

SAFETY CLASSIFICATION OF HYDROGEN TECHNOLOGIES: CONCEPT AND EMPIRICAL VALIDATION OF THE HISI MODEL**HIDROGÉNTÉCHNOLÓGIÁK BIZTONSÁGI OSZTÁLYOZÁSA: A HISI-MODELL KONCEPCIÓJA ÉS EMPIRIKUS VALIDÁCIÓJA**SZÉN István¹ – BAKOSNÉ DIÓSZEGI Mónika² – RÁCZ Ervin³**Abstract**

Hydrogen, a key energy carrier in the EU's green transition, is gaining an increasingly dominant role in modern energy systems. However, no unified, hydrogen-specific accident classification framework currently exists. We identified a research gap and found that existing industrial safety incident scales are unsuitable, without major compromises, for consequence-based and structured classification of hydrogen incidents. To address this, we developed the Hydrogen Incident Severity Indicator (HISI) scale. Its validity was confirmed through an empirical method by retrospectively classifying past incidents. HISI is objective, industry-independent, and interoperable, enabling the severity classification of hydrogen incidents and supporting consistent risk communication and regulatory harmonization

Keywords

hydrogen, industrial safety, industrial accident, malfunction, incident-scale

Absztrakt

A hidrogén, az EU által preferált zöldátmenet kulcsfontosságú energiahordozója, így egyre dominánsabban jelenik meg az energiarendszerekben. Azonban, jelenleg nem áll rendelkezésre egységes, hidrogénspecifikus, baleseti eseménybesorolási-rendszer. Ezzel kapcsolatban azonosítottunk egy kutatási rést, s megállapítottuk, hogy a meglévő iparbiztonsági eseményskálák, kompromisszumok nélkül nem alkalmasak a következményalapú és strukturált, hidrogénincidensek osztályozásra. Kutatásunk célja e hiány pótlása, ezért megalkottuk a Hydrogen Incident Severity Indicator (HISI) skálát. A HISI érvényességét empirikus módszerrel, korábban bekövetkezett események visszamenőleges besorolásával validáltuk. A HISI skála objektív, iparág-független és interoperábilis, képes a hidrogénesemények súlyossági osztályozására, valamint hozzájárul a kockázatok egységes kommunikációjához és a szabályozási folyamatok harmonizációjához.

Kulcsszavak

hidrogén, iparbiztonság, üzemi baleset, üzemzavar, incidens skála

¹szen.istvan@kvk.uni-obuda.hu | ORCID: 0000-0002-1028-0005 | PhD Student, Doctoral School on Safety and Security Sciences Óbuda University | doktorandusz, Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola

²dioszegi.monika@bgk.uni-obuda.hu | ORCID: 0009-0000-3783-5691 | university associate professor, Óbuda University, Bánki Donát Faculty of Mechanical and Safety Engineering | egyetemi docens, Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai mérnöki Kar

³racz.ervin@kvk.uni-obuda.hu | ORCID: 0000-0002-7692-1397 | full professor, Obuda University, Kando Kalman Faculty of Electrical Engineering | egyetemi tanár, Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar

BEVEZETÉS

A hidrogénalapú energiatechnológiák gyors fejlődése egyre jelentősebb szerepet kap a globális dekarbonizációs törekvésekben. A megújuló energiaforrások és a szektorintegráció révén megjelenő zöld- és kékhidrogén termelés területén tapasztalható előrelépések, valamint a hidrogén felhasználása az iparban, a mezőgazdaságban és a közlekedésben új típusú infrastruktúrák létrehozását teszi szükségessé. Tekintettel ezen folyamatokra, potenciálisan növekszik a hidrogén veszélyeivel kapcsolatos események gyakorisága és valószínűsége. A hidrogén, fizikai és kémiai sajátosságai, mint a rendkívül kis molekulatömeg, a nagy diffuzivitás, a széles gyulladási tartomány, valamint a láng szabad szemmel történő észlelésének nehézségei, egyedi biztonságtechnikai kihívásokat eredményeznek.

Az elmúlt évtized folyamán bekövetkezett hidrogénincidensek, valamint az ezekről készült eseményjelentések rámutattak arra, hogy hiányosságok vannak a gyorsan fejlődő és intenzíven terjedő, hidrogéntekológia eseményeinek a dokumentálása terén. Az International Nuclear Event Scale (INES) [1] [2], a European Scale of Industrial Accidents (ESIA) [3] vagy az Analyse, Recherche et Information sur les Accidents (ARIA) [4] és a Hydrogen Incident and Accident Database (HIAD) [5], nem alkalmasak a hidrogénspecifikus események súlyosságának következetes, strukturált osztályozására, a következményalapú értékelésre és a súlyossági besorolásra. A HIAD adatbázis, ugyan kifejezetten a hidrogénteknológiához kapcsolódó eseményeket gyűjti és lehetőséget teremt az elemzésre is, ugyanakkor a HIAD egyik hiányossága, hogy nem rendelkezik strukturált súlyossági skálával. A közelmúltban bekövetkezett hidrogénrobbanások és balesetek, így például a 2019-es dél-koreai Gangneung-i laborrobbanás, a 2019-es norvég Bærum község H₂ töltőállomásának robbanása vagy a 2019-es kaliforniai tartályszivárgás azt bizonyítják, hogy a meglévő rendszerek hiányosak a hidrogénre jellemző kockázatok szempontjából. A tanulás, szemléltetés és a tapasztalatok átadása nehézkes és akadozó. Meglátásunk szerint szükségessé vált egy új, hidrogénspecifikus súlyossági skála kidolgozása, amely alkalmas az események iparágfüggetlen összehasonlítására, objektív értékelésre és a kockázatkommunikáció támogatására. Kiemelten fontosnak tartjuk, hogy a HISI egy interoperábilis keretrendszer, így illeszthető más iparági vagy nemzetközi osztályozási rendszerekhez is, függetlenül azok technológiai hátterétől vagy iparági beágyazottságától. A fentiekből adódóan a HISI lehetővé teszi a hidrogénnel kapcsolatos balesetek objektív értékelését is, valamint használatával megvalósíthatunk egy egységes súlyossági besorolását, továbbá a HISI támogatásával integrálhatóvá tesszük az eredményeket és levont tapasztalatokat egy már meglévő biztonsági jelentési rendszerbe vagy egy auditálási és szabályozási keretbe.

KUTATÁSI MÓDSZERTAN ÉS A VALIDÁCIÓS ELJÁRÁSOK

A szakirodalmi háttér feltárása során, a hidrogénteknológiai események átfogó elemzésére törekedtünk. Kvalitatív elemzéseket végeztünk a hidrogénipari balesetekkel kapcsolatban, s ekkor tűn fel, hogy a különböző hidrogénteknológia események nehezen vagy egyáltalán nem hasonlíthatók össze. A bevezető szakaszban említett adatbázisokkal kapcsolatban kerestünk releváns szakirodalmat a ScienceDirect és Scopus adatbázisban, valamint a Researchgate felületén. Az áttekintett szakirodalom alapján a következő megállapításokat fogalmazhatjuk meg:

- a jelenleg alkalmazott ipari eseményosztályozási rendszerek, legyenek általános ipari/nukleáris (pl. INES, ESIA, ARIA) vagy kifejezetten hidrogénre fókuszáló (pl. HIAD, HIRA) adatbázisok, egyaránt jelentős hiányosságokat mutatnak, amikor a hidrogénipari események sajátos kockázati dimenzióinak kezeléséről van szó.
- jellemző, a strukturált, kvantitatív és hidrogén-specifikus adatok hiánya
- hiányzik az egységes taxonómia és adatmező-struktúra
- jellemző az események aluljelentése, valamint a karbantartási, üzemeltetési és emberi tényezők nem megfelelő integrációja

Hiányos, hidrogénspecifikus kockázati dimenziók

A jelenleg használt hidrogénipari eseményosztályozási rendszerek jelentős lefedettség hiányosságokkal küzdenek, amikor a hidrogén-specifikus kockázati dimenziók kezeléséről van szó.

- Sok modell nem foglalkozik kellő részletességgel az anyagok kompatibilitásával és ridegedési problémáival, pedig a hidrogén komoly ridegítő tényezőként lép fel a fémeknél, csökkentve a csövek vagy fémtartályok szerkezeti integritását és mechanikai ellenállóképességét.
- A karbantartási és üzemeltetési állapotok rendszeres ellenőrzésének hiánya miatt gyakran fordulnak elő szivárgások, tömítési és szelep-hibák, amelyek jelentősen növelik a balesetek kockázatát.

A vizsgált tanulmányok rámutatnak, hogy az emberi és menedzsment tényezők, mint például a nem megfelelő képzés, hibás üzemi protokollok vagy kommunikációs anomáliák, a jelenlegi keretrendszerekben alulreprezentáltak, pedig a legsúlyosabb események jelentős része ezen tényezőkre vezethető vissza. További hiányosság, hogy a folyamatbiztonsági menedzsment elemei, mint például a kockázatsökkentő intézkedések vagy a vészhelyzeti tervek sok esetben nem integráltak a meglévő rendszerekbe. A cseppfolyós hidrogén (LH₂) speciális veszélyeit csak kevésbé veszik figyelembe, holott ezek eltérő biztonsági megközelítést igényelnek. A hidrogénspecifikus incidensek összetettsége, mint például a gáz rendkívül gyors diffúziója, a láng észlelésének nehézsége vagy az alacsony gyulladási energia (0,017 mJ, levegőben), tovább növeli annak kockázatát, hogy a meglévő rendszerek nem tudják megfelelően modellezni és értékelni a valós veszélyt. A vizsgált módszerek, mint például a Failure Modes and Effects Safety Analysis (FMESA), a Management Oversight and Risk Tree (MORT), az Accidental Risk Assessment Methodology for Industries (ARAMIS) és a Hydrogen Component Reliability Database (HyCReD), általában korlátozott alkalmazási tartománnyal és technológiaspecifikus fókusszal rendelkeznek, és nem tesznek lehetővé átfogó, többdimenziós súlyossági osztályozást. A fentiek alapján megállapítottuk, hogy a szakirodalom a hidrogénre jellemző kockázati tényezők strukturáltabb, integráltabb és empirikusan validált feldolgozását igényli [6][7][8].

Modellalkotás, alapkövetelmények

Szakirodalomkutatásunk alapján megállapítottuk, hogy egy új, hidrogénspecifikus baleseti skálának strukturált, kvantitatív adatkeretre, egységes taxonómiára, hidrogénspecifikus kockázati dimenziók lefedésére és valós baleseti adatokon alapuló empirikus validációra kell épülnie, miközben kompatibilis marad fejlett elemző eszközökkel és rendszeresen frissített, nyílt adatbázissal biztosítja a naprakész kockázatértékelést [6][9][10].

Validált és jelenleg használatban lévő osztályozási rendszerek hiányosságai

Ahogy fent már említettük, a jelenlegi ipari eseményosztályozási rendszerek nem nyújtanak megfelelő keretet a hidrogéntekológiákhoz kapcsolódó események súlyossági értékelésére.

- az INES kizárólag nukleáris eseményekre alkalmazható skála [1][2],
- az ESIA ugyan ipari balesetek kvantitatív értékelésére szolgál, de nem tartalmaz hidrogénspecifikus paramétereket [3],
- az ARIA egy iparibaleset-adatforrás és eseménytár, de önmagában nem alkalmas a hidrogénesemények szabványosított, többdimenziós súlyossági osztályozására,
- míg a HIAD ugyan hidrogén incidenseket gyűjt, de nem tartalmaz súlyossági besorolást és súlyossági skálát [5].

Validációs eljárások

A vizsgált publikációk közös jellemzője, hogy a validációt, valós ipari események alapján végezték el, konkrét folyamatok feldolgozásával, elemzésével. Ez biztosította, hogy az osztályozási, előrejelző vagy kockázatelemző modellek ne csupán elméleti, hanem gyakorlati szempontból is relevánsak legyenek. Az így kapott modellek megbízható alapot szolgáltatnak a szabványosításhoz, a kockázatsökkentési stratégiák kialakításához és az új biztonsági protokollok kidolgozásához [6][7][9][10]. A most bemutatott modellünk validálását, mi is valós eseményekre alapoztuk, s a cikkben bemutatjuk a besorolás folyamatát és eredményeit majd a modellünkhez kapcsolódóan a validációs célok elérése érdekében elvégezzük a komplex konzisztencia analízist és az érzékenységvizsgálatot.

A HISI-MODELL ALAPJAI

A modell célja

A Hydrogen Incident Severity Indicatorral a célunk egy egységes, többdimenziós, strukturált súlyossági osztályozási rendszer megalkotása, hidrogéntekológiai események objektív értékelésének a támogatásához. A HISI további célja, hogy lehetővé tegye az események következetes és összehasonlítható értékelését, elősegítve ezzel a biztonsági kommunikációt, a műszaki- és jogi szabályozást, valamint a kollektív kockázatkezelési stratégiák fejlesztését.

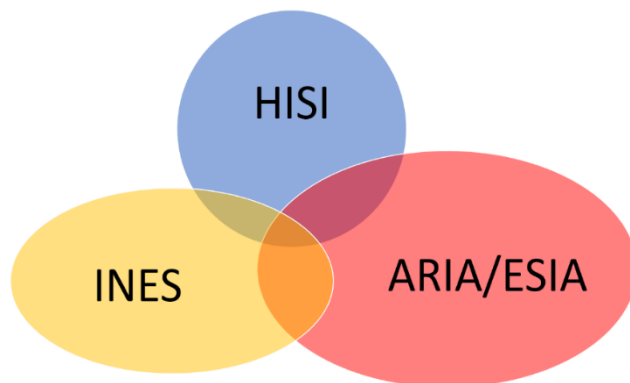
A modell alkalmazási köre

A modell közvetlenül alkalmazható a már meglévő, valamint a jövőben létesülő hidrogéntekológiai infrastruktúrára is. A kapcsolódó technológiai területek rendkívül dinamikusan fejlődnek és bővülnek, így az alkalmazási kör meghatározása jelenleg nem tekinthető véglegesnek, hiszen az alkalmazási területek sokrétűek. A hidrogén az elmúlt évtizedben megjelent az iparban, az energetikában, a mezőgazdaságban, a közlekedés számos területén és az innovációk révén folyamatosan bővül a felhasználási területe. A tudományos szempontok kielégítése érdekében, mi mégis definiáltunk néhány alkalmazási területet, ugyanakkor jelenleg nem tekinthető teljesnek és lezártnak a felsorolás, az alkalmazási kör így nyitott minden jövőbeni, hidrogénhez kapcsolódó fejlesztési irány előtt. Definiált alkalmazási területek:

- ipari, fosszilis bázisú hidrogénelőállítás (gőzreformálás, parciális oxidáció, elgázosítás, pirolízis),
- karbonszegény, úgynevezett zöld- és kékhidrogén előállítás (alkáli- és PEM elektrolízis),
- természetes, un. fehérhidrogén források és kitermelési infrastruktúra
- hidrogéntárolás (kis- és nagynyomású gáz valamint kriogén rendszerek),
- hidrogénszállítás (csővezeteki, kötegelt tartályok, tartálykocsik),
- hidrogénfelhasználás
 - közvetlen égetéses eljárások (robbanómotor, kazán, gázturbina),
 - elektrokémiai konverzió (tűzelőanyagcellák),
 - vegyipari felhasználás (ammóniagyártás, kőolajfinomítás, metanolgyártás, szintetikus üzemanyaggyártás),
 - ipari folyamatok (acélgyártás, üveg- és cementipar),
- kísérleti, laboratóriumi hidrogéntechnológiák (előállítás, tárolás, felhasználás, oktatás, kutatás-fejlesztés-innováció)

A HISI pozícionálása a nemzetközi rendszerekbe

A különböző iparágakban alkalmazott baleseti, súlyossági skálák eltérő célokra és jogi keretekre épülnek, ezért a hidrogénnel kapcsolatos események értékelése során a skálák alkalmazhatósága elsősorban az adott létesítmény típusától és a szabályozási környezettől függ. Nukleáris létesítményekben bekövetkező balesetek esetén, amennyiben az esemény a nukleáris biztonságot érinti, az INES az egyetlen hivatalosan elfogadott nemzetközi értékelési rendszer, amely kötelezően alkalmazandó a hivatalos jelentésekben. Ilyen esetekben a HISI skála csak kiegészítő szerepet tölthet be, lehetővé téve a hidrogénhez kapcsolódó incidens súlyosságának részletes és strukturált elemzését, amely az INES skálán belül gyakran rejtve marad.



1. ábra: A HISI komplementer szerepe és integrálhatósága más rendszerekhez, saját szerkesztés

A 2011-es fukusimai atomerőmű-baleset erre szemléletes példa, az INES skála szerinti 7-es fokozatú besorolás a teljes nukleáris katasztrófa súlyosságát tükrözte, ugyanakkor a reaktorépületekben történt hidrogénrobbanások önálló kockázati jellemzői nem kaptak külön kvantitatív besorolást. A HISI ilyen esetben kiegészítő információt adhatott volna a

hidrogénrobbanások fizikai sajátosságairól, következményeiről és azok biztonságtechnikai súlyosságáról, ezzel támogatva a baleset elemzését és a jövőbeni megelőző intézkedések kialakítását. Nem nukleáris, ipari létesítmények esetében, például a veszélyes anyagokkal foglalkozó üzemeknél, az ARIA vagy az ESIA keretrendszerek biztosítanak hivatalos baleseti adatgyűjtést és súlyossági értékelést, ezen rendszerekbe a HISI egy hidrogénspecifikus modulként értelmezhető, lehetővé téve, hogy a hidrogénincidensek összehasonlíthatóan, iparágfüggetlenül és kvantitatív módon kerüljenek értékelésre. Így a HISI nem váltja ki a meglévő skálákat, hanem komplementer eszközként működik közre (1. ábra), amely növeli a baleseti értékelések információtartalmát, javítja az interdiszciplináris kommunikációt és támogatja a szabályozási folyamatok harmonizációját.

A HISI-MODELL KONCEPCIONÁLIS KIDOLGOZÁSA ÉS DIMENZIÓI

A HISI-skála alapjait a szakirodalmi forrásokra, a nyílt hozzáférésű adatbázisokra épített értékelési dimenziókkal kívánjuk biztosítani. Amint a bevezetőben kifejtettük, szakirodalmi áttekintésünk során jelentős kutatási rést azonosítottunk: a meglévő eseményskálák és adatbázisok nem tartalmaznak hidrogénspecifikus jellemzőket. Ennek megfelelően elsődleges célunk e sajátos kockázati profilhoz illeszkedő jellemzők kidolgozása és integrálása. Második fő célkitűzésként arra törekedtünk, hogy az általunk megalkotott rendszer illeszkedjen a már létező értékelési keretrendszerekhez, eseményskálákhoz, sőt kiegészítő funkciót és többlettartalmat biztosítson a HISI, ezáltal jogi, műszaki és biztonságtechnika szempontból is harmonizációs funkciót láthat el a hazai, európai és nemzetközi iparbiztonsági gyakorlatban.

Kiemelt jelentőségű az emberi hatások értékelése a nemzetközi szabványokban és biztonsági ajánlásokban. Az Egyesült Államokban az OSHA-PSM (Occupational Safety and Health Administration - Process Safety Management) kötelező előírásai és az API RP 754 (American Petroleum Institute Recommended Practice) ajánlásai a súlyos személyi sérüléseket és a haláleseteket, egyértelműen a legsúlyosabb kategóriába sorolja [11][12]. Az Európai Unióban a Seveso III irányelv és az eMARS (Major Accident Reporting System) adatbázis kötelezővé teszi a halálos és súlyos sérüléssel járó balesetek jelentését [13][14][15] [16][17]. A Center for Chemical Process Safety (CCPS) metodikái külön kezelik a robbanás, tűz és mérgezés okozta sérüléseket [18], az ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) pedig egy szisztematikus, előre definiált rendszert alkalmaz az emberi sérülések és halálesetek statisztikai értékelésére [4]. Ezen alapelvek mentén alkottuk meg azt a koncepciót, hogy a HISI-skála önálló dimenzióként kezelje személyi sérüléseket és a fokozatosság elvét betartva, egyre súlyosabb osztályozást valósítsunk meg, a súlyosbodó személyi sérülések bekövetkezése során, biztosítva a nemzetközi kompatibilitást és az objektív összehasonlíthatóságot.

A HISI, környezeti hatások dimenziója a Seveso III irányelv környezeti kritériuma-ira (talaj-, víz- és levegőszennyezés) épül, de kiterjeszti azokat a hidrogénspecifikus kibocsátásokra, például a vészhelyzet során a légkörbe jutó hidrogén mennyiségére és a kritikus környezeti receptorok (védett területek, ivóvízbázisok, lakott területek) érintettségére.

A fizikai károk értékelése összhangban van az API RP 754 negyedik szintű (Significant Property Damage) mutatójával, valamint az ARIA és a Chemical Safety Board (CSB) gyakorlatával, amelyek pénzübeli küszöbértékeket és robbanásienergia-értékelést (TNT-ekvivalencia, túlnyomási zónák) alkalmaznak [20][21].

A műszaki meghibásodások dimenzió a CCPS és az OSHA-PSM által meghatározott kritikus biztonsági funkciók működésének értékelésére épül, kiegészítve az ARIA és adatbázisokban szereplő eseménykezelési, un. sikerességi mutatókkal.

E négy dimenzió együttesen lefedi a hidrogénes balesetek minden releváns következményét és okát, lehetővé téve, hogy a HISI-skála egyszerre működjön technikai, jogi és kommunikációs eszközként, támogatva a biztonsági események objektív, összehasonlítható és nemzetközileg is összehangolt besorolását. A dimenziók kombinált értékelése biztosítja, hogy a HISI skála a baleset komplex következményprofilját mutathassa meg.



1. ábra: A HISI-skála dimenziói, saját szerkesztés

A HISI-skála szintjeinek formális definíciói és a logikai alapelvek

A skála hét szintet tartalmaz, melyek fokozatosan növekvő súlyosságot tükröznek. A HISI-1 a legkevésbé súlyos esemény. A szintek meghatározása a dimenziók (2. ábra) együttes értékelésével történik. A skála kialakítása során a következő alapelveket vettük figyelembe:

- logaritmusos hatásszemlélet: adaptálva az INES skála ezen tulajdonságát, a magasabb szintek exponenciálisan növekvő következményeket reprezentálnak,
- ordinalitás: a szintek egyértelmű sorrendiséget követnek, kvalitatív és kvantitatív hatás szerint,
- pontosság: minden szintnél jól körülírt határérték található a dimenziók mentén,
- interoperabilitás: a skálát úgy terveztük, hogy az alkalmazható legyen a fent definiált alkalmazási körökben, sőt a meglévő skáláknak komplementer eszköze lehessen.

A HISI-SKÁLA PONTOZÁSI RENDSZERE

A HISI-skála egy hétszintű, négydimenziós pontozásos rendszert alkalmazó skála. Minden dimenzióhoz egy 0–5-ig terjedő pontszám tartozik, ahol a magasabb pontszám súlyosabb következményeket jelez (3. ábra). Az egyes dimenziókra adott pontszámok összege

adja a HISI-összpontszámot, amely alapján, a szintdefiníciós táblázat (4. ábra) felhasználásával meghatározható a HISI súlyossági kategória. A rendszer célja, hogy a kvalitatív leírásokat és a kvantitatív küszöbértékeket ötvözve egy objektív, reprodukálható és összehasonlítható besorolást biztosítson a hidrogéntechnológiai eseményekre, így a HISI-skála egy eddig fennálló hiányosságot pótol.

Dimenzió	0 pont	1 pont	2 pont	3 pont	4 pont	5 pont
Emberi hatás	Nincs sérülés	≤1 könnyű sérült	≥ 2 könnyű és/vagy 1 súlyos sérült	≥ 2 súlyos sérült és/vagy 1 haláleset	2–3 haláleset	>3 haláleset
Környezeti hatás (elsődleges: légkörbe jutott H ₂ tömeg; másodlagos: receptor érintettsége)	<0,5–1,5 kg; nincs receptor	1,5–5 kg; nincs receptor érintettség	5–200 kg; nincs tartós égés; a hatás lokális és rövid idejű, receptort csak részben érintett	200–500 kg; tartós égés, a hidrogénen kívül más éghető anyag is tartósan égett, receptor biztosan érintett	500–1000 kg; tartós légköri/ökológiai hatás, lokális és regionális hatások, receptor biztosan érintett	>1000 kg; Tartós, regionális légköri/ökológiai hatás receptor biztosan érintett
Fizikai kár (elsődleges: robbanás és/vagy tűz; másodlagos: kár mértéke)	Nincs kár, nincs tűz, nincs robbanás, kár: <10k €	Kis tűz, kézi oltóval oltva; kár: 10k–100k €	Kis tűz, kis kiterjedés, mérsékelt kár: 100k–1 M€	Komplex tűz, több oltási pont jelentős kár: >1 M€	Robbanás, jelentős kár: >1 M€	Robbanás, súlyos károk, az eszköz és/vagy a környezet már nem javítható, kár: >10 M€
Műszaki meghibásodás (elsődleges: emberi-másodlagos: műszaki tényező)	Emberi mulasztás hiba/minden biztonsági rendszer jól működött	Marginális emberi hiba és részleges műszaki hiba, gyors beavatkozás	Emberi hiba/részleges műszaki hiba, az esemény lokális tűzzel vagy robbanással járt	Jelentős emberi hiba/kritikus hiba egy alrendszerben, késleltetett beavatkozás, kiterjedt tűz, robbanás	Több alrendszer hibája, nincs lehetőség megelőző beavatkozásra	Felelősen és jelentős emberi hiba és/vagy kritikus rendszerhiba (több fontos alrendszer hibája, hiányossága)

2. ábra: Dimenziók - hatások és pontok, saját szerkesztés

Szint	Összpontszám	Szöveges értékelés
HISI-7	19-20	nagyon súlyos baleset
HISI-6	16-18	súlyos baleset
HISI-5	13-15	baleset – nagy kiterjedés
HISI-4	10-12	baleset – kis kiterjedés
HISI-3	7-9	súlyos üzemzavar – folyamatok ellenőrzése
HISI-2	4-6	üzemzavar – fokozott figyelem + felülvizsgálatok
HISI-1	0-3	eltérés – fokozott figyelem

3. ábra: Szintdefiníciós táblázat, saját szerkesztés

Az események elemzése során, két eredményre számítunk. Az egyik eredmény a HISI-szint melyhez kapcsolódik még egy nagyon egyértelmű és szándékosan rövid szöveges értékelés is. A másik eredmény egy radardiagram, ami szemléletesen mutatja a bekövetkezett esemény jellegét. Mi ezt a diagrammot, az esemény következményprofiljának tekintjük és a HISI-Quadrilemma névvel azonosítjuk. A quadrilemma egy szemléltető és kommunikációs eszköznek, a gyors tájékoztatás és összehasonlítás érdekében.

EMPIRIKUS VALIDÁCIÓ

Egy új biztonsági, súlyossági skála - mint amilyen a Hydrogen Incident Severity Indicator - tudományos megalapozottsága és ipari alkalmazhatósága csak akkor biztosítható, ha annak elméleti felépítését és pontozási logikáját valós események adatain végzett empirikus validációval támasztjuk alá. Az empirikus validáció célja egyrészt a skála gyakorlati működésének ellenőrzése, másrészt a következetesség értékelése.

Alkalmazott adatforrások és esettanulmányok

A validáció első lépéseként gondosan kiválasztott esettanulmányokat soroltunk be a HISI hétfokozatú skálájára. Az empirikus validációt több, eltérő jellegű és megbízható adatforrásra alapoztuk. Elsődleges kiindulópontként a HIAD szolgált, amelyet kiegészítettünk az ESIA és ARIA adatbázisok adataival, valamint számos nyílt forrásból és az Elsevier által gondozott tudományos adatbázisokból származó információval. A publikációhoz szándékosan olyan eseményeket választottunk, amelyek egyrészt széles körben és szabadon hozzáférhetők, másrészt jól reprezentálják a kimenetek közötti jelentős eltéréseket. Fontos kiválasztási szempont volt továbbá, hogy a vizsgálatok státusza lezárt legyen, vagyis a körülményeket a vizsgáló hatóságok teljes körűen feltárták, és az eseményekkel kapcsolatban új információ már nem várható. A kiválasztott esetek különböző országokból és létesítménytípusokból származnak, ami biztosítja a módszertani sokféleséget, és egyben növeli a modell robusztusságát. A vizsgálati példánkban szereplő három esemény:

- Kjørbo (2019.06.10.), Norvégia-Sandvika: töltőállomás-robbanás
- Santa Clara (2019.06.01.), USA: tartálykocsi robbanás és tűz
- Gangneung (2019.05.23.), Dél-Korea, laborrobbanás

Rövid esettanulmány-összefoglalók:

Kjørbo(Sandvika): Nyílt téren, egy gyors diszperziós hatású, viszonylag rövid ideig tartó tüzeset történt egy hidrogén-töltőállomáson, A beszámolók szerint két személy könnyebb sérülést szenvedett, azonban mi ezt nem vesszük figyelembe mert megállapítható, hogy a sérülések nem közvetlen hatások voltak, hanem un.: másodlagos balesetek, autó légzsákjának a nyitása okozott könnyebb sérülést a 2 személynél. Az esemény mérsékelt, kis helyre koncentrálódó infrastrukturális károkat okozott, a nagynyomású hidrogéntároló tartály ugyan gyakorlatilag megsemmisült, de a tűz nem terjedt át sem a töltőállomás további részére sem a civil lakosság tulajdonára. A tűz 500 méteres körzetében lakott terület is található. A hivatalos vizsgálat megállapította, hogy a balesetet szerelési, telepítési hiba okozta (nem kellő nyomatékkel meghúzott csatlakozó csavarok a nagynyomású hidrogéntartályon). A hiba következménye szivárgás lett, de a vizsgálat során feltárták, hogy a tartály nyomásérzékelője nem működött megfelelően. A jelentések szerint a szivárgás huzamosabb ideig fennállhatott, s a levegő-hidrogén elegy meggyulladásához vezetett. Az eseményt követően az üzemeltető, a NEL Hydrogen, minden norvégiai és több európai állomását ideiglenesen bezárta, a szereléseket felülvizsgálta, és a szerelési folyamatra, valamint annak ellenőrzésére új, szigorított módszert vezetett be. [22][23].

Santa Clara: egy moduláris hidrogénzállító trailer töltése közben szivárgást észleltek a gépkocsi kezelői. A gépkocsikezelők, annak ellenére, hogy nem volt engedélyük ilyen tevékenységre, megpróbálták javítani, cserélni a tömítést, de a biztonsági előírásokat nem tartották be (LockOut/TagOut), majd mindezt félreérthető kommunikációval tetézték,

amit a kevésbé tapasztalt személy nem jól értett és rossz működtetőgombot nyomott meg, így a hidrogén tömegáram megindult a szabadba, ahol a levegővel keveredve nagy erejű deflagrációs robbanást eredményezett. A folyamat során ezt követően kialakult egy sugár-láng, s a tűz áterjedt a szomszédos, parkoló dízel üzemű teherautókra. A riportokban az is olvasható, hogy a kb. 40m-re lévő épület ablakai kitörték a lökeshullám következtében. Személyi sérülés nem történt (fülzúgás és vállfájdalom volt, de a kezelők megmenekültek enyhébb sérülések nélkül). A károk: 4 teherautó és a szállítmányok, valamint 250 kg hidrogén szabadult ki, égett el. A cég elrendelte a biztonsági tréninget és felülvizsgálták a kommunikációs utasításokat és a munkafolyamatokat [24][25].

Gangneung: egy kísérleti laboratóriumban nagy erejű robbanás történt. A robbanást kiváltó oknak, egy elektrolizáló-cella membránjának a meghibásodását jelölték meg. A kezelők, a hibát nem észlelték időben, mert nem voltak beépített mérőműszerek és nem voltak kidolgozva erre az esetre ellenőrzési folyamatok. A sérült membrán nem választotta el tökéletesen a hidrogént és az oxigént, így a hidrogénáramba oxigén is keveredett, ami egy 40 m³-es, 10 bar-os hidrogéntartályba halmozódott fel. A tartály tartalmát nem monitoringozták, így kialakulhatott a végzetes oxigén-hidrogén keverék, ami gyújtóforrással találkozáva detonációt váltott ki. A számítások szerint a robbanás ereje, kb. 50kg TNT-egyenértéknek felelt meg, s a tartály valamint környezetének megsemmisülését okozta, valamint a lökeshullámot még 100m-el távolabb is érezni lehetett, ahol ablakok törtek ki. Sajnálatos módon két ember életét veszítette és további hat személy, sérüléseket szenvedett [26][27].

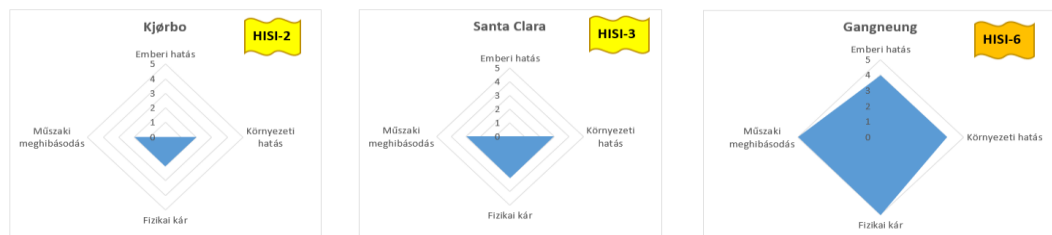


4. ábra: Helyszíni fotók, sorrendben balról jobbra: Kjørbo [28], Santa Clara [29], Gangneung [30]

Esettanulmányok besorolása a HISI-skála alapján

A Kjørbo és Santa Clara esetén ugyan előfordultak kisebb sérülések, ezek azonban másodlagos vagy alig értékelhető sérülések voltak. A környezeti károk mindhárom esetben jelentősek voltak, Gangneung esetén a detonációs hatás különösen erőteljesen érvényesült. A részletes pontszámok, a súlyossági besorolások, valamint a HISI-quadrilemmák a 6. ábrán láthatók.

Eset	Emberi hatás	Környezeti hatás	Fizikai kár	Műszaki meghibásodás	Összpontszám	HISI	Szöveges értékelés
Kjørbo	0	2	2	2	6	HISI-2	Üzemzavar – fokozott figyelem + felülvizsgálatok
Santa Clara	0	3	3	3	9	HISI-3	Súlyos üzemzavar – folyamatok ellenőrzése
Gangneung	4	4	5	5	18	HISI-6	Súlyos baleset



5. ábra: Az esettanulmányok besorolása a HISI-skálára és a kapcsolódó quadrilemmák, saját szerkesztés

A táblázatban látható pontszámok és szintek alapján a vizsgált esetek egyértelműen eltérő kockázati kategóriákba sorolhatók, ami igazolja a skála diszkriminációs képességét.

A mellékelt quadrilemma diagramoknak külön erőssége, hogy a négy dimenzió vizuálisan is összevethetővé válik, és a szintek azonnal értelmezhetők mind szakmai, mind kommunikációs szempontból. A központból kiinduló tengelyek hossza egyértelműen mutatja a domináns kockázati tényezőket, a feltüntetett HISI-szint pedig gyors tájékozódást biztosít a döntéshozók és a nyilvánosság számára is. Látható az is hogy az első két eset hasonló eseményprofilal rendelkezik, csak Kjørbon a tűz inkább maradt lokális jellegű, és mérsékelt károkat okozott, s ennek a következménye, hogy kedvezőbb az esemény besorolása, mint a Santa Clara esetben. A profilból és a HISI-skálából is látszik, hogy a laborrobbanás egy jelentősen kiterjedtebb és katasztrofális balesetnek minősíthető. Ez a vizualizációs forma nemcsak a technikai elemzést segíti, hanem a kockázatkommunikáció terén is új és hatékony eszköz lehet a hidrogénipari incidensek területén, hiszen egyetlen pillantással átláthatóvá teszi az esemény profilját és súlyosságát.

Konzisztenciaanalízis és érzékenységvizsgálat célja

A HISI-skála validálása több, egymást kiegészítő módszerrel is támogatható, melyek célja a modell megbízhatóságának, iparágfüggetlen alkalmazhatóságának igazolása. A konzisztenciavizsgálat a skála belső logikáját ellenőrzi, vagyis azt, hogy hasonló nagyságrendű és következményű események azonos kategóriába kerülnek-e, és hogy a pontozási rendszer belső ellentmondásoktól mentes-e?

Az érzékenységvizsgálat kvantitatívan teszteli, hogy kis bemeneti változások (például egy pontnyi növekedés a környezeti hatásban vagy egy haláleset megjelenése) okoz-e besorolási szintváltást, ezáltal mérve a skála finom-különbségekre adott reakcióját. E módszerek kombinációja biztosítja, hogy a HISI-modell robusztus, transzparens és döntéstámogatásra alkalmas maradjon különböző ipari környezetben.

A konzisztenciavizsgálat - kvalitatív alapokon

- A pontrendszer 0-5 közötti pontjai, a pontok jelentése világos definíciós különbségekkel bír.
- A mintaesetek kvalitatív leírása és a skála pontjai jól illeszkednek.
- Mindhárom incidensnél az egyedi dimenziókhoz köthető pontszámok és az összpontszám, valamint az értékelési táblázat belső konzisztenciát tükröz.
- A fotók (6. ábra) és a hivatkozott publikációk alapján a HISI-értékek reális közelítést adnak.
- A HISI-quadrilemmák (6. ábra) vizuális szempontból jól tükrözik az eseteket, az eseményprofil és a HISI-érték együttes megjelenése nagyon gyors és hatékony eseménykommunikációt tesznek lehetővé.

Konzisztenciavizsgálat - Cronbach- α , kvantitatív módszerrel

A Cronbach-alfa a belső konzisztencia mérőszáma és azt fejezi ki, hogy a skálát alkotó tételek (jelen esetben a HISI-skála dimenziókra adott pontszámok) mennyire mérnek egy közös, mögöttes konstruktumot. A közös konstruktum az a „rejtett változó”, amire a dimenziók együttesen utalnak, így a mi esetünkben ez a baleseti súlyosság. A módszer egyik megkötése, hogy nagyobb esetszámmal pontosabb eredményeket ad [31]. A cikk terjedelmi

korláta miatt mi most megmaradunk a három, eddig ismertetett esetnél, vállalva, hogy nem kapunk ideális eredményt.

Eset	Emberi hatás	Környezeti hatás	Fizikai kár	Műszaki meghibásodás
Kjørbo	0	2	2	2
Santa Clara	0	3	3	3
Gangneung	4	4	5	5

6. ábra: A vizsgált esetek - kiindulási állapot a konzisztencia vizsgálathoz, saját szerkesztés

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_i^2}{\sigma_{total}^2} \right)$$

ahol:

k – a dimenziók száma

σ_i^2 – az egyes dimenziók varianciája

σ_{total}^2 – az összpontszám varianciája

Események összpontszáma:

- Kjørbo: $0+2+2+2 = 6,0$
- Santa Clara: $0+3+3+3 = 9,0$
- Gangneung: $4+4+5+5 = 18$

Dimenziók varianciája:

- Emberi hatás: (0, 0, 4): átlag: 1,33 variancia: 5,33
- Környezeti hatás: (2, 3, 4): átlag: 3,00 variancia: 1,00
- Fizikai kár (2, 3, 5): átlag: 3,33 variancia: 2,33
- Műszaki meghib. (2, 3, 5): átlag: 3,33 variancia: 2,33

A dimenziók varianciájának összege: $5,33 + 1 + 2,33 + 2,33 = 10,99 \sim 11$

Összesített pontsz. (6, 9, 18): átlag: 11, variancia: 39

A számítás:

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_i^2}{\sigma_{total}^2} \right) = \frac{4}{3} \left(1 - \frac{11}{39} \right) = 1,333 \times (1 - 0,282) = 1,333 \times 0,718 = 0,957$$

A kapott Cronbach- α eredmény: 0,957, a Cronbach-alfa elméleti tartománya 0 és 1 között van, ahol az 1 érték a maximális belső konzisztenciát jelenti a skálán szereplő tételek között. Ha az érték 0,5 alatt van, akkor a belső konzisztencia nem fogadható el. A gyakorlatban 0,75-től elfogadhatónak tekintjük a konzisztencia értékét, 0,9 felett pedig kiváló. A 0,957-es érték egyértelműen mutatja már a három mintára is a rendszer belső konzisztenciája kiváló.

Érzékenységvizsgálat

Az érzékenységvizsgálat célja, hogy feltárja, a vizsgált modell kimenete mennyire változik a bemeneti paraméterek kismértékű módosítására. Az ipari kockázatelemzésben és a HISI-hez hasonló skálarendszerekben ez különösen fontos, mert segítségével meghatározható, hogy a skála mennyire érzékeny egy-egy dimenzió pontszámának változására. Az érzékenységvizsgálat során azonosíthatók a kritikus tényezők, amelyek a legnagyobb hatást

gyakorolják a végső besorolásra, és ez alapot ad a döntéshozatal és a biztonsági intézkedések optimalizálásához.

A One-at-a-Time (OAT) módszer az egyik legegyszerűbb és legszélesebb körben használt érzékenységvizsgálati technika. Lényege, hogy a modell bemeneti paramétereit egyenként változtatjuk meg egy előre meghatározott lépésközzel, miközben a többi változó értékét rögzítjük. Így megfigyelhető, hogy az adott bemenet módosítása milyen mértékben befolyásolja a kimenetet. Az OAT előnye a könnyű implementáció és az eredmények egyértelmű értelmezhetősége, hátránya viszont, hogy nem veszi figyelembe a paraméterek közötti kölcsönhatásokat. Tekintettel, hogy a módszer ezen hátrányával tisztában voltunk, ezért végeztük el megelőző validációs módszerként a konzisztencia vizsgálatot. Az OAT-módszert számos ipari, közgazdasági, orvosi és mérnöki elemzésben alkalmazzák, például Saltelli és munkatársai összefoglaló tanulmányában is részletesen bemutatják alkalmazását [32] [33]. A szintdefiníciós táblázatot és a dimenziókhoz kapcsolódó pontozási rendszert úgy alakítottuk ki, hogy a HISI-modell optimálisan, mérsékelt érzékenységgel rendelkezzen. A túlzott reakciót és a lomha viselkedést is el szeretnénk volna kerülni, így a definíciós táblában látható, hogy van egy stabil érték az adott szint középso értéke, viszont a határértékek közelében érzékeny a rendszer.

- Kjørbo (0, 2, 2, 2 → összesen 6 pont, HISI-2) – stabil állapotban
+1 pont bármely dimenzióban → 7 pont, HISI-3
-1 pont bármely dimenzióban → 5 pont, HISI-2 marad
- Santa Clara (0, 3, 3, 3 → összesen 9 pont, HISI-3) – stabil állapotban
+1 pont bármely dimenzióban → 10 pont, HISI-4
-1 pont bármely dimenzióban → 8 pont, HISI-3 marad
- Gangneung (4, 4, 5, 5 → összesen 18 pont, HISI-6) – stabil állapotban
+1 pont bármely dimenzióban → 19 pont, HISI-7
-1 pont bármely dimenzióban → 17 pont, HISI-6 marad

A validációs tapasztalatok megerősítik, hogy a HISI skála strukturált logikája alkalmas iparágfüggetlen eseményosztályozásra, és érzékenyen reagál a súlyossági tényezők kombinációjára.

ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatásunk célja a Hydrogen Incident Severity Indicator (HISI) skála kidolgozása volt, amely hidrogéntéchnológiai események többdimenziós, súlyossági osztályozását teszi lehetővé. A modell felépítését és működését, valamint eredményeit bemutattuk.

A validációs folyamat során előbb esettanulmányok és szakértői elemzések kerültek felhasználásra, melyeket besoroltunk, majd a kapott eredmények lehetővé tették, hogy a validációs folyamatot konzisztenciaanalízissel és érzékenységelemzéssel folytassuk.

Tudományos módszerekkel igazoltuk a konzisztenciáját, érzékenységet és iparágfüggetlen alkalmazhatóságát. A HISI modell túlmutat az egyszerű technikai osztályozáson: lehetőséget ad a kockázati kommunikáció, szabályozás, oktatás és biztonsági auditálás területén is. A HISI-modell hozzájárulhat ahhoz, hogy a hidrogéngazdaság fejlődése ne csak fenntartható, hanem biztonságos is legyen – megelőzve ezzel azokat a kockázatokat, amelyek az új technológiák gyors bevezetésével járnak.

A kutatás jövőképe

- A rendszer finomítása és egy nagy adatbázis létrehozása 50-100 minősített esettanulmány feldolgozása, ami alapján a HISI-skála paraméterei finomíthatók.
- Tervezzük, hogy elkészítjük a skála webes, és táblagépes változatát, annak érdekében, hogy a minősítés távolról, felmérési helyekről is elvégezhető legyen.
- Bízunk benne, hogy a további minősítések, olyan mértékben fogják növelni a tapasztalatunk, ami a további skálafejlesztések folyamatába előnyösen hasznosíthatók.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA), "INES – The International Nuclear and Radiological Event Scale User's Manual," IAEA, Vienna, 2013.
- [2] OECD/NEA, "The International Nuclear and Radiological Event Scale (INES) – A Guide for Communicators," OECD Publishing, Paris, 2008.
- [3] European Commission, "ESIA – The European Scale of Industrial Accidents: Technical Description," JRC, Seville, 2010.
- [4] French Ministry for the Ecological Transition, "ARIA – Analysis, Research and Information on Accidents Database," Ministère de la Transition écologique, [Online]. <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr> [megtekintve: 2024. október 12.]
- [5] M. C. Galassi, E. Papanikolaou, D. Baraldi, E. Funnemark, E. Håland, A. Engebø, G. P. Haugom, T. Jordan, and A. V. Tchouvelev, "HIAD – hydrogen incident and accident database," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 22, pp. 17351–17357, Nov. 2012.
- [6] A. Campari, E. Stefana, D. Ferrazzano, and N. Paltrinieri, "Analyzing Hydrogen-Related Undesired Events: A Systematic Database for Safety Assessment," in *Proceedings of the 33rd European Safety and Reliability Conference (ESREL 2023)*, 2023.
- [7] A. Khanal, N. Chaudhary, B. Pandey, and B. S. Thapa, "Review of Hydrogen-Related Accidents: Root Causes, Mitigation Strategies, and Recommendations for Secure Utilization," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1254, no. 1, p. 012021, 2024.
- [8] C. Correa-Jullian and K. Groth, "Data Requirements for Improving the Quantitative Risk Assessment of Liquid Hydrogen Storage Systems," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 75, pp. 37349–37361, 2021.
- [9] J. Wen, M. Maroño, P. Moretto, E. Reinecke, P. Sathiah, E. Studer, és E. Vyazmina, "Statistics, Lessons Learnt and Recommendations from Analysis of HIAD 2.0 Database," 2021.
- [10] J. Wen, M. Maroño, P. Moretto, E. Reinecke, P. Sathiah, E. Studer, E. Vyazmina, és D. Melideo, "Statistics, Lessons Learned and Recommendations from Analysis of HIAD 2.0 Database," *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022.
- [11] U.S. Occupational Safety and Health Administration, "Process Safety Management" [Online]. Available: <https://www.osha.gov/process-safety-management>. [megtekintve: 2024. október 15].
- [12] American Petroleum Institute, "Recommended Practice 754 Fact Sheet: Process Safety Indicators for the Refining and Petrochemical Industries," Szeptember 2021. [Online]. elérhető: <https://www.api.org/-/media/Files/Oil-and-Natural-Gas/Refining/Process%20Safety/RP-754-Fact-Sheet.pdf>

- [13] Directive 2012/18/EU – Seveso III, Európai Unió, "Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances," Official Journal of the European Union L197, o. 1–37, 2012. júl. 24. [Online]. Elérhető: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/18/oj/eng>. [Hozzáférés dátuma: 2025. aug. 02.]
- [14] Major Accident Reporting System (eMARS) Európai Bizottság, Joint Research Centre, "Major Accident Reporting System (eMARS)," 2018. ápr. 25. [Online]. Elérhető: https://knowledge4policy.ec.europa.eu/projects-activities/major-accident-reporting-system-emars_en. [Hozzáférés dátuma: 2025. aug. 02.]
- [15] Introduction to EU Environmental Law – ERA Module, European Academy of Law (ERA), "Introduction to EU Environmental Law – Module 8, Part 2," [Online]. Elérhető: https://www.era-comm.eu/Introduction_EU_Environmental_Law/EN/module_8/part_2/part_2_1.html. [Hozzáférés dátuma: 2025. aug. 02.]
- [16] eMARS Statisztikák - European Commission, Joint Research Centre (JRC), "eMARS Statistics," [Online]. Elérhető: <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/statistics/statistics>. [Hozzáférés dátuma: 2025. aug. 03.]
- [17] eMARS Balesetkereső oldal - European Commission, Joint Research Centre (JRC), "eMARS Accident Search," [Online]. Elérhető: <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/accident/search>. [Hozzáférés dátuma: 2025. aug. 03.]
- [18] R.C. Stokes, Q.A. Baker, M.P. Broadribb, T.V. Rodante, C.A. Grounds, "CCPS Incident Investigation Book, Third Edition," Hazards 29, IChemE, 2019. [Online]. Elérhető: <https://www.icheme.org/media/19410/hazards-29-paper-30.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 2024. november 05.]
- [19] Sydney Water, "HSP-014: HIDRA Health and Safety Procedure," 2007. febr. [Online]. Elérhető: <https://www.sydneywater.com.au/content/dam/sydneywater/documents/health-and-safety-procedure-HIDRA.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 2024. december 21.]
- [20] G.V. Poje, I. Rosenthal, "The role of the chemical safety board in preventing chemical accidents," Hazards XVI, IChemE, 2001. [Online]. Elérhető: <https://www.icheme.org/media/10150/xvi-paper-05.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 2025. január. 12.]
- [21] U.S. Chemical Safety Board (CSB), "CSB Best Practice Guidance," [Online]. Elérhető: <https://www.csb.gov/csb-best-practice-guidance/>. [Hozzáférés dátuma: 2024. október 15.]
- [22] Nel Hydrogen, "Status and Q&A regarding the Kjørbo incident," 2019. jún.–júl. [Online]. Elérhető: <https://nelhydrogen.com/status-and-qa-regarding-the-kjorbo-incident/>. [Hozzáférés dátuma: 2024. aug. 02.]
- [23] N. Ade, B. Wilhite, and H. Goyette, "An integrated approach for safer and economical design of Hydrogen refueling stations," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 45, no. 58, pp. 32713–32727, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.105.
- [24] H2Tools – Santa Clara Incident Review Report Hydrogen Safety Panel, "AP Santa Clara Incident Review Report Rev1," 2021. jún. [Online]. Elérhető: https://h2tools.org/sites/default/files/2021-06/AP_Santa_Clara_Incident_Review_Report_Rev1.pdf. [Hozzáférés dátuma: 2024. aug. 02.]
- [25] P. Marsh, "Santa Clara Incident Summary: Hydrogen Trailer Transfill Facility Explosion, 1 June 2019," Individual Incident Summary Report Rev. 0, XBP Refining Con-

- sultants Ltd., Santa Clara, CA, Aug. 2023. [Online]. Elérhető <https://www.icheme.org/media/24670/santa-clara-incident-summary-01-jun-19.pdf> [Hozzáférés dátuma: 2024. aug. 02.].
- [26] Y. Lee, M.H. Cho, M.C. Lee, and Y.J. Kim, "Evaluating hydrogen risk management policy PR: Lessons learned from three hydrogen accidents in South Korea," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, pp. 24536–24547, 2023
- [27] S.I. Kim, Y. Kim, "Review: Hydrogen Tank Explosion in Gangneung, South Korea," *Center for Hydrogen Safety Conference, AIChE*, 2019. [Online]. Elérhető: <https://proceedings.aiche.org/chs/conferences/international-center-hydrogen-safety-conference/2019/proceeding/paper/review-hydrogen-tank-explosion-gangneung-south-korea>. [[Hozzáférés dátuma: 2024. aug. 02.].]
- [28] Fotó: insideevs.com, "Hydrogen Fueling Station Explodes," *InsideEVs*, May 23, 2019. [Online]. Elérhető: <https://insideevs.com/news/354223/hydrogen-fueling-station-explodes/>
- [29] Fotó: abc7news.com, "Hydrogen explosion shakes Santa Clara neighborhood," *ABC7 News*, June 3, 2019. [Online]. Elérhető: <https://abc7news.com/post/hydrogen-explosion-shakes-santa-clara-neighborhood/5326601/>
- [30] Fotó: www.koreatimes.co.kr, "Hydrogen tank explosion kills 2 in Gangneung," *The Korea Times*, May 23, 2019. [Online]. Elérhető: <https://www.koreatimes.co.kr/southkorea/society/20190523/hydrogen-tank-explosion-kills-2-in-gangneung>
- [31] G. Ursachi, I. Horodnic, C. Zait, "How reliable are measurement scales? External factors with influence on Cronbach's alpha," *Procedia Economics and Finance*, vol.23, pp.679–686, 2015.
- [32] G. Ursachi, I. A. Horodnic, and A. Zait, "How reliable are measurement scales? External factors with indirect influence on reliability estimators," *Procedia Economics and Finance*, vol. 20, pp. 679–686, 2015, doi: 10.1016/S2212-5671(15)00123-9
- [33] A. Saltelli, S. Tarantola, F. Campolongo, and M. Ratto, *Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models*. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 2004.