

Hidrogénincidensek osztályozásának jelenlegi korlátai és egy új eseményskála (HISI) fejlesztése.

Szén István^{1,2}

1. Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar - Elektrofizika Intézet, Hidrogéntechológiák és Ipari IoT Tanszék (HTT), Budapest 1034 Bécsi út 94-96/A, Magyarország, szen.istvan@kvk.uni-obuda.hu

2. Óbudai Egyetem, Egyetemi Kutató és Innovációs Központ - Hidrogén és Hibrid Technológiák Kutatóközpont, 1034 Bécsi út 94-96/A, Magyarország, szen.istvan@kvk.uni-obuda.hu

Az elmúlt tíz év hidrogéntechológiai fejlődése, valamint az ehhez kapcsolódó balesetek és üzemzavarok részletes feltárása világosan jelezte, hogy a terület biztonsági eseményeinek szisztematikus dokumentálása és értékelése mind nemzetközi, mind hazai szinten hiányosságokkal terhelt. A releváns szakirodalom kritikus áttekintése és az általam elvégzett lefedettség hiányelemzés egyaránt azt mutatta, hogy a jelenlegi gyakorlat nem rendelkezik olyan, széles körben elfogadott, többdimenziós osztályozási kerettel, amely alkalmas volna a hidrogénhez köthető események következetes és objektív súlyossági értékelésére. E kutatás célja egy olyan új, tudományosan megalapozott súlyossági skála kialakítása, amely kifejezetten a hidrogéntechológiákban bekövetkező események objektív besorolását hivatott támogatni. A javasolt rendszer egyrészt illeszkedni kíván a meglévő ipari értékelési keretrendszerekhez, másrészt olyan interoperabilitást biztosít, amely elősegíti az adatmegosztást és a kooperatív elemzést mind a bemeneti, mind az eredményoldali feldolgozás során. Az új skálastruktúra lehetőséget teremt az események közötti átlátható, következményalapú összehasonlításra, ami hozzájárul a hidrogénalapú iparágak biztonsági kultúrájának fejlődéséhez, valamint a preventív intézkedések hatékonyságának további növeléséhez.

Kulcsszavak: eseményskála, hidrogénbiztonság, incidens, HISI,

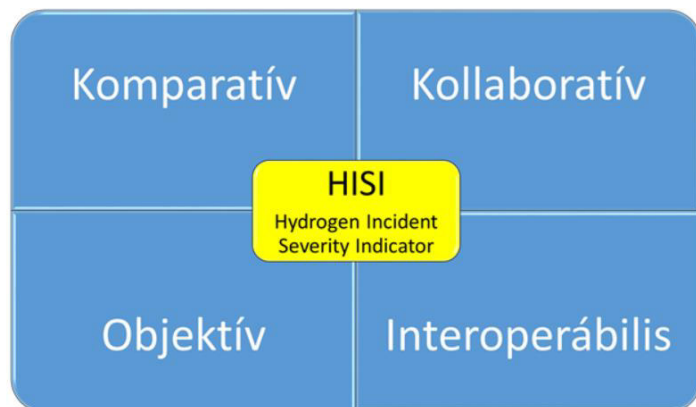
6 Bevezetés

A hidrogéntechológiákhoz kapcsolódó létesítmények és rendszerek működése sajátos, többtényezős biztonsági kihívásokat vet fel, amelyek jelentősen túlmutatnak a hagyományos tűz- és robbanásveszélyes ipari környezetek ismert kockázati kategóriáin. A hidrogén rendkívül alacsony gyulladási energiája (0,017 mJ levegőben), rendkívül széles éghetőségi tartománya (4–75 V/V), nagy diffúziós sebessége, valamint a szinte láthatatlan lángkép olyan sajátos

veszélypotenciált alakít ki, amelyhez a jelenleg alkalmazott ipari eseményosztályozó rendszerek nem illeszthetők megfelelően [1][2][5][9][10][11][12].

Az energiaátmenet jelenlegi szakaszában – amelyet többek között az Európai Zöld Megállapodás és a hazai energiatervezési dokumentumok, például a NEKT (Nemzeti Energia- és Klímaterv) is meghatároznak – a hidrogén szerepe gyorsan bővül mind az ipari, mind a közlekedési, mind az energiatárolási alkalmazásokban [3][4][5][6][7][8]. Az elmúlt évtized több jelentős hidrogénbalesete – köztük a 2019-es Kjørboe-i (Norvégia), a Santa Clara-i (USA) és a Gangneung-i (Dél-Korea) esemény – jól érzékeltette, hogy a ma használt ipari eseményskálák nem képesek adekvát módon kezelni a hidrogénspecifikus sajátosságokat és következménytereket [3][13][14].

A legelterjedtebb nemzetközi riport- és osztályozási rendszerek – így az INES (International Nuclear Event Scale), az ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents), az ESIA (European Scale of Industrial Accidents) és a HIAD (Hydrogen Incident and Accident Database) – csak korlátozott mértékben alkalmasak a hidrogénnel összefüggő események értékelésére. Bár a HIAD kifejezetten hidrogéneseeményeket gyűjt, formális és kvantitatív súlyossági skála hiányában nem képes következetes kategorizálást biztosítani. Mindezek indokolják egy olyan új, hidrogénspecifikus, többdimenziós eseményskála kidolgozását, amely képes kezelni a technológiai sajátosságokból fakadó komplexitást [13][14][16][17]. A tervezett HISI-modellem (Hydrogen Incident Severity Indicator) fejlesztési alapelvei az 1. ábrán kerülnek összefoglalásra.



4. ábra: A HISI-modellel tervezési alapjai [12][13].

7 Az új skála megalkotásának motivációja

A rendelkezésre álló nemzetközi szakirodalom átfogó vizsgálata alapján kijelenthető, hogy a hidrogénnel kapcsolatos incidensek értékeléséhez szükséges multidimenzionális, technológiaspecifikus szemlélet jelenleg nem épült be az ipari gyakorlatba. A széles körben alkalmazott módszerek – például a FMESA (Failure Modes and Effects Safety Analysis), a MORT (Management Oversight and Risk Tree) vagy az ARAMIS (Accidental Risk Assessment Methodology for Industries) – jellemzően meghatározott technológiai területekre lettek szabva, így nem biztosítják a hidrogénesemények következményorientált és komplex elemzését [13][15][18][19][22].

A nukleáris iparban használatos INES skála strukturális és koncepcionális okokból nem ültethető át hidrogénincidensek értékelésére. Az ESIA és ARIA adatbázisok ugyan széles körű ipari baleseti információkat gyűjtenek, azonban nem tartalmaznak olyan hidrogénspecifikus paramétereket, amelyek lehetővé tennék a gáz egyedi fizikai és kémiai tulajdonságainak figyelembevételét [13][19][22].

A tudományos gap-analízis eredményei alapján a jelenleg használt rendszerek több kritikus dimenziót is alulreprezentálnak, így például:

- anyagkompatibilitási kihívások, különösen a hidrogén okozta szerkezeti degradáció;
- fémridegédi folyamatok;
- az extrém alacsony gyulladási energia következményterei;
- humán- és szervezeti tényezők hatása;
- kriogén üzemmód sajátosságai (pl. cseppfolyós hidrogén kezelése);
- diffúzióból eredő veszélyzónák kialakulása és terjedési mechanizmusai [9][10][11][12].

Ezen hiányosságok világosan indokolják egy dedikált, hidrogénközpontú eseményskála létrehozását, amely képes lefedni a teljes következményteret és kezelni a technológia sajátos kockázati mintázatait [11][12][13].

8 A skála felépítése

Szakirodalomkutatásom alapján megállapítottam, 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 kockázateértékelést.

8.1 A HISI-modell alapjainak meghatározása

A Hydrogen Incident Severity Indicatorral a célom egy egységes, többdimenziós, strukturált súlyossági osztályozási rendszer megalkotása, hidrogéntechológiai 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.

8.1.1 A modell alkalmazási köre

A modell közvetlenül alkalmazható a már meglévő, valamint a jövőben létesülő hidrogéntechológiai 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.

8.1.2 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 nagy nyomású gáz valamint kriogén rendszerek),
- hidrogénszállítás (csővezetéki, 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 hidrogéntechológiák (előállítás, tárolás, felhasználás, oktatás, kutatás-fejlesztés-innováció) A HISI pozicionálása a nemzetközi rendszerekbe

8.1.3 A HISI-skála dimenziói

A HISI-skála koncepcionális alapjainak kialakításakor elsődleges célom az volt, hogy az értékelési dimenziókat olyan, a szakirodalomban rögzített és nyílt hozzáférésű adatbázisokból származó paraméterekre építsem, amelyek alkalmasak a hidrogénteknológiák sajátos kockázati jellemzőinek megragadására. Amint azt a bevezető részben már bemutattam, az áttekintett eseményskálák és incidens-adatbázisok egyike sem tartalmaz olyan hidrogénspecifikus tényezőket, amelyek lehetővé tennék a következetes és átfogó súlyossági értékelést. Ennek megfelelően a fejlesztés első lépése a hidrogénre jellemző kockázati elemek azonosítása, majd azok integrálása egy új, strukturált és következetes értékelési keretbe. Második kiemelt célként olyan rendszerszintű illeszkedést kívántam biztosítani, amely lehetővé teszi, hogy a HISI ne csupán kiegészítse a már létező eseményosztályozási gyakorlatokat, hanem azokkal harmonizálva – jogi, műszaki és biztonságtechnikai értelemben egyaránt – alkalmazható legyen mind hazai, mind európai, mind pedig nemzetközi kontextusban.

Az emberi hatások vizsgálata a globális iparbiztonsági ajánlásokban kiemelt jelentőséget kap. Az Egyesült Államokban az OSHA-PSM (Process Safety Management) kötelező szabályozása, valamint az API RP 754 iránymutatásai egyértelműen a legmagasabb súlyossági kategóriába sorolják a súlyos sérülésekkel vagy halálesettel járó eseményeket. Az Európai Unióban a Seveso III irányelv és az eMARS (Major Accident Reporting System) adatbázis ugyancsak kötelező jelentési kötelezettséget ír elő a súlyos és halálos kimenetelű balesetek esetén. A CCPS metodikái külön kezeli a tűz-, robbanás- és toxikus expozíció okozta sérüléseket, míg az ARIA adatbázis strukturált rendszert alkalmaz a személyi érintettség és halálozás statisztikai elemzésére. Ezeket az alapelveket követve a HISI a személyi sérülések önálló dimenzióját úgy alakítja ki, hogy az fokozatos, nemzetközileg összevethető és súlyosbodó következményeket tükröző besorolást tegyen lehetővé.

A környezeti hatások dimenziója egyrészt a Seveso III irányelv talaj-, víz- és levegőszennyezésre vonatkozó kritériumaira épül, másrészt kiegészül olyan hidrogénspecifikus paraméterekkel, mint a vészhelyzeti kibocsátás mértéke vagy a kritikus környezeti receptorok – például ivóvízbázisok, védett területek vagy lakóövezetek – érintettsége. E bővített szempontrendszer teszi lehetővé a hidrogénkibocsátások kontextusfüggő és finomfelbontású értékelését.

A vagyoni és infrastrukturális károk meghatározása az API RP 754 negyedik szintű, „Significant Property Damage” kategóriájára, valamint az ARIA és a Chemical Safety Board (CSB) gyakorlatára támaszkodik, amelyek egyaránt alkalmaznak pénzügyi küszöbértékeket és energia-alapú károkozási mutatókat (például TNT-ekvivalenciát és túlnyomási zónák meghatározását). Ez a megközelítés különösen releváns a hidrogén nagyenergiájú, gyorsan terjedő égési és robbanási folyamataiból fakadó kármintázatok értékelésénél.

A műszaki meghibásodások értékelése a CCPS és az OSHA-PSM által meghatározott kritikus biztonsági funkciók teljesíthetőségére épül, továbbá tartalmazza az ARIA adatbázisokból ismert eseménykezelési hatékonysági indikátorokat. E szempont tartalmazza mind a berendezésszintű, mind a rendszerszintű meghibásodások következményprofilját, valamint a hibák terjedésének módját és mértékét.

A négy dimenzió együttes alkalmazása biztosítja, hogy a HISI-skála a hidrogénnel kapcsolatos események teljes következményrendszerét reprezentálni tudja, miközben technikai, jogi és kommunikációs értelemben is értelmezhető kategóriákat hoz létre. A dimenziók kombinált értékelése lehetővé teszi, hogy a HISI egy esemény komplex, többtényezős súlyossági profilját jelenítse meg, és ezáltal objektív, összehasonlítható, valamint a nemzetközi gyakorlatba illeszthető besorolást nyújtson.



5. ábra: A HISI-skála dimenziói [12][13]

8.1.4 A HISI-skála pontozási rendszere

A HISI-skála egy hétszintű, négydimenziós pontszám alapú rendszert alkalmazó skála. Minden dimenzióhoz egy 0-5-ig terjedő pontszám tartozik, ahol a magasabb pontszám súlyosabb következményeket jelez. Az egyes dimenziókra adott pontszámok összege adja a HISI-összpontszámot, amely alapján, a szintdefiníciós táblázat 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 érintettség)	<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 tűz, minden biztonsági rendszer jól működött	Marginális emberi hiba és részleges műszaki hiba, gyors beavatkozás	Emberi hiba/részleges műszaki hiba, az esemény lokális tüzzel vagy robbanással járt	Jelentős emberi hiba/kritikus hiba egy alrendszerben, késleltetett beavatkozás, kiterjedt tűz, robbanás	Több alrendszer hibája, nincs lehetőség megelőző beavatkozásra	Felclődés és jelentős emberi hiba és/vagy kritikus rendszerhiba (több fontos alrendszer hibája, károsodása)

3. ábra: Dimenziók - hatások és pontok [12][13]

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

4. ábra: Szintdefiníciós táblázat [12][13]

Egy esemény elemzése során, két eredményt kapunk. 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. Ezt a diagrammot, az esemény következményprofiljának tekinthetjük és a HISI-Quadrilemma nevet adtam neki. A quadrilemma egy szemléltető és kommunikációs eszköznek, a gyors tájékoztatás és összehasonlítás érdekében.

8.1.5 A HISI-skála empirikus validációja

A HISI-skála tudományos megalapozottságát több lépcsőben értékeltem. Elvégeztem az empirikus validációt reprezentatív esettanulmányok bevonásával, amely igazolta a skála következetes működését és megfelelő diszkriminációs képességét. A belső megbízhatóság statisztikai vizsgálata magas konzisztenciát mutatott. A robusztusság és stabilitás ellenőrzésére szenzitivitásvizsgálatot is lefolytattam, amely megerősítette, hogy a HISI-skála a kisebb bemeneti

változásokra kontrolláltan reagál, míg a kritikus határértékek közelében megfelelő érzékenységgel jelzi a súlyossági szint módosulását. E vizsgálatok összességükben igazolják a skála gyakorlati alkalmazhatóságát és megbízhatóságát.

9 Alkalmazási perspektívák, nemzetközi harmonizáció és következtetések

A HISI-skála alkalmazhatósága jól körülhatárolható, ugyanakkor rugalmas keretet biztosít a jövőbeni fejlesztések számára. A rendszer közvetlenül beépíthető az ipari, kriogén, közlekedési és laboratóriumi hidrogéntechnológiai rendszerek értékelésébe [3][5][8], és nemcsak hagyományos, statikus biztonsági elemzésekben használható, hanem valós idejű monitorozásra épülő döntéstámogató platformokba is integrálható. A HISI más nemzetközi osztályozási és riportálási rendszerekkel együttműködve, azok hidrogénspecifikus kiegészítő moduljaként működik, nem pedig helyettesíti azokat [12][13].

Szabályozói szempontból a HISI releváns alapot nyújthat a Seveso III irányelv, az eMARS jelentési rendszer, valamint az OSHA-PSM követelményeinek hidrogénkörnyezetben történő alkalmazásához. A skála illeszthető a nemzeti és nemzetközi biztonsági adatbázisokhoz, támogatva a hosszú távú trendanalízist, az oksági struktúrák feltárását és a megelőzési stratégiák hatékonyságának értékelését [12][13]. A HISI alapján létrehozható, központilag koordinált hidrogénincident-adatbázis a tudományos, ipari és szabályozói közösségek számára jelentős tudásbázist kínálhat a jövőben.

10 Összefoglalás

A Hydrogen Incident Severity Indicator egy új, kutatásalapú és többdimenziós eszközt jelent a hidrogéntechnológiák biztonsági értékelésében. A skála alkalmas arra, hogy objektív, összevethető és nemzetközileg összehangolható besorolást biztosítson, ezáltal hozzájárulva a hidrogénalapú rendszerek biztonságának erősítéséhez és fenntartható fejlődéséhez [12][13].

11 Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani az Óbudai Egyetemnek, és a Kandó Kálmán Villamosmérnöki Karnak, valamint Dr. habil. Wühl Tibor Úrnak, a konferencia szervezésért és a kiadványkötet megjelenéséhez kapcsolódó munkájáért.

Forrásjegyzék

- [1] Agrawal, H., & Raghu, S. (2019). Hydrogen safety aspects and hazards. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(36), 19484-19500.
- [2] Ustolin, F., et al. (2021). A review of hydrogen vehicle incidents and accidents by country. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(54), 27867-27891.
- [3] Szén, István, GH2 - Green hydrogen hydrogen energy in the light of sustainability, In: Kolcun, M; Kurimsky, J; Kolcunova, I (szerk.) *PROCEEDINGS OF THE 9TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC SYMPOSIUM ON ELECTRICAL POWER ENGINEERING (ELEKTROENERGETIKA 2017)*, Kosice, Szlovákia : Technical University of Kosice (2017) pp. 556-560. , 4 p.
- [4] Ervin, Rác ; István, Szén, GH2 – Green Hydrogen: Hydrogen Energy in the light of sustainability (2017), Előadás, *ELEKTROENERGETIKA 2017. International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering*, Stará Lesná, Szlovákia, September 12-14., 2107.,
- [5] Szén István, Hidrogén alapú energetika, In: Óbudai, Egyetem (szerk.) *XII. Óbudai Energetikai Konferencia*, Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem (2017) 132 p. pp. 91-102. , 12 p.
- [6] Istvan, Szen ; Ervin, Racz, Use of the Power Line Communication System (PLC) at Low Voltage (0.4 kV) Noisy Electrical Networks – Introducing a New Concept at Power Quality *RENEWABLE ENERGY & POWER QUALITY JOURNAL RE&PQJ : RE&PQJ-10* pp. 1735-1740. Paper: 823 , 6 p. (2012).
- [7] Szén, István ; Dr. Janáky, Csaba ; Bakos, Imre ; Dr. Endrődi, Balázs ; Pintér, László ; Koncz, Bence, A bükkábrányi naperőmű megújuló áramtermelését hasznosító innovatív energiáról technológia fejlesztése.
- [8] Szén István, A hidrogén jelentősége a megújuló energiaforrások integrációjában valamint szerepe a fenntartható energetikában és a „zöld iparban”. In: Temesvári, Zsolt; Wühl, Tibor; Molnár, György (szerk.) *XXXVIII. Kandó Konferencia 2022 - Kiadvány kötet Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar* (2022) 419 p. pp. 69-79. , 11 p.
- [9] Szén István, Hidrogén-biztonság: Balesetek kvantitatív elemzése és biztonságközpontú, új tervezési módszerek fejlesztése , 1 p. (2023), *XXXIX. Kandó Konferencián elhangzott előadás és absztrakt.*
- [10] Szén, István ; Rác, Ervin ; Bakosné, Diószegi Mónika, Hidrogénüzemek, új és komplex kockázatértékelési rendszere: Új tervezési irányelvek a hidrogénipari létesítmények biztonságának fokozása érdekében, In: Wühl, Tibor (szerk.) *KVK Habilitációs és PhD Workshop Minikonferencia : Kiadvány kötet, Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar* (2024) 124 p. pp. 92-97. , 6 p.
- [11] Hidrogénbiztonság: Balesetek kvantitatív elemzése és biztonságközpontú, új tervezési módszerek fejlesztése. In: Molnár, György; Temesvári, Zsolt; Wühl, Tibor (szerk.) *XXXIX. Kandó Konferencia 2023, Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem* (2024) 420 p. pp. 44-49. , 6 p.

- [12] Szén István, Óbudai Egyetem-Biztonságtudományi Doktori Iskola, Doktori értekezéstervezet (2025. szeptember 19.), Budapest
- [13] Szén, István; Bakosné Diószegi, Mónika ; Rácz, Ervin, Hidrogéntechológiák biztonsági osztályozása: a HISI-modell koncepciója és empirikus validációja, BIZTONSÁGTUDOMÁNYI SZEMLE 7 : 3 pp. 113-128. , 16 p. (2025)
- [14] Gáti-Kiss, Dániel ; Bakos, Imre ; Szén, István, Hidrogénbekeverés-projekt az OPUS TIGÁZ Zrt.-nél, H₂ - HIDROGÉN HÍRLEVÉL : A MAGYAR HIDROGÉN ÉS TŰZELŐANYAG-CELLA EGYESÜLET HÍRLEVELE 2025 : 2025/1 p. Március (2025)
- [15] Merilo, E. J., et al. (2019). Hydrogen safety: Lessons learned and challenges ahead. *Safety Science*, 131, 104934.
- [16] Hydrogen Incident and Accident Database (HIAD). Retrieved from <https://h2-hiad-prod.s3.amazonaws.com/> (accessed 2025).
- [17] Ewan, B. C. R., & Allen, R. W. K. (2005). A figure of merit assessment of selected hydrogen production processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(8), 809-817.
- [18] Failure Modes and Effects Safety Analysis (FMESA) – IEC 60812:2018.
- [19] European Commission. (2020). ARIA – Analyse, Recherche et Information sur les Accidents. Retrieved from <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/>
- [20] Kikukawa, S., et al. (2021). Hydrogen storage systems for fuel cell vehicles: A review. *Journal of Power Sources*, 507, 230311.
- [21] Dincer, I., & Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(25), 7099-7111.
- [22] International Nuclear Event Scale (INES). IAEA Technical Reports Series No. 340. Vienna: IAEA, 1992.
- [23] Pfoertner, H., & Thierry, F. (2019). Investigation report: Hydrogen filling station incident in Kjørnbø, Norway. Norwegian DSB Report.
- [24] California State Fire Marshal. (2019). Incident Report: Hydrogen Trailer Explosion, Santa Clara County.
- [25] Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, 16(3), 297-334.
- [26] Saltelli, A., et al. (2019). Sensitivity analysis in practice: A guide to assessing scientific models. Wiley.
- [27] Seveso III Directive (2012/18/EU) – Guidelines on the European Major-Accident Hazard Management.
- [28] OSHA Process Safety Management (PSM) Standard, 29 CFR 1910.119.

[29] International Energy Agency (IEA). (2022). The Future of Hydrogen – Seizing Today's Opportunities. IEA Publications.