

Hydrogen Incident Severity Indicator (HISI), az új hidrogénspecifikus eseményskála.

Szén István^{1,2}

1. Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar - Elektrofizika Intézet, Hidrogéntekológiák 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

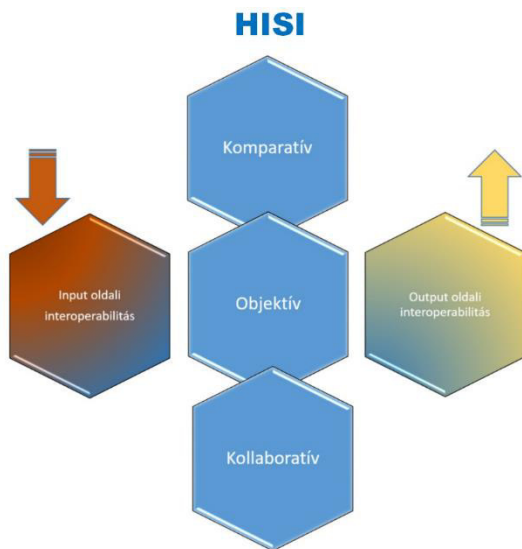
Az elmúlt évtized hidrogénhez köthető eseményei és azok részletes esettanulmányai egyértelműen rávilágítottak arra, hogy a gyors ütemben fejlődő és egyre szélesebb körben alkalmazott hidrogéntekológiák biztonsági eseményeinek dokumentálása, elemzése és rendszerezése jelentős hiányosságokat mutat. A szakirodalmi források áttekintése és az általam végzett lefedettség hiányokra irányuló vizsgálat (gap-analízis) megerősítette ezt a tapasztalatot. Kutatásom alapján jelenleg nem áll rendelkezésre olyan, általánosan elfogadott és többdimenziós súlyossági skála, amely a hidrogéntekológiákhoz kapcsolódó események következetes, teljes körű és objektív osztályozását biztosítaná. A rendelkezésre álló módszerek és modellek – például a Failure Modes and Effects Safety Analysis (FMESA), a Management Oversight and Risk Tree (MORT), az Accidental Risk Assessment Methodology for Industries (ARAMIS), illetve a Hydrogen Component Reliability Database (HyCReD) – jellemzően szűk technológiai fókuszúak, eseti alkalmazásokhoz készültek, vagy csupán komponensszintű értékelésre alkalmasak. Hasonló korlátok figyelhetők meg az olyan nemzetközileg elismert rendszerek esetében is, mint az International Nuclear Event Scale (INES), a European Scale of Industrial Accidents, az Analyse, Recherche et Information sur les Accidents (ARIA) vagy a Hydrogen Incident and Accident Database (HIAD). Ezek a megközelítések nem teszik lehetővé a hidrogénspecifikus események strukturált, következményalapú és súlyossági szempontú értékelését. Bár a HIAD kifejezetten hidrogénhez kapcsolódó eseményeket gyűjt és elemez, egyik lényeges hiányossága, hogy nem rendelkezik formalizált, kvantitatív súlyossági skálával. Kutatásom célja egy olyan új, tudományos alapokon nyugvó súlyossági skála kidolgozása, amely kifejezetten a hidrogéntekológiákhoz kapcsolódó események objektív osztályozását szolgálja. A javasolt rendszer célja, hogy kiegészítse a már széles körben használt ipari eseményértékelési keretrendszereket, miközben biztosítja az interoperabilitást és a kollaboratív adatelemzést mind a bemeneti, mind a kimeneti oldalon. Az új skálaszerkezet lehetőséget teremt az események közötti objektív összehasonlításra, ezáltal hozzájárulva a hidrogénipar biztonsági kultúrájának fejlesztéséhez és a megelőző intézkedések hatékonyságának növeléséhez.

Kulcsszavak: hidrogén, biztonság, HISI, eseményskála, incidens, empirikus validáció

1 Bevezetés

A hidrogéntechológiák objektumai, tűz- és robbanásveszélyes, rendkívül komplex biztonsági profillal rendelkeznek. A hidrogén alacsony gyulladási energiája (0,017 mJ levegőben), széleskörű gyulladási tartománya (4–75 V/V), nagy diffúziós képessége és szabad szemmel szinte nem látható lángja olyan kockázati profilt eredményez, amely a hagyományos ipari eseményosztályozási rendszereknek nem felel meg [1][2][5][9][10][11][12].

Az Energiaátmenet jelen szakaszában, amelyet az Európai Zöld Megállapodás és a nemzeti stratégiák (pl.: NEKT – Nemzeti Energia és Klímaterv) előírnak, a hidrogén alkalmazása egyre szélesebb körben terjed [3][4][5][6][7][8]. Az elmúlt évtizedben több dokumentált hidrogénbaleset is, (pl.: 2019-es Kjørbo-i (Norvégia), Santa Clara-i (USA) és Gangneung-i (Dél-Korea)) rávilágított arra, hogy az ipari események osztályozási rendszerei nem megfelelően kezelik a hidrogénspecifikus kockázatokat [3][13][14]. A meglévő eseményriport és -osztályozási rendszerek, - mint 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) – jelentős korlátokkal küzdenek. Ugyan a HIAD kifejezetten hidrogénincidenseket gyűjt, de nem rendelkezik formalizált, kvantitatív súlyossági skálával. Ezen tények jelentik a fő motivációt arra, hogy egy új, hidrogénspecifikus, multidimenzionális eseményskálát definiáljak [13][14][16][17]. A skála fundamentális alapjait az 1. ábrán szemléltetem.

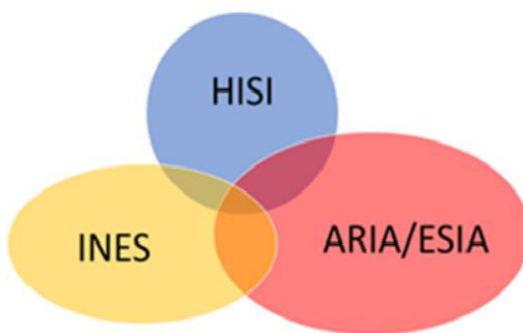


19. ábra: A HISI-modell tervezési alapjai [12][13].

2 A meglévő eseményosztályozási rendszerek hiányosságai

A nemzetközi, szisztematikus szakirodalomkutatás alapján kijelenthetem, hogy a hidrogénspecifikus incidensek értékeléséhez szükséges multidimenzionális megközelítés jelenleg hiányzik az ipari gyakorlatban. A FMESA (Failure Modes and Effects Safety Analysis), a MORT (Management Oversight and Risk Tree) és az ARAMIS (Accidental Risk Assessment Methodology for Industries) szűk technológiai fókuszúak, és nem alkalmazhatók általánosan a hidrogénesemények értékelésére [13][15][18][19][22]. Az INES skála, bár nemzetközileg elfogadott a nukleáris iparban, nem értelmezhető hidrogénincidensekre. Az ESIA és ARIA adatbázisok, noha ipari baleseteket gyűjtönek, nem tartalmaznak hidrogénspecifikus paramétereket [13][19][22].

A tudományos gap-analízis eredményei azt mutatják, hogy a jelenlegi rendszerek alulreprezentálnak olyan kritikus dimenziókat, mint: (1) a hidrogén, kompatibilitási problémái, (2) a fémek ridegedése; (3) az alacsony gyulladási energiával összefüggő sajátosságok; (4) az emberi és menedzsment tényezők szerepe; (5) a kriogén folyamat (cseppfolyós hidrogén esetén); (6) az áramló gáz diffúziója következtében kialakuló veszélyzónák [9][10][11][12]. Ezek a hiányosságok indokoltá teszik egy új, kifejezetten hidrogénre kidolgozott skála megalkotását [11][12][13].



20. ábra: A HISI komplementer szerepe és integrálhatósága más rendszerekhez [12][13]

3 A Hydrogen Incident Severity Indicator szerkezete és dimenziói (HISI (Szén 2025))

A HISI egy hétszintű, négydimenziós pontozási alapú rendszer, amely az alábbi dimenziókat (3. ábra) integrálva értékeli a hidrogénincidenseket:

- **emberi hatások** (személyi sérülések, halálesetek);
- **környezeti hatások** (talaj-, víz- és légszennyezés, hidrogénkibocsátás);
- **fizikai kár** (vagyon kár, infrastrukturális károk TNT-ekvivalencia alapján);
- **műszaki meghibásodások** (kritikus biztonsági funkciók elvesztése, szisztematikus hibák) [12][13].

Minden dimenzió 0–5 pontig terjed, ahol a magasabb érték súlyosabb következményt jelez.

A HISI súlyossági szintjei logaritmikus hatásszemlélettel rendelkeznek, hasonlóan az INES skálához. Az HISI-1 a legkevesbé súlyos eseményt, az HISI-7 pedig a katasztrofális baleset kategóriáját reprezentálja. A skála ordinális jellegű, biztosítva, hogy a szintek között egyértelmű sorrendiség van. Az összes dimenzióra adott pontszámok összege adja az HISI-összpontszámot, amely alapján a szintdefiníciós táblázat segítségével meghatározható az esemény súlyossági kategóriája [12][13].



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

4 Empirikus validáció és esettanulmányok

A HISI-skála tudományos megalapozottságának igazolásához empirikus validációt végeztem el. Az empirikus validáció célja a skála gyakorlati működésének ellenőrzése, valamint a következetesség értékelése. A kiválasztott esettanulmányok széleskörűen reprezentálják a hidrogénincidensek különféle típusait, országokat és létesítménytípusokat.

A validáció során három reprezentatív esetet analizáltam: (1) a Kjorbø-i eset (2019. június 10., Norvégia – hidrogéntöltőállomási tüzeset, mérsékelt infrastrukturális kár, HISI-2); (2) a Santa Clara-i eset (2019. június 1., USA – tartálykocsi robbantás és tüzeset, közepesen súlyos kár, HISI-3); (3) a Gangneung-i laborrobbanás (2019. május 23., Dél-Korea – laboratóriumi detonációs katasztrofális szintű kár, HISI-6) [12][13][23][24]. Ezek az esetek eltérő kockázati profilokat mutatnak, lehetővé téve a HISI szenzitivitásának és diszkriminációs képességének validálását. Az esettanulmányok besorolása során konzisztenciaanalízist végeztem el Cronbach-alfa módszerrel. A számítások eredménye Cronbach- $\alpha = 0,957$, amely a skála belső konzisztenciáját igazolja (elfogadható tartomány: 0,7–0,75; kitűnő: $> 0,9$) [12]. Ez a magas érték azt mutatja, hogy a HISI dimenziói koherensen működnek együtt, és stabil empirikus megalapozottságot biztosítanak.

5 Szenzitivitásvizsgálat és robusztusság

A HISI-skála robusztusságának és stabilitásának ellenőrzésére szenzitivitásvizsgálatot végeztem a One-at-a-Time (OAT) módszer alkalmazásával. E módszer révén az egyes dimenziókat egyenként módosítjuk egy előre meghatározott lépésközzel, és megfigyeljük, hogy az adott bemenet változása milyen mértékben befolyásolja a végső besorolást. Jól tervezett skála esetén az apró módosítások csak mérsékelten hatnak az összpontszámra, míg kritikus határértékek mellett a skála kellő érzékenységgel reagál [12]. A szenzitivitásvizsgálat eredményei azt mutatják, hogy a HISI-skála mérsékelt és megfelelő re-szenzitivitással rendelkezik. Kisebb perturbációk (± 1 pont bármely dimenzióban) a legtöbb esetben nem okoznak szintváltást, azonban a kritikus határértékek közelében a skála képes megkülönböztetni a súlyosság finomabb megváltozásait. Például a Kjorbø-esetben (alappontszám: 6 = HISI-2) egy pont növekedés még HISI-2-ben marad (7 pont), míg egy pont csökkentés szintén HISI-2-ben helyezi az esetet. A határértékeken túlmutató változások azonban kategóriaváltást eredményeznek, amely demonstrálja a skála finomhangolásait és döntéstámogatási képességét.

6 Alkalmazási perspektívák, nemzetközi harmonizáció és következtetések

A HISI-skála alkalmazási köre jól definiált, de nyitott a jövőbeli fejlesztésekre. Közvetlenül alkalmazható az ipari, kriogén, szállítási és laboratóriumi hidrogéntechológiai infrastruktúrára [3][5][8]. Nem csupán a statikus alkalmazások közvetett támogatására, hanem a dinamikus on-line monitorozáshoz kapcsolódó döntéstámogatási rendszerekbe is integrálható. A HISI-skála

interoperábilis más nemzetközi rendszerekkel, nem helyettesíti őket, hanem kiegészítő, hidrogénspecifikus modulként működik [12][13].

Jogi és szabályozási szempontból a HISI alátámaszthatja a Seveso III irányelv, az eMARS Major Accident Reporting System és az OSHA-PSM alkalmazását hidrogén-specifikus környezetekben. A skála integrálható a nemzeti és nemzetközi biztonsági adatbázisokba, támogatva a statisztikai trendek elemzését, az oksági minták felismerését és a megelőző intézkedések hatékonyságának értékelését [12][13]. Hosszú távon a HISI alapú, központilag koordinált hidrogénincident-adatbázis empirikus tudásbázissá válhat, amely informálja a szabályozó, ipari és tudományos közösséget.

Összegzésül, a Hydrogen Incident Severity Indicator egy új, tudományosan megalapozott, multidimenzionális eseményskála, amely kitölt egy szignifikáns kutatási rést a hidrogénipar biztonsági dokumentációjában. A HISI-skála objektív, összehasonlítható és nemzetközileg harmonizálható besorolást tesz lehetővé, ezzel hozzájárulva a hidrogéntechnológiák biztonságos és fenntartható fejlődéséhez [12][13].

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 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 energiátároló 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 ; Rácz, 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, Hidrogénteknológiák 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 TÜZELŐANYAG-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 Kjørbo, 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.