

Hidrogénbiztonság: Balesetek kvantitatív elemzése és biztonságközpontú, új tervezési módszerek fejlesztése.

Szén István

Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar - Elektrofizika Intézet, Hidrogéntechnológiák és Ipari IoT Tanszék, H-1034 Budapest, Bécsi út 94-96/A, szen.istvan@kvk.uni-obuda.hu

A cikk első felében elemzem a dokumentált hidrogén-ipari balesetek okait, majd azokat osztályozom, s a kapott eredményeket új tervezési módszerek fejlesztésére kívánom felhasználni. A teljes hidrogén értéklánc esetén megvizsgálom, hogy biztonságtechnikai értelemben, hol találhatóak a kritikus gócpontok, majd, megvizsgálom, hogy a jelenlegi, hazai gyakorlatban milyen kockázatelemzési módszereket használnak a tervezők, s a használt módszereket összehasonlítom más tudományos tekintetben is elfogadott módszerekkel. Cikkemben és az előadáson egy átfogó képet szeretnék bemutatni a hidrogén-ipari létesítményekről, a hidrogénalapú közlekedésről, s mindezt biztonságtechnikai szempontból fogom elemezni.

Keywords: hidrogén, biztonságtechnika, kvantitatív elemzés, tervezési módszerek, javaslatok

1. Bevezetés:

Napjainkban a „Párizsi Megállapodás”, a nemzetközi és Európai Unió klímapolitika meghatározó eleme. A 2016. november 4-én hatályba lépett megállapodás célja, hogy a globális átlaghőmérséklet emelkedését 2 °C fok alatt tartsa, törekedve arra, hogy a hőmérséklet-emelkedés az iparosodás előtti átlaghőmérséklethez képest a 1,5 °C fokot ne haladja meg [1].

Az előttünk álló évtizedben a hidrogén kulcsfontosságú, világszerte alkalmazott alternatív üzemanyag lesz, mely elősegítheti a megújuló energiaforrások integrációját az egységes villamosenergia-rendszerbe. Az Európai Unió szempontjából a hidrogén az energetikai függetlenség egyik meghatározó eleme, s az unió, az energiapiaci zavarokra valamint az orosz-ukrán háborúra hivatkozva kidolgozta az REPowerEU-tervet, melynek költségvetése 210 milliárd euro, s a hidrogén infrastruktúra kiemelt figyelmet kap a terv megvalósítása során [2].

A hidrogén előnyös tulajdonságai mellett fontos kérdés a biztonság a gyártás, a tárolás, a szállítás és a felhasználás során. Ebben a cikkben, nemzetközi adatbázisok és hidrogén-balesetek elemzése révén megvizsgálom és felfedem azon sarokpontokat, ahol a hidrogén biztonságának kiemelt szerepe van, majd elemzem a kapott eredményeket, s végül javaslatot teszek a tervezés során alkalmazható módszerek bevezetésére, fejlesztésére.

1.1 A hidrogénben rejlő veszélyek:

A hidrogén, nagyléptékű elterjedésének előfeltétele az alacsony költségű és biztonságos hidrogénelőállítás, -tárolás és -felhasználás.

Két veszélyforrás jelentkezik a hidrogénnel kapcsolatban, egyrészt – mivel a hidrogén sűrűsége a legkisebb az ismert anyagok közül - a hidrogént kompresszált vagy cseppfolyós formában célszerű tárolni és felhasználni, másrészt a hidrogén kifejezetten nagy reakcióképességgel rendelkezik és roppant gyúlékony anyag.

Az acéltartályos gáztárolásnak ugyan kiforrott technológiája van, ám a hidrogén esetében ez nem előnyös, mert az acéltartály szénatomjait dekarbonizálja a hidrogén, így hosszú távon az acél előbb rideggé majd áteresztővé válik (repedések, szivárgások). A fenti problémát kompozittartályok alkalmazásával tudjuk kiküszöbölni, ám a nyomásértékek a gyakorlatban 350 bar vagy 700 bar értéket érnek el, ami igen magas értéknek számít a műszaki gyakorlatban. További nehézség a hidrogén – sűrűségéből eredeztethető – nagy diffúziós képessége, így a szivárgás nehezen detektálható.

A hidrogénszivárgásból ered a következő feladat, a hidrogén észlelése, ami kritikus fontosságú, hiszen rendkívül széles (4 -75 V/V%) gyúlékonysági tartománnyal rendelkezik, továbbá a gyors lángsebességéből adódóan a robbanással járó balesetek is veszélyforrást jelentenek. Általánosságban elmondható, hogy a hidrogénszivárgás utáni azonnali gyújtóforrással való találkozás hidrogénsugár-tűzet okoz, míg a hidrogénszivárgás utáni késleltetett gyújtás, robbanást idézhet elő, s ezen jelenségek ellen a műszaki gyakorlatban szükséges cselekednünk, olyan óvintézkedéseket és tervezési irányelveket kell foganatosítanunk, amik mellett a kockázatok az elfogadható szintre csökkenthetők.

A cikk elkészítése során, arra törekedtem, hogy szabadon elérhető, strukturált adatbázisokra alapozzam a kutatásom, így a választásom a következő adatbázisokra esett:

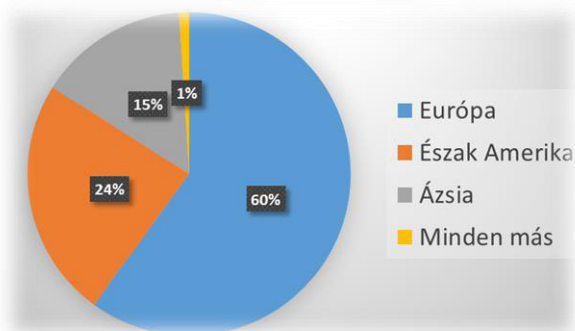
- Franciaország: „Le Bureau d’analyse des risques et pollutions industriels, du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires” - Ökológiai, Fenntartható Fejlődési és Energiaügyi Minisztérium, Ipari Kockázat- és Szennyezéselemző Hivatala, mely kezeli az ARIA (Analysis, Research and Information on Accidents) adatbázist [3]. Ez az adatbázis több mint 54 000 Franciaországban vagy külföldön bekövetkezett balesetet vagy incidenst tartalmaz, melyből 997 eset kapcsolható a hidrogénhez (2023. november 10.)
- Japán: Vegyibalesetek adatbázisa: Relational Information System for Chemical Accidents Database (RISCAD) [4].
- Amerikai Egyesült Államok:
 - The U.S. Chemical Safety Board (CSB) [5].
 - National Energy Technology Laboratory (NETL) [6].
 - Hydrogen Tools Portal [7].
- Nemzetközi: International Association for Hydrogen Safety – HySafe [8]

A fenti adatbázisokon túl, informatív és hasznos segítséget jelentett a Francia gyökerű BARPI - Bureau for Analysis of Industrial Risks and Pollutions, illetve ezen szervezet “Lessons Learnt from Industrial Accidents” (2023) kiadványa [8].

2. Balesetek kvantitatív elemzése:

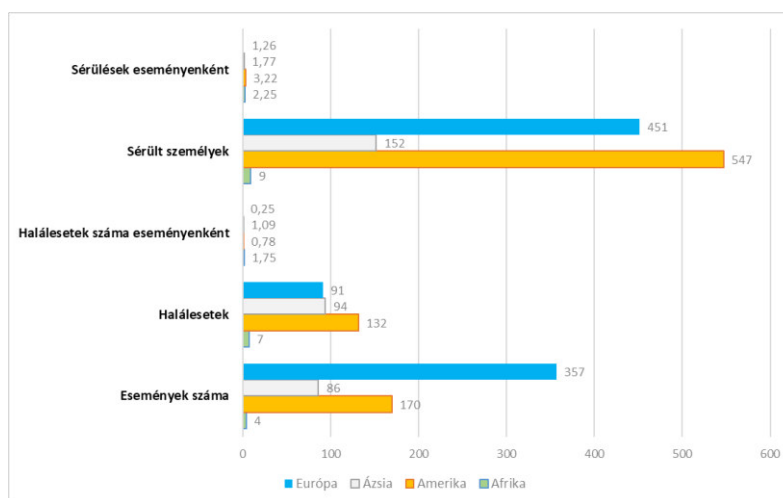
A gyűjtött adatok alapján előbb a hidrogénnel kapcsolatos balesetek földrajzi elhelyezkedését, azok eloszlását határoztam meg. A vizsgált balesetek száma: 626, mely 1960 és 2020 közötti időszakban következett be. A fenti dátumokból már az is megállapítható, hogy a vizsgált 60 évben, a 626 regisztrált balesettel meghatározható, az éves átlagos balesetszám, ami ebben az esetben 10,43 baleset/év.

A balesetek földrajzi megoszlását vizsgálva kijelenthetjük, hogy a legtöbb baleset az Európai országokban következett be a vizsgált időszakban, majd a sorrend Észak-Amerika és Ázsia (1. ábra).



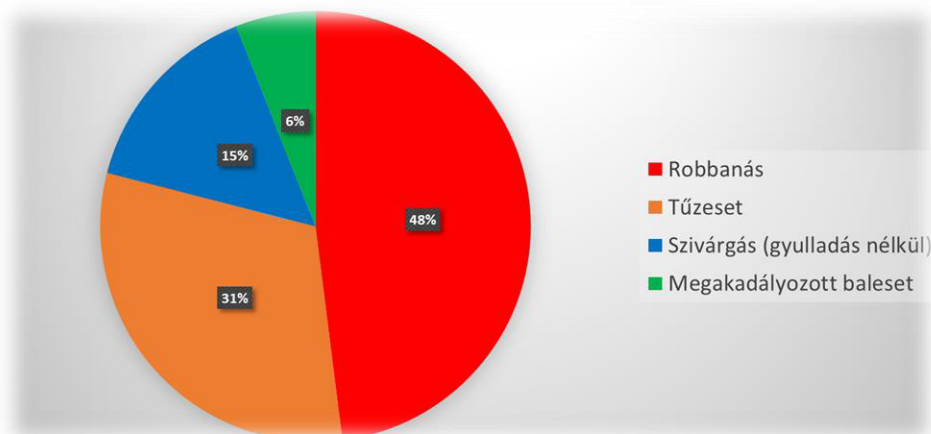
1. ábra: Hidrogénbalesetek földrajzi megoszlása a vizsgált időszakban

A legtöbb baleset ugyan Európában következett be, de a sérültek száma az Észak-Amerikai kontinensen volt a legmagasabb, ugyanis ott 170 esemény során 547 ember sérült meg, míg Európában a 357 esemény során 451 ember sérült meg. Ez azt jelenti, hogy a fajlagos sérültszám Európában, 1,26 fő, míg Észak-Amerikában 3,22 fő. Afrikában ugyan mindössze 4 baleseti esemény következett be, ám ezen balesetek során 9 személyi sérülés és 7 haláleset is bekövetkezett, így ott volt a legmagasabb a halálesetek száma, egy baleseti eseményre vetítve (2. ábra).



2. ábra: Sérültek és halálesetek

A balesetek jellegét vizsgálva három jelentős területet különítettem el, melyek csökkenő sorrendben: robbanás, tüzeset és gyulladás nélküli szivárgás (3. ábra).



3. ábra: Balesetek jellege és megoszlása

Az eseményeket kiváltó okokat megvizsgálva azt tapasztaltam, hogy a legtöbb halálos esetet (59 fő) és sérülést (231 sérült) okozó balesetek kiváltó oka a helytelen telepítés, a nem megfelelő felügyelet és az elhanyagolt karbantartási előírások, vagy azok be nem tartása.

A halálos esetek második leggyakoribb oka a nem megfelelő szervezeti intézkedések sora. Ide sorolom az ellenőrzési rendszer hiányát, az elégtelen koordinációt, a nem kielégítő védelmi előírásokat.

3. Irányelvek, új tervezési módszerek és javaslatok a balesetek tükrében:

3.1 Irányelvek

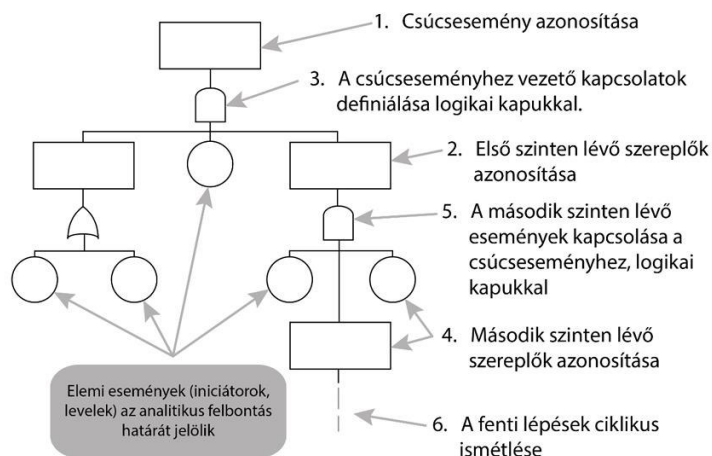
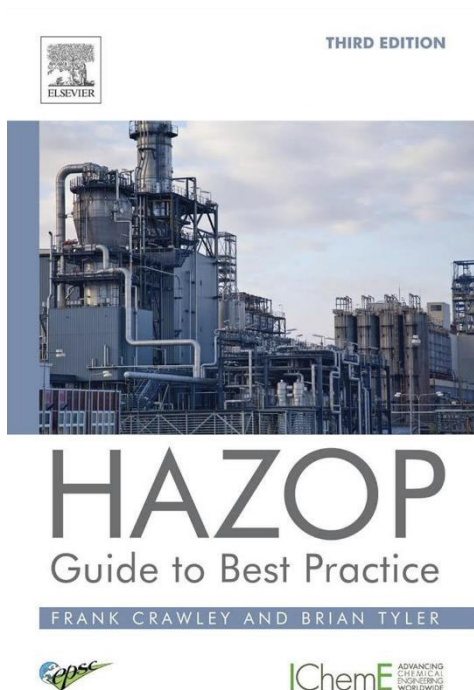
- Szaktervező bevonása és referencia projektek bemutatásának megkövetelése
- A kivitelezési munkák szervezéséhez olyan fővállalkozó bevonása, aki:
 - részt vesz a projekt megvalósulásában a tervezési fázistól, de minimum a tervszűri folyamattól, s a végső munkafolyamata az üzemeltető szakemberek helyismereti vizsgájával zárul.

- alacsony számú alvállalkozó foglalkoztatása a projektben.
- Az üzemeltetői szakemberek rendelkeznek ATEX (atmosphère explosibles), vagyis robbanásveszélyes környezetbe szánt berendezések üzemeltetése során szerzett tapasztalattal (2014/34/EU irányelv).
- Az üzemeltetésre szánt szakemberek (minimum 4 fő) főberendezési, gyártóművi tesztelésen való részvétele.
- Üzemi próbák és próbaüzem lefolytatása a gyártó-kivitelező-üzemeltető jelenlétében
- A karbantartást az üzem indítása előtt (hidrogénmentes állapotban) gyakorolni szükséges, a munkafolyamatot képfelvető berendezéssel rögzíteni szükséges, amit közösen kell kielemezni az üzemvezető és a teljes üzemeltetési személyzet jelenlétében.
- A karbantartás során csak ATEX-es ruházat viselése és szerszámok használata engedélyezett.
- A biztonsági előírásokat egy szakmai zsűrinek jóvá kell hagynia.
- A szakszemélyzetnek rendszeres üzemeltetési és karbantartási tréningben kell részt vennie.

3.2 Új tervezési módszerek:

A tervezés során a technológia tervezésén kívül alkalmazni szükséges

- Veszély és kockázatelemzést szükséges elvégezni
- Biztonsági tervezést kell folytatni
- Meg kell felelni az MSZ EN61511/IEC 61511 folyamatirányítási és biztonsági szabvány követelményeinek és előírásainak
- A hidrogénipari objektumok esetében el kell végezni a HAZOP (Hazard & Operability Analysis) folyamatot.
- A HAZOP mellett szükséges legalább egy alternatív, biztonságkritikus módszer vizsgálatának lefolytatása is:
 - Hibafa-analízis – Fault Tree Analysis (FTA)
 - Eseményfa-analízist – Event Tree Analízis (ETA)
- A HAZOP + FTA/ETA mellett el kell végezni a védelmi réteg elemzést (LOPA - Layers of Protection Analysis)



3.3 További javaslatok:

- Zárt térben jól szellőzés biztosítása, hogy hidrogénszivárgás esetén a hidrogén sűrűsége a gyulladási határ alatti koncentrációban maradjon (maximum 1-2 % V/V) ventilátorok ATEX minősítése!
- Mivel a hidrogén színtelen, szagtalan és íztelen gáz, kritikus fontosságú a szivárgás észlelése megbízható és gazdaságos szenzorok segítségével, kiegészítő védelmi stratégiákkal.
- Egy viszonylag kis méretű hidrogéntartály alkalmazása a tárolás során.
- Nagy, központosított tárolórendszerek helyett elosztott építése.
- A hidrogéntárolás lehetőleg a szabadban történjen, ha zárt konténerben van lehetőség csak a tárolásra, akkor a konténer tetejének olyannak kell lenni, hogy egy esetleges szivárgás esetén a hidrogén szabadon elszállhasson.
- A személyzetet fel kell készíteni a magas kockázatra
- A személyzetet érdekelté kell tenni a biztonság fenntartásában
- A biztonsági berendezéseket a hatóságnak legalább évente ellenőrizni szükséges.
- A legkisebb incidenst is jelenteni kell egy országos rendszerben.
- Létre kell hozni egy jelentési kötelezettségnek elegendő keretrendszert.
- A hidrogénbaleseteket osztályozni szükséges.
- A kivizsgálás során feltárt hiányosságokat a balesett mellett rögzíteni szükséges.
- A Katasztrófavédelmet fel kell készíteni egy katasztrófa esetén a biztonságos munkavégzésre és az életmentésre.

4. Javasolt keretrendszer hidrogénbalesetek jelentési kötelezettségének kezelésére:

Kidolgoztam egy hidrogénbalesetek esetén használható jelentési rendszert, mely hét különböző szintet különít el egymástól. Az első szint az enyhébb jelentőségű baleset, míg a 7. szintnek a legsúlyosabb baleset feleltethető meg.

1. szint: Rendellenesség (nincs biztonsági kockázat, tervezett intézkedésekkel a folyamatok a normál, üzemszerű keretek közé szoríthatók).
2. szint: Szivárgás (gyulladás nélküli szivárgás, a szivárgás megszüntethető, a normál üzemenet rövid időn belül újra tartható)
3. szint: Üzemzavar (hidrogén égés történt, de nincs személyi sérülés, az üzemzavar kezelhető)
4. szint: Mérsékelt üzemzavar (égés és/vagy robbanás történt, személyi sérülés is bekövetkezett.)
5. szint: Súlyos üzemzavar (égés és/vagy robbanás, haláleset is bekövetkezett)
6. szint: Súlyos baleset (az 5. szint, de az esemény hatással van az üzemi személyzeten kívül más személyekre vagy a környező természetre is).
7. szint: Nagyon súlyos baleset (evakuáció szükséges a legközelebbi településről vagy az objektum megsemmisült).

Hivatkozások:

- [1] „Az éghajlatváltozásról szóló Párizsi Megállapodás”: <https://www.consilium.europa.eu/hu/policies/climate-change/paris-agreement/#EU> [hivatkozva: 2023. 09. 05.]
- [2] REPowerEU: energiapolitika az uniós országok helyreállítási és rezilienciaépítési terveiben: <https://www.consilium.europa.eu/hu/policies/eu-recovery-plan/repowereu/> [hivatkozva: 2023. 09. 05.]
- [3] Analysis, Research and Information on Accidents <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/> [hivatkozva: 2023. 08. 03.]
- [4] Relational Information System for Chemical Accidents Database (RISCAD) <https://r2.aist-riss.jp/> [hivatkozva: 2023. 08. 03.]
- [5] The U.S. Chemical Safety Board (CSB) <https://www.csb.gov/> [hivatkozva: 2023. 08. 03.]
- [6] National Energy Technology Laboratory <https://www.netl.doe.gov/> [hivatkozva: 2023. 08. 03.]
- [7] Hydrogen Tools Portal <https://h2tools.org/> [hivatkozva: 2023. 08. 05.]
- [8] International Association for Hydrogen Safety <https://hysafe.info/> [hivatkozva: 2023. 08. 05.]
- [9] A 15. Implementation and Enforcement of Environmental Law szeminárium, “Lessons Learnt from Industrial Accidents”, 23-24 May 2023 – Marseilles, France
https://www.aria.developpementdurable.gouv.fr/wpcontent/uploads/2023/05/Brochure_UK_02062023.pdf