects of hydrogen blending on the Joule-Thomson characteristics of hydrogen-blended natural gas. *Journal of Cleaner Production*. 2023, 406.
- Lord, A.S., Kobos, P.H. και Borns, D.J. 2014.** Geologic Storage of Hydrogen: Scaling up to Meet City Transportation Demands. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014, 39, σσ. 15570–15582.
- Ma, L. και Spataru, C. 2015.** The Use of Natural Gas Pipeline Network with Different Energy Carriers. *Energy Strategy Reviews*. 2015, 8, σσ. 72-81.
- Ma, X., και συν. 2020.** Hydrogen storage materials: recent progress and prospect. *National Science Review*. 2020, Τόμ. 7, 3, σσ. 389-411.
- Markvart, Tomas. 2000.** *Solar Electricity*. s.l. : Wiley, 2000.
- Maytal, B.Z. και Pfothenauer, J.M. 2013.** The joule-thomson effect, its inversion and other expansions. In: Miniature Joule-Thomson Cryocooling. *International Cryogenics Monograph Series: Miniature Joule-Thomson Cryocooling*. 2013, σσ. 39-72.
- Melaina , M.W., Antonia , O. και Penev, M. 2013.** Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues. *Technical report. National Renewable Energy Laboratory*. 2013.
- Meng, B. C., και συν. 2017.** Hydrogen Effects on X80 Pipeline Steel in High-Pressure Natural Gas/Hydrogen Mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017, 42, σσ. 7404–7412.
- Menon, E.S. 2016.** Pipeline Economics. In *Transmission Pipeline Calculations and Simulations Manual*. 2016, σσ. 473-517.

Moradi, Ramin και Groth, Katrina. 2019. Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. May 2019, 44, σσ. 12254-12269.

Nanninga, N. A., και συν. 2010. A Review of Fatigue Crack Growth for Pipeline Steels Exposed to Hydrogen. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2010, 115.

Navas-Anguita, Z., και συν. 2021. Revisiting the role of steam methane reforming with CO₂ capture and storage for long-term hydrogen production. *Science of The Total Environment*. 2021, Τόμ. 771.

Nikolaïdis, P. και Poullikkas, A. 2017. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,. 2017, Τόμ. 46, σσ. 597-611.

Panfilov, M. 2016. 4 -Underground and Pipeline Hydrogen Storage. *In Compendium of Hydrogen Energy*,. Woodhead Publishing Series in Energy-Woodhead Publishing, 2016, σσ. 91-115.

Panousis, G., Theofilou, S. και Papageorgiou, D.G. 2018. Impact of Hydrogen Blending on Flame Speed of Natural Gas and Its Consequences. *Energy Procedia*. 2018, Τόμ. 152, σσ. 349-354.

Papadias, D. και Ahluwalia, R.K. 2021. Bulk Storage of Hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021, 40, σσ. 34527-34541.

Pellegrini, M., Guzzini, A. και Sacconi, C. 2020. A Preliminary Assessment of the Potential of Low Percentage Green Hydrogen Blending in the Italian Natural Gas Network. *Energies* 13. 2020, 13, σ. 5570.

Qardan, M., και συν. 2017. Efficacy of Options to Address Balancing Challenges: Integrated Gas and Electricity Perspectives. *Applied Energy*. 2017, 190, σσ. 181-190.

Qardan, M., και συν. 2015. Role of Power-to-Gas in an Integrated Gas and Electricity System in Great Britain. *International Journal of Hydrogen Energy*. 40, 2015, σσ. 5763–5775.

Reitenbach, V.L., και συν. 2015. Influence of Added Hydrogen on Underground Gas Storage: A Review of Key Issues. *Environmental Earth Sciences*. 2015, 73, σσ. 6927-6937.

Revamp / Re-rate Design Considerations. Sorokes, J.M., Kaulius, S.T, και Memmott, E.A. 2014. Houston, TX : s.n., 2014. 43rd Turbo-machinery & 30th Pump Users Symposia (Pump & Turbo 2014).

Riva , A., και συν. 2020. Hydrogen-powered aviation: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020, Τόμ. 45, 15, σσ. 8734-8758.

Robinson, A.H., και συν. 1995. *Elements of Cartography*. New York : John Wiley and Sons, 1995.

Ronevich, J., Shrestha, R. και San Marchi, C. 2022. *Misconceptions of hydrogen degradation of pipeline steels in existing natural gas infrastructure*. Ghent, Belgium : 4th International Conference on Steel and Hydrogen, 2022.

- Ronevich, J.A., D'Elia, R. και Hill, M.R. 2018.** Fatigue Crack Growth Rates of X100 Steel Welds in High Pressure Hydrogen Gas Considering Residual Stress Effects. *Engineering Fracture Mechanics*. 2018, 194, σσ. 42-51.
- Saeedmanesh, A., Mac Kinnon, M.A. και Brouwer, J. 2018.** Hydrogen is essential for sustainability. *Current Opinion in Electrochemistry*. 2018, σσ. 166-181.
- San Marchi, C., και συν. 2010.** Fracture and Fatigue of Commercial Grade API Pipeline Steels in Gaseous Hydrogen. In *ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Conference: Volume 6*,. 2010, σσ. 939-948.
- San Marchi, C.J., και συν. 2019.** Technical Basis for Master Curve for Fatigue Crack Growth of Ferritic Steels in High-Pressure Gaseous Hydrogen in ASME Section VIII-3 Code. *Codes and Standards*. San Antonio, Texas, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2019, Τόμ. 1.
- Schietekat, C., και συν. 2018.** Power-to-Hydrogen and Hydrogen-to-X pathways: Techno-economic analysis of an increasingly important flexibility option for the energy system. *Applied Energy*. 2018, Τόμ. 225, σσ. 889-911.
- Schouten, J. 2004.** Effect of H₂-injection on the Thermodynamic and Transportation Properties of Natural Gas. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2004, Τόμ. 11, 29, σσ. 1173–1180.
- sciencenews.gr.** [Ηλεκτρονικό]
<http://www.sciencenews.gr/afieromata/ydrogono/ydrogono5.asp> .
- Sciencenews.gr.** [Ηλεκτρονικό]
<http://www.sciencenews.gr/afieromata/ydrogono/ydrogono5.asp> .
- Sequeira, T. 2012.** Recommended Practices for Valves Used in Hydrogen Service. *American Fuel & Petrochemical Manufacturers Annual Meeting*. American Fuel & Petrochemical Manufacturers, 2012.
- Shi, Z.K., Jessen, K. και Tsotsis, T.T. 2020.** “Impacts of the Subsurface Storage of Natural Gas and Hydrogen Mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020, 45, σσ. 8757–8773.
- Statistical Surveys on the Sensitivities of Industrial End-Users to Gas Quality Fluctuations in Germany.* **Leicher, Ξ., και συν. 2017.** Rio de Janeiro : s.n., 2017. gehalten auf der International Gas Union Research Conference (IGRC).
- Sun, X., και συν. 2013.** Ammonia borane as a hydrogen carrier: dehydrogenation and regeneration. *Chemical Society Reviews*. 2013, Τόμ. 42, 3, σσ. 900-915.
- Sun, Yahui, και συν. 2018.** Tailoring magnesium based materials for hydrogen storage through synthesis: Current state of the art. *Energy Storage Materials*. January 2018, σσ. 168-198.
- Sweelssen, J., και συν. 2020.** “A Versatile Capacitive Sensing Platform for the Assessment of the Composition in Gas Mixtures. *Micromachines*. 2020, Τόμ. 2, 11, σ. 116.
- Tabkhi, F., και συν. 2008.** A Mathematical Framework for Modelling and Evaluating Natural Gas Pipeline Networks under Hydrogen Injection. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2008, 33, σσ. 6222-6231.

- Tarasov, Boris, και συν. 2021.** Metal hydride hydrogen storage and compression systems for energy storage technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*. April 2021.
- Termaath, C., και συν. 2006.** Emissions Reduction Benefits from Hydrogen Addition to Midsize Gas Turbine Feedstocks. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2006, 31, σσ. 1147–1158.
- Thaysen, E.M., και συν. 2021.** Estimating Microbial Growth and Hydrogen Consumption in Hydrogen Storage in Porous Media. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021, 151, σ. 111481.
- Timmerberg, S. και Kaltschmitt, M. 2019.** Hydrogen from Renewables: Supply from North Africa to Central Europe as Blend in Existing Pipelines – Potentials and Costs. *Applied Energy*. 2019, 237, σσ. 795-809.
- U.S. Energy Information Administration . 2009.** U.S. Natural Gas Pipeline Network. https://www.eia.gov/naturalgas/archive/analysis_publications/ngpipeline/ngpipelines_map.html. 2009.
- Wang, B., και συν. 2018.** An MILP Model for the Reformation of Natural Gas Pipeline Networks with Hydrogen Injection. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018, 43, σσ. 16141-16153.
- Weidner, E., και συν. 2016.** CEN -CENELEC Sector Forum Energy Management: Working Group Hydrogen : Final Report. Luxembourg: Publications Office, 2016.
- Wolf, E. 2015.** Large-scale hydrogen energy storage. *Elsevier B.V.* 2015.
- Wu, X., και συν. 2022.** From the perspective of new technology of blending hydrogen into natural gas pipelines transmission: mechanism, experimental study, and suggestions for further work of hydrogen embrittlement in high-strength pipeline steels. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2022, Τόμ. 47, 12, σσ. 8071-8090.
- Zabrzewski, L., και συν. 2017.** The Effect of Hydrogen Transported through a Gas Pipeline on the Functioning of Gas Compression Station Work. *AGH Drilling, Oil, Gas*. 2017, 33, σ. 959.
- Zhang, J., και συν. 2021.** Current research progress and perspectives on liquidhydrogen rich molecules in sustainable hydrogen storage. *Energy Storage Mate*. 2021, σσ. 35-69.
- Zhou, H., και συν. 2022.** Throttling characteristics and throttling coefficient prediction of pure hydrogen and hydrogen-blended natural gas. *Nat. Gas. Ind.* 2022, Τόμ. 42, 4, σσ. 139-148.
- Zivar, D., Kumar, S. και Foroozesh, J. 2020.** Underground hydrogen storage: a comprehensive review. *Int J Hydrogen Energy*. 2020.