

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΙΩΑΝΝΗΣ ΓΑΛΑΝΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Cohort 11, ΙΟΥΛΙΟΣ 2023

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Δρ. Καββαδίας Κοσμάς

(Όνομα)

(Υπογραφή)

Δρ. Καλδέλλης Ιωάννης

(Όνομα)

(Υπογραφή)

Δρ. Παπαποστόλου Χριστιάννα

(Όνομα)

(Υπογραφή)

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Γαλανόπουλος Ιωάννης του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου ΕΕΔ 202105 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Ενεργειακά και Περιβαλλοντικά Έργα του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Μηχανολόγων – Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Γαλανόπουλος Ιωάννης

Contents

1. Εισαγωγή	6
1.1. Γενικά στοιχεία για το υδρογόνο	6
1.2. Το υδρογόνο σήμερα	6
1.3. Το υδρογόνο στην Ευρώπη	8
1.4. Το υδρογόνο στην Ελλάδα	9
1.5. Το υδρογόνο στη βιομηχανία.....	10
1.6. Το υδρογόνο στις μεταφορές.....	10
2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΥΝΟΥ.....	12
2.1. Ιστορικά ατυχήματα	12
2.2. Ανάλυση δεδομένων ατυχημάτων.....	15
3. ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑ	18
3.1. Αποθήκευση και μεταφορά	19
3.2. Αγωγοί και δίκτυα	21
3.3. Υλικά αγωγών και δεξαμενών	23
4. ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	24
4.1. Ανίχνευση υδρογόνου	24
4.2. Χαρακτηριστικά φλόγας υδρογόνου.....	26
4.3. Περιοριστικός δείκτης οξυγόνου LOI	27
4.4. Αυτανάφλεξη υδρογόνου.....	28
5. Φυσιολογικοί κίνδυνοι.....	29
5.1. Ασφυξία.....	29
5.2. Θερμικό έγκαυμα	30
5.3. Κρυογενικό έγκαυμα	31
5.4. Έκρηξη/Τραυματισμός από κύματα.....	32
5.5. Υποθερμία	33
6. Φυσικοί κίνδυνοι.....	34
6.1. Ψαθυροποίηση μετάλλων.....	34
6.2. Ψαθυροποίηση χαμηλής θερμοκρασίας	36
6.3. Τεχνικές θραύσης υλικών.....	37
6.4. Θερμική συστολή υλικών	39
7. Χημικοί κίνδυνοι.....	39
7.1. Μίγματα H ₂ -Air, H ₂ -O ₂	39
7.2. Επίδραση αδρανών	41
7.3. Επίδραση αλογόνων.....	42
7.4. Θερμική αστάθεια	43

8.	Φαινόμενα εκρήξεων	44
8.1.	Ενέργεια / τρόπου ανάφλεξης	44
8.2.	Φαινόμενο BLEVE	47
8.3.	Έκρηξη/Επιπτώσεις έκρηξης	50
8.4.	Αποστάσεις απόσβεσης	52
8.5.	Αυτανάφλεξη.....	53
9.	Κίνδυνοι σε εγκαταστάσεις και αποθήκες H ₂	54
9.1.	Κίνδυνοι σε εγκαταστάσεις H ₂	54
9.2.	Κίνδυνοι στην αποθήκευση και στη μεταφορά H ₂	56
10.	Κίνδυνοι σε εφαρμογές H ₂ και εφαρμογές αυτοκίνησης και σταθμών ανεφοδιασμών 56	
10.1.	Κίνδυνοι σε εφαρμογές H ₂	56
10.2.	Κίνδυνοι σε εφαρμογές αυτοκίνησης	58
10.3.	Κίνδυνοι σε σταθμούς ανεφοδιασμών	60
11.	Επιπτώσεις σε υλικά και εξοπλισμό.....	63
11.1.	Δοχεία/δεξαμενές αερίου υδρογόνου.....	63
11.2.	Αγωγοί αερίου υδρογόνου.....	65
12.	Συστήματα ασφαλείας	66
12.1.	Inherently safer design	66
12.2.	Integrated Management Systems	71
13.	Νομοθεσία και προδιαγραφές.....	73
13.1.	Νομικές απαιτήσεις.....	73
13.2.	Ευρωπαϊκός κανονισμός	74
13.3.	Πρότυπα	75
13.4.	Βασικές νομοθεσίες ασφάλειας που σχετίζονται με το υδρογόνο	75
14.	Συστήματα ανίχνευσης.....	78
14.1.	Ανίχνευση	78
14.2.	Είδη αισθητήρων.....	80
14.3.	Ανίχνευσης φλόγας υδρογόνου	83
14.4.	Αναδυόμενες τεχνολογίες ανίχνευσης υδρογόνου	85
15.	Συμπεράσματα	87
16.	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	91

1. Εισαγωγή

1.1. Γενικά στοιχεία για το υδρογόνο

Τον τελευταίο καιρό γίνεται λόγος για το μέλλον του υδρογόνου, τόσο στην Ευρώπη, όσο και παγκόσμιο επίπεδο. Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο ή ως φορέας ενέργειας σε πολλές εφαρμογές, χωρίς να επιβαρύνει το περιβάλλον με CO₂ και προκαλεί σχεδόν μηδενική ατμοσφαιρική ρύπανση. Κατά αυτήν την έννοια, μπορεί να συμβάλει στην αποανθρακοποίηση της βιομηχανίας, των μεταφορών, της ηλεκτροπαραγωγής, προκειμένου να επιτευχθεί κλιματική ουδετερότητα το 2050, όπως επιτάσσει η συμφωνία του Παρισιού.

Φυσικά, το υδρογόνο από μόνο του δεν φτάνει για την πλήρη κλιματική ουδετεροποίηση. Ο συνδυασμός με τις ΑΠΕ είναι απαραίτητος, ώστε να υπάρχει ένα ευέλικτο ενεργειακό μίγμα και να παίζει κυρίαρχο λόγο στην αποθήκευση ενέργειας. Η ΕΕ είναι ιδιαίτερα φιλικά προσκείμενη σε αυτήν την τεχνολογία με διάθεση επενδύσεων 180-470 δισ. EUR έως το 2050 και στην κλίμακα των 3-18 δισ. EUR για το υδρογόνο ορυκτής προέλευσης χαμηλών ανθρακούχων εκπομπών. Επιπλέον, οι θέσεις εργασίας στον τομέα των εφαρμογών του υδρογόνου μπορεί να φτάσει έως 1 εκατομμύριο άτομα, άμεσα ή έμμεσα. Επίσης, η παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση θα μπορούσε να καλυφθεί έως το 24% (International Energy Agency, 2022).

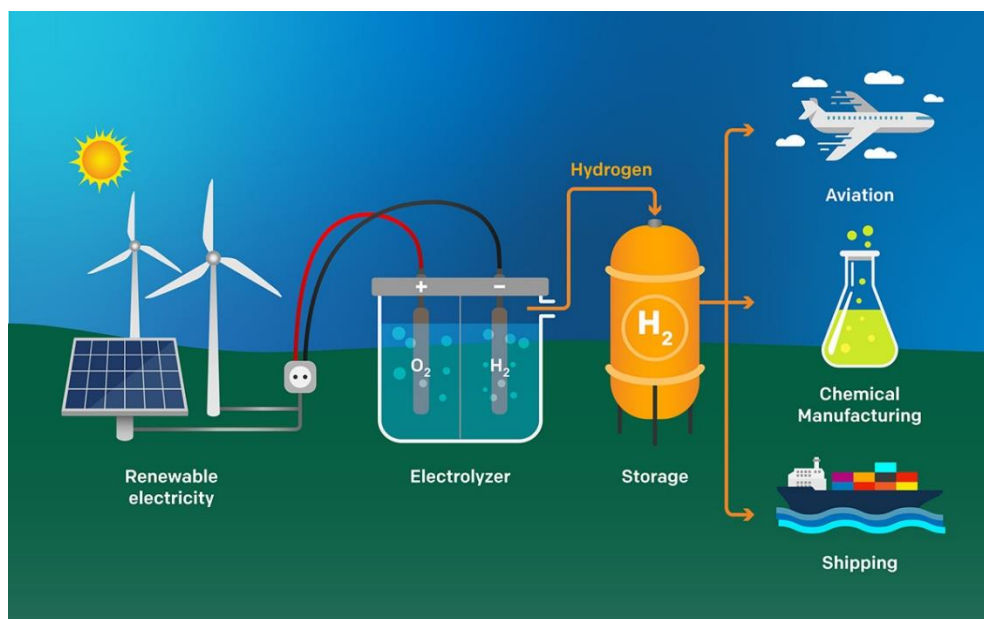
Ωστόσο, το υδρογόνο έχει συνδεθεί με σοβαρά ατυχήματα στο παρελθόν και οι φυσικές ιδιότητές του το καθιστούν ιδιαίτερο μέσο ως προς την ασφάλεια (Ministry of ecology, energy, sustainable development and town and country planning, 2009). Τα κύρια χαρακτηριστικά που προκαλούν το ενδιαφέρον είναι το μεγάλο εύρος ευφλεκτότητας και εκρηξιμότητα, η χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης, η υψηλή ταχύτητα διάδοσης της φλόγας, η ραγδαία διάχυση και η άνωση σε συνδυασμό με την συμπεριφορά του στην υγρή φάση. Το υδρογόνο είναι ελαφρύτερο του αέρα, άοσμο, καίγεται με άορατη φλόγα και όταν χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο εκλύει την περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα μάζας, σε σύγκριση με όλα τα γνωστά καύσιμα. Οι κίνδυνοι που υπάρχουν στην παραγωγή, την μεταφορά και την χρήση του υδρογόνου πρέπει να ελεγχθούν κατάλληλα σε επίπεδο σχεδιασμού των εφαρμογών, με οικονομικά αποδοτικό τρόπο, ώστε το υδρογόνο να μπορεί να διεισδύσει στην οικονομία της κλιματικής ουδετερότητας με ασφάλεια.

1.2. Το υδρογόνο σήμερα

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί με διάφορες μεθόδους, ανάλογα με την τεχνολογία παραγωγής υπάρχει και το αντίστοιχο περιβαλλοντικό αποτύπωμα εκπομπών. Η παγκόσμια ζήτηση του υδρογόνου το 2021 έφτασε τους 91Mt (International Energy Agency, 2022).

Περίπου 275 Mtoe ενέργειας χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υδρογόνου, ποσοστό που αντιστοιχεί στο 2% της παγκόσμιας πρωτογενούς ενεργειακής ζήτησης. Παρακάτω τα είδη του παραγόμενου υδρογόνου:

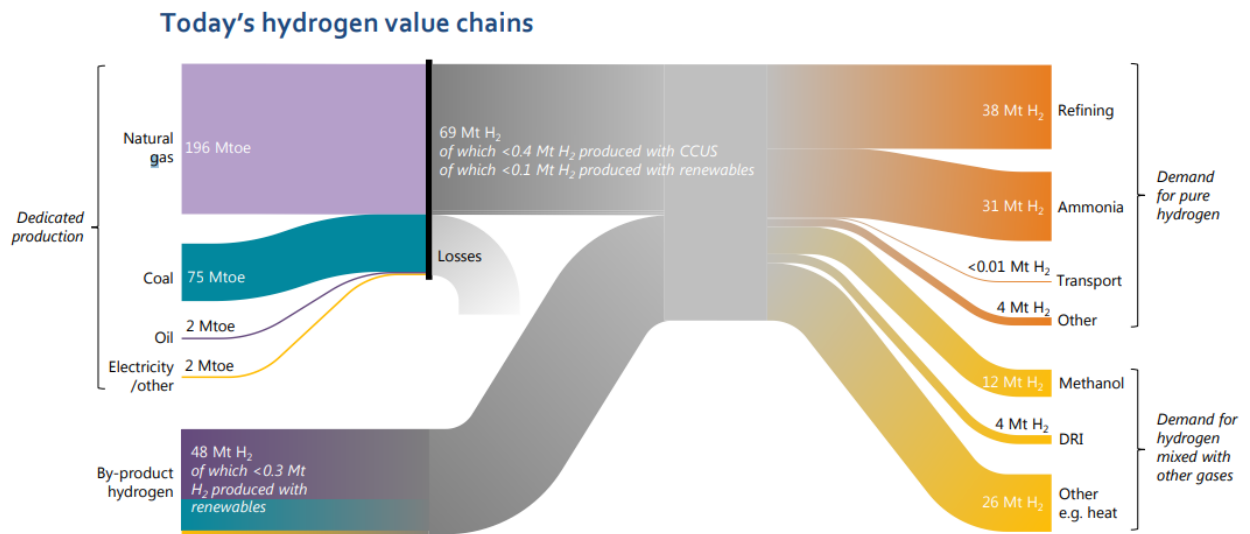
- **«Υδρογόνο που βασίζεται στην ηλεκτρική ενέργεια»** είναι αυτό που παράγεται με ηλεκτρόλυση του νερού σε κυψέλη ηλεκτρόλυσης που αντλεί ηλεκτρική ενέργεια. Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα εξαρτάται από την ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου. Η ηλεκτρόλυση καταλαμβάνει το 2% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου.
- **«Ανανεώσιμο υδρογόνο»** είναι το αυτό που παράγεται σε κυψέλη ηλεκτρόλυσης που αντλεί ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τη διαδικασία είναι σχεδόν μηδενικές.



Εικόνα 1: Αποτύπωση παραγωγής ανανεώσιμου υδρογόνου (πηγή: fuelcellsworks.com, accessed on 29/05/2022)

Το «**καθαρό υδρογόνο**» αναφέρεται στο ανανεώσιμο υδρογόνο.

- «**Υδρογόνο ορυκτών καυσίμων**» είναι αυτό που παράγεται από ορυκτά καύσιμα, όπως το φυσικό αέριο ή την αεριοποίηση του γαιάνθρακα. Αυτό αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο ποσοστό του υδρογόνου (περίπου τα ¾) που παράγεται σήμερα, και η παραγωγή του σχετίζεται με υψηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η παραγωγή αγγίζει τους 70 MtH₂, χρησιμοποιώντας 205 Bcm φυσικού αερίου, περίπου το 2% της παγκόσμιας ζήτησης. Ο άνθρακας υπολογίζεται σε ένα ποσοστό 23% της παγκόσμιας ζήτησής του να αφιερώνεται στο υδρογόνο, περίπου 107Mt περίπου το 2% της παγκόσμιας ζήτησης.
- Το «**υδρογόνο ορυκτών καυσίμων με δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα**» είναι υποκατηγορία του υδρογόνου ορυκτών καυσίμων, στην οποία τα αέρια του θερμοκηπίου που εκπέμπονται στο πλαίσιο της διαδικασίας παραγωγής υδρογόνου δεσμεύονται.
- Το «**υδρογόνο χαμηλών ανθρακούχων εκπομπών**» περιλαμβάνει το υδρογόνο ορυκτών καυσίμων με δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα και το υδρογόνο που βασίζεται στην ηλεκτρική ενέργεια, με σημαντικά μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, κατά τον πλήρη κύκλο ζωής σε σύγκριση με την υφιστάμενη παραγωγή υδρογόνου. Η πρώτη τεχνολογία μπορεί να δεσμεύσει μέχρι και το 90% των ρύπων, ενώ η δεύτερη εξαρτάται από το ενεργειακό μίγμα παροχής του ηλεκτρικού ρεύματος.
- Τα «**συνθετικά καύσιμα που παράγονται από υδρογόνο**» περιλαμβάνουν διάφορα αέρια και υγρά καύσιμα με βάση το υδρογόνο και τον άνθρακα. Για να θεωρούνται ανανεώσιμα τα συνθετικά καύσιμα, το μέρος του υδρογόνου του συνθετικού αερίου πρέπει να είναι ανανεώσιμο.

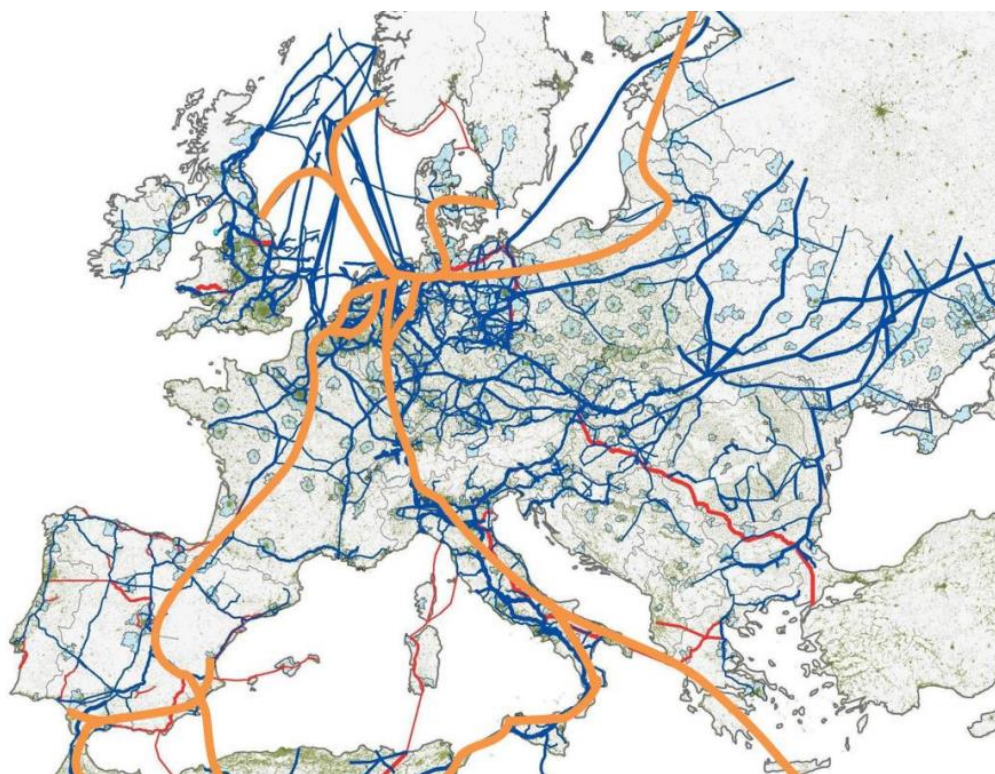


Εικόνα 2: Αλυσίδα αξίας υδρογόνου (πηγή: IEA The future of Hydrogen, 2019)

1.3. Το υδρογόνο στην Ευρώπη

Σύμφωνα με τις ανακοινώσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης (European Commission, 2020) η στρατηγική που σχεδιάζεται προβλέπει μια σταδιακή πορεία με τρεις φάσεις ανάπτυξης της οικονομίας του καθαρού υδρογόνου, με διαφορετική ταχύτητα, ανάλογα με τον εκάστοτε βιομηχανικό τομέα:

- Στην αρχική φάση (2020-24) στόχος είναι η αντικατάσταση της υφιστάμενης παραγωγής υδρογόνου για τις τρέχουσες χρήσεις του με υδρογόνο από ανανεώσιμες πηγές. Η τεχνολογία που θα αντικαταστήσει τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής του υδρογόνου μέχρι το 2024 θα είναι οι ηλεκτρολυτικές κυψέλες με ισχύ τουλάχιστον 6 Gigawatt για την καθαρή παραγωγή έως και ενός εκατομμυρίου τόνων ανανεώσιμου υδρογόνου. Συγκριτικά, η συνολική ισχύς των εγκατεστημένων ηλεκτρολυτικών κυψελών στην ΕΕ σήμερα είναι περίπου 1 Gigawatt.
- Στη δεύτερη φάση (2024-30), ο στρατηγικός στόχος είναι η εγκατάσταση ηλεκτρολυτικών κυψελών ανανεώσιμου υδρογόνου ισχύος τουλάχιστον 40 Gigawatt, καθιστώντας το υδρογόνο αναπόσπαστο μέρος του ενοποιημένου ενεργειακού συστήματος, για την παραγωγή έως και δέκα εκατομμυρίων τόνων στην ΕΕ. Η χρήση υδρογόνου θα επεκταθεί σταδιακά σε νέους τομείς, συμπεριλαμβανομένης της χαλυβουργίας, των φορτηγών, των σιδηροδρομικών μεταφορών και ορισμένων εφαρμογών στον τομέα των θαλάσσιων μεταφορών. Θα εξακολουθεί να παράγεται κυρίως κοντά στον χρήστη ή κοντά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σε τοπικά οικοσυστήματα.
- Σε μια τρίτη φάση, από το 2030 και εξής και έως το 2050, οι τεχνολογίες ανανεώσιμου υδρογόνου θα πρέπει να έχουν φθάσει σε ωριμότητα και να έχουν αναπτυχθεί σε ευρεία κλίμακα, προκειμένου να φτάσουν σε όλους τους δύσκολα απανθρακοποιήσιμους τομείς, στους οποίους άλλες εναλλακτικές λύσεις ενδέχεται να μην είναι εφικτές ή να έχουν υψηλότερο κόστος.



Εικόνα 3: Πιθανό μελλοντικό δίκτυο υδρογόνου (πηγή: Delft University of Technology, 2019)

1.4. Το υδρογόνο στην Ελλάδα

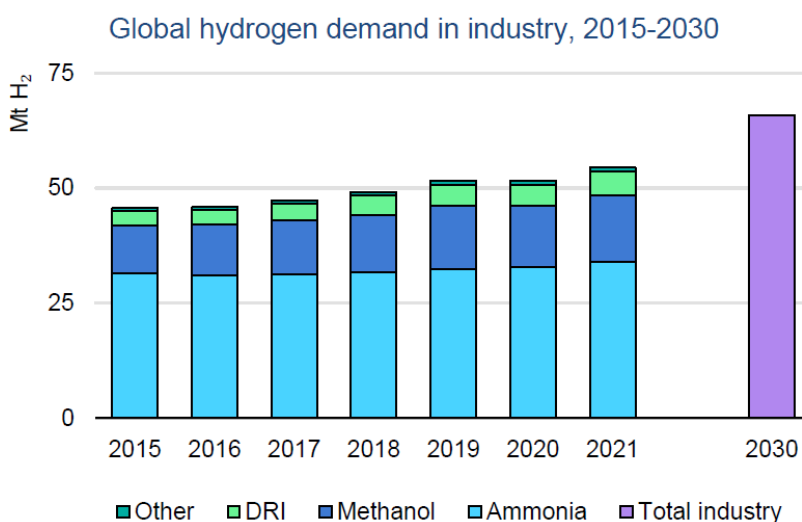
Το χαρτοφυλάκιο των σημαντικών έργων υδρογόνου δεν περιορίζεται στην Ευρώπη. Στην Ελλάδα αναμένεται να αναπτυχθεί ιδιαίτερα σημαντική η χρήση του υδρογόνου μέσω του προγράμματος «Κοινό Ευρωπαϊκό Ενδιαφέρον (IPCEI) Υδρογόνο». Κάποια από τα πιο σημαντικά έργα παρουσιάζονται παρακάτω σύμφωνα με πηγές (Καθημερινή – Οικονομία, 2021):

- **White Dragon:** Το σύμπλεγμα έργων για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου στη Δυτική Μακεδονία μέσω ηλεκτρόλυσης από ηλιακή ενέργεια και διανομής του μέσω του δικτύου του ΔΕΣΦΑ και του αγωγού TAP.
- **Blue Med:** Έργο της Motor Oil που συνίσταται στην παραγωγή μπλε υδρογόνου πολύ χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος και πράσινου υδρογόνου με ορίζοντα το 2025. Το project προβλέπει τη δημιουργία cluster ολοκληρωμένου κύκλου παραγωγής γαλάζιου και πράσινου H₂ για μεταφορά, διανομή και χρήση σε βιομηχανία και μεταφορές (λεωφορεία και πλοία).
- **Green HIPO:** Έργο της Advanced Energy Technologies (Advent Technologies) για την κατασκευή μονάδας παραγωγής καινοτόμων ηλεκτρολυτών και κυψελών καυσίμου. Οι συνδυασμένες κυψέλες καυσίμου θερμότητας και ενέργειας (CHP) σχεδιάζεται να παραχθούν από την Advent για το Project White Dragon. Η παραγωγή θα πραγματοποιείται στη γραμμή παραγωγής της εταιρείας, με εγκατάσταση στη Δυτική Μακεδονία.
- Οι προτάσεις που έχουν προκριθεί από τα κράτη μέλη της ΕΕ συμμετέχουν σε Συνεδρίες Πρόκλησης («Challenge Sessions») και σχετικά Workshops που συντονίζονται πλέον σε ευρωπαϊκό επίπεδο με στόχο την ενθάρρυνση ανάπτυξης συνεργασιών μεταξύ των έργων. Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση των συντονιστών, τα έργα Green HIPO, White Dragon και H₂CAT Tanks εντάσσονται στην υποκατηγορία του IPCEI «Τεχνολογίες

υδρογόνου» και το Blue Med και το H2CEM στην υποκατηγορία «απανθρακοποίηση μέσω υδρογόνου».

1.5. Το υδρογόνο στη βιομηχανία

Σήμερα οι κύριες χρήσεις του υδρογόνου στον κλάδο της βιομηχανίας είναι η παραγωγή αμμωνίας (34 Mt ζήτησης υδρογόνου), η παραγωγή μεθανόλης (15 Mt) και DRI (Direct Reduced Iron) για τη βιομηχανία του χάλυβα (5 Mt). Άλλες βιομηχανικές εφαρμογές αφορούν διάφορες παραγωγές ηλεκτρονικών, υαλουργίας και χημικών βιομηχανιών.



Εικόνα 4: Ποσοστά κατανάλωσης υδρογόνου (πηγή: IEA, Global Hydrogen Review 2022)

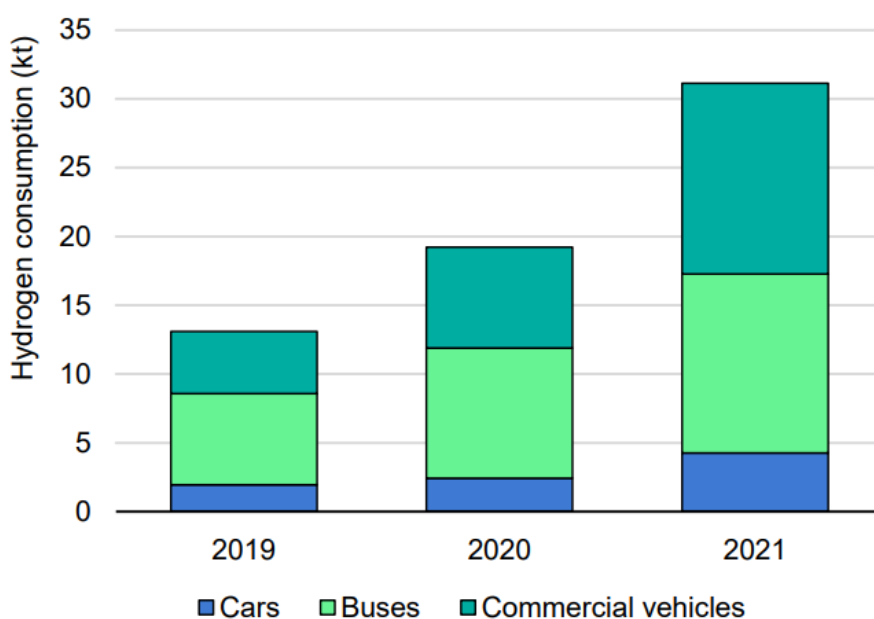
Το υδρογόνο, επίσης, χρησιμοποιείται και ως καύσιμο και στην Αεροδιαστημική Βιομηχανία. Το υγροποιημένο υδρογόνο σε συνδυασμό με το οξυγόνο έχει αποδειχθεί ότι λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων του υδρογόνου, απελευθερώνει πολύ μεγάλη ενέργεια σε σχέση με την μάζα του και αυτό εξυπηρετεί κατά πολύ τις διαστημικές εφαρμογές. Ωστόσο, η υγροποίηση του υδρογόνου και η διατήρησή του σε υγρή μορφή είναι πολύ δαπανηρή και αυτό την καθιστά ασύμφορη για χρήση σε άλλες βιομηχανίες, όπως την αυτοκίνηση.

Η ζήτηση του υδρογόνου αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά δεδομένων των τρεχουσών τάσεων και της αναγκαιότητας της κλιματικής ουδετερότητας. Σε αυτό το πλαίσιο εκτιμάται ότι η βιομηχανική ζήτηση υδρογόνου θα αυξηθεί κατά 11 Mt έως το 2030 σε σχέση με τα επίπεδα του 2021, δηλαδή να ξεπεράσει τα 60Mt.

1.6. Το υδρογόνο στις μεταφορές

Η ζήτηση του υδρογόνου στις μεταφορές αποτελεί το 0,03% του συνόλου της ζήτησης του (International Energy Agency, 2022). Σε γενικές γραμμές ο τομέας των μεταφορών μπορεί να γίνει βασικός χρήστης του υδρογόνου, με τα φορτηγά και τα βαρέα οχήματα, γενικότερα, να χρησιμοποιούν το μεγαλύτερο ποσοστό.

Hydrogen consumption in road transport by vehicle segment, 2019-2021



Σημείωση: Στα επαγγελματικά οχήματα περιλαμβάνονται τα ελαφρά επαγγελματικά οχήματα, τα φορτηγά μεσαίας χρήσης και φορτηγά βαρέως τύπου.

Εικόνα 5: Κατανάλωση υδρογόνου στις μεταφορές (πηγή: IEA, Global Hydrogen Review 2022)

Η ζήτηση υδρογόνου στις μεταφορές ανήλθε συνολικά σε πάνω από 30 kt το 2021, περισσότερο από 60% υψηλότερη από το προηγούμενο έτος, όπου η κατανάλωση πλησιάζει χωρίς να αγγίζει τους 20 kt. Η συνεχώς αυξανόμενη χρήση του υδρογόνου ενέπνευσε τη χρήση του σε επιβατικά τρένα και τον Αύγουστο του 2022 υπήρξε η πρώτη κυκλοφορία τρένου με κυψέλες υδρογόνου (www.alstom.com/press-releases-news/2021, accessed on 04/11/2022). Το υδρογόνο προσφέρει μια λύση για την απανθρακοποίηση των σιδηροδρομικών γραμμών ντίζελ, όπου η ηλεκτροδότηση είναι δύσκολη και οι αποστάσεις είναι πολύ μακρινές, προκειμένου να καλυφθούν με ηλεκτρικά τρένα με μπαταρία. Η διεύθυνση του υδρογόνου στον τομέα των σιδηροδρομικών μεταφορών αναμένεται να ξεκινήσει σύντομα.

Το ενδιαφέρον αυξάνεται, επίσης, για τη χρήση υδρογόνου και συνθετικών καυσίμων που παράγονται από υδρογόνο στους τομείς της ναυτιλίας και των αερομεταφορών, αν και οι τεχνολογίες είναι λιγότερο ώριμες από εκείνες για τις οδικές και τις σιδηροδρομικές μεταφορές.

Στον τομέα των αερομεταφορών εταιρείες έχουν ανακοινώσει την θέληση να μεταβούν σε απανθρακοποιημένες μεταφορές, μεταξύ άλλων και η Airbus, ωστόσο η πρώτη κυκλοφορία αεροσκάφους με κυψέλες υδρογόνου αναμένεται να γίνει μετά το 2030.

Τα δύο ανακοινωμένα σενάρια για την διεύθυνση του υδρογόνου στις βιομηχανικές μεταφορές θέλουν το ένα - Stated Policies Scenario- το 2030 χρήση του υδρογόνου σε ποσότητα 0,7 Mt, και το άλλο - Announced Pledges Scenario - 8 Mt, με το 60% να χρησιμοποιείται στη ναυτιλία.

2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΥΝΟΥ

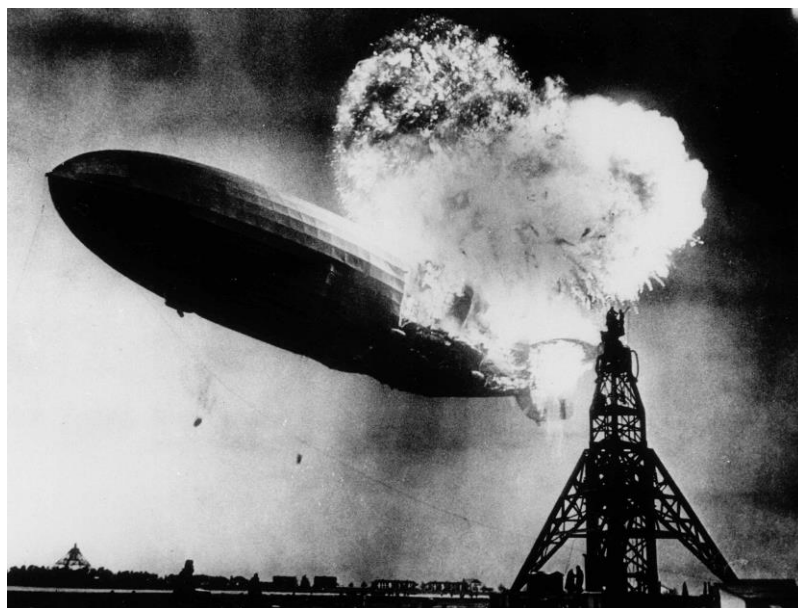
2.1. Ιστορικά ατυχήματα

Εάν συντελέσουν συγκεκριμένες συνθήκες υπάρχει ο κίνδυνος σοβαρού ατυχήματος. Ιστορικά, στη χρήση του υδρογόνου οφείλονται ατυχήματα που σημάδεψαν αρνητικά τη χρήση του.

Στις 6 Μαΐου του 1937 αερόπλοιο γερμανικής ταυτότητας έπιασε φωτιά εν ώρα πτήσης. 200.000 m³ υδρογόνου αναφλέχθηκαν σε λιγότερο από ένα λεπτό, σκοτώνοντας 35 ανθρώπους, οι οποίοι πήδηξαν να σωθούν.

Με πειραματικές μεθόδους ο καθηγητής Dr. Konstantinos Giapis του πανεπιστημίου Caltech της Καλιφόρνια εκτίμησε ότι το αερόπλοιο έδωσε σπινθήρα, ενώ υπήρχε διαρροή υδρογόνου με αποτέλεσμα την μοιραία έκρηξη.

Η ηλεκτροστατική φόρτιση από τον καιρό και η τοποθέτηση σχοινιών στο έδαφος, που βοήθησε την περαιτέρω φόρτιση, έκανε το αερόπλοιο να λειτουργεί σαν πλέγμα πυκνωτών δημιουργώντας πολλαπλούς σπινθήρες, που σε συνδυασμό με την διαρροή, προκάλεσαν την έκρηξη (Caltech.edu, accessed on 27/06/2022).



Εικόνα 6: Φωτιά σε αερόπλοιο, Hindenburg (πηγή: Accidentology involving hydrogen, 2009)

Στις 28 Ιανουαρίου του 1986 το διαστημόπλοιο Challenger και 73 δευτερόλεπτα μετά την εκτόξευση του από τον σταθμό Cape Canaveral, Florida, ανατινάχθηκε μπροστά στα μάτια χιλιάδων θεατών και μπροστά στις οθόνες όλου του πλανήτη, σκοτώνοντας το πλήρωμα των 7 ατόμων.

Τη συγκεκριμένη μέρα υπήρχαν συνθήκες ψύχους και οι μηχανικοί εξέφρασαν την ανησυχία τους για την εκτόξευση. Χωρίς να δοθεί σημασία, ο προγραμματισμός παρέμεινε, επιφέροντας το μοιραίο αποτέλεσμα.

Κάποιοι σύνδεσμοι λόγω του ψύχους αστόχησαν, προκαλώντας διαρροή καυσίμου στη δεξιά δεξαμενή αποθήκευσης καυσίμου, και στη συνέχεια ανάφλεξη, καταλήγοντας σε έκρηξη.

Βασικό στοιχείο στην υπόθεση είναι η κουλτούρα ανοχής σε αποκλίσεις ασφάλειας, καθώς οι επισημάνσεις των μηχανικών αγνοήθηκαν (U.S. Government, 1986).



Εικόνα 7: Διαστημόπλοιο Challenger (πηγή: history.com, accessed on 29/06/2022)

Το 2007 σε μία παράδοση ρουτίνας αερίου υδρογόνου συνέβη μια θανατηφόρα έκρηξη σε ένα εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας στο Muskingum του Οχάιο. Συστάθηκε επιτροπή για διερεύνηση της αποτυχίας και την κατανόηση του πώς θα μπορούσε να βελτιωθεί η ασφάλεια του υδρογόνου, για την πρόληψη μελλοντικών συμβάντων.

Η έρευνα αποκάλυψε ως αίτια πρόκλησης του συμβάντος, μεταξύ άλλων, έλλειψη των βέλτιστων πρακτικών που σχετίζονται με τη συντήρηση, το σχεδιασμό του συστήματος, τον εξαερισμό και τον αερισμό των συστημάτων του υδρογόνου (Accident report OSHA, 2007).

Ο οδηγός του φορτηγού παρέδιδε το αέριο υδρογόνο, για να γεμίσει δύο δοχεία αποθήκευσης 185 κυβικών μέτρων στο εργοστάσιο. Το αέριο υδρογόνο θα χρησιμοποιούταν για την ψύξη της γεννήτριας στο εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας. Εκείνη τη στιγμή μάρτυρες άκουσαν έναν δυνατό θόρυβο. Ήταν το αέριο υψηλής πίεσης που διοχετεύονταν μέσω μιας ανακουφιστικής βαλβίδας στην ατμόσφαιρα και μέσα σε 15 έως 20 δευτερόλεπτα, το αέριο υδρογόνο εξερράγη, σκοτώνοντας τον υπάλληλο και τραυματίζοντας οκτώ άλλα άτομα. Η έρευνα αποκάλυψε ότι το αέριο υδρογόνο πίεσε έναν δίσκο θραύσης, που ήταν συνδεδεμένος σε έναν από τους κυλίνδρους υδρογόνου. Καθώς η καθορισμένη πίεση του δίσκου θραύσης ήταν μεταξύ 3500 και 4000 psi και η μέγιστη πίεση που θα μπορούσε να ασκηθεί στο σύστημα κατά την πλήρωση ήταν 2600 psi, ο δίσκος θραύσης απέτυχε πολύ κάτω από την προβλεπόμενη πίεση. Η απελευθέρωση υδρογόνου μέσω των σωληνώσεων εξαερισμού ανακούφισης, που κατέληγε εξωτερικά πάνω από την οροφή, προκάλεσε, επίσης, την αποτυχία και τη διάσπαση του χάλκινου σωλήνα εξαερισμού σε γωνία 45 μοιρών

κάτω από την οροφή, απελευθερώνοντας, έτσι, αέριο υδρογόνο. Αυτό επέτρεψε στο αέριο να συσσωρευτεί σε ένα μεγάλο σύννεφο, που στη συνέχεια αναφλέχθηκε και εξερράγη.

Πιο αναλυτικά:

1. Το συμβάν ξεκίνησε με την πρόωρη αστοχία ενός δίσκου θραύσης στη δεξαμενή αποθήκευσης. Αυτή η αποτυχία από μόνη της δεν θα έπρεπε να έχει οδηγήσει στην έκρηξη. Αντίθετα, το υδρογόνο θα έπρεπε να έχει διαφύγει μέσω ενός σωστά σχεδιασμένου συστήματος εξαερισμού και να διαχέεται ακίνδυνα στο περιβάλλον πάνω από την τέντα.
2. Στη συνέχεια, το αέριο υδρογόνο συσσωρεύτηκε κάτω από μια ακατάλληλα σχεδιασμένη τέντα πριν από την ανάφλεξη. Εντοπίστηκαν πολλαπλές πιθανές πηγές ανάφλεξης στην τέντα.



Εικόνα 7: Εργοστάσιο Muskingum, Ohio (πηγή: <https://wha-international.com/>, accessed on 18/12/2022)

Ριζικές αιτίες του συμβάντος

1. Δίσκος θραύσης ακατάλληλου μεγέθους – Η κατηγορία του δίσκου θραύσης σχετικά με την πίεση λειτουργίας του είχε ληφθεί υπόψιν κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού από στοιχεία του Υπουργείου Μεταφορών των ΗΠΑ (DOT), αντί της Αμερικανικής Εταιρείας Μηχανολόγων Μηχανικών (ASME), που απαιτούνταν για αυτό τον δίσκο. Ο εν λόγω δίσκος δεν είχε συντηρηθεί καταλλήλως.
2. Καμία διαχείριση αλλαγής για τη συντήρηση δίσκου θραύσης – Η διαχείριση της αλλαγής δεν ακολουθήθηκε κατά την αντικατάσταση του δίσκου ρήξης μόλις έξι

- μήνες πριν από το συμβάν. Εγκαταστάθηκε λανθασμένος τύπος δίσκου και χρησιμοποιήθηκαν εξαρτήματα με αμφισβητήσιμη συμβατότητα για τη σύνδεση.
3. Ενδείξεις διάβρωσης στο δίσκο θραύσης – Λόγω ακατάλληλων πρακτικών συντήρησης, οι έξοδοι των σωληνώσεων εξαερισμού χωρίς καπάκι θα μπορούσαν να έχουν επιτρέψει την είσοδο νερού στο σύστημα. Η συσσώρευση νερού μπορεί να είχε προκαλέσει διάβρωση που βρέθηκε στους δίσκους ρήξης.
 4. Σωληνώσεις υδρογόνου σε κακή κατάσταση – Οι σωληνώσεις εξαερισμού του υδρογόνου κατασκευάστηκαν ακατάλληλα από χαλκό λεπτού τοιχώματος, δεν αξιολογήθηκαν για την πίεση ή την επιτάχυνση του αερίου και είχαν υποστεί σοβαρή διάβρωση με πολλές περιοχές τοπικής λέπτυνσης. Το ερμάριο του ρυθμιστή, επίσης, δεν σχεδιάστηκε με γνώμονα την ασφάλεια υδρογόνου, καθώς το ερμάριο δεν είχε εξαερισμό, ενώ είχε ανακουφιστικές βαλβίδες μέσα. Μια τοπική πυρκαγιά σημειώθηκε στο ερμάριο μετά από την αρχική απελευθέρωση υδρογόνου.
 5. Ακατάλληλη σχεδίαση σωλήνων υδρογόνου – Η αντοχή της χάλκινης σωλήνωσης διέφερε σε όλο το σύστημα, συμπεριλαμβανομένου κάποιου χαλκού λεπτού τοιχώματος που προοριζόταν για νερού. Κατά τη διάρκεια της απελευθέρωσης του υδρογόνου, η λεπτή χάλκινη σωλήνωση υπερπίεστηκε και εν μέρει ισιώθηκε κάτω από τις δυνάμεις ώθησης. Μία γωνία στη σωλήνωση εξαερισμού εξερράγη, πιθανότατα λόγω πρόσκρουσης εκτοξευόμενου αντικειμένου. Το σύστημα εξαερισμού ήταν κακώς σχεδιασμένο και ανίκανο να αντέξει την ώθηση και την πίεση μιας απελευθέρωσης H₂.
 6. Η τέντα δεν έχει σχεδιαστεί για αερισμό υδρογόνου – δεν έχει σχεδιαστεί για αερισμό, όπως απαιτείται για την ασφάλεια υδρογόνου και τη συμμόρφωση με τους κώδικες. Όταν απελευθερώθηκε υδρογόνο, το ανερχόμενο αέριο αναγκάστηκε να ανέβει στη γωνιακή γραμμή της οροφής και συγκεντρώθηκε στον χώρο.

Η προέλευση της έκρηξης ήταν κάτω από την τέντα, αν και η ακριβής πηγή ανάφλεξης είναι άγνωστη. Αυτό συμβαίνει συχνά με αστοχίες υδρογόνου, επειδή η ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια ανάφλεξης του είναι τόσο χαμηλή. Η ηλεκτροστατική εκκένωση, τα ηλεκτρικά φώτα στην τέντα και οι ηλεκτρικοί πίνακες ήταν όλα πιθανές πηγές ανάφλεξης.

Αποτυχία μάθησης από προηγούμενα περιστατικά – Ένα παρόμοιο, λιγότερο σοβαρό περιστατικό συνέβη περίπου 2 χρόνια πριν σε μια εγκατάσταση που ανήκει στην ίδια εταιρεία. Ένας δίσκος θραύσης απέτυχε πρόωρα, με αποτέλεσμα την αστοχία ενός χάλκινου σωλήνα εξαερισμού και τη συσσώρευση και ανάφλεξη υδρογόνου. Μια έρευνα αποκάλυψε διδάγματα που θα είχαν αποτρέψει το πολύ μεγαλύτερο θανατηφόρο περιστατικό στο αδελφό εργοστάσιο, εάν είχαν εφαρμοστεί σωστά.

2.2. Ανάλυση δεδομένων ατυχημάτων

Πολλές μελέτες έχουν διεξαχθεί για την ασφάλεια του υδρογόνου. Αρχικώς η ανάλυση των ατυχημάτων αφορούσε το υγροποιημένο υδρογόνο και, κυρίως, τη μεταφορά και αποθήκευση του με 96 καταγεγραμμένα περιστατικά το 1978 από το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν πιο διευρυμένες μελέτες, οι οποίες ανέλυαν 400 περιστατικά και άνω, που είχαν συμβεί τον βιομηχανικό τομέα κατά την περίοδο 1965-1977. Μεταγενέστερα εξετάστηκε η ασφάλεια των μεταφορών και των οχημάτων που χρησιμοποιούν ως κινητήρια δύναμη το υδρογόνο.

Στη συνέχεια, για να μπορέσει να κατανοηθεί η ατυχηματολογία του υδρογόνου θα έπρεπε να διαχειριστούν την διερεύνηση των ατυχημάτων φορείς που έχουν την επάρκεια, την

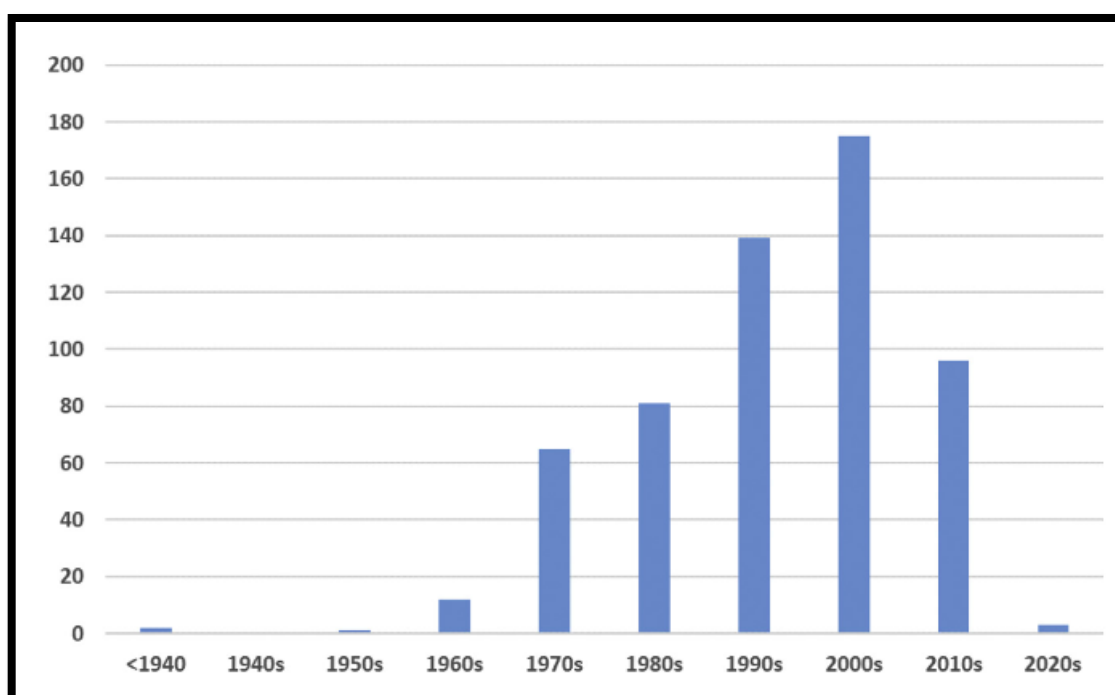
πρόσβαση στην πληροφορία και τη δυνατότητα να επηρεάσουν τους νομοθέτες. Υπό αυτήν την έννοια ανέλαβαν φορείς, όπως οι παρακάτω στην Αμερική:

- Chemical Hazard Investigation Board CSB
- National Transportation Safety Board NTSB
- Occupational Safety and Health Administration OSHA

Και οι παρακάτω στην Ευρώπη:

- French database ARIA of the Bureau for Analysis of Industrial Risks and Pollution of the French Ministry of Environment στη Γαλλία
- EU database eMARS of the Joint Research Centre (JRC) of the European Commission σε επίπεδο ευρωπαϊκής ένωσης
- Institution of Chemical Engineers στη Βρετανία

Οι παραπάνω φορείς ανέλαβαν την επίσημη διερεύνηση των ατυχημάτων που προκαλούνται από το υδρογόνο και συνέβαλαν σημαντικά στην κατανόηση των κινδύνων, στην ανάπτυξη μέτρων πρόληψης και μέτρων περιορισμού των καταστροφών. Η επίσημη βάση δεδομένων πλέον που είναι στη διάθεση των μελετητών και έχει καταρτιστεί σε επίπεδο ευρωπαϊκής ένωσης είναι η European Incident and Accident Database (HIAD). Πιο συγκεκριμένα, η σύγχρονη βάση δεδομένων HIAD 2 περιλαμβάνει αναλύσεις και στατιστικά με πάνω από 700 περιστατικά.



Διάγραμμα 8: Αριθμός συμβάντων ανά δεκαετία (πηγή: Statistics, lessons learned and recommendations from analysis of HIAD 2.0 database, Wen et al, 2022)

Στην παραπάνω ανάλυση περιστατικών υδρογόνου αναγνωρίστηκαν έξι κατηγορίες αιτιών.

Οι τρεις πρώτες κατηγορίες αφορούν τον σχεδιασμό του συστήματος, υλικά, μεθοδολογίες κατασκευής και εγκατάσταση:

- Εσφαλμένη σχεδίαση συστήματος υποδοχής και λειτουργίας του υδρογόνου: Το σύστημα δεν ήταν σωστά σχεδιασμένο για τις συνθήκες λειτουργίας ή τη χρήση του υδρογόνου.

Σχετικά παραδείγματα: επιλογή μη συμβατών στοιχείων με το υδρογόνο, έλλειψη αντικερηκτικού εξοπλισμού κατάλληλης κλάσης, απρόβλεπτη εμφάνιση του επικίνδунου μείγματος αερίων, απρόβλεπτα φορτία πίεσης ή θερμοκρασίας, επιλογή εξοπλισμών ασφαλείας μικρότερης αξιοπιστίας.

- Αστοχία υλικού/κατασκευής: Αν και μπορεί να είχε επιλεγθεί σωστό στοιχείο, δεν λειτούργησε σωστά λόγω λάθους κατασκευής/συναρμογής κ.α.

- Σφάλμα εγκατάστασης: Παρόλο που ήταν το σωστό στοιχείο που επιλέχτηκε και εφαρμόστηκε, δυσλειτουργούσε λόγω ακατάλληλης εγκατάστασης ή συντήρησης.

Άλλοι τρεις αιτιώδεις παράγοντες σχετίζονται με τον άνθρωπο, και αποτυπώνονται με αλληλένδετο τρόπο: η εργασία, το άτομο και ο οργανισμός.

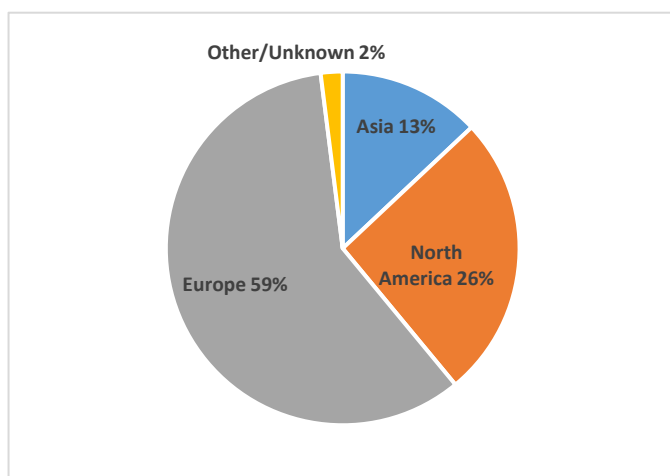
Ο «οργανισμός» αναφέρεται ως «σύστημα διαχείρισης ασφάλειας» στην οδηγία Seveso III (European Union, 2012). Σε αρκετές περιπτώσεις, οι βαθύτερες αιτίες εντοπίστηκαν στην απουσία επαρκούς κουλτούρας ασφάλειας, έλλειψη εκπαίδευσης, έλλειψη διαδικασιών

Για να μπορέσει να υπάρξει μία ενιαία προσέγγιση ανάμεσα στους διαφορετικούς αναλυτές οι παρακάτω ομαδοποιήσεις καταρτίστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις των συμβάντων:

Εργασιακοί παράγοντες: ακατάλληλος σχεδιασμός εργασίας, εξοπλισμού και επιβλαβής αλληλεπίδραση ανθρώπου με εξοπλισμό, ελαττώματα σχεδιασμού, λάθος διαδικασίες, στρεσογόνοι παράγοντες όπως: υψηλός φόρτος εργασίας, θορυβώδεις και δυσάρεστες συνθήκες εργασίας, διατάραξη προσοχής κ.λπ.

- Ατομικοί/ανθρώπινοι παράγοντες: ανεπαρκείς δεξιότητες και ικανότητες, ακατάλληλη επιλογή προσωπικού, προσωπικό με ιατρικό ιστορικό κ.λπ.

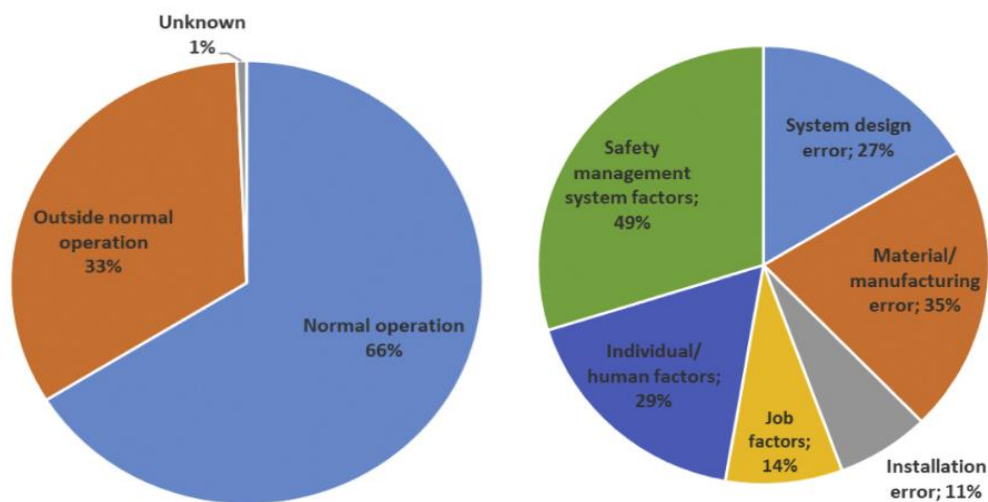
- Σύστημα διαχείρισης της ασφάλειας: κακός σχεδιασμός του συστήματος, ανεπαρκής δέσμευση της διοίκησης, έλλειψη συστημάτων ασφαλείας, ελλιπής εκπαίδευση, αποτυχία μάθησης από προηγούμενα περιστατικά, μονόδρομη επικοινωνία, έλλειψη συντονισμού και σαφής ορισμός των ευθυνών, ανεπαρκής διαχείριση της υγείας και της ασφάλειας.



Διάγραμμα 9:

Γεωγραφική κατανομή ατυχημάτων, Κατηγοριοποίηση περιστατικών

(πηγή: Statistics, lessons learned and recommendations from analysis of HIAD 2.0 database, Wen et al, 2022)



Διάγραμμα 10, 11: Λειτουργικές συνθήκες, Αιτίες πρόκλησης συμβάντων (πηγή: Statistics, lessons learned and recommendations from analysis of HIAD 2.0 database, Wen et al, 2022)

Συνοπτικά, όλα τα παραπάνω περιστατικά οδηγούν σε συγκεκριμένα συμπεράσματα που αφορούν στην πρόληψη και αντιμετώπιση συμβάντων με την εξής κατηγοριοποίηση:

- Σχεδιασμός συστημάτων
- Κατασκευή συστημάτων, εγκατάσταση και τροποποίηση
- Ανθρώπινοι παράγοντες
- Έκτακτη ανάγκη

Επίσης, το βασικό συμπέρασμα είναι ότι τα περιστατικά είναι αποτέλεσμα πολλών άλλων περιστατικών, τα οποία εάν είχαν συμβεί ξεχωριστά ενδεχομένως να είχαν μικρή σημασία, ο συνδυασμός τους όμως είναι η αιτία πρόκλησης.

3. ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑ

Όπως και άλλα καύσιμα ή άλλοι φορείς ενέργειας, το υδρογόνο παρουσιάζει συγκεκριμένους κινδύνους, λόγω των ιδιοτήτων του και των χαρακτηριστικών των εφαρμογών του. Τέτοια ζητήματα, όπως και πιθανά συμβάντα, μπορούν να επιβραδύνουν, ή ακόμα και να αποτρέψουν, την ανάπτυξη των εφαρμογών, εάν δεν αντιμετωπισθούν κατάλληλα.

Ωστόσο, δεν σημαίνει ότι κίνδυνοι και περιπτώσεις ατυχημάτων δεν υπάρχουν και με τα υφιστάμενα, καθιερωμένα και ευρέως διαδεδομένα ενεργειακά προϊόντα (βενζίνη, ντίζελ, φυσικό αέριο, ηλεκτρική ενέργεια, άνθρακας), με τους χρήστες να επιδεικνύουν εξοικείωση και να υποτιμούν χαρακτηριστικούς- σε κάποιες των περιπτώσεων- κινδύνους, όπως ευφλεκτότητα, πιθανή καρκινογένεση, τοξικότητα κ.α. Ωστόσο, η διαχείριση αλλαγής, τόσο από πλευράς τεχνολογιών, όσο και σε ανθρώπινο επίπεδο, πρέπει να αντιμετωπισθεί κατάλληλα.

Το υδρογόνο ως ελαφρύ αέριο μικρών μορίων απαιτεί ειδικό εξοπλισμό και διαδικασίες για να εξασφαλισθεί η ασφαλής διαχείρισή του. Διαθέτει σύσταση εξαιρετικά μικρής ποσότητας όγκου, η οποία μπορεί να διαφεύγει μέσω συνδέσμων ορισμένων υλικών (σε μεγαλύτερο βαθμό από το φυσικό αέριο), αυξάνοντας την πιθανότητα αστοχίας (Γρηγοριάδης Δημήτριος

Παναγιώτης, 2014). Το συγκεκριμένο θέμα αφορά, κατά πολύ, το πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί το υφιστάμενο δίκτυο φυσικού αερίου για την μεταφορά υδρογόνου.

Το υδρογόνο είναι ένα μη τοξικό αέριο, αλλά η υψηλή ταχύτητα φλόγας, το ευρύ φάσμα ανάφλεξης και η χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης το καθιστούν ιδιαίτερα εύφλεκτο. Γενικότερα, όμως, λόγω της άνωσης και της διάχυσης μπορεί να διαλυθεί και να απομακρυνθεί γρήγορα σε ένα χώρο. Έχει φλόγα που δεν φαίνεται με γυμνό μάτι, είναι άχρωμο και άοσμο, καθιστώντας την ανίχνευσή του δύσκολη (Γρηγοριάδης Δημήτριος Παναγιώτης, 2014).

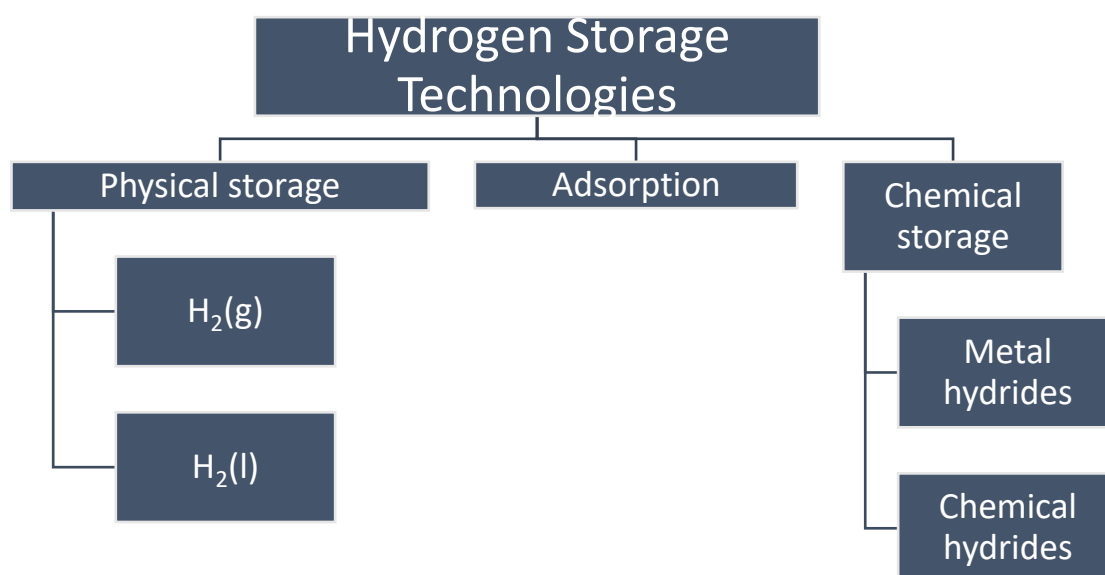
3.1. Αποθήκευση και μεταφορά

Εφόσον παραχθεί το υδρογόνο θα πρέπει να μεταφερθεί και να αποθηκευτεί στους χώρους των εγκαταστάσεων χρήσης του με ασφαλή τρόπο. Το υδρογόνο έχει σημείο βρασμού $-252.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, για αυτόν τον λόγο, η αποθήκευση του σε υγρή μορφή απαιτεί εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες και τη δέσμευσή του σε οργανικές κυψέλες, οι οποίες μέσω χημικών αντιδράσεων μπορούν να απορροφήσουν ή να αποδεσμεύσουν υδρογόνο. Από την άλλη πλευρά, το υδρογόνο σε αέρια μορφή, όντας ένα αέριο με πολύ μικρή πυκνότητα (1kg υδρογόνου καταλαμβάνει 11 m^3), όταν αποθηκεύεται σε συνθήκες περιβάλλοντος απαιτεί υψηλή πίεση, ώστε να αποκτήσει την ίδια ενεργειακή πυκνότητα με το κρυογενικό υδρογόνο (Joseph Morelos, 2017).

Τα συστήματα αποθήκευσης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τα μεγάλα συστήματα αποθήκευσης για μεταφορά και διανομή, και τα μικρά συστήματα, που είναι εγκατεστημένα σε χώρους για χρήση.

Μεγάλα συστήματα αποθήκευσης

Οι κατηγορίες αποθήκευσης των μεγάλων συστημάτων κατηγοριοποιούνται ως εξής : Andersson and Grönkvist, 2019, ανάλογα με την αλληλεπίδραση του υδρογόνου με την διάταξη που το περιέχει.



Διάγραμμα 13: Μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου (πηγή: Large-scale storage of hydrogen, Andersson & Gronkvist 2019)

Συνοπτικά οι μέθοδοι αποθήκευσης παρουσιάζονται παρακάτω:

Αποθήκευση σε φυσική μορφή

Η αποθήκευση του καθαρού υδρογόνου μπορεί να λάβει χώρα είτε σε αέρια, είτε σε υγρή μορφή. Το υδρογόνο σε αέρια μορφή απαιτεί συμπίεση. Ο βαθμός συμπίεσης εξαρτάται από την εφαρμογή και το κόστος, ενώ συνήθως η πίεση δεν υπερβαίνει τα 100 bar για δοχεία υπέργεια, και τα 200 bar για δοχεία υπόγεια. Για αποθήκευση σε υψηλότερη πίεση απαιτούνται υλικά υψηλότερης αντοχής, καθιστώντας την μη βιώσιμη οικονομικά για τις περισσότερες εφαρμογές. Η αποθήκευση του αέριου υδρογόνου γίνεται σε βιομηχανικούς κυλίνδρους, σε σφαιρικά πιεστικά δοχεία έως 20 bar και σε σωληνωτούς αγωγούς, έως 100 bar.

Το υδρογόνο σε υγρή μορφή έχει πολύ υψηλή πυκνότητα και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται υψηλή ενεργειακή αποθήκευση σε περιέκτες, που μπορούν εύκολα να τοποθετηθούν σε βιομηχανικούς ή εμπορικούς χώρους για χρήση. Ωστόσο, η διαδικασία της υγροποίησης είναι αρκετά ενεργοβόρα, κυρίως λόγω του χαμηλού σημείο βρασμού του υδρογόνου, και του γεγονότος ότι δεν παγώνει σε διεργασίες στραγγαλισμού έως τους -73°C. Τα δοχεία αποθήκευσης υγροποιημένου υδρογόνου έχουν μονωτικές ιδιότητες με διπλά τοιχώματα με κενό ανάμεσα, ώστε να ελαχιστοποιείται η μεταφορά θερμότητας από το περιβάλλον.

Προσρόφηση

Η αποθήκευση υδρογόνου μέσω προσρόφησης εκμεταλλεύεται τους μοριακούς δεσμούς van der Waals μεταξύ των μορίων του υδρογόνου και ενός υλικού με μεγάλη ειδική επιφάνεια, όπως ένα πορώδες υλικό σαν το κράμα μαγγανίου ή τιτανίου (Akiba, 1999). Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο εφαρμόζονται υψηλές πιέσεις μεταξύ 10-100 bar, και χαμηλές θερμοκρασίες με το πιο συνηθισμένο μέσο ψύξης, το άζωτο. Τα υλικά προσρόφησης μπορεί να είναι τα μεταλλικά οργανικά πλαίσια, πορώδη υλικά με βάση τον άνθρακα, πορώδη πολυμερή και ζεόλιθοι.

Υδρίδια μετάλλων

Τα υδρίδια μετάλλων είναι σχηματισμοί που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση ή του μοριακού υδρογόνου με μέταλλα, είτε στην καθαρή τους μορφή, είτε διαμεταλλικά σε διάφορους σχηματισμούς. Με την συνεισφορά της ενέργειας το μοριακό υδρογόνο διαχέεται στην κρυσταλλική δομή του στέρεο, καταλαμβάνοντας θέσεις εντός του κρυσταλλικού πλέγματος.

Η απελευθέρωση του υδρογόνου από αυτά μπορεί να γίνει είτε με θέρμανση (θερμόλυση), είτε με αντίδραση με το νερό (υδρόλυση). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα υδρίδια λιθίου, τιτανίου, ασβεστίου και ζirkονίου (αποθήκευση υδρογόνου από υλικά με βάση το μαγνήσιο (Χρήστος Κ. Χαλαζιάς, 2020).

Χημικά υδρίδια

Τα χημικά υδρίδια έχουν χημικούς δεσμούς με το υδρογόνο. Τα χημικά υδρίδια είναι υγρά σε κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος, γεγονός που εξυπηρετεί τις μεταφορές και την αποθήκευση. Τα χημικά τα οποία μπορούν να αναλάβουν το ρόλο δέσμευσης του υδρογόνου είναι: η μεθανόλη, η αμμωνία, το φορμικό οξύ (Αποθήκευση υδρογόνου από υλικά με βάση το μαγνήσιο (Χρήστος Κ. Χαλαζιάς, 2020).

Μικρά συστήματα αποθήκευσης

Τα μικρά συστήματα αποθήκευσης, συνήθως, εκμεταλλεύονται κάποια από τις παραπάνω μεθόδους σε τοπικές εφαρμογές. Για την αποθήκευση σε εγκαταστάσεις με μικρή ζήτηση εφαρμόζονται συστήματα βιομηχανικών φιαλών ή δοχεία χαμηλής πίεσης. Μια μορφή αποθήκευσης μικρής κλίμακας είναι οι σταθμοί ανεφοδιασμού και οι κυψέλες υδρογόνου.

Συνοπτικά οι κυψέλες υδρογόνου λειτουργούν ως εξής (Lanz, 2001):

Η κυψέλη καυσίμου είναι μια διάταξη που παράγει ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Σε μια κυψέλη καυσίμου το υδρογόνο και το οξυγόνο συνδυάζονται, για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, θερμότητα και νερό. Τα συστήματα κυψελών καυσίμου είναι μια καθαρή, αποτελεσματική, αξιόπιστη και αθόρυβη πηγή ενέργειας. Οι κυψέλες καυσίμου δεν χρειάζεται να επαναφορτίζονται περιοδικά, όπως οι μπαταρίες, αλλά, αντίθετα, συνεχίζουν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, όσο παρέχεται πηγή καυσίμου. Μια κυψέλη καυσίμου αποτελείται από μια άνοδο, μια κάθοδο και μια μεμβράνη ηλεκτρολύτη. Το καύσιμο λειτουργεί περνώντας υδρογόνο μέσω της ανόδου μιας κυψέλης, και οξυγόνο μέσω της καθόδου. Στη θέση της ανόδου ένας καταλύτης διασπά τα μόρια του υδρογόνου σε ηλεκτρόνια και πρωτόνια. Τα πρωτόνια διέρχονται από την πορώδη μεμβράνη του ηλεκτρολύτη, ενώ τα ηλεκτρόνια ωθούνται μέσω ενός κυκλώματος, δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα και περίσσεια θερμότητας. Στην κάθοδο τα πρωτόνια, τα ηλεκτρόνια και το οξυγόνο συνδυάζονται, για να παράγουν μόρια νερού. Καθώς δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη, οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν αθόρυβα και με εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία.

3.2. Αγωγοί και δίκτυα

Το υδρογόνο μπορεί να μεταφερθεί μέσω αγωγών σε υγρή ή αέρια κατάσταση. Κατά αυτήν την έννοια, θα μπορεί να μεταφερθεί με τον ίδιο τρόπο που μεταφέρεται το φυσικό αέριο, διαμέσου αγωγών χερσαίων και υποθαλάσσιων. Σήμερα ακολουθώντας το πρότυπο ASME B31.12 Option B (Tazedakis et al., 2021) εταιρείες ήδη έχουν προχωρήσει στην κατασκευή δικτύων μεταφοράς 100% υδρογόνου (CPW – Snam press realease, 2021), παρέχοντας μια τεχνικά και οικονομικά εφικτή λύση, για την ασφαλή μεταφορά του υδρογόνου σε υψηλές πιέσεις, μέσω χαλύβδινων αγωγών μεγάλης διαμέτρου/υψηλής αντοχής. Έτσι, σωλήνες που παράγονται υπό το συγκεκριμένο πρότυπο μπορεί να καλύψουν το ενεργειακό μείγμα του αύριο.

Καθώς, όμως, μία επένδυση αποκλειστικά για αγωγούς υδρογόνου θα ήταν εξαιρετικά υψηλή και ασύμφορη, το υφιστάμενο δίκτυο του φυσικού αερίου μπορεί να αποτελέσει λύση για τη μεταβατική περίοδο.

Η μετατροπή των υφιστάμενων αγωγών φυσικού αερίου σε Αμερική και Ευρώπη σε αγωγούς που θα μεταφέρουν αποκλειστικά υδρογόνο, θα μπορούσε να μειώσει το κόστος μεταφοράς κατά 20% έως 60%, σε σύγκριση με την κατασκευή νέων αγωγών (Parfomak, 2021).

Τέτοιες μετατροπές θα μπορούσαν να διευκολύνουν την ανάπτυξη της αγοράς υδρογόνου, παρέχοντας ικανή ποσότητα με περιορισμένο κεφάλαιο πρόσθετης επένδυσης. Η μετατροπή των αγωγών φυσικού αερίου σε υδρογόνο θα μπορούσε, επίσης, να μειώσει τον κίνδυνο να υποτιμηθούν αυτοί οι υφιστάμενοι αγωγοί, λόγω της μειωμένης ζήτησης για μεταφορά φυσικού αερίου, που προκύπτει από τις πολιτικές υδρογόνου και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η δυνατότητα διατήρησης της αξίας των υφιστάμενων αγωγών, με ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, είναι μεταξύ των λόγων που φορείς εκμετάλλευσης αγωγών εξετάζουν τη δυνατότητα μετατροπής. Εκτιμάται ότι περισσότεροι από 1,2 εκατομμύρια χιλιόμετρα αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου είναι εγκατεστημένοι σε όλον τον κόσμο (International Energy Agency, 2022).

Η χρησιμοποίηση των δικτύων φυσικού αερίου για μεταφορά υδρογόνου θα απαιτήσει σημαντική αναδιαμόρφωση και προσαρμογή. Η αντοχή των χαλύβδινων αγωγών είναι ένα ζήτημα, καθώς το υδρογόνο επηρεάζει την ακεραιότητά του μετάλλου σε μεγαλύτερο βαθμό από το φυσικό αέριο. Επιπλέον, λόγω της μικρής μοριακής μάζας μπορεί να διαρρεύσει πιο εύκολα, καθιστώντας τη μεταφορά του επικίνδυνη στο σημείο διαρροής. Πιο συγκεκριμένα, το υδρογόνο μπορεί να μειώσει την ελαστικότητα του χάλυβα, την αντοχή στη θραύση και να αυξήσει τον ρυθμό κόπωσης σε σχέση με το φυσικό αέριο. Η χημική του σύνθεση μπορεί να επιταχύνει την υποβάθμιση του αγωγού προκαλώντας ψαθυροποίηση, με αποτέλεσμα να προκληθούν αστοχίες στον αγωγό.

Υπάρχουν λύσεις που μελετώνται ως προς την εφαρμογή όπως:

- Συχνή επιθεώρηση του αγωγού υδρογόνου με κάμερες εσωτερικά της διαμέτρου

Η διαδικασία εσωτερικής επιθεώρησης μπορεί να αναζητηθεί ως pipeline rigging, και είναι η μέθοδος κατά την οποία τοποθετείται μία κεφαλή εσωτερικά της σωληνογραμμής, και αυτή ταξιδεύει εντός, για να εκτελέσει καθαρισμό, απομάκρυνση υγρασίας, διαστασιολόγηση ή επιθεώρηση. Η επιθεώρηση του αγωγού μέσω κεφαλών πραγματοποιείται για την εξασφάλιση της ακεραιότητας του αγωγού ως προς τη λειτουργία του. Είναι αρκετά σημαντική, ώστε να εξασφαλισθεί η ομαλή ροή του ρευστού εντός της σωληνογραμμής, ενώ παράλληλα απομακρύνονται ρυπαντές αυτής.



Εικόνα 14: (πηγή: <https://www.piping-world.com/pipeline-pigging-types-procedure>, accessed on 05/12/2022)

- Επένδυση του αγωγού για προστασία του υλικού από το υδρογόνο

Οι μέχρι τώρα δοκιμές, που έχουν διεξαχθεί από εταιρείες κατασκευής σωλήνων, για μεταφορά υδρογόνου, δείχνουν ότι οι εποξειδικές επενδύσεις της εσωτερικής διαμέτρου του σωλήνα μπορούν να αποτελέσουν τη βέλτιστη λύση προστασίας. Η αντοχή του σωλήνα δοκιμάζεται σε περιβάλλον υδρογόνου έως 100 bar και αποδεικνύεται για τις εποξειδικές βαφές, ότι η επένδυση δε χάνει την προσκόλλησή της, ενώ, επιπλέον, δεν προκαλούνται φουσκάλες και άλλου είδους αστοχίες.

- Λειτουργία με χαμηλές πιέσεις έως την κατώτερη πίεση που μπορεί να δεχθεί το σύστημα και με σταθερή πίεση, χωρίς εναλλαγές πιέσεων.

Οι σωληνογραμμές έχουν κατασκευασθεί, ώστε να αντέχουν υψηλές πιέσεις, μεγαλύτερες από τις πιέσεις λειτουργίας των συστημάτων μεταφοράς υδρογόνου. Η λειτουργία των συμπιεστών του δικτύου εντός ορίων αντοχής, και η διατήρηση ομαλής ροής, είναι βασικό στοιχείο για την αποφυγή καταπόνησης και δημιουργίας αστοχιών των υλικών (Health and Safety Executive, 2012).

3.3. Υλικά αγωγών και δεξαμενών

Όπως προαναφέρθηκε, οι αγωγοί φυσικού αερίου και η συγκεκριμένη τεχνολογία κατασκευής των αγωγών αυτών είναι η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά υδρογόνου. Μέχρι σήμερα αγωγοί μαλακού χάλυβα χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά υδρογόνου βιομηχανικής χρήσης σε αγωγούς άνω των 4.500 χιλιομέτρων παγκοσμίως (Tazedakis et al., 2021). Ωστόσο, η μελλοντική χρήση του υδρογόνου αναμένεται να είναι σε υψηλές πιέσεις, σε μεγάλες ροές και σε ευρεία κλίμακα χρήσης, οδηγώντας την αγορά σε χάλυβα υψηλής αντοχής. Συγκεκριμένα, πρότυπα κατασκευής καθορίζουν τις δοκιμές και τις προδιαγραφές που πρέπει να πληρούν αυτοί οι αγωγοί.

Όμως και η μεταφορά υδρογόνου σε δοχεία είναι ευρέως διαδεδομένη. Η μεταφορά υδρογόνου σε μεταλλικές σιδερένιες φιάλες έχει εφαρμογή από το 1880 (Sterioitis et al., 2019). Συνεπώς, ο σίδηρος, και κατ' επέκταση ο χάλυβας, είναι το πιο βασικό υλικό κατασκευής. Στη συνέχεια, ο σίδηρος εμπλουτίστηκε με κράματα Cr-Mo, αυξάνοντας τις μηχανικές ιδιότητες των φιαλών. Η ψαθυροποίηση που προκαλεί το υδρογόνο, όμως, έβαλε φρένο στις βιομηχανικού τύπου φιάλες από χάλυβα μέχρι την περίοδο του 1970, που ενισχύθηκε ο χάλυβας με ίνες άνθρακα. Οι ίνες άνθρακα λειτουργούν ως επένδυση, προστατεύοντας τον χάλυβα της φιάλης, καταφέροντας πλήρωση με μεγάλες πιέσεις πλέον.

Οι τύποι των δεξαμενών/δοχείων χωρίζονται ως εξής:

Δεξαμενή υδρογόνου τύπου I

Οι δεξαμενές υδρογόνου τύπου I αποτελούνται εξ ολοκλήρου από μέταλλο και μπορεί να κατασκευαστούν σε μεγάλα μεγέθη. Οι συγκεκριμένες δεξαμενές λειτουργούν σε χαμηλές πιέσεις, σε σχέση με τις άλλες δεξαμενές, και είναι οι πιο οικονομικές, σε σχέση με τους λοιπούς τύπους αποθήκευσης. Οι δεξαμενές κατασκευασμένες με το πρότυπο κατασκευής ASME VII, Division 1 έχουν μέγιστη πίεση 200bar, ενώ οι δεξαμενές κατασκευασμένες με το πρότυπο κατασκευής ASME VII, Division 2 ή 3 έχουν μέγιστη πίεση 1000 bar.

Δεξαμενή Υδρογόνου τύπου II

Οι δεξαμενές υδρογόνου τύπου II αποτελούνται από μια μεταλλική εσωτερική επένδυση (συνήθως αλουμίνιο), γύρω από την οποία προστίθεται ένα εξωτερικό περιτύλιγμα CFRP (ενισχυμένο ανθρακόνημα), προκειμένου να ενισχυθούν οι φυσικές τους ιδιότητες στο ωφέλιμο μήκος του κυλίνδρου. Αυτά επιτρέπουν υψηλότερες πιέσεις δεξαμενής υδρογόνου με μια σχετικά λεπτή επένδυση. Οι συγκεκριμένες δεξαμενές έχουν όριο αντοχής 300 bar.

Δεξαμενή Υδρογόνου Τύπου III

Στις δεξαμενές υδρογόνου τύπου III μπορεί να γίνει πιο αποδοτική αποθήκευση, έως και 4 φορές περισσότερη μάζα υδρογόνου, σε σχέση με τις δεξαμενές τύπου I. Έχουν πλήρη εσωτερική μεταλλική επένδυση και πλήρες εξωτερικό περίβλημα CFPR (ενισχυμένο ανθρακόνημα).

Δεξαμενή Υδρογόνου Τύπου IV

Οι δεξαμενές αποθήκευσης τύπου IV είναι πλήρως επενδυμένες εξωτερικά με CFPR (ενισχυμένο ανθρακόνημα), και εσωτερικά, συνήθως, επενδύονται από κάποιου είδους πολυμερές υλικό, όπως πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας. Οι πιο συνηθισμένες δεξαμενές έχουν, συνήθως, μέγιστη πίεση έως 700 bar.



Εικόνα 15: Φωτογραφική απεικόνιση τύπων δοχείων υδρογόνου (πηγή: HYDROGEN STORAGE- Air Liquide, 2011)

4. ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

4.1. Ανίχνευση υδρογόνου

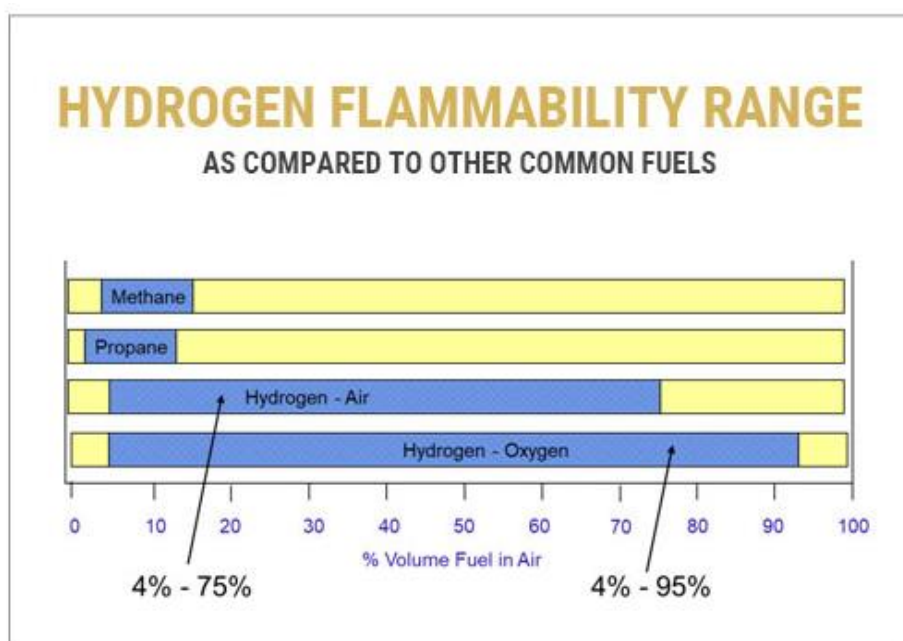
Ένας από τους σημαντικότερους κινδύνους προέρχεται από την πιθανή, ανεπιθύμητη, απελευθέρωση υδρογόνου, η οποία συνδέεται με την πιθανότητα δημιουργίας εκρηκτικών συνθηκών ή συνθηκών φωτιάς. Από αυτή την άποψη, το υδρογόνο είναι δυνητικά πιο επικίνδυνο από άλλα συμβατικά καύσιμα (μεθάνιο, προπάνιο), λόγω του μεγάλου εύρους αναφλεξιμότητας, εκρηκτικότητας και της χαμηλής ενέργειας ανάφλεξης του, αντικείμενο που θα παρουσιασθεί και παρακάτω.

Τα μόρια του υδρογόνου αέριας μορφής αποτελούνται από δύο άτομα υδρογόνου συνδεδεμένα μεταξύ τους. Αυτό κάνει το H_2 το μικρότερο μόριο στο σύμπαν. Ως εκ τούτου, το αέριο υδρογόνο είναι επιρρεπές σε διαρροή από διάφορους συνδέσμους, φλάντζες, βαλβίδες και είναι δύσκολο να συγκρατηθεί/περιορισθεί εντός των αγωγών και περιεκτών. Οι διαρροές υδρογόνου μπορεί να είναι δύσκολο να ανιχνευθούν. Επίσης, το υδρογόνο δεν γίνεται αντιληπτό μέσω της όσφρησης καθώς είναι άοσμο. Επομένως, είναι σημαντικό να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα για τον μετριασμό του κινδύνου διαρροών υδρογόνου.

Το υδρογόνο ανιχνεύεται χρησιμοποιώντας ένα όργανο μέτρησης γνωστό ως «ανιχνευτής αερίων υδρογόνου». Οι ανιχνευτές αερίων υδρογόνου αποτελούνται από ηλεκτρονικά στοιχεία και έναν αισθητήρα H_2 (Γρηγοριάδης Δημήτριος Παναγιώτης, 2014). Ο αισθητήρας αερίου μετατρέπει την ανιχνευμένη συγκέντρωση αερίου υδρογόνου σε ηλεκτρονικό σήμα, για ανάλυση από τον ενσωματωμένο μικροεπεξεργαστή. Από εκεί, ο επεξεργαστής μεταφέρει την ένδειξη στην οθόνη. Εάν η μετρούμενη ποσότητα του H_2 υπερβαίνει τις προκαθορισμένες τιμές, θα ενεργοποιηθούν συναγερμοί για να προειδοποιηθεί ο χρήστης.

Ανίχνευση του κατώτατου ορίου εκρηκτικότητας (Lower explosible limit, LEL)

Προτού συμβεί πυρκαγιά ή έκρηξη, λόγω της παρουσίας του υδρογόνου στην ατμόσφαιρα, πρέπει να πληρούνται ταυτόχρονα τρεις προϋποθέσεις. Ένα καύσιμο (δηλ. εύφλεκτο αέριο), και οξυγόνο (αέρας) πρέπει να υπάρχουν σε ορισμένες αναλογίες, μαζί με μια πηγή ανάφλεξης, όπως ένας σπινθήρας ή μια φλόγα. Η αναλογία καυσίμου και οξυγόνου που απαιτείται ποικίλλει, ανάλογα με κάθε εύφλεκτο αέριο ή ατμό. Η ελάχιστη συγκέντρωση ενός συγκεκριμένου εύφλεκτου αερίου ή ατμού, που απαιτείται για την υποστήριξη της καύσης του στον αέρα, ορίζεται ως το κατώτερο όριο έκρηξης (LEL) για αυτό το αέριο. Κάτω από αυτό το επίπεδο το μείγμα είναι πολύ «πτωχό» για να καεί. Η μέγιστη συγκέντρωση αερίου ή ατμού, που θα καεί στον αέρα, ορίζεται ως το ανώτερο όριο έκρηξης (UEL). Πάνω από αυτό το επίπεδο, το μείγμα είναι πολύ «πλούσιο» για να καεί. Το εύρος μεταξύ LEL και UEL είναι γνωστό ως «εύφλεκτο εύρος».



Εικόνα 16: Οπτική απεικόνιση εύρους εκρηκτικότητας (πηγή: <https://wha-international.com/>)

Είναι σημαντικό, λοιπόν, να υπάρχουν συστήματα ανίχνευσης του υδρογόνου και συστήματα ανίχνευσης της συγκέντρωσης αυτού, ώστε να εξασφαλισθεί ότι ο χώρος δεν έχει εκρηξιμες συγκεντρώσεις. Περισσότερα για την τεχνολογία των ανιχνευτών θα εξετασθούν στο κεφάλαιο 14.1.

Τάση άνωσης

Το υδρογόνο, όπως έχει ήδη αναφερθεί, παρουσιάζει μικρή μοριακή μάζα. Σε θερμοκρασία δωματίου έχει την υψηλότερη ικανότητα διάχυσης, την υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα και την υψηλότερη ταχύτητα διάχυσης όλων των αερίων. Η υψηλή ικανότητα διάχυσης του υδρογόνου το καθιστά ικανό να διαφεύγει από περιέκτες αποθήκευσης, από τους οποίους δεν μπορούν να διαφύγουν άλλα αέρια (Λάμπρου Ευάγγελος and Σιάκουλης Ορέστης, 2015). Αν και η υψηλή του άνοση καθιστά τους κινδύνους, που συνδέονται με μια ανεπιθύμητη απελευθέρωση, πιθανό να μειωθούν γρήγορα και σε αποδεκτά επίπεδα σε εξωτερικούς χώρους, ή/και παρουσία επαρκούς αερισμού. Λόγω της μεγάλης άνωσης και διάχυσης που εμφανίζει, αναμειγνύεται με τον αέρα και δεν είναι πλέον εύφλεκτο. Η ανάπτυξη ενός κατάλληλου συστήματος για την ανίχνευση εκρηκτικών ατμοσφαιρών, θα πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη ως απαραίτητο μέτρο ασφαλείας.

4.2. Χαρακτηριστικά φλόγας υδρογόνου

Ορατότητα φλόγας

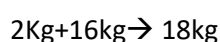
Η φλόγα του υδρογόνου είναι αόρατη. Αυτό καθιστά δύσκολο την αντίληψη της εστίας της πυρκαγιάς με την όραση. Η μη συνειδητοποίηση της ύπαρξης της πυρκαγιάς μπορεί να οδηγήσει σε επικίνδυνες καταστάσεις, όπως επικίνδυνη προσέγγιση του σημείου, αδυναμία αντίληψης της αναγκαιότητας εκκένωσης ή επέμβασης με συγκεκριμένο τρόπο (Λάμπρου Ευάγγελος and Σιάκουλης Ορέστης, 2015).

Η αντιμετώπιση του παραπάνω ζητήματος μπορεί να αντιμετωπισθεί προσθέτοντας προσμίξεις στο υδρογόνο, ώστε κατά την αντίδραση της καύσης να εκπέμπεται ακτινοβολία με ορατή φλόγα.

Θερμοκρασία και ακτινοβολία φλόγας

Η θερμοκρασία της φλόγας του υδρογόνου, όταν καίγεται στοιχειομετρικά στον αέρα, είναι περίπου 2.182°C, ενώ η φλόγα του φυσικού αερίου είναι 1.937°C (Glassman Irvin, 2015). Η διαφορά αυτή πρέπει να συνυπολογισθεί στη συσκευή, που θα διατελέσει την καύση για λόγους ανθεκτικότητας.

Η εξίσωση που δίνει την αντίδραση υδρογόνου και οξυγόνου είναι η παρακάτω:

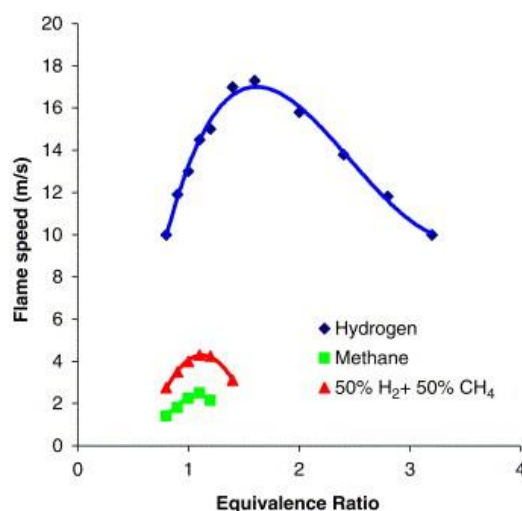


Επίσης, όταν αναμιχθεί με καθαρό οξυγόνο, ανάλογα με την εφαρμογή, η φλόγα μπορεί να φτάσει έως 2.400°C. Ωστόσο, ακτινοβολία της φλόγας είναι χαμηλής έντασης και δεν μπορεί να αντιληφθεί κάποιος την αυξημένη θερμοκρασία, εκτός εάν πλησιάσει αρκετά κοντά στην εστία της καύσης. Αυτό σημαίνει ότι υλικά ή άνθρωποι πλησίον της εστίας δεν θα κινδυνεύσουν από την υψηλή θερμοκρασία ή θα πάθουν εγκαύματα από τη θερμική

ακτινοβολία. Οι αναθυμιάσεις, επίσης, είναι αβλαβείς, καθώς κατά την καύση του υδρογόνου παράγεται ατμός, εκτός αν ταυτόχρονα καίγονται και άλλα υλικά.

Ταχύτητα καύσης

Ένα σημαντικό θέμα που αφορά την ασφάλεια του υδρογόνου είναι η μεγάλη ταχύτητα καύσης του. Ως ταχύτητα καύσης εννοείται η σχετική ταχύτητα του μετώπου της φλόγας, σε σχέση με το άκαυστο μίγμα. Η ταχύτητα μετάδοσης της φλόγας κατά την καύση του υδρογόνου είναι, κατά βάση, 7 φορές μεγαλύτερη από αυτή των συμβατικών καυσίμων. Το μίγμα καίγεται ταχύτατα και η απελευθέρωση ενέργειας είναι σύντομη και πολύ μικρή σε διάρκεια. Λόγω της στιγμιαίας απελευθέρωσης της ενέργειας, υπάρχει απότομη αύξηση της πίεσης και η φλόγα του υδρογόνου είναι πολύ πιθανό να οδηγήσει σε έκρηξη.



Διάγραμμα 17: Σύγκριση ταχυτήτων καύσης (πηγή: Laminar-burning velocities of hydrogen-air, Ilbas et al 2006)

4.3. Περιοριστικός δείκτης οξυγόνου LOI

Το υδρογόνο είναι εξαιρετικά εύφλεκτο. Οι επικίνδυνες συγκεντρώσεις είναι μεταξύ 4% και 75% κατ' όγκο (για σύγκριση, το μεθάνιο είναι εύφλεκτο στον αέρα μόνο σε αναλογία μεταξύ 4,4% και 17% κατ' όγκο) όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω. Όπως παρουσιάζεται από τον Molnarne et al 2003, η ευφλεκτότητα του υδρογόνου, ανάλογα με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και ανάλογα με την πίεση περιβάλλοντος, μπορεί να είναι ως παρακάτω:

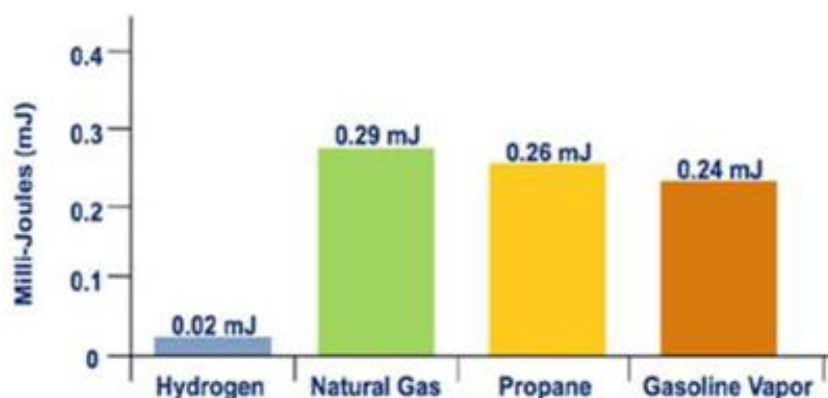
(Όπου LEL, Lower Explosible Limit και UEL, Upper Explosible Limit).

Θερμοκρασία °C	LEL % volume	UEL % volume	Περιοριστική συγκέντρωση αέρα % όγκου	Περιοριστική συγκέντρωση οξυγόνου % όγκου
20	4.1	75.6	20.4	4.3
100	3.4	77.6	19.1	4.0
200	2.9	81.3	15.0	3.2
300	2.0	83.9	10.9	2.3
400	1.4	87.6	6.2	1.3

Πίνακας 18 – Επίδραση της θερμοκρασίας στην ευφλεκτότητα του υδρογόνου (πηγή:- DIN 51649-A)

Το υδρογόνο παρουσιάζει πολύ μικρή ενέργεια ανάφλεξης, δηλαδή η ποσότητα ενέργειας, που απαιτείται για την ανάφλεξη ενός μείγματος υδρογόνου/αέρα, είναι, επίσης, πολύ χαμηλότερη από ό,τι για άλλα καύσιμα. Η ελάχιστη ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την ανάφλεξη ενός μείγματος υδρογόνου και αέρα είναι μόλις 0,017 mJ, ενέργεια, που μπορεί να αποδοθεί με μία μικρή εκκένωση στατικού ηλεκτρισμού στην καθημερινότητα. Αντίθετα, η ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης για τα αέρια καυσίμου υδρογονανθράκων είναι πολύ υψηλότερη, περίπου στα 0,3 mJ για μείγματα μεθανίου/αέρα ή προπανίου/αέρα.

HYDROGEN IGNITION ENERGY AS COMPARED TO OTHER COMMON FUELS



Διάγραμμα 19: Ελάχιστη ενέργεια έναυσης (πηγή: Hydrogen safety considerations LR, 2017)

Από την άλλη το υδρογόνο παρουσιάζει μεγάλη ενέργεια αυτανάφλεξης (585°C), γεγονός που δεν το καθιστά επικίνδυνο σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

4.4. Αυτανάφλεξη υδρογόνου

Υπάρχουν μηχανισμοί αυτανάφλεξης, που πρέπει να εξετασθούν, γιατί μπορεί δυνητικά να θέσουν σε κίνδυνο τις εφαρμογές του υδρογόνου, όπως οι παρακάτω: (P.HOOKER et al., 2015).

- Αντίστροφο φαινόμενο Joule-Thomson
- Η απότομη αδιαβατική συμπίεση
- Corona discharges – Ηλεκτροστατικές εκκενώσεις τύπου κορώνας

Αντίστροφο φαινόμενο Joule-Thomson (Astbury and Hawksworth, 2007).

Όταν ένα συμπιεσμένο αέριο διαφεύγει στην ατμόσφαιρα, μέσω ενός ακροφυσίου, το αέριο εκτονώνεται. Αν το αέριο έχει θερμοκρασία αναστροφής κάτω από το όριο θερμοκρασίας αναστροφής Joule-Thomson, αυτό ψύχεται κατά την εκτόνωση. Η θερμοκρασία αναστροφής του αέρα είναι περίπου 325°C, επομένως, ο αέρας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και πάνω από την ατμοσφαιρική πίεση θα κρυώσει κατά την εκτόνωση. Το υδρογόνο, από την άλλη, έχει θερμοκρασία αναστροφής Joule-Thomson περίπου 193 K (-80°C), επομένως, το συμπιεσμένο υδρογόνο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος θα θερμανθεί κατά τη διαστολή σε

ατμοσφαιρικό πίεση. Τα δεδομένα από ένα διάγραμμα Mollier μπορούν να καθορίσουν την άνοδο της θερμοκρασίας, η οποία για αρχικές συνθήκες 50 MPa και 9°C θα προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας μεταξύ 9 K και 18 K. Αυτό δύσκολα ευνοεί αυτανάφλεξη, αφού η θερμοκρασία αυτανάφλεξης του υδρογόνου είναι 585°C.

Αν και από μόνη της φαίνεται ότι η παραπάνω διαδικασία δεν θα ανέβαζε τη θερμοκρασία του υδρογόνου στην κανονική θερμοκρασία αυτανάφλεξης, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι θα αυξήσει τη θερμοκρασία του αερίου πάνω από το περιβάλλον. Αυτό από μόνο του είναι απίθανο να προκαλέσει ανάφλεξη, αλλά ο συνδυασμός με άλλα φαινόμενα μπορεί να είναι επαρκής για την έναρξη της αυθόρμητης ανάφλεξης.

Η απότομη αδιαβατική συμπίεση

Αυτό συμβαίνει, όταν ένα αέριο συμπιέζεται αδιαβατικά. Ωστόσο, η αδιαβατική συμπίεση, είναι απίθανο να πραγματοποιηθεί στην πράξη. Σε πειράματα που έγιναν, η πραγματική μετρούμενη θερμοκρασία, που πραγματοποιήθηκε με λόγο συμπίεσης 28 φορές από την πίεση περιβάλλοντος, ήταν μόνο 149 K, θερμοκρασία που δεν ευνοεί την αυτανάφλεξη.

Corona discharges – Ηλεκτροστατικές εκκενώσεις τύπου κορώννα

Μια εκκένωση κορώννας είναι ικανή να αναφλέξει ένα μείγμα υδρογόνου-αέρα. Αυτή είναι μια γνωστή πιθανή πηγή ανάφλεξης, ιδιαίτερα από την ατμοσφαιρική ηλεκτρική δραστηριότητα. Η εκκένωση κορώννας συμβαίνει, όταν υπάρχει ένα συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα μεταξύ δύο ηλεκτροδίων, που φέρονται σε υψηλό δυναμικό και διαχωρίζονται από ένα ουδέτερο ρευστό, όπως ο αέρας, με ιονισμό αυτού του ρευστού.

Γενικότερα, έχει παρατηρηθεί η ανάφλεξη καυσίμων, όταν διαφεύγουν με πίεση από περιέκτες ή σωληνώσεις, και διαχέονται στην ατμόσφαιρα. Μελέτες που έχουν γίνει σε αγωγούς υδρογόνου με διαφυγή αερίου καυσίμου, έδειξαν ότι η ανάφλεξη ήταν σπάνια, όταν ο καιρός ήταν καλός, αλλά ήταν πιο συχνή κατά τη διάρκεια καταιγίδας, χιονόπτωσης, ή σε κρύες παγωμένες νύχτες. Αυτές οι καιρικές συνθήκες αντιστοιχούν σε υψηλές εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου στο ατμόσφαιρα.

Γενικά, αντιλαμβάνεται κάποιος ότι το υδρογόνο δεν είναι αρκετά πιθανό να αυτανάφλεγει, όταν διαρρεύσει στην ατμόσφαιρα, χωρίς αυτό να είναι απόλυτο.

5. Φυσιολογικοί κίνδυνοι

5.1. Ασφυξία

Η ασφυξία μπορεί να συμβεί κάτω από ποικίλες συνθήκες, οι οποίες κυμαίνονται από τυχαίο τραυματισμό με τη μορφή πνιγμού ή μέσω δηλητηρίασης με κυάνιο. Επιπρόσθετα, τυχαία ασφυξία προκύπτει από πυρκαγιές σε σπίτια ή σε εργασιακούς χώρους. Η τελική αιτία θανάτου σε όλα αυτά τα περιστατικά θεωρείται η εγκεφαλική υποξία, ακολουθούμενη από καρδιακή ανακοπή.

Ο χρόνος που απαιτείται για να επέλθει η απώλεια των αισθήσεων, για να συμβεί θάνατος, είναι συχνά δύσκολο να εκτιμηθεί. Το υδρογόνο δεν είναι δηλητηριώδες, αλλά όπως συμβαίνει με οποιοδήποτε αέριο (εκτός από το οξυγόνο), υπάρχει κίνδυνος ασφυξίας. Εντοπίζεται κυρίως σε περιορισμένες περιοχές, ως αποτέλεσμα της εξάντλησης του οξυγόνου και εκτοπισμού του από την αναπνευστική ζώνη του ανθρώπου. Ο κανονικός αέρας περιέχει περίπου 20,8% οξυγόνο κατ' όγκο. Εκτός από την αραιώση μέσω ανάμειξης με άλλα αέρια, το οξυγόνο μπορεί να καταναλωθεί κατά την καύση υδρογόνου ή άλλων αερίων, που

καίγονται, και μπορεί να εξαντληθεί μέσω συμπύκνωσης σε πολύ ψυχρές επιφάνειες, όπως σε πισίνες υγρού υδρογόνου. Έτσι, η αραιώση της ογκομετρικής περιεκτικότητας σε οξυγόνο κάτω του 19,5% θα έχει επιπτώσεις στον άνθρωπο. Τα επίπεδα συναγερμού ρυθμίζονται γενικά στο 19% οξυγόνου (International Association for Hydrogen Safety, 2022a).

Πίνακας συμπτωμάτων ασφυξίας

O ₂ (vol%)	Επίδραση και συμπτώματα στον άνθρωπο
19-21	Κανένα διακριτό σύμπτωμα
15-19	Μείωση σωματικής και πνευματικής απόδοσης χωρίς να το γνωρίζει ο πάσχων. Μπορεί να προκληθούν πρώιμα συμπτώματα σε άτομα με καρδιακά, πνευμονικά ή κυκλοφορικά προβλήματα
12-15	Βαθύτερη αναπνοή, ταχύτεροι παλμοί, κακός συντονισμός
10-12	Πονοκέφαλοι, ίλιγγος, κακή κρίση, ελαφρώς μπλε χείλη. Κίνδυνος θανάτου κάτω από 11 vol%, χρόνος ανοχής 30 λεπτά
8-10	Ναυτία, έμετος, λιποθυμία, λιποθυμία μέσα σε λίγα, διανοητική ανεπάρκεια, χρόνος ανοχής 5 λεπτά
6-8	Η λιποθυμία εμφανίζεται μετά από περίπου 3 λεπτά. Θάνατος σε 8 λεπτά. 50% θάνατος και 50% ανάρρωση με θεραπεία σε 6 λεπτά, 100% ανάρρωση με θεραπεία σε 4 έως 5 λεπτά
3-6	Κώμα σε 40 δευτερόλεπτα, διακοπή της αναπνοής, θάνατος ή μόνιμη εγκεφαλική βλάβη, ακόμη και αν διασωθεί το θύμα
0-3	Θάνατος σε 45 δευτερόλεπτα

Πίνακας 20: Συμπτώματα ασφυξίας (Πηγή NASA, 1997)

Εάν η διαρροή υδρογόνου δεν αναφλεγεί αμέσως μετά την απελευθέρωση, θα οδηγήσει σε βαθμιαία υδρογονοσυσσώρευση εντός του εσωτερικού χώρου. Η απελευθέρωση υδρογόνου με υψηλή ταχύτητα ροής, που υπερβαίνει την ικανότητα αερισμού του εσωτερικού χώρου, προκαλεί μεγάλη συγκέντρωση υδρογόνου, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ασφυξία.

5.2. Θερμικό έγκαυμα

Τα θερμικά εγκαύματα προκαλούνται, όταν συμβεί άμεση επαφή με θερμαινόμενα αντικείμενα (ζεστό νερό, ατμό και φωτιά από καύσιμη ύλη). Τα θερμικά εγκαύματα χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες, συμπεριλαμβανομένων των εγκαυμάτων θερμικής επαφής, των ηλεκτρικών εγκαυμάτων, των χημικών εγκαυμάτων, των εγκαυμάτων από ακτινοβολία και των εγκαυμάτων που προκαλούνται από φωτιά. Τα σχέδια θεραπείας για ένα θερμικό έγκαυμα ποικίλλουν, ανάλογα με το είδος του εγκαύματος και τη σοβαρότητά του (Burn and Reconstructive Center of America, 2022).

Τα εγκαύματα χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με την σοβαρότητα τους:

Θερμικό έγκαυμα πρώτου βαθμού

Τα εγκαύματα πρώτου βαθμού ή επιφανειακά περιέχονται στην επιδερμίδα και οι νευρικές απολήξεις παραμένουν άθικτες. Συνήθως, δεν υπάρχει ανάγκη πρόσβασης σε κέντρο

υγειονομικής περίθαλψης, καθώς αυτά τα εγκαύματα μπορούν να επουλωθούν μέσα σε τρεις έως πέντε ημέρες, με ελάχιστη παρέμβαση.

Θερμικό έγκαυμα δεύτερου βαθμού

Τα εγκαύματα δεύτερου βαθμού είναι αυτά που καταστρέφουν μερικώς τις νευρικές απολήξεις και αφήνουν βαθύτερα εγκαύματα. Αυτά τα εγκαύματα μπορεί να φαίνονται πιο προχωρημένα, αλλά μπορούν να επουλωθούν μέσα σε 10 έως 15 ημέρες.

Θερμικό έγκαυμα τρίτου βαθμού

Γνωστά ως εγκαύματα πλήρους πάχους. Αυτά τα εγκαύματα προκαλούν σημαντικές ουλές και απαιτούν μεγάλους χρόνους επούλωσης. Μπορεί να χρειαστούν μήνες για να επουλωθούν αυτού του είδους τα εγκαύματα.

Θερμικό έγκαυμα τέταρτου βαθμού

Τα πιο σοβαρά εγκαύματα που αφορούν το υποδόριο λίπος, τους μύες και τα οστά, απαιτούν άμεση επίσκεψη σε νοσοκομείο. Η θεραπεία θα επικεντρωθεί στη διατήρηση της υγείας του ασθενούς πριν από τη μετάβαση σε καθαρισμό, δερματικά αυτομοσχεύματα, και, πιθανώς, ακόμη και μεταγγίσεις αίματος και ακρωτηριασμούς.

Όπως έχει προαναφερθεί, το υδρογόνο έχει φλόγα θερμοκρασίας περίπου 2.182°C, συνεπώς, οποιαδήποτε επαφή με τη φλόγα ή με αντικείμενα που έχουν αναπτύξει θερμοκρασία λόγω της καύσης, μπορεί να οδηγήσει σε πολύ σοβαρό έγκαυμα.

5.3. Κρυογενικό έγκαυμα

Το υδρογόνο στην υγρή του μορφή είναι ένα κρυογενικό υγρό. Απαιτούνται ειδικές εγκαταστάσεις για την αποθήκευσή του, ώστε να διατηρηθεί η χαμηλή θερμοκρασία. Τα δοχεία έχουν ειδικές προδιαγραφές: συνήθως διαθέτουν μανόμετρο, χειροκίνητη βαλβίδα εκτόνωσης, αυτόματη βαλβίδα υπερπίεσης, δίσκο θραύσης, δίοδο πλήρωσης και βάνα εισόδου αερίου, για σύνδεση με τον σωλήνα μετάγγισης (Dr. Scroumbelos Gorge and Vatista Margarita, 2023)

Κατά την άμεση επαφή του δέρματος με το κρυογενικό υδρογόνο μπορεί να προκληθεί ψυχρό έγκαυμα και να παγώσουν, τόσο εξωτερικοί, όσο και υποδόριοι ιστοί, ενώ η παρατεταμένη επαφή ενδέχεται να οδηγήσει σε θρόμβους αίματος. Επίσης, το δέρμα είναι δυνατό να κολλήσει στην επιφάνεια του ψυχρού εξοπλισμού ή των σωληνώσεων που περιέχουν κρυογενικά υλικά και να προκληθεί τραυματισμός στην προσπάθεια αποκόλλησής του. Τα κρυογενικά εγκαύματα συνήθως δεν προκαλούν σημαντικές ή εκτεταμένες ουλές και μπορεί να ποικίλλουν σε ένταση. Η έκταση ενός κρυογενικού εγκαύματος και οι σχετικές βλάβες καθορίζονται από τη διάρκεια της έκθεσης σε ψυχρό υλικό ή ουσία, καθώς και από την επιφάνεια του ιστού του δέρματος που ήρθε σε επαφή με το υλικό.

Το πιο σοβαρό έγκαυμα υγρού υδρογόνου είναι το κρουπάγημα (frostbite), το οποίο προκαλείται από εκτεταμένη (παρατεταμένη) έκθεση στο κρυογενικό υδρογόνο ή σε υλικά που μπορεί να έχουν έρθει σε επαφή με αυτό. Τα κρουπάγηματα έχουν ως αποτέλεσμα βαθιά τμήματα του ιστού του δέρματος να παγώνουν, οδηγώντας αναπόφευκτα στο θάνατό τους. Όταν ο ιστός του δέρματος πεθαίνει, γίνεται μπλε ή μαύρος, και πρέπει να ακρωτηριαστεί.

5.4. Έκρηξη/Τραυματισμός από κύματα

Οι εκρήξεις μπορούν να προκαλέσουν πολλαπλούς τραυματισμούς, που όταν συμβούν έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν απειλή για τη ζωή σε έναν ή σε περισσότερους ανθρώπους. Τα μοτίβα τραυματισμών μετά από μία έκρηξη προκύπτουν από τη σύνθεση και την ποσότητα των εμπλεκόμενων υλικών, το περιβάλλον, την απόσταση μεταξύ του θύματος και της έκρηξης και από τυχόν προστατευτικούς φραγμούς (προστατευτικά τοιχία, μεταλλικές κατασκευές κ.α.).

Ως έκρηξη μπορεί να ορισθεί η ξαφνική, δυνατή και βίαιη απελευθέρωση ενέργειας που συμβαίνει όταν κάτι (όπως μια φιάλη υδρογόνου) σπάσει, με τρόπο που στέλνει τα μέρη του στο περιβάλλον. Η έκρηξη συμβαίνει, όταν ένα εύφλεκτο υλικό, μια πηγή ανάφλεξης και το ατμοσφαιρικό οξυγόνο συγκρούονται σε έναν περιορισμένο χώρο, με αποτέλεσμα μια έκρηξη. Οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις πρέπει πάντα να προλαμβάνουν παράγοντες που μπορεί να προκαλέσουν έκρηξη, αλλά και να προστατεύονται από τις συνέπειες των εκρήξεων, προκειμένου να διασφαλίζεται ότι οι εργαζόμενοι είναι ασφαλείς και η παραγωγή μπορεί να συνεχιστεί απρόσκοπτα.

Μία έκρηξη, ανάλογα με το υλικό που εκρήγνυται, μπορεί να προκαλέσει έως και 7000°C στο επίκεντρο της. Επιπλέον, τα κύματα πίεσης μπορεί να φτάσουν τα 300.000bar. Ως αποτέλεσμα, ενδέχεται να μετακινηθεί το κύμα πίεσης από το επίκεντρο στον περιβάλλοντα αέρα και να διαδώσει το κύμα της έκρηξης, με αποτέλεσμα την καταστροφή των υλικών, αλλά και τον τραυματισμό ατόμων.

Παρακάτω απεικονίζεται η κατηγοριοποίηση των τραυματισμών από εκρήξεις (Center for Disease Control and Prevention, 2023):

Κατηγορία	Χαρακτηριστικά	Μέλος του σώματος	Τύπος τραυματισμού
Πρωτοβάθμια	Αποτέλεσμα του κτυπήματος με το ωστικό κύμα από την υπερπίεση	Μέλη που είναι γεμάτα με αέρα έχουν ευπάθεια (πνεύμονες, αεραγωγός, έσω ους)	- Ρήξη πνεύμονα - Ρήξη τυμπάνου - Εσωτερική αιμορραγία - Ρήξη οφθαλμού - Διάσειση
Δευτερογενής	Αποτέλεσμα από εκτινασόμενα σωματίδια	Κάθε μέλος του σώματος μπορεί να επηρεαστεί	- Διείσδυση σωματιδίων - Αμβλεία τραύματα
Τριτογενής	Αποτελέσματα από εκτίναξη ατόμων	Κάθε μέλος του σώματος μπορεί να επηρεαστεί	- Κατάγματα - Ακρωτηριασμοί
Τεταρτογενής	Όλες οι παραπάνω περιπτώσεις μαζί	Κάθε μέλος του σώματος μπορεί να επηρεαστεί	- Έγκαυμα - Τραύμα από την κρούση - Κάταγμα κρανίου - Πνευμονική προσβολή - Υπεργλυκαμία, υπερένταση

Πίνακας 21: Μηχανισμοί τραυματισμού εκρήξεων (πηγή: CDC)

Ανάλυση τραυματισμών:

Πνευμονοτραυματισμός

Ο πνεύμονας τραυματισμένος από έκρηξη («Blast Lung») είναι άμεση συνέπεια του κύματος υπερπίεσης, που προέρχεται από την έκρηξη. Είναι ο πιο κοινός θανατηφόρος πρωτογενής τραυματισμός από έκρηξη. Ο τραυματισμός «Blast Lung» επισυμβαίνει αμέσως μετά την έκρηξη και τα συμπτώματα επέρχονται άμεσα, αλλά έχουν αναφερθεί περιστατικά εκδήλωσης μέχρι και 48 ώρες μετά την έκρηξη.

Ο συγκεκριμένος τραυματισμός χαρακτηρίζεται από την κλινική τριάδα της άπνοιας, της βραδυκαρδίας και της υπότασης. Οι πνευμονικές βλάβες ποικίλλουν, από διάσπαρτα μελανώματα έως σοβαρές αιμορραγίες.

Τραυματισμός αυτιού

Ο τραυματισμός του αυτιού εξαρτάται από τον προσανατολισμό του προς την έκρηξη. Η διάτρηση της μεμβράνης του τυμπάνου είναι ο πιο συχνός τραυματισμός. Τα σημάδια τραυματισμού του αυτιού είναι, συνήθως, άμεσα κατά την εκδήλωση της έκρηξης. Σε δεύτερο χρόνο, θα πρέπει να εξεταστεί αν παρουσιάζει απώλεια ακοής, εμβοές, ωταλγία, ίλιγγο, αιμορραγία από τον έξω πόρο, ρήξη τυμπάνου ή βλεννοπυώδη ωτόρροια.

Κοιλιακός τραυματισμός

Τα τμήματα της γαστρεντερικής οδού που περιέχουν κενό είναι πιο ευάλωτα στο πρωτογενές φαινόμενο έκρηξης. Αυτό μπορεί να προκαλέσει άμεση διάτρηση του εντέρου, αιμορραγία, τραυματισμούς μεσεντέριας διάτμησης, ρήξεις οργάνων και ρήξη όρχεων. Σε οποιονδήποτε εκτίθεται σε έκρηξη θα πρέπει να υπάρχει υποψία τραυματισμού από έκρηξη στην κοιλιά με κοιλιακό άλγος, ναυτία, έμετο, αιματέμεση, πόνο στο ορθό, πόνο στους όρχεις ή οξύ πόνο στην κοιλιακή χώρα.

Εγκεφαλικός τραυματισμός

Τα πρωτογενή κύματα έκρηξης μπορεί να προκαλέσουν διάσειση ή ήπια τραυματική εγκεφαλική βλάβη, χωρίς άμεσο χτύπημα στο κεφάλι με αντικείμενο της έκρηξης. Σημαντικό ρόλο παίζει η εγγύτητα του θύματος στην έκρηξη, ιδιαίτερα όταν υπάρχουν ενδείξεις για πονοκέφαλο, κόπωση, κακή συγκέντρωση, λήθαργο, κατάθλιψη, άγχος, αϋπνία ή άλλα συμπτώματα. Τα συμπτώματα, όπως η διάσειση και η διαταραχή μετατραυματικού στρες, μπορεί να είναι παρόμοια.

5.5. Υποθερμία

Η υποθερμία αναπτύσσεται, όταν η θερμοκρασία του σώματος πέσει κάτω από τους 35°C. Η κανονική θερμοκρασία του ανθρώπινου σώματος είναι περίπου 37°C. Καθώς η θερμοκρασία του σώματος πέφτει κάτω από τους 32°C, η υποθερμία γίνεται σοβαρή και απειλητική για τη ζωή (Center for Disease Control and Prevention, 2023).

Τα πρώτα σημάδια, συνήθως, περιλαμβάνουν αίσθημα κρύου και ανεξέλεγκτο ρίγος. Το άτομο μπορεί να αισθάνεται εξαντλημένο και το δέρμα του μπορεί να είναι δροσερό και χλωμό. Καθώς η υποθερμία εξελίσσεται, εμφανίζονται επιπλέον συμπτώματα, όπως τρεμάμενα χέρια, ασταθές βάδισμα, μπερδεμένη ομιλία, σύγχυση και υπνηλία. Η υποθερμία μπορεί να εξελιχθεί αργά και οι πάσχοντες μπορεί να μη γνωρίζουν ότι χρειάζονται ιατρική βοήθεια. Τα συμπτώματα της σοβαρής υποθερμίας περιλαμβάνουν επιβράδυνση του

καρδιακού ρυθμού και της αναπνοής, διεσταλμένες κόρες και κώμα. Οι καρδιακές δυσλειτουργίες επισυμβαίνουν όταν η εσωτερική θερμοκρασία του σώματος πέσει στους 27°C, ενώ μπορεί να προκληθεί θάνατος, όταν η εσωτερική θερμοκρασία του σώματος πέσει στους 25°C. Χωρίς θεραπεία η κατάσταση είναι πιθανό να οδηγήσει ακόμα και σε θάνατο.

Η άμεση επαφή με υγρό υδρογόνο ή με επιφάνειες σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία προκαλεί κρουγενικά «εγκαύματα», όπως έχουν περιγραφεί ανωτέρω. Η παρατεταμένη εισπνοή ψυχρού ατμού ή αερίου μπορεί να προκαλέσει σοβαρή βλάβη στους πνεύμονες. Ιδιαίτερα τα μάτια είναι αρκετά ευαίσθητα στο κρύο. Η έκθεση σε χαμηλές θερμοκρασίες μετά από μεγάλη διαρροή, χαμηλώνει τη θερμοκρασία στο σώμα (Safety of liquefied hydrogen, 2021). Συνεπώς, η παραμονή σε ψυχόμενο χώρο με μεγάλη διαρροή αποτελεί σοβαρότατο κίνδυνο για την υγεία του ατόμου.

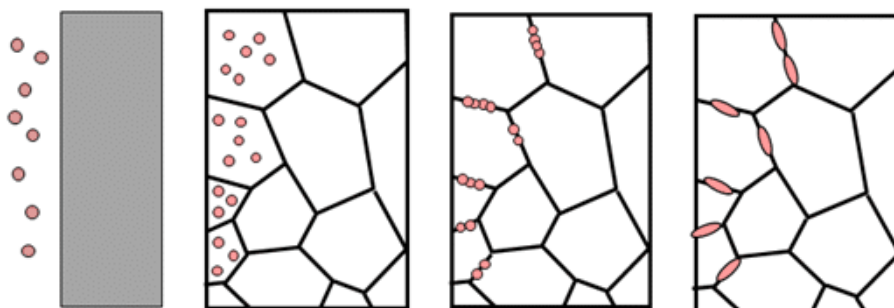
6. Φυσικοί κίνδυνοι

6.1. Ψαθυροποίηση μετάλλων

Η ευθραυστότητα των υλικών που μεταφέρουν ή περιέχουν υδρογόνο προκαλείται από την απώλεια της ολκιμότητας του μεταλλικού υλικού και την μείωση της ικανότητας να δέχεται φορτίο, λόγω της απορρόφησης των ατόμων ή των μορίων του υδρογόνου από το μέταλλο. Το αποτέλεσμα της απορρόφησης αυτής είναι η «ευθραυστότητα του υδρογόνου» (hydrogen embrittlement), με αποτέλεσμα τα μεταλλικά στοιχεία να ραγίζουν και να καταλήγουν σε θραύση σε τάσεις μικρότερες από τις τάσεις που θα κατέληγαν σε θραύση χωρίς την παραπάνω συνθήκη (Valentini et al., 2019).

Διαδικασία ψαθυροποίησης

Σε θερμοκρασία δωματίου τα άτομα υδρογόνου μπορούν να απορροφηθούν από κράματα χάλυβα. Το απορροφούμενο υδρογόνο μπορεί να υφίσταται είτε σε ατομική, είτε σε μοριακή μορφή. Στη διάρκεια του χρόνου το υδρογόνο διαχέεται στα όρια των μεταλλικών κόκκων και σχηματίζει φυσαλίδες ανάμεσα σε αυτά. Αυτές οι φυσαλίδες ασκούν πίεση στους μεταλλικούς κόκκους. Η πίεση μπορεί να αυξηθεί σε σημεία που το μέταλλο έχει μειωμένη ολκιμότητα και αντοχή με αποτέλεσμα την αστοχία (Αποστολόπουλος Χαράλαμπος and Τσερπές Κωνσταντίνος, 2015).



Εικόνα 22: Απεικόνιση διαδικασίας ψαθυροποίησης (πηγή: Αστοχία υλικών Ι, Πανεπιστήμιο Κρήτης)

Καταστάσεις που οδηγούν σε απορρόφηση υδρογόνου

Το υδρογόνο μπορεί να διαχυθεί μέσα στον χάλυβα, ακόμη και σε θερμοκρασία δωματίου, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω. Αυτό μπορεί να συμβεί κατά τη διάρκεια που το μέταλλο έρχεται σε επαφή με το υδρογόνο. Η απορρόφηση υδρογόνου μπορεί, επίσης, να συμβεί, όταν ο χάλυβας εκτεθεί σε οξέα ή εάν διαβρωθεί.

Θραύση ανάμεσα στους κόκκους



Εικόνα 23: Απεικόνιση θραύσης (πηγή: Αστοχία υλικών Ι, Πανεπιστήμιο Κρήτης)

Ένα παράδειγμα αστοχίας, λόγω ευθραυστότητας του υδρογόνου, φαίνεται στα παραπάνω σχήματα. Η αριστερή εικόνα δείχνει μια μακροσκοπική άποψη ενός σπασμένου, επιψευδαργυρωμένου, χαλύβδινου μπουλονιού. Η δεξιά εικόνα δείχνει μια μεγέθυνση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου της επιφάνειας της θραύσης. Σε αυτή την εικόνα διακρίνονται οι μεμονωμένοι κόκκοι στην επιφάνεια της θραύσης, κάτι που είναι ενδεικτικό διακοκκώδους θραύσης. Το μπουλόني έγινε εύθραυστο κατά τη διαδικασία ηλεκτρολυτικής επίστρωσης ψευδαργύρου.

Στην περίπτωση της ευθραυστότητας του υδρογόνου οι φυσαλίδες υδρογόνου στα όρια των κόκκων αποδυναμώνουν το μέταλλο. Η διακοκκώδης ρωγμάτωση συμβαίνει, όταν σχηματίζονται ρωγμές και αναπτύσσονται κατά μήκος των εξασθενημένων ορίων των κόκκων σε ένα μέταλλο.

Προϋποθέσεις αστοχίας λόγω ευθραυστότητας υδρογόνου

Υπάρχουν τρεις προϋποθέσεις για αστοχία λόγω ευθραυστότητας υδρογόνου:

- Ευαίσθητο υλικό
- Έκθεση σε περιβάλλον που περιέχει υδρογόνο
- Η παρουσία εφελκυστικής τάσης

Οι χάλυβες υψηλής αντοχής με αντοχή σε εφελκυσμό μεγαλύτερη από περίπου 1000 MPa είναι τα κράματα, που είναι πιο ευάλωτα στην ευθραυστότητα του υδρογόνου. Όσον αφορά την τάση που προκαλεί την θραύση, αρκεί ακόμη και η υπολειμματική τάση εφελκυσμού μέσα σε ένα εξάρτημα, για να προκαλέσει αστοχία του υλικού.

Πρόληψη ευθραυστότητας υδρογόνου

Προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία ευθραυστότητας του υδρογόνου μπορούμε να μειώσουμε την έκθεση σε υδρογόνο, καθώς και την έκθεση σε υψηλή θερμοκρασία (ψήσιμο), μετά από ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση ή άλλες διεργασίες που οδηγούν σε απορρόφηση υδρογόνου. Η ευθραυστότητα υδρογόνου των επιμεταλλωμένων εξαρτημάτων μπορεί να αποφευχθεί με το ψήσιμο τους στους 190° έως 220 °C εντός λίγων ωρών μετά τη διαδικασία επιμετάλλωσης. Κατά το ψήσιμο, το υδρογόνο διαχέεται έξω από το μέταλλο. Ενδεικτικοί τρόποι για την αποφυγή θραύσης, λόγω ευθραυστότητας υδρογόνου, είναι η χρήση χάλυβων χαμηλότερης αντοχής, καθώς και η μείωση της υπολειπόμενης και εφαρμοζόμενης τάσης. Τέλος, υπάρχουν δοκιμές βάσει προτύπων, που μπορούν να πραγματοποιηθούν για να αξιολογηθεί αν η διεργασία μπορεί να οδηγήσει σε ευθραυστότητα του χάλυβα υδρογόνου.

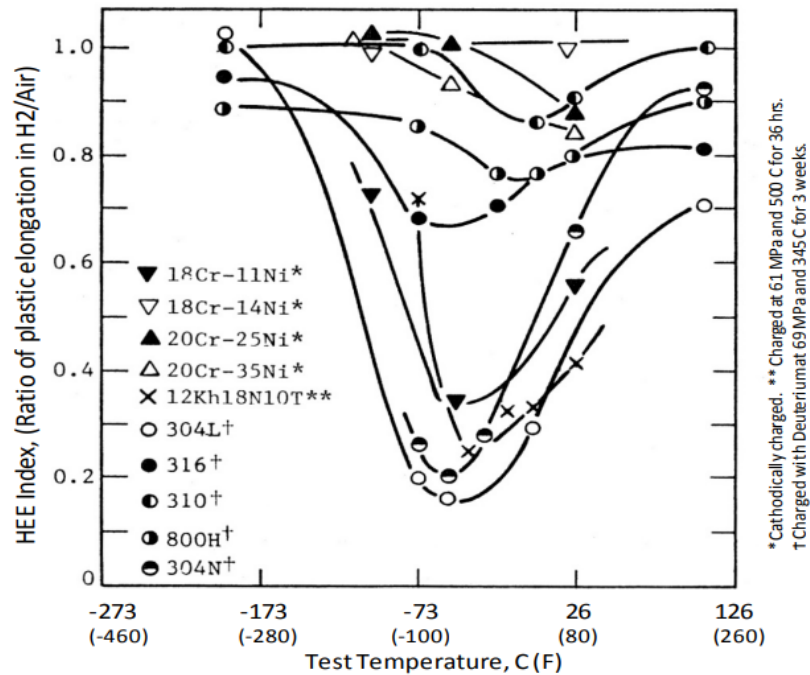
6.2. Ψαθυροποίηση χαμηλής θερμοκρασίας

Έχει παρατηρηθεί ότι η ψαθυροποίηση, λόγω του υδρογόνου, μπορεί να εμφανιστεί σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Ωστόσο, η συγκεκριμένη κατάσταση είναι πιο σοβαρή κοντά στην θερμοκρασία δωματίου για πολλά υλικά (Jonathan A. Lee, 2016). Με βάση το “μοντέλο παγίδευσης υδρογόνου” η παγίδευση του υδρογόνου μπορεί να θεωρηθεί ως η δέσμευση των ατόμων υδρογόνου από ακαθαρσίες, ελαττώματα δομής ή κάποια συστατικά μικροδομής στο κράμα.

Αποτελέσματα πειραμάτων (Jonathan A. Lee, 2016) δείχνουν ότι η ενέργεια δέσμευσης και η διαχυτικότητα του υδρογόνου εξηγούν γιατί η ευθραυστότητα του υδρογόνου είναι πιο έντονη κοντά σε θερμοκρασίες δωματίου και γίνεται λιγότερο σοβαρή ή αμελητέα σε υψηλότερες ή χαμηλότερες περιοχές θερμοκρασίας.

Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες η διαχυτικότητα του υδρογόνου συμβαίνει με αργό ρυθμό για να γεμίσει με θύλακες υδρογόνου το υλικό. Σε υψηλές θερμοκρασίες η κινητικότητα του υδρογόνου ενισχύεται και η πιθανότητα παγίδευσης μειώνεται. Σε υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης μπορεί να υπάρξει θραύση, χωρίς τη συνεισφορά του υδρογόνου, επειδή η αργή κινητικότητα του υδρογόνου δεν είναι επαρκής.

Στο παρακάτω σχήμα αποτυπώνεται το φαινόμενο ευθραυστότητας του υδρογόνου πολλών κραμάτων χάλυβα, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας:



Διάγραμμα 24: Ευθραυστότητα συναρτήσει θερμοκρασίας (πηγή: Hydrogen Embrittlement, NASA 2016)

Η επίδραση της ψαθυροποίησης του υδρογόνου παρατηρείται πιο έντονη σε θερμοκρασίες δωματίου και πλησίον του μηδενός. Σε θερμοκρασίες πιο υψηλές και πιο χαμηλές δεν υπάρχει η ίδια έντονη επίδραση. Ωστόσο, αυτό δεν είναι απόλυτο για όλα τα κράματα, και πιο συγκεκριμένα, εξαιρούνται κάποια κράματα νικελίου και κοβαλτίου.

Ψαθυροποίηση χαμηλής θερμοκρασίας υλικών

Σε χαμηλές θερμοκρασίες, και ειδικότερα σε κρυογενικές θερμοκρασίες, τα περισσότερα υλικά μετατρέπονται από όλκιμα σε ψαθυρά. Κατά συνέπεια, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία των υλικών που εμπεριέχουν υδρογόνο και να οδηγήσουν σε ατύχημα. Συγκεκριμένα, υλικά και κράματα χάνουν σε μεγάλο βαθμό την αντοχή τους, όπως τα κράματα σίδηρου – νικελίου, κάνοντας τα ακατάλληλα για την αποθήκευση υδρογόνου. Από την άλλη πλευρά, κράματα αλουμινίου έχουν καλή συμπεριφορά, όταν μειώνεται η θερμοκρασία, καθιστώντας τα κατάλληλα για αποθήκευση υδρογόνου.

6.3. Τεχνικές θραύσης υλικών

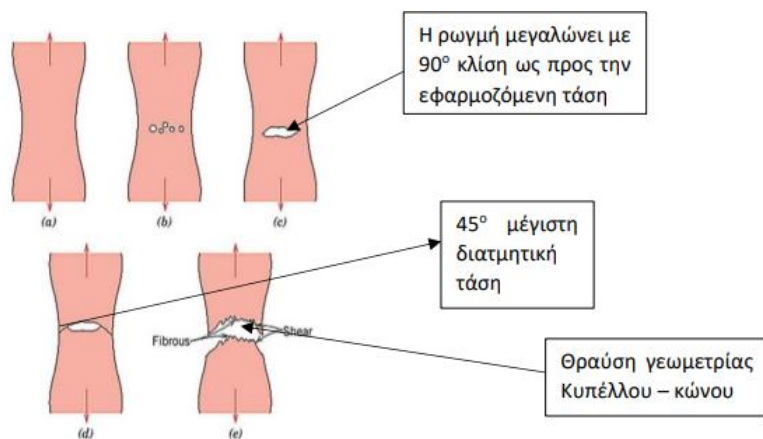
Η θραύση διακρίνεται, ανάλογα με την ολκιμότητα του χάλυβα, σε όλκιμη και ψαθυρή θραύση, ενώ ανάλογα με την διάδοση του ρήγματος της θραύσης, σε διακρυσταλλική ή περικρυσταλλική θραύση.

Ως «θραύση» ορίζεται ο διαχωρισμός του μετάλλου σε δύο ή περισσότερα κομμάτια, αποτέλεσμα επιβαλλόμενης στατικής τάσης (σταθερής ή αργά μεταβαλλόμενης), ή λόγω κόπωσης και ερπυσμού (Αποστολόπουλος Χαράλαμπος and Τσερπές Κωνσταντίνος, 2015).

Οι δύο βασικοί τρόποι θραύσης είναι ο όλκιμος και ο ψαθυρός.

Συνοπτικά, τα στάδια της όλκιμης θραύσης σε δοκίμιο, που υπόκειται σε μονοαξονικό εφελκυσμό, φαίνονται σχηματικά παρακάτω και είναι:

- (α) Αρχική στένωση του δοκιμίου
- (β) Σχηματισμός μικρών κοιλοτήτων
- (γ) Συνένωση κοιλοτήτων και σχηματισμός ρωγμής
- (δ) Ανάπτυξη ρωγμής
- (ε) Τελική διατμητική θραύση σε γωνία 45^ο ως προς τη διεύθυνση της τάσης



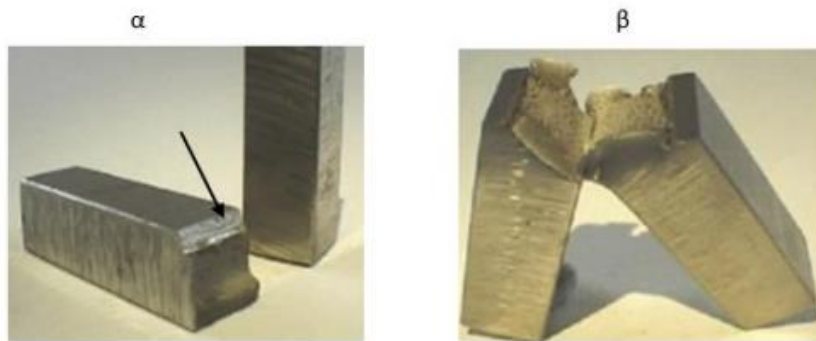
Εικόνα 25: Απεικόνιση ρωγμής θραύσης (Αστοχία υλικών Ι, Πανεπιστήμιο Κρήτης).

Διατμητική θραύση: Ο μηχανισμός θραύσης εξελίσσεται μέσω των ατελειών που δρουν ως σημεία συγκέντρωσης τάσεων, και, άρα, έχουμε την ανάπτυξη τοπικά επαγόμενων τάσεων μεγαλύτερων του ορίου διαρροής, οι οποίες με τη σειρά τους προκαλούν τοπικές, πλαστικές παραμορφώσεις και οδηγούν στην ανάπτυξη ρωγμών στο δοκίμιο.

Ψαθυρή θραύση: Η διαδικασία που εξελίσσεται με πολύ μεγάλη ταχύτητα και υπάρχει μικρός χρόνος μεταξύ της έναρξης της αστοχίας και της πλήρους ρήξης. Όταν αρχίσει η θραύση, η μικρορωγμή διαδίδεται κάθετα προς τη διεύθυνση της εφαρμοζόμενης τάσης, χωρίς να απαιτείται προοδευτικά υψηλότερη τάση. Η ψαθυρή θραύση σχετίζεται με την ορθή τάση εφελκυσμού ως προς την επιφάνεια θραύσης, και είναι το αποτέλεσμα της απόσπασης των ατόμων σε αντίθεση με την διάτμηση.

Τα μέταλλα θραύονται με τον μηχανισμό της ψαθυρής θραύσης υπό τις εξής προϋποθέσεις (Αστοχία υλικών Ι, Πανεπιστήμιο Κρήτης) :

- επίδραση κρουστικών τάσεων
- χαμηλές θερμοκρασίες
- υψηλή σκληρότητα (λόγω καθίζησης και διασποράς)



Εικόνα 26: Κατηγορίες ψαθυρής θραύσης (Αστοχία υλικών Ι, Πανεπιστήμιο Κρήτης).

- *Διακρυσταλλική (transgranular) θραύση* συμβαίνει όταν ένα ρήγμα εξελίσσεται δια μέσου των κόκκων του υλικού. Συνήθως, εμφανίζεται στα λεπτόκοκα υλικά. Επειδή σε χαμηλότερες θερμοκρασίες τα όρια των κόκκων έχουν μεγαλύτερη αντοχή από τους ίδιους τους κόκκους, ευνοείται το συγκεκριμένο είδος διάδοσης του ρήγματος.
- *Περικρυσταλλική (intergranular) θραύση* συμβαίνει όταν ένα ρήγμα εξελίσσεται στα όρια των κόκκων, συνήθως όταν αυτά είναι εξασθενημένα. Σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες εξασθενούν τα όρια των κόκκων, οπότε ευνοείται αυτού του τύπου η θραύση. Μεγάλο μέγεθος κόκκων και υψηλότερες τάσεις διευκολύνουν την περικρυσταλλική θραύση.

6.4. Θερμική συστολή υλικών

Είναι φυσικό τα υλικά να διαστέλλονται όταν θερμαίνονται και να συστέλλονται όταν ψύχονται. Διαφορετικά υλικά έχουν διαφορετικούς συντελεστές θερμικής συστολής, γεγονός που καταδεικνύει ότι πρέπει να γίνονται προσαρμογές για τις διαφορετικές διαστάσεις τους σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Εάν όχι, ενδέχεται να προκύψουν προβλήματα που σχετίζονται με την ασφάλεια (π.χ. διαρροές).

Πιο συγκεκριμένα, ζητήματα διαρροών αφορούν στοιχεία, όπως φλάντζες, συνδέσεις και αρμούς. Αυτά τα στοιχεία υπόκεινται επανειλημμένα σε κύκλο θερμικής διαστολής/συστολής, που οδηγούν σε διαρροή. Η επιλογή υλικών με σχετικά χαμηλό συντελεστή θερμοκρασιακής διαστολής, όπως το αλουμίνιο, ο χαλκός, οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες, ο ορείχαλκος, το μονέλ ή ινκονέλ είναι σημαντική για τις περιπτώσεις χρήσεις του υδρογόνου. Μη μεταλλικά υλικά που επίσης αντέχουν σε υγρό υδρογόνο είναι το τεφλόν, οι μεμβράνες *nylon* και το νάιλον (Cadwallader and Herring, 1999).

7. Χημικοί κίνδυνοι

7.1. Μίγματα H_2 -Air, H_2 - O_2

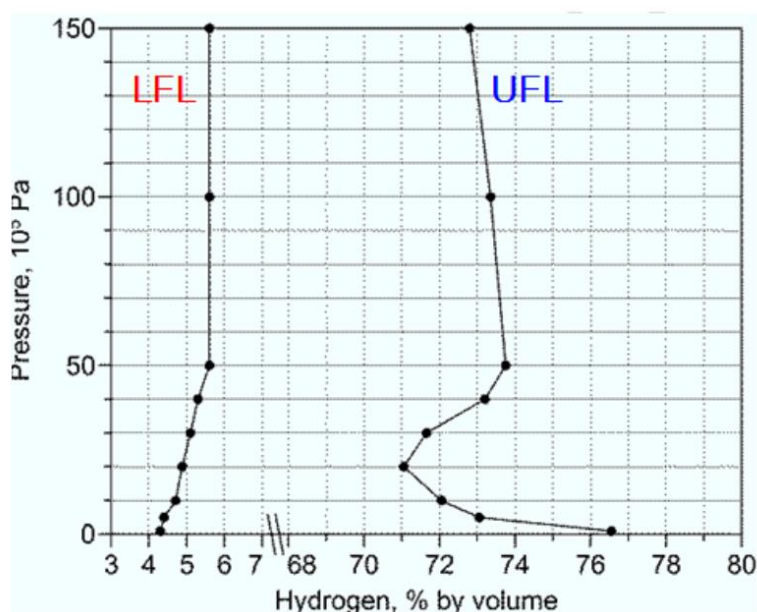
Το υδρογόνο, προκειμένου να αναφλεγεί, πρέπει να αναμιχθεί με ένα οξειδωτικό, το μείγμα να είναι εντός των ορίων ευφλεκτότητας, και να υπάρχει κατάλληλη πηγή ανάφλεξης. Το μείγμα του υδρογόνου με τον αέρα, το οξυγόνο ή άλλα οξειδωτικά είναι πολύ εύφλεκτο σε ένα ευρύ φάσμα συγκεντρώσεων. Αυτό ορίζεται από τα όρια ευφλεκτότητας κάθε μείγματος,

και είναι το ποσοστό κατ' όγκο υδρογόνου στο μείγμα στο οποίο θα αναφλεγούν οι ατμοί του καυσίμου, όταν εκτεθούν σε πηγή ανάφλεξης επαρκούς ενέργειας. Τα όρια ευφλεκτότητας εξαρτώνται από την ενέργεια ανάφλεξης, τη θερμοκρασία, την πίεση, την παρουσία αραιωτικών, το μέγεθος και διαμόρφωση της εγκατάστασης.

Ένα εύφλεκτο μείγμα μπορεί να αραιωθεί με οποιοδήποτε από τα συστατικά που αποτελείται έως ότου η συγκέντρωση του μείγματος να βρεθεί εκτός ορίου ευφλεκτότητας:

- κάτω από το κατώτερο όριο ευφλεκτότητας (LFL)
- ή πάνω από το ανώτερο όριο ευφλεκτότητας (UFL).

Το κατώτερο όριο ευφλεκτότητας στα μείγματα υδρογόνου-αέρα βρίσκεται περίπου στο 4 τοις εκατό κατ' όγκο υδρογόνου και το ανώτερο όριο ευφλεκτότητας βρίσκεται περίπου 75 τοις εκατό κατ' όγκο. Η χαμηλότερη πίεση στην οποία μπορεί να αναφλεγεί το εύφλεκτο μείγμα με μια πηγή χαμηλής ενέργειας είναι περίπου 6,9 kPa (1 psia) σε συγκέντρωση υδρογόνου είναι μεταξύ 20 και 30 τοις εκατό κατ' όγκο (NASA, 1997). Παρακάτω παρατηρούμε το διάγραμμα κατώτερου ορίου αναφλεξιμότητας (LFL) και ανώτερου ορίου αναφλεξιμότητας (UFL), ανάλογα με την πίεση.



Διάγραμμα 27: Όρια αναφλεξιμότητας (πηγή: Hydrogen properties relevant to safety, Ulster University)

Το εύρος ευφλεκτότητας για υδρογόνο-οξυγόνο είναι από 4 έως 95 τοις εκατό κατ' όγκο υδρογόνο. Η χαμηλότερη πίεση που παρατηρείται για ανάφλεξη είναι 57 Pa (0,008 psia) σε συγκέντρωση υδρογόνου 50 τοις εκατό κατ' όγκο, όταν χρησιμοποιείται υψηλής ενέργειας πηγή ανάφλεξης.

Επιπλέον, τα όρια ευφλεκτότητας του υδρογόνου εξαρτώνται από την κατεύθυνση διάδοσης της φλόγας. Οι περιοχές των ορίων ευφλεκτότητας για διαφορετικές κατευθύνσεις διάδοσης της φλόγας παρουσιάζονται παρακάτω:

Ανοδική διάδοση		Οριζόντια διάδοση		Καθοδική διάδοση	
LFL %	UFL %	LFL %	UFL %	LFL %	UFL %
3,9-5,1	67,9-75	6,0-7,15	65,7-71,4	8,5-9,45	68-74,5

Πίνακας 28: Όρια αναφλεξιμότητας (πηγή: Hydrogen properties relevant to safety, Ulster University)

Για συστήματα όπως συσκευές ηλεκτρόλυσης ή κυψέλες καυσίμου, διαρροές μπορεί να οδηγήσουν στο σχηματισμό ενός εύφλεκτου μείγματος υδρογόνου-οξυγόνου και, επομένως, είναι σημαντικό να υπάρχει γνώση του ορίου ευφλεκτότητας. Το εύρος ευφλεκτότητας για μείγματα υδρογόνου-οξυγόνου, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι από 4 έως 95 vol. %. Τα όρια ευφλεκτότητας των μιγμάτων υδρογόνου-οξυγόνου εξαρτώνται, επίσης, από την πίεση.

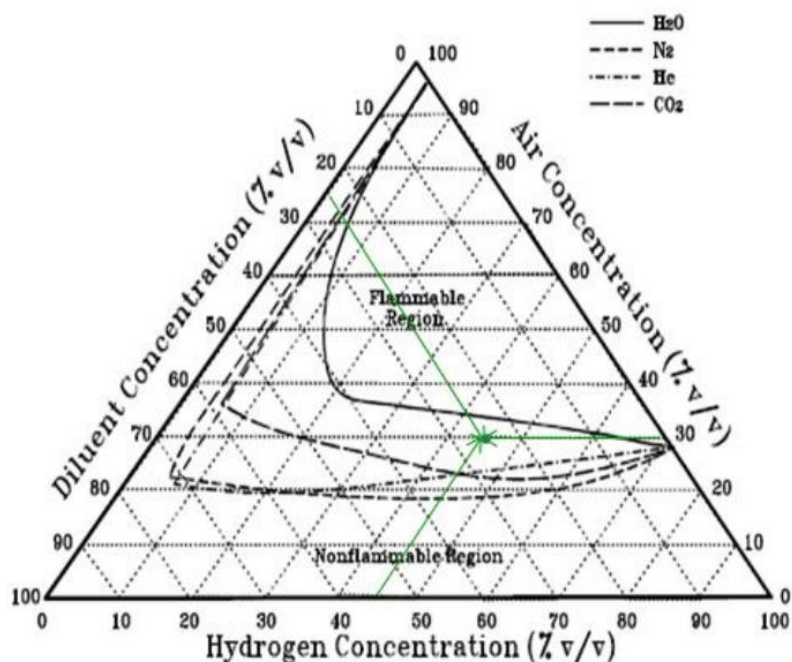
Τα όρια ευφλεκτότητας καθορίστηκαν από το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 1839 (B) στο εύρος των πιέσεων 1-20 bar, όπως φαίνεται στον πίνακα. Το εύρος ευφλεκτότητας των μιγμάτων υδρογόνου-οξυγόνου μικραίνει για πιέσεις στην περιοχή από 1-20 bar και σε πιέσεις μεγαλύτερες από 20 bar αυξάνονται τόσο το LFL, όσο και το UFL (S. Tretsiakova-McNally, 2021).

Pressure, bar	LFL at 20°C, vol. %	UFL at 20°C, vol. %	LFL at 80°C, vol. %	UFL at 80°C, vol. %
1	4.0	95.2	3.8	95.4
5	4.6	94.6	4.4	95.0
10	5.0	94.2	4.8	94.6
20	5.4	94.2	5.2	94.6
50	5.5	94.6	5.3	95.0
100	5.7	94.9	5.7	95.3
150	5.7	95.1	5.3	95.5
200	5.9	95.1	5.7	95.5

Πίνακας 29: Όρια αναφλεξιμότητας συναρτήσει θερμοκρασιών (πηγή: Hydrogen properties relevant to safety, Ulster University)

7.2. Επίδραση αδρανών

Αραιωτικοί παράγοντες και αδρανή υλικά επηρεάζουν, επίσης, το εύρος ευφλεκτότητας και επιδρούν, μεταξύ άλλων, και κατασβεστικά. Τα όρια ευφλεκτότητας για συστήματα υδρογόνου-αραιωτικού αέρα παρουσιάζονται ως τριαδική γραφική παράσταση στο παρακάτω σχήμα.



Διάγραμμα 30: Εύφλεκτη περιοχή (πηγή:Hydrogen properties relevant to safety, Ulster University)

Αυτό το διάγραμμα χρησιμεύει για τον προσδιορισμό του καταλληλότερου παράγοντα αραιώσης, ανάλογα με την εφαρμογή ή τις ανάγκες κατάσβεσης πυρκαγιάς υδρογόνου. Για παράδειγμα, το μείγμα που αποτελείται από 45 vol. % υδρογόνο, 30 % αέρα και 25 vol. % αραιωτικό. Το σημείο υποδεικνύεται με την πράσινη κουκκίδα σε αυτό το διάγραμμα. Για την επιλεγμένη σύνθεση τα αραιωτικά, όπως το ήλιο, το διοξείδιο του άνθρακα και το άζωτο θα εξακολουθούν να βρίσκονται εντός του εύρους ευφλεκτότητας, ενώ η χρήση νερού ως αραιωτικού θα οδηγήσει σε σχηματισμό μη εύφλεκτου μίγματος. Το νερό είναι το πιο αποτελεσματικό στη μείωση του εύρους ευφλεκτότητας και το ήλιο λιγότερο.

7.3. Επίδραση αλογόνων

Οι αλογονάνθρακες έχουν χρησιμοποιηθεί ιστορικά για την κατάσβεση πυρκαγιών, όπως και οι αραιωτικοί παράγοντες. Λειτουργούν επεμβαίνοντας στην αλυσιδωτή αντίδραση της καύσης.

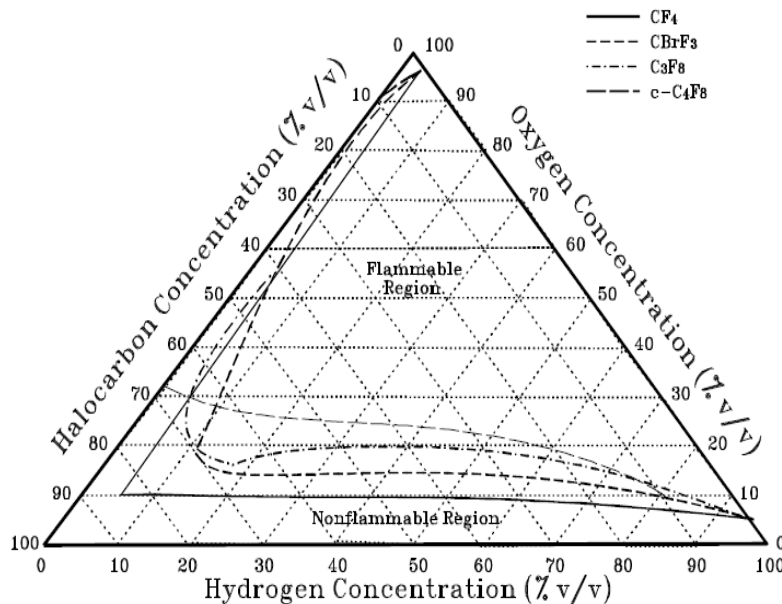
Ο παρακάτω πίνακας συγκρίνει την επίδραση του αζώτου N_2 και των αναστολέων αλογονάνθρακα (βρωμομεθάνιο CH_3Br και βρωμοτριφθορομεθάνιο $BrCF_3$), που απαιτούνται για την κατάσβεση φλόγας διάχυσης υδρογόνου στον αέρα. Οι αναστολείς που περιέχουν αλογόνο είναι πιο αποτελεσματικοί, όταν προστίθενται στο ρεύμα αέρα. Το άζωτο είναι πιο αποτελεσματικό, όταν προστίθεται στο ρεύμα καυσίμου.

Αναστολέας	Συγκέντρωση % στη φλόγα για κατάσβεση
Προσθήκη στον αέρα	
Άζωτο	94,1
CH_3Br	11,7
$CBrF_3$	17,7
Προσθήκη στο καύσιμο	
Άζωτο	52,4

CH ₃ Br	58,1
CBrF ₃	56,6

Πίνακας 31: Όρια συγκεντρώσεων για κατάσβεση, (πηγή: Hydrogen properties relevant to safety, Ulster University)

Αυτό το διάγραμμα χρησιμεύει για τον προσδιορισμό του καταλληλότερου παράγοντα αλογονάνθρακα, ανάλογα με την εφαρμογή ή τις ανάγκες κατάσβεσης πυρκαγιάς υδρογόνου. Παρατηρείται ότι το C₄F₈ έχει τη μικρότερη επίδραση στο όριο ευφλεκτότητας και το CF₄ έχει τη μεγαλύτερη.



Διάγραμμα 32: Εύφλεκτη περιοχή (πηγή: Hydrogen properties relevant to safety, Ulster University)

7.4. Θερμική αστάθεια

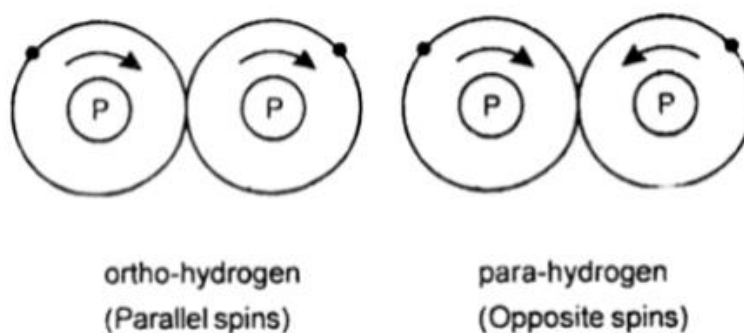
Στα περισσότερα άτομα υδρογόνου ο πυρήνας αποτελείται από ένα μοναδικό πρωτόνιο, αν και μια σπάνια μορφή (ή «ισότοπο») υδρογόνου περιέχει, τόσο ένα πρωτόνιο, όσο και ένα νετρόνιο. Αυτή η μορφή υδρογόνου είναι που ονομάζεται δευτέριο ή βαρύ υδρογόνο. Υπάρχουν και άλλα ισότοπα υδρογόνου, όπως το τρίτιο με δύο νετρόνια και ένα πρωτόνιο, αλλά αυτά τα ισότοπα είναι ασταθή και διασπώνται ραδιενεργά.

Το μεγαλύτερο μέρος της μάζας ενός ατόμου υδρογόνου συγκεντρώνεται στον πυρήνα. Στην πραγματικότητα, το πρωτόνιο έχει πάνω από 1800 φορές περισσότερη μάζα από το ηλεκτρόνιο. Τα νετρόνια έχουν σχεδόν την ίδια μάζα, όσο τα πρωτόνια. Ωστόσο, η ακτίνα της τροχιάς του ηλεκτρονίου που ορίζει το μέγεθος του ατόμου είναι περίπου 100.000 φορές μεγαλύτερη από την ακτίνα του πυρήνα. Τα άτομα υδρογόνου αποτελούνται σε μεγάλο βαθμό από κενό χώρο (Lanz, 2001). Τα φορτία που σχετίζονται με το πρωτόνιο και το ηλεκτρόνιο του κάθε ατόμου υδρογόνου αλληλοαναιρούνται και είναι ηλεκτρικά ουδέτερα.

Από χημικής άποψης, η περιφορά ηλεκτρονίου γύρω από ένα πυρήνα είναι εξαιρετικά αντιδραστική. Για το λόγο αυτό, τα άτομα υδρογόνου συνδυάζονται φυσικά σε μοριακά ζεύγη (H₂ αντί για H). Κάθε πρωτόνιο σε ένα ζεύγος υδρογόνου έχει ένα πεδίο, που μπορεί

να χαρακτηριστεί περιστροφικό . Μόρια στα οποία και τα δύο πρωτόνια έχουν την ίδια φορά περιστροφής είναι γνωστά ως «ortho-hydrogen», και μόρια στα οποία τα πρωτόνια έχουν αντίθετη φορά περιστροφής είναι γνωστά ως «para-hydrogen».

Πάνω από το 75% του κανονικού υδρογόνου σε θερμοκρασία δωματίου είναι ortho-hydrogen. Αυτή η διαφορά γίνεται σημαντική σε πολύ χαμηλά επίπεδα θερμοκρασίας, αφού το ortho-hydrogen γίνεται ασταθές και αλλάζει στην πιο σταθερή διάταξη, αυτήν του para-hydrogen, απελευθερώνοντας θερμότητα στη διαδικασία. Αυτή η θερμότητα μπορεί να περιπλέξει τις διεργασίες υδρογόνου, ιδιαίτερα στην υγροποίηση.



Εικόνα 33: Σχηματική απεικόνιση περιστροφής ηλεκτρονίων (πηγή: <https://unacademy.com/>, accessed on 17/12/2022)

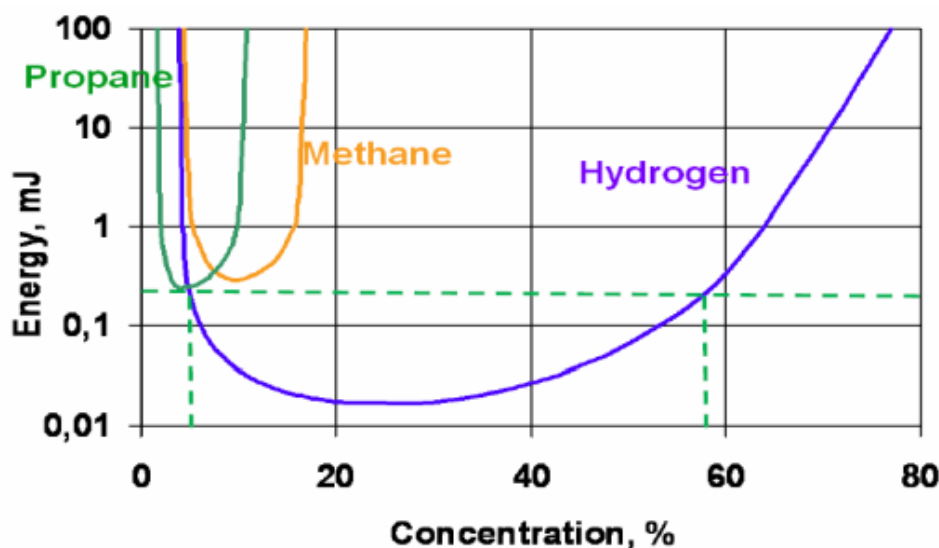
8. Φαινόμενα εκρήξεων

8.1. Ενέργεια / τρόπου ανάφλεξης

Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για την ανάφλεξη των εύφλεκτων αερίων και ατμών είναι η ελάχιστη τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία είναι αποθηκευμένη σε ένα κύκλωμα εκφόρτισης , με όσο το δυνατόν μικρότερη απώλεια στα καλώδια. Με τον τρόπο αυτόν, αναφλέγει το μείγμα καυσίμου – αέρα, ενώ αυτό είναι σε ηρεμία, στην πιο εύφλεκτη σύνθεση (S. Tretsiakova-McNally, 2021). Για μια δεδομένη σύνθεση μείγματος πρέπει να υπάρχουν οι ακόλουθες παράμετροι του κυκλώματος εκφόρτισης, σε βέλτιστες συνθήκες: χωρητικότητα, επαγωγικότητα, τάση φόρτισης, σχήμα και διαστάσεις των ακροδεκτών, καθώς και απόσταση μεταξύ τους. Εκτός από τη σύνθεση του μείγματος, η ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως η αρχική πίεση και θερμοκρασία του μείγματος. Δεδομένου ότι οι περισσότερες πηγές ανάφλεξης παράγουν περισσότερα από 10 mJ, πρακτικά όλα τα κοινά καύσιμα θα αναφλεγούν στο μείγμα με τον αέρα, εάν η συγκέντρωση υπερβαίνει το κατώτερο όριο ευφλεκτότητας (LFL). Οι πηγές ανάφλεξης μπορούν να σχηματιστούν από κρούσεις. Για παράδειγμα, εκκενώσεις σπινθήρων υψηλής ενέργειας μπορούν να πυροδοτήσουν άμεσα την έκρηξη.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης υδρογόνου στο εύφλεκτο μείγμα (είτε με αέρα, είτε με οποιοδήποτε άλλο οξειδωτικό). Για ένα δεδομένο εύφλεκτο μείγμα και έναν τύπο ανάφλεξης υπάρχει μία ελάχιστη ενέργεια, κάτω από την οποία δεν συμβαίνει ανάφλεξη. Η ελάχιστη ενέργεια

ανάφλεξης γίνεται άπειρη στα όρια ευφλεκτότητας, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 34: Ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης συναρτήσει της συγκέντρωσης (Sources of hydrogen ignition and prevention measures, Tretsiakova - McNally).

Τύποι πηγών ανάφλεξης και μηχανισμοί ανάφλεξης

Ο κατάλογος των πιθανών πηγών ανάφλεξης φαίνεται παρακάτω:

Ηλεκτρικές πηγές:

- Ηλεκτρικοί σπινθήρες (π.χ. από ηλεκτρικό εξοπλισμό). Όταν δύο ηλεκτρισμένα σώματα πλησιάσουν αρκετά μεταξύ τους, αναπτύσσονται ηλεκτρικοί σπινθήρες, όταν τα θετικά φορτισμένα σωματίδια κινούνται προς τα αρνητικά. Παραδείγματα σπινθήρων έχουμε από χαλαρούς ηλεκτρικούς συνδέσμους, από διακόπτες κατά το άνοιγμα ή κλείσιμο, από σύνδεση ή αποσύνδεση φιν κ.α.
- Στατικές εκκενώσεις (π.χ. σε μη γειωμένα φίλτρα σωματιδίων). Η ηλεκτροστατική εκκένωση συμβαίνει με τον ίδιο ακριβώς μηχανισμό όπως πάνω, όμως η φόρτιση των σωματιδίων οφείλεται, συνήθως, σε μηχανική τριβή και αφορά όχι μόνο στερεά υλικά αλλά και ρευστά σε κίνηση.
- Ηλεκτρικό τόξο (διακόπτες, ηλεκτροκινητήρες, φορητά τηλέφωνα, τηλειδιοποιητές και ραδιόφωνα). Στους περισσότερους πίνακες χαμηλής και μέσης τάσης, το μονωτικό υλικό που υπάρχει μεταξύ των ενεργών μερών τους (μπάρες, καλώδια, εξοπλισμός) είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας. Η απόσταση που θα πρέπει να έχουν αυτά τα ενεργά μέρη μεταξύ τους, για να μην δημιουργούνται ηλεκτρικές εκκενώσεις, εξαρτάται από την τάση που εφαρμόζεται στα άκρα τους. Ηλεκτρικό τόξο ονομάζουμε το φαινόμενο κατά το οποίο η μόνωση αυτή που προσφέρει ο ατμοσφαιρικός αέρας (διηλεκτρική αντοχή) διασπάται απότομα, εκλύοντας τεράστιες ποσότητες ενέργειας και θερμότητας.
- Εκκένωση κεραυνού (π.χ. κεραυνός χτυπά κοντά στην εγκατάσταση εξαερισμού υδρογόνου). Ο κεραυνός είναι ηλεκτρική εκκένωση μεταξύ σύννεφου και εδάφους σε ώρα καταιγίδας. Προσβάλλει περισσότερο τα υψηλά και απομονωμένα αντικείμενα, και μπορεί η θερμοκρασία να φτάσει τους 30.000 Κ.

- Ηλεκτρικό φορτίο που παράγεται από τη λειτουργία του εξοπλισμού (συμπιεστές, γεννήτριες, οχήματα και άλλος εξοπλισμός). Το ρεύμα που καταναλώνεται σε μηχανήματα, είτε παράγεται από γεννήτριες.
- Ηλεκτρικά βραχυκυκλώματα. Βραχυκύκλωμα ονομάζεται η σύνδεση δύο σημείων ενός κυκλώματος με αγωγό αμελητέας αντίστασης. Χαρακτηριστικό γνώρισμα ενός βραχυκυκλώματος είναι ότι τα δύο άκρα της συσκευής είναι ισοδυναμικά, δηλαδή, το ηλεκτρικό δυναμικό έχει την ίδια τιμή και στα δύο άκρα. Η συσκευή, φυσικά, διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, αφού εμφανίζει ηλεκτρική αντίσταση.

Μηχανικές πηγές:

- Μηχανικοί σπινθήρες (από βαλβίδες που κλείνουν γρήγορα): Σπινθήρες που προκαλούνται από την τριβή ή κρούση εξαρτημάτων
- Μηχανική κρούση και/ή τριβή: Η κρούση και η τριβή είναι μηχανισμοί πρόκλησης σπινθήρων
- Θραύση μετάλλου: Μπορεί να δώσει σπινθήρα ή θερμική ενέργεια
- Μηχανική δόνηση και επαναλαμβανόμενη κάμψη: Επίσης μπορεί να δώσει σπινθήρα ή θερμική ενέργεια

Θερμικές πηγές:

- Καυτές επιφάνειες (π.χ. εξοπλισμός θέρμανσης). Αύξηση της θερμοκρασίας στοιχείων, λόγω των διεργασιών που εκτελούν
- Ανοιχτές φλόγες. Φλόγες από εστίες πυρκαγιάς ή από διεργασίες καύσης (π.χ. πετκοκ, LPG, Diesel), που δίνουν θερμοκρασίες άνω των 1000^{0C}
- Καυτές δέσμες. Μια καυτή δέσμη εκτόξευσης ή ψεκασμού είναι μια τυρβώδης φλόγα διάχυσης, που προκύπτει από την καύση ενός καυσίμου, το οποίο απελευθερώνεται συνεχώς με κάποια σημαντική ορμή προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση ή κατευθύνσεις, που προκύπτει από κάποια διεργασία.
- Εξατμίσεις (π.χ. κινητήρες εσωτερικής καύσης). Οι εξατμίσεις οχημάτων, αλλά και οι καμινάδες μονάδων καύσης, δίνουν υψηλές θερμοκρασίες.
- Εκρηκτικά μείγματα (π.χ. γομώσεις που χρησιμοποιούνται σε κατασκευές, πυροτεχνήματα ή πυροτεχνικές συσκευές). Εκρήξεις από υλικά μπορούν να δώσουν υψηλές θερμοκρασίες και υψηλές πιέσεις σε κύματα
- Καταλύτες, εκρηκτικά και αντιδραστικά χημικά υλικά
- Κρουστικά κύματα ή/και θραύσματα. Αποτέλεσμα εκρήξεων είναι τα κύματα και τα θραύσματα, που έχουν υψηλές θερμοκρασίες, ως αποτέλεσμα της έκρηξης
- Ανακλώμενα ή επαναλαμβανόμενα ακουστικά και κρουστικά κύματα

Άλλες πηγές:

- Ιοντίζουσα ακτινοβολία (ραδιενέργεια)
- Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία
- Ακτινοβολία υπερήχων
- Φως (λέιζερ/φλας)
- Αδιαβατική συμπίεση (αύξηση πίεσης)

8.2. Φαινόμενο BLEVE

Οι κίνδυνοι πυρκαγιάς και έκρηξης, που σχετίζονται με την αποθήκευση και τη μεταφορά εύφλεκτων υλικών, είναι θέμα αρκετά ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Το «Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion –BLEVE» είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει, όταν ένα κλειστό δοχείο καυσίμου υποβάλλεται σε θερμότητα για μεγάλη διάρκεια. Η θερμότητα αεριοποιεί το υγρό καύσιμο, με αποτέλεσμα, λόγω της αυξανόμενης πίεσης, να διαρρηγνύεται το δοχείο και να απελευθερώνονται οι εύφλεκτοι ατμοί του καυσίμου, οδηγώντας σε σειρά εκρήξεων. Ένα τέτοιο φαινόμενο μπορεί να αποβεί καταστροφικό, τόσο σε επίπεδο ανθρώπινων ζώων, όσο και σε επίπεδο υλικών ζημιών. Στο παρελθόν υπήρξαν πολυάριθμες μελέτες για το φαινόμενο BLEVE για διάφορα καύσιμα, π.χ. κηροζίνη, βενζίνη, LPG, LNG, υδρογόνο και άλλα.



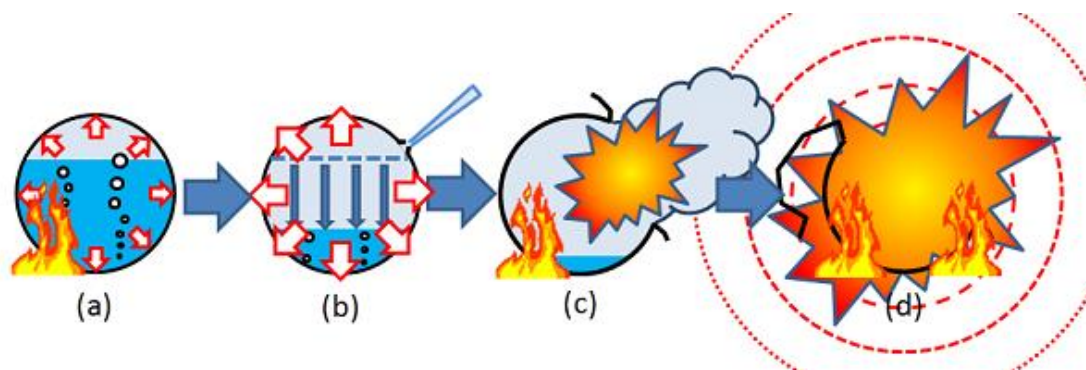
Εικόνα 35: Έκρηξη BLEVE, (Πηγή: <https://nypost.com/>, BLEVE at Philadelphia Energy Solutions Refining Complex US)

Οι κανονισμοί για την ασφαλή αποθήκευση και μεταφορά εύφλεκτων υλικών εξαρτώνται από την ανάλυση του συμβάντος σε πιθανά σενάρια, π.χ. διασπορά, πυρκαγιά και έκρηξη, και τις αντίστοιχες συνέπειές τους. Τα BLEVE είναι προβλεπόμενα σενάρια, όταν υπάρχουν κλειστά δοχεία υδρογόνου (υγρό ή αέρια), και δυνητικά μπορεί να υποβάλλονται σε θερμότητα (Mishra et al., 2015). Οι εκτινάξεις φλεγόμενων μαζών (βολίδες fireballs) είναι οι συνέπειες των BLEVE.

Το υγρό υδρογόνο (LH_2) περιέχει μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα και απόδοση από το συμπιεσμένο αέριο υδρογόνο (CGH_2), βρίσκοντας εφαρμογή στις μεταφορές υδρογόνου για μεγάλες αποστάσεις, τρένα, πλοία και αεροπλάνα. Οι κίνδυνοι και η επικινδυνότητά για το LH_2 είναι κάπως διαφορετικά από το συμπιεσμένο αέριο υδρογόνο (CGH_2). Το υγρό υδρογόνο, γενικά, αποθηκεύεται σε δεξαμενές με διπλό τοίχωμα, υπερ-μονωμένο υπό κενό. Το χειρότερο σενάριο είναι η αστοχία της δεξαμενής του LH_2 από φωτιά, απελευθερώνοντας την αποθηκευμένη μηχανική και χημική ενέργεια σε μορφή εκρηκτικού κύματος. Σε περίπτωση ρήξης της δεξαμενής αποθήκευσης LH_2 , ο διογκούμενος ατμός, που βράζει λόγω της θερμότητας που λαμβάνει σε περίπτωση πυρκαγιάς, οδηγεί σε έκρηξη (BLEVE). Η έκρηξη αυτή ορίζεται ως «αιφνίδια απελευθέρωση μεγάλης μάζας υπερθερμασμένου υγρού υπό πίεση στο ατμόσφαιρα» (Cirrone et al., 2023). Σε αυτή την περίπτωση, η αστοχία της δεξαμενής αποθήκευσης, που περιέχει υγρό υπό πίεση σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από

σημείο βρασμού της ατμοσφαιρικής πίεσης, θα συνεπαγόταν με την απελευθέρωση του διογκούμενου ατμού. Οι κίνδυνοι περιλαμβάνουν ένα κύμα έκρηξης, βολίδες και βλήματα φωτιάς.

Ο μετριασμός του περιστατικού περιλαμβάνει την παροχή δεξαμενών αποθήκευσης LH₂ με διατάξεις ανακούφισης πίεσης (PRD), οι οποίες εξαερίζουν το υδρογόνο, προκειμένου να αποφευχθεί η συσσώρευση πίεσης σε μια δεξαμενή. Εάν το PRD αποτύχει, η ακεραιότητα της δεξαμενής διακυβεύεται. Άρα, ο σωστός σχεδιασμός διατάξεων PRD περιλαμβάνει υπολογισμό του «ρυθμού απελευθέρωσης ατμών», που θα καθορίσει την αποτροπή από το BLEVE.



Εικόνα 36: Απεικόνιση BLEVE, (Πηγή: www.fireandsafetycommunity.com)

Ιστορικά ατυχήματα - Ελλάδα

Την 1η Μαΐου του 1999 , στο 178ο χλμ. Αθηνών-Λαμίας, άνδρες της τροχαίας σταμάτησαν ένα βυτιοφόρο, το οποίο μετέφερε προπάνιο, στο πλαίσιο του ελέγχου της εφαρμογής του μέτρου απαγόρευσης κυκλοφορίας φορτηγών στα εθνικά οδικά δίκτυα.

Στο ύψος της παράκαμψης για Καμένα Βούρλα, ο 39χρονος οδηγός σταματάει το βυτιοφόρο και κατεβαίνει από το όχημα, με σκοπό να ελεγχθεί από τους αστυνομικούς. Όσο όμως εκείνος δέχεται τον έλεγχο, το βυτιοφόρο είναι σταματημένο σε ένα σημείο, που οι πιθανότητες για τροχαίο είναι αυξημένες.

Ένα μικρό φορτηγό, που μετέφερε κρέατα, καταλήγει με φόρα πάνω στο βυτιοφόρο. Σε περιπτώσεις, όπως του προπανίου, όταν υπάρξει έντονη πίεση σαν κι αυτή που προκάλεσε η σύγκρουση, έχουμε το φαινόμενο BLEVE.

Η έκρηξη που ακολουθεί εκτινάσσει τους αστυνομικούς 150 μέτρα μακριά και βρίσκουν ακαριαίο θάνατο. Ο οδηγός του βυτιοφόρου, ο οποίος έχει απομακρυνθεί 200 μέτρα, δέχεται μια λαμαρίνα, που είχε εκτοξευτεί από την έκρηξη, και πεθαίνει. Ο 35χρονος οδηγός του φορτηγού, που μετέφερε τα κρέατα, εξαϋλώνεται και το σώμα του δεν βρίσκεται ποτέ.



Εικόνα 37: Σημείο ατυχήματος Καμμένων Βούρλων (πηγή: daypress.gr accessed on 21/02/2023)

Ιστορικά ατυχήματα - Μεξικό

Περίπου στις 5:30 π.μ. της 19ης Νοεμβρίου 1984 υπήρξε μία μεγάλη πυρκαγιά και σειρά εκρήξεων σε έναν τερματικό σταθμό αποθήκευσης και διανομής αερίου (LPG) στο Σαν Χουάν της Πόλης του Μεξικού.

Η αιτία του ατυχήματος δε μπορούσε να καθοριστεί πλήρως, λόγω της καταστροφής των εγκαταστάσεων, καθώς και της απουσίας αυτοπτών μαρτύρων. Εκτιμάται ότι διέρρευσε υγραέριο από μια δεξαμενή ή έναν αγωγό. Ατμοί υγραερίου σχημάτισαν ένα εύφλεκτο σύννεφο ατμού, ύψους περίπου 2 μέτρων. Το σύννεφο αναφλέγεται, πιθανώς από κάποια θερμή δραστηριότητα ή θερμή εγκατάσταση εδάφους. Υπάρχουν ενδείξεις ότι η αρχική έκρηξη μπορεί να προήλθε από υπερπλήρωση δεξαμενής ή την ύπαρξη υπερπίεσης μιας από τις δεξαμενές αποθήκευσης. Πολλές αιτίες μπορεί να συνέβαλαν στην καταστροφή, συμπεριλαμβανομένων του σχεδιασμού του τερματικού (π.χ. ανεπαρκής απόσταση μεταξύ δεξαμενών, αναποτελεσματική ανίχνευση διαρροής αερίου, έλλειψη παθητικής πυροπροστασίας ή έλλειψη συστημάτων προστασίας).

Υπήρξαν περίπου 600 θάνατοι, περίπου 7.000 τραυματισμοί, 200.000 άνθρωποι εκκένωσαν την περιοχή και ο τερματικός σταθμός καταστράφηκε. Οι εκρήξεις καταγράφηκαν σε σεισμόμετρο 20 χλμ. μακριά και η μεγαλύτερη έκρηξη ήταν 0,5 βαθμών της κλίμακας Ρίχτερ (S. Tretsiakova-McNally, 2021)(Center of Chemical Process Safety, 2014).



Εικόνα 38: Σημείο ατυχήματος Μεξικό 1984 (πηγή: devastating disasters.com accessed on 21/02/2023)

8.3. Έκρηξη/Επιπτώσεις έκρηξης

Η έκρηξη του υδρογόνου αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για τις εγκαταστάσεις και τις εφαρμογές. Το αέριο υδρογόνο σχηματίζει εύφλεκτα ή εκρηκτικά μείγματα με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο σε ένα ευρύ φάσμα συγκεντρώσεων στην περιοχή 4,0%-75% και 18%-59%, αντίστοιχα, όπως έχει ήδη αναφερθεί σε άλλα κεφάλαια.

Η ικανότητα ενός μίγματος υδρογόνου-αέρα να εκραγεί είναι μεγαλύτερη από αυτή των υδρογονανθράκων. Η άμεση εκκίνηση της έκρηξης μίγματος υδρογόνου-αέρα είναι δυνατή με τη μικρότερη δυνατή ενέργεια σε σχέση με άλλα καύσιμα. Ελάχιστη ενέργεια έναυσης αέριου υδρογόνου σε κανονική θερμοκρασία και πίεση είναι η 0,017mJ (S. Tretsiakova-McNally, 2021).

Παρακάτω η σύγκριση ελάχιστης ενέργειας για ανάφλεξη και έκρηξη σε σχέση με άλλα καύσιμα:

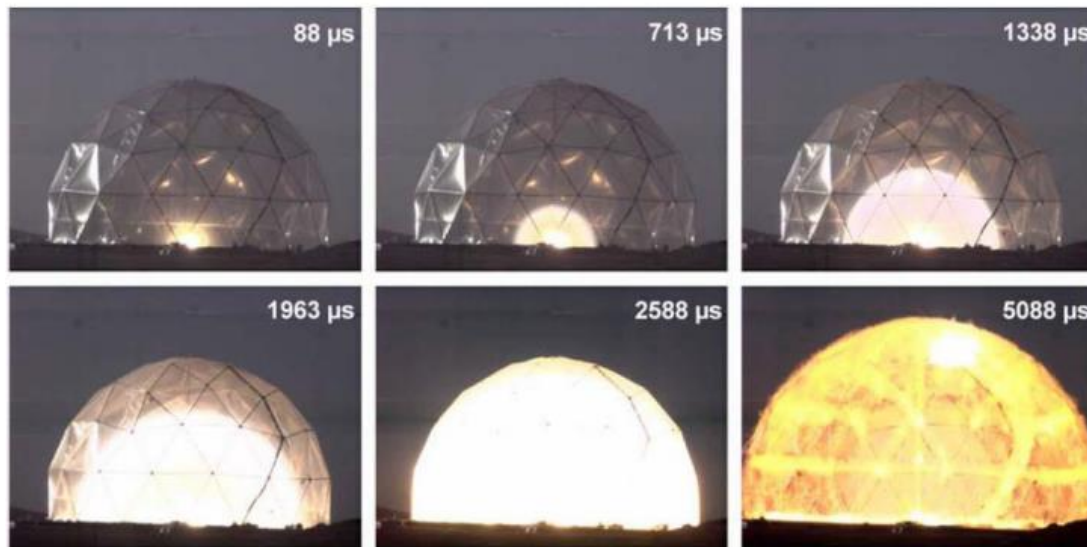
Type of fuel	Minimum Ignitions/Initiation Energy	
	Deflagration, mJ	Detonation, mJ
Hydrogen	0.017	$1.0 \cdot 10^7$
Methane	0.25	$2.3 \cdot 10^{11}$
Propane	0.28	$2.5 \cdot 10^9$

Πίνακας 39: Ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης ανά καύσιμο (πηγή: Dealing with hydrogen explosions, Tretsiakova-McNally)

Έκρηξη μείγματος 30% Υδρογόνου-Αέρα

Πραγματοποιήθηκε ελεγχόμενη έκρηξη, στα πλαίσια πειράματος, για την απεικόνιση της.

Η ελεγχόμενη έκρηξη έγινε σε ημισφαιρικό πλαίσιο πολυαιθυλενίου ακτίνας 5,23 μέτρων. Το κύμα έκρηξης καταγράφηκε έως και 15,6 μέτρα από το σημείο της έκρηξης.



Εικόνα 40: Ελεγχόμενη έκρηξη (πηγή: Dealing with hydrogen explosions, Tretsiakova-McNally)

Η ταχύτητα έκρηξης (Charpen-Jouguet) για 30 vol. % μείγμα υδρογόνου-αέρα ήταν $D=1.977$ m/s [1], πίεση Charpen-Jouguet 15,3 MPa.

Τα κύματα έκρηξης είναι επιβλαβή με διάφορους τρόπους. Οι επιπτώσεις μπορούν να ταξινομηθούν ως πρωτογενείς, δευτερογενείς και τριτογενείς.

Πρωτεύουσες επιπτώσεις:

- i. Βλάβη στην ακοή
- ii. Βλάβη στους πνεύμονες και άλλα εσωτερικά όργανα

Δευτερεύουσες επιπτώσεις:

- iii. Τραυματισμοί που οφείλονται σε ιπτάμενα συντρίμια (π.χ. θραύσματα γυαλιού)
- iv. Κατάρρευση κατασκευών σε άτομα με αποτέλεσμα σοβαρούς τραυματισμούς ή θάνατο

Τριτογενείς επιπτώσεις:

- v. Ολόσωμη μετατόπιση ενός ατόμου

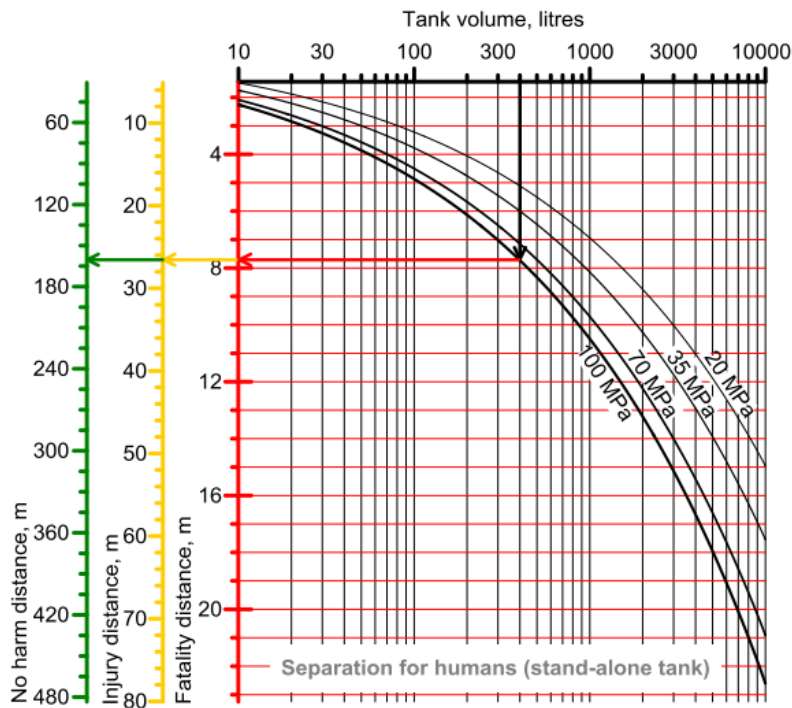
Οι περισσότερες προσεγγίσεις μοντελοποίησης ασχολούνται με τις επιπτώσεις της έκρηξης και της πυρκαγιάς. Σε πολλά σενάρια έκρηξης υδρογόνου, όμως, η ρίψη βλημάτων ή συντριμμίων, είναι, επίσης, σημαντική και σε ορισμένες περιπτώσεις, ακόμη και, κυρίαρχη. Όταν η διαδικασία καύσης του υδρογόνου αλλάζει από ανάφλεξη σε έκρηξη, η ρίψη βλημάτων ή των συντριμμίων μπορεί να είναι καταστροφική. Παραδείγματα περιλαμβάνουν εκρήξεις αερίου σε βιομηχανικό εξοπλισμό, μέσα σε αποθήκες ή σε εργοστάσιο. Αυτά τα σενάρια μπορεί να οδηγήσουν σε μεγάλο κίνδυνο συντριμμίων ή βολίδων φωτιάς.

Οποιαδήποτε μεθοδολογία εκτίμησης κινδύνου για το υδρογόνο, θα πρέπει να περιέχει μοντέλα για τη ρίψη συντριμμίων ή βλημάτων.

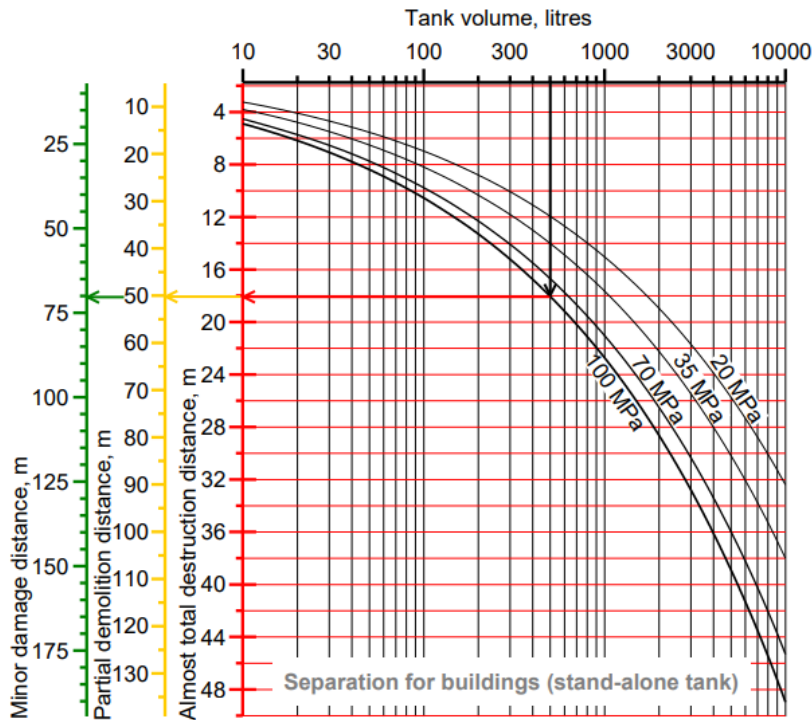
8.4. Αποστάσεις απόσβεσης

Δεν είναι μόνο η υπερπίεση που προκαλεί βλάβη αλλά και ο παλμός που μεταδίδεται σε ένα παρευρισκόμενο άτομο ή αντικείμενο στο σημείο της έκρηξης.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο Ulster (Molken and Kashkarov, 2015) επιτρέπει σε ενδιαφερόμενους να προσδιορίζουν τις αποστάσεις κινδύνου και ασφαλείας, για τους ανθρώπους και τα κτίρια, σε περίπτωση ρήξης δεξαμενής υδρογόνου υψηλής πίεσης από μια πυρκαγιά. Η μεθοδολογία προτείνει ένα σύνολο για τον γραφικό προσδιορισμό των αποστάσεων κινδύνου και ασφαλείας.



Εικόνα 41: Ασφαλείς αποστάσεις / αποστάσεις κινδύνου για ανθρώπους από δεξαμενή υδρογόνου υπό φωτιά (πηγή: Dealing with hydrogen explosions, Tretsiakova-McNally)



Εικόνα 42: Ασφαλείς αποστάσεις / αποστάσεις κινδύνου για κτίρια από δεξαμενή υδρογόνου υπό φωτιά (πηγή: Dealing with hydrogen explosions, Tretsiakova-McNally)

8.5. Αυτανάφλεξη

Η θερμοκρασία αυτανάφλεξης είναι η ελάχιστη θερμοκρασία που απαιτείται για την έναρξη μιας αντίδρασης καύσης μείγματος καυσίμου-οξειδωτικού απουσία οποιασδήποτε εξωτερικής πηγής ανάφλεξης.

Η τυπική θερμοκρασία αυτοανάφλεξης του υδρογόνου στον αέρα είναι πάνω από 510°C. Η θερμοκρασία είναι σχετικά υψηλή σε σύγκριση με τους υδρογονάνθρακες. Ωστόσο, αυτή η θερμοκρασία αυτόματης ανάφλεξης μπορεί να μειώνεται όταν το μείγμα έρχεται σε επαφή με καταλυτικές επιφάνειες, όπως η πλατίνα. Τα αντικείμενα που κυμαίνονται σε θερμοκρασίες από 500 °C έως 580 °C, μπορούν να αναφλέξουν μείγματα υδρογόνου-αέρα ή υδρογόνου-οξυγόνου σε ατμοσφαιρική πίεση. Τα ψυχρότερα αντικείμενα στους περίπου 320°C, μπορεί να προκαλέσουν ανάφλεξη υδρογόνου σε παρατεταμένη επαφή σε μικρότερη πίεση από την ατμοσφαιρική (S. Tretsiakova-McNally, 2021).

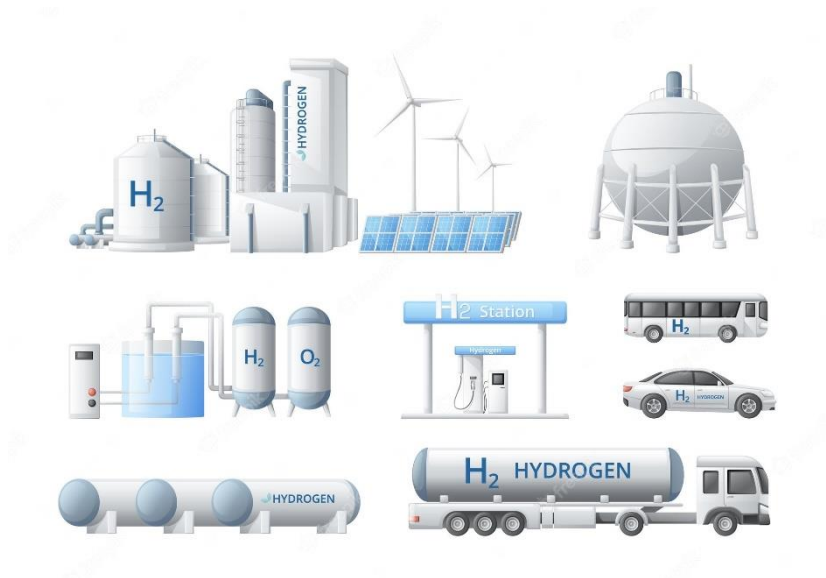
9. Κίνδυνοι σε εγκαταστάσεις και αποθήκες H₂

9.1. Κίνδυνοι σε εγκαταστάσεις H₂

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου, όπως έχει προαναφερθεί, αυτές μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες σχετικά με το καύσιμο που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του – ορυκτά καύσιμα και ανανεώσιμες πηγές. Η συντριπτική πλειοψηφία του υδρογόνου σήμερα προέρχεται από ορυκτά καύσιμα.

Σήμερα δεν υπάρχει σημαντική παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές, καθώς αυτή είναι μια ενεργοβόρα διαδικασία η οποία είναι συχνά θεωρείται αντιοικονομική, ιδιαίτερα σε σύγκριση με «γκρίζα» παραγωγή από συμβατικά καύσιμα (The hydrogen economy: opportunities and risks in energy transition, 2021.) Όμως, για τους σκοπούς της επίτευξης της ανθρακικά ουδέτερης οικονομίας στο μέλλον, η παραγωγή υδρογόνου θα χρειαστεί να αλλάξει όλο και περισσότερο.

Το πράσινο υδρογόνο παράγεται με ηλεκτρόλυση, μια διαδικασία που χρησιμοποιεί ηλεκτρικό ρεύμα για να χωρίζει το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο, χρησιμοποιώντας ενέργεια, που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το υδρογόνο προσφέρει πολλές επιλογές για τη μετάβαση στην ανανεώσιμη οικονομία: ως φορέας και αποθήκευση ενέργειας, ως μέσο για μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια, ως καύσιμο για μέσα μεταφοράς και ως υποκατάστατο για τη χρήση ορυκτών υδρογονανθράκων σε διάφορες βιομηχανίες, όπως ο χάλυβας, τα πετροχημικά και τα διυλιστήρια.



Εικόνα 43: Συστήματα αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου, (πηγή: <https://www.freepik.com/>, accessed on 22/03/2023)

Στη βιομηχανία, αεριοστρόβιλοι, παλινδρομικοί κινητήρες και κυψέλες καυσίμων αναπτύσσονται όλο και περισσότερο για περαιτέρω χρήση του υδρογόνου. Η χρήση του στην πετροχημική βιομηχανία είναι επίσης σημαντική. Επιπλέον, το υδρογόνο στις κυψέλες καυσίμου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για βαριές μεταφορές, όπως σε τρένα, αεροπλάνα ή πλοία. Το υδρογόνο καθιστά δυνατές τις μετακινήσεις χωρίς εκπομπές CO₂, αλλά βοηθά, επίσης, στην κάλυψη μεγαλύτερων αποστάσεων και αυτονομίας σε σύγκριση με οχήματα που κινούνται με μπαταρίες.

Συνοπτικά το υδρογόνο παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα:

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	
ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Καταναλώνεται καθαρά, χωρίς εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, απελευθερώνοντας μόνο νερό και ενέργεια	Σήμερα παράγεται ως επί των πλείστων από συμβατικά καύσιμα
Γίνεται δυνατή μεγαλύτερη αποθήκευση ενέργειας ανά μονάδα μάζας	Είναι ακριβό για να παραχθεί
Μπορεί να παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	Είναι ακριβό να αποθηκευτεί και να μεταφερθεί
Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σχεδόν σε όλες τις μορφές βιομηχανίας και στον αγροτικό τομέα	Απαιτούνται μεγάλες ποσότητες ενέργειας για την παραγωγή του
Μπορεί να συνεισφέρει σε εφαρμογές χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος εφόσον δεν μπορεί να μηδενιστεί τελείως	Η εφοδιαστική αλυσίδα του υδρογόνου είναι περίπλοκη και ακριβή
Μπορεί να προσφέρει ασφάλεια εφοδιασμού	Απαιτούνται αυστηρές προδιαγραφές ασφαλείας που πρέπει να καταρτιστούν

Πίνακας 43: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του υδρογόνου, (πηγή: The hydrogen economy: opportunities and risks in energy transition, Gellermann et al, 2021)

Σε όλο τον κόσμο γίνονται έργα για την περαιτέρω ανάπτυξη τεχνολογιών στους τομείς της ηλεκτρόλυσης υδρογόνου, αποθήκευσης και μεταφοράς. Πολλές από τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υδρογόνου και ενέργειας από υδρογόνο είναι αρκετά ώριμες. Η συντριπτική πλειοψηφία του υδρογόνου σήμερα παράγεται και χρησιμοποιείται επιτόπου στη βιομηχανία. Η παραγωγή της αμμωνίας και η διύλιση πετρελαίου είναι οι πρωταρχικοί στόχοι, αντιπροσωπεύουν τα 2/3 της χρήσης υδρογόνου. Η αμμωνία χρησιμοποιείται ως αζωτούχο λίπασμα. Στα διυλιστήρια πετρελαίου χρησιμοποιείται υδρογόνο για τη μεταφορά βαρύτερου πετρελαίου. Νέες εταιρείες εισέρχονται στην αγορά ως σχεδιαστές, κατασκευαστές και χειριστές σε μονάδες υδρογόνου. Οι καθιερωμένοι ενεργειακοί παίκτες αυξάνουν το μέγεθος τους και τις δραστηριότητες τους στον τομέα του υδρογόνου. Ως εκ τούτου, όλα τα έργα απαιτούν προσεκτική αξιολόγηση κινδύνου. Παρακάτω δίνεται επιγραμματικά το περίγραμμα των κινδύνων για τις εγκαταστάσεις του υδρογόνου, όπως έχουν αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια.

Κίνδυνος πυρκαγιάς και έκρηξης: Ο κύριος κίνδυνος των εγκαταστάσεων του υδρογόνου είναι η έκρηξη, αφού προκύψει διαρροή και το υδρογόνο, που διέφυγε, σχηματίζει εύφλεκτο μίγμα με τον αέρα. Οι διαρροές είναι δύσκολο να εντοπιστούν χωρίς εξειδικευμένους ανιχνευτές, καθώς το υδρογόνο είναι άχρωμο και άοσμο. Μια φλόγα υδρογόνου είναι σχεδόν αόρατη στο φως της ημέρας.

Τα στατιστικά στοιχεία έρευνας απωλειών (The hydrogen economy: opportunities and risks in energy transition, 2021) δείχνουν, ότι πολλές πυρκαγιές υδρογόνου προκύπτουν από την αυτανάφλεξη ξαφνικής απελευθέρωσης υδρογόνου, μέσω ρήξης δίσκων και βαλβίδων εκτόνωσης πίεσης. Το 25% των απωλειών αποδίδεται σε διαρροές. Από αυτές τις διαρροές το 40% δεν είχε εντοπιστεί εγκαίρως.

Σημαντικός παράγοντας που επιβάρυνε τις απώλειες ήταν ο ανεπαρκής αερισμός και εξαερισμός των σωληνώσεων. Τα δεδομένα δείχνουν το πλεονέκτημα του εντοπισμού του υδρογόνου σε εξοπλισμό σε εξωτερικούς χώρους. Έχει καταγραφεί ότι το υδρογόνο από λάθος απελευθερώνεται σε εξωτερικούς χώρους, πολλές φορές, χωρίς ανάφλεξη. Σχεδόν όλες, όμως, οι διαρροές σε εσωτερικό χώρο έχουν αναφλεγεί. Οι διαρροές σε εσωτερικούς χώρους είχαν ως αποτέλεσμα την έκρηξη, παρά την πυρκαγιά σε αναλογία 3:1, ενώ οι διαρροές σε εξωτερικούς χώρους είχαν ως αποτέλεσμα ίδιο αριθμό πυρκαγιών και εκρήξεων.

Ευθραυστότητα υλικού: Η διάχυση του υδρογόνου εντός των υλικών μπορεί να προκαλέσει ευθραυστότητα του μετάλλου και του χάλυβα και ένα ευρύ φάσμα εξαρτημάτων μπορεί να επηρεαστεί, όπως για παράδειγμα, σωληνώσεις, δοχεία ή εξαρτήματα μηχανημάτων. Σε συνδυασμό με την ευθραυστότητα, ενδέχεται να συμβεί πυρόλυση με υποβοήθηση υδρογόνου. Για την ασφάλεια των συστημάτων του υδρογόνου, είναι σημαντικό τα προβλήματα, όπως ο κίνδυνος ευθραυστότητας και η πυρόλυση με υποβοήθηση, να λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό, καθώς και να δημιουργούνται κατάλληλες συνθήκες αποτροπής των συμβάντων. Αυτό γίνεται με την επιλογή κατάλληλων υλικών. Η επιλογή των υλικών είναι εξίσου σημαντική με την εξέταση των συνθηκών λειτουργίας (πίεση αερίου, θερμοκρασία, μηχανική φόρτιση).

Υγεία και Ασφάλεια προσωπικού: Το υδρογόνο δεν είναι τοξικό και το τελικό προϊόν της καύσης είναι το καθαρό νερό. Ωστόσο, απαιτείται προσοχή και εκπόνηση συγκεκριμένων μελετών, για τον καθορισμό των απαραίτητων μέτρων υγείας και ασφάλειας στην εργασία, κυρίως λόγω της ευφλεκτότητας του υδρογόνου/αέρα.

9.2. Κίνδυνοι στην αποθήκευση και στη μεταφορά H₂

Η αποθήκευση του υδρογόνου υπό πίεση σε μεγάλα δοχεία και δεξαμενές είναι ήδη ώριμη τεχνολογία. Οι κίνδυνοι που συνδέονται με την αποθήκευση του υδρογόνου υπό πίεση στις δεξαμενές είναι γνωστοί, καθώς αυτή η μορφή αποθήκευσης χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες. Για το υδροποιημένο υδρογόνο υπήρξε σημαντική βελτίωση της αντοχής και της ποιότητας των δεξαμενών που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευσή του.

Ο κίνδυνος μεταφοράς υδρογόνου με αγωγούς και σταθμούς συμπίεσης είναι, επίσης, γνωστός και πρέπει αξιολογείται μεμονωμένα. Εκτός από τη χρήση κατάλληλων υλικών για να αποφευχθεί η ευθραυστότητα (βλ. ψαθυροποίηση υδρογόνου), η αξιολόγηση κινδύνου θα πρέπει να αντιμετωπίζει την αυξημένη επικινδυνότητα της ευφλεκτότητας των μειγμάτων υδρογόνου/αέρα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα καύσιμα.

10. Κίνδυνοι σε εφαρμογές H₂ και εφαρμογές αυτοκίνησης και σταθμών ανεφοδιασμών

10.1. Κίνδυνοι σε εφαρμογές H₂

Οι εφαρμογές του υδρογόνου είναι αρκετές, ωστόσο, από τις πλέον συνηθισμένες είναι η ηλεκτρόλυση του νερού για την παραγωγή του. Βλάβες και ζημιές που αφορούν τη συγκεκριμένη διαδικασία και μπορούν να φανούν επικίνδυνες είναι οι εξής:

- Βλάβες στο στοιχείο ηλεκτρόλυσης που μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικές ζημιές και απαιτήσεις συντήρησης, λόγω εκτεταμένης διακοπής της παραγωγής
- Βλάβες στις μεμβράνες (μεμβράνες ηλεκτρόλυσης του πολυμερούς ηλεκτρολύτη), οι οποίες είναι ευαίσθητες σε ακαθαρσίες και μπορεί να διακόψουν την παραγωγή για μεγάλα διαστήματα

- Βραχυκυκλώματα λόγω διάβρωσης στα ηλεκτρόδια που θα μπορούσαν να προκαλέσουν έκρηξη οξυγόνου-υδρογόνου-αερίου

Ο χειρισμός υδρογόνου στις εγκαταστάσεις υγροποίησης έχει, επίσης, σημαντικούς κινδύνους. Ο κύριος κίνδυνος στις εγκαταστάσεις υγροποίησης είναι ο χειρισμός του εκρηκτικού υδρογόνου, ο οποίος απαιτεί επαρκή προστατευτικά μέτρα και ιδιαίτερη εκπαίδευση.

Στοιχεία από ασφαλιστικές μελέτες έχουν δείξει για τις εφαρμογές του υδρογόνου (The hydrogen economy: opportunities and risks in energy transition, 2021), ότι η πυρκαγιά και η έκρηξη είναι οι πιο κρίσιμοι κίνδυνοι και έχουν προκαλέσει σημαντικό κόστος ζημιών στη λειτουργία των βιομηχανιών. Η συγκεκριμένη ανάλυση της Allianz αφορά περισσότερες από 470.000 αξιώσεις σε όλους τους κλάδους της βιομηχανίας σε διάστημα πέντε ετών και δείχνει πόσο δαπανηρός είναι ο κίνδυνος της φωτιάς και της έκρηξης. Οι πυρκαγιές και οι εκρήξεις έχουν προκαλέσει σημαντικές ζημιές και πληρωμές άνω των 14 δισ. ευρώ (16,75 δισ. \$) κατά την υπό εξέταση περίοδο. Εξαιρουμένων των φυσικών καταστροφών, περισσότερες από τις μισές αξιώσεις οφείλονταν σε αυτά τα αίτια, καθιστώντας την πυρκαγιά/έκρηξη την πρώτη αιτία απώλειας για επιχειρήσεις παγκοσμίως.

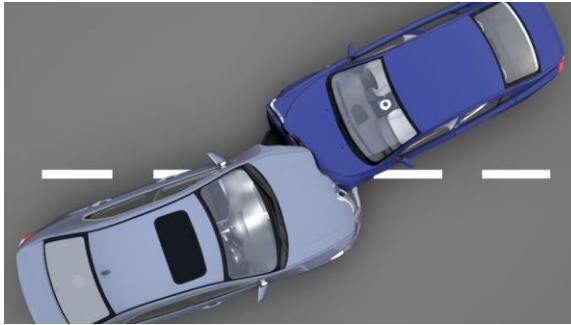


Εικόνα 44: Έκρηξη σε βιομηχανία, (πηγή: <https://www.ctif.org/news/hydrogen-refuelling-plant-explodes-norway>, accessed on 22/03/2023)

Το κόστος διακοπής της επιχείρησης μετά από πυρκαγιά προστίθεται στο τελικό σύνολο ζημιών. Για παράδειγμα, η ανάλυση της Allianz δείχνει ότι σε όλους τους κλάδους της βιομηχανίας, η μέση απώλεια από ένα περιστατικό πυρκαγιάς είναι περίπου 45% υψηλότερη από τη μέση άμεση απώλεια περιουσίας – και σε πολλές περιπτώσεις, το μερίδιο της συνολικής αξίωσης είναι πολύ υψηλότερο, ιδιαίτερα σε ασταθείς αγορές, όπως αυτές του πετρελαίου και του φυσικού αερίου. Ο κίνδυνος βλάβης των μηχανημάτων δεν πρέπει, επίσης, να υποτιμάται. Κατά την υπό εξέταση περίοδο, το 5% της συνολικής αξίας όλων των αξιώσεων οφειλόταν σε ζημία τεχνικού και μηχανολογικού εξοπλισμού.

10.2. Κίνδυνοι σε εφαρμογές αυτοκίνησης

Το υδρογόνο σε ένα όχημα μπορεί να αποτελέσει κίνδυνο για την ασφάλεια των επιβατών. Οι κίνδυνοι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν όταν το όχημα βρίσκεται σε λειτουργία και όταν δεν λειτουργεί αφορούν συνήθως την σύγκρουση του οχήματος.



Εικόνα 45: Σύγκρουση οχημάτων, (πηγή: google pics, accessed on 22/03/2023)

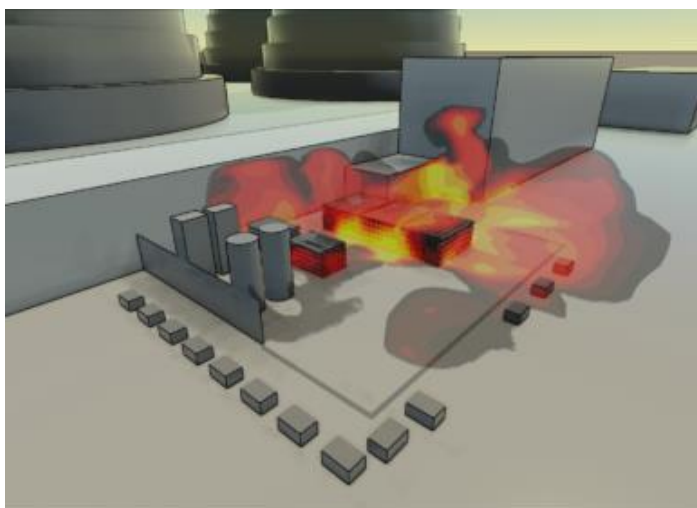
Πιθανά αποτελέσματα αφορούν σε πυρκαγιά και έκρηξη. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε περίπτωση πυρκαγιάς οι αναθυμιάσεις του υδρογόνου δεν είναι τοξικές. Το υδρογόνο, ως πηγή πυρκαγιάς ή έκρηξης, μπορεί να προέρχεται από την αποθήκευση καυσίμου, από τις γραμμές παροχής καυσίμου ή από την κυψέλη καυσίμου. Η κυψέλη καυσίμου θέτει μικρότερο κίνδυνο, αν και το υδρογόνο και το οξυγόνο διαχωρίζονται από μία πολύ λεπτή (~20-30 μm) πολυμερής μεμβράνη.

Σε περίπτωση ρήξης της μεμβράνης το υδρογόνο και το οξυγόνο ενώνονται. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα ανιχνευθεί εύκολα από έναν έλεγχο. Επιπλέον, οι γραμμές τροφοδοσίας θα πρέπει να αποσυνδεθούν αμέσως. Η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί η θερμοκρασία (60° έως 90°C) και είναι πολύ χαμηλή για να είναι πηγή θερμικής ανάφλεξης, ωστόσο, το υδρογόνο και το οξυγόνο μπορεί να συνδυαστούν στην επιφάνεια του καταλύτη και να δημιουργηθούν συνθήκες ανάφλεξης. Παρόλα αυτά, η πιθανή ζημιά θα ήταν περιορισμένη, λόγω μιας μικρής ποσότητας υδρογόνου, που υπάρχει στην κυψέλη καυσίμου και στις γραμμές παροχής καυσίμου.

Η μεγαλύτερη ποσότητα υδρογόνου ανά πάσα στιγμή υπάρχει στη δεξαμενή. Η αστοχία δεξαμενών είναι σημαντικός παράγοντας κινδύνου και περιλαμβάνει τις παρακάτω περιπτώσεις:

- καταστροφική ρήξη, λόγω κατασκευαστικού ελαττώματος στη δεξαμενή, ή από ελάττωμα, που προκαλείται από καταχρηστικό χειρισμό της δεξαμενής ή θραύση λόγω πίεσης, διάτρηση από αιχμηρό αντικείμενο, εξωτερική φωτιά
- με αστοχία ανοίγματος της συσκευής εκτόνωσης πίεσης
- τεράστια διαρροή, λόγω ελαττωματικής συσκευής εκτόνωσης πίεσης, χωρίς αιτία ή χημική ενεργοποίηση
- προκαλούμενο σφάλμα στο τοίχωμα της δεξαμενής, τρύπημα από αιχμηρό αντικείμενο, λειτουργία συσκευής εκτόνωσης πίεσης σε περίπτωση πυρκαγιάς (που είναι ο σκοπός της συσκευής)
- αργή διαρροή λόγω ρωγμών στην επένδυση της δεξαμενής, ελαττωματική συσκευή εκτόνωσης πίεσης ή ελαττωματική σύζευξη από τη δεξαμενή στη γραμμή τροφοδοσίας ή ανοίγματα που προκαλούνται από κρούση στη σύνδεση της γραμμής καυσίμου.

Παρόμοια ανάλυση αστοχίας μπορεί να εφαρμοστεί και στις γραμμές καυσίμου υψηλής και χαμηλής πίεσης.



Εικόνα 46: Απεικόνιση πυρκαγιάς, (πηγή: <https://www.gexcon.com/blog/hydrogen-hazards-too-dangerous-to-handle/>, accessed on 22/03/2023)

Σε μια μελέτη που διεξήχθη για λογαριασμό της Ford Motor Company, η Directed Technologies Inc. (C.E.Thomas, 1997) πραγματοποιήθηκε λεπτομερής αξιολόγηση των πιθανοτήτων των παραπάνω τρόπων αστοχίας. Το συμπέρασμα της μελέτης είναι, ότι μια καταστροφική ρήξη είναι ένα εξαιρετικά απίθανο γεγονός. Ωστόσο, υπάρχουν αρκετοί τρόποι αστοχίας, με αποτέλεσμα μεγάλη απελευθέρωση υδρογόνου.

Οι περισσότεροι από τους τρόπους αστοχίας που συζητήθηκαν παραπάνω μπορούν, είτε να αποφευχθούν, είτε η εμφάνισή τους και οι συνέπειες να ελαχιστοποιηθούν από:

- Πρόληψη διαρροών, μέσω σωστής σχεδίασης συστήματος, επιλογή επαρκούς εξοπλισμού (μερικοί ενδέχεται να απαιτηθούν περαιτέρω δοκιμές και έρευνες), επιτρέποντας την ανοχή σε κραδασμούς και κραδασμούς, τοποθέτηση εξαερισμού συσκευής ανακούφισης πίεσης, προστασία των γραμμών υψηλής πίεσης, εγκατάσταση μιας κανονικά κλειστής ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας σε κάθε γραμμή τροφοδοσίας δεξαμενής κ.λπ.
- ανίχνευση διαρροής, είτε με ανιχνευτή διαρροής, είτε με προσθήκη οσμών στο καύσιμο υδρογόνου (αυτό μπορεί να είναι πρόβλημα για τις κυψέλες καυσίμου)
- πρόληψη ανάφλεξης, μέσω αυτόματης αποσύνδεσης της τράπεζας μπαταριών, εξαλείφοντας, έτσι, την πηγή ηλεκτρικών σπινθήρων που προκαλούν κατά 85% πυρκαγιές στα οχήματα βενζίνης μετά από σύγκρουση, σχεδιάζοντας τις γραμμές παροχής καυσίμου, έτσι ώστε να είναι φυσικά διαχωρισμένες από όλες τις ηλεκτρικές συσκευές, μπαταρίες, κινητήρες και καλώδια στο μέγιστο δυνατό βαθμό, καθώς και σχεδιάζοντας το σύστημα ενεργητικού και παθητικού αερισμού (όπως ένα άνοιγμα, που επιτρέπει στο υδρογόνο διαφυγή προς τα πάνω).

Ο κίνδυνος τυπικά ορίζεται ως προϊόν πιθανότητας εμφάνισης και συνεπειών. Η προαναφερθείσα μελέτη από την Directed Technologies Inc. περιλαμβάνει λεπτομερή εκτίμηση κινδύνου, όπως και πολλά πιθανά ή πιο σοβαρά σενάρια ατυχήματος υδρογόνου, όπως:

- πυρκαγιά ή έκρηξη δεξαμενής καυσίμου σε απεριόριστους χώρους
- πυρκαγιά ή έκρηξη δεξαμενής καυσίμου σε σήραγγες

- διαρροές γραμμής καυσίμου σε απεριόριστους χώρους
- διαρροή καυσίμου στο γκαράζ
- ατυχήματα σταθμού ανεφοδιασμού

Το συμπέρασμα αυτής της μελέτης είναι, ότι σε μια σύγκρουση σε ανοιχτούς χώρους ένα αυτοκίνητο κυψελών καυσίμου υδρογόνου κατασκευασμένο με ασφάλεια, θα πρέπει να έχει λιγότερο πιθανό κίνδυνο από ό,τι θα είχε, είτε με φυσικό αέριο, είτε σε ένα όχημα βενζίνης. Σε περίπτωση σύγκρουση σήραγγας ένα όχημα κυψελών καυσίμου υδρογόνου, θα πρέπει να είναι σχεδόν εξίσου ασφαλές με ένα όχημα φυσικού αερίου. Επιπλέον, και τα δύο θα πρέπει να είναι δυνητικά λιγότερο επικίνδυνα από ένα όχημα βενζίνης ή προπανίου, με βάση προσομοιώσεις υπολογιστή που συγκρίνουν την ουσιαστική έκλυση βενζίνης και φυσικού αερίου, μετά από σύγκρουση σε ένα τούνελ. Ο μεγαλύτερος πιθανός κίνδυνος για το κοινό φαίνεται να είναι μια αργή διαρροή σε ένα κλειστό σπίτι γκαράζ, όπου η συσσώρευση υδρογόνου θα μπορούσε να οδηγήσει σε πυρκαγιά ή έκρηξη, εάν δεν υπήρχε υδρογόνο. Για το λόγο αυτό, εφαρμόζονται συσκευές ή μέτρα ανίχνευσης ή μετριάσμου του κινδύνου (όπως παθητικός ή ενεργητικός εξαερισμός).

Εν κατακλείδι, όσον αφορά την αυτοκίνηση, το υδρογόνο φαίνεται να εγκυμονεί κινδύνους της ίδιας τάξης μεγέθους με άλλα καύσιμα. Παρά την πεποίθηση του κοινού, το υδρογόνο είναι στην πραγματικότητα, από πολλές απόψεις, ασφαλέστερο καύσιμο από τη βενζίνη και το φυσικό αέριο.

Ωστόσο, μπορεί να χρειαστεί περαιτέρω έρευνα για τη διερεύνηση και τον ποσοτικό προσδιορισμό και των αιτιών και των συνεπειών διαρροών υδρογόνου, την ανάπτυξη νέων υλικών και συνδέσμων λιγότερο επιρρεπών σε διαρροές υδρογόνου, τρόποι διάρκειας ζωής και αστοχίας κυψελών καυσίμου κ.λπ.

Οι επιλεγμένες πληροφορίες θα πρέπει να τροφοδοτούνται στα μέσα ενημέρωσης και στο ευρύ κοινό, προκειμένου να αλλάξουν την εικόνα του υδρογόνου ως επικίνδυνο καύσιμο. Οι πρακτικές επιδείξεις μπορεί να είναι εξαιρετικά πολύτιμες από αυτή την άποψη.

10.3. Κίνδυνοι σε σταθμούς ανεφοδιασμών

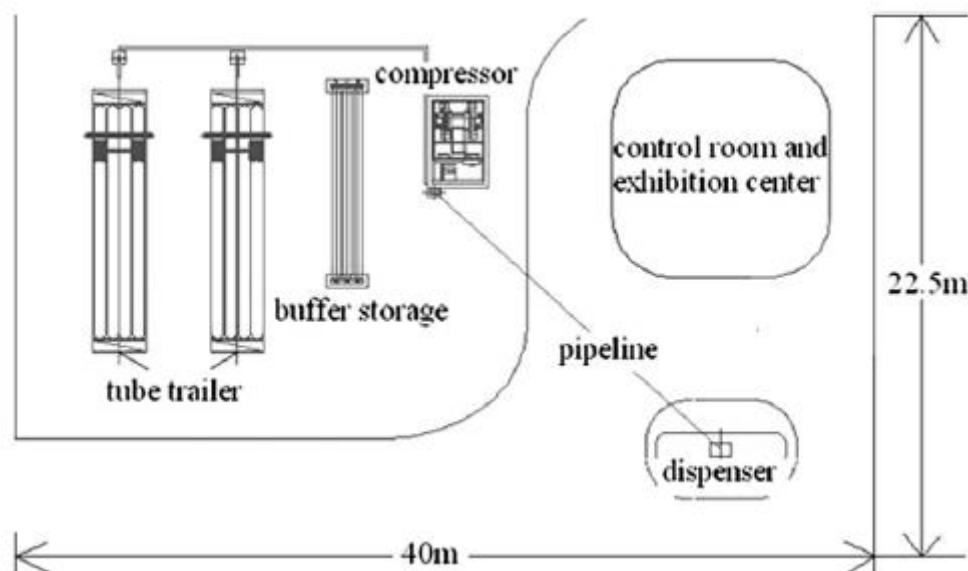
Η πιθανή έκθεση των ανθρώπων σε κίνδυνο σε σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου είναι κρίσιμη, καθώς το υδρογόνο θα διεισδύσει όλο και πιο έντονα στην αυτοκίνηση, με σκοπό την μείωση των εκπομπών του άνθρακα στον τομέα των μεταφορών.

Οι κίνδυνοι για το σταθμό ανεφοδιασμού αφορούν στο προσωπικό, στους πελάτες και σε τρίτους που εξυπηρετούνται αντίστοιχα. Ταυτόχρονα, πρέπει να εξετασθούν ατομικά μέτρα προστασίας, όπως και συλλογικά, σε κοινωνικό επίπεδο, καθώς συχνά οι σταθμοί ανεφοδιασμού είναι εντός του αστικού ιστού. Μελέτες δείχνουν ότι ο σημαντικότερος παράγοντας πρόκλησης κινδύνων είναι η διαρροή του αερίου υδρογόνου από τον συμπιεστή (Zhiyong et al., 2010), που προωθεί το αέριο για ανεφοδιασμό.

Σε έναν τυπικό σταθμό ανεφοδιασμού της αναφερόμενης μελέτης ισχύουν οι εξής ροές εργασιών: ο σταθμός έχει πίεση εγκατάστασης 35 MPa, το υδρογόνο καταφτάνει με οδικό ρυμουλκούμενο, το οποίο αποτελείται από κάποιους σωλήνες όγκου, περίπου 2,3 m³ έκαστος, και περιέχουν πίεση συμπιεσμένου υδρογόνου, όχι μεγαλύτερη από 200 bar (200 bar είναι το ανώτατο όριο που περιορίζει ο νόμος για τις μεταφορές στην Κίνα). Το ρυμουλκούμενο συνδέεται με εύκαμπτο σωλήνα, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με σωλήνωση 17 μέτρων με συμπιεστή. Ο συμπιεστής αντλεί υδρογόνο από το ρυμουλκούμενο για να γεμίσει μία δεξαμενή buffer μέχρι την πίεση των 414 bar. Η αποθήκευση buffer έχει κάποια

διασυνδεδεμένα κυλινδρικά δοχεία πίεσης όγκου περίπου $0,77 \text{ m}^3$ έκαστο. Κατά τον ανεφοδιασμό το υδρογόνο θα λαμβάνεται από τα κυλινδρικά δοχεία πίεσης μέσω σωληνώσεων στο αυτοκίνητο μέχρι την πίεση 350 bar.

Παρακάτω απεικονίζεται η σχηματική διάταξη της εγκατάστασης:



Εικόνα 47: Διάταξη σταθμού ανεφοδιασμών, (πηγή: Quantitative risk assessment on a gaseous hydrogen refueling station, Zhiyong et al 2010)

Η διαρροή του υδρογόνου μπορεί να είναι είτε στιγμιαία, είτε συνεχής από κάποιο στοιχείο. Η ανάφλεξη μιας στιγμιαίας απελευθέρωσης υδρογόνου θα έχει ως αποτέλεσμα μια έκρηξη σύννεφων ατμών (δημιουργία φαινομένου BLEVE).

Οι συνέπειες της συνεχούς διαρροής του υδρογόνου θα εξαρτηθούν από το χρόνο ανάφλεξης. Η άμεση ανάφλεξη της διαρροής θα έχει ως αποτέλεσμα μία δέσμη φωτιάς (jet fire), ενώ μία καθυστέρηση ανάφλεξης μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα πυρκαγιά (flash fire) ή να καταλήξει σε έκρηξη, εάν το απελευθερωμένο υδρογόνο συσσωρεύεται σε περιορισμένη περιοχή.

Μέτρα προστασίας

Όπως αναφέρθηκε, για το συγκεκριμένο σενάριο η διαρροή του συμπιεστή είναι ο κύριος παράγοντας πρόκλησης ατυχήματος, υποδεικνύοντας ότι ο μετριασμός του κινδύνου θα πρέπει να εφαρμοστεί στους συμπιεστές.

Στην περίπτωση που ο συμπιεστής λειτουργήσει χωρίς μέτρα ελέγχου, αυτό ενδέχεται να εκθέσει σε κίνδυνο το προσωπικό του σταθμού, τους πελάτες και εγκαταστάσεις ή τις οικίες που γειτνιάζουν.

Αποστάσεις ασφαλείας για τον κρίσιμο εξοπλισμό.

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τις αποστάσεις ασφαλείας από κάθε εξοπλισμό υδρογόνου στο σταθμό.

Αποστάσεις ασφαλείας από εξοπλισμό	
Ρυμουλκό φορτηγό	7 – 20 μέτρα
Συμπιεστής υδρογόνου	25 μέτρα 12 μέτρα με εγκλεισμό συμπιεστή 23 μέτρα με συμπιεστή σε άλλο επίπεδο
Δοχείο προσωρινής αποθήκευσης buffer	13-21 μέτρα
Σωληνογραμμές	5 μέτρα
Διανομέας υδρογόνου	2 μέτρα

Πίνακας 48: Αποστάσεις ασφαλείας από πηγές κινδύνου, (πηγή: Quantitative risk assessment on a gaseous hydrogen refueling station, Zhiyong et al 2010)

Η απόσταση ασφαλείας από τον διανομέα υδρογόνου είναι μόνο δύο μέτρα, δηλαδή πολύ μικρή απόσταση. Αυτό συμβαίνει επειδή η απελευθέρωση υδρογόνου από τον διανομέα εκτιμάται ως μία στιγμιαία απελευθέρωση και δεν αναμένεται να είναι συνεχής, λόγω των συστημάτων διακοπής λειτουργίας έκτακτης ανάγκης, όπως προβλέπεται σε τέτοιες εγκαταστάσεις.

Για τη στιγμιαία απελευθέρωση υδρογόνου του διανομέα, καθώς το συνολικό απόθεμα είναι πολύ μικρό -μόνο ένα κιλό- οι συνέπειες θα είναι πολύ περιορισμένες.

Η αρχική απόσταση ασφαλείας από τον συμπιεστή είναι περίπου 25 μ. Με το περίβλημα ασφαλείας του συμπιεστή αυτή η απόσταση μπορεί να μειωθεί σε μόλις 12 μέτρα, περισσότερο από 50% μείωση της αρχικής απόστασης ασφαλείας.

Η επίδραση της ανύψωσης του συμπιεστή (χωρίς περίβλημα ασφαλείας) στην ασφάλεια δεν φέρνει ιδιαίτερα επιθυμητό αποτέλεσμα, καθώς προσφέρει μείωση μόνο δύο μέτρα στην απόσταση ασφαλείας.

Αποστάσεις ασφαλείας για το σταθμό.

Οι αποστάσεις ασφαλείας, βάση της μελέτης, δεν δείχνουν να αλλάζουν σημαντικά με το περίβλημα ασφαλείας του συμπιεστή και παραμένουν στα 10 μέτρα (Quantitative risk assessment on a gaseous hydrogen refueling station, Zhiyong et al 2010). Συνεπώς, τα όρια του σταθμού ανεφοδιασμού θα πρέπει να είναι 10 μέτρα από εγκαταστάσεις και οικίες που γειτνιάζουν.

Κίνδυνος για την κοινωνία

Μια περαιτέρω ανάλυση κατάταξης κινδύνου δείχνει ότι μία πιθανή διαρροή στον συμπιεστή (χωρίς μέτρα μετριασμού) προκαλεί υψηλούς κοινωνικούς κινδύνους σε μη αποδεκτό επίπεδο, καθώς ο στόχος είναι 0 απώλειες σε περίπτωση συμβάντος.

Για τον λόγο αυτόν, και ανεξάρτητα από τις μελέτες αποστάσεων ασφαλείας, πρέπει να εφαρμοστούν μέτρα ελέγχου και περιορισμού των κρίσιμων στοιχείων, όπως ο συμπιεστής στην προκειμένη περίπτωση.

Η παραπάνω ανάλυση ανέδειξε τη σημαντικότητα λήψης μέτρων ελέγχου σε κρίσιμο εξοπλισμό, όπως ο συμπιεστής του σταθμού ανεφοδιασμού. Η συγκεκριμένη ανάλυση δεν είναι εξαντλητική και εστιάζει σε έναν μόνο παράγοντα κινδύνου. Περαιτέρω μέτρα ελέγχου και ανίχνευσής των διαρροών εφαρμόζονται για τον περιορισμό των δυσμενών αποτελεσμάτων, αλλά κυρίως για την πρόληψη και αποφυγή τους.

11. Επιπτώσεις σε υλικά και εξοπλισμό

Ο άνθρακας και οι χάλυβες ελαφριάς κραμάτωσης είναι κοινά υλικά, που μεταφέρουν ή αποθηκεύεται σε αυτούς, υδρογόνο υψηλής πίεσης. Αυτοί οι χάλυβες είναι χαμηλού κόστους και μπορεί να διαθέτουν ένα ευρύ φάσμα ιδιοτήτων μέσω των συστατικών της κραμάτωσης και της θερμικής επεξεργασίας. Η κατασκευή πολύπλοκων στοιχείων μεταφοράς και αποθήκευσης, όπως τα δοχεία και οι αγωγοί, μπορεί να επιτευχθεί εύκολα με χάλυβες. Το υλικό αυτό μπορεί να διαμορφωθεί, να συγκολληθεί και να υποστεί θερμική επεξεργασία σε μεγάλα τμήματα, λαμβάνοντας την τελική μορφή, που εξυπηρετεί τον χρήστη.

Η συγκράτηση και μεταφορά αερίου υδρογόνου σε μεταλλικές κατασκευές υψηλής πίεσης είναι μια ιδιαίτερη πρόκληση. Το αέριο υδρογόνο μπορεί να προσροφηθεί και να διασπαστεί στην επιφάνεια του χάλυβα. Η προσρόφηση και η διάχυση του ατομικού υδρογόνου εντός του χάλυβα υποβαθμίζει τις μηχανικές του ιδιότητες και είναι το φαινόμενο που έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα σημεία της παρούσας εργασίας ως «ευθραυστότητα/ψαθυρότητα υδρογόνου».

Η εκδήλωση της ευθραυστότητας του υδρογόνου είναι η αυξημένη ευαισθησία σε θραύση. Το υδρογόνο μειώνει την αντίσταση σε θραύση, την αντοχή σε εφελκυσμό, μειώνει την ολκιμότητα, επιταχύνει τη διάδοση των ρωγμών κόπωσης και εισάγει πρόσθετους τρόπους αστοχίας του υλικού. Ειδικότερα, οι μεταλλικές κατασκευές, που δεν αστοχούν υπό στατικά φορτία σε συνθήκες συνθήκες και σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, μπορεί να διαδοθούν σε αυτές ρωγμές από κόπωση, όταν εκτίθενται από αέριο υδρογόνο. Παρακάτω παρατίθενται στοιχεία από την μελέτη των Somerday, Brian P., San Marchi, Christopher W., «EFFECTS OF HYDROGEN GAS ON STEEL VESSELS AND PIPELINES» (Somerday and Marchi, 2006) σχετικά με τις επιπτώσεις του υδρογόνου σε δοχεία και αγωγούς.

11.1. Δοχεία/δεξαμενές αερίου υδρογόνου

Οι πληροφορίες που αναφέρονται εδώ αφορούν κυλινδρικά και σωληνωτά δοχεία από χάλυβα, που η πρωταρχική λειτουργία αυτών είναι η διανομή αερίου υδρογόνου σε καταναλωτές.

Το ευρωπαϊκό αέριο υδρογόνο διανέμεται από εκατοντάδες χιλιάδες πλοία, τα οποία προμηθεύουν έως και $300 \times 10^6 \text{ m}^3$ αερίου υδρογόνου ετησίως. Τις τελευταίες δύο δεκαετίες αυτές οι δεξαμενές μεταφοράς αερίου υδρογόνου έχουν λειτουργήσει με ασφάλεια και αξιοπιστία. Κάποιες βλάβες δεξαμενών αυτών των πλοίων έχουν υπάρξει τα τελευταία χρόνια. Μελέτες των βλαβών των δεξαμενών αυτών έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι υπήρξε διάδοση ρωγμών κόπωσης, ενισχυμένη από την επαφή με το υδρογόνο, σε σημεία όπου υπήρχαν επιφανειακά ελαττώματα.

Συνθήκες των υλικών που επηρεάζουν τον χάλυβα των δοχείων/δεξαμενών

Η εμπειρία δείχνει ότι η αστοχία των δοχείων ή των δεξαμενών που εμπεριέχουν αέριο υδρογόνο διέπεται κυρίως από τις ιδιότητες του χάλυβα, την ιδιαίτερη αντοχή και την μικροδομή. Αυτές οι μεταβλητές επηρεάζουν την ευαισθησία του χάλυβα στην ευθραυστότητα του υδρογόνου. Η εμπειρία για αξιόπιστα δοχεία αερίου υδρογόνου αφορά ένα περιορισμένο εύρος για χάλυβα. Τα δοχεία και οι δεξαμενές αερίου υδρογόνου στην

Ευρώπη κατασκευάζονται από χάλυβα με ονομασία «34CrMo₄». Η σύσταση του χάλυβα διακρίνεται από τα κραματικά στοιχεία χρώμιο και μολυβδαίνιο, καθώς και τη συγκέντρωση του άνθρακα.

Οι χάλυβες 34CrMo₄ υποβάλλονται σε επεξεργασία, για να παραχθεί μια «ομαλοποιημένη και σκληρυμένη» μικροδομή. Τα βήματα αυτή της θερμικής επεξεργασίας για την παραγωγή αυτής της μικροδομής αφορούν στη θέρμανση του χάλυβα, μέχρι το πεδίο του ωστενίτη, άμεση ψύξη για να σχηματιστεί μαρτενσίτης, και μετά επαναφορά σε ενδιάμεση θερμοκρασία. Τα δοχεία που χρησιμοποιούνται για τη διανομή αερίου υδρογόνου είναι χωρίς ραφή, γεγονός που σημαίνει ότι το σώμα του σκάφους είναι κατασκευασμένο χωρίς συγκολλήσεις. Τα δοχεία αερίου υδρογόνου είναι ιδανικά χωρίς ραφή, καθώς η συγκόλληση μεταβάλλει την επιθυμητή μικροδομή του χάλυβα, που παράγεται και εισάγει υπολείμματα τάσεων. Οι συγκολλήσεις σε δοχεία αερίου υδρογόνου υψηλής πίεσης, που κατασκευάζονται από χάλυβες χαμηλού κράματος, έχουν συμβάλλει στη δημιουργία ρωγμών από υδρογόνο.

Περιβαλλοντικές συνθήκες που επηρεάζουν τον χάλυβα σε υδρογόνο

Η σοβαρότητα της ευθραυστότητας του υδρογόνου στον χάλυβα επηρεάζεται από την πίεση του αερίου, καθώς αυτό υπαγορεύει την ποσότητα του ατομικού υδρογόνου, που διαχέεται στον χάλυβα. Οι συνθήκες πιέσεις λειτουργίας για τα χαλύβδινα δοχεία σε εφαρμογές διανομής υδρογόνου είναι στην περιοχή από 20 έως 30 MPa. Η εσωτερική επιφάνεια των δοχείων αερίου υδρογόνου είναι ευαίσθητη σε τοπική διάβρωση, λόγω των ατελειών ή ακαθαρσιών που ενδέχεται να υπάρχουν στον χάλυβα και το αέριο υδρογόνο. Αλληλεπιδράσεις μεταξύ του σημείου της τοπικής διάβρωσης και της ευθραυστότητας του υδρογόνου δεν έχουν καθοριστεί, ωστόσο, οι ακαθαρσίες στο αέριο και τον χάλυβα είναι γνωστό ότι επηρεάζουν την ευθραυστότητα του υδρογόνου.

Μηχανικές συνθήκες που επηρεάζουν τον χάλυβα δοχείων/δεξαμενών σε υδρογόνο

Εκτός από την πίεση του αερίου, η υδροστατική τάση εφελκυσμού αυξάνει τη συγκέντρωση του υδρογόνου σε μέταλλα. Αυτό οδηγεί σε υψηλές, τοπικές συγκεντρώσεις ατομικού υδρογόνου σε σημεία που υπάρχει συγκέντρωση τάσεων, όπως π.χ ελαττώματα, προάγοντας έτσι την ευθραυστότητα του υδρογόνου. Τα ελαττώματα μπορεί να δημιουργηθούν στην εσωτερική επιφάνεια του δοχείου του αερίου υδρογόνου κατά την κατασκευή ή κατά τη λειτουργία. Μία συνηθισμένη περίπτωση ελαττωμάτων είναι οι εντοπισμένοι λάκκοι διάβρωσης. Μία από τις επιζήμιες συνθήκες μηχανικής φόρτισης για τα χαλύβδινα δοχεία αερίου υδρογόνου είναι η κυκλική καταπόνηση, το οποίο οδηγεί στη διάδοση των ρωγμών κόπωσης. Ο κύκλος πίεσης προκύπτει από το γέμισμα και εκκένωση των δοχείων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Η παρουσία επιφανειακών ελαττωμάτων επηρεάζει τις μηχανικές συνθήκες στο τοίχωμα του χαλύβδινου αγγείου. Τα επιφανειακά ελαττώματα εντείνουν τις τοπικές τάσεις, οι οποίες παρέχουν τη μηχανική κινητήρια δύναμη για τη διάδοση των ρωγμών κόπωσης, καθώς και τη συγκέντρωση ατομικού υδρογόνου στο ασάλι. Οι ρωγμές πολλαπλασιάζονται με την ευθραυστότητα του υδρογόνου, οι οποίες ενισχύονται με την κυκλική καταπόνηση. Μετά από έναν ορισμένο αριθμός κύκλων πλήρωσης-εκκένωσης, οι ρωγμές κόπωσης φτάνουν σε κρίσιμο μήκος. Οι ρωγμές, επίσης, μπορούν να επεκταθούν με μηχανισμούς ευθραυστότητας υδρογόνου, που λειτουργούν σε ένα γεμάτο υδρογόνο δοχείο υπό στατική πίεση.

11.2. Αγωγοί αερίου υδρογόνου

Οι πληροφορίες που συνοψίζονται εδώ αφορούν τις σωληνώσεις από χάλυβα μεταφοράς και διανομής, αλλά και τα συστήματα που μεταφέρουν αέριο υδρογόνο. Οι εταιρείες βιομηχανικού αερίου έχουν συσσωρεύσει δεκαετίες εμπειρίας με αγωγούς μεταφοράς αερίου υδρογόνου και, επί του παρόντος, λειτουργούν πάνω από 1000 χιλιόμετρα αγωγού στις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ευρώπη. Αυτοί οι αγωγοί είναι ασφαλείς και αξιόπιστοι για συγκεκριμένες σειρές υλικών, περιβαλλοντικών και μηχανικών συνθηκών.



Εικόνα 49: Σωληνογραμμή υδρογόνου, (πηγή: freepik.com, accessed on 01/04/2023)

Συνθήκες των υλικών που επηρεάζουν τον χάλυβα αγωγών σε υδρογόνο

Αν και οι χαλύβδινοι αγωγοί έχουν λειτουργήσει με ασφάλεια μεταφέροντας αέριο υδρογόνο, έχουν τεθεί συγκεκριμένα όρια στις ιδιότητες των χάλυβων. Συγκεκριμένα, χάλυβες σχετικά χαμηλής αντοχής έχουν προσδιοριστεί ως ασφαλέστεροι για αγωγούς αερίου υδρογόνου. Παραδείγματα χάλυβων που έχουν αποδειχθεί επαρκείς για υδρογόνο είναι οι: ASTM A106 Grade B, καθώς και οι API 5L Grade X42 και API 5L Grade X52.

Οι χάλυβες API 5L, που περιέχουν μικρές ποσότητες νιοβίου, βαναδίου και τιτανίου, αναφέρονται ως «ελάχιστα κραματωμένοι (microalloyed)» χάλυβες. Ο μικροκραματωμένος χάλυβας X52 έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε αγωγούς αερίου υδρογόνου. Οι χάλυβες για αγωγούς αερίου υδρογόνου υποβάλλονται σε επεξεργασία για να παράγουν ομοιόμορφες, λεπτόκοκες, μικροδομές. Μια κανονικοποιημένη θερμική επεξεργασία μπορεί να προσδώσει την επιθυμητή μικροδομή σε συμβατικούς χάλυβες. Μια τυπική κανονικοποιημένη θερμική επεξεργασία αποτελείται από τη θέρμανση του χάλυβα σε πεδίο ωστενίτη και την ψύξη σε αέρα. Μια πιο περίπλοκη διαδικασία είναι αυτή της θερμής έλασης στο πεδίο φάσης ωστενίτη-φερρίτη, που χρησιμοποιείται για κατασκευή λεπτόκοκκων μικροκραματοποιημένων χάλυβων.

Η αντοχή του υλικού είναι μια σημαντική μεταβλητή, που επηρεάζει την ευθραυστότητα του υδρογόνου του αγωγού. Ένα από τα κριτήρια που οδηγούν στην επιλογή των ποιοτήτων

χάλυβα και τις διαδικασίες επεξεργασίας είναι το ανώτερο όριο αντοχής του χάλυβα. Η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό για χάλυβα αγωγών αερίου υδρογόνου είναι 800 MPa. Οι ιδιότητες των συγκολλήσεων ελέγχονται προσεκτικά, για να αποκλείεται η ευθραυστότητα του υδρογόνου. Ένα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά υλικού, που διέπουν τις ιδιότητες της συγκόλλησης, είναι το ισοδύναμο του άνθρακα (CE). Το CE είναι ένας σταθμισμένος μέσος όρος στοιχείων, όπου οι συγκεντρώσεις του άνθρακα και του μαγγανίου είναι σημαντικοί παράγοντες.

Υψηλότερες τιμές CE αυξάνουν την τάση για σχηματισμό μαρτενσίτη κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Ο μη σκληρυμένος μαρτενσίτης είναι η πιο ευάλωτη φάση στην ευθραυστότητα του υδρογόνου. Αν και οι χαμηλές τιμές του CE καθορίζονται για την πρόληψη του σχηματισμού μαρτενσίτη στις συγκολλήσεις, αυτές οι περιοχές είναι συχνά ακόμα πιο σκληρές από το βασικό μέταλλο του αγωγού που περιβάλλει. Η μεγαλύτερη σκληρότητα κάνει τις συγκολλήσεις πιο ευαίσθητες στην ευθραυστότητα του υδρογόνου. Η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό για τις συγκολλήσεις είναι επίσης ως 800 MPa.

Μηχανικές συνθήκες που επηρεάζουν τον χάλυβα αγωγών σε υδρογόνο

Οι αγωγοί μεταφοράς αερίου υδρογόνου λειτουργούν σχεδόν σε σταθερή πίεση, επομένως η δημιουργία ρωγμής, λόγω ευθραυστότητας του υδρογόνου, προκαλείται από τις στατικές μηχανικές δυνάμεις. Η κυκλική φόρτωση, η οποία μπορεί να οδηγήσει στη διάδοση των ρωγμών κόπωσης, υποβοηθούμενη από την ευθραυστότητα του υδρογόνου, δεν έχει προκαλέσει ανησυχία σχετικά με τους αγωγούς μεταφοράς αερίου υδρογόνου.

12. Συστήματα ασφαλείας

12.1. Inherently safer design

Ο εγγενώς ασφαλέστερος σχεδιασμός ή αλλιώς «Inherently Safer Design (ISD)» είναι μια φιλοσοφία για την αντιμετώπιση ζητημάτων ασφάλειας στη φάση του σχεδιασμού και της λειτουργίας εγκαταστάσεων, οι οποίες χρησιμοποιούν ή επεξεργάζονται επικίνδυνα χημικά. Όταν εξετάζεται η εγγενώς ασφαλής λειτουργία, ο σχεδιαστής της εγκατάστασης προσπαθεί να διαχειριστεί τον κίνδυνο της διαδικασίας, εξαλείφοντας ή μειώνοντας σημαντικά τους κινδύνους κατά τη φάση του σχεδιασμού, ώστε να μην υπάρχει η δυνατότητα να εμφανιστούν στη συνέχεια.

Συχνά, η παραδοσιακή προσέγγιση για τη διαχείριση της ασφάλειας χημικών εγκαταστάσεων αφορά την αποδοχή της ύπαρξης των κινδύνων σε μια διαδικασία. Στη συνέχεια ακολουθεί η ενσωμάτωση τεχνικών μέτρων ελέγχου, καθώς και διοικητικών, για τη μείωση της επικινδυνότητας. Όπου είναι εφικτό, η μεθοδολογία παρέχει αποδοτική και αξιόπιστη διαχείριση του κινδύνου, και έχει τη δυνατότητα να εφαρμόζει απλούστερα μέτρα, καθώς και περισσότερο οικονομικά, εξαλείφοντας την ανάγκη για ακριβά συστήματα και διαδικασίες ασφαλείας.

Ωστόσο, όταν κάποιος αναλογιστεί τους πολλαπλούς κινδύνους που συνδέονται με οποιαδήποτε τεχνολογία, συμπεριλαμβανομένης της χημικής επεξεργασίας, είναι απίθανο οποιαδήποτε διαδικασία ή σχεδιασμός εγκατάστασης να εξαλείψει όλους τους κινδύνους. Ένας συνδυασμός τεχνικών και διοικητικών μέτρων απαιτούνται, ώστε πάντα να επιτυγχάνεται επαρκώς η διαχείριση όλων των κινδύνων της διαχείρισης του χημικού, και στην προκειμένη περίπτωση, του υδρογόνου.

Η εγγενώς ασφαλέστερη φιλοσοφία σχεδιασμού (ISD) έχει εξελιχθεί με την πάροδο του χρόνου για να βελτιώσει την ασφάλεια και την ασφάλεια των βιομηχανικών διεργασιών και συστημάτων. Αρχικά εισήχθη τη δεκαετία του 1970 από τον Trevor Kletz και η έννοια της «εγγενούς ασφάλειας», έχει υποστεί διάφορες εξελίξεις και βελτιώσεις από τότε. Ακολουθεί μια επισκόπηση του πώς έχει αλλάξει η φιλοσοφία της ISD με την πάροδο του χρόνου:

Έγκαιρη αναγνώριση εγγενών κινδύνων: Η αρχική εστίαση της ISD ήταν να εντοπίσει και να εξαλείψει ή να ελαχιστοποιήσει τους εγγενείς κινδύνους στις χημικές διεργασίες. Αυτό περιλάμβανε ανάλυση του σχεδιασμού και της λειτουργίας του συστήματος για τον εντοπισμό πιθανών πηγών κινδύνου όπως τοξικές ή εύφλεκτες ουσίες.

Εκτίμηση Κινδύνου και Μείωση Κινδύνου: Με την πάροδο του χρόνου, η ISD στράφηκε προς μια πιο συστηματική προσέγγιση για την αξιολόγηση και τη μείωση του κινδύνου. Αυτό περιλάμβανε τη διεξαγωγή ενδεδειγμένων αναλύσεων κινδύνου διαδικασίας για τον εντοπισμό πιθανών κινδύνων, την αξιολόγηση της σοβαρότητάς τους και τον καθορισμό των κατάλληλων μέτρων μείωσης του κινδύνου.

Ιεραρχία Ελέγχων: Η φιλοσοφία της ISD αναγνώρισε τη σημασία της εφαρμογής μιας ιεραρχίας ελέγχων, για την αποτελεσματική διαχείριση των κινδύνων. Αυτή η ιεραρχία, γνωστή ως «ιεραρχία ασφαλείας» ή «ιεραρχία εγγενούς ασφάλειας», δίνει προτεραιότητα στην εξάλειψη των κινδύνων στην πηγή, ακολουθούμενη από την υποκατάσταση, την απλοποίηση, τη μετριοπάθεια και, τέλος, την προστασία μέσω διασφαλίσεων.

Εντατικοποίηση και απλοποίηση διαδικασιών: Τα τελευταία χρόνια, έχει δοθεί αυξανόμενη έμφαση στην εντατικοποίηση και απλοποίηση των διαδικασιών ως μέρος της ISD. Αυτό περιλαμβάνει το σχεδιασμό διαδικασιών, που είναι εγγενώς ασφαλέστερες, μειώνοντας την πολυπλοκότητα, την κλίμακα και τον αριθμό των βημάτων της διαδικασίας. Με την απλούστευση των λειτουργιών, ελαχιστοποιείται η πιθανότητα ανθρώπινου λάθους και αποκλίσεων στη διαδικασία.

Συστηματικός σχεδιασμός και εργαλεία ανάλυσης: Η πρόοδος στην τεχνολογία και τα υπολογιστικά εργαλεία επέτρεψαν την ανάπτυξη πιο εξελιγμένων μεθόδων για το σχεδιασμό και την ανάλυση εγγενώς ασφαλέστερων συστημάτων. Τεχνικές όπως η ανάλυση δένδρων σφαλμάτων (FTA), η μελέτη κινδύνου και λειτουργικότητας (HAZOP) και η ποσοτική αξιολόγηση κινδύνου (QRA) χρησιμοποιούνται πλέον, συνήθως, για την αξιολόγηση των κινδύνων, που σχετίζονται με μια διαδικασία, καθώς και για την αξιολόγηση πιθανών βελτιώσεων ασφάλειας.

Ενσωμάτωση ανθρώπινων παραγόντων: Μια άλλη σημαντική εξέλιξη στην ISD ήταν η ενσωμάτωση των αρχών μηχανικής του ανθρώπινου παράγοντα. Αναγνωρίζοντας ότι τα ανθρώπινα λάθη και η συμπεριφορά μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ασφάλεια, η φιλοσοφία της ISD εξετάζει τώρα παράγοντες, όπως η αλληλεπίδραση ανθρώπου-μηχανής, ο φόρτος εργασίας, η εκπαίδευση και ο διαδικαστικός σχεδιασμός για τη μείωση της πιθανότητας ανθρώπινων σφαλμάτων και τη βελτίωση της συνολικής ασφάλειας.

Αειφορία και περιβαλλοντικά ζητήματα: Τα τελευταία χρόνια, η φιλοσοφία της ISD έχει επεκταθεί για να συμπεριλάβει ζητήματα αειφορίας και περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Οι εγγενώς ασφαλέστερες αρχές σχεδιασμού στοχεύουν πλέον όχι μόνο στη βελτίωση της ασφάλειας της διαδικασίας, αλλά και στην ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού

αποτυπώματος, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας, την παραγωγή αποβλήτων και τη χρήση επικίνδυνων υλικών.

Συνολικά, η φιλοσοφία της ISD έχει μετατραπεί από μια έννοια, που επικεντρώνεται στον εντοπισμό και την εξάλειψη εγγενών κινδύνων, σε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση, που περιλαμβάνει αξιολόγηση κινδύνου, ιεραρχία ελέγχου, απλοποίηση διαδικασιών, προηγμένα εργαλεία ανάλυσης, ανθρώπινους παράγοντες και βιωσιμότητα. Αυτές οι εξελίξεις συνεχίζουν να διαμορφώνουν το πεδίο της μηχανικής ασφάλειας διεργασιών και να επηρεάζουν το σχεδιασμό ασφαλέστερων βιομηχανικών διεργασιών και συστημάτων.



Εικόνα 49: Γραφιστική απεικόνιση συστημάτων υδρογόνου, (πηγή: freepik.com, accessed on 01/04/2023)

Ο ISD αντιμετωπίζει τον άμεσο αντίκτυπο μεμονωμένων γεγονότων σε ανθρώπους, σε περιβάλλον, στην ιδιοκτησία και τις επιχειρήσεις. Σε μια μονάδα υδρογόνου αυτό σημαίνει τις άμεσες επιπτώσεις των πυρκαγιών, των εκρήξεων και απελευθέρωσης του υδρογόνου. Σε πολλές περιπτώσεις το σύστημα ISD είναι, επίσης, βοηθητικό και για άλλους τύπους κινδύνου, όπως ο περιβαλλοντικός κίνδυνος, η πρόληψη της ρύπανσης, η πρόληψη χρόνιων ασθενειών εργαζομένων που εμπλέκονται με το υδρογόνο ή κινδύνους για τους καταναλωτές.

Ενώ αναγνωρίζονται τα πιθανά οφέλη του ISD στη διαχείριση άλλων τύπων κινδύνου, ο βασικός σκοπός είναι να μειώσει τις πιθανές επιπτώσεις των συμβάντων, όπως μεγάλα βιομηχανικά ατυχήματα, αλλά κυρίως να προλάβει την εμφάνιση αυτών.

Επομένως, η εφαρμογή του ISD είναι μία μέθοδος, που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην επιλογή της τεχνολογίας των διεργασιών και των προϊόντων.



Εικόνα 50: Γραφιστική απεικόνιση, (πηγή: <https://www.hydrogenfuelnews.com/>, accessed on 01/04/2023)

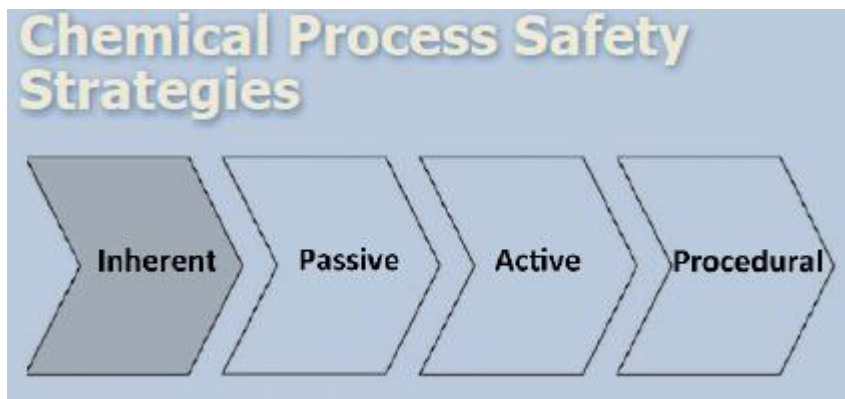
Τα συστήματα ISD έχουν ως στόχο, όπως αναφέρθηκε, την αντιμετώπιση κινδύνων στη φάση του σχεδιασμού. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα απλούστερες και οικονομικότερες μονάδες. Εάν απαιτούνται εκτεταμένα συστήματα ασφαλείας για τον έλεγχο των κινδύνων με μεγάλη πολυπλοκότητα και κόστος, αυτό αυξάνει την αρχική επένδυση για τον εξοπλισμό ασφαλείας και το λειτουργικό κόστος, μαζί με αυτό της συντήρησης. Επειδή ο στόχος των συστημάτων ISD είναι να εξαλείψει ή να μειώσει τους κινδύνους, πρέπει κανείς να κατανοήσει τον όρο του κινδύνου. Σε αυτό το πλαίσιο, ο ορισμός του «Center of Chemical Process Safety - CCPS (2008)» (Hendershot, 2008) εξέδωσε κατευθυντήριες γραμμές για τις διαδικασίες αξιολόγησης κινδύνου. Σύμφωνα με αυτή την πηγή, κίνδυνος είναι «ένα εγγενές φυσικό ή χημικό χαρακτηριστικό που έχει τη δυνατότητα να προκαλέσει βλάβη στους ανθρώπους, το περιβάλλον ή την ιδιοκτησία». Οι κίνδυνοι είναι εγγενείς σε ένα υλικό ή στις συνθήκες χρήσης του. Για παράδειγμα:

- Το υδρογόνο είναι πολύ εύφλεκτο
- Το χλώριο είναι τοξικό όταν εισπνέεται
- Η βενζίνη είναι εύφλεκτη
- Ο ατμός υψηλής πίεσης περιέχει μεγάλη ποσότητα δυναμικής ενέργειας από την αυξημένη θερμοκρασία του και από την υψηλή πίεση

Αυτοί οι κίνδυνοι δεν μπορούν να αλλάξουν παρά μόνο με αντικατάσταση του υλικού ή των συνθηκών χρήσης.

Στρατηγικές Ασφάλειας Χημικών Διεργασιών

Οι στρατηγικές ασφάλειας χημικών διεργασιών μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τέσσερις κατηγορίες: εγγενής, παθητική, ενεργητική και διαδικαστική στρατηγική. Οι τρεις πρώτες μπορούν να χαρακτηριστούν ως μηχανικοί έλεγχοι, ενώ η τελευταία ως διοικητική. Γενικά, οι εγγενείς και οι παθητικές στρατηγικές είναι οι πιο ισχυρές και αξιόπιστες, αλλά απαιτούνται στοιχεία όλων των στρατηγικών για ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα διαχείρισης ασφάλειας διεργασιών, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους κινδύνους μιας διαδικασίας και μιας εγκατάστασης.



Εικόνα 51: Στρατηγική ασφάλειας διεργασιών, (πηγή: Center of Chemical Process Safety, accessed on 01/04/2023)

Εγγενής

Η εγγενής προσέγγιση για την ασφάλεια είναι, όπου είναι εφικτό, η εξάλειψη ή η σημαντική μείωση του κινδύνου, η αλλαγή της διαδικασίας με χρήση υλικών και συνθηκών που δεν είναι επικίνδυνα ή είναι πολύ λιγότερο επικίνδυνα. Αυτές οι αλλαγές πρέπει να είναι αναπόσπαστο μέρος της διαδικασίας ή του προϊόντος.

Ένα παράδειγμα είναι η αντικατάσταση του υδρογόνου με ένα μη εύφλεκτο υλικό, χωρίς, βεβαίως, να είναι πάντα εφικτή αυτή η αντικατάσταση. Η εξάλειψη του στοιχείου της ευφλεκτότητας, η οποία είναι εγγενές χαρακτηριστικό του προϊόντος, είναι ο ορισμός της στρατηγικής αυτής. Ο κίνδυνος πυρκαγιάς με αυτόν τον τρόπο εξαλείφεται κατά την χρήση του συγκεκριμένου υλικού σε όλα τα στάδια της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Παθητική

Οι συσκευές παθητικής ασφάλειας είναι μηχανικοί έλεγχοι, που ελαχιστοποιούν τους κινδύνους κατά τη χρήση διεργασιών ή του εξοπλισμού, και διαθέτουν χαρακτηριστικά που μειώνουν είτε τη συχνότητα, είτε τη συνέπεια ενός περιστατικού. Για παράδειγμα, η χρήση πυράντοχων διαμερισμάτων σε ένα χώρο που υπάρχει υδρογόνο, ώστε να το εγκλωβίσει σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Ενεργητική

Τα συστήματα ενεργητικής ασφάλειας είναι μηχανικοί έλεγχοι, όπως συστήματα ελέγχου διεργασιών με όργανα ασφαλείας, όπως συστήματα καταιωνιστήρων. Αυτά τα συστήματα έχουν σχεδιαστεί για να αντιλαμβάνονται μια επικίνδυνη κατάσταση και να ενεργούν με κατάλληλες ενέργειες. Ενεργά συστήματα μπορεί να έχουν σχεδιαστεί για να αποτρέπουν ένα περιστατικό ή να ελαχιστοποιούν τις συνέπειες.

Διοικητική

Τα συστήματα διαδικαστικής ασφάλειας περιλαμβάνουν τυπικές διαδικασίες λειτουργίας, κανόνες και διαδικασίες ασφαλείας, εκπαίδευσης και διαδικασίες αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης. Για παράδειγμα, ένας χειριστής μπορεί να εκπαιδευτεί να παρατηρεί τη θερμοκρασία σε έναν αντιδραστήρα και ένα εφαρμόσει ψύξη έκτακτης ανάγκης, εάν υπερβαίνει αυτό μία καθορισμένη κρίσιμη τιμή.

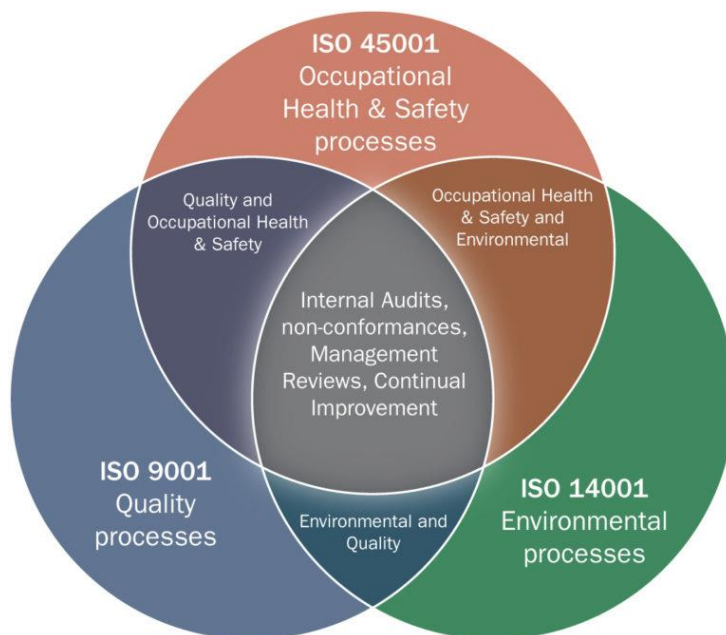
Γενικά, για ένα σύστημα υψηλού κινδύνου, η διοικητική στρατηγική ασφαλείας από μόνη της δεν παρέχει επαρκή διαχείριση κινδύνου. Δεν μπορεί να επαφίεται ένα σύστημα στην ανθρώπινη αξιοπιστία, και οι άνθρωποι, συχνά, δεν μπορούν να πραγματοποιήσουν διάγνωση ενός προβλήματος. Επιπλέον, δεν μπορούν να καθορίσουν κατάλληλη δράση, καθώς και να την εφαρμόσουν, με ικανοποιητική ταχύτητα. Ωστόσο, τα συστήματα διοικητικής ασφάλειας θα αποτελούν πάντα μέρος του ολοκληρωμένου προγράμματος διαχείρισης κινδύνων.

12.2. Integrated Management Systems

Τα ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης (IMS), που εμπεριέχουν την διαχείριση της ασφάλειας, αποτελούν μια κατάλληλη στρατηγική για τη διαχείριση πολλαπλών συστημάτων, τα οποία ανταποκρίνονται στις ανάγκες και τις προσδοκίες των διαφόρων ενδιαφερομένων.

Ο κύριος στόχος των συστημάτων είναι η αποτελεσματική διαχείριση συγκεκριμένων λειτουργιών ενός οργανισμού, με σκοπό την συνεχή βελτίωση (Hendershot, 2011).

Συνήθως, τα συστήματα ποιότητας, υγείας και ασφάλειας της εργασίας και περιβάλλοντος (ISO 9001, ISO 14001 και ISO 45001) ενοποιούνται, καθώς βασίζονται σε κοινά πρότυπα, κυρίως όσον αφορά στις αρχές και τις δράσεις.



Εικόνα 52: Συστήματα διαχείρισης, (πηγή:<https://www.energy.gov/ehss/integrated-safety-management-ism>, accessed on 01/04/2023)

Υπάρχουν τέσσερα βήματα της μεθόδου διαχείρισης, που είχε αναπτυχθεί από τον πατέρα του ποιοτικού ελέγχου, Deming (1950), η οποία είναι γνωστή ως ο κύκλος «Σχεδίασε, Κάνε, Έλεγξε και Δράσε» (Plan, Do, Check, Act). Ο κύκλος PDCA είναι ο πυρήνας της συνεχούς βελτίωσης και σταδιακής επίλυσης προβλημάτων.

Το πρώτο βήμα του κύκλου «PLAN» είναι να για να θέσει το ορόσημο του τι θα ήθελε να επιτύχει ο οργανισμός. Στη συνέχεια, το δεύτερο βήμα «DO» χρειάζεται για την εκτέλεση, καθώς η διοίκηση παρέχει την εκπαίδευση, την εκπόνηση διαδικασιών, τους πόρους κλπ. Η φάση «CHECK» είναι για να δώσει ανατροφοδότηση προς την ανώτατη διοίκηση σχετικά με τα προβλήματα και προτάσεις βελτίωσης, ανάλυσης των κενών, συντονισμό του συστήματος διαχείρισης και διενέργεια εσωτερικού ελέγχου. Το τελικό βήμα «ACT» είναι η φάση που η διοίκηση θα αποφασίσει για τη μελλοντική βελτίωση, με βάση τους ελέγχους.



Εικόνα 53: Κύκλος του Deming, (πηγή: <http://users.sch.gr/karakousis/TQM.HTM>, accessed on 10/04/2023)

Η ενοποίηση των συστημάτων εξυπηρετεί 6 σημαντικά σημεία:

1) Συστημική Διαχείριση

- ενοποίηση των αρμοδιοτήτων της ανώτατης διοίκησης και δέσμευση της στο ενοποιημένο σύστημα διαχείρισης
- αναγνώριση των κοινών στόχων των συστημάτων
- διαχείριση των συστημάτων με κοινούς πόρους και κοινή οργάνωση
- αναγνώριση κοινών αναγκών εμπλεκόμενων μερών

2) Τυποποίηση

- ενοποίηση των όρων και εννοιών
- τυποποίηση των διαδικασιών
- τυποποίηση της τεκμηρίωσης
- ανάπτυξη κοινών μηχανισμών για εσωτερική επικοινωνία
- επένδυση στην εκπαίδευση και κατάρτιση του εργατικού δυναμικού

3) Στρατηγική, τακτική και επιχειρησιακή ολοκλήρωση

- ενσωμάτωση συστημάτων σε στρατηγικό επίπεδο
- ενσωμάτωση συστημάτων σε τακτικό επίπεδο
- ενσωμάτωση συστημάτων σε επιχειρησιακό επίπεδο
- διενέργεια ολοκληρωμένων ελέγχων
- δέσμευση εργαζομένων στην εφαρμογή IMS

4) Οργανωσιακή μάθηση

- προώθηση της ομαδικής εργασίας και της ανταλλαγής γνώσεων και ατομικών εμπειριών μεταξύ ομάδων και τμημάτων
- ανάπτυξη ικανότητας για καινοτομία
- ανάπτυξη κοινών συστηματικών κινήτρων
- δημιουργία αποτελεσματικής ροής πληροφοριών

5) Απογραφειοκρατία

- εξάλειψη των επικαλύψεων και των ασυνεπειών μεταξύ εγγράφων/διαδικασιών
- μείωση των αντιφάσεων μεταξύ εγγράφων/διαδικασιών
- τυποποίηση και απλοποίηση της τεκμηρίωσης
- συγχώνευση της τεκμηρίωσης

6) Συνεχής Βελτίωση

- χρήση της οργανωτικής κουλτούρας για υποστήριξη της ανάπτυξης και τη διαχείρισης του IMS
- εντοπισμός κοινών ευκαιριών για αποφυγή ή/και μείωση της σπατάλης
- προώθηση της επικοινωνίας και της αλληλεπίδρασης μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών
- ενσωμάτωση του IMS με άλλα προγράμματα, συστήματα διαχείρισης ή/και ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού

Οι στρατηγικές προς τη βιωσιμότητα πραγματοποιούνται με την ενσωμάτωση του συστήματος διαχείρισης, προκειμένου να γίνει πιο ευέλικτο και αποτελεσματικό και ανταγωνιστικό στον κλάδο. Το στοιχείο που θα μπορούσε να ενσωματωθεί μπορεί να συγχωνευθεί, ενώ το στοιχείο που δεν μπορεί να ενσωματωθεί, θα πρέπει να χρησιμοποιείται ως ενιαίο σύστημα διαχείρισης.

Το IMS (Muzaimi et al., 2017) μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιονδήποτε οργανισμό. Επιπλέον, η προσέγγιση PDCA είναι σε θέση να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα στην εφαρμογή IMS για την καλύτερη διαχείριση στον οργανισμό. Η ενοποίηση είναι σημαντική για τη βελτίωση της οργανωσιακής κουλτούρας, με σκοπό να επωφεληθούν από τις συνέργειες του συστήματος συνδυασμένης διαχείρισης.

13. Νομοθεσία και προδιαγραφές

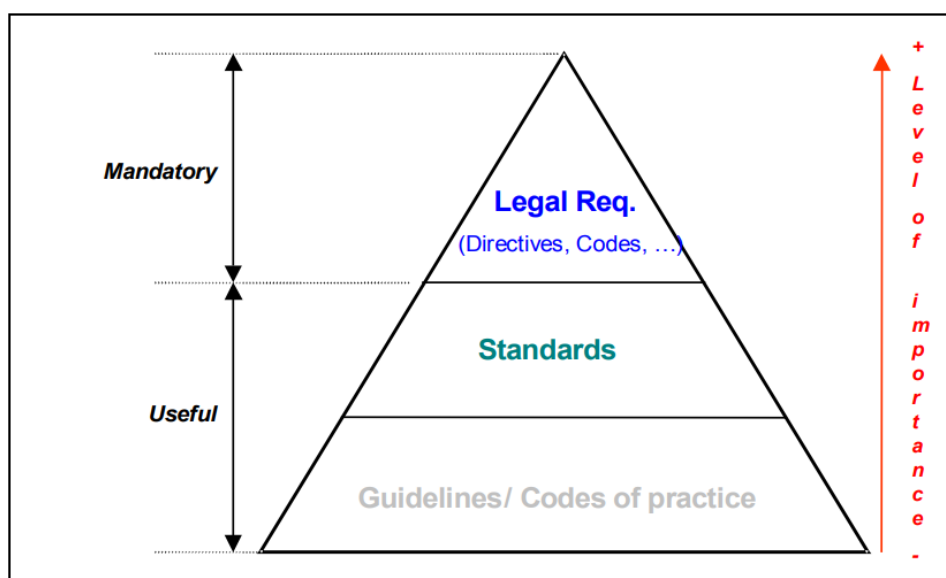
13.1. Νομικές απαιτήσεις

Νομική απαίτηση (οδηγία, κανονισμός ή κώδικας κ.λπ.) είναι ένα εθνικό ή ευρωπαϊκό καταστατικό κείμενο, το οποίο επιβάλλεται από την εξουσία. Αναφέρει απαιτήσεις που γράφονται και υιοθετούνται από νομοθετικά όργανα, όπως για τη ρύθμιση ενός συγκεκριμένου είδους δραστηριότητας και, εν προκειμένω, τα ζητήματα ασφάλειας των εφαρμογών του υδρογόνου.

Οι νομικές απαιτήσεις έχουν σκοπό να εγγραφούν, ότι ένα προϊόν ή σύστημα ή δραστηριότητα, δε θα επηρεάσει την ανθρώπινη ασφάλεια / υγεία ή το περιβάλλον. Η νομοθεσία για το υδρογόνο σχετικά με την ασφάλεια είναι μια κρίσιμη πτυχή της παγκόσμιας μετάβασης στην οικονομία υδρογόνου. Διεθνείς οργανισμοί, περιφερειακοί φορείς και εθνικοί φορείς έχουν αναπτύξει ολοκληρωμένους κανονισμούς, πρότυπα και οδηγίες για την αντιμετώπιση των μοναδικών προκλήσεων ασφάλειας, που σχετίζονται με τις τεχνολογίες υδρογόνου. Μέσω της αξιολόγησης κινδύνου, των προγραμμάτων εκπαίδευσης, των

επιθεωρήσεων και της τήρησης αναγνωρισμένων κωδίκων, στόχος είναι να διασφαλιστεί η ασφαλής ανάπτυξη συστημάτων υδρογόνου και να ενισχυθεί η εμπιστοσύνη του κοινού σε αυτόν, τον πολλά υποσχόμενο, φορέα καθαρής ενέργειας. Η συνεχής συνεργασία και οι περιοδικές ενημερώσεις της νομοθεσίας θα είναι απαραίτητες, καθώς η βιομηχανία υδρογόνου εξελίσσεται και επεκτείνεται.

Η νομοθεσία τονίζει τη σημασία της διεξαγωγής ολοκληρωμένων αξιολογήσεων κινδύνου για τα συστήματα υδρογόνου και της εφαρμογής κατάλληλων μέτρων μετριασμού, για την αντιμετώπιση πιθανών κινδύνων. Αυτό περιλαμβάνει μέτρα, όπως συστήματα ανίχνευσης διαρροών, απαιτήσεις αερισμού και σχέδια απόκρισης έκτακτης ανάγκης. Η νομοθεσία απαιτεί συχνά προγράμματα κατάρτισης και πιστοποίηση για άτομα που εμπλέκονται στην εγκατάσταση, λειτουργία και συντήρηση συστημάτων υδρογόνου. Αυτά τα προγράμματα διασφαλίζουν, ότι το προσωπικό διαθέτει τις απαραίτητες γνώσεις και δεξιότητες, για να χειρίζεται το υδρογόνο με ασφάλεια. Απαιτούνται τακτικές επιθεωρήσεις και έλεγχοι των εγκαταστάσεων υδρογόνου, για την αξιολόγηση της συμμόρφωσης με τους κανονισμούς ασφαλείας. Αυτό βοηθά στον εντοπισμό πιθανών προβλημάτων, στη διασφάλιση της σωστής συντήρησης και στη βελτίωση της συνολικής ασφάλειας



Εικόνα 54: Ιεραρχία απαιτήσεων, (πηγή: google pics, accessed on 10/04/2023)

13.2. Ευρωπαϊκός κανονισμός

Η ΕΕ έχει θεσπίσει διάφορους κανονισμούς, για να διασφαλίσει την ασφαλή χρήση του υδρογόνου. Συγκεκριμένα, η Οδηγία II της ΕΕ για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, θέτει κριτήρια βιωσιμότητας για την παραγωγή υδρογόνου. Επιπλέον, ο κανονισμός της ΕΕ για τις συσκευές αερίου καλύπτει τις απαιτήσεις ασφαλείας για συσκευές υδρογόνου, όπως λέβητες και θερμαντήρες. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης έχει αναπτύξει τεχνικά πρότυπα για τη διασφάλιση της ασφάλειας της υποδομής υδρογόνου, των σταθμών ανεφοδιασμού και των κυψελών καυσίμου. Αυτά τα πρότυπα συμβάλλουν στην εναρμόνιση των πρακτικών ασφαλείας σε όλες τις ευρωπαϊκές χώρες.

Οι ευρωπαϊκοί νόμοι, όπως οι οδηγίες, οι κανονισμοί και οι ευρωπαϊκοί κανόνες υπερισχύουν των εθνικών νόμων. Εκτελούν το καθήκον τους και σύμφωνα με τις διατάξεις της Συνθήκης για την ίδρυση της Ευρωπαϊκής Κοινότητας (Συνθήκη ΕΚ). Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εκδίδει κανονισμούς και εκδίδει οδηγίες. Μια οδηγία είναι δεσμευτική ως προς το



επιδιωκόμενο αποτέλεσμα, για κάθε κράτος μέλος, αλλά αφήνει στις εθνικές αρχές την επιλογή της μορφής και των μεθόδων. Ένας κανονισμός έχει γενική εφαρμογή. Είναι δεσμευτικός ως προς όλα τα μέρη του και ισχύει άμεσα σε όλα τα κράτη μέλη. Η ΕΕ έχει υποβάλει για παράδειγμα ένα πρώτο σχέδιο κανονισμού για την έγκριση τύπου αυτοκίνητα υδρογόνου για συζήτηση.

13.3. Πρότυπα

Ένα πρότυπο είναι ένα έγγραφο, το οποίο καταρτίστηκε από τεχνική επιτροπή και εγκρίθηκε από αναγνωρισμένο φορέα, και παρέχει για κοινή χρήση κανόνες και κατευθυντήριες γραμμές για δραστηριότητες, με στόχο την επίτευξη του βέλτιστου βαθμού ασφάλειας, σε ένα δεδομένο πλαίσιο. Η νομοθεσία συχνά παραπέμπει σε αναγνωρισμένους κώδικες και πρότυπα, όπως το IEC, το ISO και το NFPA, για να διασφαλίσει τη συμμόρφωση με τις καθιερωμένες πρακτικές ασφάλειας και να προωθήσει τη συνέπεια μεταξύ των δικαιοδοσιών.



Εικόνα 55: Γραφιστική απεικόνιση, (πηγή: google pics, accessed on 01/04/2023)

Ένα διεθνές πρότυπο είναι ένα πρότυπο που αναπτύχθηκε και υιοθετήθηκε από μια διεθνή οργάνωση και διατίθεται στο κοινό (όπως ορίζεται στον Οδηγό IEC/ISO 2). Η εφαρμογή ενός προτύπου δεν είναι υποχρεωτική, εκτός εάν ένας κανονισμός αναφέρεται σε αυτό το πρότυπο. Ακόμα και τότε, η νομική εξουσία προέρχεται από τον κανονισμό, όχι από το πρότυπο.

13.4. Βασικές νομοθεσίες ασφάλειας που σχετίζονται με το υδρογόνο Οδηγία ATEX EC/1999/92 (European Commission, 1999)

Η οδηγία ATEX 1999/92/CE ορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις για την ασφάλεια και την υγεία των εργαζομένων, που κινδυνεύουν από εκρηκτικές ατμόσφαιρες (ATEX). Το υδρογόνο είναι ένα εύφλεκτο αέριο, που μπορεί να σχηματίσει ένα εκρηκτικό μίγμα όταν αναμιγνύεται με τον αέρα. Έτσι, οποιοσδήποτε λειτουργεί εγκαταστάσεις, όπου γίνεται επεξεργασία υδρογόνου, πρέπει να συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις της οδηγίας, επειδή οι εργαζόμενοι του κινδυνεύουν δυνητικά από τις επιπτώσεις των εκρήξεων, που ενδέχεται να παραχθούν με την ανάφλεξη ενός εκρηκτικού μίγματος, εφόσον σχηματιστεί.

Οδηγία για εξοπλισμό υπό πίεση PED 2014/68/EU (European Commission, 2014)

Η PED εφαρμόζεται στην Ευρώπη από τον Δεκέμβριο του 1999 και είναι υποχρεωτική από τα τέλη Μαΐου 2002, με αναθεώρηση το 2014. Ισχύει για όλα τα ακίνητα δοχεία με πίεση λειτουργίας μεγαλύτερη από 0,5 bar. Στην περίπτωση των εφαρμογών υδρογόνου είναι ιδιαίτερα σημαντικό για όλα τα δοχεία πίεσης (φιάλες) και εξαρτήματα ασφαλείας (βαλβίδες, εύκαμπτοι σωλήνες, σύνδεσμοι), που χρησιμοποιούνται για ανεφοδιασμό με υδρογόνο, να συμμορφώνονται με την οδηγία.

Δεδομένου ότι η παρούσα οδηγία είναι υποχρεωτική στην Ευρώπη, έχουν ειδοποιηθεί ορισμένοι «Κοινοποιημένοι Φορείς» από τις αρχές κάθε κράτους μέλους της Ε.Ε. Αυτοί οι κοινοποιημένοι φορείς μπορούν να κάνουν την «αξιολόγηση της συμμόρφωσης» του εξοπλισμού υπό πίεση, αυτή η αξιολόγηση επιβεβαιώνεται από το σήμα «CE», που εφαρμόζεται πάνω στον εξοπλισμό. Οποιοσδήποτε κοινοποιημένος οργανισμός (από κάθε χώρα) μπορεί να εγκρίνει έναν εξοπλισμό με σήμανση CE, που χρησιμοποιείται σε κάθε χώρα της ΕΕ.

Η παρούσα οδηγία ορίζει μόνο τις «βασικές απαιτήσεις», που δίνονται στο Παράρτημα 1 της. Αναλυτικά οι απαιτήσεις παρέχονται στα εναρμονισμένα πρότυπα (π.χ. που έχουν εκπονηθεί από την CEN). Αυτά τα πρότυπα EN δεν είναι υποχρεωτικά, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον κατασκευαστή, για να αποδείξει στον κοινοποιημένο οργανισμό ότι πληρούνται οι βασικές απαιτήσεις.

Σε αντίθεση με τον μεταφερόμενο PED, αυτή η Ευρωπαϊκή Οδηγία δεν καλύπτει τη χρήση του εξοπλισμού, που εξακολουθεί να υπόκειται στους εθνικούς κανονισμούς. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει δυσκολίες εάν πρόκειται να μεταφερθεί τέτοιος εξοπλισμός από τη μια χώρα στην άλλη.

Κανονισμοί μεταφοράς επικίνδυνων εμπορευμάτων TPED 2010/35/EU (European Commission, 2010)

Η οδηγία TPED ισχύει για μεταφερόμενο εξοπλισμό υπό πίεση και είναι υποχρεωτική από την 1η Ιουλίου 2003 για φιάλες αερίου. Επίσης, έχει αναθεωρηθεί το 2010. Στην περίπτωση των εφαρμογών υδρογόνου είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς αφορά το πεδίο εφαρμογής της μεταφοράς υδρογόνου στα πρατήρια καυσίμων. Ισχύει, επίσης, για δεξαμενές πίεσης H₂, που χρησιμοποιούνται σε οχήματα στις περιπτώσεις που αυτές οι δεξαμενές αφαιρούνται και ξαναγεμίζονται, ανεξάρτητα από το όχημα.

Όπως και για το PED, ορισμένοι «Κοινοποιημένοι Φορείς» έχουν κοινοποιηθεί στις Βρυξέλλες από τις αρχές του κάθε μέλους της ΕΕ. Αυτοί οι κοινοποιημένοι φορείς μπορούν να κάνουν την αξιολόγηση της συμμόρφωσης του εξοπλισμού. Αυτή η αξιολόγηση επιβεβαιώνεται από

το σήμα «P», που τοποθετείται στον εξοπλισμό. Ο φορέας (για κάθε χώρα) μπορεί να εγκρίνει εξοπλισμό με σήμανση CE, που θα χρησιμοποιείται σε κάθε χώρα της ΕΕ.

Η παρούσα οδηγία ορίζει τις κύριες απαιτήσεις όπως αναφέρονται στην οδηγία ADR/RID για τις συγκεκριμένες απαιτήσεις. Το ADR/RID είναι ο κανονισμός οδικών μεταφορών (ADR) και σιδηροδρομικών (RID) για την Ευρώπη και πολλές άλλες χώρες γύρω.

Τα πρότυπα EN (και ISO) αναφέρονται στην ADR/RID και παρέχουν τεκμήριο συμμόρφωσης με αυτές, αλλά συνήθως άλλες τεχνικές οδηγίες, που συμμορφώνονται με τις τεχνικές απαιτήσεις του ADR/RID, μπορούν να ακολουθηθούν. Σε αντίθεση με το PED, το TPED καλύπτει, επίσης, τη χρήση του εξοπλισμού, συμπεριλαμβανομένης της περιοδικής επιθεώρησης και οποιαδήποτε άλλη λειτουργική απαίτηση. Επίσης, επιτρέπει την «επαναξιολόγηση» του παλιού εξοπλισμού για τη μετατροπή του σε εξοπλισμό «P».

Εκτός από τους "Κοινοποιημένους Φορείς", μπορούν να οριστούν "Εγκεκριμένοι Φορείς" με περιορισμένο πεδίο εφαρμογής ελέγχου του εξοπλισμού.

Σήμανση CE

Η σήμανση CE συμβολίζει ότι το προϊόν που φέρει τη σήμανση πληροί όλες τις ισχύουσες διατάξεις (ή απαιτήσεις) από εφαρμοστέες οδηγίες, που προβλέπουν τη σήμανση CE (βασικές απαιτήσεις, εναρμονισμένα πρότυπα και ειδικές διατάξεις), καθώς και ότι το προϊόν έχει υποβληθεί στην κατάλληλη αξιολόγηση συμμόρφωσης.

Το πεδίο εφαρμογής του καθεστώτος σήμανσης CE ορίζεται στις σχετικές οδηγίες εναρμόνισης και μπορεί να εφαρμόζεται μόνο από το νομικό πρόσωπο, που είναι υπεύθυνο για τη συμμόρφωση του προϊόντος.

Η σήμανση CE δεν είναι ούτε σήμα προέλευσης, ούτε σήμα ποιότητας.

Το σύστημα υδρογόνου πρέπει να συμμορφώνεται με τις ακόλουθες οδηγίες για να αποκτήσει σήμανση CE:

- Οδηγία για τα μηχανήματα
- Εξοπλισμός και συστήματα προστασίας, που προορίζονται για χρήση σε δυνητικά εκρηκτική ατμόσφαιρα.
- Οδηγία για τον εξοπλισμό υπό πίεση
- Οδηγία χαμηλής τάσης
- Οδηγία για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα
- Απλές οδηγίες για τα δοχεία πίεσης

Τεχνική Επιτροπή ISO "Hydrogen Technologies"

Η πιο σημαντική επιτροπή για τα πρότυπα για την τεχνολογία υδρογόνου είναι το ISO TC 197 «Τεχνολογίες Υδρογόνου». Η γραμματεία ασκείται από τον οργανισμό τυποποίησης του Κεμπέκ Bureau de Normalization du Québec (BNQ) στον Καναδά. Κάθε τεχνική επιτροπή έχει μέλη και παρατηρητές μεταξύ των εθνικών φορέων τυποποίησης, οι οποίοι είναι μέλη του ISO. Ενώ οι παρατηρητές λαμβάνουν όλα τα έγγραφα και μπορούν να παρακολουθήσουν την

ολομέλεια της τεχνικής επιτροπής στις συνεδριάσεις, μόνο τα μέλη της έχουν το δικαίωμα να προτείνουν εμπειρογνώμονες για τις ομάδες εργασίας και να ψηφίσουν τα αποτελέσματα.

Οι θεματολογίες και οι τεχνικές οδηγίες που αφορούν το υδρογόνο είναι μεταξύ άλλων και οι παρακάτω:

- ISO 13984:1999 Υγρό υδρογόνο - Διεπαφή συστήματος τροφοδοσίας οχημάτων ξηράς
- ISO 14687:1999 Καύσιμο υδρογόνου -- Προδιαγραφές προϊόντος
- ISO 14687:1999/Cor 1:2001
- ISO/PAS 15594:2004 Λειτουργίες εγκατάστασης τροφοδοσίας υδρογόνου αεροδρομίου
- ISO/TR 15916:2004 Βασικές εκτιμήσεις για την ασφάλεια των συστημάτων υδρογόνου
- ISO 17268:2006 Συσκευές σύνδεσης ανεφοδιασμού οχημάτων με επιφάνεια συμπιεσμένου υδρογόνου

Το ISO TC22 "Road Vehicles" είναι, επίσης, βασικός κατασκευαστής προτύπων υδρογόνου μέσω των υποεπιτροπής.

Το επίσημο έγγραφο σχετικά με το υδρογόνο είναι το:

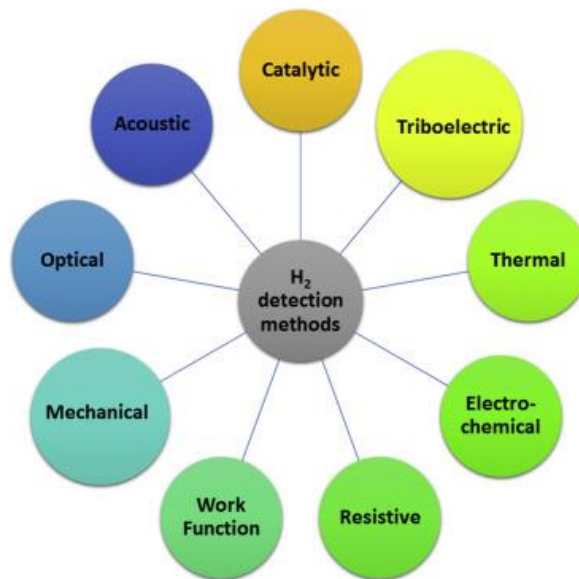
- ISO 23273-2 Οδικά οχήματα με κυψέλες καυσίμου -- Προδιαγραφές ασφαλείας -- Μέρος 2: Προστασία έναντι κινδύνων υδρογόνου για οχήματα, που τροφοδοτούνται με συμπιεσμένο υδρογόνο

14. Συστήματα ανίχνευσης

14.1. Ανίχνευση

Η ανίχνευση αφορά στην επίβλεψη μιας τοποθεσίας, χωρίς φυσική παρουσία ανθρώπου ή στην παρακολούθηση σημάτων, που δεν μπορούν να γίνουν αντιληπτά από τους παρευρισκόμενους υπαλλήλους. Στόχος είναι η εκτέλεση μιας ενέργειας πρόληψης, πριν κλιμακωθεί ένα ατύχημα. Στην περίπτωση πυρκαγιών υδρογόνου η ανίχνευση μπορεί να πληροί και τις δύο απαιτήσεις.

Οι κύριοι κίνδυνοι, λόγω ανεπιθύμητης απελευθέρωσης υδρογόνου, σχετίζονται με τη δημιουργία εκρηκτικών συνθηκών. Από αυτή την άποψη, το υδρογόνο είναι δυνητικά πιο επικίνδυνο από άλλα συμβατικά καύσιμα (μεθάνιο, προπάνιο) ή τους ατμούς τους. Στις περισσότερες καταστάσεις, λόγω της υψηλής ευφλεκτότητάς του υδρογόνου, του εύρους εκρηκτικότητας και της χαμηλής ενέργειας ανάφλεξης του (R.F. Cracknell et al., 2002) το υδρογόνο είναι εξαιρετικά επικίνδυνο. Ωστόσο, η υψηλή άνωσή του σημαίνει ότι οι κίνδυνοι μιας ανεπιθύμητης έκλυσης είναι πιθανό να μειωθούν γρήγορα, σε αποδεκτά επίπεδα, σε εξωτερικές συνθήκες ή/και σε περιοχές όπου υπάρχει επαρκής αερισμός. Η ανάπτυξη ενός κατάλληλου συστήματος για την ανίχνευση εκρηκτικών ατμοσφαιρών θα πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη ως πιθανό μέτρο ασφαλείας.



Εικόνα 56: Μέθοδοι ανίχνευσης, (πηγή: Hydrogen gas sensing methods, materials, and approach to achieve parts per billion level detection, Chauhan, Bhattacharya 2019)

Ανίχνευση εκρηκτικών ατμοσφαιρών

Όσον αφορά τη νομοθεσία, το θέμα της εκρηκτικής ατμόσφαιρας καλύπτεται από τις ευρωπαϊκές και εθνικές διατάξεις, για την ασφαλή χρήση εύφλεκτων ουσιών και, γενικότερα, εκρηκτικών αερίων. Εκτός από άλλα μέτρα προστασίας, η οδηγία του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις για τη βελτίωση της ασφάλειας και της προστασίας της υγείας των εργαζομένων, που κινδυνεύουν δυνητικά από εκρηκτικές ατμόσφαιρες (2014/34/EU), ορίζει ότι «όπου κρίνεται αναγκαίο, οι εργαζόμενοι πρέπει να λαμβάνουν οπτικές ή/και ακουστικές προειδοποιήσεις, καθώς και να αποσύρονται, πριν φτάσουν οι συνθήκες έκρηξης». Ως εκ τούτου, η αναγκαιότητα εγκατάστασης ενός συστήματος ανίχνευσης, θα πρέπει να εκτιμηθεί ως μέρος μιας προκαταρκτικής ανάλυσης των λειτουργικών κινδύνων, που προκύπτουν από τη χρήση εύφλεκτων αερίων.

Το σημείο αναλύεται περαιτέρω σε μεταγενέστερη ανακοίνωση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής σχετικά με την καλή πρακτική για την εφαρμογή της Οδηγίας, η οποία αναφέρει ότι «οι συγκεντρώσεις κοντά σε μια μονάδα μπορούν να παρακολουθούνται, π.χ. μέσω συναγερωμένων αερίου». Για να χρησιμοποιηθούν τέτοιοι συναγερωμοί, οι ουσίες που ενδέχεται να υπάρχουν, η θέση των πηγών, η μέγιστη ισχύς των πηγών και οι συνθήκες διασποράς πρέπει να είναι γνωστές με επαρκείς λεπτομέρειες και η απόδοση του οργάνου ανίχνευσης πρέπει να είναι κατάλληλη για τις συνθήκες χρήσης, ιδίως όσον αφορά την απόκριση, το επίπεδο συναγερωμού και την απαιτούμενη ευαισθησία.

Η αστοχία μεμονωμένων λειτουργιών των συστημάτων συναγερωμού δεν πρέπει να οδηγεί σε επικίνδυνες καταστάσεις, ενώ ο αριθμός και η θέση των σημείων ανίχνευσης θα πρέπει να επιλέγονται έτσι, ώστε να επιτρέπεται η γρήγορη και αξιόπιστη ανίχνευση των αναμενόμενων μειγμάτων. Τελευταίο, αλλά εξίσου σημαντικό, είναι το γεγονός ότι οι συναγερωμοί αερίου για χρήση σε επικίνδυνες περιοχές, πρέπει να αφορούν κατάλληλους, ασφαλείς, ηλεκτρικούς εξοπλισμούς, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 94/9/EC, η οποία

με τη σειρά της υποστηρίζεται από μια σειρά ευρωπαϊκά πρότυπα, που εκπονήθηκαν από τη CENELEC “The ATEX Directive 94/9/EC: operation and perspectives in Europe and the World,” 1994).

Ενώ η διασφάλιση της ασφάλειας της βιομηχανικής λειτουργίας, παρουσία εύφλεκτων αερίων, είναι ένα ευρέως αναγνωρισμένο ζήτημα, για το οποίο μπορούν να χρησιμοποιηθούν ορισμένες καθιερωμένες τεχνολογίες, υπάρχει ανάγκη να επανεξεταστεί η υπάρχουσα γνώση, για την ανίχνευση υδρογόνου υπό το πρίσμα μιας μελλοντικής οικονομίας του. Μια μεγάλη ποικιλία νέων εφαρμογών, μερικές από τις οποίες μπορεί να φέρουν το υδρογόνο πιο κοντά από ποτέ στο ευρύ κοινό, θα απαιτήσουν οι αισθητήρες υδρογόνου να είναι παντού. Τόσο το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ (DoE), όσο και η Ευρωπαϊκή Πλατφόρμα Κυψελών Καυσίμου Υδρογόνου (HFP), έχουν εντοπίσει νέες κατευθύνσεις για την ανάπτυξη αισθητήρων υδρογόνου, προβλέποντας την καινοτομία, τόσο σε υλικά, όσο και σε ιδέες για εφαρμογές.

Η αποτελεσματικότητα της ανίχνευσης σε ένα ευρύ φάσμα συγκεντρώσεων υδρογόνου (και οξυγόνου), η χαμηλή ευαισθησία σε αέριους ρύπους και η αποφυγή της αστοχίας, αποτελούν εξαιρετικά σύνθετες απαιτήσεις. Η δυνατότητα αποτελεσματικής ενσωμάτωσης «έξυπνων» συσκευών ανίχνευσης σε συστήματα υδρογόνου είναι πρωταρχικής σημασίας, έτσι ώστε τα μέτρα ασφαλείας ή έκτακτης ανάγκης να μπορούν να ενεργοποιηθούν αυτόματα, όπου κρίνεται αναγκαίο (International Association for Hydrogen Safety, 2022).

14.2. Είδη αισθητήρων

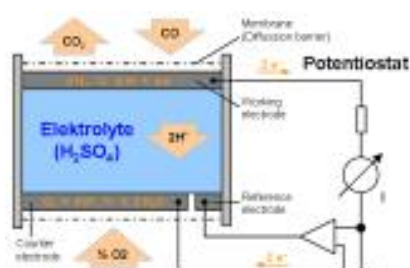
Αρκετοί τύποι αισθητήρων υπάρχουν για την ανίχνευση του υδρογόνου και επιλέγονται σύμφωνα με τις ειδικές συνθήκες λειτουργίας. Χωρίζονται, κυρίως, στις παρακάτω κατηγορίες:

- ηλεκτροχημικοί αισθητήρες
- καταλυτικοί αισθητήρες
- θερμικοί αισθητήρες αγωγιμότητας
- ημιαγωγοί

Χρησιμοποιούνται κυρίως σε βιομηχανίες, όπου υπάρχει κίνδυνος υδρογόνου.

Οι αρχές λειτουργίας των διαθέσιμων αισθητήρων περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

Ηλεκτροχημικός ανιχνευτής υδρογόνου

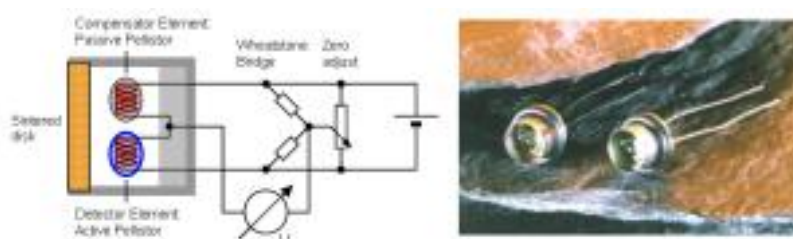


Εικόνα 57: Απεικόνιση ηλεκτροχημικού ανιχνευτή υδρογόνου, (πηγή: <http://www.hysafe.net/wiki/BRHS/DetectionMeasures>, accessed on 12/11/2022)

Η αρχή λειτουργίας του ηλεκτροχημικού ανιχνευτή είναι η μέτρηση του ρεύματος, που προκαλείται από αντιδράσεις οξειδοαναγωγής (αναγωγής-οξείδωσης). Η διαδικασία βασίζεται σε ένα ηλεκτροχημικό στοιχείο, που καλύπτεται από μια ημιπερατή, επιλεκτική

μεμβράνη που επιτρέπει την αποκλειστική διάχυση του υδρογόνου. Ο ρυθμός διάχυσης, μέσω αυτής της μεμβράνης, είναι ανάλογος της θερμοκρασίας του αέρα και της μερικής πίεσης του υδρογόνου (και, επομένως, της συγκέντρωσής του στον αέρα). Μόλις διαχυθεί, μέσω της μεμβράνης, το υδρογόνο έρχεται σε επαφή με το οριακό στρώμα μεταξύ της μεμβράνης και του ηλεκτρολύτη, που αποτελείται από θειικό οξύ. Το υδρογόνο ιονίζεται στιγμιαία στη διεπιφάνεια στερεού-υγρού ενός καταλυτικού ηλεκτροδίου πλατίνας (ηλεκτρόδιο εργασίας). Αυτός ο ιονισμός επιτρέπει μια αντίδραση οξειδοαναγωγής, με το δεύτερο ηλεκτρόδιο (βοηθητικό ηλεκτρόδιο), που αποτελείται από οξείδιο της πλατίνας. Αυτές οι αντιδράσεις προκαλούν μια διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων, η οποία επιτρέπει τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του υδρογόνου με μια μη γραμμική συσχέτιση. Τα προϊόντα της αντίδρασης δημιουργούν φραγμούς φορτίου, που τείνουν να περιορίζουν την αντίδραση. Για να βελτιωθεί η σταθερότητα και η αναπαραγωγιμότητα της μέτρησης, ένα τρίτο, χημικά μη ενεργό ηλεκτρόδιο, προστίθεται στο στοιχείο. Ένας ποτενσιοστάτης (που δημιουργείται με χρήση λειτουργικού ενισχυτή), εφαρμόζεται για να διατηρεί το δυναμικό του ηλεκτροδίου εργασίας στην ίδια τιμή με αυτό το τρίτο ηλεκτρόδιο, που ονομάζεται «ηλεκτρόδιο αναφοράς». Η διάρκεια ζωής του αμπερομετρικού στοιχείου περιορίζεται από μια επίδραση ξήρανσης του ηλεκτρολύτη, που επηρεάζεται έντονα από την έκθεσή του σε ορισμένες συνθήκες λειτουργίας, ιδιαίτερα σε αυξημένες θερμοκρασίες.

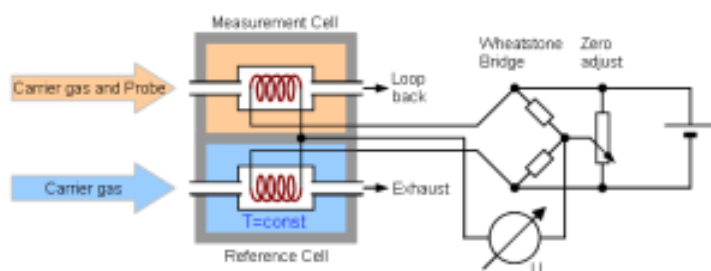
Καταλυτικοί αισθητήρες



Εικόνα 58: Απεικόνιση καταλυτικού ανιχνευτή υδρογόνου, (πηγή: <http://www.hysafe.net/wiki/BRHS/DetectionMeasures>, accessed on 12/11/2022)

Η αρχή ανίχνευσης βασίζεται στη μέτρηση θερμότητας καύσης εύφλεκτου αερίου στην επιφάνεια ενός μεταλλικού καταλύτη. Αυτό σημαίνει ότι μία κεφαλή καλυμμένη με καταλύτη, ή ακόμα και ένα νήμα πλατίνας, θερμαίνεται από το φαινόμενο Joule, ενώ υπολογίζεται η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Η καύση μορίων αερίου στην επιφάνεια του στοιχείου προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του, και, συνεπώς, αλλαγή στην αντίστασή του. Αυτή η τροποποίηση αντίστασης δημιουργεί μια ανισορροπία στη γέφυρα Wheatstone, όπου εισάγεται το στοιχείο μέτρησης. Η συγκέντρωση υδρογόνου στον αέρα συσχετίζεται γραμμικά με την ανισορροπία της γέφυρας.

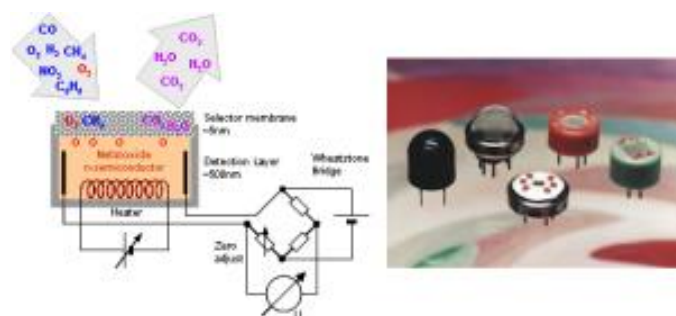
Αισθητήρες θερμότητας



Εικόνα 59: Απεικόνιση ανιχνευτή θερμότητας υδρογόνου, (πηγή: <http://www.hysafe.net/wiki/BRHS/DetectionMeasures>, accessed on 12/11/2022)

Οι αισθητήρες αγωγιμότητας θερμότητας χρησιμοποιούν την υψηλή θερμική αγωγιμότητα του αέριου υδρογόνου. Ένα υλικό που θερμαίνεται από το φαινόμενο Joule, σταθεροποιείται σε μια θερμοκρασία, που εξαρτάται από την ηλεκτρική ισχύ που παρέχεται και τις θερμικές ανταλλαγές με το αέριο περιβάλλον. Μια αλλαγή στη σύνθεση της ατμόσφαιρας προκαλεί αλλαγή στη θερμοκρασία του αισθητήρα. Το παράγωγο αυτής της αλλαγής θερμοκρασίας, που μεταβάλλει την ηλεκτρική αντίσταση του στοιχείου, συσχετίζεται γραμμικά με τη συγκέντρωση αερίου υδρογόνου στον αέρα. Για τη μέτρηση, ένας μεταλλικός συρμάτινος αγωγός, επικαλυμμένος με χημικά αδρανές υλικό, εκτίθεται στον καθετήρα αερίου. Ένας δεύτερος πανομοιότυπος αγωγός καλωδίων εκτίθεται σε ατμόσφαιρα αναφοράς, για αντιστάθμιση θερμοκρασίας. Η διακύμανση της ηλεκτρικής αντίστασης μετράται, επίσης, χρησιμοποιώντας μια γέφυρα Wheatstone. Τα σήματα που προκαλούνται από τις ποικίλες θερμικές συνθήκες είναι πιο αδύναμα από τα σήματα των καταλυτικών αισθητήρων.

Ημιαγωγοί ανίχνευσης



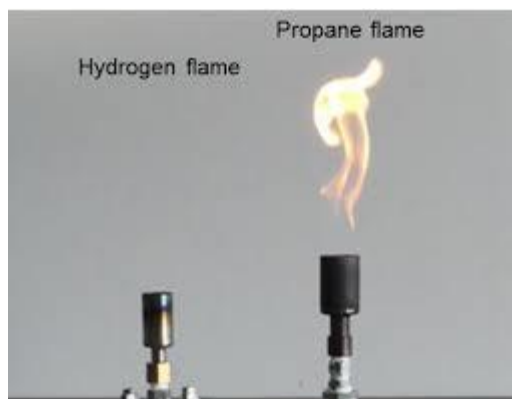
Εικόνα 60: Απεικόνιση ημιαγωγού υδρογόνου, (πηγή: <http://www.hysafe.net/wiki/BRHS/DetectionMeasures>, accessed on 12/11/2022)

Το υλικό υποστήριξης της αντίδρασης οξειδοαναγωγής δεν είναι πλέον μέταλλο, αλλά ημιαγωγός οξειδίου μετάλλου τύπου n ή p (SnO_2 , ZnO , κ.λπ.). Η αγωγιμότητά του προκαλείται από ελλείψεις οξυγόνου (οξείδιο όχι ακριβώς στοιχειομετρικό). Αυτές οι αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, ή απλώς αντιδράσεις προσρόφησης στην επιφάνεια, αλλάζουν την αντίσταση του υλικού, τροποποιώντας τον αριθμό των ελλείψεων οξυγόνου. Το υλικό θερμαίνεται παρόμοια με τα καταλυτικά υλικά, αλλά η μέτρηση είναι διαφορετική: μετριέται

η διακύμανση της αντίστασης του ίδιου του υλικού, παρά του θερμαντικού στοιχείου, το οποίο συνδέεται με τη συγκέντρωση υδρογόνου μέσω μη γραμμικής συσχέτισης.

14.3. Ανίχνευσης φλόγας υδρογόνου

Το υδρογόνο καίγεται με πολύ ανοιχτή μπλε φλόγα και δεν εκπέμπει ορατό φως κατά τη διάρκεια της ημέρας (η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να εξουδετερώσει το φως από μια φλόγα υδρογόνου), ούτε καπνό (παράγει νερό όταν καίγεται στον αέρα), εκτός εάν, για παράδειγμα, προστεθεί αλάτι νατρίου ή σκόνη. Σε αυτή την περίπτωση τα σωματίδια παρασύρονται και καίγονται μαζί με το εύφλεκτο μείγμα.



Πηγή: Ultraviolet and visible spectral imaging of hydrogen flames using an organic photoconductive film CMOS imager.

Σε σύγκριση με την καύση υδρογονανθράκων, οι φλόγες υδρογόνου ακτινοβολούν σημαντικά λιγότερη θερμότητα, και, έτσι, η ανθρώπινη φυσική αντίληψη αυτής της θερμότητας δεν εμφανίζεται, μέχρι να έρθει η άμεση επαφή με τη φλόγα. Μια πυρκαγιά υδρογόνου μπορεί, επομένως, να παραμείνει μη ανιχνεύσιμη και να διαδοθεί, παρά την ανθρώπινη, άμεση παρακολούθηση σε περιοχές, όπου το υδρογόνο μπορεί να διαρρεύσει, να χυθεί ή να συσσωρευτεί και να σχηματίσει δυνητικά εύφλεκτα μείγματα. Οι ανιχνευτές πυρκαγιάς υδρογόνου διασφαλίζουν την άμεση λήψη μέτρων σε αυτές τις περιπτώσεις. Οι ανιχνευτές πυρκαγιάς υδρογόνου μπορούν να είναι είτε σταθεροί, για συνεχή παρακολούθηση απομακρυσμένων λειτουργιών, είτε φορητοί, για επιχειρήσεις πεδίου.

Για αποτελεσματική και αξιόπιστη χρήση ένας ανιχνευτής πυρκαγιάς υδρογόνου πρέπει να πληροί τα ακόλουθα κριτήρια:

- Θα πρέπει να ανιχνεύει κάθε αληθινό περιστατικό και να αποφεύγει τα ψευδή
- Θα πρέπει να είναι συγκεκριμένος και να λαμβάνει σήματα πυρκαγιάς υδρογόνου μεταξύ πολλών διαφορετικών σημάτων, τα οποία γίνονται ακόμη πιο πολλά όταν αυξάνεται η ευαισθησία του ανιχνευτή
- Θα πρέπει να έχει ικανοποιητικό χρόνο απόκρισης, ειδικά εάν ενεργοποιεί μια συνθήκη ασφαλείας
- Θα πρέπει να δοκιμάζεται και να ελέγχεται περιοδικά

Όσον αφορά την απόδοση του ανιχνευτή, αυτός θα πρέπει να είναι ικανός για ανίχνευση φλόγας υδρογόνου σε επαρκή απόσταση και για ανίχνευση μικρών εστιών. Όλα τα παραπάνω πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την εγκατάσταση ανιχνευτή φλόγας υδρογόνου.

Μια πυρκαγιά υδρογόνου μπορεί, ενδεχομένως, να ανιχνευθεί χρησιμοποιώντας θερμικούς ανιχνευτές (όπως ανιχνευτές ρυθμού αύξησης της θερμοκρασίας ή υπερθέρμανσης), για την ανίχνευση ακτινοβολίας, μεταφερόμενης από τον αέρα ή αγωγίμης θερμότητας. Αυτοί οι αξιόπιστοι ανιχνευτές διαφόρων τύπων είναι κατάλληλοι για ανίχνευση πυρκαγιάς υδρογόνου, εφόσον βρίσκονται πολύ κοντά στο σημείο που εκδηλώνεται η πυρκαγιά. Οι συνήθεις τύποι ανιχνευτών πυρκαγιάς, όπως αυτοί με ιονίζουσες κυψέλες, δεν είναι κατάλληλοι για την ανίχνευση πυρκαγιών υδρογόνου.



Εικόνα 60: Hydrogen Flame Detector - FL500-H₂, (πηγή: MSA.com, accessed on 12/11/2022)

Αν και οι πυρκαγιές υδρογόνου τείνουν να εκπέμπουν ακτινοβολία σε ένα ευρύ φάσμα και δεν χαρακτηρίζονται από ακραίες κορυφές, οι ανιχνευτές πυρκαγιάς υδρογόνου μπορούν να βασίζονται στην ανίχνευση υπεριώδους και υπέρυθρης ακτινοβολίας. Εκτός από την ίδια την ακτινοβολία, οι φλόγες του υδρογόνου μπορούν να είναι έμμεσα ορατές από την ισχυρή θερμική τους επίδραση στην περιοχή πλησίον.

Οι οπτικοί ανιχνευτές φλόγας ανιχνεύουν συγκεκριμένη φασματική ακτινοβολία, που εκπέμπεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της καύσης από τις διάφορες χημικές ουσίες (ιόντα, ρίζες, μόρια) που είναι, είτε ενδιάμεσα, είτε τελικά προϊόντα της καύσης. Οι χημικές ουσίες, που εκπέμπουν ακτινοβολία σε μήκη κύματος, είναι χαρακτηριστικές για το συγκεκριμένο είδος φλόγας.

- Η ρίζα υδροξυλίου και το νερό είναι τα κύρια χημικά είδη που εκπέμπουν στη διαδικασία καύσης υδρογόνου. Αυτά τα είδη εκπέμπουν ακτινοβολία σε συγκεκριμένες φασματικές ζώνες, σύμφωνα με την δομή ηλεκτρονίων τους και την τυπική ενέργεια της διαδικασίας.
- Το OH (που είναι ένα ενεργό ενδιάμεσο με ένα διαθέσιμο ελεύθερο ηλεκτρόνιο) εκπέμπει έντονα στη φασματική ζώνη UV 0,306 & 0,282 μm και επιπλέον στα 0,180 - 0,240 μm . Εκπέμπει, επίσης, υπέρυθρη ενέργεια στην εγγύς ζώνη με αρκετές κορυφές εντός της φασματικής ζώνης 1-3 μm .
- Το H₂O εκπέμπει κυρίως στην εγγύς ζώνη υπερύθρων με ισχυρές κορυφές στο 2,7, 1,9 & 1,4 μm , που κυμαίνεται από την υψηλότερη έως τη χαμηλότερη ένταση.

Αυτές οι τεχνικές ανίχνευσης υποθέτουν ότι δεν υπάρχει παρεμβολή μεταξύ της φλόγας και του ανιχνευτή UV/IR. Αν και υπάρχουν διαθέσιμες οπτικές τεχνικές, για την ανίχνευση αυτών των διαφόρων μηκών κύματος, η κύρια πρόκληση συνίσταται στην εξάλειψη των σημάτων φλόγας υδρογόνου από άλλες πιθανές πηγές, οι οποίες εκπέμπουν σήματα με παρόμοια συχνότητα και ένταση.

14.4. Αναδυόμενες τεχνολογίες ανίχνευσης υδρογόνου

Οι τεχνολογίες ανίχνευσης υδρογόνου μπορούν, γενικά, να χωριστούν σε τεχνολογίες που βασίζονται σε οπτικές μεθόδους αναγνώρισης και μη. Η ακόλουθη ενότητα δίνει ένα γενικό πλαίσιο και για τα δύο, ξεκινώντας από τις μη οπτικές τεχνολογίες (Tobiska P. et al., 2001). Οι πρόσφατες τεχνολογίες ανίχνευσης υδρογόνου είναι:

- ο ημιαγωγός
- η δίοδος Schottky
- το δίκτυο καλωδίων παλλαδίου
- ο αισθητήρας ακουστικών κυμάτων επιφάνειας σε ευαίσθητο στρώμα νανοδομής

Η ανάπτυξη αισθητήρων ημιαγωγών και διόδων Schottky στοχεύει, κυρίως, στη βελτίωση της επιλεκτικότητας των διαφορετικών στρωμάτων, καθώς και στη δοκιμή νέων συνδυασμών μεταλλικού υποστρώματος απόθεσης. Αν και αυτές οι τεχνολογίες είναι διαθέσιμες ήδη στην αγορά, η έρευνα συνεχίζεται, προκειμένου να μειωθεί η απόκριση και να αυξηθεί η επιλεκτικότητα. Η λειτουργία των τεχνολογιών ημιαγωγών και διόδων Schottky περιγράφεται παραπάνω. Μεταξύ άλλων, περιγράφονται οι αρχές λειτουργίας των αισθητήρων που βασίζονται σε δίκτυο καλωδίων παλλαδίου και των αισθητήρων ηχητικών κυμάτων επιφάνειας σε ένα ευαίσθητο στρώμα νανοδομής. Οι αναδυόμενες οπτικές τεχνολογίες χρησιμοποιούν, κυρίως, οπτικές ίνες σε συνδυασμό με επιστρώσεις ευαίσθητες στο υδρογόνο, για τη μέτρηση των συγκεντρώσεων υδρογόνου.

Νήμα παλλαδίου

Αυτοί οι αισθητήρες αποτελούνται από ένα δίκτυο 20 έως 100 νανόμετρων συρμάτων παλλαδίου. Αυτά τα δίκτυα νανοσυρμάτων παλλαδίου παρασκευάζονται με ηλεκτρο-εναπόθεση σε επιφάνεια γραφίτη και μεταφέρονται σε γυάλινη πλάκα, καλυμμένη με κυανακρυλικό φιλμ. Στη συνέχεια, τα νανοσύρματα συνδέονται και στις δύο πλευρές με ασημένιες επαφές. Αυτά τα νανοσύρματα παλλαδίου είναι στην πραγματικότητα «σπασμένα» και δε μεταφέρουν το ρεύμα. Παρουσία υδρογόνου το παλλάδιο διογκώνεται ελαφρώς, και οι νανοσκοπικοί χώροι ή «σπασίματα», «επισκευάζονται», επιτρέποντας τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος. Η μεταβολή της αντίστασης εξαρτάται από τη συγκέντρωση του υδρογόνου σε εύρος συγκέντρωσης από 2 έως 10%. Για να λειτουργήσουν αυτοί οι αισθητήρες απαιτείται μόνιμη σύνδεση ρεύματος και μπορεί να χρειαστεί ακόμη και θέρμανση (Favier F et al., 2001),

Επιφανειακός αισθητήρας ακουστικών κυμάτων σε ευαίσθητο στρώμα νανοδομής

Ένας επιφανειακός αισθητήρας ακουστικών κυμάτων είναι τοποθετημένος γύρω από δύο διασυνδεδεμένους μετατροπείς, οι οποίοι τοποθετούνται στην επιφάνεια ενός πιεζοηλεκτρικού υποστρώματος. Συνδέοντας εναλλασσόμενο ρεύμα στους μεταλλικούς αγωγούς του μετατροπέα εισόδου εμφανίζεται μια εναλλαγή συμπιέσεων και διαστολών, που δημιουργεί ένα επιφανειακό κύμα. Αυτό το κύμα κινείται προς τον δεύτερο μετατροπέα, που θα μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρικό σήμα. Κατά τη διέλευση του κύματος μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων είναι δυνατό αυτό να επηρεαστεί, τοποθετώντας ένα ευαίσθητο δίχτυ με νανοδομή, το οποίο αποτελείται από το ίδιο συρμάτινο δίκτυο παλλαδίου, που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Αυτό το δίκτυο βάζει τεχνικές διαταραχές στην επιφάνεια αγωγής των κυμάτων και μεταβάλλει τα φυσικά χαρακτηριστικά (πυκνότητα, ακαμψία, ηλεκτρική αγωγιμότητα, πάχος) με το απορροφούμενο υδρογόνο, το οποίο εξαρτάται από τη

συγκέντρωσή του. Αυτές οι διαταραχές εξαρτώνται από τη συγκέντρωση υδρογόνου, την ταχύτητα φάσης και τις διακυμάνσεις εξασθένησης των επιφανειακών ακουστικών κυμάτων.

Οπτική ίνα με μικροκαθρέφτη παλλαδίου



Εικόνα 61: Οπτική ίνα με μικροκαθρέφτη παλλαδίου

(πηγή: <http://www.hysafe.net/wiki/BRHS/DetectionMeasures>, accessed on 12/11/2022)

Αυτός ο τύπος αισθητήρα υδρογόνου βασίζεται σε μια πολυτροπική οπτική ίνα με μικροκάτοπτρο παλλαδίου. Το υδρογόνο απορροφάται από τον μικροκαθρέφτη παλλαδίου, που βρίσκεται στο άκρο της ίνας. Οι οπτικές και ηλεκτρικές ιδιότητες του παλλαδίου αλλάζουν. Κατά συνέπεια, το ανακλώμενο κύμα τροποποιείται, ενώ το προσπίπτον κύμα παραμένει το ίδιο (Bevenot X. et al., 2000).

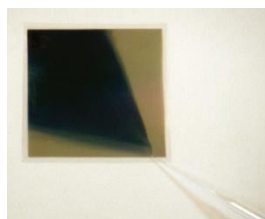
Οπτική ίνα με μικροκαθρέφτη τριοξειδίου του βολφραμίου

Το τριοξείδιο του βολφραμίου (WO_3) δείχνει αλλαγές εξαρτώμενες από τη συγκέντρωση του υδρογόνου στον δείκτη διάθλασής του, γεγονός που οδηγεί σε αλλαγές στην ένταση του ανακλώμενου φωτός. Οι προκύπτουσες διακυμάνσεις της έντασης της ανακλώμενης δέσμης μπορούν να ανιχνευθούν συμβολομετρικά.

Οπτικές ίνες δικτύου Bragg

Ένα δίκτυο Bragg προκαλεί περιοδική ή μη περιοδική διακοπή του, λόγω ενεργούς απορρόφησης ή του ενεργού δείκτη διάθλασης ενός καλωδίου οπτικών ινών. Τα προκαθορισμένα μήκη κύματος φωτός αντανακλώνται από το δίκτυο Bragg, ενώ όλα τα άλλα μήκη κύματος διέρχονται από αυτό. Σε αυτόν τον αισθητήρα, ο οποίος λειτουργεί με υπεριώδη ακτινοβολία, αναπτύσσεται μια μηχανική καταπόνηση, που προκαλείται από το στρώμα παλλαδίου, όταν απορροφά το υδρογόνο. Αυτή η τάση τεντώνει ή συμπιέζει το δίκτυο Bragg και, επομένως, και τα μήκη κύματος ή τα οπτικά μήκη του ανακλώμενου ή μεταδιδόμενου φωτός. Όπου χρησιμοποιούνται πολλά δίκτυα Bragg με διαφορετικές σταθερές πλέγματος, πολλοί αισθητήρες υδρογόνου μπορούν να υπάρξουν σε μία μόνο ίνα (Sutarun B. et al., 1999).

Χημειοχρωμικός αισθητήρας



Εικόνα 62: Χημειοχρωμικός αισθητήρας,

(πηγή: <http://www.hysafe.net/wiki/BRHS/DetectionMeasures>, accessed on 12/11/2022)

Αυτός ο τύπος μη ηλεκτρικού ανιχνευτή αποτελείται από μια επίστρωση λεπτής μεμβράνης ή μια χρωστική ουσία ενός οξειδίου μετάλλου, όπως οξείδιο του βολφραμίου ή οξείδιο του μολυβδαινίου, με έναν καταλύτη, όπως η πλατίνα ή το παλλάδιο. Το οξείδιο ανάγεται μερικώς, παρουσία του υδρογόνου, σε συγκεντρώσεις τόσο χαμηλές, όσο 300 μέρη ανά εκατομμύριο, και αλλάζει από διαφανές, σε σκούρο χρώμα. Η αλλαγή του χρώματος είναι γρήγορη και εύκολα ορατή από απόσταση. Στον αέρα, η αλλαγή χρώματος αντιστρέφεται γρήγορα, όταν αφαιρεθεί η πηγή αερίου υδρογόνου -στην περίπτωση του οξειδίου του βολφραμίου- ή είναι σχεδόν μη αναστρέψιμη -στην περίπτωση του οξειδίου του μολυβδαινίου. Το μερικώς αναγόμενο οξείδιο μετάλλου γίνεται ημιαγωγίμο και αυξάνει την ηλεκτρική του αγωγιμότητα κατά αρκετές τάξεις μεγέθους, όταν εκτίθεται στο υδρογόνο. Η ενσωμάτωση αυτού του αισθητήρα ηλεκτρικής αντίστασης με μια ετικέτα RFID (Radio Frequency Identification) μπορεί να επεκτείνει την ικανότητα αυτών των αισθητήρων να καταγράφουν και να μεταδίδουν ιστορικό παρουσίας ή απουσίας διαρροής υδρογόνου σε μεγάλες αποστάσεις. Για μεγάλες περιόδους έκθεσης στην ατμόσφαιρα η απόκριση του δείκτη μπορεί να επιβραδυνθεί, λόγω της υποβάθμισης του καταλύτη (Hoagland W. et al., 2007).

15. Συμπεράσματα

Είναι η κατάλληλη στιγμή για να αξιοποιήσουμε τις δυνατότητες του υδρογόνου. Το υδρογόνο μπορεί να διαδραματίσει βασικό ρόλο σε ένα καθαρό, ασφαλές και προσιτό ενεργειακό (International Energy Agency, 2019). Η έκθεση «The future of hydrogen» του Διεθνούς Γραφείου Ενέργειας διαπιστώνει, ότι το καθαρό υδρογόνο χαίρει -επί του παρόντος- μια άνευ προηγουμένου πολιτική και επιχειρηματική δυναμική, με τον αριθμό των έργων σε όλο τον κόσμο να επεκτείνεται με ταχείς ρυθμούς. Τονίζεται δε, ότι τώρα είναι η ώρα να κλιμακωθούν οι τεχνολογίες και να μειωθεί το κόστος, για να επιτραπεί η ευρεία χρήση του υδρογόνου. Οι ρεαλιστικές και εφαρμόσιμες συστάσεις προς τις κυβερνήσεις και τη βιομηχανία που παρέχονται, θα καταστήσουν δυνατή την πλήρη αξιοποίηση αυτής της αυξανόμενης δυναμικής.

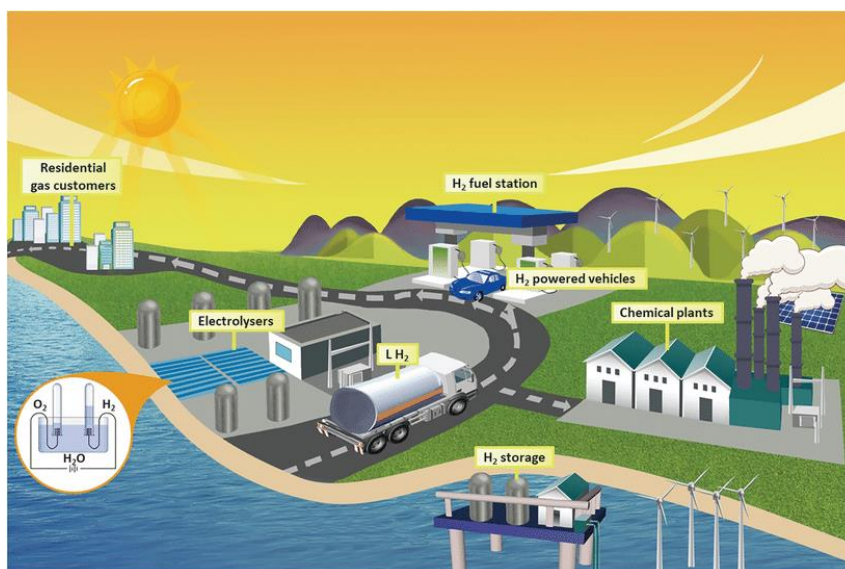


Εικόνα 63: Γραφιστική απεικόνιση εγκαταστάσεων υδρογόνου

(πηγή: <https://www.rechargenews.com/energy-transition/>, accessed on 12/11/2022)

Το υδρογόνο μπορεί να βοηθήσει στην αντιμετώπιση διαφόρων κρίσιμων ενεργειακών προκλήσεων. Προσφέρει τρόπους απαλλαγής από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε σημαντικούς κλάδους της βιομηχανίας, συμπεριλαμβανομένων των μεταφορών μεγάλων αποστάσεων, των χημικών προϊόντων και του σιδήρου και του χάλυβα, που θεωρείται δύσκολο να μειωθούν ουσιαστικά οι εκπομπές με άλλους εναλλακτικούς τρόπους. Μπορεί, επίσης, να συμβάλει στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα και στην ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας. Παρά τους πολύ φιλόδοξους διεθνείς κλιματικούς στόχους, οι παγκόσμιες εκπομπές CO₂, που σχετίζονται με την ενέργεια, είναι σε υψηλό επίπεδο. Η ρύπανση του εξωτερικού αέρα παραμένει, επίσης, ένα πιεστικό πρόβλημα με περίπου 3 εκατομμύρια ανθρώπους να πεθαίνουν πρόωρα κάθε χρόνο.

Το υδρογόνο είναι ευέλικτο. Οι τεχνολογίες που είναι ήδη διαθέσιμες σήμερα, επιτρέπουν στο υδρογόνο να παραχθεί, να αποθηκευτεί, να μεταφερθεί και να χρησιμοποιηθεί με διαφορετικούς τρόπους. Μια μεγάλη ποικιλία καυσίμων είναι σε θέση να παράγει υδρογόνο, συμπεριλαμβανομένων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, των πυρηνικών, του φυσικού αερίου, του άνθρακα και του πετρελαίου. Μπορεί να μεταφερθεί ως αέριο με αγωγούς ή σε υγρή μορφή με πλοία, όπως το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG). Μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια και μεθάνιο για να τροφοδοτήσει τα σπίτια και τη βιομηχανία ζωοτροφών και σε καύσιμα για αυτοκίνητα, φορτηγά, πλοία και αεροπλάνα.



Εικόνα 64: Γραφιστική απεικόνιση εγκαταστάσεων υδρογόνου

(πηγή: www.researchgate.net/figure/The-blueprint-of-the-future-hydrogen-economy-society, accessed on 12/11/2022)

Το υδρογόνο μπορεί να επιτρέψει στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να προσφέρουν ακόμη μεγαλύτερη συμβολή. Έχει τη δυνατότητα να βοηθήσει με την μεταβλητή παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως τα ηλιακά φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες, των οποίων η διαθεσιμότητα δεν είναι πάντα σύμφωνη με τη ζήτηση, ενώ και η αποθήκευσή τους αποτελεί ένα ζήτημα. Το υδρογόνο είναι μία από τις κορυφαίες επιλογές για την αποθήκευση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, ενώ φαίνεται πολλά υποσχόμενη, καθώς πρόκειται για μια επιλογή με το χαμηλότερο κόστος, για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας για ημέρες, εβδομάδες ή και μήνες. Το υδρογόνο ως φορέας μπορεί να μεταφέρει ενέργεια από

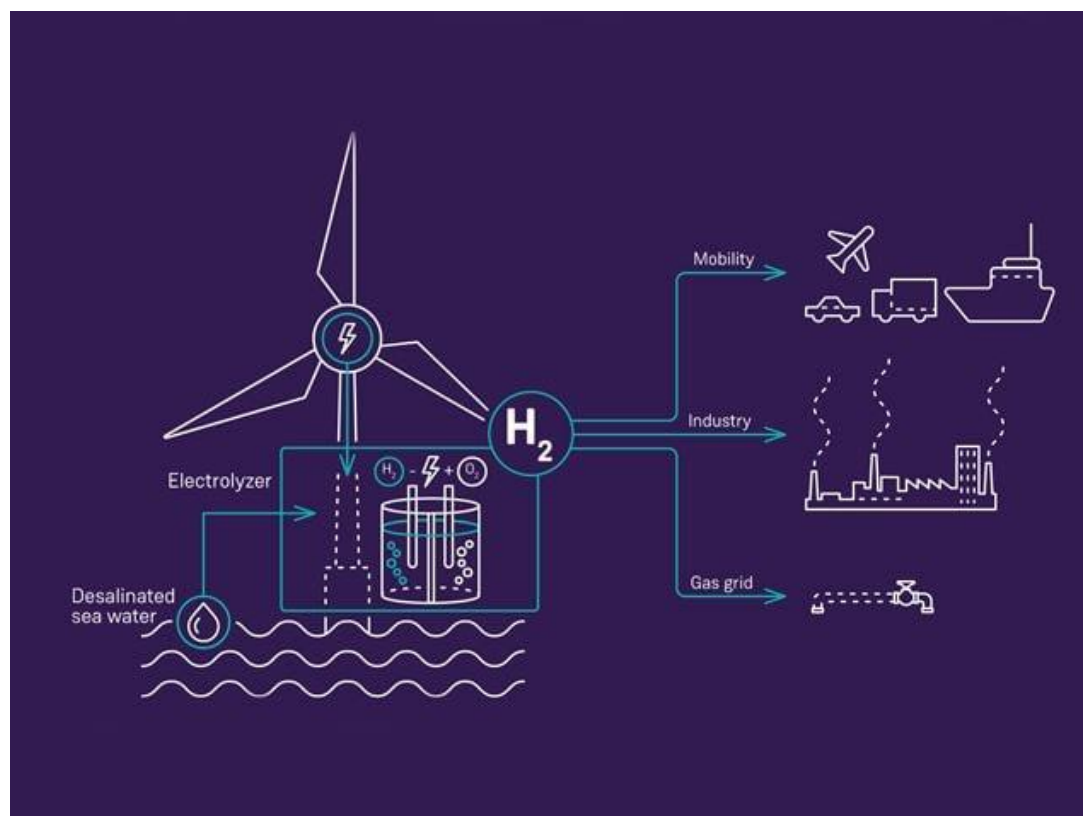
ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις – από περιοχές με άφθονους ηλιακούς και αιολικούς πόρους.



Εικόνα 65: Γραφιστική απεικόνιση εγκαταστάσεων υδρογόνου

(πηγή:<https://www.innovationnewsnetwork.com/north-sea-green-hydrogen-pipeline-project-seeks-pci-status-from-european-commission/>, accessed on 12/11/2022)

Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί πολύ ευρύτερα. Σήμερα, το υδρογόνο χρησιμοποιείται, κυρίως, στη δύλιση πετρελαίου και για την παραγωγή λιπασμάτων. Για να συμβάλει σημαντικά στη μετάβαση στην καθαρή ενέργεια, πρέπει, επίσης, να υιοθετηθεί σε τομείς, όπου αυτή τη στιγμή απουσιάζει σχεδόν εντελώς, όπως οι μεταφορές, τα κτίρια και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 66: Γραφιστική απεικόνιση εγκαταστάσεων υδρογόνου

(πηγή: <https://stateofgreen.com/en/solutions/brande-hydrogen/>, accessed on 12/11/2022)

Ωστόσο, η καθαρή, ευρεία χρήση του υδρογόνου στις παγκόσμιες ενεργειακές μεταβάσεις αντιμετωπίζει πολλές προκλήσεις:

- Πρέπει να ενισχυθεί η νομοθεσία συγκεκριμένα για την ασφάλεια του υδρογόνου και να συνταχθούν συγκεκριμένες τεχνικές προδιαγραφές ασφαλείας για εφαρμογές και υλικά.
- Πρέπει να δημιουργηθούν φορείς με επάρκεια ώστε να μπορούν να αναλύσουν τους κινδύνους σε εγκαταστάσεις και να εκπαιδεύσουν τους εμπλεκόμενους με την τεχνολογία του υδρογόνου.
- Πρέπει να ενταχθούν με συγκεκριμένες κατευθύνσεις στα ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης τα ζητήματα του υδρογόνου καθώς οι εγγενείς κίνδυνοι είναι συγκεκριμένοι και ιδιαίτεροι. Επίσης πρέπει να σχηματισθούν διαπιστευμένα φορείς που θα πιστοποιούν εταιρείες κατασκευής υλικών και πρόσωπα.
- Οι προδιαγραφές αδειοδότησης σταθμών ανεφοδιασμού, χώρων στάθμευσης και μεταφοράς οχημάτων πρέπει να συγκεκριμενοποιηθούν πριν την ένταξη του υδρογόνου στην μαζική αγορά της αυτοκίνησης και να καλυφθούν τα υφιστάμενα κενά.
- Η αναδυόμενες τεχνολογίες ανίχνευσης πρέπει να εστιάσουν στη μείωση της απόκρισης της ανίχνευσης, στην επιλεκτικότητα και στη διασύνδεση τους με συστήματα RFID.

16. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Akiba, E., 1999. Hydrogen-absorbing alloys. *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*
- Andersson, J., Grönkvist, S., 2019. Large-scale storage of hydrogen. *Int. J. Hydrog. Energy* 44, 11901–11919.
- Astbury, G., Hawksworth, S., 2007. Spontaneous ignition of hydrogen leaks: A review of postulated mechanisms. *Int. J. Hydrog. Energy* 32, 2178–2185.
- Bevenot X., Troillet A., Veillas C., Gagnaire H., Clement M., 2000. Hydrogen leak detection using an optical fibre sensor for aerospace application.
- Burn and Reconstructive Center of America, 2022. Thermal Burn Definition.
- Cadwallader, L.C., Herring, J.S., 1999 Safety Issues with Hydrogen as a Vehicle Fuel.
- Center for Disease Control and Prevention, 2023. Hypothermia.
- Center for Disease Control and Prevention, 2023. Explosions and Blast Injuries.
- C.E.Thomas, 1997. Hydrogen Vehicle Safety Report.
- Cirrone, D., Makarov, D., Molkov, V., 2023. Rethinking “BLEVE explosion” after liquid hydrogen storage tank rupture in a fire. *Int. J. Hydrog. Energy* 48, 8716–8730.
- Dr. Scroumbelos Gorge, Vatista Margarita, 2023. Προφυλάξεις & ασφαλής χειρισμός κρυογενικών υλικών.
- European Commission, 2010. DIRECTIVE 2010/35/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 June 2010.
- European Commission, 1992 ATEX EC.1999.92.
- European Union, 2012. Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012, in: Core EU Legislation. Bussels.
- Favier F, Walter E.C., Zach M.P., Benter T., Penner R.M., 2001. Hydrogen sensors and switches from electrodeposited palladium mesowire arrays.
- Glassman Irvin, 2015. Combustion, in: Combustion. Elsevier, p. iii.
- Health and Safety Executive, 2012. A guide to the Pipelines Safety Regulations 1996: guidance on regulations. Health and Safety Executive, Sudbury, Suffolk.
- Hendershot, D.C., 2008 An Overview of Key Elements.
- Hoagland W., Benson D.K., Smith R.D., 2007. Novel wide-area hydrogen sensing technology.
- International Association for Hydrogen Safety, 2022a. Asphyxiation by Hydrogen.
- International Association for Hydrogen Safety, 2022b. Detection Measures.
- International Energy Agency, 2019. The Future of Hydrogen.
- International Energy Agency, 2022, 2022. Global Hydrogen Review 2022.
- Jonathan A. Lee, 2016. Hydrogen Embrittlement.
- Joseph Morelos, 2017. Hydrogen – Safety Considerations and Future Regulations.
- Lanz, W., 2001. Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies. *Hydrog. Fuel.*
- Ministry of ecology, energy, sustainable development and town and country planning, 2009. Accidentology involving hydrogen_2009
- Mishra, K.B., Wehrstedt, K.-D., Krebs, H., 2015. Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE) of Peroxy-fuels: Experiments and Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation. *Energy Procedia* 66, 149–152.
- Molkov, V., Kashkarov, S., 2015. Blast wave from a high-pressure gas tank rupture in a fire: Stand-alone and under-vehicle hydrogen tanks. *Int. J. Hydrog. Energy* 40, 12581–12603.
- Muzaimi, H., Chew, B.C., Hamid, S.R., 2017. Integrated management system: The integration of ISO 9001, ISO 14001, OHSAS 18001 and ISO 31000. Presented at the ENGINEERING INTERNATIONAL CONFERENCE (EIC) 2016: Proceedings of the 5th International Conference on Education, Concept, and Application of Green Technology, Semarang, Indonesia, p. 020034.

- NASA, 1997. SAFETY STANDARD FOR HYDROGEN AND HYDROGEN SYSTEMS.
- Parfomak, P.W., 2021 Pipeline Transportation of Hydrogen: Regulation, Research, and Policy.
- P.HOOKER, J.GUMMER, M.ROYLE, D.WILLOUGHBY, 2015. Self Ignition of Hydrogen by Various Mechanisms.
- R.F. Cracknell, J.L. Alcock, J.J. Rowson, L.C. Shirvill, A. Ungut, 2002. SAFETY CONSIDERATIONS IN RETAILING HYDROGEN.
- S. Tretsiakova-McNally, 2021. Hydrogen properties relevant to safety. Safety of liquefied hydrogen, 2021.
- Somerday, B.P., Marchi, C.S., 2006, EFFECTS OF HYDROGEN GAS ON STEEL VESSELS AND PIPELINES.
- Sterioitis, T., Junior, V.L.J., Papaelias, M., 2019 Prepared and cross- reviewed by: Sutapun B., Tabib-Azar M., Kazemi A., 1999. PD-coated elastooptic fiber optic Bragg grating sensors for multiplexed hydrogen sensing.
- Tazedakis, A.S., Voudouris, N., Dourdounis, E., Mannucci, G., Vito, L.F.D., Fonzo, A., 2021. Qualification of High-Strength Linepipes for Hydrogen Transportation Based on Asme B31.12 Code.
- The hydrogen economy: opportunities and risks in energy transition, 2021.
- Tobiska P., Hugnon O., Trouillet A, Gagnaire H, 2001. An integrated optic hydrogen sensor based on SPR on palladium.
- U.S. Government, 1986. Report - Investigation of the Challenger Accident.
- Valentini, R., Tedesco, M.M., Corsinovi, S., Bacchi, L., Villa, M., 2019. Investigation of Mechanical Tests for Hydrogen Embrittlement in Automotive PHS Steels. Metals 9, 934.
- Zhiyong, L., Xiangmin, P., Jianxin, M., 2010. Quantitative risk assessment on a gaseous hydrogen refueling station in Shanghai. Int. J. Hydrog. Energy 35, 6822–6829.
- Αποστολόπουλος Χαράλαμπος, Τσερπές Κωνσταντίνος, 2015, Αντοχή Υλικών Ι, Πανεπιστήμιο Κρήτης.
- Γρηγοριάδης Δημήτριος Παναγιώτης, 2014. ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.
- Λάμπρου Ευάγγελος, Σιάκουλης Ορέστης, 2015. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ.
- Χρήστος Κ. Χαλαζιάς, 2020. Αποθήκευση υδρογόνου από υλικά με βάση το μαγνήσιο- Προκλήσεις και μελλοντικές προοπτικές.