

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΑΙ
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΑΣΦΑΛΟΥΣ
ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: 1) ΤΟΥΡΛΑΚΗΣ ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ (Α.Μ. 5914)
2) ΝΙΝΟΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ (Α.Μ. 5915)

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ: 1) ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΜΑΥΡΙΔΗΣ
2) ΓΙΑΝΝΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΠΑΤΡΑ, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και αναφέρεται στην ανάλυση των κινδύνων από τη χρήση και αποθήκευση του υδρογόνου σε διάφορες εγκαταστάσεις και αναλύονται τρόποι αποτροπής κινδύνων και ασφαλούς χρήσης του.

Στην αρχή γίνεται μια εισαγωγή στα χημικά χαρακτηριστικά του υδρογόνου που δημιουργούν κινδύνους και αναφέρονται γνωστά ατυχήματα λόγω της χρήσης υδρογόνου και της λανθασμένης εφαρμογής και χρήσης του. Στην συνέχεια γίνεται αναλύονται οι κατηγορίες των κινδύνων λόγω του υδρογόνου σε ανθρώπους αλλά και κατασκευές και εγκαταστάσεις αποθήκευσης και χρήσης του και στο τέλος γίνεται ανάλυση στα συστήματα ασφαλείας που πρέπει να υιοθετηθούν και οι οδηγίες που πρέπει να γίνουν μέρος της διαδικασίας χρήσης -διακίνησης-αποθήκευσης του υδρογόνου σε κάθε μορφή του.

Ευχαριστούμε θερμά τους Επιβλέποντες Καθηγητές μου κ. Κωνσταντίνο Μαυρίδη, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, και τον κ. Ιωάννη Γιαννάκη, Συνεργάτη του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφεραν για την πραγματοποίηση της Εργασίας.

ΟΙ ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ

ΤΟΥΡΛΑΚΗΣ ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ

ΝΙΝΟΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία αναφέρεται στην ανάλυση των κινδύνων από τη χρήση και αποθήκευση του υδρογόνου σε διάφορες εγκαταστάσεις και αναλύονται τρόποι αποτροπής κινδύνων και ασφαλούς χρήσης του. Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε πέντε κεφάλαια.

Στην εισαγωγή και στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στα χημικά χαρακτηριστικά του υδρογόνου που δημιουργούν κινδύνους και αναφέρονται γνωστά ατυχήματα λόγω της χρήσης υδρογόνου και της λανθασμένης εφαρμογής και χρήσης του.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο αναλύονται οι κατηγορίες των κινδύνων λόγω του υδρογόνου σε ανθρώπους αλλά και στην αλλαγή των ιδιοτήτων υλικών.

Στο τρίτο Κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των κινδύνων σε εγκαταστάσεις αποθήκευσης υδρογόνου και παρουσιάζονται στοιχεία από έρευνες υπολογιστικές και πειραματικές.

Στο τέταρτο Κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των οδηγιών και της νομοθεσίας που πρέπει να γίνουν μέρος της διαδικασίας χρήσης -διακίνησης-αποθήκευσης του υδρογόνου σε κάθε μορφή του.

Στο πέμπτο Κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των συστημάτων διαχείρισης ασφαλείας για τις εγκαταστάσεις υδρογόνου.

Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

	Σελ.
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
Εισαγωγή στη χρήση του υδρογόνου και γνωστά ατυχήματα χρήσης του	4
Κεφάλαιο 1^ο: Ιδιότητες του Υδρογόνου που σχετίζονται με κινδύνους	12
1.1. Ιδιότητες αερίου υδρογόνου σχετικές με κινδύνους	12
1.2. Ιδιότητες υγροποιημένου υδρογόνου σχετικές με κινδύνους	15
Κεφάλαιο 2^ο: Κίνδυνοι από το Υδρογόνο	17
2.1 Φυσιολογικοί κίνδυνοι	17
2.2 Φυσικοί κίνδυνοι	23
2.3 Χημικοί κίνδυνοι	28
Κεφάλαιο 3^ο: Κίνδυνοι στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης υδρογόνου	48
3.1 Επιλογές αποθήκευσης	48
3.2 Διάκριση κινδύνου	50
3.3 Εκτίμηση κινδύνου	56
3.4 Ποιοτική πρόβλεψη της μετακίνησης του νέφους	58
3.5 Προσομοίωση της διασποράς αερίου	59
Κεφάλαιο 4^ο: Νομοθεσία και Κανονισμοί για την ασφάλεια του υδρογόνου	69
4.1 Ορισμοί	69
4.2 Εγκαταστάσεις Υδρογόνου	72
4.3 Σχέση Ποσότητας-Απόστασης	76
4.4 Τροφοδοσία οχημάτων με υδρογόνο	77
Κεφάλαιο 5^ο: Συστήματα διαχείρισης ασφάλειας	88
5.1 Εισαγωγή στα συστήματα διαχείρισης ασφάλειας	88
5.2 Διαχείριση κινδύνου διαδικασιών	91
5.3 Ανθρώπινοι παράγοντες	91
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	93

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Εισαγωγή στη χρήση του υδρογόνου και γνωστά ατυχήματα χρήσης του.

Εάν εξετάσουμε την ιστορία της χρήσης του υδρογόνου, είναι σημαντικό για πληροφόρηση να ανατρέξουμε στην ανακάλυψη στην ανάπτυξη μιας άλλης πηγής ενέργειας, το πετρέλαιο. Ο Edwin Drake διάνοιξε την πρώτη πετρελαιοπηγή το 1859 στην Πενσυλβάνια και χρησιμοποιήθηκε πετρέλαιο εξόρυξης σαν αντικατάσταση των ελαίων από φάλαινες, η μόνη πηγή φωτισμού και χρήσης ενέργειας εκείνη την εποχή. Αυτή η πηγή είναι επικίνδυνη στην εξόρυξή της και εξαντλείται λόγω της βαριάς εξόρυξης που είναι το πρόβλημα στις μέρες μας. Το πετρέλαιο παρουσίασε αρκετά πλεονεκτήματα έναντι του ελαίου φάλαινας και έλυσε πολλά οικολογικά και προβλήματα ασφάλειας αποθεμάτων σε σχέση με την παλιά πηγή. Όμως μετά από ενάμιση αιώνα, το πετρέλαιο δημιούργησε πολλά προβλήματα σχετικά με τη ρύπανση του περιβάλλοντος και την ασφάλεια ενέργειας. Για να επιλυθούν αυτά τα προβλήματα, προσπάθειες γίνονται για την σταδιακή αντικατάσταση όλων των συνηθισμένων ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, μέταλλευμα) με νέες πηγές ενέργειας λόγω της εξάντληση των φυσικών πηγών και τη συνακόλουθη τεράστια αύξηση των αναγκών ενέργειας παγκοσμίως και τις συνεχώς αυξανόμενες τιμές ειδικά μετά από παγκόσμιες κρίσεις.

Το υδρογόνο θεωρείται σαν ένα από τα πιο ελπιδοφόρα καύσιμα για γενικευμένη χρήση στο μέλλον, κυρίως επειδή είναι αποδοτικό ενεργειακά, έχει χαμηλή προσφορά στη ρύπανση, και είναι δυνητικά μια ανανεούμενη πηγή ενέργειας. Το υδρογόνο είναι ευέλικτο και καθαρό και με περιβαλλοντικά οφέλη στο νού, η παραγωγή του υδρογόνου από Α.Π.Ε. όπως βιομάζα, άνεμο, ήλιο και πυρηνικές πηγές είναι υπό μελέτες και διάφορες έρευνες παγκοσμίως.

Οι στρατηγικές περιοχές έρευνας υπό διερεύνηση και επιχορήγηση από ερευνητικούς οργανισμούς παγκοσμίως σε σχέση με το υδρογόνο είναι οι ακόλουθες:

- Καθαρή παραγωγή υδρογόνου από υπάρχουσες και νέες διαδικασίες
- Αποθήκευση, περιλαμβάνοντας υβριδικά συστήματα αποθήκευσης
- Βασικά υλικά, περιλαμβάνοντας αυτά για συσκευές ηλεκτρόλυσης, κελιά καυσίμου και συστήματα αποθήκευσης
- Θέματα ασφάλειας και ρυθμιστικά που απαιτούνται για την προετοιμασία των κανονισμών και των ρυθμίσεων ασφαλείας σε παγκόσμιο επίπεδο.

- Θέματα κοινωνικά περιλαμβάνοντας την ενημέρωση του κοινού και τις προετοιμασίες για την μετάβαση σε μια οικονομία ενέργειας υδρογόνου.

Το υδρογόνο μπορεί να είναι ένας αποτελεσματικός φορέας ενέργειας εάν γίνει οικονομικά ανταγωνιστικό και συνδεθεί με μια δομή που παρέχει ένα ασφαλές και περιβαλλοντικά αποδεκτό ενεργειακό σύστημα μέσω όλης της παραγωγής, διανομής και χρήσης. Το υδρογόνο έχει παραχθεί και χρησιμοποιηθεί για πάνω από έναν αιώνα με ένα υψηλό αρχείο ασφαλείας για εμπορική και βιομηχανική χρήση όπως σε βιομηχανίες διύλισης και χημικές διεργασίες, ώθηση πυραύλων. Η βιομηχανία έχει σημαντική εμπειρία σε διαχείριση ασφαλείας επικίνδυνων υλικών σε χημικές βιομηχανίες, όπου μόνο καλά εκπαιδευμένο προσωπικό έρχεται σε επαφή με το υδρογόνο.

Παρόλα αυτά η ευρεία χρήση του υδρογόνου σαν φορέας ενέργειας θα οδηγήσει στη χρήση του από συνηθισμένους ανθρώπους χωρίς εμπειρία και θα οδηγήσει αναγκαστικά σε διαφοροποίηση των κανονισμών ασφαλείας και τεχνολογίες που αυτή τη στιγμή είναι υπό ανάπτυξη.

Ένας από τα κύρια θέματα που επηρεάζουν την αποδοχή του υδρογόνου για δημόσια χρήση είναι η ασφάλεια των εγκαταστάσεων υδρογόνου (μονάδες παραγωγής και αποθήκευσης), όπως και οι εφαρμογές του (π.χ. σε οχήματα ή για οικιακή χρήση). Οι κίνδυνοι που σχετίζονται με την χρήση του υδρογόνου μπορούν να χαρακτηριστούν σαν φυσιολογικοί (κρυσπάγημα και ασφυξία) φυσικοί (αστοχίες υλικών και ψαθυρότητα) και χημικοί (καύση ή έκρηξη), με τον βασικό κίνδυνο να είναι η δημιουργία ενός εύφλεκτου ή εκρηκτικού μίγματος με τον αέρα.

Όσον αφορά τις ευρωπαϊκές χώρες, οι εγκαταστάσεις επικίνδυνων χημικών είναι υπό την οδηγία SEVESO II (96/82/EC) για τον έλεγχο των κυριότερων κινδύνων ατυχήματος περιλαμβάνοντας επικίνδυνες ουσίες. Το υδρογόνο περιλαμβάνεται σε αυτήν την οδηγία με αυστηρότερη ελάχιστη ποσότητα για την εφαρμογή της οδηγίας από ότι κάθε άλλο συνηθισμένο καύσιμο.

Άρα η γνώση των κινδύνων της χρήσης του υδρογόνου και η αποφυγή σφαλμάτων κατά την εγκατάσταση και χρήση του είναι μια σημαντική παράμετρος επιτυχούς χρήσης του σε μεγάλη κλίμακα στο μέλλον για κάθε ενεργειακή απαίτηση.

Μια ιστορική έρευνα αποκαλύπτει ότι έχουν γίνει αρκετά σοβαρά ατυχήματα σε τομείς βιομηχανικούς και μεταφοράς λόγω της χρήσης υδρογόνου. Οι κύριες αιτίες

για ένα κύριο ατύχημα μπορεί να ταξινομηθεί σε κάποια από τις ακόλουθες κατηγορίες:

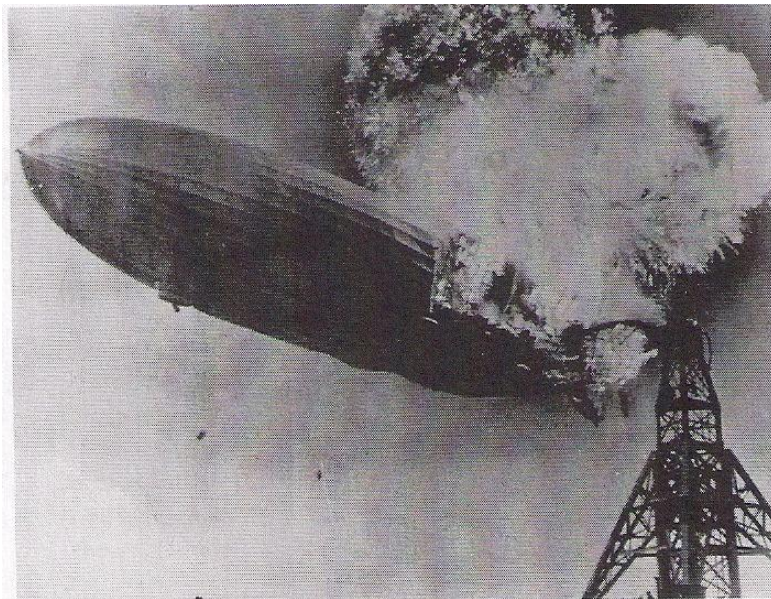
- Μηχανική ή αστοχία υλικού
- Επίδραση διάβρωσης
- Υπερπίεση
- Ανθρώπινο λάθος
- Βρασμός υγρού που εκτονώθηκε με έκρηξη ατμού
- Ενισχυμένη ψαθυρότητα των δεξαμενών αποθήκευσης σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- Ρήξη λόγω της επιπτώσεων από κρουστικά κύματα και ριπές από παρακείμενες εκρήξεις.

Καλά πληροφορημένες πηγές ατυχημάτων, όπως αυτές του Προγράμματος Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Εθνών και του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης, του MHIDAS (Major Hazardous Incident Data Service ή Υπηρεσία δεδομένων κύριων επικίνδυνων συμβάντων) χρησιμοποιούνται για να συλλεγούν και ταξινομηθούν ατυχήματα που συνέβησαν και σχετίζονται με τις εφαρμογές του υδρογόνου. Βέβαια αυτές οι βάσεις δεδομένων συνέχεια ενημερώνονται έτσι ώστε ο κάθε ενδιαφερόμενος να βρίσκει τα στοιχεία που θέλει και να ενημερώνεται για τους πιθανούς κινδύνους χρήσης του υδρογόνου.

Παρακάτω θα αναφερθούν πολύ γνωστά ατυχήματα που σχετίζονται με τη χρήση του υδρογόνου σε διάφορες εφαρμογές.

A) Η καταστροφή του Hindenburg: το μεγαλύτερο αεροσκάφος που μέχρι τότε είχε κατασκευαστεί ήταν το Zeppelin LZ-129 και το αδελφό σκάφος Graf Zeppelin II. Ήταν 245m σε μήκος, 41m σε διάμετρο και περιείχε 211,890m³ σε 16 κελιά και είχε ταχύτητα 135Km/h. Χρησιμοποιούσε το υψηλώς εύφλεκτο υδρογόνο σαν ανωστικό αέριο αντί του άκαυστου ηλίου λόγω του στρατιωτικού εμπάργκο στο Ήλιο από τις ΗΠΑ. Για την πρόληψη οποιασδήποτε πιθανής πυρκαγιάς στο σκάφος από διαρροή υδρογόνου είχαν ληφθεί πολλά μέτρα προστασίας όπως ένα επίστρωμα από ύφασμα που το καθιστούσε ηλεκτρικά αγωγίμο για την αποφυγή σπινθήρων από

στατικό ηλεκτρισμό. Όμως συνέβη έκρηξη σε ταξίδι του στο New Jersey της 6 Μαΐου 1937 και για πολλά χρόνια ερευνήθηκαν οι λόγοι που συνέβη αυτό μιας και δεν είχε συμβεί ποτέ τίποτα στο παρελθόν στις πτήσεις του από χώρα σε χώρα. Από τότε σταμάτησαν τα ταξίδια με αερόπλοια για επιβάτες. Η έναυση του υδρογόνου προχώρησε πολύ γρήγορα και το κατέστρεψε όλο και 36 άνθρωποι σκοτώθηκαν. Τα αίτια του ατυχήματος οφείλονταν στην ευφλεκτότητα του εξωτερικού κελύφους του σκάφους και του χρώματος από το οποίο ήταν βαμμένο και μπορούσαν να καούν μέσω σπινθήρων. Ο καιρός δεν ήταν κατάλληλος και λόγω των φορτίων που υπήρχαν στην ατμόσφαιρα αναπτύχθηκαν ηλεκτρικό δυναμικό που δημιούργησε σπινθήρες και τελικά έναυση φωτιάς και καταστροφή. Έτσι ο κακός σχεδιασμός και η λάθος επιλογή των υλικών ήταν η βασική αιτία αλλά η παρουσία ενός καυσίμου τόσο εύφλεκτου σε μεγάλη ποσότητα οδήγησε στην καταστροφή. Λόγω αυτού στις μέρες μας χρησιμοποιείται ήλιο αντί για υδρογόνο σε αερόπλοια που καθοδηγούνται λόγω άνωσης και έτσι οδηγούμαστε σε πιο ασφαλή συστήματα.



Η καταστροφή του Hindenburg

B) Απελευθέρωση υδρογόνου κατά τη διάρκεια εργασιών συντήρησης: Στις 23 Οκτωβρίου 1989 στην Πασαντένα του Τέξας, μια μεγάλη και καταστροφική έκρηξη νέφους ατμών υδρογόνου συνέβηκε σε μια μονάδα πολυαιθυλενίου δημιουργώντας απώλεια 23 ζώων και 314 τραυματισμούς και εκτεταμένες καταστροφές σε όλη τη μονάδα. Η δύναμη της έκρηξης εκτιμήθηκε σαν ισοδύναμη με 2.4 τόνους από εκρηκτική ύλη TNT. Το ατύχημα συνδέεται με την απελευθέρωση 40,000kg αερίου διαδικασίας που περιείχε αιθυλένιο, ισοβουτάνιο, εξάνιο και υδρογόνο κατά τη

διάρκεια εργασιών συντήρησης σε μια γραμμή ανακυκλοφορίας της αντίδρασης. Η έρευνα έδειξε ότι πλήθος ατελειών στη διεύθυνση της εγκατάστασης που εν συντομία είναι τα παρακάτω:

- Έλλειψη μελέτης εκτίμησης κινδύνων
- Ανεπαρκείς αποστάσεις ασφαλείας μεταξύ του χώρου ελέγχου και του αντιδραστήρα που δεν επέτρεψε ενέργειες κλεισίματος ανάγκης και ασφαλή εκκένωση του προσωπικού κατά τη διάρκεια της αρχικής απελευθέρωσης ατμού.
- Έλλειψη ενός αποτελεσματικού συστήματος αδειών για τον έλεγχο των δραστηριοτήτων επισκευής
- Εσφαλμένος σχεδιασμός των εισόδων αερισμού του κτηρίου, έτσι ώστε στην περίπτωση απελευθέρωσης αερίου από τη μονάδα διαδικασιών, το αέριο που διέφυγε θα μπορούσε να παγιδευτεί σε παρακείμενα κτίρια.

Παρακάτω δείχνονται ενδεικτικές εικόνες από ατύχημα με ρυμουλκούμενο όχημα μεταφοράς υδρογόνου και τα διάφορα τμήματά του μετά το ατύχημα και την έκρηξη:



μπροστινό μέρος

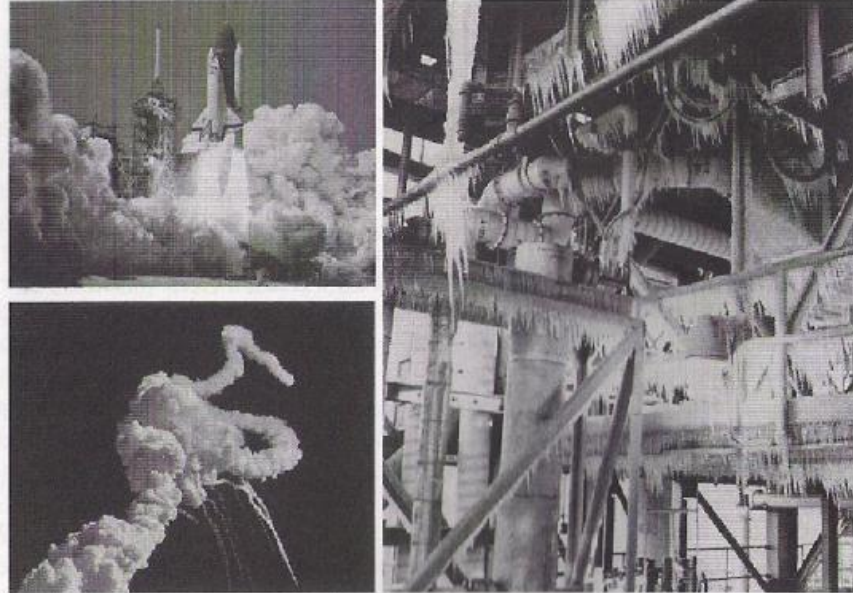


Πίσω μέρος



έξοδος σωλήνα

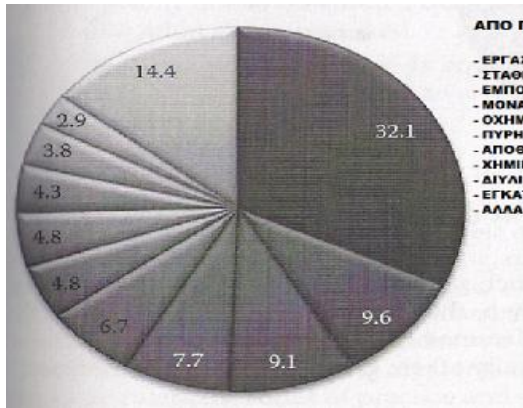
Αμέσως παρακάτω φαίνονται φωτογραφίες από την καταστροφή του διαστημικού λεωφορείου Challenger λόγω αποκόλλησης θερμικού πλακιδίου αλλά συνέπεια της άμεσης καταστροφής του ήταν και η μεταφορά δεξαμενών καυσίμου υδρογόνου σε υγρή και αέρια μορφή.



Από τη μελέτη στατιστικών μελετών και βάσεων δεδομένων προκύπτει:

- Πολλά συμβάντα συμβαίνουν στη σημερινή εποχή σε εργαστήρια λόγω της εντατικής έρευνας στην παραγωγή, αποθήκευση και χρήση του υδρογόνου.
- Τα πιο πολλά συμβάντα συμβαίνουν στο πιο απλό εξοπλισμό, όπως σωληνώσεις, συνδέσεις και βαλβίδες στα οποία κάποιος δεν δίνει την πρέπουσα προσοχή.
- Τα πιο πολλά συμβάντα οδηγούν σε καταστροφή υλικών στοιχείων, μόνο λίγα σε τραυματισμούς πιθανόν λόγω των μικρών ποσοτήτων υδρογόνου που ακόμα χρησιμοποιούνται και των μειωμένων μετρήσεων που λαμβάνονται.
- Η πιο συχνή πιθανή αιτία είναι η αστοχία του εξοπλισμού, ενώ έλλειψη επίγνωσης της κατάστασης και το ανθρώπινο λάθος είναι οι πιο συχνοί παράγοντες που συνεισφέρουν.

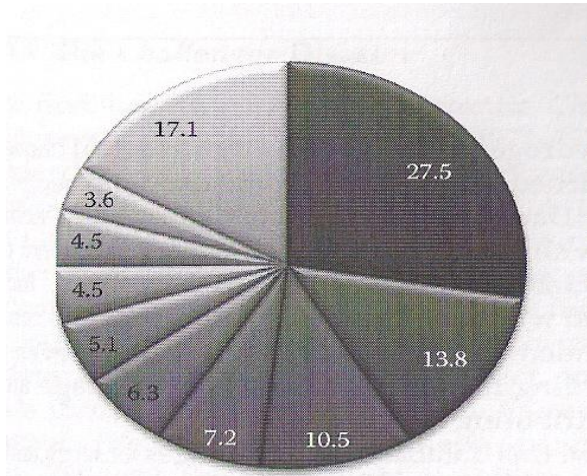
Τα παρακάτω γραφήματα δείχνουν πιο αναλυτικά τα συμπεράσματα αυτών των μελετών.



ΑΠΟ ΠΑΝΩ ΚΑΙ ΔΕΞΙΑ ΣΤΟΝ ΚΥΚΛΟ:

- ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ
- ΣΤΑΘΜΟΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ
- ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ
- ΜΟΝΑΔΑ ΙΣΧΥΟΣ
- ΟΧΗΜΑ ΔΙΑΚΙΝΗΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ/ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΩΛΗΝΩΝ
- ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ/ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ
- ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ/ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΧΡΗΣΗΣ
- ΧΗΜΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ
- ΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΟ
- ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ
- ΆΛΛΑ

Ποσοστά περιστατικών που σχετίζονται με το υδρογόνο σε ποικίλες εφαρμογές.



ΑΠΟ ΠΑΝΩ ΚΑΙ ΔΕΞΙΑ ΣΤΟΝ ΚΥΚΛΟ:

- ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ/ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ/ΒΑΛΒΙΔΕΣ
- ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ
- ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΙ ΟΧΗΜΑΤΩΝ
- ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ
- ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ
- ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΑΝΑΚΟΥΦΙΣΕΩΣ ΠΙΕΣΗΣ
- ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ
- ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ
- ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ
- ΆΛΛΑ

Ποσοστά διαφορετικών τύπων εξοπλισμού που συμμετέχει στα συμβάντα



ΑΠΟ ΠΑΝΩ ΚΑΙ ΔΕΞΙΑ ΣΤΟΝ ΚΥΚΛΟ:

- ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗ ΠΕΡΙΟΥΣΙΑΣ
- ΤΙΠΟΤΑ
- ΜΙΚΡΟΣ ΤΡΑΥΜΑΤΙΣΜΟΣ
- ΤΡΑΥΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΕ ΑΠΩΛΕΙΑ ΧΡΟΝΟΥ
- ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΖΩΗ
- ΚΛΕΙΣΙΜΟ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
- ΚΛΕΙΣΙΜΟ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕΧΡΙ ΤΗΝ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ
- ΆΛΛΑ

Ποσοστά τύπων ζημιάς και τραυματισμών από συμβάντα υδρογόνου.



Ποσοστά πιθανών αιτιών για συμβάντα με υδρογόνο.

Κεφάλαιο 1^ο: Ιδιότητες του Υδρογόνου που σχετίζονται με κινδύνους.

Σε σχέση με τη σχετική περιστροφή του μονού ατόμου οι ακόλουθες μορφές υδρογόνου ορίζονται: ο-H₂ (ορθο-υδρογόνο), ρ-H₂ (παρα-υδρογόνο), ε-H₂ (υδρογόνο ισορροπίας) και η-H₂ (κανονικό υδρογόνο). Το ε-H₂ αντιστοιχεί στη συγκέντρωση ισορροπίας σε προσδιορισμένες θερμοκρασίες. Το η-H₂ είναι μίγμα 75% ο-H₂ και 25% ρ-H₂ σε θερμοδυναμική ισορροπία σε θερμοκρασία δωματίου (293.15K ή 20°C).

1.1 Ιδιότητες αερίου υδρογόνου σχετικές με κινδύνους

Οι ιδιότητες του αερίου υδρογόνου που σχετίζονται με τους κινδύνους αναλύονται σε συντομία παρακάτω:

Ανίχνευση: Σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, το αέριο υδρογόνο είναι άχρωμο, άοσμο, και μη ανιχνεύσιμο σε κάθε συγκέντρωση από τις ανθρώπινες αισθήσεις. Δεν είναι τοξικό αλλά μπορεί να προκαλέσει ασφυξία με την αραιώση του οξυγόνου στον αέρα, με μια περιορισμένη συγκέντρωση οξυγόνου ίση με 19.5% κ.ο., κάτω από την οποία η ατμόσφαιρα θεωρείται ελλειπτική σε οξυγόνο. Επιπλέον, η αδυναμία ανίχνευσης υδρογόνου το καθιστά λανθάνων καύσιμο, έτοιμο να αναφλεγεί σε κάθε στιγμή.

Ογκομετρική διαρροή: Με την προσδοκία της εισαγωγής σε μεγάλη κλίμακα του υδρογόνου σαν φορέας ενέργειας, η ογκομετρική του διαρροή από δοχεία και σωληνώσεις αναμένεται να είναι 1.3-2.8 φορές μεγαλύτερη από τη διαρροή αερίου μεθανίου και περίπου 4 φορές αυτής του αέρα κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Αυτό έρχεται να επιβεβαιώσει τον κανόνα: «αεροστεγής δεν είναι υδρογονοστεγής». Από την άλλη μεριά, κάθε απελευθέρωση υδρογόνου έχει τη δυνατότητα να διασπείρεται τάχιστα με γρήγορη διάχυση, τυρβώδη μεταφορά θερμότητας και άνωση, έτσι θεωρητικά περιορίζει την παρουσία του στην ζώνη κινδύνου.

Άνωση: Από σχετικούς πίνακες ιδιοτήτων αερίων, το αέριο υδρογόνο είναι περίπου 14 φορές ελαφρύτερο από τον αέρα σε κανονικές συνθήκες και σε αυτό οφείλεται ότι κάθε διαρροή γρήγορα κινείται προς τα πάνω, έτσι μειώνονται οι κίνδυνοι ανάφλεξης. Όμως, ο κορεσμένος ατμός είναι βαρύτερος από τον αέρα και θα παραμείνει κοντά στο έδαφος μέχρι να αυξηθεί η θερμοκρασία. Οι ταχύτητες λόγω άνωσης μεταβάλλονται από 1.2 έως και 9m/s σε Κ.Σ. αέρα επειδή εξαρτώνται από τη διαφορά

πυκνοτήτων αέρα και ατμού. Έτσι, οι πυκνοί κρύοι ατμοί του καυσίμου που παράγονται από διαρροές υγροποιημένου υδρογόνου θα παραμείνουν αρχικά κοντά στο πάτωμα και μετά θα ανυψωθούν πιο αργά από τα αέρια καύσιμα σε Κ.Σ. θερμοκρασίας και πίεσης.

Ορατότητα φλόγας: Μια φλόγα υδρογόνου-αέρα-οξυγόνου είναι σχεδόν αόρατη σε φως ημέρας ακτινοβολώντας κυρίως στην περιοχή του υπέρυθρου και του υπεριώδους. Έτσι κάθε ορατότητα της φλόγας υδρογόνου προκαλείται από ακαθαρσίες όπως σαν υγρασία ή σωματίδια στον αέρα. Οι πυρκαγιές υδρογόνου είναι εύκολα ορατές στο σκοτάδι και μεγάλες πυρκαγιές υδρογόνου είναι ανιχνεύσιμες στο φως της ημέρας από “διακυμάνσεις θερμότητας” και τη θερμοκρασία ακτινοβολίας στο δέρμα. Σε μειωμένες πιέσεις μια φλόγα με χρώμα ανοικτό μπλέ ή μώβ μπορεί να είναι ορατή. Μια προφανής επικινδυνότητα λόγω αυτής της ιδιότητας μπορεί να είναι πολλά εγκαύματα σε πρόσωπα που είναι εκτεθειμένα σε φλόγες υδρογόνου λόγω της έναυσης αερίου υδρογόνου από τις διαρροές στις εγκαταστάσεις.

Θερμοκρασία φλόγας: Η θερμοκρασία της φλόγας για 19.6% κ.ο. υδρογόνου στον αέρα έχει μετρηθεί σαν 2318K. Για πιο αναλυτικές πληροφορίες σχετικά με τις θερμοκρασίες και πιέσεις για ανάφλεξη και έκρηξη μίγματος που περιέχει υδρογόνο με διάφορα άλλα συστατικά δίνονται από σχετικούς πίνακες και προκύπτουν από τον κώδικα θερμοδυναμικών στοιχείων και ιδιοτήτων Gordon-McBride.

Ταχύτητα καύσης: Η ταχύτητα καύσης στον αέρα είναι η υποηχητική ταχύτητα στην οποία η φλόγα ενός εύφλεκτου μίγματος καυσίμου-αέρα διαδίδεται. Για το υδρογόνο η ταχύτητα ποικίλλει από 2.65 έως 3.46m/s εξαρτώμενη από πίεση, θερμοκρασία και σύνθεση μίγματος. Αυτή η υψηλή ταχύτητα καύσης, που είναι μια τάξη μεγέθους υψηλότερη από αυτή του μεθανίου (μέγιστη ταχύτητα καύσης στον αέρα σε Κ.Σ. 0.45m/s) δείχνει το υψηλό εκρηκτικό δυναμικό της και τη δυσκολία περιορισμού ή σύλληψης φλογών υδρογόνου και εκρήξεων.

Θερμική ενέργεια ακτινοβολίας από τη φλόγα: Η έκθεση σε φωτιές υδρογόνου μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική ζημιά από θερμική ακτινοβολία, που εξαρτάται πολύ από τη ποσότητα του υδρατμού στην ατμόσφαιρα. Στην πραγματικότητα, η

ατμοσφαιρική υγρασία απορροφά τη θερμική ενέργεια που ακτινοβολείται από μια φωτιά και μπορεί να τη μειώσει σημαντικά. Η ένταση της ακτινοβολίας από τη φλόγα υδρογόνου σε συγκεκριμένη απόσταση εξαρτάται από την ποσότητα του υδρατμού παρόντα στην ατμόσφαιρα και εκφράζεται από την εξίσωση:

$$I = I_0 e^{-0.0046wr},$$

όπου: I_0 = αρχική ένταση (exposure/χρόνο x επιφάνεια)

w = περιεχόμενο υδρατμού (% κ.β.)

r = απόσταση (m).

Δείκτης περιορισμού οξυγόνου: Ο δείκτης περιορισμού οξυγόνου είναι η ελάχιστη συγκέντρωση του οξυγόνου που μπορεί να υποστηρίξει την διάδοση της φλόγας σε ένα μίγμα από ατμούς καυσίμου και αέρα. Για το υδρογόνο, καμία διάδοση φλόγας δεν παρατηρείται σε Κ.Σ., εάν το μίγμα περιέχει λιγότερο από 5% κ.ο. οξυγόνο.

Επίδραση Joule-Thomson: όταν τα αέρια εκτονώνονται μέσω ενός πορώδους βύσματος ή ενός μικρού ανοίγματος ή στομίου από υψηλή σε χαμηλή πίεση, αυτά συνήθως ψύχονται. Όμως, η θερμοκρασία μερικών πραγματικών αερίων αυξάνεται όταν αυτά εκτονώνονται σε θερμοκρασία και πίεση πέρα από τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης που προσδιορίζουν την καμπύλη αντιστροφής τους Joule-Thomson (J-T). Η μέγιστη θερμοκρασία αντιστροφής για το υδρογόνο είναι 202K σε απόλυτη πίεση ίση με μηδέν. Ετσι, σε θερμοκρασίες και πιέσεις μεγαλύτερες από αυτές, η θερμοκρασία του υδρογόνου θα αυξηθεί κατά την εκτόνωση. Λαμβάνοντας υπόψη την ασφάλεια, η αύξηση της θερμοκρασίας σαν αποτέλεσμα της επίδρασης του Joule-Thomson δεν είναι κανονικά επαρκής να εναύσει ένα μίγμα υδρογόνου-αέρα. Π.χ. η θερμοκρασία του υδρογόνου αυξάνεται από 300K σε 346K όταν εκτονώνεται από πίεση 100MPa σε 0.1MPa. Αυτή η αύξηση στη θερμοκρασία δεν είναι επαρκής να εναύσει το υδρογόνο που η θερμοκρασία αυτανάφλεξης του είναι 858K σε 1atm και 620K σε χαμηλές πιέσεις.

1.2 Ιδιότητες υγροποιημένου υδρογόνου σχετικές με κινδύνους

Όλες οι ιδιότητες που σχετίζονται με το αέριο υδρογόνο (GH_2) υπάρχουν επίσης και στο υγροποιημένο υδρογόνο (LH_2) λόγω της εύκολης εξάτμισης. Επιπλέον κίνδυνοι πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν χειριζόμαστε ή αποθηκεύουμε υγρό υδρογόνο λόγω αυτής της ευκολίας εξάτμισης. Οι ιδιότητες του υγροποιημένου υδρογόνου που σχετίζονται με τους κινδύνους αναλύονται σε συντομία παρακάτω:

Χαμηλό σημείο βρασμού: το σημείο βρασμού του υδρογόνου στην πίεση του επιπέδου της θάλασσας είναι 203K. Εάν υγρό υδρογόνο πάει στο δέρμα ή στα μάτια μπορεί να προκαλέσει εγκαύματα από κρυοπαγήματα ή υποθερμία. Εισπνοή ατμού ή ψυχρού αερίου αρχικά θα παράγει αναπνευστική δυσκολία και επιπλέον εισπνοή μπορεί να οδηγήσει σε ασφυξία.

Δημιουργία πάγου: Αεραγωγοί και βαλβίδες σε δοχεία αποθήκευσης και περιβλήματα μπορούν να μπλοκαριστούν από συσσώρευση πάγου που δημιουργείται από υγρασία στο αέρα. Υπερβολική πίεση μπορεί να οδηγήσει μετά σε μηχανική αστοχία (ρήξη δοχείου ή στοιχείων) με απελευθέρωση δέσμης υδρογόνου και πιθανώς μια έκρηξη από εκτονούμενο ατμό λόγω βρασμού υγρού υδρογόνου (BLEVE).

Συνεχής εξάτμιση: η αποθήκευση του υδρογόνου σαν υγρό σε δοχεία συντελεί στην συνεχή εξάτμιση, αλλάζοντας την κατάσταση του σε αέριο υδρογόνο. Για εξισορρόπηση πίεσης, το αέριο υδρογόνο πρέπει να εξαερώνεται σε μια ασφαλή θέση ή να συλλέγεται ασφαλώς προσωρινά. Τα δοχεία αποθήκευσης πρέπει να διατηρούνται υπό θετική πίεση για να προλαμβάνουν τον αέρα να εισέρχεται και να παράγει εύφλεκτα μίγματα. Το υγροποιημένο υδρογόνο πρέπει να απομονώνεται με συμπυκνωμένο αέρα και να στερεοποιηθεί από την ατμόσφαιρα.

Αύξηση πίεσης: το υγροποιημένο υδρογόνο που περιορίζεται, π.χ. σε έναν σωλήνα μεταξύ δύο βαλβίδων, θα θερμανθεί σταδιακά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος οδηγώντας σε μια σημαντική αύξηση της πίεσης. Οι σχεδιασμοί των κανονικών συστημάτων αποθήκευσης συνήθως θεωρούν μια διαρροή θερμότητας ίση με 0.5% ανά ημέρα των υγρών συστατικών. Θεωρώντας το υδρογόνο σαν ιδανικό αέριο, η

πίεση που προκύπτει από τον περιορισμένο όγκο υγροποιημένου υδρογόνου σε μια ατμόσφαιρα ατμοποίησης και θερμαινόμενη στους 294K είναι 85.8MPa. Όμως, η πίεση είναι 172MPa όταν λαμβάνεται υπόψη η συμπίεστικότητα του υδρογόνου.

Υψηλή πυκνότητα ατμού: η υψηλή πυκνότητα του κορεσμένου ατμού οδηγεί άμεσα μετά την απελευθέρωσή του από το δοχείο αποθήκευσης υγροποιημένου υδρογόνου που διαρρέει και κάνει ένα σύννεφο υδρογόνου να κινηθεί οριζόντια ή κάθετα για αρκετό χρόνο. Αυτό έχει δειχθεί πειραματικά από την NASA και έχει προσομοιωθεί αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας προσέγγιση μέσω CFD.

Συσσώρευση ηλεκτρικού φορτίου: επειδή η ηλεκτρική ειδική αντίσταση του υγροποιημένου υδρογόνου είναι περίπου $10^{19}\Omega\text{m-cm}$ σε 25V, το ηλεκτρικό ρεύμα – ικανότητα μεταφοράς είναι μικρή και περισσότερο ή λιγότερο ανεξάρτητη από την επιβαλλόμενη τάση. Έρευνα έδειξε ότι η συσσώρευση ηλεκτρικού φορτίου σε ρέον υγροποιημένο υδρογόνο δεν είναι ανησυχητικό.

Κεφάλαιο 2^ο: Κίνδυνοι από το Υδρογόνο

Οι κίνδυνοι που σχετίζονται με το υδρογόνο μπορεί να είναι φυσιολογικοί (κρουπάγημα και ασφυξία), φυσικοί (αστοχίες υλικού και ψαθυρότητα), χημικοί (καύση ή έκρηξη), ο κύριος κίνδυνος που παράγεται ένα εύφλεκτο ή εκρηκτικό μίγμα με τον αέρα. Ασφάλεια μπορεί να επιτευχθεί όταν μόνο οι σχεδιαστές και το προσωπικό λειτουργίας της εγκατάστασης έχουν επίγνωση όλων των κινδύνων που σχετίζονται με την διαχείριση και χρήση του υδρογόνου. Γενικά, η ανησυχία ασφάλειας του υδρογόνου δεν είναι πολύ διαφορετική από αυτή που θα πρέπει να υπάρχει σε αυτούς που σχετίζονται με τη χρήση βενζίνης ή φυσικού αερίου αλλά σαφώς έχουν αρκετές διαφορές στη στρατηγική και τα μέτρα ασφάλειας.

Γενικά, οι περισσότεροι κίνδυνοι προκύπτουν από το γεγονός ότι το αέριο υδρογόνο είναι άοσμο, άχρωμο και άγευστο, έτσι οι διαρροές δεν ανιχνεύονται από τις ανθρώπινες αισθήσεις. Αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιούνται αισθητήρες υδρογόνου συχνά στη βιομηχανία για να ανιχνεύουν επιτυχώς διαρροές υδρογόνου. Σε σύγκριση, το φυσικό αέριο είναι επίσης άοσμο, άχρωμο και άγευστο αλλά στη βιομηχανία οι μερκαπτάνες συχνά προστίθενται σαν αρώματα για να το κάνουν ανιχνεύσιμο από τους ανθρώπους. Δυστυχώς, όλα τα γνωστά αρώματα μολύνουν τα κελιά καυσίμου (μια εφαρμογή για το υδρογόνο) και δεν είναι όλα αποδεκτά στις εφαρμογές τροφίμων (υδρογόνωση ή φαγώσιμα έλαια).

2.1 Φυσιολογικοί κίνδυνοι

Η βλάβη στους ανθρώπους μπορεί να εκφραστεί σε όρους τραυματισμού ή θανάτου μετά την έκθεση σε φλόγες, ροές θερμότητας με ακτινοβολία, εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες ή ριπές κυμάτων αέρα με δύναμη. Ο κίνδυνος της ασφυξίας υπάρχει εάν το περιεχόμενο οξυγόνο μειωθεί κάτω από το 18% κ.ο. λόγω της συσσώρευσης υδρογόνου στον αέρα. Άμεση επαφή του δέρματος με ψυχρό αέριο ή υγρό υδρογόνο οδηγεί σε μούδιασμα και σε αλλαγή του χρώματος του δέρματος και τελικά σε κρουπάγημα. Ο κίνδυνος είναι μεγαλύτερος από ότι με υγρό άζωτο λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας και της υψηλότερης θερμικής αγωγιμότητας του υδρογόνου. Έτσι, το προσωπικό που είναι παρόν κατά τη διάρκεια διαρροών, πυρκαγιών ή εκρήξεων μιγμάτων υδρογόνου με αέρα μπορεί να υποστεί πολλούς τύπους τραυματισμού.

A) Ασφυξία:

Το υδρογόνο δεν είναι τοξικό και δεν θέτει καμία έντονη ή μακροπρόθεσμους φυσιολογικούς κινδύνους. Η μόνη επίδραση της εισπνοής του αερίου είναι πρόκληση ύπνου και υψηλού τόνου φωνής. Όμως, ασφυξία μπορεί να συμβεί όταν εισερχόμαστε σε περιοχή όπου το υδρογόνο (όπως και κάθε άλλο μη τοξικό αέριο) έχει αντικαταστήσει τον αέρα, μειώνοντας τη συγκέντρωση του οξυγόνου κάτω από το 19.5% κ.ο. Τα στάδια της ασφυξίας βασιζόμενα στη συγκέντρωση του οξυγόνου δείχνονται στον πίνακα 2.1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: Στάδια ασφυξίας λόγω παρουσίας υδρογόνου στον αέρα.

Οξυγόνο στον αέρα (% κ.ο.)	Επιπτώσεις
15-19	Μείωση ικανότητας για εκτέλεση εργασιών και πρώιμα συμπτώματα με καρδιά, πνεύμονες ή προβλήματα κυκλοφοριακά μπορούν να φανούν.
12-15	Βαθύτερες αναπνοές, υψηλότερος σφυγμός, ελλειπτικός προσανατολισμός
10-12	Μικρή κριτική ικανότητα, ελαφρώς μπλε χείλη
8-10	Ναυτία, χάσιμο αισθήσεων, αστοχία σκέψης
6-8	Θάνατος σε 8 λεπτά, 50% θάνατος και 50% επαναφορά με θεραπεία σε 6 λεπτά, 100% επαναφορά με θεραπεία σε 4-5 λεπτά.
4	Κατάσταση κώματος σε 40s, σταμάτημα αναπνοής, θάνατος.

B) Θερμικά εγκαύματα

Τα θερμικά εγκαύματα προκύπτουν από την ακτινοβόλο θερμότητα που εκπέμπεται από φωτιά υδρογόνου και απορροφάτε από το άτομο. Λόγω της απουσίας άνθρακα και της παρουσίας υδρατμού που απορροφά τη θερμότητα που παράχθηκε από την καύση υδρογόνου, μια φωτιά υδρογόνου έχει σημαντικά μικρότερη ακτινοβόλο θερμότητα σε σύγκριση με μια φωτιά υδρογονανθράκων. Η ακτινοβόλος θερμότητα που απορροφάτε είναι άμεσα ανάλογη σε πολλούς παράγοντες, περιλαμβάνοντας το χρόνο έκθεσης, ρυθμό καύσης, θερμότητα καύσης, μέγεθος της φλεγόμενης

επιφάνειας και ατμοσφαιρικές συνθήκες (κυρίως άνεμος και υγρασία). Οι φλόγες του υδρογόνου είναι σχεδόν αόρατες στο φώς της ημέρας και αυτός είναι ο λόγος για σοβαρά θερμικά εγκαύματα που υποφέρουν τα θύματα που πλησιάζουν μια αόρατη δέσμη φωτιάς. Οι φωτιές του υδρογόνου διαρκούν μόνο το 1/5 έως 1/10 του χρόνου των φωτιών υδρογονανθράκων. Έτσι, η ζημιά από τη φωτιά είναι μικρότερης σημασίας λόγω:

- Υψηλού ρυθμού καύσης από ταχεία ανάμιξη και υψηλή ταχύτητα διάδοσης
- Υψηλής ανωστικής ταχύτητας
- Υψηλού ρυθμού δημιουργίας ατμού του υγρού υδρογόνου.

Αν και η μέγιστη θερμοκρασία φλόγας του υδρογόνου δεν είναι πολύ διαφορετική από αυτή άλλων καυσίμων, η θερμική ενέργεια που εκπέμπεται από τη φλόγα είναι μόνο ένα μέρος π.χ. από αυτή της φλόγας του φυσικού αερίου.

Η ποσότητα της ζημιάς που ένα έγκαυμα μπορεί να προκαλέσει εξαρτάται από τη θέση του, το βάθος του και πόση επιφάνεια σώματος αφορά. Τα εγκαύματα ταξινομούνται με βάση το βάθος τους στο σώμα του θύματος. Έτσι έχουμε:

- Πρώτου βαθμού έγκαυμα: είναι επιφανειακό και προκαλεί τοπικό ερεθισμό του δέρματος που χαρακτηρίζεται από πόνο, κοκκινίλα και ήπιο πρήξιμο.
- Δεύτερου βαθμού έγκαυμα: είναι βαθύτερο και με αύξηση σε πόνο, κοκκινίλα του δέρματος και μεγάλο ερεθισμό, και παρουσία φουσκαλών στο δέρμα.
- Τρίτου βαθμού έγκαυμα: είναι ακόμα βαθύτερο, περιλαμβάνοντας όλα τα επίπεδα του δέρματος, και σαν αποτέλεσμα έχει τη καταστροφή της επιφάνειας του δέρματος. Επειδή τα νεύρα και οι αρτηρίες του αίματος καταστρέφονται, τα τρίτου βαθμού εγκαύματα έχουν εμφάνιση λευκή και σκληρή και τείνουν να είναι πολύ οδυνηρά.

Τα εγκαύματα δεν είναι στατικά και ωριμάζουν. Μέσα σε λίγες ώρες ένα 1ου βαθμού έγκαυμα μπορεί να συμπεριλάβει και βαθύτερες δομές σώματος και να γίνει 2ου βαθμού. Ομοίως και τα 2ου βαθμού μπορούν να μεταβληθούν σε 3ου βαθμού.

Γενικά, τα επίπεδα έκθεσης σε ροές θερμικής ακτινοβολίας έχουν τις συνέπειες που φαίνονται στον πίνακα 2.2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2: Κριτήρια ροής θερμικής ακτινοβολίας για ανθρώπους

Ένταση ακτινοβολίας (kW/m ²)	θερμικής	Επιπτώσεις στους ανθρώπους
1.6		Καμία βλάβη για μεγάλες εκθέσεις
4-5		Πόνος σε 20s, 1 ^{ου} βαθμού έγκαυμα σε 30s
9.5		Άμεσες αντιδράσεις του δέρματος, 2 ^{ου} βαθμού έγκαυμα σε 20s
12.5-15		1 ^{ου} βαθμού έγκαυμα σε 10s, 1% θανατηφόρο σε 1min
25		Σημαντικός τραυματισμός σε 10s, 100% θανατηφόρο σε 1min.
35-37.5		1% θανατηφόρο σε 10s.

Είναι ενδιαφέρον ότι τα αποτελέσματα της θερμικής ακτινοβολίας στους ανθρώπους είναι συνάρτηση μαζί και της έντασης θερμικής ροής και της διάρκειας της έκθεσης. Έτσι, είναι γενικά αποδεκτό ότι η βλάβη απο θερμική ακτινοβολία πρέπει να εκφραστεί σε όρους θερμικής δόσης όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$\text{Thermal Dose Unit} = I^{4/3}t \quad (2.1)$$

Όπου: I είναι η ροή θερμικής ακτινοβολίας σε KW/m² και t είναι η διάρκεια έκθεσης σε secs.

Οι θερμικές δόσεις από υπεριώδη ή υπέρυθρη ακτινοβολία που οδηγεί σε 1^{ου}, 2^{ου} και 3^{ου} βαθμού εγκαύματα φαίνονται στον Πίνακα 2.3. Όπως μπορεί κανείς να συμπεράνει από αυτόν τον πίνακα που βασίζεται σε πειράματα χρησιμοποιώντας δέρμα ζώων ή δεδομένα από πυρηνικές ριπές, η υπέρυθρη ακτινοβολία είναι πιο επικίνδυνη από ότι η υπεριώδης.

Βασιζόμενοι σε αυτά τα επίπεδα θερμικών δόσεων, τα επικίνδυνα επίπεδα δόσεων έχουν προσδιοριστεί σαν η δόση που οδηγεί σε 1% θανάτους του πληθυσμού που εκτίθεται.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3: Δεδομένα εγκαυμάτων ακτινοβολίας από υπέρυθρη ή υπεριώδη ακτινοβολία.

Κατώφλι Δόσης (KW/m ²) ^{4/3}		
Βαθμός εγκαύματος	Υπεριώδης	Υπέρυθρη
1 ^{ου} βαθμού	260-440	80-130
2 ^{ου} βαθμού	670-1100	240-730
3 ^{ου} βαθμού	1220-3100	870-2640

Επιπλέον οι τιμές LD50 (lethal dose 50, θανατηφόρος δόση στο 50% του εκτεθειμένου πληθυσμού) έχει προσδιοριστεί μόνο για υπέρυθρη ακτινοβολία αλλά με μεγάλο πεδίο τιμών.

Η βιβλιογραφία προτείνει την τιμή 2000 (KW/m²)^{4/3} να χρησιμοποιείται για εγκαταστάσεις αερίου και εγκαταστάσεις εξωχώριες (offshore).

Γ) Κρυογενικά εγκαύματα

Κρυογενικά εγκαύματα (κρυοπαγήματα) μπορεί να προκύψουν από επαφή με εξαιρετικά κρύα ρευστά ή ψυχρές επιφάνειες δοχείων. Όμως, για να διατηρηθεί το υδρογόνο, όπως και άλλα κρυογενικά ρευστά, εξαιρετικά παγωμένα σήμερα, τα δοχεία με το υγρό υδρογόνο είναι με διπλά τοιχώματα, με περίβλημα κενού, τα υπερμονωμένα δοχεία είναι σχεδιασμένα να παρέχουν υδρογόνο με ασφάλεια σε αέρια μορφή έστω και αν ρήγμα είτε στην εσωτερική ή εξωτερική επιφάνεια ανιχνευθεί. Η συμπαγής κατασκευή και τα απαραίτητα χαρακτηριστικά ασφαλείας δραματικά μειώνουν την πιθανότητα ανθρώπινης επαφής.

Το κρυοπάγημα καταστρέφει τους ιστούς από πάγωμα, λόγω του σχηματισμού κρυστάλλων πάγου μέσα στα κύτταρα, ρηγματώνοντας και καταστρέφοντάς τα με αυτόν τον τρόπο. Ανάλογα με τα θερμικά εγκαύματα, τα κρυοπαγήματα ταξινομούνται με βάση το βάθος τους:

- 1^{ου} βαθμού τραύμα συμβαίνει όταν μόνο η επιφάνεια του δέρματος είναι παγωμένη και ξεκινά το ξύσιμο της περιοχής και ο πόνος. Σταδιακά το δέρμα γίνεται λευκό και η περιοχή γίνεται μουδιασμένη. Γενικά δεν προκαλείται μόνιμη ζημιά αλλά μπορεί να οδηγήσει για μεγάλο χρονικό διάστημα σε ευαισθησία στη ζέστη και στο κρύο.

- 2^{ου} βαθμού τραύμα θα συμβεί όταν η ψύξη συνεχίσει. Σε αυτή την περίπτωση το δέρμα θα γίνει παγωμένο και σκληρό ενώ οι βαθύτεροι ιστοί θα παραμείνουν μαλακοί και κανονικοί. Αυτός ο τύπος του τραύματος δημιουργεί φουσκάλες 1-2 μέρες μετά την ψύξη. Οι φουσκάλες θα γίνουν σκληρές και σταδιακά θα μαυρίσουν. Οι περισσότερες από αυτές τους τραυματισμούς θα επουλωθούν σε 3-4 εβδομάδες αν και η περιοχή προσβολής μπορεί να παραμείνει μόνιμα σε ευαισθησία στη ζέση και στο κρύο.
- 3^{ου} βαθμού και 4^{ου} βαθμού τραύματα συμβαίνουν όταν επιπλέον η ψύξη συνεχίζει οδηγώντας σε βαθύ κρουπάγημα. Η επιφάνεια που έχει πληγεί έχει εμφάνιση βαθύ μώβ ή κόκκινη, με φουσκάλες που είναι συνήθως γεμάτες με αίμα. Αυτός ο τύπος του κρουπάγηματος μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια δακτύλων χεριών και ποδιών.

Δ) Υποθερμία

Η έκθεση σε μεγάλες διαρροές υγροποιημένου υδρογόνου μπορεί να οδηγήσει σε υποθερμία εάν τα απαραίτητα μέτρα δεν ληφθούν. Υποθερμία συμβαίνει όταν η θερμοκρασία του σώματος πέσει κάτω από 35°C και γίνεται απειλητική για τη ζωή κάτω από 32.5°C. Το κύριο αρχικό σημάδι της υποθερμίας είναι η μείωση της διανοητικής κατάστασης που οδηγεί στην αδυναμία λήψης αποφάσεων που μπορεί να οδηγήσει σε επιπλέον εμπλοκές ασφάλειας. Κούραση ή λήθαργος, αλλαγές στην ομιλία και μη ορθός προσανατολισμός είναι επίσης τυπικά συμπτώματα. Οι άνθρωποι που επηρεάζονται από αυτήν δρουν σαν να είναι μεθυσμένοι. Το σώμα σταδιακά κάνει τα προστατευτικά του ανακλαστικά και λειτουργίες των μυών εξαφανίζονται και έτσι το άτομο δεν μπορεί να περπατήσει ή σταθεί. Σταδιακά το άτομο κάνει τη συνείδηση.

Η αναγνώριση της υποθερμίας είναι δύσκολη για άπειρα άτομα επειδή τα συμπτώματα μοιάζουν με άλλες καταστάσεις ιατρικής αλλαγής στο άτομο όπως διαβήτη, εγκεφαλική συμφόρηση, χρήση αλκοόλ και ναρκωτικών. Το πιο σημαντικό θέμα είναι να είμαστε ενήμεροι της πιθανότητας και να είμαστε προετοιμασμένοι να επέμβουμε. Η θεραπεία περιλαμβάνει αργή θέρμανση του σώματος χρησιμοποιώντας κουβέρτες ή άλλους τρόπους αύξησης της θερμοκρασίας του σώματος. Η θερμοκρασία του σώματος θα πρέπει αυξηθεί σε όχι περισσότερους από 2 βαθμούς ανά ώρα.

Ε) Τραυματισμός από υπερπίεση

Τα αποτελέσματα από ριπές κυμάτων σε ανθρώπους μπορεί να είναι άμεσα και έμμεσα. Το κύριο άμεσο αποτέλεσμα είναι η ξαφνική αύξηση της πίεσης που μπορεί να οδηγήσει σε ζημιά στα όργανα που είναι ευαίσθητα στην πίεση όπως τα αυτιά και οι πνεύμονες. Έμμεσα αποτελέσματα προκαλούνται από την επαφή του ανθρώπινου σώματος με αντικείμενα που προκαλούνται από μια έκρηξη, από κατεστραμμένες δομές ή από ένα βίαιο σπρώξιμο του σώματος λόγω της ώθησης που παράγεται από μια έκρηξη και τη σύγκρουση σε μια σκληρή επιφάνεια.

Όπως και στην περίπτωση της θερμικής ακτινοβολίας τα κύματα λόγω υπερπίεσης μπορεί να προκαλέσουν τραυματισμούς ή ακόμα και θάνατο σαν αποτέλεσμα του συνδυασμού υπερπίεσης και διάρκειας επίδρασης.

2.2 Φυσικοί κίνδυνοι

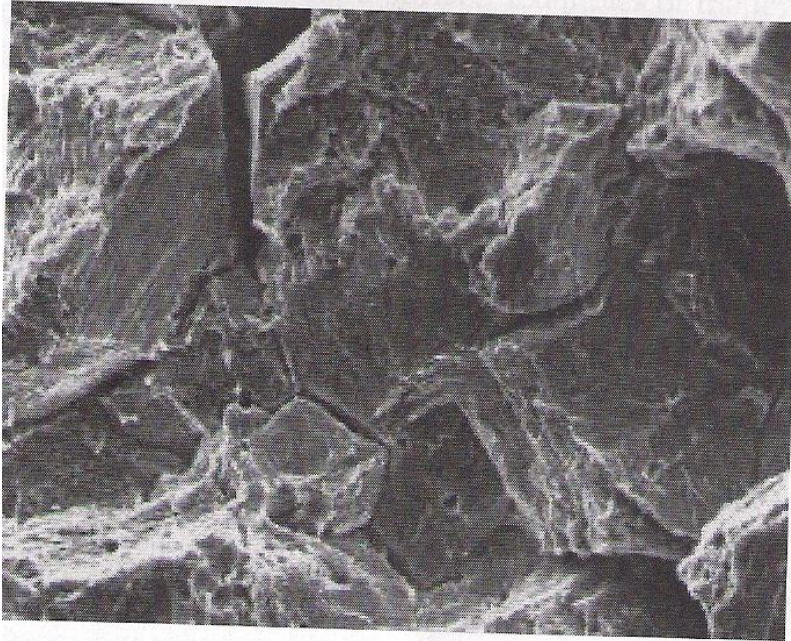
Μεταξύ των πιο σημαντικών φυσικών κινδύνων του υδρογόνου είναι αυτοί που σχετίζονται είτε με το μικρό μοριακό μέγεθος του ή με την αποθήκευσή του σε χαμηλές θερμοκρασίες.

A) Ψαθυρότητα υδρογόνου

Η ψαθυρότητα υδρογόνου είναι η διαδικασία στην οποία ένα μέταλλο γίνεται εύθραυστο (ψαθυρό) και αναπτύσσει μικρές ρωγμές λόγω της έκθεσής του στο υδρογόνο. Είναι αποτέλεσμα πολύ χρόνου και συμβαίνει από παρατεταμένη χρήση του συστήματος υδρογόνου. Ύστερα, οι μηχανικές ιδιότητες των μεταλλικών και μη μεταλλικών υλικών υστερούν και αστοχούν οδηγώντας σε διαρροές που θα δημιουργήσουν επικινδυνότητα στις παρακείμενες περιοχές και επιφάνειες. Η περισσότερη από τη ζημιά προκαλείται από την έναυση του υδρογόνου ακολουθώντας την ρήξη κάποιου υλικού ή κατασκευαστικής δομής. Έτσι, όλες οι επισκευές και οι διαμορφώσεις σε σωληνώσεις και εξοπλισμό που διαχειρίζεται υδρογόνο πρέπει προσεκτικά να κατασκευάζονται και να ελέγχονται με ακρίβεια.

Οι μηχανισμοί της ψαθυρότητας του υδρογόνου δεν είναι ακόμα καλά κατανοητές, αλλά βέβαιοι παράγοντες που είναι γνωστοί και επηρεάζουν το ρυθμό ψαθυρότητας περιλαμβάνουν τη συγκέντρωση υδρογόνου, την πίεση, τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, την καθαρότητα του υδρογόνου, συγκέντρωση και χρόνος έκθεσης

του υδρογόνου, την κατάσταση τάσεων, τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, μικροδομή, συνθήκες επιφανείας και τη φύση του μπροστινού μέρους της ρωγμής του υλικού (εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1: Εικόνα από SEM ρωγμής από ψαθυρότητα υδρογόνου

1) Τύποι ψαθυρότητας

Οι τύποι της ψαθυρότητας περιλαμβάνουν:

- Περιβαλλοντική ψαθυρότητα υδρογόνου, των μετάλλων και των κραμάτων που μπορεί να παραμορφωθούν πλαστικά σε περιβάλλον αέριου υδρογόνου, οδηγώντας σε αύξηση των επιφανειακών ρωγμών, χάσιμο της αγωγιμότητας και μείωση της τάσης θραύσης με ρωγμές να αρχίζουν στην επιφάνεια.
- Εσωτερική ψαθυρότητα υδρογόνου, που προκαλείται από υδρογόνο που έχει απορροφηθεί οδηγώντας σε πρώιμη ψαθυρότητα κάποιων μετάλλων με ρωγμές να ξεκινούν εσωτερικά.
- Ψαθυρότητας αντίδρασης υδρογόνου, που προκαλείται από τη χημική αντίδραση του απορροφημένου υδρογόνου με ένα ή περισσότερα από τα συστατικά του μετάλλου για να δημιουργήσει ένα ψαθυρό υβρίδιο μετάλλου ή μεθάνιο με άνθρακα στο χάλυβα. Αυτό το φαινόμενο ευνοείται από αυξημένες θερμοκρασίες.

2) Αποδυνάμωση μηχανικών ιδιοτήτων

Σημαντική αποδυνάμωση των μηχανικών ιδιοτήτων πολλών μετάλλων και κραμάτων στην παρουσία του υδρογόνου έχουν παρατηρηθεί. Έρευνες έδειξαν:

- Η ευαισθησία μετάλλου (ή κράματος) λόγω της αύξησης του υδρογόνου σε σχέση με την αντοχή του μετάλλου.
- Οι ρυθμοί της εσωτερικής και της περιβαλλοντικής ψαθυρότητας του υδρογόνου είναι μέγιστοι σε θερμοκρασίες των 200 έως 300K (-73 έως 27°C), όπου η αντίδραση ψαθυρότητας του υδρογόνου συμβαίνει σε θερμοκρασίες πάνω από τη θερμοκρασία δωματίου.
- Η ευαισθησία του χάλυβα στην ψαθυρότητα υδρογόνου αυξάνεται με την καθαρότητα του υδρογόνου
- Η ευαισθησία στην ψαθυρότητα γενικά αυξάνεται με την τάση έντασης.
- Η ψαθυρότητα συχνά οδηγεί σε κόπωση του μετάλλου λόγω της ανάπτυξης ρωγμών.

3) Κύριοι παράγοντες ψαθυρότητας υδρογόνου

- **Επιφάνεια και στρώσεις επιφανείας:** Η έκταση της ρωγμής επιφανείας και η μείωση αγωγιμότητας μπορούν να ελαχιστοποιηθούν από την αφαίρεση του στρώματος επιφανείας κατά την διάρκεια του φινιρίσματος μιας μεταλλικής επιφάνειας. Επίσης έχει βρεθεί ότι κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας της μεταλλικής επιφάνειας αναπτύσσονται κάποια οξειδία που περιορίζουν την απορρόφηση του υδρογόνου και ελέγχουν το βαθμό ψαθυρότητας. Συνθετικά φιλμ επιφανείας χρησιμοποιούνται για να μειώσουν την απορρόφηση υδρογόνου και αυτά που συνήθως προτείνονται είναι χαλκού και χρυσού που λειτουργούν σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών κατά τη λειτουργία χρήσης τους.
- **Αποτέλεσμα ηλεκτρικής εκροής κατεργασίας:** Η ψαθυρότητα υδρογόνου μπορεί να αυξηθεί από την ηλεκτρική εκροή κατεργασίας που συχνά χρησιμοποιείται για την δημιουργία οπών, εγκολπώσεων και άλλων κοιλοτήτων σε μέταλλα. Το υδρογόνο παράγεται από τη διάσπαση του διηλεκτρικού ρευστού (συχνά λάδι ή κηροζίνη) που χρησιμοποιείται όταν ιονίζεται από την ηλεκτρική εκροή.
- **Αποτέλεσμα παγίδευσης:** το υδρογόνο μπορεί να παγιδευτεί σε σημεία μέσα στη δομή του μετάλλου περιλαμβάνοντας μετατοπίσεις, όρια κόκκων και

φάσεων, φυσαλίδες αερίου, περιεχόμενο οξυγόνο και άλλα οξειδία κ.α. Η παγίδευση συνήθως παρατηρείται σε χαμηλές θερμοκρασίες και είναι σημαντική σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος όπου η ψαθυρότητα υδρογόνου είναι εμφανής.

4) Ελεγχος ψαθυρότητας υδρογόνου

Γενικά, ο ανοξειδωτος χάλυβας είναι πιο ανθεκτικός στην ψαθυρότητα του υδρογόνου από ότι τους συνήθης χάλυβες και μαζί απλό αλουμίνιο και πολλά κράματα αλουμινίου είναι ακόμα πιο ανθεκτικά από τον ανοξειδωτο χάλυβα εάν το αέριο είναι ξηρό. Επίσης πρέπει όλα τα συστατικά μέρη των συστημάτων καυσίμου υδρογόνου πρέπει να κατασκευαστούν από υλικά που είναι γνωστό ότι είναι συμβατά με το υδρογόνο.

Επιστρώσεις οξειδίων, εξάλειψη των συγκεντρώσεων τάσεων, πρόσθετα στο υδρογόνο, κατάλληλο μέγεθος κόκκων, και προσεκτική επιλογή κράματος είναι μεταξύ των μέτρων για να προληφθεί η ψαθυρότητα. Επιπλέον, τα ακόλουθα μέτρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξαλείψουν αποτελεσματικά τη ψαθυρότητα του υδρογόνου στα μέταλλα:

- Χρήση του αλουμινίου σαν δομικό υλικό λόγω της μικρής του ευαισθησίας στο υδρογόνο
- Σχεδιασμός των εξαρτημάτων κατασκευασμένων από μεσαίας αντοχής χάλυβα (για αέριο υδρογόνο) και ανοξειδωτο χάλυβα (για υγρό υδρογόνο) στη βάση του αυξημένου πάχους, φινιρίσματος επιφάνειας και κατάλληλων τεχνικών συγκόλλησης.
- Κατάλληλος σχεδιασμός των μεταλλικών εξαρτημάτων με σκοπό την μείωση της αντίστασης στην κόπωση.
- Μη χρήση χυτοσίδηρου και υβριδικά κατασκευασμένων μετάλλων και κραμάτων σαν δομικά υλικά για χρήση με υδρογόνο.
- Γενικά, οι θερμοκρασίες έκθεσης κάτω της θερμοκρασίας δωματίου επιβραδύνει την αντίδραση ψαθυρότητας του υδρογόνου.
- Η περιβαλλοντική και εσωτερική ψαθυρότητα του υδρογόνου αυξάνεται στο θερμοκρασιακό πεδίο των 200-300K (-73 έως 27°C).

B) Θερμική σταθερότητα δομικών υλικών

Για λόγους ασφαλείας, η επιλογή των δομικών υλικών βασίζεται αρχικά στις μηχανικές τους ιδιότητες όπως η αντοχή σε εφελκυσμό και κάμψη, αγωγιμότητα και αντοχή κρούσης. Τα υλικά πρέπει να έχουν ελάχιστες τιμές σχεδιασμού αυτών των ιδιοτήτων πάνω από όλο το θερμοκρασιακό πεδίο λαμβάνοντας υπόψη μη λειτουργικές συνθήκες όπως η φωτιά λόγω υδρογόνου. Οι ιδιότητες των υλικών πρέπει να είναι σταθερές χωρίς αλλαγή φάσης στην κρυσταλλική δομή με το χρόνο ή επαναλαμβανόμενους θερμικούς κύκλους.

Οι κύριες θεωρήσεις της συμπεριφοράς του μετάλλου και του κράματος σε συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών είναι οι ακόλουθες:

- Η μετάβαση από την ολκιμότητα στην ψαθυρότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες
- Μορφές πλαστικών παραμορφώσεων που παρουσιάζονται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.
- Αλλαγές σε μηχανικές και ελαστικές ιδιότητες λόγω των μετατροπών φάσεων στην κρυσταλλική δομή σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Ειδικά για την επιλογή του υλικού για χρήση σε υγροποιημένο υδρογόνο, οι κύριες θερμικές ιδιότητες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι η ψαθυρότητα χαμηλής θερμοκρασίας και η θερμική συστολή.

Σε χαμηλές θερμοκρασίες και ειδικά σε κρυογενικές θερμοκρασίες, πολλά υλικά αλλάζουν από όλκιμα σε ψαθυρά. Αυτή η αλλαγή μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία των δεξαμενών αποθήκευσης υδρογόνου ή σωλήνων και να προκληθεί ατύχημα.

Διαφορετικά δομικά υλικά έχουν διαφορετικούς συντελεστές θερμικής συστολής γεγονός που σημαίνει ότι διαφοροποιήσεις πρέπει να γίνουν για τις διαφορετικές διαστάσεις τους σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Εάν όχι, προβλήματα που σχετίζονται με την ασφάλεια (π.χ. διαρροές) μπορεί να προκύψουν. Γενικά, η συστολή των περισσότερων μετάλλων από τη θερμοκρασία δωματίου (300K) σε θερμοκρασία κοντά στη θερμοκρασία υγροποίησης του υδρογόνου (20K) είναι μικρότερη του 1%, όπου η συστολή των πιο κοινών δομικών πλαστικών είναι από 1 στο 2.5%.

2.3 Χημικοί κίνδυνοι

A) Ατυχήματα

Κύρια έμφαση πρέπει να δοθεί στην ανάσχεση, στην ανίχνευση και αερισμό σε μια εγκατάσταση υδρογόνου επειδή η ελάχιστη ενέργεια του αερίου υδρογόνου για έναυση σε αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση είναι 0.02mJ. Οι μελέτες αλλά και η καταγεγραμμένη εμπειρία από εγκαταστάσεις δείχνουν ότι το υδρογόνο που διαρρέει εύκολα μπορεί να καεί.

Για το υδρογόνο (σαν καύσιμο) για να καεί, χρειάζεται να αναμιχθεί με αέρα (οξυγόνο σαν οξειδωτικό) και το μίγμα πρέπει να είναι μέσα στα όρια ευφλεκτότητας. Επιπρόσθετα, και σύμφωνα με το τρίγωνο της φωτιάς, μια πηγή έναυσης με επαρκή ενέργεια πρέπει να είναι παρούσα για να καεί το υδρογόνο. Διαρροές συμβαίνουν για κάθε αέριο και ειδικά για υδρογόνο, που και οι καλύτερες προσπάθειες μπορούν να περιορίσουν.

Μέτρα ασφαλείας περιλαμβάνουν εξάλειψη όλων των πιθανών πηγών έναυσης. Έρευνες βιομηχανικών ατυχημάτων έδειξαν ότι περίπου πάνω από 50% αυτών συνέβησαν λόγω διαρροών και ρήξης δομής εξοπλισμού, το 15% λόγω αποπλύσεων ή αερισμού καπνοδόχων και το υπόλοιπο από άλλους λόγους. Στη βιομηχανία αμμωνίας τα περισσότερα ατυχήματα έγιναν λόγω της διαρροής από βαλβίδες και περιβλήματα σωλήνων. Όταν ατυχήματα δεν γίνονται λόγω αστοχίας εξοπλισμού, αυτά συνήθως γίνονται από διαδικασίες που δεν είναι προδιαγεγραμμένες ή από διαδικασίες που δεν ακολουθούνται. Πηγές έναυσης υπεύθυνες για αυτά τα συμβάντα είναι ηλεκτρικά κυκλώματα και σπινθήρες, στατικά φορτία, συγκολλήσεις, ρήξη μετάλλου, πρόσκρουση αερίου κ.α.

B) Ευφλεκτότητα του υδρογόνου

Τα όρια ευφλεκτότητας των μιγμάτων υδρογόνου με αέρα, οξυγόνο ή άλλους οξειδωτές εξαρτώνται από την ενέργεια έναυσης, τη θερμοκρασία, την πίεση, την παρουσία διαλυμένων ουσιών, το μέγεθος και τη διαμόρφωση του εξοπλισμού, την εγκατάσταση και τις σχετικές συσκευές χρήσης. Τέτοιο μίγμα μπορεί να αραιώνεται είτε με τα συστατικά του μέχρι η συγκέντρωσή του να πέσει κάτω από το χαμηλό όριο ευφλεκτότητας (LFL = Lower flammability limit) ή πάνω από το ανώτερο όριο ευφλεκτότητας (UFL = Upper flammability limit). Τα όρια ευφλεκτότητας για τα μίγματα του υδρογόνου με αέρα ή οξυγόνο μεγαλώνουν για διάδοση φλόγας προς τα πάνω και μειώνονται για διάδοση φλόγας προς τα κάτω.

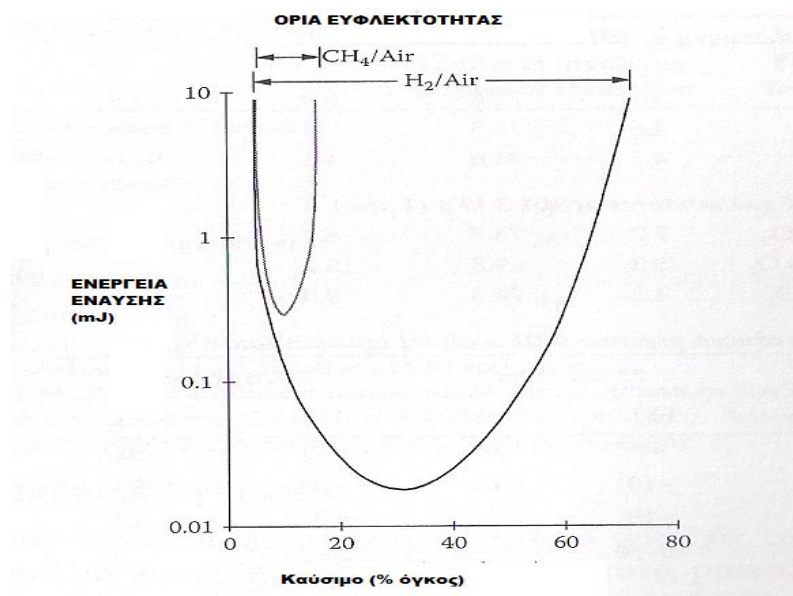
Τα όρια ευφλεκτότητας του υδρογόνου σε ξηρό αέρα για προς τα πάνω διάδοση σε σωλήνες σε πίεση 101.3kPa (1atm) και θερμοκρασία περιβάλλοντος κυμαίνετε από 4.1% κ.ο (LFL) σε 74.8% κ.ο (UFL). Τα όρια ευφλεκτότητας του υδρογόνου σε οξυγόνο για προς τα πάνω διάδοση σε σωλήνες σε πίεση 101.3kPa (1atm) και θερμοκρασία περιβάλλοντος κυμαίνετε από 4.1% κ.ο (LFL) σε 94% κ.ο (UFL). Με μείωση στην πίεση κάτω της 1atm τα όρια ευφλεκτότητας αλλάζουν και μεγαλώνει το LFL και μικραίνει το UFL δηλαδή το πεδίο τους μικραίνει σημαντικά και φτάνει από 4% - 30% το LFL και από 27%-55% το UFL με πιέσεις από 6kPa έως 20kPa.

Μίγματα υδρογόνου-αέρα

Η χαμηλότερη πίεση στην οποία μια πηγή έναυσης χαμηλής ενέργειας ανάβει ένα μίγμα υδρογόνου-αέρα είναι περίπου 6.9kPa (0.07atm) σε συγκέντρωση υδρογόνου μεταξύ 20 και 30% κ.ο.

Τα μίγματα υδρογόνου-αέρα ανάβουν από μια πηγή έναυσης σπινθήρα 45mJ σε 311K (38°C) θερμοκρασία περιβάλλοντος και έχουν LFL ίσο με 4.5% κ.ο. στο πεδίο πιέσεων 0.34-1atm.

Συγκρίνοντας με τα μίγματα μεθανίου-αέρα τα μίγματα υδρογόνου-αέρα είναι πιο επικίνδυνα λόγω λανθασμένης ή ατυχούς έναυσης λόγω των ευρύτερων ορίων ευφλεκτότητας και την τάξη μεγέθους της ελάχιστης ενέργειας έναυσης όπως φαίνεται στην εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2: Ελάχιστη ενέργεια έναυσης μεθανίου –αέρα και υδρογόνου αέρα μιγμάτων σε Κ.Σ. (Πίεση 1atm και θερμοκρασία 298K (25°C)).

Μίγματα υδρογόνου-Οξυγόνου

Τα όρια ευφλεκτότητας για τα μίγματα υδρογόνου-οξυγόνου σε 1atm κυμαίνονται από 4 σε 94% κ.ο. του υδρογόνου για προς τα πάνω διάδοση σε σωλήνες. Μειωμένη πίεση θα αυξήσει το LFL. Η χαμηλότερη πίεση για έναυση είναι 0.56atm σε μια συγκέντρωση υδρογόνου 50% κ.ο. όταν μια υψηλής ενέργειας πηγή έναυσης χρησιμοποιείται.

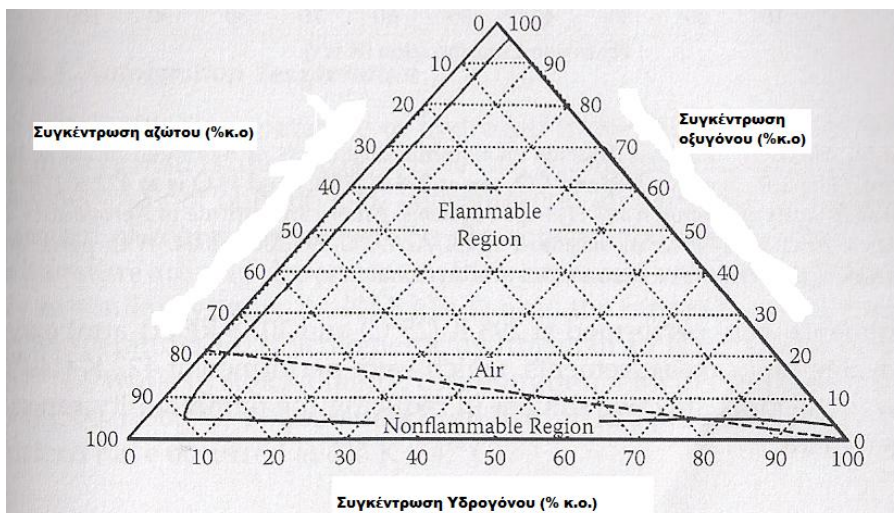
Σε μεγάλες πιέσεις το LFL δεν αλλάζει έως και την τιμή 122atm ενώ σε 15atm το UFL είναι 95.7% κ.ο. του υδρογόνου.

Το LFL μειώνεται από 9.6% σε 9.1% κ.ο. υδρογόνου και το UFL αυξάνεται από 90% σε 94% κ.ο. υδρογόνου όταν η θερμοκρασία αυξηθεί από 288K σε 573K (15 σε 300°C).

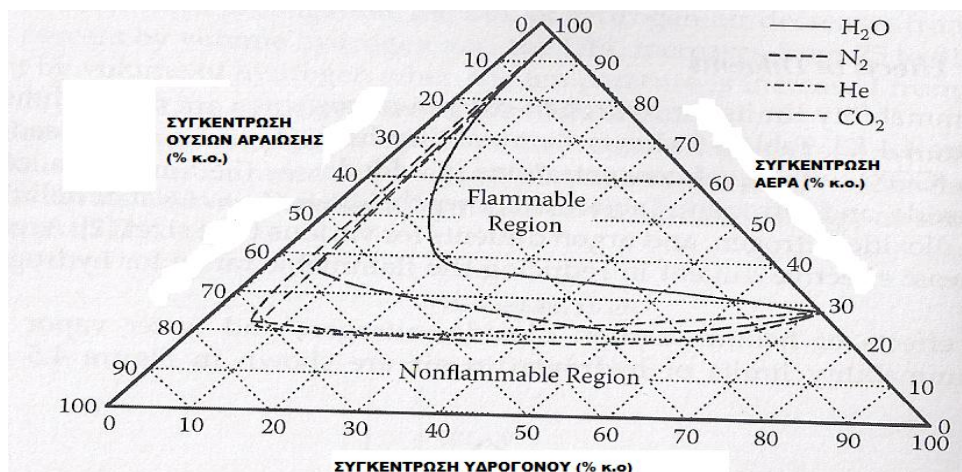
Επιδράσεις των ουσιών αραίωσης

Τα όρια ευφλεκτότητας για μίγματα υδρογόνου-οξυγόνου-αζώτου φαίνονται στην εικόνα 2.3.

Τα αποτελέσματα του ηλίου, του διοξειδίου του άνθρακα και του ατμού νερού στα όρια ευφλεκτότητας του υδρογόνου σε αέρα φαίνονται στην εικόνα 2.4.



Εικόνα 2.3: Όρια ευφλεκτότητας μιγμάτων υδρογόνου-οξυγόνου –αζώτου σε Κ.Σ. (Πίεση 1 atm και θερμοκρασία 298K (25°C)).

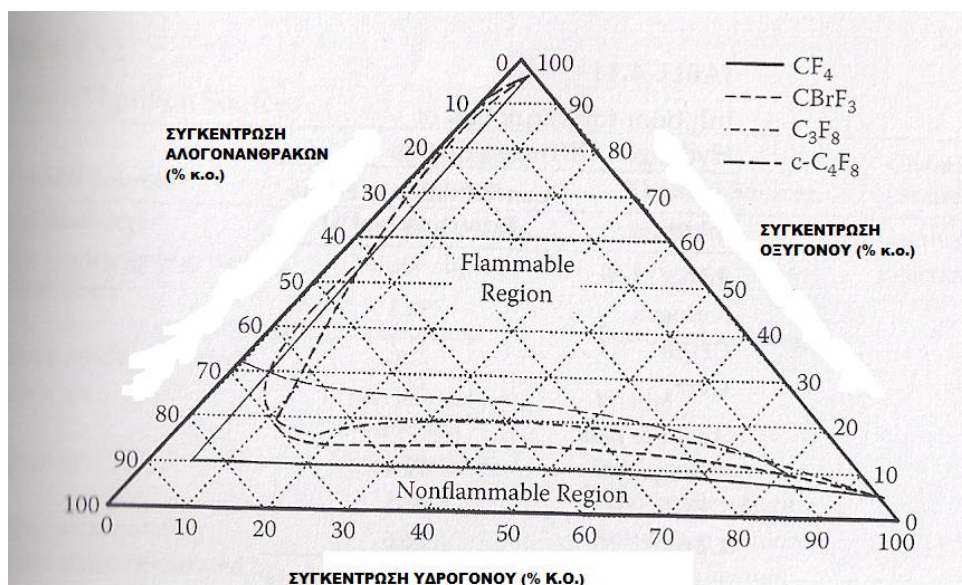


Εικόνα 2.4: Αποτελέσματα των ουσιών αραίωσης στα όρια ευφλεκτότητας του υδρογόνου στον αέρα σε 1 atm και 298K (εκτός νερού στους 422K).

Από ότι προκύπτει από τις εικόνες το νερό είναι το πιο αποτελεσματικό μέσο αραίωσης μειώνοντας τα όρια ευφλεκτότητας του υδρογόνου στον αέρα.

Επίδραση των αναστολέων αλογονανθράκων

Η επίδραση των αναστολέων αλογονανθράκων στα όρια ευφλεκτότητας των μιγμάτων υδρογόνου-οξυγόνου φαίνονται στην εικόνα 2.5.



Εικόνα 2.5: Αποτελέσματα των αλογονανθράκων στα όρια ευφλεκτότητας του υδρογόνου στον αέρα σε 1 atm και 298K.

Η επίδραση των N_2 , CH_3Br και $CBrF_3$ στο σβήσιμο φλογών διάχυσης υδρογόνου σε αέρα φαίνεται στον πίνακα 2.4. Οι αναστολείς αλογονάνθρακες είναι πιο αποτελεσματικοί όταν προστίθενται σε ρεύμα αέρα, το άζωτο ήταν πιο αποτελεσματικό όταν προστέθηκε σε ρεύμα καυσίμου.

Πίνακας 2.4: Αναστολείς για σβήσιμο φλογών διάχυσης υδρογόνου

Αναστολέας	Συγκέντρωση για σβήσιμο φλόγας (% κ.ο.)
Πρόσθεση στον αέρα:	
N_2	94.1
CH_3Br	11.7
$CBrF_3$	17.7
Πρόσθεση στο καύσιμο:	
N_2	52.4
CH_3Br	58.1
$CBrF_3$	56.6

Θερμοκρασία αυτανάφλεξης

Η θερμοκρασία αυτανάφλεξης του υδρογόνου στον αέρα διαφέρει μόνο λίγο από εκείνη στο οξυγόνο. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι οι θερμοκρασίες αυτανάφλεξης και στις δύο περιπτώσεις εξαρτώνται όχι μόνο από τη συγκέντρωση του GH_2 και την πίεση αλλά και την κατεργασία της επιφάνειας των δεξαμενών μεταφοράς επίσης. Έτσι, οι θερμοκρασίες αυτανάφλεξης εξαρτώνται από το σύστημα και οι τιμές θα πρέπει να εφαρμόζονται σε παρόμοια συστήματα. Σε 1atm το πεδίο των παρατηρούμενων θερμοκρασιών αυτανάφλεξης για στοιχειομετρικό υδρογόνο στον αέρα είναι από 773 σε 850K (500-577°C), ενώ σε στοιχειομετρική συγκέντρωση με οξυγόνο είναι από 773 σε 833K (500-560°C). Σε πιέσεις 0.20-0.50atm οι εναύσεις GH_2 -αέρα παρατηρήθηκαν σε θερμοκρασία 620K (347°C).

Πηγές ανάφλεξης

Όλες οι πηγές ανάφλεξης όπως οι ανοικτές φλόγες, ηλεκτρικός εξοπλισμός ή εξοπλισμός θέρμανσης πρέπει να εξαφανίζονται ή ασφαλώς να απομονώνονται σε κτίρια ή ειδικά δωμάτια που να μην περιέχουν συστήματα υδρογόνου. Οι βιομηχανικές λειτουργίες πρέπει να πραγματοποιούνται σαν να υπάρχουν πηγές ανάφλεξης που δεν φαίνονται.

Πιθανές πηγές ανάφλεξης για συστήματα υδρογόνου φαίνονται στον πίνακα 2.5.

Πίνακας 2.5: Πιθανές πηγές ανάφλεξης

Ηλεκτρικές Πηγές	Μηχανικές πηγές	Θερμικές πηγές	Χημικές πηγές
Στατική εκφόρτιση	Μηχανική κρούση	Ανοικτή φλόγα	Καταλύτες
Στατικός ηλεκτρισμός (π.χ. διφασική ροή)	Θραύση	Θερμή επιφάνεια	Αντιδρώντα
Στατικός ηλεκτρισμός (π.χ. ροή σε στερεά σωματίδια να περιλαμβάνονται).	Τριβή	Κάπνισμα προσωπικού	
Ηλεκτρικό τόξο	Μηχανική ταλάντωση	Εξάτμιση από μηχανή καύσης	
Συσσώρευση φορτίου	Αστοχία μετάλλου	Αντήχηση ανάφλεξης	
Ηλεκτρική φόρτιση από λειτουργία εξοπλισμού		Εκρηκτική φόρτιση	
Ηλεκτρικοί σπινθήρες		Θέρμανση δέσμης υψηλής ταχύτητας	
Στατικός ηλεκτρισμός		Κρουστικό κύμα από καταστροφή δεξαμενής	
		Κομμάτι από δεξαμενή που καίγεται.	

Σπινθήρες

Οι ηλεκτρικοί σπινθήρες μπορεί να είναι το αποτέλεσμα των ηλεκτρικών εκφορτίσεων μεταξύ αντικειμένων που έχουν διαφορετικά ηλεκτρικά δυναμικά όπως σπασμένα ηλεκτρικά κυκλώματα ή εκφορτίσεις στατικού ηλεκτρισμού.

Οι σπινθήρες στατικού ηλεκτρισμού μπορούν να αναφλέξουν μίγματα υδρογόνου-αέρα ή υδρογόνου-οξυγόνου. Στατικός ηλεκτρισμός προκαλείται από πολλά κοινά καθημερινά πράγματα όπως μαλλιά ή τρίχωμα που φροντίζεται ή μια ζώνη διαδρόμου μεταφοράς εν λειτουργία. Οι άνθρωποι μπορούν να δημιουργήσουν υψηλού δυναμικού φορτίσεις στατικού ηλεκτρισμού στους εαυτούς τους όταν περπατούν σε συνθετικά χαλιά ή σε στεγνό πάτωμα, κινούνται ενώ φορούν συνθετικά ρούχα, γλιστρούν σε θέσεις αυτοκινήτου ή κινώντας τα μαλλιά τους. Η ροή GH_2 ή LH_2 σε αγωγούς ή η τύρβη σε δεξαμενές μπορεί να δημιουργήσει φορτίσεις στατικού ηλεκτρισμού. Επιπλέον, στατικές φορτίσεις μπορεί να συμβούν κατά τη διάρκεια ηλεκτρικών καταιγίδων.

Σκληρά αντικείμενα που έρχονται σε επαφή το ένα με το άλλο μπορούν να προκαλέσουν σπινθήρες τριβής όπως στην περίπτωση κρούσης μετάλλων, μετάλλου με πέτρα ή πέτρας με πέτρα. Οι σπινθήρες τριβής είναι σωματίδια καιόμενου υλικού, που θερμαίνονται με την μηχανική ενέργεια τριβής και κρούσης και είναι ένα αποτέλεσμα της επαφής. Οι σπινθήρες από εργαλεία χειρός έχουν κανονικά χαμηλή ενέργεια ενώ τα μηχανικά εργαλεία όπως τρυπάνια και πνευματικές συσκευές μπορούν να δημιουργήσουν υψηλής ενέργειας σπινθήρες.

Η ελάχιστη ενέργεια σπινθήρα για ανάφλεξη προσδιορίζεται σαν η ελάχιστη ενέργεια σπινθήρα που απαιτείται να αναφλέξει την πιο εύκολα αναφλέξιμη συγκέντρωση καυσίμου στον αέρα και στο οξυγόνο. Οι ελάχιστες ενέργειες σπινθήρα για υδρογόνο στον αέρα είναι 0.017mJ σε 1atm, 0.09mJ σε 0.05atm και 0.56mJ σε 0.02atm. Η ελάχιστη ενέργεια σπινθήρα που απαιτείται για ανάφλεξη υδρογόνου στον αέρα είναι αρκετά μικρότερη από αυτή για μεθάνιο (0.29mJ) ή βενζίνη (0.24mJ). Όμως, και για τα τρία καύσιμα οι ενέργειες ανάφλεξης είναι πολύ χαμηλές και έτσι η ανάφλεξη σε αέρα είναι μάλλον σίγουρη στην παρουσία κάθε αδύναμης πηγής ανάφλεξης όπως σπινθήρες, σπύρτα, θερμές επιφάνειες, ανοικτές φλόγες ή ακόμα ένας αδύναμος σπινθήρας που προκαλείται από την εκφόρτιση στατικού ηλεκτρισμού από ανθρώπινο σώμα.

Θερμά αντικείμενα και φλόγες

Αντικείμενα σε θερμοκρασίες από 500-580°C μπορούν να αναφλέξουν μίγματα υδρογόνου-αέρα ή υδρογόνου οξυγόνου σε ατμοσφαιρική πίεση. Σημαντικά ψυχρότερα αντικείμενα (σε 370°C) μπορούν να αναφλέξουν επίσης αυτά τα μίγματα μετά από παρατεταμένη επαφή σε μικρότερη από την ατμοσφαιρική πίεση. Ανοικτές φλόγες μπορούν εύκολα να αναφλέξουν μίγματα υδρογόνου-αέρα.

Σε περιπτώσεις όπου οι πηγές ανάφλεξης είναι απαιτούμενο μέρος της χρήσης υδρογόνου, περιορισμοί πρέπει να υπάρχουν για την αντιμετώπιση αναφλέξεων και εκρήξεων. Π.χ. ένας καυστήρας ή μια μηχανή δεν θα πρέπει να λειτουργεί σε περιβάλλον που περιέχει υδρογόνο χωρίς σπρέι νερού καλής διασποράς στην εξάτμιση. Τα σπρέι νερού βέβαια δεν είναι αξιόπιστα σε θέματα αποφυγής εκρήξεων. Το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να χρησιμοποιηθεί με το σπρέι νερού για μείωση των κινδύνων.

Φαινόμενα έκρηξης

Ο γενικός όρος έκρηξη αντιστοιχεί σε μια ταχεία απελευθέρωση ενέργειας και αύξησης πίεσης και μπορεί να συμβεί και σε αντιδρώντα και μη αντιδρώντα συστήματα. Δεξαμενές αερίου υπό πίεση που αστοχούν είναι παραδείγματα μη αντιδρώντων εκρήξεων όπου αέρια πρόμιξης καυσίμου και οξειδωτή επιτρέπουν ταχεία απελευθέρωση ενέργειας από χημικές αντιδράσεις σε αντιδρώντα συστήματα. Γενικά, ο όρος έκρηξη χρησιμοποιείται για κάθε είδος βίαιης αύξησης της πίεσης όπως η ανάφλεξη και η εκτόνωση.

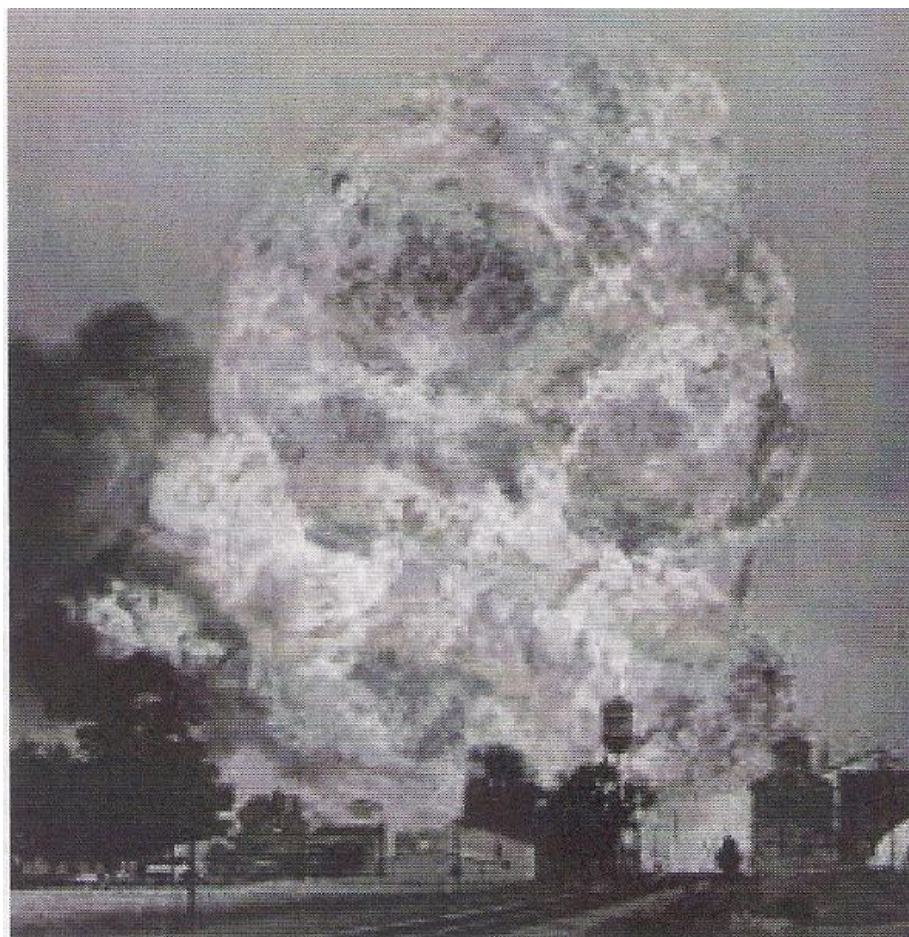
Οι εκρήξεις αερίων δεν απαιτούν απαραίτητα την μεταφορά κύματος μέσω της πηγής έκρηξης, αν και οι εκρήξεις στις περισσότερες περιπτώσεις περιλαμβάνουν κάποιο είδος κύματος.

Η ανάφλεξη είναι το φαινόμενο στο οποίο το μπροστινό κομμάτι της φλόγας κινείται μέσω του εύφλεκτου μίγματος στη μορφή ενός υποηχητικού κύματος σε σχέση με το μέσο που δεν αντιδρά.

Η έκρηξη συμβαίνει όταν το μπροστινό μέρος της φλόγας ενώνεται με ένα κρουστικό κύμα που διαδίδεται μέσω ενός εκρηκτικού μίγματος στη μορφή ενός υπερηχητικού κύματος σε σχέση με το μέσο που δεν αντιδρά. Η θερμική ενέργεια της αντίδρασης συγκρατεί το κρουστικό κύμα και το κρουστικό κύμα συμπιέζει το μη αντιδρών υλικό για να διατηρήσει την αντίδραση. Γενικά, μια έκρηξη διαδίδεται 2 ή 3 τάξεις μεγέθους ταχύτερα από ότι η ανάφλεξη και τα αποτελέσματα σε πιέσεις στο έμπροσθεν μέρος

της έκρηξης είναι 15-20 φορές μεγαλύτερα από ότι η αρχική πίεση. Αυτό το γεγονός δείχνει γιατί μια έκρηξη έχει μεγαλύτερο δυναμικό για πρόκληση τραυματισμού σε προσωπικό ή ζημιά εξοπλισμού από ότι η ανάφλεξη.

Άλλο φαινόμενο έκρηξης που συμβαίνει σε αποθήκευση υδροποιημένου υδρογόνου υπό πίεση είναι το BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion= έκρηξη ατμού εκτονούμενου υγρού βρασμού) που συμβαίνει από την ξαφνική απελευθέρωση μεγάλης μάζας υπό πίεση υγρού στην ατμόσφαιρα. Μια τυπική βασική αιτία είναι μια εξωτερική πρόσκρουση φλόγας στο κέλυφος μιας δεξαμενής πάνω από το επίπεδο του υγρού, έτσι αδυνατεί το κέλυφος και οδηγούμαστε σε ξαφνική ρήξη. Κατόπιν το περιεχόμενο της δεξαμενής απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα και εάν είναι εύφλεκτο αναφλέγεται δημιουργώντας ένα σχεδόν σφαιρικό σύννεφο καύσης που ονομάζεται κοινώς μπάλα φωτιάς (εικόνα 2.6). Κατά τη διάρκεια της φωτιάς η ενέργεια καύσης εκπέμπεται κυρίως στη μορφή της θερμότητας ακτινοβολίας. Ο εσωτερικός πυρήνας του σύννεφου αποτελείται από σχεδόν καθαρό καύσιμο, όπου το εξωτερικό στρώμα που η ανάφλεξη πρώτα εμφανίστηκε είναι μίγμα καυσίμου-αέρα μέσα στα όρια ευφλεκτότητας. Επειδή οι ανωστικές δυνάμεις των θερμών αερίων αρχίζουν να επικρατούν, το φλεγόμενο σύννεφο ανυψώνεται και γίνεται πιο σφαιρικό σε σχήμα.



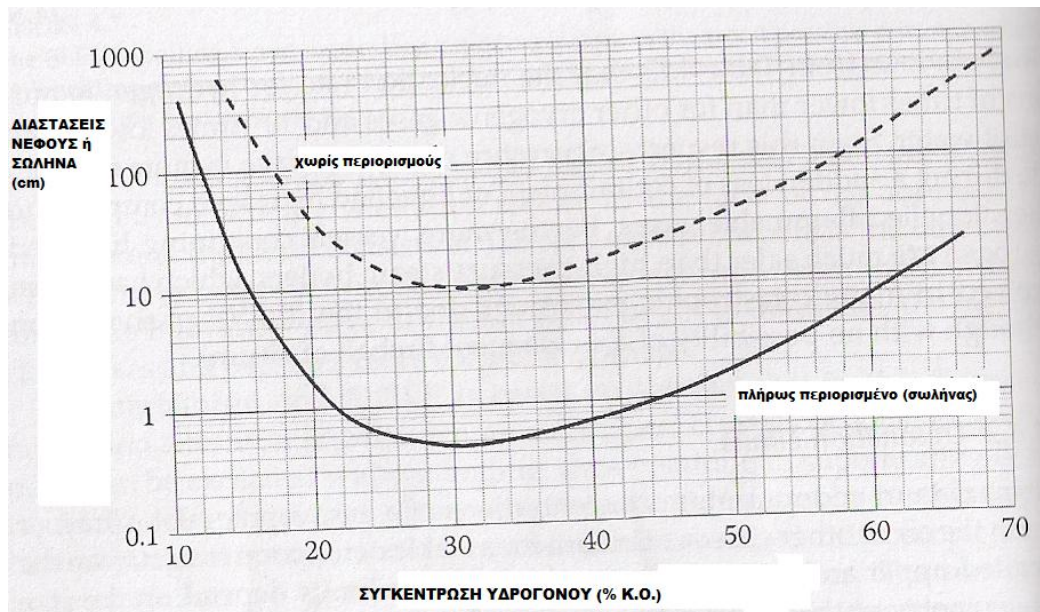
Εικόνα 2.6: Το BLEVE είναι το χειρότερο σενάριο- Μπάλα φωτιάς.

Όρια έκρηξης

Οι μέγιστες και οι ελάχιστες συγκεντρώσεις του αερίου, του ατμού, του σπρέι, της ομίχλης στον αέρα ή σε άλλο αέριο οξειδωτικό για μια σταθερή έκρηξη να συμβεί είναι τα ονομαζόμενα πάνω και κάτω όρια έκρηξης. Αυτά τα όρια εξαρτώνται από το μέγεθος και τη γεωμετρία του περιβάλλοντος χώρου όπως και από άλλους παράγοντες. Έτσι, τα όρια έκρηξης που βρίσκονται στη βιβλιογραφία θα πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή. Πολλές φορές τα όρια έκρηξης συγχέονται με τα όρια ανάφλεξης και πρέπει να δείχνεται ιδιαίτερη προσοχή στην ανάγνωση τιμών από σχετικούς πίνακες στη βιβλιογραφία.

Τα όρια έκρηξης για κάθε μίγμα καυσίμου-οξειδωτή εξαρτώνται μεταξύ άλλων παραγόντων από τη φύση και τις διαστάσεις της εγκατάστασης περιορισμού του μίγματος. Οι ελάχιστες διαστάσεις για έκρηξη μιγμάτων υδρογόνου-αέρα στην 1atm

και σε θερμοκρασία 25° C σε διαφορετικούς βαθμούς περιορισμού δείχνονται στην εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7: Ελάχιστες διαστάσεις των μιγμάτων GH_2 -αέρα για έκρηξη σε Κ.Σ.

Ενέργεια ανάφλεξης

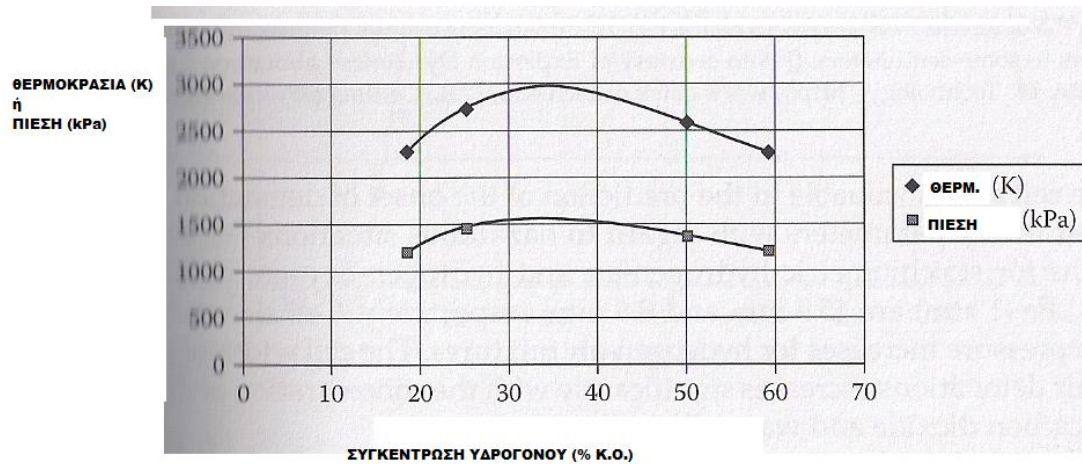
Η ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης για μια συμβεί μια έκρηξη εξαρτάται από τη συγκέντρωση υδρογόνου στο εκρηκτικό μίγμα. Έτσι, η ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης, είναι ισοδύναμη με περίπου 1 gr tetryl (τετρύλη) για μίγματα υδρογόνου-αέρα στη στοιχειομετρική σύνθεση όπου αυτή αυξάνεται σε αρκετές δεκάδες grams tetryl για πολύ πλούσια ή πολύ ισχνά μίγματα (κοντά στα όρια έκρηξης).

Η ενέργεια ανάφλεξης που απαιτείται για σταθερή έκρηξη είναι μεγάλη για πτωχά ή πλούσια μίγματα (δηλ. μακριά από την στοιχειομετρική συγκέντρωση). Αντίθετα, είναι πιθανό να παραχθούν υπερβολικές εκρήξεις από μια μεγάλη ενέργεια ανάφλεξης.

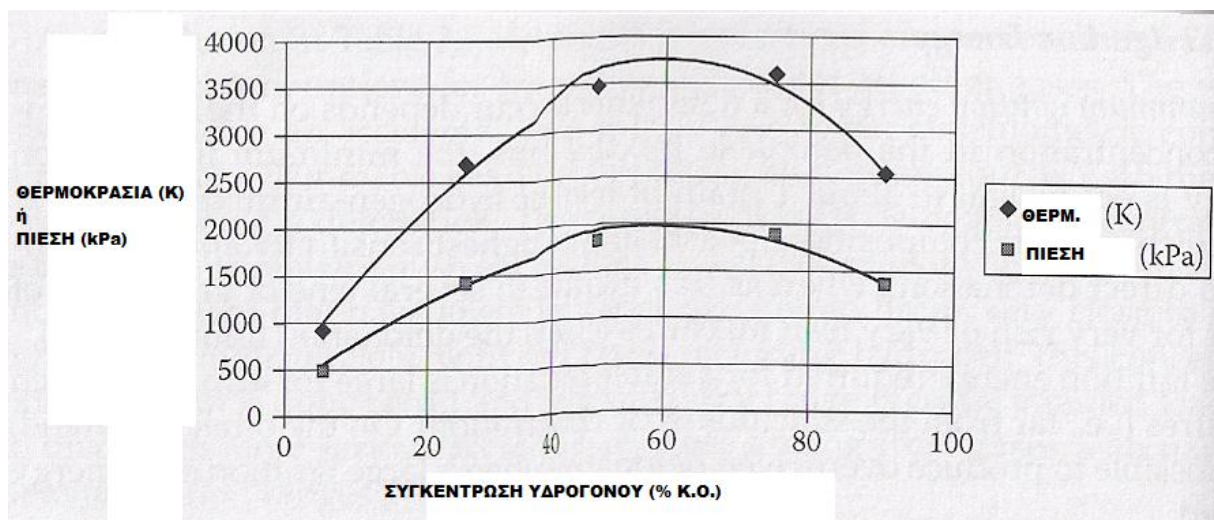
Οι παράμετροι σταθερής έκρηξης όπως η θερμοκρασία έκρηξης και η πίεση μπορούν να υπολογιστούν από τον κώδικα του Gordon McBride μέσω διαφορετικών προσεγγίσεων ανάλογα τον ερευνητή και την εφαρμογή.

Η συνάρτηση της θερμοκρασίας έκρηξης και της πίεσης με τη συγκέντρωση υδρογόνου στα μίγματα υδρογόνου-αέρα και υδρογόνου-οξυγόνου φαίνονται στις εικόνες 2.8 και εικόνα 2.9 αντίστοιχα. Οι μέγιστες τιμές είναι περίπου 3000K και 1600kPa για κοντά στην στοιχειομετρία μιγμάτων υδρογόνου-αέρα, όπου για

στοιχειομετρία μιγμάτων υδρογόνου-οξυγόνου είναι οι αντίστοιχες τιμές 3800K και 2000kPa.



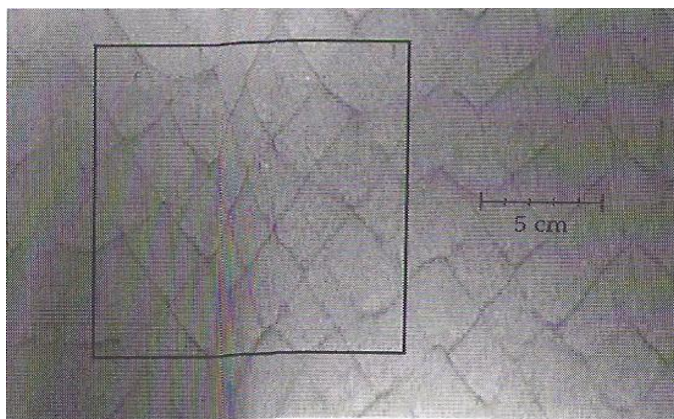
Εικόνα 2.8: Πίεση έκρηξης και θερμοκρασία μιγμάτων υδρογόνου-αέρα σε Κ.Σ.



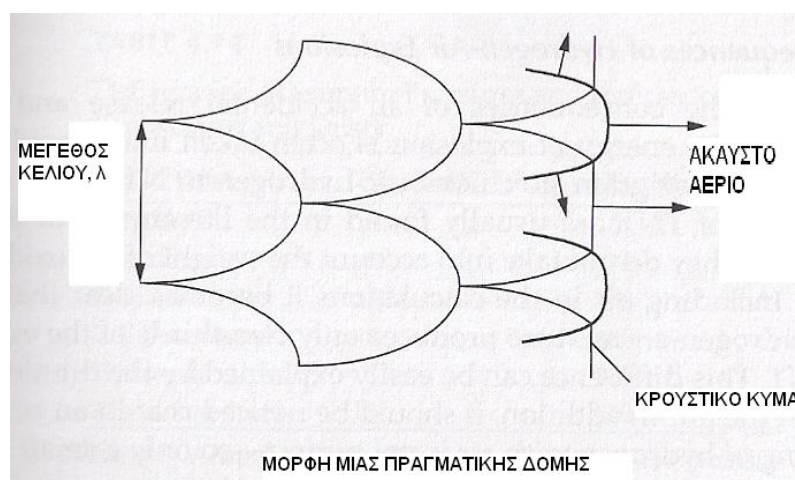
Εικόνα 2.9: Πίεση έκρηξης και θερμοκρασία μιγμάτων υδρογόνου-Οξυγόνου σε Κ.Σ.

Μέγεθος κελιού έκρηξης

Μια χαρακτηριστική παράμετρος που σχετίζεται με την έκρηξη είναι το μέγεθος του κελιού έκρηξης (λ). Το μπροστινό μέρος σε μια έκρηξη δεν είναι επίπεδο αλλά απαρτίζεται από κελιά αντίδρασης όπως επιβεβαιώνεται από τη μορφή που έμεινε μια έκρηξη σε πλάκα με καπνό (εικόνα 2.10). Μια δισδιάστατη αναπαράσταση της πραγματικής δομής φαίνεται στην εικόνα 2.11 σύμφωνα με το μοντέλο ZND (Zelodovich, von Neumann και Doring).



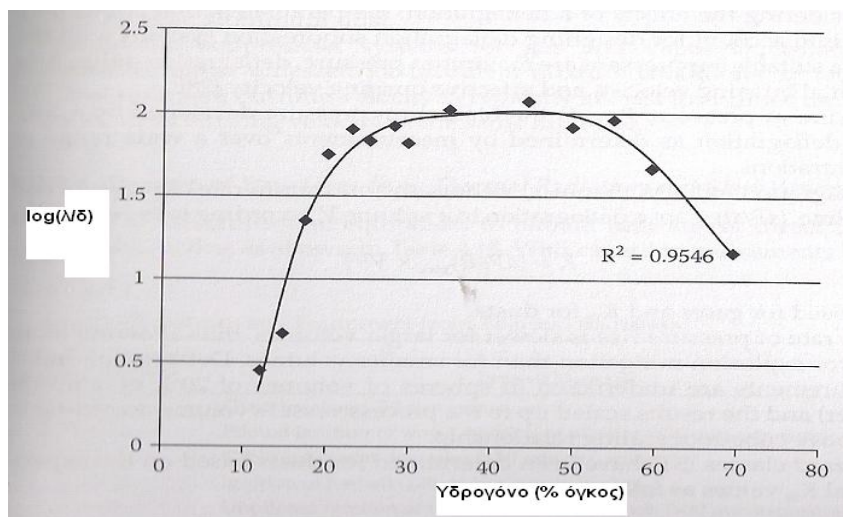
Εικόνα 2.10: Μορφή και διάσταση κελιών αντίδρασης.



Εικόνα 2.11: Δομή ZND και μορφή μιας πραγματικής δομής μετώπου έκρηξης.

Το μέγεθος του κελιού είναι σημαντικό για την πρόβλεψη της προσβολής της έκρηξης και σχετίζεται με παραμέτρους κλειδιά σε σχέση με καταστάσεις κινδύνου. Τα μήκη των κελιών για στοιχειομετρικά μίγματα υδρογόνου-αέρα και υδρογόνου-οξυγόνου σε 1atm είναι 15.9mm και 0.6mm αντίστοιχα. Το μέγεθος του κελιού μειώνεται όταν η πίεση αυξάνεται για τα μίγματα υδρογόνου-αέρα. Το πλάτος του κελιού των εκρήξεων υδρογόνου-αέρα αυξάνεται σημαντικά με την συγκέντρωση συστατικών αραίωσης (π.χ. διοξείδιο του άνθρακα και νερό).

Ο λόγος του μήκους του κελιού έκρηξης (λ) με το πλάτος της ζώνης αντίδρασης (δ) εμφανίζεται να εξαρτάται από τη σύνθεση του μίγματος και τις αρχικές συνθήκες και μεταβάλλεται στο εύρος περίπου των 100 (εικόνα 2.12).



Εικόνα 2.12: Εξάρτηση του λόγου του λ με το πλάτος της ζώνης αντίδρασης δ σε μίγματα υδρογόνου-αέρα στους 300K.

Επιπτώσεις των εκρήξεων υδρογόνου-αέρα

Λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις μιας τυχαίας απελευθέρωσης και συναφούς έκρηξης, η ενέργεια της έκρηξης συχνά λαμβάνεται υπόψη. Υπολογισμοί όπως 1gr στοιχειομετρικού υδρογόνου σε Κ.Σ. αέρα είναι ισοδύναμο με 24grams TNT συχνά βρίσκονται στη βιβλιογραφία αλλά καθοδηγούν λάθος επειδή δεν λαμβάνουν υπόψη το βάρος του οξειδωτή (συνήθως αέρα). Αν ληφθεί υπόψη ο αέρας στους υπολογισμούς είναι ξεκάθαρο ότι η στοιχειομετρική αναλογία μίγματος υδρογόνου-αέρα παράγει μόνο τα 2/3 της ενέργειας έκρηξης του TNT. Αυτή η διαφορά μπορεί εύκολα να εξηγηθεί από την αραίωση που επιφέρει το άζωτο στον αέρα. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι σε μια ξαφνική απελευθέρωση, η ανάμιξη του υδρογόνου με τον αέρα δεν είναι τέλεια και έτσι μόνο ένα μικρό κλάσμα της θεωρητικής ενέργειας θα παραχθεί.

Άλλοι παράγοντες που προσδιορίζουν τα καταστροφικά αποτελέσματα μιας έκρηξης είναι η αρχική πυκνότητα του εκρηκτικού μέσου (όπου είναι 3 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη του TNT από ότι των μιγμάτων υδρογόνου-αέρα) και η ταχύτητα έκρηξης (που είναι 3-5 φορές μεγαλύτερη για το TNT από ότι για το υδρογόνο). Έτσι, το προκύπτον κύμα πίεσης από την έκρηξη υδρογόνου είναι σχετικά πιο επίπεδο (μεγαλύτερη διάρκεια και χαμηλότερη μέγιστη υπερπίεση) από ότι του TNT και τα καταστροφικά αποτελέσματα προκαλούνται κυρίως από ώθηση παρά από υπερπίεση.

Θεωρώντας τα αποτελέσματα της έκρηξης, οι παράμετροι που συνήθως λαμβάνονται υπόψη για το σχεδιασμό συστημάτων κατάπνιξης έκρηξης με τη βοήθεια κατάλληλου υλικού κατάπνιξης είναι η μέγιστη πίεση, ο δείκτης έκρηξης, η βασική ταχύτητα καύσης και η αποτελεσματική ταχύτητα καύσης.

Η μέγιστη πίεση P_{max} , είναι αυτή που αναπτύσσεται από μια περιορισμένη έκρηξη όπως προσδιορίζεται από μετρήσεις πάνω από ένα ευρύ πεδίο συγκεντρώσεων.

Ο δείκτης έκρηξης, $K(\text{bar} \times \text{m/s})$, προσδιορίζει το μέγιστο ρυθμό της αύξησης πίεσης με το χρόνο, $(dP/dt)_{max}$, μιας έκρηξης σε έναν όγκο V , σύμφωνα με την εξίσωση:

$$K = (dP/dt)_{max} \times V^{1/3} \quad (2.2)$$

K_G χρησιμοποιείται σε αέρια και K_{St} για σκόνες.

Ο ρυθμός της αύξησης πίεσης είναι χαμηλότερος για μεγάλους όγκους και έτσι επιτρέπει πιο πολύ χρόνο για μετρίασμό της έκρηξης από ότι σε μικρότερους όγκους.

Οι μετρήσεις του δείκτη έκρηξης λαμβάνονται σε σφαίρες όγκων 20L ή 1m³ και τα αποτελέσματα σχετίζονται με κλίμακα στον όγκο της δεξαμενής σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση.

Οι τάξεις κινδύνου (ST) προσδιορίζονται για σκόνες βασιζόμενοι σε πειραματικές τιμές του K_{St} ως ακολούθως:

ST 0: $K_{St} = 0 \text{ bar} \times \text{m/s}$

ST 1: $K_{St} = 1 \text{ έως } 200 \text{ bar} \times \text{m/s}$

ST 2: $K_{St} = 201 \text{ έως } 300 \text{ bar} \times \text{m/s}$

ST 3: $K_{St} > 300 \text{ bar} \times \text{m/s}$

Όμως ένα παρόμοιο σύστημα ταξινόμησης δεν έχει ακόμα πλήρως αναπτυχθεί για τα αέρια και τους ατμούς και μόνο λίγα αποτελέσματα έχουν παρουσιαστεί για αέρια. Για μια σύγκριση τυπικές τιμές P_{max} και δείκτες έκρηξης δίνονται για αέρια και σκόνες δίνονται στον πίνακα 2.6. Όπως φαίνεται στον πίνακα, το υδρογόνο ταξινομείται σαν το πιο επικίνδυνο συγκρινόμενο με τα άλλα αέρια αλλά είναι πολύ λιγότερο επικίνδυνο από ότι την σκόνη του αλουμινίου.

Τα συστήματα κατάπνιξης της έκρηξης για εκρήξεις αερίων και ατμών είναι σχεδιασμένα για συνθήκες ήρεμης ή τυρβώδους ανάμιξης. Στην πραγματικότητα, η

αποτελεσματική τυρβώδης ταχύτητα καύσης είναι τυπικά τουλάχιστον 4 φορές μεγαλύτερη της τιμής της στρωτής ταχύτητας καύσης του ίδιου μίγματος.

Πίνακας 2.6: Μέγιστες πιέσεις έκρηξης και δείκτες για αέρια και σκόνες

Αέριο ή σκόνη	P_{max} (bar)	K_G ή K_{St} (bar x m/s)
Μεθάνιο	8.4	58
Σκόνες κάρβουνου	8	70
Προπάνιο	8.3	103
Κυτταρίνη	8	140
Υδρογόνο	8.2	503
Σκόνες αλουμινίου	13	1000

Ζημιές σε δομές από θερμική ακτινοβολία και ριπές κυμάτων

Η έκθεση των δομών κατασκευών και εξοπλισμού σε ακτινοβόλο ροή θερμότητας ή σε απευθείας φλόγες μπορεί να είναι καταστροφική όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 2.7.

Πίνακας 2.7: Καταστροφή δομών και εξοπλισμού από θερμική ακτινοβολία

Ενταση θερμικής ακτινοβολίας (kW/m²)	Τύπος ζημιάς
4	Σπάσιμο γυαλιού (30 min έκθεση)
12.5-15	Ανάφλεξη ξύλου με καυστήρα-πιλότο, τήξη πλαστικών (>30 min έκθεση)
18-20	Μόνωση καλωδίων μειώνεται (>30 min έκθεση)
10-20	Ανάφλεξη πετρελαίου (120 ή 40s αντίστοιχα)
25-32	Ανάφλεξη ξύλου χωρίς καυστήρα-πιλότο, παραμόρφωση χάλυβα (>30 min έκθεση)
35-37.5	Καταστροφή εξοπλισμού λειτουργίας και δομικές καταστροφές (περιλαμβ. Δεξαμενές αποθήκευσης) (>30 min έκθεση)
100	Κατασκευή χάλυβα καταρρέει (>30 min έκθεση)

Όμως, επειδή η διάρκεια της έκθεσης που χρειάζεται για τη θερμική ακτινοβολία να είναι αποτελεσματική είναι σχετικά μεγάλη, η επίδραση της θερμικής ακτινοβολίας από υδρογόνο στις δομές και τον εξοπλισμό δεν θεωρείται πολύ σημαντικός αν θεωρηθεί μόνος του αλλά σημαντικός μαζί και με άλλους παράγοντες.

Μερικές ζημιές σε δομές και εξοπλισμό από συμβάντα υπερπίεσης παρουσιάζονται στον πίνακα 2.8.

Πίνακας 2.8: Ζημιές σε δομές και εξοπλισμό από συμβάντα υπερπίεσης

Υπερπίεση (kPa)	Τύπος ζημιάς
1	Κατώφλι για σπάσιμο γυαλιού
15-20	Κατάρρευση μη εμπλουτισμένου μπετόν ή τοίχων από μπλόκ υλικών
20-30	Κατάρρευση χαλύβδινου βιομηχανικού σκελετού δομής.
35-40	Παραμόρφωση και σπάσιμο σωλήνων εγκατάστασης
70	Ολική καταστροφή κτιρίων, βλάβες βαρέων μηχανημάτων
50-100	Παραμόρφωση των κυλινδρικών δεξαμενών αποθήκευσης, αστοχία σωληνώσεων.

Αποστάσεις ασφαλείας από εγκαταστάσεις αποθήκευσης υδρογόνου

Μια απόσταση ασφαλείας μπορεί να προσδιοριστεί σαν η αποδεκτή ελάχιστη απόσταση διαχωρισμού μεταξύ μιας επικίνδυνης πηγής όπως η διαρροή εύφλεκτου αερίου και του αντικειμένου που πρέπει να προστατευτεί (π.χ. άνθρωποι ή/και κτίρια). Αυτή η απόσταση διαχωρισμού είναι συνάρτηση της ποσότητας του υδρογόνου και για αυτό το λόγο συνήθως αναφέρεται σαν σχέση ποσότητας-απόστασης. Οι επιπτώσεις στο αντικείμενο και η απόσταση ασφαλείας εξαρτώνται από τις προσδιορισμένες τιμές κατωφλίου από φυσικά προσδιορισμένα κριτήρια όπως η δόση της θερμικής ακτινοβολίας, η τοξική δόση ή η μέγιστη υπερπίεση του κύματος έκρηξης.

Οι αποστάσεις ασφαλείας για GH_2 και LH_2 ρυθμίζονται βάσει σχετικής διεθνούς νομοθεσίας (π.χ. οργανισμός OSHA, Π.Ο.Υ., οργανισμός UN για την ασφάλεια) για ασφαλή σχεδιασμό και λειτουργία εγκαταστάσεων που υπάρχει υδρογόνο. Σύμφωνα με αυτή τη νομοθεσία, η ασφαλής απόσταση μεταξύ εγκατάστασης υδρογόνου και

ανθρώπων ή παρουσίας προσδιορίζεται περίπου στα 15m για GH_2 σε ποσότητες πάνω από 425Nm^3 . Για κρυογενικές δεξαμενές LH_2 που περιέχουν περισσότερο από 2.3m^3 , η απόσταση ασφαλείας από τα ίδια αντικείμενα είναι τουλάχιστον 23m. Στην Ευρώπη, οι δεξαμενές αποθήκευσης LH_2 καλύπτονται από οδηγίες που έχουν δοθεί από την EIGA (European Industrial Gases Association) που προσδιορίζει τις ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας. Π.χ. η προσδιορισμένη ελάχιστη απόσταση των δεξαμενών αποθήκευσης LH_2 από αναφλέξιμα υγρά ή στερεά, δρόμους, γραμμές τρένων, γραμμές παροχής ενέργειας και τεχνικά κτίρια είναι 10m.

Λανθασμένη δημιουργία υδρογόνου σε πυρηνικούς αντιδραστήρες

Ακολουθώντας πολλά ατυχήματα σε μονάδες πυρηνικής ενέργειας, σημαντικά ποσά υδρογόνου μπορούν να παραχθούν, π.χ. από τη χημική αντίδραση μεταξύ του ζirkονίου και του ζεστού υδρατμού όπως και από επεμβάσεις στον πυρήνα από μπετόν μετά από αποτυχία κατασκευής ή επιδιόρθωση των δεξαμενών. Το υδρογόνο που παράγεται πρέπει να βρει το δρόμο του σε δωμάτια στην κατασκευή του κτιρίου με το δυναμικό να απειλεί την δομική ακεραιότητα της κατασκευής από υπερπίεση από τις αναφλέξεις και πιθανές εκρήξεις. Ακόμα, και τοπική καύση υδρογόνου που δεν είναι απειλή στη συνολική ακεραιότητα της κατασκευής μπορεί να έχει επικίνδυνα αποτελέσματα στη επιβίωση του σχετικού εξοπλισμού ασφαλείας.

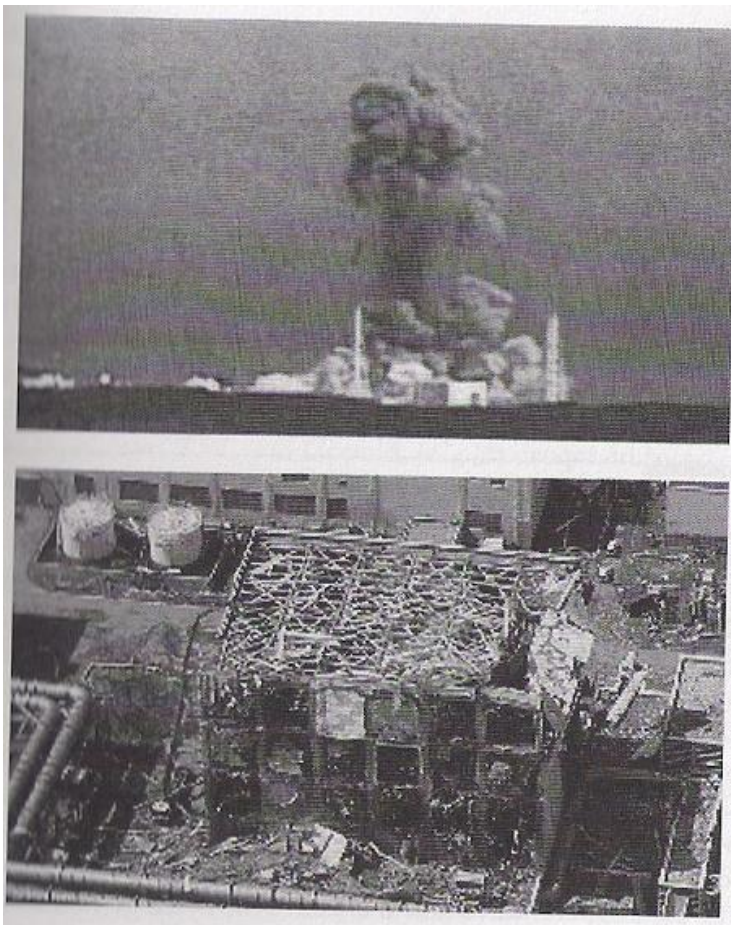
Έτσι, κανονισμοί που αφορούν τον έλεγχο του υδρογόνου βασιζόμενοι σε τοπικές συγκεντρώσεις υδρογόνου έχουν αναπτυχθεί σε χώρες που χρησιμοποιούν πυρηνικούς αντιδραστήρες. Έτσι, εξοπλισμός με μονάδες ελέγχου υδρογόνου όπως αναφλέκτες ή καταλυτικοί διασπαστές χρησιμοποιούνται.

Ο μηχανισμός από τον οποίο το υδρογόνο παράγεται σε μονάδες πυρηνικής ενέργειας είναι ο ακόλουθος. Σε υψηλές θερμοκρασίες, το κράμα ζirkονίου που χρησιμοποιείται σαν μεταλλικό κάλλυμα σε πυρηνικούς αντιδραστήρες μπορεί να αντιδράσει με το νερό και να παράγει υδρογόνο. Αυτή η εξώθερμη αντίδραση ακολουθείται από ανάφλεξη ή έκρηξη του μίγματος του υδρογόνου αέρα που μπορεί να παράγει χημική ενέργεια για να επιταχύνει την πρόοδο ενός ατυχήματος. Η αντίδραση του κράματος ζirkονίου-νερού που γίνεται μια ταχεία αντίδραση σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 1200°C είναι:



Όπου η ΔH_{Zr} είναι η θερμότητα της αντίδρασης ανά mole του κράματος ζιρκονίου που καταναλώθηκε που είναι περίπου 615MJ/Kmol.

Μια αποτελεσματική μέθοδος να μειωθεί η συγκέντρωση του υδρογόνου σε αυτές τις περιπτώσεις είναι η με πρόθεση καύση του υδρογόνου που παράγεται με αναφλέκτες για να αποφευχθούν επιπτώσεις από εκρήξεις υδρογόνου-αέρα (εικόνα 2.13). Συνεχής καύση μπορεί να προλάβει την συσσώρευση υδρογόνου και σε μικρή πίεση στο δωμάτιο συγκέντρωσής του.



Εικόνα 2.13: Εκρηξη υδρογόνου στη πυρηνική μονάδα Fukushima της 14/3/2011 (κατά τη διάρκεια και κατόπιν)

Περιβαλλοντικά προβλήματα

Αν και το υδρογόνο θεωρείται περιβαλλοντικά φιλικό σε σχέση με τους υδρογονάνθρακες σαν καύσιμο μεταφορών, μελέτες έχουν δείξει ότι καθώς περνάμε στην λεγόμενη “Οικονομία του υδρογόνου”, η διαρροή υδρογόνου από την ευρύτατη χρήση του μπορεί να είναι έως και 15%. Αυτό θα οδηγήσει σε άμεσες κινήσεις

μεγάλων ποσοτήτων (εκτιμάται 60-120 χιλιάδες τόνους) από αυτό το πολύ ελαφρύ αέριο στη ζώνη του όζοντος, με αποτέλεσμα το διπλασιασμό ή και τον τριπλασιασμό της εισόδου υδρογόνου στην ατμόσφαιρα από όλες τις φυσικές ή ανθρώπινες πηγές. Σαν αποτέλεσμα θα είναι η δημιουργία επιπλέον νερού που θα ψυχράνει και θαμπώσει τη στρατόσφαιρα, θα οδηγήσει σε λέπτυνση του στρατοσφαιρικού στρώματος όζοντος έως και 10%. Επίσης, ο συνδυασμός υδρογόνου και οξυγόνου για να δημιουργήσουν νερό ίσως να δημιουργήσει αυξημένα νέφη που θα εμφανίζονται στην ανατολή και στη δύση και ίσως να επιταχύνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου με την υπερθέρμανση του πλανήτη σαν αποτέλεσμα. Εάν επιβεβαιωθούν αυτές οι έρευνες τότε η επίδραση αυτή θα μοιάζει με αυτήν των CFCs που καταστρέφουν το στρώμα του όζοντος με τη δημιουργία οπών στους πόλους.

Κεφάλαιο 3^ο: Κίνδυνοι στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης υδρογόνου

3.1 Επιλογές αποθήκευσης

Οι επιλογές αποθήκευσης για το υδρογόνο (περιλαμβάνοντας και αυτές που είναι υπό περαιτέρω έρευνα και εφαρμογή) είναι οι ακόλουθες:

- Συμπιεσμένο αέριο υδρογόνο (GH_2) σε κυλίνδρους ή δεξαμενές
- Σάκκους-μπαλόνια ή δεξαμενές παραμόρφωσης νερού (χαμηλής πίεσης GH_2)
- Υδρογόνο προσροφημένο σε μέταλλο για να δημιουργήσει υδρίτη μετάλλου (MH)
- Υγρό υδρογόνο σε κρυογενικές δεξαμενές
- Προσρόφηση σε πούδρα άνθρακα μεγάλης επιφανείας σε δεξαμενές
- Εγκλωβισμός σε μικρόσφαιρες γυαλιού (υπό έρευνα)
- Προσρόφηση σε νανοσωλήνες άνθρακα (υπό έρευνα)
- Σε νερό
- Σε αμμωνία
- Σε υγρούς υδρογονάνθρακες: βενζίνη, ντίζελ, αλκοόλη, LNG (Liquid natural gas= υγρό φυσικό αέριο), προπάνιο ή βουτάνιο κ.α.
- Σε αέριους υδρογονάνθρακες: συμπιεσμένο φυσικό αέριο (CNG), βιοαέριο κ.α.

Οι τρεις πρώτες επιλογές αποθήκευσης του υδρογόνου είναι οι καλύτερες μέθοδοι και οι πιο συχνά εφαρμοζόμενοι σε κινητές και σταθερές εφαρμογές. Οι 2 τελευταίες επιλογές αποθήκευσης είναι τα ορυκτά καύσιμα που τώρα κατέχουν την συνολική κατανάλωση καυσίμου και παραγωγή.

Το νερό κατέχει πολύ μεγάλη πυκνότητα υδρογόνου και είναι το ρεζερβουάρ αποθήκευσης υδρογόνου και είναι πιθανή η μεγάλη χρήση του στο μέλλον μετά την ανάπτυξη σχετικά φθηνών μεθόδων για διαχωρισμό υδρογόνου από το νερό.

Αποθήκευση σαν υγρό υδρογόνο

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου υγρό υδρογόνο είναι χρηστικό π.χ. όταν υψηλή καθαρότητα απαιτείται. Μειονεκτήματα είναι η σταθεροποίηση της θερμοκρασίας για αποφυγή υπερπίεσης, οι απώλειες εναλλαγής θερμότητας και κυρίως η ενεργειακή απαίτηση της υγροποίησης. Τεχνολογία αποθήκευσης LH_2 είναι εμπορικά διαθέσιμη σε δοχεία-δεξαμενές με μεγέθη από 0.1 έως χιλιάδες κυβικά μέτρα. Η κύρια ανησυχία

στο σχεδιασμό δεξαμενών LH_2 είναι η κατασκευή ενός αποτελεσματικά μονωμένου δοχείου. Αυτό συνήθως επιτυγχάνεται με την κατασκευή περιβλήματος με κενό, και δεξαμενές με διπλά τοιχώματα. Το προτιμώμενο σχήμα είναι σφαιρικό λόγω του ελάχιστου λόγου επιφάνειας σε όγκο και της πιο ομοιόμορφης κατανομής τάσεων και εντάσεων.

Ειδική προσοχή πρέπει να δοθεί στην πολυστρωματική κατασκευή της μόνωσης που θα πρέπει να αποτελείται από 60-100 ανακλώντα ελάσματα που είναι τοποθετημένα στο εξωτερικό μέρος του μέσα δοχείου με διαχωριστές σε κάθε στρώμα που ενεργούν σαν θερμικά εμπόδια και συνολικό πάχος τουλάχιστον 20mm για δεξαμενές μεγέθους μέχρι 300m^3 .

Ο όγκος κενού μεταξύ των δύο τοίχων της δεξαμενής πρέπει να γεμίσει με ανακλαστική σκόνη περλίτη ή κοίλες μικρόσφαιρες γυαλιού που σημαντικά μειώνουν την απώλεια θερμότητας και επιτρέπουν λιγότερη απαίτηση κενού από ότι συνήθως απαιτείται (1.3 Pa). Για λόγους ασφαλείας φροντίδα πρέπει να δοθεί για τη δυνατότητα μετακίνησης των σωματιδίων μόνωσης κατά την συστολή του μέσα δοχείου που οδηγεί σε διαστολή λόγω επανεκτόνωσης που μπορεί να διασπάσει τις υποστηρικτικές κατασκευές. Κατάλληλα υλικά για κατασκευή κρυογενικών δεξαμενών είναι ανθρακούχος χάλυβας για το εξωτερικό μέρος και ανοξειδωτος χάλυβας ή αλουμίνιο για το εσωτερικό μέρος της δεξαμενής. Οι σωληνώσεις γενικά κατασκευάζονται από ανοξειδωτο χάλυβα.

Εκτός των ανακλαστικών υλικών, υγρό άζωτο συχνά χρησιμοποιείται για λόγους ασφαλείας σε μεγάλες δεξαμενές υγρού υδρογόνου για να γεμίσει τα κενά που δημιουργούνται από ένα επιπλέον τοίχωμα. Μέχρι τώρα, η NASA έχει κατασκευάσει τις μεγαλύτερες δεξαμενές υγρού υδρογόνου με χωρητικότητα $3,800\text{m}^3$ η καθεμιά.

Τα υλικά είναι ωστενικός ανοξειδωτος χάλυβας για το έσω τοίχωμα και ανθρακούχος χάλυβας για το εξωτερικό τοίχωμα και η πίεση λειτουργίας είναι 620kPa.

Αποθήκευση σε πορώδη μέσα

Η αυξημένη ασφάλεια συνοδεύει την αποθήκευση του υδρογόνου σε πορώδη μέσα, λόγω της χαμηλότερης πίεσης αποθήκευσης και της ευελιξίας σχεδιασμού αλλά αυτή η τεχνολογία δεν είναι έτοιμη να χρησιμοποιηθεί ακόμα. Αντιστροφή ρόφησης σε πορώδη μέσα μπορεί να είναι φυσική ρόφηση (δυνάμεις van der Waals) ή χημική ρόφηση (σαν σε υδρίτες μετάλλου). Τα υλικά που δοκιμάζονται σαν απορροφητικά είναι:

- Υλικά βασισμένα στον άνθρακα: νανοσωλήνες, νανοίνες, ενεργά καρβίδια, ενεργές ίνες, πούδρες, ενισχυμένα καρβίδια και κράματα νιτριδίων.
- Οργανικές ύλες, πολυμερή, ζεόλιθοι, σιλικόνες με αέρα, πορώδεις σιλικόνες.

Συγκρίνοντας τους πολλούς τύπους υλικών αποθήκευσης σε υλικά βασισμένα στον άνθρακα, οι νανοσωλήνες εμφανίζονται να έχουν υψηλότερη αποθηκευτική ικανότητα από ότι οι ενεργοποιημένοι άνθρακες. Βέβαια πρέπει να σημειωθεί ότι ερευνητικά δεδομένα για νανοσωλήνες είναι συχνά αμφισβητούμενα λόγω της πιθανότητας των αβεβαιοτήτων στο υλικό που χρησιμοποιείται.

Η αποθήκευση σε άλλα μη καρβονικά υλικά περιλαμβάνει:

- Αυτοδημιουργούμενα νανασύνθετα υλικά/αεροζόλ: αυτά είναι νανοδομημένα ανοικτού κελιού αφροί με πολύ χαμηλές πυκνότητες, φθηνά και ασφαλή να χρησιμοποιηθούν σε αποθήκευση υδρογόνου με φυσική ρόφηση.
- Ζεόλιθοι: αυτά είναι κρυσταλλικά μη πορώδη υλικά διαθέσιμα σε χαμηλό κόστος, περιβαλλοντικά φιλικά και ασφαλή στη χρήση τους.
- Μεταλλικά οργανικά υλικά: αυτά είναι υλικά ζεολιθικού τύπου με ειδικά ρυθμισμένες ιδιότητες και υψηλό δυναμικό για μελλοντική χρήση σε μεγάλη κλίμακα.
- Άλλα υλικά όπως μικρόσφαιρες γυαλιού, μορφές υδριτών, άμορφα υλικά υδρογονωμένο άμορφο άνθρακα, υβρίδια, δομές μεταλλικές-οργανικές κ.α.

3.2 Διάκριση κινδύνου

Σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, το υδρογόνο είναι άχρωμο, άοσμο αέριο και πολύ ελαφρύτερο από το αέρα. Η μικρή του πυκνότητα σε συνάρτηση με το μικρό μέγεθος των σωματιδίων του επιτρέπει την διείσδυση των μορίων του υδρογόνου σε μερικά μέταλλα και κράματα όπως στον χυτοσίδηρο και υψηλώς ανθρακούχο χάλυβα. Η διείσδυση μπορεί να οδηγήσει σε μικρές διαρροές υδρογόνου ή στην παρουσία ρωγμών μέσα στα τοιχώματα, συμβάλλοντας στη διάδοση της ρωγμής, στη μείωση της αντοχής του υλικού και στη μετέπειτα αστοχία του.

Το υδρογόνο δρά βίαια με τους οξειδωτές όπως το νιτρικό οξύ, τα αλογόνα (ειδικά με φθόριο και χλώριο) και ακόρεστους υδρογονάνθρακες (π.χ. ασετυλίνη) με εξωθερμικές αντιδράσεις. Το αέριο υδρογόνο δημιουργεί αναφλέξιμα ή εκρηκτικά

μίγματα με ατμοσφαιρικό οξυγόνο πάνω από ένα ευρύ πεδίο συγκεντρώσεων στον αέρα στο πεδίο 4-75% κ.ο. και 18-59% κ.ο. αντίστοιχα. Επειδή το υδρογόνο έχει μεγαλύτερα όρια ευφλεκτότητας και εκρηκτικότητας σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο καύσιμο, δεν θα πρέπει να αποθηκεύεται εκτός εάν είναι κάτω από το LFL. Ετσι, τα πρότυπα της βιομηχανίας για ασφάλεια αποθήκευσης έχουν τεθεί κάτω από 0.25 του LFL κάτι το οποίο είναι λιγότερο από 1% οξυγόνο με το υδρογόνο.

Οι πυρκαγιές δέσμης δεν είναι οπτικά ανιχνεύσιμες λόγω της αορατότητας των φλογών υδρογόνου ειδικά στο φως της ημέρας, έτσι η φωτιά υδρογόνου είναι πολύ δύσκολο να διακριθεί και αυτό έχει οδηγήσει σε καθυστερημένες κινήσεις και σοβαρούς τραυματισμούς απρόσεκτων ανθρώπων που πλησιάζουν το σημείο.

Το υδρογόνο δεν είναι τοξικό, όμως παράλληλα με τους κινδύνους των αναφλέξεων και της έκρηξης του νέφους αερίου στο γεγονός μιας λανθασμένης απελευθέρωσης του, το υδρογόνο μπορεί να δράσει σαν μέσο ασφυξίας σε υψηλές συγκεντρώσεις με την δέσμευση του οξυγόνου που είναι διαθέσιμο στον αέρα.

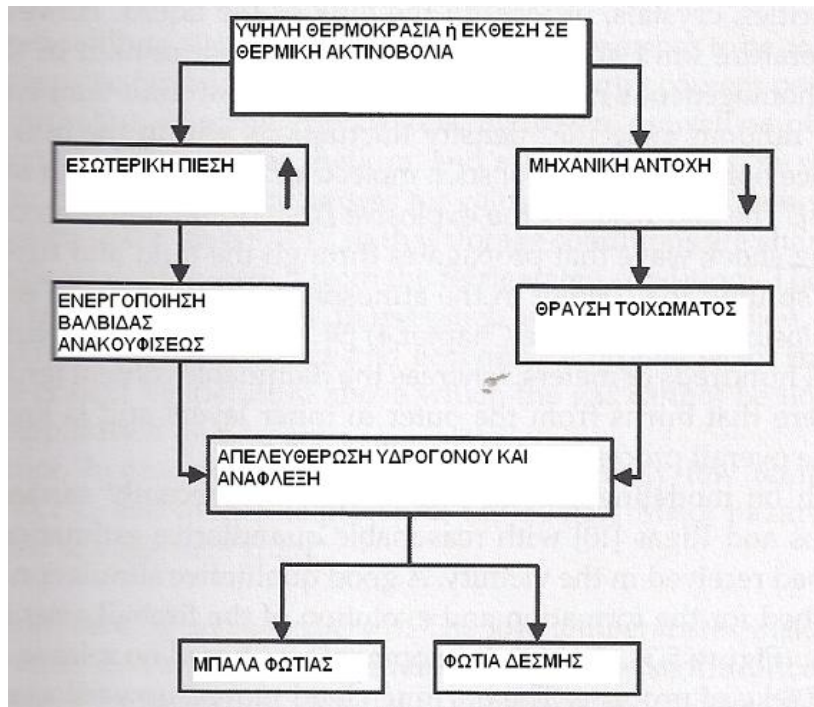
Ψυχρές συνθήκες αποθήκευσης

Το υδρογόνο αποθηκεύεται σε κανονική θερμοκρασία είτε σε αέρια φάση κάτω από μέτρια (4-9 bar) ή υψηλή πίεση (140-400 bar) ή σε υγρή φάση κάτω από χαμηλή θερμοκρασία και μέτρια πίεση. Όταν αποθηκεύεται σε μέτρια πίεση, το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σε χαμηλώς ανθρακούχο χάλυβα ή άλλα υλικά που δεν επηρεάζονται από την ψαθυρότητα του υδρογόνου. Οι δεξαμενές από υψηλώς ανθρακούχο χάλυβα δεν είναι κατάλληλες για αποθήκευση υδρογόνου υπό υψηλή πίεση. Για πρόληψη ψαθυρότητας της δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου, θα πρέπει να αποφεύγεται η χρήση χαλύβων που έχουν σημεία οξυγονοκόλλησης και σκληρότητας σύμφωνα με τον αριθμό σκληρότητας Vickers πάνω από 260. Οι μη μεταλλικές δεξαμενές αποφεύγουν την ανησυχία για την ψαθυρότητα του υδρογόνου και μειώνουν την πιθανότητα να συμβεί.

Οι μεσαίας πίεσης δεξαμενές αποθήκευσης GH_2 έχουν συνήθως μικρότερο μέγεθος και μεγαλύτερο βάρος για δοσμένη ικανότητα αποθήκευσης, σε σχέση με τις δεξαμενές χαμηλής πίεσης.

Οι δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου πρέπει να ελέγχονται υδροστατικά σε τουλάχιστον διπλάσια πίεση λειτουργίας, να είναι εφοδιασμένες με μια ανακουφιστική βαλβίδα πίεσης και πάντα να εγκαθίστανται σε εξωτερικά σημεία για λόγους

ασφαλείας. Επιπλέον, οι εσωτερικές και εξωτερικές γραμμές πρέπει να είναι εφοδιασμένες με ανιχνευτές πυρκαγιάς και συστήματα τοπικού εγκλωβισμού της. Σε κάθε περίπτωση υπάρχει ένα σημαντικό δυναμικό κινδύνου μηχανική έκρηξη των δεξαμενών υδρογόνου όταν εκτίθενται σε υψηλή θερμοκρασία ή θερμική ακτινοβολία. Συνήθως, η αιτία της υπερθέρμανσης είναι μια γειτονική πυρκαγιά (κύριο γεγονός) που προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας στο κέλυφος του δοχείου και στο περιεχόμενο (εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1: Αποτέλεσμα θερμικής ακτινοβολίας σε δεξαμενές υδρογόνου υπό πίεση.

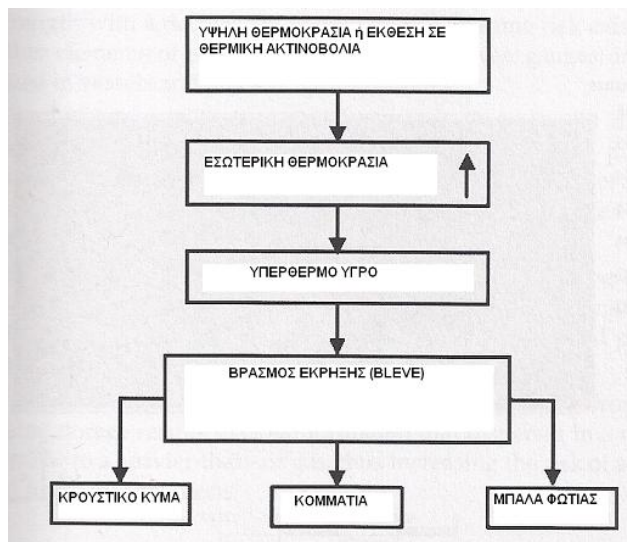
Το δοχείο τελικά καίγεται (δευτερεύον γεγονός) διαρρέει το περιεχόμενό της που εφόσον είναι αναφλέξιμο, συνήθως άμεσα αναφλέγεται και καίγεται στη μορφή μιας πυρκαγιάς δέσμης ή μπάλας φωτιάς. Συνήθεις πηγές έναυσης είναι οι ηλεκτροστατικοί σπινθήρες που αναπτύχθηκαν με πολλούς τρόπους όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενη παράγραφο. Αυτή η κατάσταση είναι γνωστή σαν ντόμινο μιας και ένα αρχικό συμβάν δίνει αύξηση σε άλλο και ούτε καθεξής και έτσι δημιουργείται μια αλυσίδα γεγονότων με καταστροφικές συνέπειες σε όλους τους τομείς.

Σε αντίθεση με τις δεξαμενές αποθήκευσης για υψηλής πίεσης αερίου υδρογόνου, οι δεξαμενές υδροποιημένου υδρογόνου λειτουργούν σε μέτριες έως χαμηλές πιέσεις που συνήθως δεν ξεπερνούν τα 20 bar. Σαν αποτέλεσμα, είναι λογικό για τα

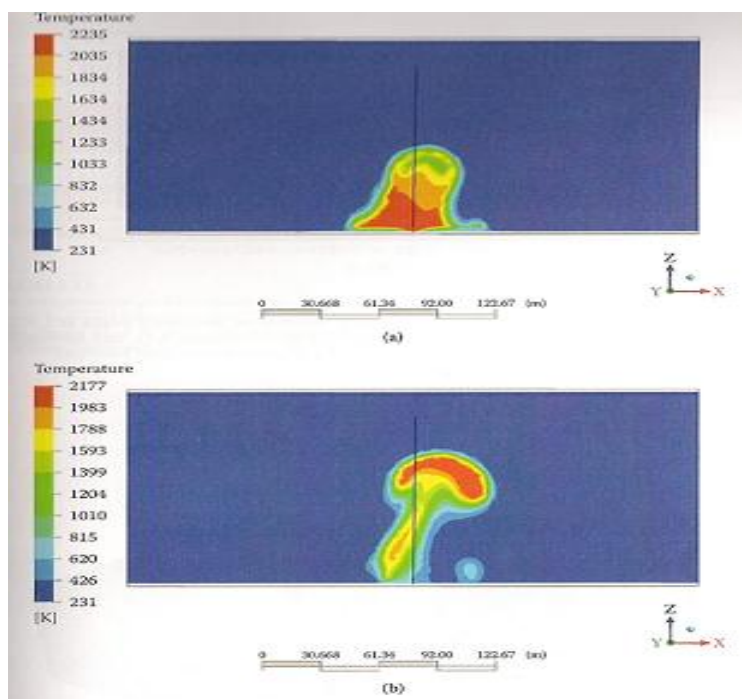
τοιχώματα να κατασκευάζονται με μικρότερη αντίσταση πίεσης σε σχέση με αυτά για την αποθήκευση αερίου υδρογόνου (που οι πιέσεις λειτουργίας μπορεί να φτάσουν και τα 400 bar). Σε περίπτωση εγκλωβισμού της δεξαμενής σε φωτιά, το μέταλλο θερμαίνεται και χάνει την μηχανική του αντοχή. Ενώ η υγρή φάση απορροφά σημαντικά ποσά θερμότητας, οι ατμοί κατέχουν πολύ χαμηλότερη ικανότητα ειδικής θερμότητας. Έτσι, η θερμότητα που παρέχεται σε αυτό το μέρος της δεξαμενής όπου υπάρχει η φάση του ατμού, θα αυξηθεί η τοπική θερμοκρασία τοιχώματος πολύ περισσότερο από ότι θα μειώσει την αντοχή του.

Στην αποθήκευση υγροποιημένου υδρογόνου, η υπερθέρμανση της δεξαμενής θα οδηγήσει σε εσωτερικές θερμοκρασίες υψηλότερες από το σημείο βρασμού του περιεχομένου της, χωρίς ατμοποίηση της υγρής φάσης, και μετά το υγρό θα υπερθερμανθεί. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται όταν υπάρχει έλλειψη στοιχείων κρυστάλλων, ιόντων και προσθέτων στον όγκο του υγρού. Όμως ύστερα υπάρχει ένα όριο θερμοκρασίας πάνω από το οποίο το ρευστό δεν μπορεί να παραμείνει στην υγρή φάση. Τότε λόγω των τυχαίων διακυμάνσεων της μοριακής πυκνότητας μέσα στον όγκο του υγρού, παράγονται περιοχές σαν σπές μοριακών διαστάσεων που δρουν σαν φουσαλίδες. Έτσι, κατόπιν υπάρχει μια έκρηξη του υγρού που συνοδεύεται από ένα δυνατό κρουστικό κύμα που διαδίδεται μέσα στο ρευστό και ρηγματώνει την δεξαμενή και διαρρέει το περιεχόμενό της στην ατμόσφαιρα. Κατόπιν ρηγματωμένα τοιχώματα μπορεί να μεταφερθούν εκατοντάδες μέτρα μακριά, ενώ το αναφλέξιμο περιεχόμενο αναφλέγεται δημιουργώντας μια σφαίρα που καίγεται από τα έξω στα μέσα στρώματα και είναι η γνωστή μπάλα φωτιάς. Η όλη διαδικασία φαίνεται στην εικόνα 3.2.

Έρευνες γίνονται για την μελέτη μοντελοποίησης αυτών των φαινομένων με ενθαρρυντικά αποτελέσματα αφού μπορεί να βρεθεί η πραγματική τους φύση και να λαμβάνονται μέτρα πρόληψής τους ή να μπορούν να προβλεφθούν οι κινήσεις μετά το ατύχημα να ελαχιστοποιήσουν τις επιπτώσεις σε ανθρώπους και κατασκευές. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στην εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.2: Αποτέλεσμα θερμικής ακτινοβολίας σε δεξαμενές υδροποιημένου υδρογόνου.



Εικόνα 3.3: Ανάπτυξη μπάλας φωτιάς μετά από καύση και απελευθέρωση υδρογόνου.

Κρυογενικές συνθήκες αποθήκευσης

Στους σταθμούς παροχής και στα οχήματα, το υδρογόνο πρέπει να είναι συμπιεσμένο σε υψηλές πιέσεις (έως 400 bar) λόγω της χαμηλής ενέργειας ανά μονάδα όγκου. Όμως, σε μερικές εφαρμογές, το υδρογόνο όπως και άλλα αέρια (άζωτο, ήλιο, μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα) χρειάζεται να αποθηκευτούν σε υγρή

φάση σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία για περιορισμό του όγκου τους. Αυτές οι θερμοκρασίες είναι συχνά χαμηλότερες από -73°C , έτσι οι συνθήκες αποθήκευσης χαρακτηρίζονται σαν κρυογενικές. Αυτές οι συνθήκες προτιμώνται π.χ. για χρήσεις όπως σε εκκίνηση πυραύλων όπως επίσης και για αποθήκευση λόγω ευκολίας και οικονομίας. Ένας κρίσιμος παράγοντας στην υγροποίηση είναι η κρίσιμη θερμοκρασία πάνω από την οποία το αέριο δεν μπορεί να υγροποιηθεί από την εφαρμογή πίεσεως μόνο.

Στην πράξη, το υδρογόνο διατηρείται υγροποιημένο σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, κάτω του -240°C και σε μέτριες πιέσεις (20-30 bar). Οι βασικοί κίνδυνοι που σχετίζονται με την κρυογενική αποθήκευση προκύπτουν από:

- **Ψαθυρότητα των λειτουργικών υλικών:** οι χαμηλές θερμοκρασίες μέσα στις δεξαμενές αποθήκευσης και στις σωληνώσεις μεταφοράς μπορεί να προκαλέσουν σημαντική ευαισθησία του δομικού υλικού σε ταλαντώσεις και κρούσεις. Οι ελαφροί χάλυβες και τα περισσότερα κράματα σιδήρου σε θερμοκρασίες υγρού υδρογόνου θα χάσουν την αγωγιμότητά τους, με μεγάλη πιθανότητα της μηχανικής αστοχίας. Ο ίδιος κίνδυνος υπάρχει και με άλλα στοιχεία του εξοπλισμού (π.χ. βαλβίδες ελέγχου, όργανα) που είναι ενσωματωμένα στις δεξαμενές και στους σωλήνες.
- **Διαρροή υγρού υδρογόνου:** απελευθερώσεις υγροποιημένου υδρογόνου δημιουργούν μεγαλύτερους όγκους αναφλέξιμων νεφών (1L υγρού παράγει σε εξάτμιση 851L αερίου). Επομένως, οι συνέπειες μιας φωτιάς ή έκρηξης θα είναι πιο ευρεία από ότι μια απελευθέρωση συμπιεσμένου υδρογόνου.
- **Εξαιρετικά χαμηλή θερμοκρασία:** χαμηλή θερμοκρασία μπορεί να δημιουργήσει πολλαπλά κρυοπαγήματα ιστών εάν το υλικό έρθει σε επαφή με το ανθρώπινο σώμα. Το σώμα μπορεί να αντιδρά γρήγορα στο κρύο όμως ανεπαρκώς μονωμένοι σωλήνες ή δεξαμενές θα έχουν επιπτώσεις στο να μην έχει άσχημα αποτελέσματα στη διάρκεια της λειτουργίας τους.
- **Διασπορά νέφους υδρογόνου:** μια διαρροή υδρογόνου που ξεκινά από κρυογενική αποθήκευση οδηγεί σε δημιουργία νέφους που διασπείρεται με τρόπο παρόμοιο με αερίου βαρύτερου του αέρα, έτσι αυξάνεται ο κίνδυνος τυχαίας φωτιάς και εκρήξεων.

3.3 Εκτίμηση κινδύνου

Μεθοδολογία

Η εκτίμηση κινδύνου στις εγκαταστάσεις της αποθήκευσης υδρογόνου στοχεύει στον προσδιορισμό όλων των πιθανών σεναρίων ατυχήματος. Μια ποικιλία μεθόδων (δέντρο γεγονότων (event tree), τρόποι και μορφές αστοχίας (failure modes) και ανάλυση αποτελεσμάτων (effects analysis), τι-εάν (what-if), δέντρο σφάλματος (fault tree)) μπορούν να βρεθούν στη σχετική βιβλιογραφία. Από όλες αυτές, η ανάλυση δέντρου γεγονότων (ETA = Event Tree Analysis), είναι μια συνηθισμένη τεχνική και μια από τις βασικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιείται στην έρευνα βιομηχανικών γεγονότων ατυχημάτων. Η ETA είναι ένα λογικό μοντέλο που γραφικά αναπαριστά το συνδυασμό γεγονότων και καταστάσεων σε μια αλληλουχία ατυχήματος. Είναι μια επαγωγική μέθοδος, που ξεκινά με ένα αρχικό ανεπιθύμητο γεγονός και εργάζεται προς το τελικό αποτέλεσμα. Η γενική διαδικασία για την ETA περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- Προσδιορισμός όλων των αρχικών γεγονότων που μπορεί να οδηγήσουν σε βασικούς τύπους ατυχήματος
- Ταυτοποίηση όλων των κρίσιμων παραμέτρων που μπορεί να επηρεάσουν την εξέλιξη του αρχικού γεγονότος
- Κατασκευή του δέντρου γεγονότων λαμβάνοντας υπόψη την σχέση μεταξύ των κρίσιμων παραμέτρων και του αρχικού γεγονότος
- Καθορισμός και εκτίμηση των τελικών γεγονότων του ατυχήματος.

Εφαρμόζοντας την ETA στις απελευθερώσεις αερίου καυσίμου, οι κρίσιμοι παράμετροι που μπορεί βασικά να επηρεάσουν το τελικό αποτέλεσμα είναι ο χρόνος έναυσης του τελικού νέφους και ο περιορισμός που παρέχεται από τα γειτονικά κτίρια ή τον περιβάλλοντα χώρο. Το προηγούμενο σχετίζεται με την ανάμιξη του αερίου με τον αέρα. Όταν άμεση ανάφλεξη συμβεί, η ανάμιξη του νέφους με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο είναι περιορισμένη, και έτσι η ανάφλεξη γίνεται στο εξωτερικό στρώμα που είναι μεταξύ των ορίων ευφλεκτότητας και ο εσωτερικός πυρήνας του νέφους είναι πολύ πλούσιος σε καύσιμο για να αναφλεγεί. Καθώς οι ανωστικές δυνάμεις των θερμών αερίων αρχίζουν να επικρατούν, το φλεγόμενο νέφος ανυψώνεται και γίνεται πιο σφαιρικό σε σχήμα δημιουργώντας μια μπάλα φλογών. Αυτή η ανύψωση σταδιακά δημιουργεί επιπλέον ανάμιξη του αερίου με το οξυγόνο, όπου φέρνει νέους όγκους αερίου στα όρια ευφλεκτότητας δηλαδή διατηρεί την φωτιά. Σε αντίθεση, όταν

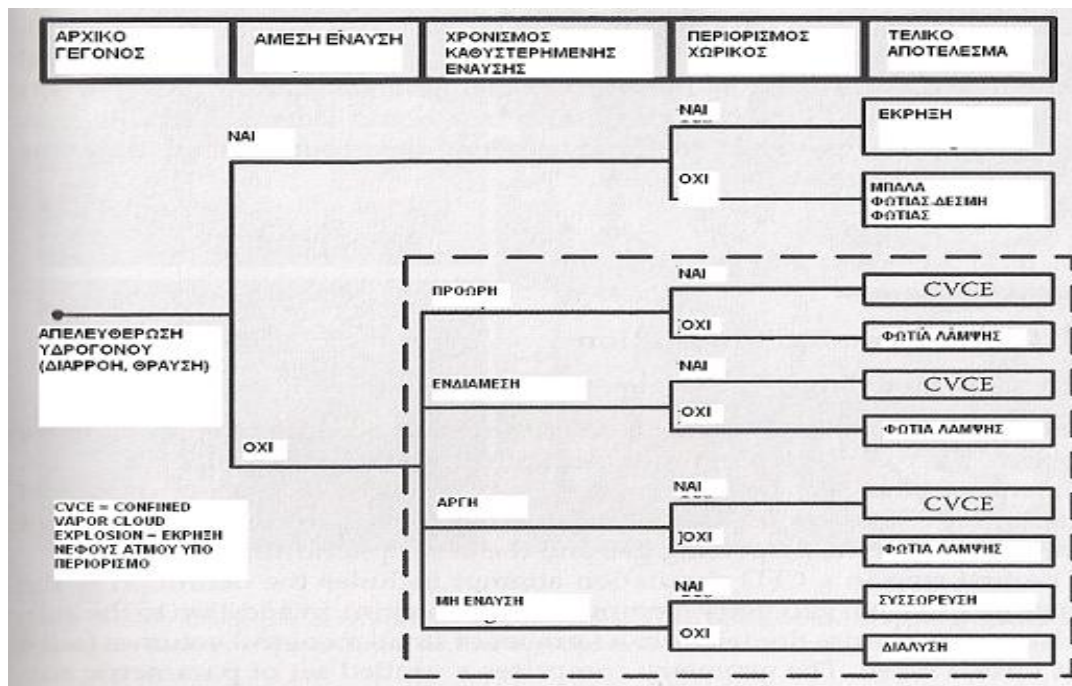
καθυστερημένη ανάφλεξη συμβαίνει, το νέφος του καυσίμου μπορεί ικανοποιητικά να αναμιχθεί με αέρα και έτσι μετά την ανάφλεξη γυρνά πίσω γρήγορα. Αυτό διαφέρει από το σενάριο της μπάλα φωτιάς επειδή προχωρά γρηγορότερα και μπορεί να κάψει από τα μέσα στα έξω αναφλέξιμα στρώματα παρέχοντας μια κατάλληλη πηγή ανάφλεξης που βρέθηκε εκεί. Έτσι μια μεγάλη ανάφλεξη ή/και έκρηξη μπορεί να συμβεί, με το τελευταίο να χρειάζεται πιο ομοιόμορφη ανάμιξη του υδρογόνου με αέρα και επιπλέον αυξημένους βαθμούς περιορισμού.

Εφαρμογή μεθόδου

Αρκετές έρευνες έχουν υιοθετήσει αυτή τη μέθοδο (ETA) σε σχέση με την ατυχηματική απελευθέρωση υδρογόνου (εικόνα 3.4). Είναι προφανές από αυτή την εικόνα ότι εκτός και αν άμεση ανάφλεξη γίνει, υπάρχει κάποιος χρόνος διασποράς μεταξύ απελευθέρωσης και ανάφλεξης. Γενικά, εάν οι ζώνες αναφλεξιμότητας του υδρογόνου είναι γνωστές, είναι πιθανό να ληφθούν προληπτικές μετρήσεις και να προετοιμαστεί σχέδιο αντίδρασης ανάγκης ενάντια σε φωτιές και εκρήξεις.

Επιπλέον, μια βασική παράμετρος είναι ο υπολογισμός της διασποράς που προκύπτει μετά από μια ατυχηματική απελευθέρωση υδρογόνου. Ακόμα και αν δεν συμβεί ανάφλεξη, το υδρογόνο που “δραπετεύει” μπορεί να ενσωματωθεί σε κλειστά μέρη παρακείμενα της πηγής και προκαλώντας κίνδυνο ασφυξίας στους ανθρώπους που μπορεί να υπάρχουν εκεί. Η διασπορά υδρογόνου μπορεί να θεωρηθεί ασφαλής μόνο όταν μη ανάφλεξη συμβεί και όταν δεν υπάρχει περιορισμός χωρικός.

Η ανάλυση δείχνει ότι εκτός και αν μια άμεση έναυση γίνει, ο προσδιορισμός της απόστασης του χαμηλού ορίου ευφλεκτότητας (LFL) του μίγματος καυσίμου-αέρα είναι σημαντικής αξίας για την πρόληψη απώλειας όπως η εξάλειψη της πηγής ανάφλεξης.



Εικόνα 3.4: Ανάλυση δέντρου γεγονότων για ατυχηματικές απελευθερώσεις υδρογόνου.

3.4 Ποιοτική πρόβλεψη της μετακίνησης του νέφους

Γενικά, η συμπεριφορά του νέφους αερίου (ή ατμού) κατά τη διασπορά μπορεί να είναι ελεγχόμενη από την άνωση ή την βαρύτητα. Η άνωση είναι σχετική με τα αέρια που είναι ελαφρύτερα από τον αέρα και η βαρύτητα με τα αέρια που είναι βαρύτερα από τον αέρα.

Οι εκτιμήσεις διασποράς πραγματοποιούνται με τη χρήση ημι-εμπειρικών μοντέλων, μονοδιάστατων μοντέλων (ονομάζονται και μοντέλα κουτιού) και κώδικες CFD (Computational Fluid Dynamics = Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής). Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου διασποράς σε ένα σενάριο ατυχηματικής απελευθέρωσης απαιτεί να είναι γνωστή η συμπεριφορά του αερίου διασποράς μιας και κάθε μοντέλο εξειδικεύεται σε έναν τύπο απελευθέρωσης (καθοδηγούμενο από άνωση ή βαρύτητα).

Σε ατμοσφαιρικές συνθήκες (1atm, 20°C), το υδρογόνο είναι ελαφρύτερο από τον αέρα και κατέχει την ιδιότητα της συμπεριφοράς ελαφρού αερίου ακόμα και εάν απελευθερώνεται από συστήματα αποθήκευσης υψηλής πίεσης. Όμως, όταν το υδρογόνο δραπέτεύει ενώ αποθηκεύεται σε υγρή φάση, η συμπεριφορά διασποράς του γίνεται αυτή ενός βαρέος έναντι ενός ελαφρού αερίου σε σχέση με τον αέρα.

3.5 Προσομοίωση της διασποράς αερίου

Μοντελοποίηση CFD

Γενικά, οι μέθοδοι CFD ακολουθούν μια ντετερμινιστική διαδικασία για να προσεγγίσουν ένα πρόβλημα. Θεωρούν τις βασικές εξισώσεις Navier-Stokes για τη μάζα, την ορμή, τη μεταφορά θερμότητας μαζί και με άλλες μερικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν και άλλες διεργασίες όπως την τυρβώδη ανάμιξη μεταξύ του αερίου διασποράς και του ατμοσφαιρικού αέρα.

Το πρώτο στάδιο σε μια προσπάθεια προσομοίωσης CFD περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της τρισδιάστατης γεωμετρίας (υπολογιστικό κομμάτι) σε συνάρτηση με τον χωρισμό όλης της γεωμετρίας σε αριθμό μικρότερων όγκων ελέγχου (κελιά) που αποτελούν το πλέγμα. Η γεωμετρία αποτελείται από ένα ενοποιημένο σέτ από παραμετρικές επιφάνειες που έχουν δημιουργηθεί σε ένα λογισμικό τύπου CAD.

Σε έναν οποιοδήποτε γνωστό εμπορικό κώδικα (π.χ. FLUENT, CFX) η λύση αρχίζει με την διακριτοποίηση των διαφορικών και ολοκληρωματικών εξισώσεων καθώς έχουν δοθεί οι αναγκαίες οριακές συνθήκες, συνθήκες λειτουργίας και όρια σύγκλισης και ανάλογα το πρόβλημα και τις απαιτήσεις μας για ακρίβεια, η λύση θα συγκλίνει και θα μας δώσει αποτελέσματα τα οποία για να μπορούμε να τα αποδεχτούμε θα πρέπει να έχουν συγκριθεί και με πειραματικά ή άλλα αποδεκτά στοιχεία.

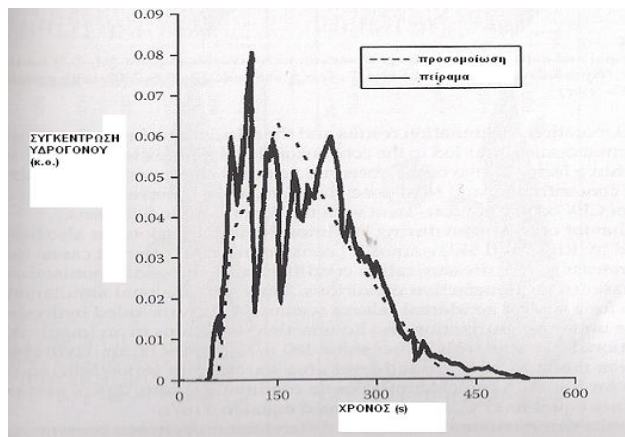
Προσομοιώσεις Απελευθέρωσης Αερίου και Υγροποιημένου Υδρογόνου

Αρκετοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί σε μεγάλης κλίμακας διασπορές αερίου και χρησιμοποίησαν CFD κώδικες για προσομοίωση και επιβεβαίωση των πειραματικών μετρήσεων. Υπολογισμοί έχουν γίνει και για ισόθερμες (κυρίως θεωρητικές καταστάσεις και όχι κοντά στις πραγματικές συνθήκες, άρα όχι απολύτως ακριβής πρόβλεψη αλλά πιο εύκολη και ταχεία) απελευθερώσεις βαρέων αερίων αλλά και για τις πραγματικές που δεν είναι ισόθερμες.

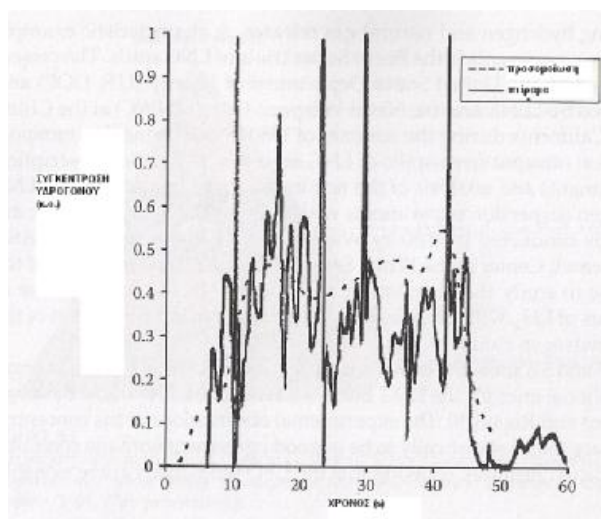
Παραδείγματα τέτοιων προσομοιώσεων δίνονται στις παρακάτω εικόνες για διαφορετικές εφαρμογές.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι μια σύγχρονη εγκατάσταση διαχείρισης, αποθήκευσης και χρήσης υδρογόνου θα πρέπει να έχει και υπολογιστικά εργαλεία τύπου CFD (εκτός όλων των άλλων) για να μπορεί να ελέγχει και να αποσοβεί κινδύνους πριν αυτοί συμβούν με το να δημιουργεί σενάρια που αν συμβούν να ξέρει τις διαστάσεις του προβλήματος και τι μέτρα να πάρει για να μειώσει τις συνέπειες.

Οι εικόνες 3.5 και 3.6 δείχνουν το ιστορικό της πειραματικής συγκέντρωσης αερίων συναρτήσει των υπολογιστικών αποτελεσμάτων που λήφθησαν από δοκιμές καύσης αερίων καυσίμων που περιέχουν υδρογόνο σε υγρή και σε αέρια μορφή. Και όπως φαίνεται υπάρχει συνάφεια και συμφωνία των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα υπολογιστικά και αυτό δείχνει το πόσο χρήσιμο αλλά και ουσιαστικό εργαλείο είναι η πρόβλεψη κίνησης του υδρογόνου μέσω εργαλείων αιχμής στη διεθνή σκηνή.



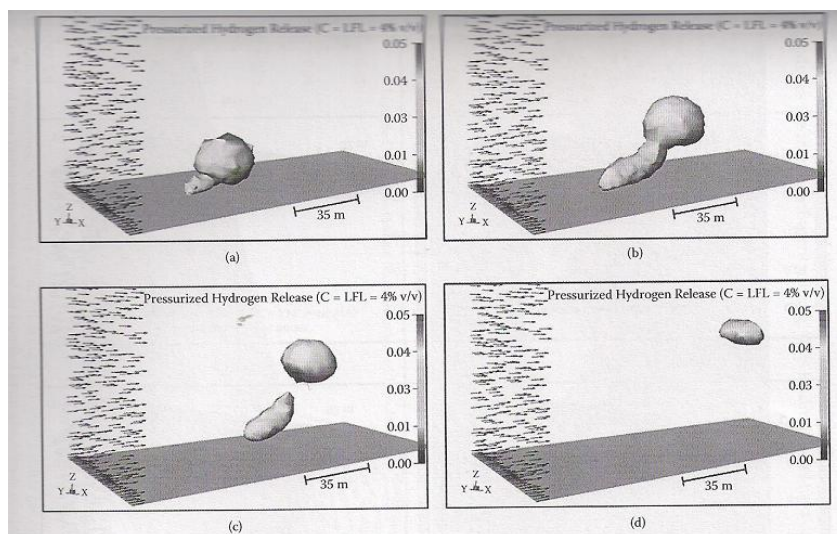
Εικόνα 3.5: Ιστορικό συγκέντρωσης αερίου υδρογόνου από καυστήρα (υπολογιστικό και πειραματικό)



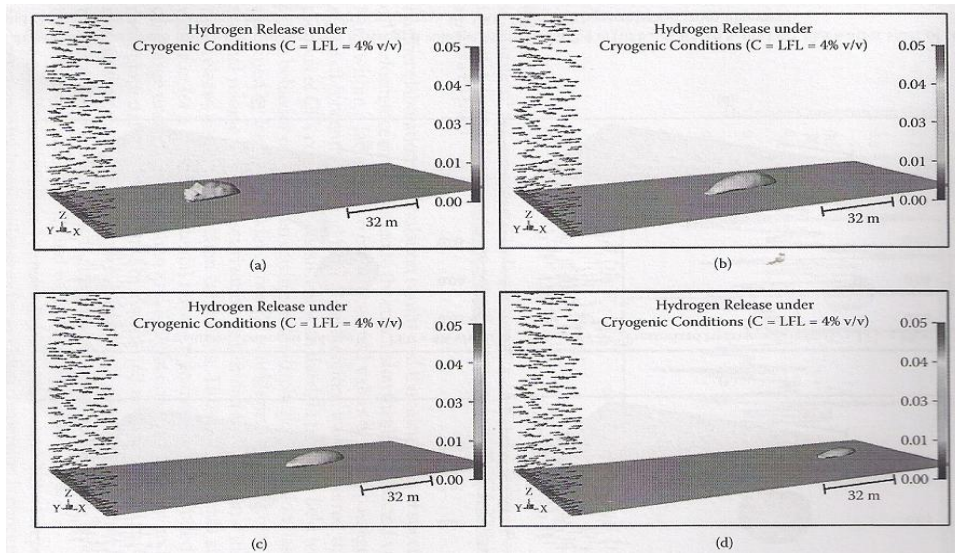
Εικόνα 3.6: Ιστορικό συγκέντρωσης υγρού υδρογόνου από καυστήρα (υπολογιστικό και πειραματικό)

Η συμπεριφορά του υδρογόνου κατά τη διάρκεια της ατμοσφαιρικής του διασποράς έχει επίσης ερευνηθεί και πειραματικά αλλά και υπολογιστικά για να δοθούν λύσεις αντιμετώπισης σε τέτοιες καταστάσεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μελέτη τέτοιων

προβλημάτων στις τρεις διαστάσεις είναι αρκετά δύσκολη λόγω των πολλών και διαφορετικών παραμέτρων (π.χ. ατμοσφαιρικές συνθήκες, ανάγλυφο της περιοχής, κτίρια κ.α.) που χρειάζεται να εμπλακούν για να είναι αξιοποιήσιμα και αξιόπιστα τα αποτελέσματα της έρευνας. Έτσι, στις παρακάτω εικόνες 3.7 και 3.8 παρουσιάζονται δύο διαφορετικές περιπτώσεις: 1^η μια ισόθερμη απελευθέρωση υπό συνθήκες συμπίεσης και 2^η μια κρυογενική (μη ισόθερμη) απελευθέρωση κάτω από συνθήκες υγροποίησης. Προσομοιώσεις 3 διαστάσεων πραγματοποιήθηκαν για τα δύο αυτά σενάρια, το υδρογόνο είχε πηγή απελευθέρωσης το επίπεδο του εδάφους και οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας ήταν οι συνήθεις και υπήρχε άνεμος 3m/s. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο περιπτώσεων όσον αφορά την διασπορά του νέφους. Στην 1^η περίπτωση το νέφος ανυψώνεται άμεσα και κινείται σχεδόν κάθετα όπου στη 2^η περίπτωση κινείται κατά την κίνηση του ανέμου σχεδόν οριζόντια παραμένοντας κοντά στο έδαφος.

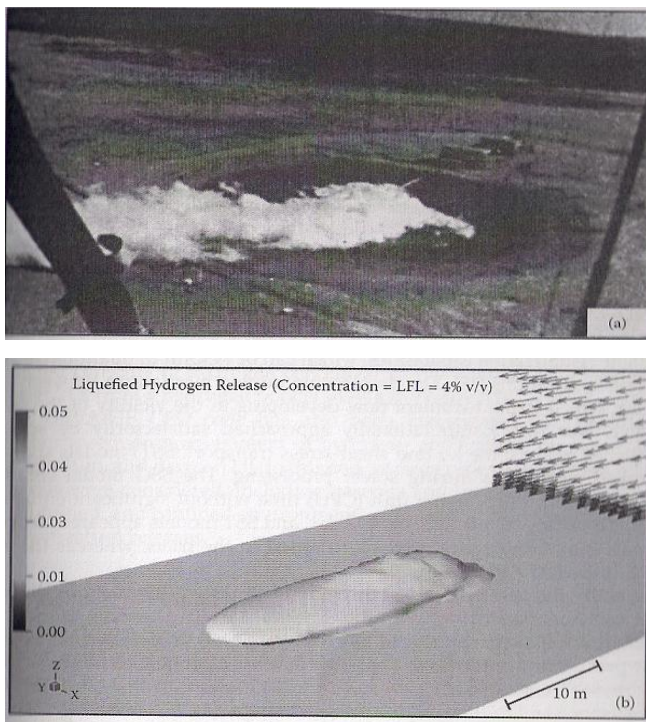


Εικόνα 3.7: Προσομοίωση σταδιακής διάχυσης απελευθερωμένου συμπιεσμένου υδρογόνου σε διάφορες χρονικές στιγμές.



Εικόνα 3.8: Προσομοίωση σταδιακής διάχυσης απελευθερωμένου κρυογενικού υδρογόνου σε διάφορες χρονικές στιγμές.

Στην εικόνα 3.9 φαίνεται ότι η διάχυση νέφους υδρογόνου από κρυογενικές συνθήκες είναι παρόμοια με αυτή του υγροποιημένου φυσικού αερίου που είναι οριζόντια μετακίνηση του νέφους σε χαμηλό ύψος. Αυτό είναι αποτέλεσμα της μεγαλύτερης αδράνειας του κρυογενικού αερίου που μειώνει το ρυθμό της τυρβώδους ανάμιξης και έτσι οδηγείται σε καθυστέρησης διάλυσης.



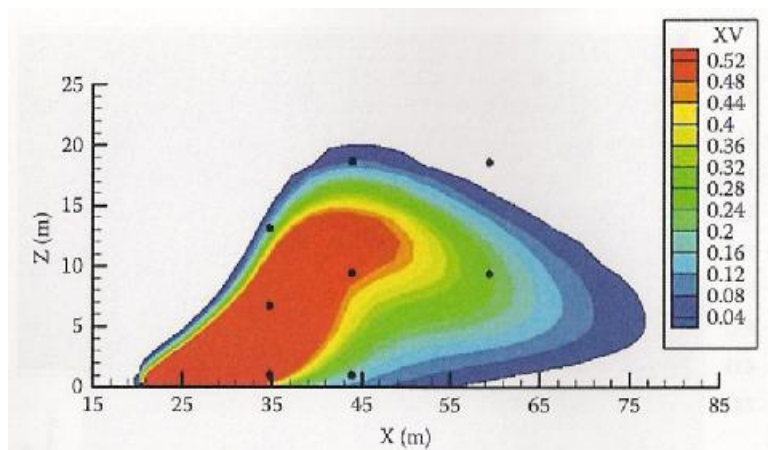
Εικόνα 3.9: Διάχυση νέφους υδρογόνου σε κρυογενικές συνθήκες , α) πείραμα και β) υπολογιστική προσομοίωση.

Αντίθετα, η μεγαλύτερη πυκνότητα του νέφους θα παράγει μια ροή καθοδηγούμενη από τη βαρύτητα που τείνει να μειώσει το ύψος του νέφους και να αυξήσει το πλάτος του. Έτσι, σε αντίθεση με τα ελαφρύτερα από τον αέρα αέρια, η παραμονή του βαρέως νέφους σε χαμηλό ύψος θα αυξήσει σημαντικά τον κίνδυνο της ανάφλεξης.

Σε πρακτικές εφαρμογές, οι υπολογισμοί διασποράς χρειάζεται να πραγματοποιηθούν όπως αναφέρθηκε νωρίτερα σε τοπογραφικά σύνθετα περιβάλλοντα. Έτσι, στερεά αντικείμενα επεμβαίνουν στην περιοχή διασποράς και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στους υπολογισμούς. Μετά από πολλές εφαρμογές έχει αποδειχθεί η εγκυρότητα των CFD κωδίκων που αποτελούν ισχυρά εργαλεία για την προσομοίωση διασποράς σε σύνθετα περιβάλλοντα δίνοντας πολύ ακριβή αποτελέσματα με εξαιρετική οπτικοποίηση που μπορεί να είναι βοηθητικά στις εφαρμογές ανάλυσης ποιοτικού κινδύνου. Ο επικρατών μηχανισμός ανάμιξης μεταξύ αερίου και αέρα, που είναι η τυρβώδης ροή που αναπτύσσεται στη γεινίαση με το στερεό εμπόδιο έχει επιτυχώς εφαρμοστεί υπολογιστικά από πολλά τυρβώδη μοντέλα όπως το k-ε μοντέλο και τα μοντέλα μεταφοράς διαμητρικής τάσης (SST) που έδειξαν αυξημένη ισχύ λύσης. Το SSG μοντέλο χρησιμοποίησε αυξημένο χρόνο επεξεργασίας χωρίς να δώσει ακρίβεια στα αποτελέσματα. Τα SSG, k-ε και SST μοντέλα εμφανίζονται να υπερεκτιμούν τις μέγιστες συγκεντρώσεις που καταγράφονται στις δοκιμές ή στις περιπτώσεις μετρήσεων πεδίου όπου το k-ω μοντέλο τις υποεκτιμά.

Γενικά, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται μέσω υπολογιστικών προσομοιώσεων έδειξαν καλή συμφωνία συγκρινόμενα με τα πειραματικά στοιχεία, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι οι τεχνικές CFD μπορούν αποτελεσματικά να χρησιμοποιηθούν σε διαδικασίες εκτίμησης συνεπειών που σχετίζονται με σενάρια διασποράς τοξικών/εύφλεκτων αερίων (όπως το υδρογόνο) όπου τα μοντέλα τύπου κουτιού δεν μπορούν να αποδώσουν.

Στην παρακάτω εικόνα 3.10 φαίνεται το αποτέλεσμα μια προσομοίωσης μεγάλης κλίμακας διαρροής υγρού υδρογόνου σε ένα περιβάλλον χωρίς εμπόδια για να μελετηθούν χαρακτηριστικά της ροής του υδρογόνου και ιδιαίτερα η συγκέντρωσή του.



Εικόνα 3.10: Διαγράμματα πρόβλεψης συγκέντρωσης υδρογόνου (περίπτωση με λίμνη καυσίμου, ύπαρξη φράκτη και μεταφορά θερμότητας λόγω επαφής).

Απελευθερώσεις σε περιορισμένα μέρη

Ερευνητές έχουν προτείνει τη μέθοδο HRAM (Hydrogen Risk Assessment Method = Μέθοδος εκτίμησης κινδύνου υδρογόνου) να χρησιμοποιείται για εδραίωση του αερισμού στα κτίρια που περιέχουν εξοπλισμό με καύσιμο υδρογόνο ή για προσδιορισμό των βέλτιστων θέσεων των αισθητήρων υδρογόνου. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει τη μοντελοποίηση CFD και να βοηθήσει στη χρήση του ηλίου σαν αντικαταστάτη του υδρογόνου για ελαχιστοποίηση των επικίνδυνων δοκιμών επιβεβαίωσης για τη διαρροή του υδρογόνου σε απλές γεωμετρικές εγκολπώσεις.

Θερμικοί κίνδυνοι από νέφη υδρογόνου

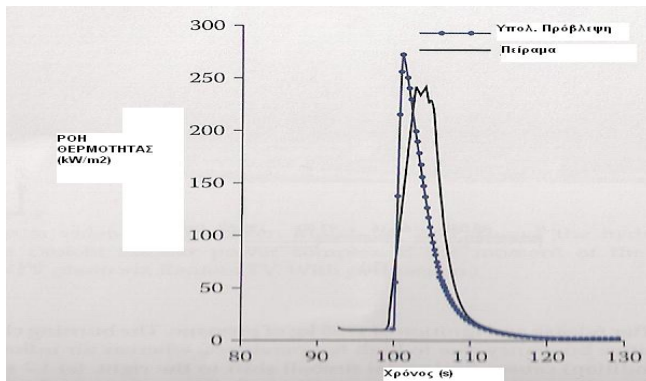
Οι ατμοσφαιρικές απελευθερώσεις εύφλεκτων αερίων όπως το υδρογόνο μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες φωτιές με σοβαρές επιπτώσεις στα περιβάλλοντα κτίρια κυρίως λόγω των εντατικών θερμικών φορτίων. Σε δραστηριότητες όπου κίνδυνοι σχετίζονται με φωτιές νεφών, υπάρχει ανάγκη για εκτίμηση κοινωνικού κινδύνου που περιλαμβάνει την εκτίμηση των επικίνδυνων ζωνών λόγω της συνολικής θερμικής ακτινοβολίας. Μέχρι τώρα πολύ λίγες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για τη μελέτη και μοντελοποίηση των αποτελεσμάτων των πυρκαγιών με λάμψη (flash fires) και τα αποτελέσματα δεν είναι επαρκή για γενίκευση των συμπερασμάτων.

Βέβαια έχουν γίνει πολλές προσπάθειες αλλά όλες μέχρι τώρα έχουν ελλείψεις λόγω των στοιχείων που χρειάζονται για να γίνει επαρκής υπολογιστική προσομοίωση σαν

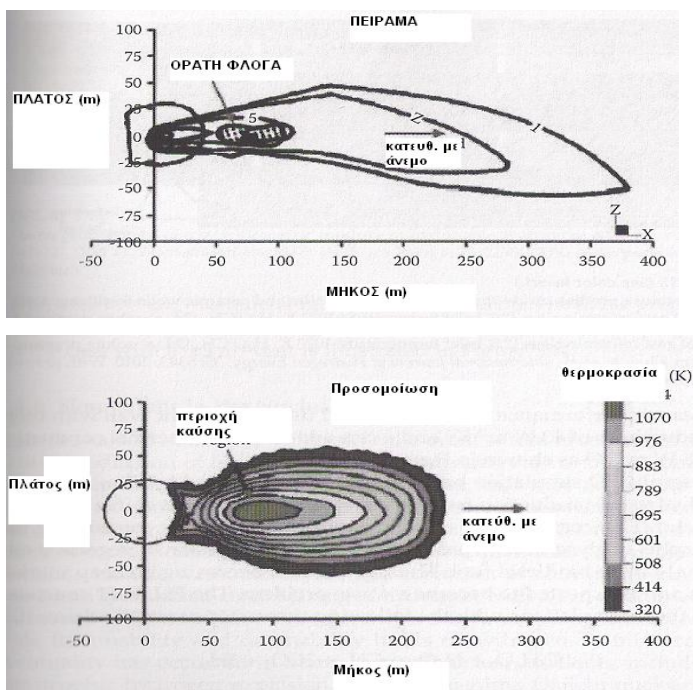
συνάρτηση των λίγων αξιόπιστων πειραματικών στοιχείων από σχετικές καταστάσεις σε εγκαταστάσεις διαχείρισης υδρογόνου.

Σε πολλά ερευνητικά κέντρα ανά τον κόσμο γίνεται προσπάθεια και αναπτύσσονται νέοι κώδικες (in-house codes) που δεν είναι σαν τους εμπορικούς όπου μπορούν να λύσουν συγκεκριμένες κατηγορίες προβλημάτων αφού υπάρχει περιορισμός στα διαθέσιμα μοντέλα και τεχνικές που το καθένα χρησιμοποιεί. Με τη χρήση κάποιων τέτοιων κωδίκων έχουν δοθεί ενθαρρυντικά αποτελέσματα και είναι ζήτημα λόγου χρόνου να μπορεί το φαινόμενο να μελετηθεί υπολογιστικά πλήρως και έτσι να εφαρμοστεί αυτή η μεθοδολογία στην πρόβλεψη των κινδύνων και σαφώς στην ελαχιστοποίηση των συνεπειών είτε σε δομές είτε σε ανθρώπους.

Στις παρακάτω εικόνες 3.11 και 3.12 δείχνονται κάποια τέτοια αποτελέσματα.



Εικόνα 3.11: Ιστορικό ροών θερμότητας (πειραματικό σε σχέση με το υπολογιστικό).



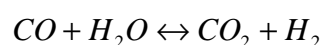
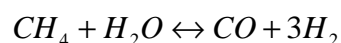
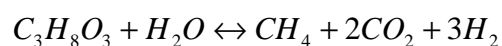
Εικόνα 3.12: Πειραματική και υπολογιστική προσομοίωση καύσης νέφους υδρογόνου.

Προσομοιώσεις στη χημική βιομηχανία

Οι χημικές βιομηχανίες (περιλαμβάνοντας και την βιομηχανία πετρελαιοειδών) παράγουν και καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες υδρογόνου για τις ανάγκες τους κυρίως αναβαθμίζοντας τα ορυκτά καύσιμα και για την παραγωγή της αμμωνίας. Σαν αποτέλεσμα, πολλά ατυχήματα έχουν συμβεί σε αυτές τις βιομηχανίες λόγω της χρήσης του υδρογόνου. Για να αντιμετωπίσουν αυτά τα γεγονότα, πολλές αναφορές υπάρχουν και βασίζονται στα εργαλεία CFD για να προσομοιάσουν σύνθετα χημικά και φυσικά φαινόμενα με την ανάγκη να προλάβουν την απώλεια ελέγχου των χημικών αντιδραστήρων.

Μια μελέτη προτείνει μια προσομοίωση CFD με την αναλυτική χημεία του αναμορφωμένου ατμού μεθανίου (SRM=Steam Reforming Methane) για παραγωγή υδρογόνου σε έναν μικροαντιδραστήρα. Αυτή η μέθοδος σε μικροαντιδραστήρες έχει εξαιρετική δυναμική να αναπτύξει μια χαμηλού κόστους, συμπαγή διαδικασία για παραγωγή υδρογόνου μέσω της μείωσης του χρόνου αντίδρασης από secs σε msec. Και έτσι, να αποφεύγονται μέθοδοι πολυέξοδοι, με αρκετό χρόνο λειτουργίας και γρήγορες αντιδράσεις για αποφυγή εξώθερμων και επικίνδυνων αντιδράσεων που μπορούν να προκαλέσουν αναφλέξεις και εκρήξεις σε περιβάλλον με υδρογόνο να κινείται.

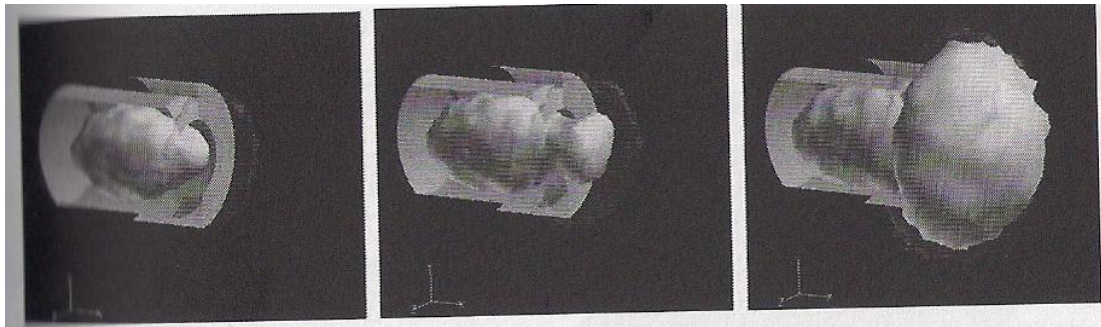
Επιτυχής προσομοίωση έχει επίσης αναφερθεί σε άλλη ερευνητική εργασία για την παραγωγή υδρογόνου από αναμόρφωση ατμού γλυκερόλης σε ρευστοποιημένη κλίνη αντιδραστήρα. Αυτή η μετατροπή είναι μεγάλης περιβαλλοντικής αξίας λόγω της υψηλής παραγωγής γλυκερόλης που τώρα παράγεται από τη μετατροπή φυτικών ελαίων ή λίπη ζώων σε καύσιμο βιοντίζελ. Έτσι, η γλυκερόλη γίνεται μια φτηνή λύση παραγωγής αλλά θα γίνει πρόβλημα αποβλήτων. Ο κώδικας FLUENT χρησιμοποιήθηκε για αυτούς του υπολογισμούς με το ακόλουθο τριών βημάτων σχήμα αντίδρασης:



Η θερμοδυναμική της χημείας και ο πειραματισμός έδειξαν ότι για την αποφυγή απόθεσης άνθρακα στον καταλύτη, η θερμοκρασία αντίδρασης πρέπει να αυξηθεί στους 600°C. Έτσι, η προσομοίωση CFD είναι ένα πολύτιμο εργαλείο για πρόβλεψη

και πρόληψη επικίνδυνων καταστάσεων όταν εφαρμόζεται αυτή η καινούργια χημική διαδικασία στη βιομηχανία.

Επιπλέον για να μελετηθούν οι εκρήξεις του υδρογόνου στη χημική βιομηχανία έρευνες έγιναν και υπολογισμοί μέσω πειραμάτων και προσομοιώσεων. Μια τέτοια περίπτωση φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 3.13 που παρουσιάζει την διάδοση φλόγας από ανάμιξη αέρα και υδρογόνου.



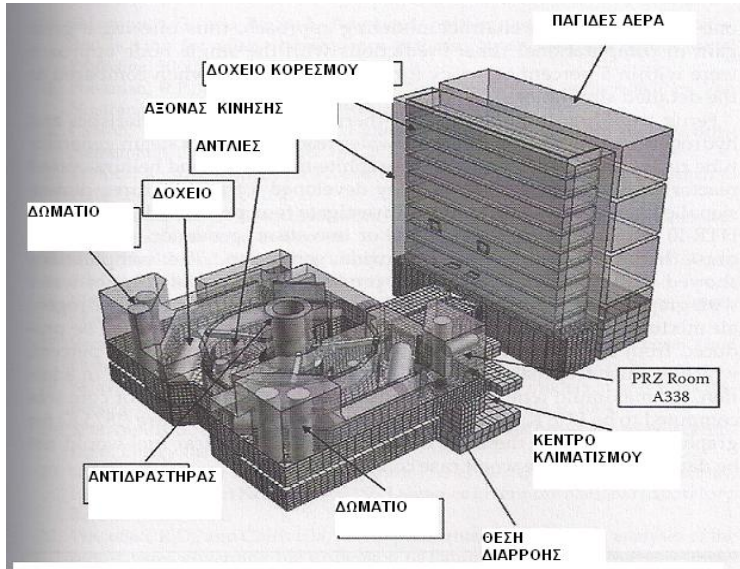
Εικόνα 3.13: Διάδοση φλόγας από καύση στοιχειομετρικού μίγματος Υδρογόνου-αέρα μέσα από άνοιγμα 0.3m^2 .

Προσομοιώσεις στην πυρηνική βιομηχανία

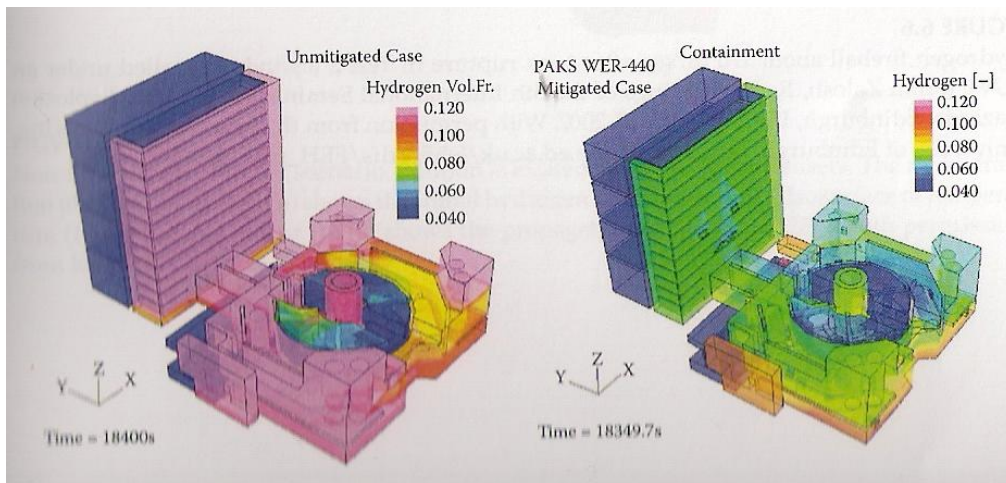
Ενας σοβαρός κίνδυνος σε πυρηνικές εγκαταστάσεις, σε περίπτωση απώλειας ελέγχου, είναι η ατυχηματική παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου μέσω διαφόρων μηχανισμών. Οι ταχείες αντιδράσεις, π.χ. σε λίγα λεπτά, μπορούν να οδηγήσουν σε αυτό το φαινόμενο που περιλαμβάνει π.χ. την αντίδραση ζιρκονίου-ατμού, αντιδράσεις χάλυβα-ατμού, αντιδράσεις τετηγμένου πυρήνα-νερό και τετηγμένου πυρήνα-μπετόν. Αντίθετα, οι αργές αντιδράσεις μπορούν να παράγουν μεγάλες ποσότητες υδρογόνου. Τέτοιες αντιδράσεις περιλαμβάνουν ραδιόλυση νερού, διάβρωση χάλυβα, χρώμα βασισμένο στον ψευδάργυρο και γαλβανισμένο χάλυβα. Η ανάμιξη υδρογόνου με αέρα σε περιορισμένο χώρο θα επιτρέψει σε αναφλεκτικά και εκρηκτικά μίγματα να έχουν ευρεία όρια ευφλεκτότητας και εκρήξεων διαθέσιμα των μιγμάτων υδρογόνου-αέρα. Αυτό έχει συμβεί σε πολλές περιπτώσεις πυρηνικών ατυχημάτων που περιλαμβάνει και την καταστροφική έκρηξη υδρογόνου στην Fukushima Daiichi πυρηνική μονάδα στην Ιαπωνία τον Μάρτιο του 2011.

Για να μειωθούν και προβλεφθούν τέτοια ατυχήματα έχουν γίνει πολλές δημοσιεύσεις και υπολογισμοί μέσω CFD λογισμικών για να μελετήσουν τις εκρήξεις του υδρογόνου σε τέτοιες εγκαταστάσεις που είναι σύνθετες και επικίνδυνες και λόγω των στοιχείων παραγωγής πυρηνικής ενέργειας και διαρροών της στο περιβάλλον.

Οι παρακάτω δύο εικόνες 3.14 και 3.15 δείχνουν αποτελέσματα τέτοιων μελετών που μπορούν να βοηθήσουν στην προστασία από την παραγωγή και κίνηση του υδρογόνου μέσα στις εγκαταστάσεις με σκοπό την αποφυγή ατυχημάτων και ρωγμών στα δομικά στοιχεία τους.



Εικόνα 3.14: Περιοχές μοντελοποιούμενες μέσω CFD.



Εικόνα 3.15: Συγκεντρώσεις υδρογόνου σε περιοχές μοντελοποιούμενες

Κεφάλαιο 4^ο: Νομοθεσία και Κανονισμοί για την ασφάλεια του υδρογόνου

4.1 Ορισμοί

Κανονισμοί, κώδικες και οδηγίες είναι οι νομικές απαιτήσεις που επιβάλλονται από νομοθετικά σώματα (κοινοβούλια, κυβερνήσεις, Ε.Ε. κ.α) και είναι υποχρεωτικοί για οποιοδήποτε σχετίζεται με μια συγκεκριμένη δραστηριότητα. Σε αντίθεση, οδηγίες, μέτρα και κώδικες πράξης είναι εθελοντικά κείμενα χρήσιμα για τον καθένα βιομηχανικό οργανισμό που ασχολείται με τη σχετική δραστηριότητα.

Στην Ε.Ε., μια οδηγία είναι μια νομική απαίτηση που θέτει κοινό έδαφος σε όλες τις Ευρωπαϊκές χώρες. Είναι υποχρεωτικές να επιβληθούν μετά από μια χρονική περίοδο και εντάσσονται στη νομοθεσία του εκάστοτε κράτους με τις αλλαγές που ίσως να θελήσει να κάνει σε σχέση με τις δικές του απαιτήσεις και ιδιαιτερότητες. Δυστυχώς δεν υπάρχει ακόμα μια Ευρωπαϊκή οδηγία σχετικά με το υδρογόνο, παρά μόνο κάποιες οδηγίες σχετικά με χημικά συστατικά και την χρήση τους. Σαν αποτέλεσμα μόνο η εθνική νομοθεσία κάποιας χώρας μπορεί να προσδιορίζει τα ελάχιστα επίπεδα για επικίνδυνες ουσίες περιλαμβάνοντας το υδρογόνο.

Με αναφορά στις δεξαμενές υπό πίεση, το υδρογόνο καλύπτεται από την Ευρωπαϊκή Οδηγία για τον Εξοπλισμό Πίεσης (European Pressure Equipment Directive=PED) και επίσης από την Οδηγία Εξοπλισμού Πίεσης για μεταφορές (Transportable Pressure Equipment Directive=TPED) που αναφέρεται στις διεθνείς συμφωνίες για ασφαλή μεταφορά επικίνδυνων αγαθών όπως η ADR (δρόμους), RID (τρένα), IMO (θάλασσα) και ADN (για εσωτερικές θαλάσσιες μεταφορές). Άδειες για χρήση οχημάτων διεθνώς λαμβάνονται από τα UN ECE (Επιτροπή Οικονομικών για την Ευρώπη των Ηνωμένων Εθνών).

Οδηγία ATEX

Με εκτίμηση στον κανονισμό για την πρόληψη ζημιάς από την απελευθέρωση εύφλεκτων αερίων (περιλαμβάνοντας το υδρογόνο), η οδηγία 94/9/EC (γνωστή σαν Οδηγία ATEX 100) και 99/92/EC (γνωστή σαν Οδηγία ATEX 118) είναι σχετικές με την ασφάλεια από υδρογόνο.

Η Οδηγία ATEX 118 προσδιορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις για βελτίωση της ασφάλειας και της υγείας σε ένα περιβάλλον εργασίας, ελαχιστοποιώντας τον κίνδυνο από πιθανή εκρηκτική ατμόσφαιρα. Με αυτή τη λογική το υδρογόνο έχει έναν κίνδυνο δημιουργίας μιας εκρηκτικής ατμόσφαιρας όταν αναμιγνύεται με αέρα. Για

πρόληψη τέτοιου γεγονότος, η διεύθυνση μιας βιομηχανίας είναι υποχρεωμένη να πάρει μια σειρά μέτρων βασιζόμενοι στις ακόλουθες αρχές:

- Πρόληψη δημιουργίας ATEX (ατμόσφαιρας εκρήξεων) και εάν αυτό δεν είναι δυνατό,
- Αποφυγή ανάφλεξης ATEX, και
- Μετριασμός των αποτελεσμάτων της έκρηξης

Για να επιτύχει αυτό το θέμα, η διεύθυνση μιας βιομηχανίας πρέπει να πραγματοποιήσει μελέτες εκτίμησης με σκοπό τον προσδιορισμό:

- Της πιθανότητας γεγονότος ATEX
- Της πιθανότητας της παρουσίας ενεργών και αποτελεσματικών πηγών ανάφλεξης
- Της κλίμακας των αποτελεσμάτων σε σχέση με τις εγκαταστάσεις, τις χημικές ουσίες και τις βιομηχανικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται.

Η διεύθυνση μιας βιομηχανίας πρέπει επίσης να ταξινομήσει τις επικίνδυνες ζώνες ως εξής:

- Ζώνη 0: Χώροι με συνεχή παρουσία ATEX ή για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα ή με μεγάλη συχνότητα
- Ζώνη 1: Χώροι με κατά περίπτωση κινδύνου ATEX κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας
- Ζώνη 2: Χώροι με μικρό κίνδυνο ATEX κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας και μικρή διάρκεια.

Με εκτίμηση στην εφαρμογή της Οδηγίας ATEX στους κινδύνους του Υδρογόνου, τα παρακάτω παραδείγματα δείχνουν την εφαρμογή της:

- Μια διαδικασία στην οποία το υδρογόνο χρησιμοποιείται (π.χ. μετά την είσοδο αέρα σε έναν αντιδραστήρα παραγωγής υδρογόνου)
- Ένας κλειστός χώρος στον οποίο το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί μέσω μιας αντίδρασης πούδρας μετάλλου με νερό (ειδικά όταν οξειδώνεται).
- Παραγωγή υδρογόνου κατά τη διάρκεια επαναφόρτισης των μπαταριών μολύβδου
- Απελευθέρωση υδρογόνου από εγκαταστάσεις υπό πίεση.

Επιπρόσθετα με αυτήν την Οδηγία ATEX πολλές άλλες οδηγίες σχετίζονται με τα εύφλεκτα αέρια όπως το Υδρογόνο, σαν την οδηγία κατασκευών.

Άλλες Οδηγίες και Κανονισμοί

Λαμβάνοντας υπόψη την διεθνή προτυποποίηση της ασφάλειας του υδρογόνου, η Τεχνική Επιτροπή 197 της ISO που ονομάζεται “Τεχνολογίες Υδρογόνου” έχει δημοσιεύσει τα ακόλουθα επίσημα σχετικά έγγραφα:

- ISO 13984:1999- Υγρό Υδρογόνο – Σύστημα επίγειου συστήματος εφοδιασμού καυσίμου οχημάτων
- ISO 14687:1999- Καύσιμο Υδρογόνο-Προσδιορισμός προϊόντος
- ISO/PAS 15594:2004- Λειτουργίες εγκατάστασης εφοδιασμού υδρογόνου σε αεροδρόμια
- ISO/TR 15916:2004- Βασικές θεωρήσεις για την ασφάλεια των συστημάτων υδρογόνου
- ISO 17268:2006- Συσκευές σύνδεσης εφοδιασμού οχημάτων επιφανείας με συμπιεσμένο υδρογόνο.

Επίσης, οδηγίες και άλλα χρηστικά έγγραφα μπορούν να βρεθούν στο δίκτυο HySafe (Safety of Hydrogen as an Energy Carrier= Ασφάλεια του Υδρογόνου σαν Φορέας Ενέργειας) όπως φαίνονται ενδεικτικά παρακάτω:

- FM Global, “Υδρογόνο”, Φύλλα Δεδομένων Απώλειας Περιουσίας, Σεπτ’ 2000.
- IGC 15/96/E, Σταθμοί Αερίου Υδρογόνου, Συμβούλιο Βιομηχανικών Αερίων, Βρυξέλλες, Βέλγιο
- IGC 06/93/E, Ασφάλεια στην Αποθήκευση, Χειρισμό και Διανομή Υγρού Υδρογόνου, Συμβούλιο Βιομηχανικών Αερίων, Βρυξέλλες, Βέλγιο
- ANSI/AIAA G-095-2004: Οδηγός για την ασφάλεια του υδρογόνου και των συστημάτων υδρογόνου.
- NASA/TM-2003-212059: Οδηγός για ανάλυση κινδύνων υδρογόνου σε στοιχεία και συστήματα.
- NFPA 50A & 50B: Πρότυπα για συστήματα Αερίου και Υγρού Υδρογόνου σε χώρους.

- NFPA 853: Πρότυπα για Εγκατάσταση Στατικών Εγκαταστάσεων Ισχύος Κελιών Καυσίμου

4.2 Εγκαταστάσεις Υδρογόνου

Οι ακόλουθες είναι γενικές οδηγίες για τη διασφάλιση της ασφάλειας σε περιοχές αποθήκευσης υδρογόνου και μεταφοράς. Καλός φωτισμός, προστασία φωτός, συστήματα συναγερμού και έκτακτης ανάγκης και συστήματα ανίχνευσης και μέτρησης αερίου πρέπει να υπάρχουν σε τέτοιες εγκαταστάσεις. Επίσης θα πρέπει να υπάρχουν λεπτομερείς οδηγίες ασφάλειας σχετιζόμενες με την πολιτική ασφαλείας, ασφάλεια στην κατασκευή-λειτουργία-συντήρηση και τελική απόθεση της εγκατάστασης υδρογόνου όπως και μετρήσεις ασφαλείας σε κτίρια και καυστήρες δοκιμών που χρησιμοποιούνται στην υπηρεσία του υδρογόνου και σίγουρα διαδικασίες ανάγκης που θα πρέπει να είναι κήμα όλων των εργαζομένων στην εγκατάσταση. Παρακάτω θα αναφερθούν κάποιες συμβουλές-οδηγίες για την προστασία από τους κινδύνους του υδρογόνου σε στοιχεία των εγκαταστάσεων.

Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις

Περιοχές όπου εύφλεκτα μίγματα υδρογόνου αναμένονται να εμφανιστούν ή περιοχές που το υδρογόνο αποθηκεύεται, μεταφέρεται ή χρησιμοποιείται ταξινομούνται σαν ζώνες υψηλού κινδύνου σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς. Όλες οι ηλεκτρικές πηγές ανάφλεξης πρέπει να απαγορεύονται σε αυτές τις περιοχές χρησιμοποιώντας μόνο εξοπλισμός ανθεκτικό σε έκρηξη ή επιλέγοντας εγκεκριμένο εξοπλισμό μη δημιουργίας ηλεκτρικού τόξου.

Ο εξοπλισμός ανθεκτικός σε έκρηξη έχει μια εγκόπλωση δυνατή αρκετά για να περιέχει την παραγόμενη πίεση από την έναυση ενός εύφλεκτου μίγματος μέσα στην κοιλότητα.

Άλλη μέθοδος πρόληψης έκρηξης αερίου είναι η τοποθέτηση του εξοπλισμού σε μια κοιλότητα που θα είναι υπό πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής με την παρουσία ενός αδρανούς αερίου.

Σύνδεση και Γείωση

Οι κινητές μονάδες παροχής υδρογόνου πρέπει να συνδεθούν ηλεκτρικά με το σύστημα πριν εκκρίνει το υδρογόνο σύμφωνα με τους κανονισμούς.

Οι δεξαμενές υγρού υδρογόνου, στατικές και κινητές και οι σχετικές σωληνώσεις θα πρέπει να συνδεθούν ηλεκτρικά και να γειωθούν χρησιμοποιώντας κατάλληλα μεγέθη επαφών γείωσης και αποδεκτές συνδέσεις βασιζόμενοι στο αναμενόμενο δυναμικό του εδάφους.

Όλες οι μη φόρτωσης εγκαταστάσεις πρέπει να παρέχουν εύκολα προσβάσιμες συνδέσεις γείωσης και να είναι τοποθετημένες έξω από την άμεση περιοχή μεταφοράς. Οι συνδέσεις της γείωσης της εγκατάστασης πρέπει να έχουν αντιστάσεις μικρότερες των 10 Ohm. Τα μέρη του υποσυστήματος μεταφοράς πρέπει να γειωθούν πριν τα υποσυστήματα συνδεθούν.

Γραμμές μεταφοράς Υδρογόνου

Οι γραμμές μεταφοράς υδρογόνου που μεταφέρουν υδρογόνο από δοχεία και δεξαμενές πρέπει να είναι τοποθετημένες πάνω από το έδαφος. Οι γραμμές που περνούν δρόμους πρέπει να είναι τοποθετημένες σε κανάλια μπετού που καλύπτονται με δικτυωτό κάλυμα και δεν θα πρέπει να είναι τοποθετημένες κάτω από ηλεκτρικά καλώδια. Οι επιφάνειες που είναι κάτω από γραμμές υδροποιημένου υδρογόνου από τις οποίες κορεσμένος υγρός αέρας μπορεί να πέσει πρέπει να κατασκευαστούν από μη εύφλεκτα υλικά όπως μπετόν. Η ασφαλτος δεν πρέπει να χρησιμοποιείται.

Εξάλειψη των πηγών Ανάφλεξης

Οι εγκαταστάσεις χρησιμοποιώντας υδρογόνο πρέπει να προστατεύονται από λάμπες από τις ράβδους φωτισμού, καλώδια κεραιών και ράβδους στο έδαφος που πρέπει να είναι κατάλληλα συνδεδεμένα. Όλος ο εξοπλισμός πρέπει να είναι γειωμένος για πρόληψη σπινθήρων.

Ο στατικός ηλεκτρισμός μπορεί να δημιουργηθεί από μετακίνηση ιμάντων μηχανισμών ή από ρέοντα ρευστά που περιέχουν στερεά ή υγρά σωματίδια. Τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για εξάλειψη της παραγωγής ηλεκτροστατικής φόρτισης περιλαμβάνουν:

- Σύνδεση και γείωση όλων των μεταλλικών μερών μέσα στο όλο σύστημα
- Χρήση αγώγιμων ιμάντων εξοπλισμού
- Τα ρούχα του προσωπικού να είναι φτιαγμένα από αντιστατικές ίνες
- Χρήση αγώγιμων και μη-επιτροπής σπινθήρων πατωμάτων στους χώρους εργασίας.

Οι σπινθήρες μπορούν να δημιουργηθούν από άλλους μηχανισμούς όπως η τριβή και η κρούση. Ακόμα και ανθεκτικά σε σπινθήρες εργαλεία μπορεί να δημιουργήσουν σπινθήρες λόγω της μικρής ενέργειας που απαιτείται για ανάφλεξη εύφλεκτων μιγμάτων υδρογόνου-αέρα. Έτσι, εργαλεία ανθεκτικά σε σπινθήρες πρέπει να χρησιμοποιούνται και επιπλέον πρέπει να χρησιμοποιούνται με πρόληψη όλων των ενεργειών όπως ρίψεις στο πάτωμα κ.α. που μπορεί να δημιουργήσουν σπινθήρες.

Θερμά αντικείμενα και Φλόγες

Τα μέτρα για την εξάλειψη έναυσης από φλόγες και θερμά αντικείμενα και πρόληψη εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς σε άλλες περιοχές περιλαμβάνουν απαγόρευση ανοικτών φλογών, κολλήσεις ή κατεργασίες υλικών μέσα στην περιοχή γύρω από εγκατάσταση υδρογόνου, εξοπλισμό συστημάτων καύσης με τη χρήση συστημάτων δέσμευσης σπινθήρων και φλογών. Μόνο δεσμευτές φλογών ειδικά σχεδιασμένες για εφαρμογές υδρογόνου πρέπει να χρησιμοποιούνται λαμβάνοντας υπόψη τον παρόντα οξειδωτή. Οι δεσμευτές φλόγας μπορούν να σβήσουν μια φλόγα στη βάση της επαρκούς μεταφοράς θερμότητας από το αέριο μίγμα. Οι δεσμευτές πρέπει να τοποθετηθούν σωστά για ελαχιστοποίηση των ατυχηματικών αναφλέξεων επειδή πολλά ατυχήματα έχουν προκληθεί από ελλιπή συντήρηση και τοποθέτηση των συσκευών ασφαλείας.

Σχεδιασμός και κατασκευή κτιρίων

Τα κτίρια στα οποία το υδρογόνο χρησιμοποιείται πρέπει να είναι κατασκευασμένα από ελαφρά και μη αναφλέξιμα υλικά σε ένα αρκετά στιβαρό σκελετό στήριξης. Τα πατώματα, οι τοίχοι και τα ταβάνια πρέπει να σχεδιαστούν και εγκατασταθούν για να μειώσουν τη δημιουργία και συσσώρευση στατικού ηλεκτρισμού και να έχουν μια τιμή αντίστασης στην φωτιά τουλάχιστον 2h.

Ο εξαερισμός έκρηξης πρέπει να παρέχεται μόνο σε εξωτερικά τοιχώματα ή στην οροφή. Η περιοχή αυτή εξαερισμού δεν θα πρέπει να είναι $<0.1\text{m}^2/\text{m}^3$ του όγκου του δωματίου. Οι εξαερισμοί που σχεδιάζονται να ανακουφίζουν σε μέγιστη εσωτερική πίεση των περίπου 1.5kPa πρέπει να αποτελούνται από ένα ή συνδυασμό τοιχωμάτων από ελαφρύ υλικό, ελαφρά συνδεδεμένα καλύμματα ή με εξωτερικές πόρτες που ανοίγουν εύκολα σε εξωτερικούς τοίχους ή την οροφή.

Οι εγκαταστάσεις δοκιμών (καυστήρες, δωμάτια κ.α.) πρέπει να είναι κατασκευασμένες έτσι ώστε να καλύπτουν συγκεκριμένους κανονισμούς και οδηγίες. Τα δωμάτια δοκιμών που δεν αερίζονται ικανοποιητικά για πρόληψη κινδύνων έκρηξης πρέπει να παρέχονται με μια αδρανή ατμόσφαιρα αζώτου, διοξειδίου του άνθρακα, ηλίου, ατμού ή άλλου αδρανούς αερίου. Η πίεση του δωματίου δοκιμών πρέπει να είναι υψηλότερα από την ατμοσφαιρική για αποφυγή εισροή αέρα. Ο σχεδιασμός του συστήματος πρέπει να προλαμβάνει ασφυξία του προσωπικού σε παρακείμενες περιοχές. Ο σχεδιασμός του συστήματος πρέπει να προλαμβάνει την είσοδο του προσωπικού στο δωμάτιο εκτός και οι συνθήκες του περιορισμένου χώρου είναι ασφαλείς.

Σε περιοχές αποκλεισμού πρέπει να τοποθετηθούν πινακίδες, έτσι ώστε το προσωπικό να είναι ενήμερο από τη πιθανότητα κινδύνου σε αυτές τις περιοχές. Τα συστήματα αερίου υδρογόνου πρέπει μόνιμα να έχουν πινακίδες ως εξής:

ΥΔΡΟΓΟΝΟ-ΕΥΦΛΕΚΤΟ ΑΕΡΙΟ-ΟΧΙ ΚΑΠΝΙΣΜΑ-ΟΧΙ ΑΝΟΙΚΤΕΣ ΦΛΟΓΕΣ

Τα συστήματα υγροποιημένου υδρογόνου πρέπει να έχουν προστατευτικά κιγκλιδώματα και μόνιμα να έχουν πινακίδες για πρόληψη εισόδου προσωπικού χωρίς σχετική έγκριση ως εξής:

ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ-ΕΥΦΛΕΚΤΟ ΑΕΡΙΟ-ΟΧΙ ΚΑΠΝΙΣΜΑ-ΟΧΙ ΑΝΟΙΚΤΕΣ ΦΛΟΓΕΣ

Ο μέγιστος αριθμός των εργαζομένων και αυτών που επιτρέπεται να μεταβαίνουν σε τέτοιους χώρους πρέπει να είναι ανακοινωμένος σε εμφανές σημείο σε όλα τα σχετικά κτίρια, δωμάτια δοκιμών και περιοχές αποθήκευσης υγροποιημένου υδρογόνου. Οι ντουζιέρες ασφαλείας πρέπει να έχουν πινακίδα ως:

ΟΧΙ ΧΡΗΣΗ ΓΙΑ ΘΕΡΑΠΕΙΑ ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΩΝ ΕΓΚΑΥΜΑΤΩΝ

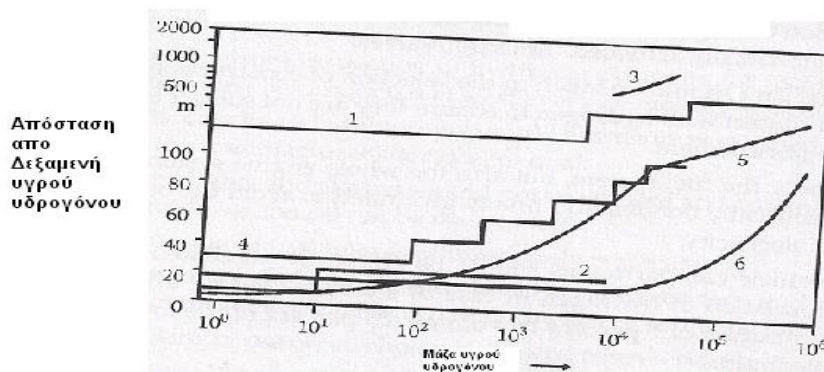
Τα προστατευτικά κιγκλιδώματα είναι κατασκευασμένα να προστατεύουν μη ελεγχόμενες περιοχές από τα αποτελέσματα αστοχίας συστήματος υδρογόνου και να προστατεύουν ένα σύστημα υδρογόνου από κινδύνους παρακείμενων ή κοντινών

διαδικασιών. Τα δοχεία πίεσης, οι σωληνώσεις και τα συστατικά στοιχεία σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο που η αποτυχία που προκαλείται από την υπερπίεση ή αστοχίες υλικού να μην προκαλέσει βλήσεις υλικών. Τα προστατευτικά κιγκλιδώματα πρέπει να κατασκευαστούν παρακείμενα στην πηγή που αναμένονται βλήσεις υλικών και σε ευθεία γραμμή θέασης μεταξύ αυτής της περιοχής και της εγκατάστασης που προστατεύεται, επειδή είναι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος προστασίας από τέτοια γεγονότα.

Η προστασία από βλήσεις υλικών μπορεί να επιτευχθεί από κουρτίνες βλήσεων ή επιφάνειες εκρήξεων που τοποθετούνται παρακείμενα του εξοπλισμού που προστατεύεται. Η απόδοση των φραγμάτων εξαρτάται από το ύψος πάνω από το έδαφος, τη θέση τοποθέτησης, τις κατάλληλες διαστάσεις και την διαμόρφωσή του. Επίσης τα προστατευτικά κιγκλιδώματα και φράγματα βλήσεων μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις μέγιστες υπερπίεσεις και δονήσεις πίσω τους αλλά όχι κρουστικά κύματα.

4.3 Σχέση Ποσότητας-Απόστασης

Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για προσδιορισμό των μαθηματικών σχέσεων ποσότητας-απόστασης μεταξύ εγκαταστάσεων αποθήκευσης LH₂ και άλλων κοντινών κτιρίων σε διάφορες χώρες αλλά τα αποτελέσματα παρουσιάζουν μεγάλη αβεβαιότητα λόγω των διαφορετικών παραδοχών που έχουν γίνει. Ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας έλαβε πολλές από αυτές τις διαφορετικές προσεγγίσεις και τις εμφάνισε σαν γραφήματα όπως στην Εικόνα 4.1.



- 1: Οδηγία Υπ. Αμυνας των ΗΠΑ
- 2: NFPA
- 3: Εγχειρίδιο Αμερικάνικου στρατού
- 4: Ινστιτούτο Ορυκτών ΗΠΑ
- 5: Γερμ. Υπουργείο εσωτερικών (για πυρηνικές μονάδες) για υγροποιημένα αέρια.
- 6: Νομοθεσία ελέγχου υψηλής πίεσης αερίου, Ιαπωνία

Εικόνα 4.1: Αποστάσεις ασφαλείας δεξαμενών LH₂ από παρακείμενα κτίρια σαν συνάρτηση της μάζας του σε διάφορες χώρες και οργανισμούς.

Πολλές προσπάθειες για προσδιορισμό της σχέσης ποσότητας-απόστασης έχουν οδηγήσει στον λεγόμενο νόμο κυβικής ρίζας. Αυτός ο νόμος σχετίζει τη μάζα ενός εύφλεκτου συστατικού με την απόσταση για προσδιορισμό της ασφαλούς απόστασης και εκφράζεται από την απλή εξίσωση:

$$R = k * M^{1/3} \quad (4.1)$$

Όπου: το R είναι η απόσταση από μια μάζα M ενός εύφλεκτου υλικού σε Kg.

Ο παράγοντας k εξαρτάται από τον τύπο του κτιρίου που προστατεύεται. Σύμφωνα με τους Γερμανικούς κανονισμούς που αρκετοί ακολουθούν αυτός ο παράγοντας παίρνει τιμές από 2.5-8 για κτίρια εργασίας, 22 για κτίρια διαμονής ανθρώπων και 200 για υπόθεση μη ζημιάς. Ο παράγοντας k πρέπει να ρυθμίζεται και από άλλες παραμέτρους εάν προστατευτικά μέτρα σαν κάλυψη γής ή προστατευτικά τοιχώματα έχουν ληφθεί.

4.4 Τροφοδοσία οχημάτων με υδρογόνο

A) Συστήματα συμπιεσμένου Υδρογόνου σε οχήματα

Σχεδιασμός οχήματος: Για λόγους ασφαλείας τα οχήματα που τροφοδοτούνται με υδρογόνο πρέπει να έχουν πινακίδες μορφής διαμαντιού που να γράφουν “Συμπιεσμένο Υδρογόνο=Compressed Hydrogen”. Οι πινακίδες πρέπει να είναι ορατές από 15m σε φώς ημέρας. Η πίεση του αερίου πρέπει να μειώνεται σταδιακά σε τρία στάδια: σύστημα αποθήκευσης καυσίμου (έως 345 bar), κύκλωμα πίεσης κίνησης (έως 12 bar) και κύκλωμα χαμηλής πίεσης (έως 1 bar). Το σύστημα πρέπει να είναι εξοπλισμένο με κατάλληλες συσκευές ανακούφισης, βαλβίδες μόνωσης και κατανεμητές ροής.

Ένας συντελεστής ασφαλείας ίσος με τρία προτείνεται για όλο το σύστημα αερίου σύμφωνα με τους κανονισμούς NFPA για οχήματα που κατασκευάζονται και διακινούνται από και προς τις ΗΠΑ από όλους τους κατασκευαστές.

Επιπλέον πολλές προτάσεις πρέπει να ακολουθούνται σύμφωνα με τις σχετικές οδηγίες και προτάσεις από οργανισμούς σχετικούς με τη χρήση του υδρογόνου.

Κάποιες από αυτές είναι:

- Οι κύλινδροι του καυσίμου πρέπει να είναι μαρκαρισμένοι μόνιμα με τη λέξη “Υδρογόνο” και να είναι σωστά τοποθετημένα και προστατευμένα από τις ακαθαρσίες του δρόμου.

- Όλοι οι κύλινδροι πρέπει να είναι εξοπλισμένοι με PRD (pressure relief devices = συσκευές ανακούφισης πίεσης) και TRD (thermal relief devices = συσκευές θερμικής ανακούφισης) και χειροκίνητες βαλβίδες κλεισίματος.
- Η μόνωση των κυλίνδρων από το υπόλοιπο σύστημα πρέπει να γίνεται με ηλεκτρικά ενεργοποιούμενες “ασφάλειας αποτυχίας=fail safe” βαλβίδες.
- Ειδική φροντίδα πρέπει να ληφθεί στην επιλογή των υλικών κατασκευής σε επαφή με το υδρογόνο για διασφάλιση ότι δεν είναι εφικτή η ψαθυρότητα υδρογόνου.
- Όλο το σύστημα και τα παρελκόμενά του πρέπει να είναι ηλεκτρικά μονωμένο και γειωμένο για αποφυγή πρόκλησης στατικού ηλεκτρισμού
- Όλα τα μέρη του οχήματος πρέπει να αερίζονται ικανοποιητικά για αποφυγή συσσώρευσης υδρογόνου σε περίπτωση διαρροής που ξεπερνά τη συγκέντρωση υδρογόνου του 1% κ.ο. (25% του LFL).
- Αισθητήρες υδρογόνου πρέπει να τοποθετηθούν στο όχημα και να συνδεθούν σωστά στο σύστημα ελέγχου του οχήματος για ενεργοποίηση συναγερμού και αυτόματου συστήματος σβησίματος όταν η συγκέντρωση του υδρογόνου ξεπερνά το 1-2% κ.ο.
- Ένα αυτόματο σύστημα σβέσης πρέπει να εγκατασταθεί έτσι ώστε να ενεργοποιείται με την ανίχνευση διαρροής υδρογόνου, υπερβάλλουσα ροή ρευστού, κρούση οχήματος ή άλλο σφάλμα του συστήματος.
- Ο χρήστης του οχήματος πρέπει να έχει εύκολη προσβασιμότητα σε διακόπτη on/off επιτρέποντας το κλείσιμο του συστήματος κελιού καυσίμου, διακοπή της ισχύος, απενεργοποιώντας τον εξοπλισμό υψηλής τάσης και της παροχής καυσίμου.
- Όταν χρειάζεται, ο αερισμός του οχήματος πρέπει να γίνεται με μια έξοδο στο πάνω μέρος του οχήματος.

Λειτουργία και συντήρηση: Όλοι οι χειριστές οχημάτων με τροφοδοσία συμπιεσμένου υδρογόνου θα πρέπει να λάβουν ειδική εκπαίδευση στους κινδύνους του υδρογόνου και αντίδρασης ανάγκης. Αυτοί που ασχολούνται με τη συντήρηση δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούν μη αποδεκτά ανταλλακτικά μέρη. Μέρη που προορίζονται να χρησιμοποιούνται για το φυσικό αέριο δεν θα πρέπει να

χρησιμοποιούνται για τα συστήματα υδρογόνου. Ειδική προσοχή απαιτείται για έλεγχο κάθε πιθανής διαρροής. Επιπλέον:

- Οι τεχνικοί συντήρησης δεν θα πρέπει να χαλαρώνουν τις ενώσεις κάτω από την πίεση του υδρογόνου ή να σφίγγουν τις ενώσεις πάνω από τα όρια που προσδιορίζονται από τους κατασκευαστές.
- Οπτική επιθεώρηση των κυλίνδρων του υδρογόνου για φθορές πρέπει να γίνεται κάθε 36 μήνες ή 58.000 Km.
- Περιοδικοί έλεγχοι και ρυθμίσεις θα πρέπει να γίνονται σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή.
- Φώτα ειδοποίησης και συναγερμοί δεν θα πρέπει να αγνοούνται και αυτόματα συστήματα σβέσης δεν θα πρέπει να παραβιάζονται.
- Δεν επιτρέπεται επισκευή γραμμών καυσίμου, μόνο αντικατάσταση.
- Απομόνωση του συστήματος καυσίμου, αποσύνδεση της μπαταρίας και απενεργοποίηση του κυρίου διακόπτη είναι υποχρεωτική πριν τη συντήρηση του αυτοκινήτου.
- Απαγόρευση καπνίσματος και χρήσης κινητού τηλεφώνου κατά τη διάρκεια της συντήρησης.
- Η εσωτερική πίεση των κυλίνδρων υδρογόνου πρέπει πάντα να παραμένουν πάνω από την ατμοσφαιρική πίεση, εάν όχι, απόπλυση με άζωτο είναι απαραίτητη πριν την τροφοδοσία με υδρογόνο.

B) Συστήματα υγρού υδρογόνου

Σχεδιασμός οχήματος: Για λόγους ασφαλείας τα οχήματα που τροφοδοτούνται με υδρογόνο πρέπει να έχουν πινακίδες μορφής διαμαντιού που να γράφουν “Υγρό Υδρογόνο=Liquid Hydrogen”. Οι πινακίδες πρέπει να είναι ορατές από 15m σε φώς ημέρας. Οι κρυογενικές δεξαμενές πρέπει να έχουν τη λέξη Υδρογόνο που να είναι σε εμφανές σημείο και προστατευμένη από φθορές πάσης φύσεως. Σε απουσία κανονισμών πιστοποίησης για δεξαμενές υγρού υδρογόνου, τουλάχιστον να εφαρμόζονται τα υπάρχοντα πρότυπα για το LNG όσον αφορά το υγρό υδρογόνο (περιλαμβάνοντας δοκιμές με φλόγες και πτώσεις).

Επιπλέον πολλές προτάσεις πρέπει να ακολουθούνται σύμφωνα με τις σχετικές οδηγίες και προτάσεις από οργανισμούς σχετικούς με τη χρήση του υδρογόνου. Κάποιες από αυτές είναι:

- Οι κρυογενικές δεξαμενές πρέπει να είναι εξοπλισμένες με βαλβίδα ανακούφισης πίεσεως που η έξοδος της πρέπει να αδειάζει σε έναν διαχύτη υδρογόνου
- Μια βαλβίδα κλεισίματος πρέπει να εγκατασταθεί στο όχημα για απομόνωση της δεξαμενής υδρογόνου από το υπόλοιπο σύστημα καυσίμου.
- Μια συσκευή μέτρησης του επιπέδου στάθμης πρέπει να εγκατασταθεί σε κάθε κρυογενική δεξαμενή με ένδειξη στην καμπίνα του οδηγού και μια ένδειξη πίεσης αναγνώσιμη κοντά στη δεξαμενή.
- Κάθε κρυογενική δεξαμενή πρέπει να εξοπλιστεί με τουλάχιστον μία ηλεκτρικά ενεργοποιούμενη βαλβίδα απομονώνοντας την δεξαμενή από το υπόλοιπο σύστημα καυσίμου. Αυτές οι βαλβίδες πρέπει να είναι του τύπου “ασφάλειας αποτυχίας=fail safe”.
- Οι γραμμές καυσίμου δεν πρέπει να περνούν από την καμπίνα των επιβατών.
- Ειδική φροντίδα πρέπει να ληφθεί στην επιλογή των υλικών κατασκευής σε επαφή με το υδρογόνο για διασφάλιση ότι δεν είναι εφικτή η ψαθυρότητα υδρογόνου.
- Αισθητήρες υδρογόνου πρέπει να τοποθετηθούν στο όχημα και να συνδεθούν σωστά στο σύστημα ελέγχου του οχήματος για ενεργοποίηση συναγερμού και αυτόματου συστήματος σβησίματος όταν η συγκέντρωση του υδρογόνου ξεπερνά το 1-2% κ.ο.
- Βαλβίδες περίσσειας ροής πρέπει να εγκατασταθούν στο όχημα παρέχοντας τη δυνατότητα σταματήματος της ροής καυσίμου όταν η ροή ξεπεράσει την τιμή κατωφλίου ρύθμισης.
- Το όχημα υγρού υδρογόνου πρέπει να είναι εξοπλισμένο με έναν αισθητήρα κρούσης που αυτόματα θα σταματήσει το όχημα σε περίπτωση κρούσης. Θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα να μπορεί για μικρό χρονικό διάστημα να επιτρέψει τη λειτουργία έτσι ώστε να μπορεί να εξέλθει του αυτοκινητόδρομου ή άλλου σημείου προς αποφυγή καταστροφής σε μεγαλύτερο επίπεδο.
- Όλο το σύστημα και τα παρελκόμενά του πρέπει να είναι ηλεκτρικά μονωμένο και γειωμένο για αποφυγή πρόκλησης στατικού ηλεκτρισμού
- Όλα τα μέρη του οχήματος πρέπει να αερίζονται ικανοποιητικά για αποφυγή συσσώρευσης υδρογόνου σε περίπτωση διαρροής που ξεπερνά τη συγκέντρωση υδρογόνου του 1% κ.ο. (25% του LFL).

- Ένα αυτόματο σύστημα σβέσης πρέπει να εγκατασταθεί έτσι ώστε να ενεργοποιείται με την ανίχνευση διαρροής υδρογόνου, υπερβάλλουσα ροή ρευστού, κρούση οχήματος ή άλλο σφάλμα του συστήματος.
- Ο χρήστης του οχήματος πρέπει να έχει εύκολη προσβασιμότητα σε διακόπτη on/off επιτρέποντας το κλείσιμο του συστήματος κελιού καυσίμου, διακοπή της ισχύος, απενεργοποιώντας τον εξοπλισμό υψηλής τάσης και της παροχής καυσίμου.
- Όταν χρειάζεται, ο αερισμός του οχήματος πρέπει να γίνεται με μια έξοδο στο πάνω μέρος του οχήματος.

Λειτουργία και συντήρηση: Όλοι οι χειριστές οχημάτων με τροφοδοσία υγρού υδρογόνου θα πρέπει να λάβουν ειδική εκπαίδευση στους κινδύνους του υδρογόνου και αντίδρασης ανάγκης. Αυτοί που ασχολούνται με τη συντήρηση δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούν μη αποδεκτά ανταλλακτικά μέρη. Μέρη που προορίζονται να χρησιμοποιούνται για το φυσικό αέριο δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για τα συστήματα υδρογόνου. Ειδική προσοχή απαιτείται για έλεγχο κάθε πιθανής διαρροής. Επιπλέον:

- Οι τεχνικοί συντήρησης δεν πρέπει ποτέ να εργάζονται σε σύστημα υγρού υδρογόνου χωρίς την χρήση προστατευτικού εξοπλισμού ένδυσης.
- Οι τεχνικοί συντήρησης δεν θα πρέπει να χαλαρώνουν τις ενώσεις κάτω από την πίεση του υδρογόνου ή να σφίγγουν τις ενώσεις πάνω από τα όρια που προσδιορίζονται από τους κατασκευαστές.
- Δεν θα πρέπει ποτέ να επηρεάζουν την μόνωση των γραμμών υγρού υδρογόνου ή τις κρυογενικές δεξαμενές που περιέχουν υγρό υδρογόνο.
- Δεν θα πρέπει να επιτρέπουν την είσοδο αέρα σε κάθε μέρος του συστήματος υδρογόνου. Εάν αυτό συμβεί, τότε ήλιο θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για εκκαθάριση πριν την επανατροφοδοσία. Αζωτο δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα υγρού υδρογόνου λόγω της πιθανής υγροποίησεως και μετά στερεοποίησεως όταν έρθει σε επαφή με υγρό υδρογόνο με αποτέλεσμα το μπλοκάρισμα γραμμών και βαλβίδων.
- Περιοδικοί έλεγχοι και ρυθμίσεις θα πρέπει να γίνονται σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή.

- Φώτα ειδοποίησης και συναγερμοί δεν θα πρέπει να αγνοούνται και αυτόματα συστήματα σβέσης δεν θα πρέπει να παραβιάζονται.
- Δεν επιτρέπεται επισκευή γραμμών καυσίμου, μόνο αντικατάσταση.
- Απομόνωση του συστήματος καυσίμου, αποσύνδεση της μπαταρίας και απενεργοποίηση του κυρίου διακόπτη είναι υποχρεωτική πριν τη συντήρηση του αυτοκινήτου.
- Απαγόρευση καπνίσματος και χρήσης κινητού τηλεφώνου κατά τη διάρκεια της συντήρησης.

B) Οδηγίες για εγκαταστάσεις τροφοδοσίας υδρογόνου

Οι σταθμοί τροφοδοσίας θεωρείται ότι είναι σχεδιασμένες, κατασκευασμένες και λειτουργούν λαμβάνοντας υπόψη τις επικίνδυνες ιδιότητες του υδρογόνου και σύμφωνα με σύγχρονους κώδικες, πρότυπα και κανονισμούς σε κάθε χώρα.

Τροφοδοσία συμπιεσμένου υδρογόνου

Η εμπειρία από τους διανεμητές καυσίμου συμπιεσμένου φυσικού αερίου είναι χρήσιμη για την ανάπτυξη των διανεμητών καυσίμου συμπιεσμένου υδρογόνου επειδή είναι παρόμοια. Η κύρια διαφορά είναι στη παροχή του αερίου καυσίμου, οι σταθμοί του καυσίμου Φυσικού Αερίου συνήθως παρέχονται με αέριο από σωληνώσεις όπου οι σταθμοί αερίου καυσίμου υδρογόνου είναι εφοδιασμένες με σωλήνες σε τροχήλατα οχήματα που σύρονται από φορτηγά (εικόνα 4.2).

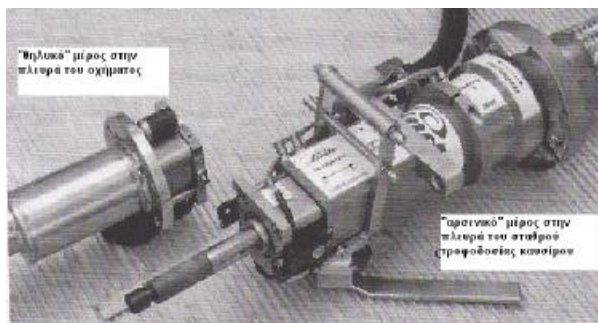


Εικόνα 4.2: Όχημα μεταφοράς σωλήνων υδρογόνου.

Το σύστημα τροφοδοσίας για συμπιεσμένο υδρογόνο αποτελείται από ένα ζεύγος στομιών που δίνει στο ένα από την παροχή στο άλλο στο όχημα. Ασφαλιζονται μαζί με τη χρήση μοχλού (εικόνα 4.3 και εικόνα 4.4).

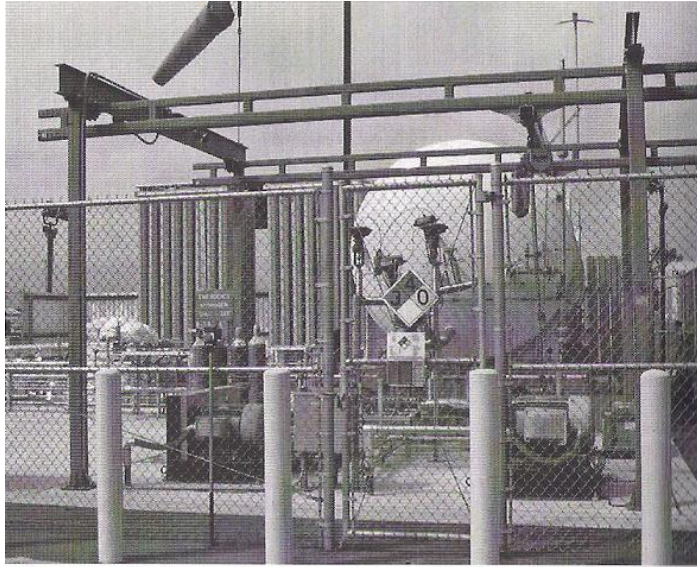


Εικόνα 4.3: Στόμιο συμπιεσμένου καυσίμου υδρογόνου.



Εικόνα 4.4: Στόμιο τροφοδοσίας υγρού υδρογόνου και στόμιο καυσίμου οχήματος.

Όταν υγρό υδρογόνο παρέχεται στον σταθμό τροφοδοσίας, ένας ατμοποιητής χρειάζεται να εγκατασταθεί επίσης. Αυτός είναι βασικά ένας εναλλάκτης θερμότητας που ατμοποιεί το υγρό υδρογόνο και αυξάνει τη θερμοκρασία του τελικού αερίου στη θερμοκρασία περιβάλλοντος εάν το υδρογόνο πρέπει να διανεμηθεί σε αέρια μορφή (εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.5: Δεξαμενή αποθήκευσης υγρού υδρογόνου και ατμοποιητής.

Σχεδιασμός: Όπως στην περίπτωση με όλα τα αναφλέξιμα αέρια και ατμούς, οι σταθμοί καυσίμου υδρογόνου είναι τοποθετημένοι εξωτερικά σε ανοικτό περιβάλλον έτσι ώστε ότι αέρια απελευθερώνονται να μπορούν εύκολα και ασφαλώς να διασπαρθούν στον αέρα. Κάθε κατασκευή πρέπει να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο που καμία συλλογή και συσσώρευση αερίου να μην επιτρέπεται. Έτσι, π.χ. εάν η εγκατάσταση έχει θόλο, αυτός θα κατασκευαστεί με κλίσεις προς τα πάνω (εικόνα 4.6).



Εικόνα 4.6: Σταθμός τροφοδοσίας συμπιεσμένου υδρογόνου.

Γενικά, μέτρα πρέπει να λαμβάνονται για προστασία του σταθμού από ζημιές που προκαλούνται από οχήματα, το κοινό και άλλες κοντινές δραστηριότητες. Σύμφωνα με ισχύουσες διεθνείς οδηγίες, η ελάχιστη απόσταση κάθε στοιχείου από τους σταθμούς τροφοδοσίας από άλλα κτίρια ή δημόσιους δρόμους είναι τουλάχιστον 3m.

Άλλες προτάσεις είναι:

- Μέτρα με ειδικές συσκευές που σταματούν την τροφοδοσία του καυσίμου πρέπει να ληφθούν για πρόληψη ατυχηματικής ή σκόπιμης κίνησης οχήματος με συνδεδεμένο τον σωλήνα παροχής.
- Ηλεκτρικός Εξοπλισμός με αντοχή στις εκρήξεις πρέπει να εγκαθίσταται πάντα και όλα τα συστατικά μέρη του αγωγού παροχής να είναι συνδεδεμένα και γειωμένα. Το όχημα πρέπει επίσης να είναι γειωμένο συνήθως μέσω του αγωγού τροφοδοσίας.
- Θερμαντήρες ανοικτής φλόγας δεν είναι επιτρεπτοί στους σταθμούς τροφοδοσίας. Ζεστός αέρας, ατμός ή ζεστό νερό πρέπει να χρησιμοποιείται για έμμεση θέρμανση.
- Το σύστημα τροφοδοσίας πρέπει να έχει πρόβλεψη για έλεγχο της τελικής πίεσης, έτσι ώστε μην ξεπεράσει την ρυθμισμένη πίεση και για τη μη επιτροπή τροφοδοσίας εάν η πίεση μέσα στις δεξαμενές του οχήματος είναι μικρότερη από την κανονική ατμοσφαιρική πίεση. Το τελευταίο δείχνει ότι μάλλον αέρας εισήλθε στη δεξαμενή και έτσι υπάρχει η πιθανότητα ενός εκρηκτικού μίγματος να έχει δημιουργηθεί μέσα στη δεξαμενή.
- Όλες οι δεξαμενές αποθήκευσης πρέπει να εξοπλιστούν με PRD (pressure relief devices = συσκευές ανακούφισης πίεσης) και TRD (thermal relief devices = συσκευές θερμικής ανακούφισης) και χειροκίνητες βαλβίδες κλεισίματος.
- Ο εξοπλισμός του σταθμού τροφοδοσίας πρέπει να έχει συστήματα σταματήματος κινδύνου και αισθητήρες υδρογόνου περιλαμβάνοντας αισθητήρες υπεριώδους φλόγας για ανίχνευση φλογών στη γειτνίαση με τον διανεμητή του καυσίμου. Αυτόματο σταμάτημα πρέπει να συμβεί όταν η συγκέντρωση του υδρογόνου στον αέρα είναι περισσότερη από 1% κ.ο.
- Πυροσβεστήρες ξηρής σκόνης πρέπει να είναι διαθέσιμοι στο σταθμό υδρογόνου για καταπολέμηση της φωτιάς.
- Επιγραφές στο σταθμό καυσίμου πρέπει να θυμίζουν στους πελάτες την πρόπουσα συμπεριφορά σε κάθε περιοχή του σταθμού, όπως και τις απαραίτητες ενέργειες σε περίπτωση ανάγκης.

Λειτουργία και συντήρηση: Όλο το προσωπικό του σταθμού τροφοδοσίας υδρογόνου θα πρέπει να λάβουν ειδική εκπαίδευση στους κινδύνους του υδρογόνου, στα λειτουργικά χαρακτηριστικά των σταθμών και αντίδρασης ανάγκης.

Όλες οι δραστηριότητες που μπορεί να οδηγήσουν στη δημιουργία σπινθήρων, φλογών ή θερμών σημείων όπως κάπνισμα, χρήση κινητών τηλεφώνων, κολλήσεις μετάλλων πρέπει να είναι απαγορευμένες σε αυτήν την περιοχή.

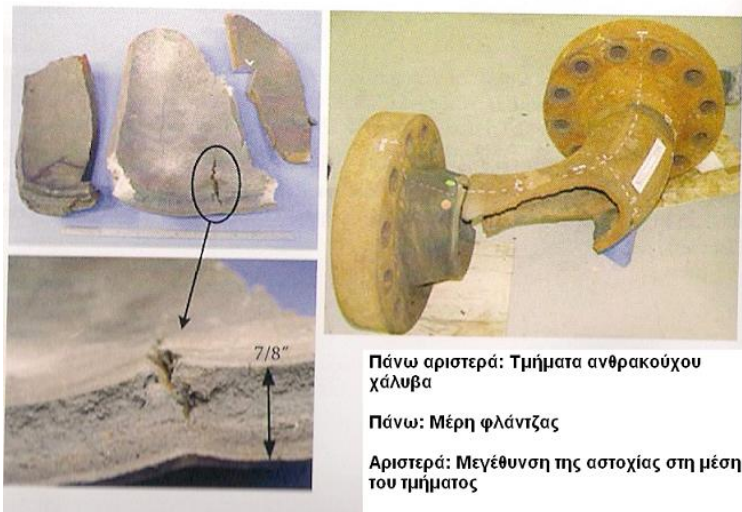
Ένα όχημα πρέπει να εφοδιάζεται μόνο όταν ο οδηγός έχει σταματήσει τη λειτουργία του οχήματος. Η συντήρηση του αυτοκινήτου δεν θα πρέπει να επιτρέπεται στους σταθμούς παροχής υδρογόνου και κάθε άλλη ενέργεια θα πρέπει να επιτρέπεται μόνο εάν πραγματοποιηθεί με εργαλεία μη πρόκλησης σπινθήρων.

Τουλάχιστον ετήσια συντήρηση του εξοπλισμού ανάγκης, όπως οι αισθητήρες φλογών και υδρογόνου, πρέπει να πραγματοποιείται σύμφωνα με τις οδηγίες των κατασκευαστών αυτών των συσκευών.

Φωτογραφίες που σχετίζονται με την αστοχία υλικών εγκαταστάσεων υδρογόνου και διαμορφώσεις εγκαταστάσεων παρουσιάζονται στις επόμενες εικόνες.



Εικόνα 4.7: Μπάλα φωτιάς υδρογόνου με ταχύτητα 170m/s μετά από θραύση δεξαμενής αποθήκευσης.



Εικόνα 4.8: Θραύση σωλήνα ανθρακούχου χάλυβα λόγω της προσβολής από υψηλής θερμοκρασίας υδρογόνου.



Εικόνα 4.9: Σταθμός τροφοδοσίας υγρού καυσίμου



Εικόνα 4.10: Έξοδος Αγωγού εξαερισμού σε σταθμό τροφοδοσίας υδρογόνου.

Κεφάλαιο 5^ο: Συστήματα διαχείρισης ασφάλειας

Ένα εργαλείο μηχανικού για βιομηχανική εφαρμογή είναι ένα σύστημα διαχείρισης ασφάλειας κατάλληλο για τους κινδύνους που παρουσιάζονται (ασφάλεια διαδικασίας, επαγγελματικός κίνδυνος, υγεία, περιβάλλον, δομική ακεραιότητα και κεφάλαια κ.α.). Τέτοια συστήματα διαχείρισης ασφάλειας αναγνωρίζονται και είναι αποδεκτά παγκοσμίως σαν μια πολύ καλή πρακτική μέθοδος για διαχείριση του κινδύνου. Αποτελούνται από 10-20 στοιχεία του προγράμματος που θα πρέπει επαρκώς να υποστηρίζονται για να διαχειρίζονται την ασφάλεια σε αποδεκτό τρόπο και επίπεδο. Αυτή η ανάγκη βασίζεται στην κατανόηση ότι όταν αναγνωριστεί ο κίνδυνος δεν πάει μακριά αλλά θα υπάρχει πάντα μια πιθανότητα ότι το δυσμενές περιστατικό θα συμβεί εκτός και αν το σύστημα διαχείρισης είναι ενεργοποιημένο και επιτηρεί τις λειτουργίες της εταιρίας και παίρνει μέτρα για να διορθώσει δυνητικά προβλήματα.

5.1 Εισαγωγή στα συστήματα διαχείρισης ασφάλειας

Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 1 για τις βασικές αιτίες που προκάλεσαν την έκρηξη του νέφους ατμού στην Πασαντένα στο Τέξας ήταν μαζί η έλλειψη μελέτης εκτίμησης κινδύνου και μια αποτελεσματικό σύστημα ελέγχου για τον έλεγχο των δραστηριοτήτων συντήρησης. Αυτοί οι παράγοντες ξεκάθαρα σχετίζονται με το σύστημα διαχείρισης ασφάλειας της εταιρίας που καθώς φάνηκε αφού δεν είχε τον έλεγχο της κίνησης των εργαζομένων ξεχωριστά. Αν και, δεν είναι ευχάριστο για τους εργαζόμενους στην βιομηχανία να ακολουθούν διαδικασίες ασφαλείας για συντηρήσεις και άλλες δραστηριότητες, είναι ευθύνη της διοίκησης να αναπτύξει τέτοιες διαδικασίες σε πρώτη ζήτηση και να διασφαλίσει ότι αυτές εφαρμόζονται και αναθεωρούνται όποτε χρειάζεται. Είναι καλά τεκμηριωμένο από τη σχετική θεωρία πρόκλησης ατυχημάτων ότι οι ελλείψεις των συστημάτων διαχείρισης είναι η αιτία πρόκλησης βιομηχανικών ατυχημάτων.

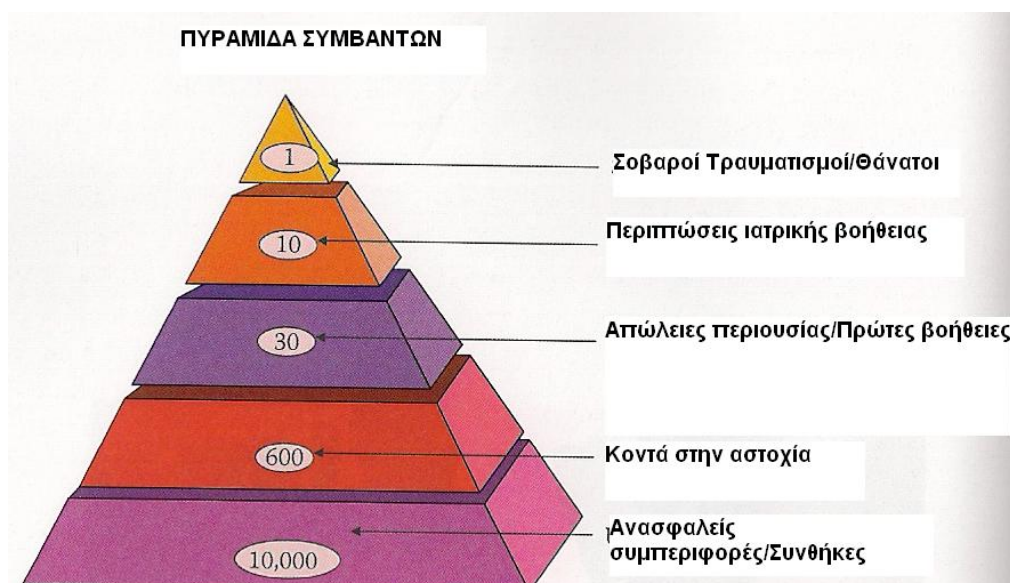
Έτσι, είναι μια αναγκαιότητα η προσέγγιση συστήματος διαχείρισης ασφάλειας στη βιομηχανία υδρογόνου, για την ακρίβεια αναγνωρίζεται και προτείνεται από σχετικούς διεθνείς οργανισμούς (π.χ. το τμήμα ενέργειας των ΗΠΑ (DOE)).

Στην ερώτηση ποια μορφή θα έχει αυτό το σύστημα, η απάντηση που δίνεται από ειδικούς του χώρου είναι ότι το κάθε τέτοιο σύστημα θα πρέπει να προσαρμοστεί στις ειδικές ανάγκες και κινδύνους και έτσι θα είναι εφαρμόσιμο και αποτελεσματικό.

Ανεξάρτητα εάν το σύστημα αφορά στην πρόληψη επαγγελματικών κινδύνων που σχετίζονται με άτομα ξεχωριστά ή γεγονότα διαδικασιών βιομηχανίας που είναι πιο ευρεία, κάποια χαρακτηριστικά θα είναι παρόμοια. Αρκετές μελέτες στο αντικείμενο περιγράφουν ένα σετ από συστατικά μέρη που είναι απαραίτητα και εφαρμόσιμα σε όλες τις περιοχές μέσα στο πεδίο ασφάλειας:

- Συνεχή βελτίωση
- Ανάπτυξη πολιτικής και υποστήριξη από έμπειρο προσωπικό διαχείρισης
- Προγραμματισμός (π.χ. ταυτοποίηση κινδύνου, εκτίμηση κινδύνου, έλεγχος κινδύνου)
- Εφαρμογή και λειτουργία (π.χ. ανάθεση υπευθυνότητας, εκπαίδευση, διαδικασίες ανάγκης και αντίδραση)
- Έλεγχοι και διορθωτικές κινήσεις (π.χ. έρευνα γεγονότος, ακρόαση)
- Επισκόπηση διαχείρισης

Συχνά αυτά τα σημεία έχουν αναφορά και τροφοδοτούν την λεγόμενη πυραμίδα συμβάντων όπως φαίνεται στην εικόνα 5.1. Πολλές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σε μεγάλο πεδίο βιομηχανιών και δραστηριοτήτων και έχουν προκύψει διαφορετικά σύνολα για τα επίπεδα της πυραμίδας αλλά γενικά οι ίδιοι λόγοι μεταξύ των επιπέδων προκύπτουν.



Εικόνα 5.1: Πυραμίδα συμβάντων

Η βασική ιδέα της πυραμίδας είναι ότι πραγματικά σοβαρά συμβάντα όπως θάνατοι συμβαίνουν σπάνια στους πιο πολλούς οργανισμούς στη σημερινή εποχή και δεν είναι πρακτικό να χρησιμοποιούμε αυτούς για επίβλεψη και βελτίωση του επιπέδου ασφαλείας και της αποτελεσματικότητας του οργανισμού-δεν είναι αρκετά αυτά τα συμβάντα να δείξουν πότε τα πράγματα γίνονται καλύτερα ή χειρότερα στον οργανισμό. Όμως, είναι πρακτικό να κρατάμε τον μεγαλύτερο αριθμό των λιγότερο σοβαρών συμβάντων και να το χρησιμοποιούμε σαν μέτρηση απόδοσης.

Η πυραμίδα είναι μια χρήσιμη ιδέα. Όμως υπάρχει κάποιο πρόβλημα που συχνά αμελείται από τους ειδικούς ασφαλείας σε μια εταιρία. Το πρόβλημα είναι ότι οι συνθήκες που οδήγησαν σε σοβαρά ατυχήματα –αυτά που είχαν σαν αποτέλεσμα θάνατο ή σοβαρό τραυματισμό- μπορεί να μην αναγνωριστούν με το να εστιάζουμε στο κάτω μέρος της πυραμίδας, κάτι το οποίο μπορεί να γίνει μια σοβαρή παράμετρος λάθους και έτσι να μην μας βοηθήσει αλλά να μας απροσανατολίσει.

Ο πίνακας 5.1 μας δείχνει τα στοιχεία ενός σχεδίου ασφαλείας που εφαρμόζεται διεθνώς σε μεγάλες εγκαταστάσεις χρήσης, παραγωγής, διανομής υδρογόνου.

Πίνακας 5.1: Στοιχεία σχεδίου ασφαλείας για εγκαταστάσεις υδρογόνου και δοκιμές κελιών καυσίμου

Αριθμός	Στοιχείο
1	Σκοπός της εργασίας
2	Πληροφορίες ασφάλειας του οργανισμού Πολιτική και διαδικασίες του οργανισμού Εμπειρία με υδρογόνο και κελιά καυσίμου
3	Ασφάλεια εφαρμογής Ταυτοποίηση κενών ασφαλείας Σχέδιο μείωσης κινδύνου Διαδικασίες λειτουργίας Εξοπλισμός και Μηχανική Ακεραιότητα Διαχείριση διαδικασιών αλλαγής Έγγραφα ασφάλειας εφαρμογής
4	Σχέδιο επικοινωνίας Εκπαίδευση εργαζομένων Αναθεωρήσεις ασφαλείας

	Γεγονότα ασφαλείας και αποκόμιση γνώσης Αντίδραση ανάγκης Ατομικές ακροάσεις
5	Έγκριση σχεδίου ασφαλείας
6	Άλλα σχόλια ή ανησυχίες

5.2 Διαχείριση κινδύνου διαδικασιών

Υπάρχουν πολλές τεχνικές που αναφέρονται σε οδηγούς διαχείρισης κινδύνου διαδικασίας για προσδιορισμό και εκτίμηση των κινδύνων περιλαμβάνοντας την ανάλυση τι-εάν (what-if (WI)), ανάλυση λίστας ελέγχου (checklist (CL)), μελέτη κινδύνου και λειτουργίας (Hazard-operability (HAZOP)), ανάλυση μορφών σφαλμάτων και αποτελέσματα (Failure modes-effects analysis (FMEA)), ανάλυση δέντρου αστοχιών (Fault Tree Analysis (FTA)), Δείκτης Πυρκαγιάς και έκρηξης Dow (Dow Fire-Explosion Index (F&EI)), Δείκτης χημικής έκθεσης (Chemical Exposure Index (CEI)), Προκαταρκτική ανάλυση κινδύνου (Preliminary hazard analysis (PHA)). Αυτές οι τεχνικές βρίσκουν εφαρμογή σε μη επικίνδυνες καταστάσεις και σε αυτές που απαιτούν μια γρήγορη απόκριση όσον αφορά τις εγκαταστάσεις μεταφοράς και αποθήκευσης του υδρογόνου. Εφαρμόζονται στις σχετικές βιομηχανίες ανάλογα με τις απαιτήσεις και την σχετική νομοθεσία σε κάθε χώρα και οργανισμό.

5.3 Ανθρώπινοι παράγοντες

Οι ανθρώπινοι παράγοντες είναι μια σημαντική συνεισφορά στα ατυχήματα διαδικασιών στη βιομηχανία. Τρεις περιοχές κλειδιά είναι: επαφή χειριστή με την διαδικασία και τον εξοπλισμό, έλεγχοι διαχείρισης και εκτίμηση ανθρώπινου λάθους. Τα ανθρώπινα σφάλματα και οι ανθρώπινοι παράγοντες έχουν αναγνωριστεί σαν βασικοί παράμετροι για πολλά βιομηχανικά ατυχήματα που περιλαμβάνουν εγκαταστάσεις υδρογόνου. Έρευνες έχουν δείξει ότι το ανθρώπινο λάθος είναι η αιτία για το περίπου 25% των συνολικού αριθμού των ατυχημάτων ενώ η αδυναμίες του συστήματος διαχείρισης επιφέρει ένα επιπλέον 27% στο σύνολο. Άρα είναι εμφανές ότι αυτή είναι μια περιοχή όπου το σχέδιο διαχείρισης πρέπει να βασιστεί, και με συνεχείς αναθεωρήσεις και σωστή εφαρμογή να μειώσει τα στατιστικά στοιχεία με άμεσο όφελος σε όλη τη βιομηχανική διαδικασία.

Επίσης ένας σημαντικός τομέας στην διαχείριση ασφάλειας είναι ότι: οι άνθρωποι είναι απαραίτητο να εκπαιδεύονται στις κατάλληλες δεξιότητες και να έχουν συνεχή μετεκπαίδευση έτσι ώστε να διατηρούν αυτά τις δεξιότητες. Αυτό θα βοηθήσει στην εξάλειψη κενών γνώσης και στη μείωση κινδύνου από αμάθεια ζητήματος που αφορά τη μεταφορά-αποθήκευση και διανομή επικίνδυνων αερίων όπως του υδρογόνου.

Τα αντικείμενα της εκπαίδευσης για την προστασία εγκαταστάσεων υδρογόνου μπορεί να είναι σύμφωνα με σχετικές αναφορές:

- Γνώση: Δημιουργία λίστας με τους βασικούς κινδύνους του υδρογόνου
- Κατανόηση: Ανάλυση με απλά λόγια την ιδέα του συμφοούς κινδύνου ασφαλείας για το υδρογόνο
- Εφαρμογή: Υπολογισμός δεικτών κινδύνου για διάφορα σενάρια καταγραφής του υδρογόνου.
- Ανάλυση: προσδιορισμός χαρακτηριστικών ασφαλείας σε ένα δεδομένο σχεδιασμό αποθήκευσης υδρογόνου χρησιμοποιώντας την ιεραρχία των μετρήσεων ελέγχου κινδύνου σαν οδηγό.
- Σύνθεση: ανάπτυξη μιας πρωτότυπης μελέτης περίπτωσης περιλαμβάνοντας την ιδέα ασφαλείας υδρογόνου
- Εκτίμηση: επιλογή από διαθέσιμες τεχνικές για εκτίμηση του κινδύνου ενός δοσμένου σχεδιασμού για κατασκευή υδρογόνου και ανάλυση της επιλογής.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Cherry, R.S., A hydrogen utopia?, Int. Journal of Hydrogen Energy, 29, 125, 2004.
2. Akansu, S.O., et al, Internal Combustion Engines fueled by natural gas: hydrogen mixtures, Int. Journal of Hydrogen Energy, 29, 1527, 2004.
3. EUR 22002, Introducing Hydrogen as an Energy Carrier, EC Directorate, 2006.
4. Institution of Chemical Engineers, Accident Database, UK, 2009.
5. Khan, F.I., and Abbasi, S.A., Major Accidents in process industries and an analysis of causes and consequences, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 12, 361-378, 1999.
6. Zuettel, A. et al, Hydrogen as a Future Energy Carrier, Wiley-VCH Verlag, Germany, 2008, 14-20.
7. Kirchsteiger, C., et al, Towards establishing an international hydrogen incidents and accidents database (HIAD), Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 20, 98, 2007.
8. ANSI, Guide to safety of Hydrogen and Hydrogen systems, ANSI/AIAA G-095-2004.
9. Karim, A., Hydrogen as a spark ignition engine fuel, Int. Journal of Hydrogen energy, 28, 569, 2003.
10. Baker, W.E., and Tang, M.J., Gas, Dust and Hybrid Explosions, 2001.
11. [http:// wolframalpha.com](http://wolframalpha.com)
12. Gordon, S., and McBride, B.J., Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications, NASA Reference Publication, 1311, 1994.
13. www.medterms.com
14. US. Department of Transportation Report, Guidelines for use of Hydrogen in Vehicles.
15. Thomson, J.D., and Enloe, J.D., Flammability limits of Hydrogen-oxygen-nitrogen mixtures at low pressures, Combustion and Flame, 10(4), 393-394, 1996.

16. Salla, J.M., et al, BLEVE: a new approach to the superheat limit temperature, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19, 690, 2006.
17. Bjerketvent, D et al, Gas explosion handbook, Journal of Hazardous Material, 52, 1, 1997.
18. www.kfp.co.uk
19. European Industrial Gases Association, Safety in Storage. Handling and Distribution of Liquid Hydrogen, Report DOC 06/02/E, 2002.
20. Walt Pyle, Hydrogen Storage, Home Power, 59, 14-15, 1997.
21. Verfondern, K., Safety Considerations on Liquid Hydrogen, Energy and Environment, Vol. 10, 2008, pp. 25-27.
22. Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., An Introduction to CFD: The Finite Volume Method, Longman, 1995.
23. Swain, M.R., et al, Hydrogen leakage into simple geometric enclosures, Int. Journal of Hydrogen Energy, 28, 229, 2003.
24. Zhang, J. et al, Numerical studies of dispersion and flammable volume of hydrogen enclosures, Int. Journal of Hydrogen energy, 35, 6431, 2010.
25. <http://fire.nist.gov/fds>
26. Xiong, J., et al, CFD application to hydrogen risk analysis, Science and Technology of Nuclear Installations, 2009.
27. Ferng, Y.M., et al, CFD Investigating thermal-hydraulic characteristics and hydrogen generation from graphite-water reaction after SG tube rupture in HTR-10 reactor, Applied Thermal Engineering, 31, 2430, 2011.
28. Frank, J., Observations on pre-emergency planning, Industrial Fire World, 2007.
29. www.hysafe.org
30. <http://www.h2incidents.org>