



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS
TÉZISFÜZETE

SZÉN ISTVÁN

Hidrogénbiztonság proaktív és reaktív szemléletben

HAZOP fejlesztés TSK-fuzzy és ACS-optimalizáció kombinálásával, valamint egy hidrogénspecifikus incidensskála kidolgozása.

Témavezetők:

Bakosné Dr. Diószegi Mónika

Prof. Dr. habil Rácz Ervin

BIZTONSÁGTUDOMÁNYI
DOKTORI ISKOLA

Budapest, 2025. december 15.

Tartalomjegyzék

1	Summary	3
2	A kutatás előzményei	4
3	Célkitűzések	5
4	Vizsgálati módszerek	5
5	Új tudományos eredmények.....	6
6	Az eredmények hasznosítási lehetősége	8
7	Irodalmi hivatkozások listája/ Irodalomjegyzék	9
8	Publikációk	21
8.1	A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények	21
8.2	További tudományos közlemények – társszerzőkkel	23

1 Summary

The widespread adoption of hydrogen-based technologies represents a key pathway toward the decarbonization of energy systems; however, the distinctive physico-chemical properties of hydrogen introduce elevated safety risks throughout the entire technological life cycle.

The HAZOP method, widely applied in the process industry, provides a structured framework for hazard identification, yet it is inherently qualitative, time-consuming, and heavily dependent on expert-based subjective judgments. These limitations are particularly critical in hydrogen technology applications, where real-time risk detection constitutes a safety-critical requirement. Accordingly, one of the primary objectives of this dissertation was the development of a real-time, HAZOP-based risk assessment framework capable of overcoming the temporal and decision-consistency limitations of the classical approach through advanced fuzzy logic-based inference mechanisms.

Through quantitative performance evaluations, I demonstrated that a Takagi–Sugeno–Kang (TSK) fuzzy logic-based HAZOP model provides significantly higher computational efficiency and risk detection reliability in hydrogen technology systems compared to the Mamdani-type fuzzy approach. The methodological novelty is further strengthened by the integration of a bio-inspired optimization technique, namely Ant Colony Optimization, which reduces expert subjectivity, optimizes fuzzy rule and weight structures, and establishes a solid foundation for real-time engineering decision support.

Another independent contribution of this dissertation is the reconsideration of consequence-based evaluation of hydrogen-related industrial events. I demonstrated that currently applied industrial accident classification systems are not suitable for adequately representing hydrogen-specific impacts; therefore, I developed a new four-dimensional severity scale, the Hydrogen Incident Severity Index (HISI). Empirical case studies and statistical validation confirm that the HISI model provides consistent, sensitive, and industry-independent categorization of hydrogen-related incidents.

The integration of the proactive, real-time fuzzy-HAZOP approach with the reactive, HISI-based incident classification framework results in a scientifically grounded methodological system that substantially contributes to the advancement of hydrogen safety risk assessment, incident communication, and the safe international deployment of hydrogen-based technologies.

2 A kutatás előzményei

A 21. század energetikai átmenetének egyik meghatározó eleme a hidrogén, amely az energiarendszerek dekarbonizációját, az önálló energiaszektorok összekapcsolását és a hosszú távú, szezonális energiatárolást egyaránt támogatja. Az Európai Unió és a nemzeti energiastratégiák - köztük Magyarország Nemzeti Energia- és Klímaterve - a hidrogént kulcsfontosságú eszközként kezelik a klímasemlegességi célok elérésében. A megújuló termelőkapacitások gyors növekedése ugyanakkor növeli a villamosenergia-rendszer szabályozási igényét, a piaci volatilitást és az energiatárolás rendszerszintű szükségességét.

E kihívások kezelésében a hidrogén energiahordozóként kiemelt szerepet tölthet be, mivel alkalmas a megújulóenergia-források időszakos túltermelésének hosszútávú tárolására, valamint közvetlenül hasznosítható az iparban, a közlekedésben és a hőtermelésben. A hidrogén sajátos fizikai és kémiai tulajdonságai olyan kockázati profilt eredményeznek, amelyhez a hagyományos kockázatelemzési módszerek csak korlátozottan illeszkednek.

Kutatásom előzményeit kiterjedt szakirodalomkutatás, valamint kvalitatív és kvantitatív hidrogénipari-baleseti elemzések alapozták meg. Ennek során részletesen elemeztem a HAZOP módszertan elméleti és gyakorlati alkalmazását, valamint rámutattam annak statikus, off-line jellegéből, valamint a szakértői szubjektivitásból fakadó korlátaira. Megállapítottam, hogy a klasszikus HAZOP módszer nem alkalmas a hidrogéntechnológiai rendszerek működés közbeni, valós idejű kockázatértékelésére, különösen adatalapú, real-time környezetben.

A biztonsági események utólagos értékelése terén a jelenleg alkalmazott ipari eseményskálák nem biztosítanak hidrogénspecifikus, összehasonlítható és transzparens besorolást. Ez akadályozza a tanulási folyamatokat és a kockázatcsökkentési stratégiák hatékony kialakítását.

A fenti hiányosságok indokolták egy valós idejű, adatvezérelt, szubjektivitást csökkentő HAZOP-alapú kockázatelemzési megközelítés, valamint egy egységes, hidrogénspecifikus incidensosztályozási keretrendszer kidolgozását. Disszertációm 2–3. fejezetei a HAZOP módszertan fejlesztésének eredményeit mutatják be, míg a 4. fejezet egy új incidensskála elméleti megalapozását és empirikus validációját ismerteti.

Összefoglalva, a hidrogéntechnológiák rendszerszintű integrációja új biztonsági kihívásokat teremt, amelyek a hagyományos kockázatelemzési módszerek továbbfejlesztését és egy objektív, hidrogénspecifikus eseményértékelési keretrendszer kialakítását teszik szükségessé.

3 Célkitűzések

Az értekezésem célkitűzései a hidrogéntechológiai kockázatelemzés és incidensosztályozás módszertani hiányosságaira adott válaszként kerültek meghatározásra, így kutatási céljaim egymásra épülő és tartalmilag összefüggő célrendszert alkotnak.

C1: Célom egy valós idejű, HAZOP-alapú kockázatértékelési keretrendszer kidolgozása hidrogéntechológiai rendszerek számára, amely a klasszikus HAZOP időbeli és döntési konzisztencia korlátait, egy gyorsabb és kvantitatív következtetési rendszer alkalmazásával kívánja feloldani.

C2: Célom a HAZOP-módszer szakértői szubjektivitásának csökkentése, valamint egy olyan optimalizált szabályrendszer és metaheurisztikus súlyhangolási eljárás kialakítása, amely az új módszert egy real-time mérnöki döntéstámogatásban való integrálhatóság felé fejleszti.

C3: Célom, a jelenleg alkalmazott iparibaleseti eseményosztályozási-rendszerek (INES, ESIA, ARIA, HIAD) hidrogéntechológiai alkalmazhatóságának kritikai értékelése.

C4: Célom, egy tudományosan megalapozott, empirikusan validált és statisztikailag értékelt, nemzetközileg is bevezethető incidensosztályozási keretrendszer kialakítása, amely képes kiegészíteni a meglévő eseményskálák hiányosságait és iparágfüggetlen módon támogatni a hidrogénalapú technológiák incidens-kommunikációját és szabályozási fejlődését.

4 Vizsgálati módszerek

Kutatásomat interdiszciplináris megközelítésben végeztem, amelynek középpontjában a kockázatértékelés, a hidrogénbiztonság és az energiabiztonság összefüggő kihívásainak feltárása állt. A vizsgálati keret kialakításához kvalitatív, kvantitatív és empirikus módszertani elemeket kombináltam. A szakirodalmi feltárás elsődlegesen az Elsevier tudományos adatbázisára, szakkönyvekre, szakmai előadásokra és releváns médiatartalmakra épült, míg az elemzésekhez nyilvánosan elérhető, hiteles adatbázisokat használtam. Az empirikus komponens saját megfigyelésekkel és analitikus értelmezésekkel egészítette ki az elméleti vizsgálatokat.

A proaktív módszertani keret kialakítása során a nemzetközi szakirodalom áttekintését és a modellalkotási stratégia meghatározását követően a Mamdani- és a Takagi–Sugeno–Kang (TSK) típusú fuzzy rendszerek hidrogéntechológiai alkalmazhatóságát vizsgáltam. A modellezés MATLAB-környezetben történt, szintetikus adatgenerálás és részletes tagsági függvény-paraméterezés alkalmazásával. A kutatási célok szempontjából kedvezőbbnek

bizonyuló TSK-fuzzy modell továbbfejlesztését egy bioinspirált optimalizációs elem, az Ant Colony System (ACS) integrálása tette lehetővé, amely dinamikusan optimalizálta a fuzzy szabály- és súlyparamétereket. Az így kialakított ACS-FORCE keretrendszer megalapozza a valós idejű, fuzzy-alapú HAZOP-elemzések megvalósítását. A fuzzy modellek teljesítményét többdimenziós értékelési rendszerrel elemeztem, amely konfúziós mátrixon, kockázatdetektálási arányszámokon, leíró statisztikai mutatókon, páros t-próbán és inkrementális elemzésen alapult.

A reaktív módszertani megközelítés szisztematikus, nemzetközi szakirodalmi áttekintésre és annak kritikai értékelésére épült, amelynek során feltártam a meglévő iparbiztonsági eseményosztályozási módszerek előnyeit és korlátait. Ezt követően meghatároztam a hidrogénesemény-intenzitás értékelésére szolgáló HISI-skála dimenzióit, szintjeit, alkalmazási területeit és pontozási logikáját. A skála gyakorlati validációját három, nemzetközileg dokumentált hidrogénesemény esettanulmány-alapú elemzésével végeztem. A konzisztenciavizsgálat kvalitatív és kvantitatív módszerekkel történt, Cronbach- α mutató, valamint egyváltozós érzékenységvizsgálat (One-At-a-Time, OAT) alkalmazásával. A proaktív és reaktív megközelítések összehangolt elemzése biztosította, hogy a HISI-skála módszertanilag megalapozott, robusztus és a gyakorlatban is alkalmazható eszközként illeszkedjen a hidrogénbiztonsági értékelések rendszerébe..

5 Új tudományos eredmények

Tézis 1. [SZI1, SZI2, SZI3, SZI4, SZI5, SZI7, SZI8, SZI9, SZI11, SZI12, SZI13, SZI15]

Vizsgálataimmal és teljesítménymetriák elemzésével igazoltam, hogy nagy adatfeldolgozási igényű és komplex hidrogéntechnológiai rendszerek esetén a TSK-fuzzy alapú HAZOP-modell szignifikánsan nagyobb kockázatdetektálási megbízhatóságot és gyorsabb számítási sebességet eredményez, mint a Mamdani-alapú megközelítés. Ezért a TSK-fuzzy módszer alkalmasabb a valós idejű, biztonságkritikus HAZOP-elemzések követelményeinek teljesítésére.

Altézis 1.1 *Rámutattam, hogy bár a Mamdani-fuzzy logika természetes módon illeszkedik a kvalitatív elvű HAZOP módszer szabályrendszeréhez, annak számítási módszertanából adódóan, nem biztosít kellő detektálási konzisztenciát és megfelelő számítási sebességet a nagy adathalmazok, valós idejű feldolgozása esetén, biztonságkritikus HAZOP-elemzésekben nem javasolt a Mamdani-fuzzy használata.*

Tézis 2. [SZI1, SZI2, SZI3, SZI4, SZI5, SZI7, SZI8, SZI9, SZI11, SZI12, SZI13, SZI15]

A TSK-fuzzy alapú HAZOP-modell teljesítményét hangyakolónia-optimalizációval tovább javítottam, és igazoltam, hogy a TSK+ACS hibrid rendszer szignifikánsan növeli a kockázatdetektálás érzékenységét, csökkenti a téves riasztások arányát (TPR: +2,2%; FPR: ~50%-kal alacsonyabb; Coverage: +57%), A kvantitatív jellegből fakadóan csökken a szakértői szubjektivitás, míg a súly- és szabályrendszer-optimalizáció tovább növeli a számítási hatékonyságot. Ennek eredményeként a kialakított rendszer alkalmas a valós idejű mérnöki döntéstámogatás megvalósítására.

Altézis 2.1 *Nagy adathalmaz feldolgozása során a TSK-alapú HAZOP-modell futásideje közel tízszer rövidebb volt, mint a Mamdani-modellé, a különbség statisztikailag is szignifikáns ($p \ll 0,001$).*

Tézis 3. [SZI2, SZI4, SZI5, SZI6, SZI7, SZI10, SZI14, SZI16]

Megalkottam egy új, négydimenziós, hidrogénipari környezetre optimalizált súlyossági skálát (HISI), amely képes átfogóan reprezentálni a hidrogénipari események következményeit és így, a ma használt általános, ipari eseményosztályozási rendszereknél magasabb információtartalmú besorolást ad a hidrogénnel kapcsolatos incidensekre.

Tézis 4. [SZI2, SZI4, SZI5, SZI6, SZI7, SZI10, SZI14, SZI16]

Empirikus vizsgálatokkal, valamint kvalitatív és kvantitatív statisztikai elemzésekkel igazoltam, hogy a HISI-modell azonos nagyságrendű következmények esetén stabil és reprodukálható kategóriabesorolást ad, a határértékek mentén pedig megfelelő, biztonságkritikus érzékenységet mutat, így a HISI-modell konzisztens, tartalmilag érvényes és alkalmas a hidrogénipari incidensek objektív, többdimenziós biztonsági osztályozására.

Altézis 4.1 *Vizsgálataimmal igazoltam, hogy az új, HISI-skála eltérő hidrogéntechnológiai ágazatokban is következetes és iparágfüggetlen kategorizálást biztosít, továbbá átlátható eseménykommunikációt (HISI-quadrilemma) tesz lehetővé.*

6 Az eredmények hasznosítási lehetősége

A disszertációban bemutatott HAZOP-alapú módszertani fejlesztések hidrogéntechnológiai rendszerekre fókuszálnak, ugyanakkor általánosan alkalmazhatók minden olyan biztonságkritikus ipari környezetben, ahol nagy mennyiségű, szenzorokkal gyűjtött adat áll rendelkezésre. A Takagi–Sugeno–Kang (TSK) típusú fuzzy logikán alapuló HAZOP-modell önmagában is jelentős előrelépést jelent a hagyományos Mamdani-megközelítéshez képest, azonban a módszer gyakorlati alkalmazhatóságát döntően növeli az Ant Colony System (ACS) algoritmussal megvalósított, adatvezérelt súly- és szabályoptimalizáció. A kialakított megközelítés alkalmas valós idejű mérnöki döntéstámogatásra, és rugalmasan kiterjeszhető más optimalizációs eljárásokkal, valamint valós hardveres környezetben történő validációval.

A kutatás gyakorlati hasznosítását támogatja a hidrogéntechnológiai és vészhelyzeti energiarendszerekre fókuszáló H.E.R.O. (Hydrogen Energy for Response & Operations) kutatólabor létrehozása az Óbudai Egyetemen, amely interdiszciplináris oktatási, kutatási és innovációs térként biztosítja a módszertan további fejlesztésének és kísérleti tesztelésének infrastruktúráját.

A HISI-skála hosszú távú hasznosíthatóságát egy egységes, állami szintű hidrogénesemény-adatbázis kialakításának lehetősége alapozza meg, amely a hidrogénspecifikus incidensek összehasonlítható, transzparens feldolgozását teszi lehetővé. Egy ilyen adatbázis támogatná a proaktív eseménymegelőzést, a reaktív értékelés egységesítését, valamint a trend- és ok-okozati elemzéseket, és empirikus alapot biztosítana mesterséges intelligencián alapuló előrejelző modellek validálásához. A bemutatott eredmények így egyaránt hasznosíthatók szabályozói, ipari és tudományos környezetben, hozzájárulva a hidrogéntechnológiai biztonságirányítás és a biztonságkritikus infrastruktúrák fejlesztéséhez.

7 Irodalmi hivatkozások listája/ Irodalomjegyzék

- [1] National Research Council, *Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment*. Washington, D.C.: National Academy of Sciences, 1979. [Online]. Available: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/12181/carbon-dioxide-and-climate-a-scientific-assessment> Accessed: Dec. 15, 2023.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change, *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*. 2023. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/> Accessed: Dec. 15, 2023.
- [3] J. Gasparotto and K. D. B. Martinello, “Coal as an energy source and its impacts on human health,” *Energy Geoscience*, vol. 2, no. 2, pp. 113–120, Apr. 2021. Accessed: Dec. 14, 2023.
- [4] National Institutes of Health, “Deaths associated with pollution from coal power plants,” *NIH Research Matters*. [Online]. Available: <https://www.nih.gov/news-events/nih-research-matters/deaths-associated-pollution-coal-power-plants> Accessed: Dec. 15, 2023.
- [5] Harvard T.H. Chan School of Public Health, “Particulate pollution from coal associated with double the risk of mortality than PM2.5 from other sources.” [Online]. Available: <https://hsph.harvard.edu/news/particulate-pollution-from-coal-associated-with-double-the-risk-of-mortality-than-pm2-5-from-other-sources/> Accessed: Dec. 15, 2023.
- [6] European Commission, *The European Green Deal*. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/stories/european-green-deal>, Accessed: Aug. 17, 2023.
- [7] European Commission, *Hungary: Final Updated NECP 2021–2030*. 2024. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/publications/hungary-final-updated-necp-2021-2030-submitted-2024_en, Accessed: Oct. 16, 2024.
- [8] Y. Zhang, Q. S. Hua, L. Sun, and Q. Liu, “Life cycle optimization of renewable energy systems configuration with hybrid battery/hydrogen storage: A comparative study,” *Journal of Energy Storage*, vol. 30, Aug. 2020. Accessed: Jan. 18, 2022.
- [9] D. Groppi, D. A. Giacomo, G. L. Baldi, F. Cumo, and L. De Santoli, “Analysing economic and environmental sustainability related to battery and hydrogen energy storages for increasing the energy independence of small islands,” *Energy Conversion and Management*, vol. 177, pp. 64–76, Dec. 2018. Accessed: Jan. 18, 2022.
- [10] M. Bahloul and S. K. Khadem, “An analytical approach for techno-economic evaluation of hybrid energy storage system for grid services,” *Journal of Energy Storage*, vol. 31, Oct. 2020. Accessed: Jan. 18, 2022.
- [11] A. M. Ferrario, F. J. Viana, F. S. M. Martins, J. M. Alonso, E. Bompard, and L. Milano, “Hydrogen vs. battery in the long-term operation: A comparative study between energy management strategies for hybrid renewable microgrids,” *Electronics*, Apr. 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/4/698>, Accessed: Jan. 19, 2022.

- [12] D. Parra, L. Valverde, F. J. Pino, and M. K. Patel, "A review on the role, cost and value of hydrogen energy systems for deep decarbonisation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 10, pp. 279–294, Mar. 2019. Accessed: May 2, 2022.
- [13] M. Böhm, A. Fernández Del Rey, J. Pagenkopf, M. Varela, S. Herwartz-Polster, and B. Nieto Calderón, "Review and comparison of worldwide hydrogen activities in the rail sector with special focus on on-board storage and refueling technologies," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 89, pp. 38003–38017, Nov. 2022. Accessed: Dec. 20, 2022.
- [14] S. Lechtenböhmer, L. J. Nilsson, M. Åhman, and C. Schneider, "Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification: Implications for future EU electricity demand," *Energy*, vol. 115, pt. 3, pp. 1623–1631, Nov. 2016. Accessed: Jun. 12, 2024.
- [15] A. Boldrini, D. Koolen, W. Crijns-Graus, and M. van den Broek, "The impact of decarbonising the iron and steel industry on European power and hydrogen systems," *Applied Energy*, 2024. Accessed: Jun. 12, 2024.
- [16] M. Blohm and F. Dettner, "Green hydrogen production: Integrating environmental and social criteria to ensure sustainability," *Smart Energy*, vol. 11, Aug. 2023. Accessed: Aug. 4, 2024.
- [17] N. Norazahar, T. M. Ambikabathy, R. Md Kasmani, A. Ahmad, A. Abd Jalil, T. A. T. Abdullah, and M. F. A. Kamaroddin, "Hydrogen application and its safety: An overview of public perceptions and acceptance in Malaysia," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 180, pp. 686–698, Dec. 2023. Accessed: Aug. 8, 2024.
- [18] J. A. Gordon, N. Balta-Ozkan, A. Haq, and S. A. Nabavi, "Necessary and sufficient conditions for deploying hydrogen homes: A consumer-oriented perspective," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 69, pp. 982–1021, Jun. 2024. Accessed: Aug. 8, 2024.
- [19] T. Suzuki, Y. Izato, and A. Miyake, "Identification of accident scenarios caused by internal factors using HAZOP to assess an organic hydride hydrogen refueling station involving methylcyclohexane," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 71, 2021. Accessed: Aug. 11, 2024.
- [20] V. T. Covello and M. W. Merkhofer, „Risk Assessment Methods: Approaches for Assessing Health and Environmental Risks.” New York: Springer, 1993. ISBN: 978-0-306-44382-4.
- [21] T. Aven, „Risk Analysis”, 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2016. ISBN: 978-1-119-05779-6.
- [22] ISO, ISO 31000:2018 – Risk Management: Guidelines, 2nd ed., 2018.
- [23] J. Rushby, "Critical system properties: Survey and taxonomy" *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 43, no. 2, pp. 189–219, 1994.

- [24] Q. Duan et al., “An experimental study on shock waves and spontaneous ignition produced by pressurized hydrogen release through a tube into atmosphere,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 25, pp. 8281–8289, 2015
- [25] V. Molkov, „Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering I.”, Bookboon, 2012. ISBN: 978-87-403-0226-4.
- [26] ARIA: Analysis, Research and Information on Accidents Database. [Online]. Available: <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/> Accessed: Nov. 10, 2023.
- [27] RISCAD: Relational Information System for Chemical Accidents Database. [Online]. Available: <https://r2.aist-riss.jp/> Accessed: Nov. 10, 2023.
- [28] International Association for Hydrogen Safety – HySafe, Hydrogen Incident and Accident Database (HIAD 2.0). [Online]. Available: <https://hysafe.info/hiad-2-0-free-access-to-the-renewed-hydrogen-incident-and-accident-database> Accessed: Nov. 10, 2023.
- [29] U.S. Chemical Safety Board (CSB). [Online]. Available: <https://www.csb.gov/> Accessed: Nov. 10, 2023.
- [30] U.S. Department of Energy – National Energy Technology Laboratory (DOE-NETL). [Online]. Available: <https://www.netl.doe.gov> Accessed: Nov. 10, 2023.
- [31] Hydrogen Tools, U.S. Department of Energy – Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE). [Online]. Available: <https://h2tools.org> Accessed: Nov. 10, 2023.
- [32] A. Campari et al., “Lessons learned from HIAD 2.0: Inspection and maintenance to avoid hydrogen-induced material failures,” *Computers & Chemical Engineering*, vol. 173, p. 108199, May 2023.
- [33] HyDeploy Hydrogen Project, United Kingdom. [Online]. Available: <https://hydeploy.co.uk> Accessed: Aug. 2, 2024.
- [34] H2Future Hydrogen Project, Austria. [Online]. Available: <https://www.h2future-project.eu> Accessed: Aug. 2, 2024.
- [35] REFHYNE Hydrogen Project, Germany. [Online]. Available: <https://www.refhyne.eu> Accessed: Aug. 3, 2024.
- [36] HyNet Hydrogen Project, United Kingdom. [Online]. Available: <https://hynet.co.uk> Accessed: Aug. 3, 2024
- [37] H2 Mobility Hydrogen Project, Germany. [Online]. Available: <https://h2-mobility.de> Accessed: Aug. 4, 2024.
- [38] H2V Normandy Hydrogen Project, France. [Online]. Available: <https://h2v.eu/hydrogen-valleys/normandy-hydrogen> Accessed: Aug. 4, 2024.
- [39] HEAVENN Hydrogen Project, Netherlands. [Online]. Available: <https://heavenn.org> Accessed: Aug. 6, 2024.

- [40] *GreenHyScale Hydrogen Project, Denmark*. [Online]. Available: <https://greenhyscale.eu> Accessed: Aug. 6, 2024.
- [41] *HyBalance Hydrogen Project, Denmark*. [Online]. Available: <https://hybalance.eu> Accessed: Aug. 10, 2024.
- [42] *Big HIT Hydrogen Project, United Kingdom*. [Online]. Available: <https://www.bighit.eu> Accessed: Aug. 10, 2024.
- [43] *SafetyCulture*, “HAZOP (Hazard and Operability Study).” [Online]. Available: <https://safetyculture.com/topics/hazop/> Accessed: Mar. 1, 2024.
- [44] *International Electrotechnical Commission, IEC 61882: Hazard and Operability Studies (HAZOP Studies) – Application Guide, 2016*.
- [45] H. Zhang, B. Zhang, and D. Gao, “A new approach of integrating industry prior knowledge for HAZOP interaction,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 86, 2023, Art. no. 105005. doi: 10.1016/j.jlp.2023.105005.
- [46] *Bükkábrányi Energiapark*. [Online]. Available: <https://bukkabranyienergiapark.hu/> Accessed: Apr. 20, 2024.
- [47] J. Isimite and P. Rubini, “A dynamic HAZOP case study using the Texas City refinery explosion,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 40, pp. 496–501, Mar. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.01.025>
- [48] S. Silvianita, M. F. Khamidi, I. Rochani, and D. Chamelia, “Hazard and operability analysis (HAZOP) of mobile mooring system,” *Procedia Earth and Planetary Science*, vol. 14, pp. 208–212, Dec. 2015. doi: 10.1016/j.proeps.2015.07.103.
- [49] J. Ahn and D. Chang, “Fuzzy-based HAZOP study for process industry,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 317, pp. 303–311, 2016. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.05.096.
- [50] J. L. Fuentes-Bargues, C. González-Gaya, C. González-Cruz, and V. Cabrelles-Ramírez, “Risk assessment of a compound feed process based on HAZOP analysis and linguistic terms,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 44, pp. 44–52, 2016. doi: 10.1016/j.jlp.2016.08.019.
- [51] R. A. Viegas, F. A. S. Mota, A. P. C. S. Costa, and F. F. P. dos Santos, “A multi-criteria-based hazard and operability analysis for process safety,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 144, pp. 310–321, 2020. doi: 10.1016/j.psep.2020.07.034.
- [52] Y. Yousofnejad, F. Afsari, and M. Es’haghi, “Dynamic risk assessment of hospital oxygen supply system by HAZOP and intuitionistic fuzzy,” *PLoS One*, vol. 18, no. 2, Feb. 2023. doi: 10.1371/journal.pone.0280918.
- [53] H. R. J. Solukloei, S. Nematifard, A. Hesami, H. Mohammadi, and M. Kamalinia, “A fuzzy-HAZOP/ant colony system methodology to identify combined fire, explosion, and toxic release risk in the process industries,” *Expert Systems with Applications*, vol. 192, 2022, Art. no. 116418, doi: 10.1016/j.eswa.2021.116418.

- [54] I. Szén, “Hidrogénbiztonság: Balesetek kvantitatív elemzése és biztonságközpontú, új tervezési módszerek fejlesztése,” in XXXIX. Kandó Konferencia 2023, G. Molnár, Zs. Temesvári, and T. Wühl, Eds. Budapest, Hungary: Óbudai Egyetem, 2024, pp. 44–49.
- [55] I. Szén, E. Rácz, and M. Bakosné Diószegi, “Hidrogénüzemek, új és komplex kockázatértékelési rendszere: Új tervezési irányelvek a hidrogénipari létesítmények biztonságának fokozása érdekében,” in KVK Habilitációs és PhD Workshop Minikonferencia: Kiadványkötet, T. Wühl, Ed. Budapest, Hungary: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, 2024, pp. 92–97.
- [56] I. Szén, “Hidrogén-energetika I. rész: Energiatárolási célok és lehetőségek, a hidrogén értéklánc,” *Elektrotechnika*, vol. 116, no. 9–10, pp. 28–32, 2023.
- [57] Y. Lee, M. H. Cho, M. C. Lee és 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, no. 63, pp. 24536–24547, 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.142. Accessed: Aug. 8, 2024.
- [58] “Bekövetkezett az első hidrogén kútrobbanás,” *e-cars.hu*, Jun. 12, 2019. [Online]. Available: <https://e-cars.hu/2019/06/12/bekövetkezett-az-első-hidrogen-kut-robbanas/> Accessed: Aug. 8, 2024.
- [59] N. Ade, B. Wilhite és H. Goyette, “An integrated approach for safer and economical design of Hydrogen refueling stations,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 56, pp. 32713–32729, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.232.
- [60] A. Tchouvelev, “Hydrogen safety codes and standards overview,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 2641–2645, 2011.
- [61] E. Zarei, M. Jafari, A. Dormohammadi, and V. Sarsangi, “The role of modeling and consequence evaluation in improving safety level of industrial hazardous installations: A case study: Hydrogen production unit,” 2013.
- [62] A. Gill, I. Pielecha, and F. Szwajca, “A new method of failure mode and severity effects analysis for hydrogen-fueled combustion systems,” *Energies*, vol. 17, no. 19, art. no. 4802, Sep. 2024, doi: 10.3390/en17194802.
- [63] O. Salvi and B. Debray, “A global view on ARAMIS: A risk assessment methodology for industries in the framework of the SEVESO II directive,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 130, no. 3, pp. 187–199, Mar. 2006, doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.07.011.
- [64] K. M. Groth, A. Al-Douri, M. West, K. Hartmann, G. Saur, and W. Buttner, “Design and requirements of a hydrogen component reliability database (HyCReD),” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 51, pt. D, pp. 1023–1037, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.07.165.
- [65] J. Fodor, “6. Fuzzy irányítási rendszerek,” *Gépi intelligencia I. BMF NIK IMRI*, Budapest. [Online]. Available: https://uni-obuda.hu/fodor/06_fuzzy_iranyitas.pdf. Accessed: Aug. 15, 2024.
- [66] T. L. Kóczy and D. Tikk, *Fuzzy rendszerek*. Budapest, Hungary: Typotex Elektronikus Kiadó Kft., 2013. ISBN: 978-963-279-709-0. Accessed: Aug. 15, 2024.

- [67] J. Fodor, *Gépi intelligencia I. – Előadásanyagok*. BMF NIK IMRI. [Online]. Available: <https://uni-obuda.hu/fodor/gi1.html>. Accessed: Aug. 15, 2024.
- [68] R. Kása and G. Réthi, “Fuzzy logikán alapuló modellezési módszerek gazdálkodástudományi alkalmazásának episztemológiai megközelítése,” *Vezetéstudomány / Budapest Management Review*, vol. 48, no. 4, pp. 84–93, 2017, doi: 10.14267/VEZTUD.2017.04.10.
- [69] V. E. S. Souza, A. Lapouchnian, W. N. Robinson, and J. Mylopoulos, “Awareness requirements for adaptive systems,” *Proc. 2011 ICSE Symp. Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems (SEAMS 2011)*, Waikiki, Honolulu, HI, USA, May 23–24, 2011, doi: 10.1145/1988008.1988018.
- [70] N. Bhardwaj and P. Liggesmeyer, “A runtime risk assessment concept for safe reconfiguration in open adaptive systems,” in *Computer Safety, Reliability, and Security*, S. Tonetta, E. Schoitsch, and F. Bitsch, Eds., *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 10489. Cham, Switzerland: Springer, 2017, pp. 309–316, doi: 10.1007/978-3-319-66284-8_26.
- [71] A. Abraham, “Nature inspired online real risk assessment models for security systems,” in *Intelligence and Security Informatics*, D. Ortiz-Arroyo et al., Eds., *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5376. Berlin, Germany: Springer, 2008, pp. 3–12, doi: 10.1007/978-3-540-89900-6_2.
- [72] T. Parhizkar, I. B. Utne, and J.-E. Vinnem, “Challenges of online dynamic probabilistic risk assessment and possible solutions,” in *Online Probabilistic Risk Assessment of Complex Marine Systems*, *Springer Series in Reliability Engineering*. Cham, Switzerland: Springer, 2021, pp. 133–141, doi: 10.1007/978-3-030-88098-9_8.
- [73] M. Ni, J. D. McCalley, V. Vittal, and T. Tayyib, “Online risk-based security assessment,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 1, pp. 258–265, Feb. 2003, doi: 10.1109/TPWRS.2002.807091.
- [74] J. Yen, L. Wang, and C. W. Gillespie, “Improving the interpretability of TSK fuzzy models by combining global learning and local learning,” *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 6, no. 4, pp. 530–537, Nov. 1998, doi: 10.1109/91.728447.
- [75] M. Rezaei and N. Borjalilu, “A dynamic risk assessment modeling based on fuzzy ANP for safety management systems,” *Aviation*, vol. 22, no. 4, pp. 143–155, Dec. 2018, doi: 10.3846/aviation.2018.6983.
- [76] J. J. Jassbi, P. J. A. Serra, R. A. Ribeiro, and A. Donati, “A comparison of Mamdani and Sugeno inference systems for a space fault detection application,” *Proc. World Automation Congress (WAC)*, Budapest, Hungary, Jul. 2006, pp. 1–8, doi: 10.1109/WAC.2006.376033.
- [77] Y. L. Xing, H. Xin és J. C. Zhao, “Optimization design of fuzzy control rules based on ant colony algorithm,” *Applied Mechanics and Materials*, vols. 716-717, pp. 1662–1665, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.716-717.1662

- [78] C.-F. Juang, C.-W. Hung, and C.-H. Hsu, "Rule-based cooperative continuous ant colony optimization to improve the accuracy of fuzzy system design," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 723–735, Aug. 2014, doi: 10.1109/TFUZZ.2013.2272480.
- [79] C.-C. Chen and Y.-T. Liu, "Enhanced ant colony optimization with dynamic mutation and ad hoc initialization for improving the design of TSK-type fuzzy system," *Computational Intelligence and Neuroscience*, vol. 2018, Art. ID 9485478, 2018, doi: 10.1155/2018/9485478.
- [80] L. M. Gambardella, M. Dorigo, M. Middendorf, and T. Stützle, "Guest editorial: Special section on ant colony optimization," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 6, no. 4, pp. 317–319, Aug. 2002, doi: 10.1109/TEVC.2002.802446.
- [81] M. Shokouhifar, "FH-ACO: Fuzzy heuristic-based ant colony optimization for joint virtual network function placement and routing," *Applied Soft Computing*, vol. 107, Art. 107401, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.asoc.2021.107401.
- [82] C. Blum, "Ant colony optimization: A bibliometric review," *Physics of Life Reviews*, vol. 51, pp. 87–95, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.plrev.2024.09.014.
- [83] K. Hartmann, C. Correa-Jullian, J. Thorson, K. Groth, and W. Buttner, "Hydrogen component leak rate quantification for system risk and reliability assessment through QRA and PHM frameworks," *Proc. 9th Int. Conf. Hydrogen Safety (ICHS 2021)*, Edinburgh, UK, Sept. 21–23, 2021. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/79598.pdf>. Accessed: Dec. 15, 2024.
- [84] Oxford Institute for Energy Studies, "Review of hydrogen leakage along the supply chain," *Energy Transition*, no. ET41, Nov. 2024. [Online]. Available: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2024/11/ET41-Review-of-Hydrogen-Leakage-along-the-Supply-Chain.pdf>. Accessed: Jan. 12, 2025.
- [85] Y. Li, Z. Wang, X. Shi, et al., "Safety analysis of hydrogen leakage accident with a mobile hydrogen refueling station," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 171, pp. 619–629, 2023, doi: 10.1016/j.psep.2023.01.051.
- [86] X. Zhang, G. Qiu, S. Wang, et al., "Hydrogen leakage simulation and risk analysis of hydrogen fueling station in China," *Sustainability*, vol. 14, no. 19, Art. no. 12420, Oct. 2022, doi: 10.3390/su141912420.
- [87] J. Qian, X. Li, Z. Gao, and Z. Jin, "A numerical study of hydrogen leakage and diffusion in a hydrogen refueling station," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, pp. 14428–14439, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.03.140.
- [88] J. X. Wen, M. Marono, P. Moretto, E.-A. Reinecke, P. Sathiah, E. Studer, E. Vyazmina, and D. Melideo, "Statistics, lessons learned and recommendations from analysis of HIAD 2.0 database," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 38, pp. 17082–17096, 2022. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.170
- [89] M. I. López, M. P. Callao, and I. Ruisánchez, "A tutorial on the validation of qualitative methods: From the univariate to the multivariate approach," *Anal. Chim. Acta*, vol. 891, pp. 62–72, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.aca.2015.06.032.

- [90] R. I. Frederick and S. C. Bowden, "The test validation summary," *Assessment*, vol. 16, no. 3, pp. 215–236, Sep. 2009, doi: 10.1177/1073191108325005.
- [91] L. Szabó, "Mi a biztonság?," *Pécsi Határőr Tudományos Közlemények*, vol. XIII, pp. 73–84, 2012. ISSN: 1589-1674.
- [92] *Human Focus*, "What is the difference between a hazard and a risk," May 22, 2025. [Online]. Available: <https://humanfocus.co.uk/blog/difference-between-hazard-and-risk/>. Accessed: Aug. 15, 2024.
- [93] *Worksafe UK*, "The difference between hazard and risk: What you need to know," Apr. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.worksafe.uk.com/risk-assessment/hazard-vs-risk-whats-the-difference/>. Accessed: Aug. 15, 2024.
- [94] Z. Nazir and M. H. J. Bollen, "Operational risk assessment of transmission systems: A review," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 164, p. 109995, 2024, doi: 10.1016/j.ijepes.2024.109995.
- [95] 1993. évi XCIII. törvény a munkavédelemről.
- [96] 234/2011. (XI. 10.) Korm. rendelet a katasztrófavédelemről és a hozzá kapcsolódó egyes törvények módosításáról szóló 2011. évi CXXVIII. törvény végrehajtásáról.
- [97] 2011. évi CXXVIII. törvény a katasztrófavédelemről és a hozzá kapcsolódó egyes törvények módosításáról.
- [98] E. Stemn, C. Bofinger, D. Cliff, and M. E. Hassall, "Failure to learn from safety incidents: Status, challenges and opportunities," *Safety Science*, vol. 101, pp. 313–325, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.ssci.2017.09.018.
- [99] A. Mesa-Gómez, J. Casal, and F. Muñoz, "Risk analysis in Natech events: State of the art," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 64, p. 104071, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.jlp.2020.104071.
- [100] ISO, *ISO 45001:2018 – Occupational Health and Safety Management Systems, Requirements with Guidance for Use*. ISO, 2018.
- [101] IEC, *IEC 60050 – IEV 903-01: Risk Assessment / Safety and Risk Reduction. International Electrotechnical Vocabulary*.
- [102] IEC, *IEC 60050 – IEV 821-12: Reliability, Availability, Maintainability and Safety. International Electrotechnical Vocabulary*.
- [103] MSZ EN 61508-1:2010, *Villamos/elektronikus/programozható elektronikus biztonsági rendszerek működési biztonsága. Magyar Szabványügyi Testület, 2010*.
- [104] L. S. Boyce, D. T. Cottle, N. C. Steissberg, and S. M. Galea, "Evacuation behaviors and emergency communications: An analysis of real-world incident videos," *Safety Science*, vol. 136, p. 105121, Apr. 2021.

- [105] A. Dennis, D. Weston, and H. Carter, “The role of pre-incident information and responder communication in effective management of casualties, including members of vulnerable groups, during a decontamination field exercise,” *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Aug. 2023 <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103806>.
- [106] S. Pooransingh, A. Kibble, and P. Saunders, “Chemical incidents: Are we ready in the West Midlands? Testing the communication arrangements of on-call public health doctors,” *Public Health*, vol. 118, no. 6, pp. 432–437, 2004.
- [107] L. Gauntlett, R. Amlôt, and G. J. Rubin, “How to inform the public about protective actions in a nuclear or radiological incident: A systematic review,” *The Lancet Psychiatry*, vol. 6, no. 1, pp. 72–80, Jan. 2019.
- [108] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, Jun. 1965, doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
- [109] M. H. Effati, H. H. Gandomi, and G. Gandomi, “Bobcat optimization algorithm: An effective bio-inspired metaheuristic algorithm for solving supply chain optimization problems,” *Scientific Reports*, vol. 14, p. 12281, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-70497-1.
- [110] HH2, “Átadták Magyarország első zöldhidrogén üzemét a Bükkábrányi Energiaparkban,” 2024. [Online]. Available: <https://hh2.hu/atadtak-magyarorszag-első-zoldhidrogen-uzemet-a-bukkabranyi-energiaparkban/>. Accessed: Dec. 15, 2024.
- [111] D. T. Kofinas, A. Spyropoulou és C. S. Laspidou, “A methodology for synthetic household water consumption data generation,” *Environmental Modelling & Software*, vol. 100, pp. 48–66, 2018, doi: 10.1016/j.envsoft.2017.11.021.
- [112] R. Carapellucci és L. Giordano, “A methodology for the synthetic generation of hourly wind speed time series based on some known aggregate input data,” *Applied Energy*, vol. 101, pp. 541–550, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.06.044.
- [113] H. Schieber, K. C. Demir, C. Kleinbeck, S. H. Yang és D. Roth, “Indoor Synthetic Data Generation: A Systematic Review,” *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 240, Art. no. 103907, 2024, doi: 10.1016/j.cviu.2023.103907.
- [114] M. Larrañeta, C. Fernández-Peruchena, M. A. Silva-Pérez, I. Lillo-Bravo, A. Grantham és J. Boland, “Generation of synthetic solar datasets for risk analysis,” *Solar Energy*, vol. 187, pp. 212–225, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.05.042.
- [115] W. N. Silva, L. H. T. Bandória, B. H. Dias, M. C. de Almeida és L. W. de Oliveira, “Generating realistic load profiles in smart grids: An approach based on nonlinear independent component estimation (NICE) and convolutional layers,” *Applied Energy*, vol. 351, Art. no. 121902, 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121902.
- [116] F. Yilmaz és Y. Eren, “A novel load profile generation method based on the estimation of regional usage habit parameters with genetic algorithm,” *Electric Power Systems Research*, vol. 217, Art. no. 109165, 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109165.
- [117] P. Schönfisch, C. Heuberger, and T. Hamacher, “SynTiSeD: A multi-agent simulation tool to generate synthetic time series for energy demand,” *Patterns*, vol. 4, no. 9, p. 100807, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.patter.2023.100807.

- [118] J.-S. R. Jang, C.-T. Sun, and E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*. Prentice Hall, 1997.
- [119] J. M. Mendel, “Fuzzy logic systems for engineering: A tutorial,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 83, no. 3, pp. 345–377, 1995.
- [120] A. Detrekői and L. Szilávik, *Fuzzy rendszerek*. Budapest: ELTE Eötvös Kiadó, 2011.
- [121] L. Fazekas, *Fuzzy rendszerek alapjai*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 2006.
- [122] Szegedi Tudományegyetem – Elektronikus Tananyag Archívum, “Statisztikai próbák, Kétmintás t -próba,” [Online]. Available: <https://eta.bibl.u-szeged.hu/1721/10/11-12.%20Statisztikai%20próba%20-%20ANOVA.pdf>. Accessed: Aug. 15, 2024.
- [123] Y. Shen et al., “All-optical implementation of the ant colony optimization algorithm,” *Scientific Reports*, vol. 6, no. 1, Art. no. 26283, Apr. 2016, doi: 10.1038/srep26283.
- [124] Z. Imrei, J. Vuts, and M. Tóth, “Bogárferomonok a környezetkímélő növényvédelemért,” [Online]. Available: <http://www.csalomoncsapdak.hu/8lszakcikkeink/feromonokrol11.pdf>. Accessed: Aug. 15, 2024.
- [125] M. Dorigo és L. M. Gambardella, “Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 1, pp. 53–66, Apr. 1997, doi: 10.1109/4235.585892.
- [126] International Electrotechnical Commission, *IEC 61511: Functional Safety – Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector, Parts 1–3*, 2003, 2nd ed. 2016.
- [127] European Parliament and Council of the European Union, “Directive (EU) 2022/2555 of 14 December 2022 on measures for a high common level of cybersecurity across the Union,” *Official Journal of the European Union*, L 290, pp. 1–51, Dec. 19, 2022.
- [128] R. J. Kuo, B. S. Wibowo, and F. E. Zulvia, “Application of a fuzzy ant colony system to solve the dynamic vehicle routing problem with uncertain service time,” *Applied Mathematical Modelling*, vol. 40, nos. 23–24, pp. 9990–10001, Dec. 2016.
- [129] S. Mirjalili, “Ant colony optimization (ACO),” *MATLAB Central File Exchange*, 2025. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/69028-ant-colony-optimization-aco>. Accessed: Mar. 12, 2025.
- [130] File Exchange, *MATLAB Central*, [Online]. Available: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/?s_tid=gn_mlc_fx_files. Accessed: Mar. 12, 2025.
- [131] International Atomic Energy Agency, *INES – The International Nuclear and Radiological Event Scale User’s Manual*. Vienna: IAEA, 2013.
- [132] OECD/NEA, *The International Nuclear and Radiological Event Scale (INES) – A Guide for Communicators*. Paris: OECD Publishing, 2008.

- [133] European Commission, “ESIA – The European Scale of Industrial Accidents: Technical Description,” JRC, Seville, 2010.
- [134] French Ministry for the Ecological Transition, “ARIA – Analysis, Research and Information on Accidents Database,” [Online]. Available: <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr>. Accessed: Oct. 12, 2024.
- [135] 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,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 22, pp. 17351–17357, Nov. 2012.
- [136] A. Campari, E. Stefana, D. Ferrazzano, and N. Paltrinieri, “Analyzing hydrogen-related undesired events: A systematic database for safety assessment,” in *Proc. 33rd European Safety and Reliability Conference (ESREL 2023)*, 2023.
- [137] 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.
- [138] 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.
- [139] J. Wen, M. Maroño, P. Moretto, E. Reinecke, P. Sathiah, E. Studer, and E. Vyazmina, “Statistics, lessons learnt and recommendations from analysis of HIAD 2.0 database,” 2021.
- [140] P. M. Ordin, *Reviews of hydrogen accidents and incidents in NASA operations*, 1974.
- [141] U.S. Occupational Safety and Health Administration, “Process safety management,” [Online]. Available: <https://www.osha.gov/process-safety-management>. Accessed: Oct. 15, 2024.
- [142] American Petroleum Institute, “Recommended Practice 754 Fact Sheet: Process Safety Indicators for the Refining and Petrochemical Industries,” Sep. 2021. [Online]. Available: <https://www.api.org/-/media/Files/Oil-and-Natural-Gas/Refining/Process%20Safety/RP-754-Fact-Sheet.pdf>.
- [143] European Union, “Directive 2012/18/EU (Seveso III) on the control of major-accident hazards involving dangerous substances,” *Official Journal of the European Union*, L197, pp. 1–37, Jul. 24, 2012. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/18/oj/eng>. Accessed: Aug. 2, 2024.
- [144] European Commission, JRC, “Major Accident Reporting System (eMARS),” Apr. 25, 2018. [Online]. Available: https://knowledge4policy.ec.europa.eu/projects-activities/major-accident-reporting-system-emars_en. Accessed: Aug. 2, 2023.

- [145] European Academy of Law (ERA), “Introduction to EU Environmental Law – Module 8, Part 2,” [Online]. Available: https://www.era-comm.eu/Introduction_EU_Environmental_Law/EN/module_8/part_2/part_2_1.html. Accessed: Aug. 2, 2024.
- [146] European Commission, JRC, “eMARS Statistics,” [Online]. Available: <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/statistics/statistics>. Accessed: May 3, 2025.
- [147] European Commission, JRC, “eMARS Accident Search,” [Online]. Available: <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/accident/search>. Accessed: May 3, 2025.
- [148] R. C. Stokes, Q. A. Baker, M. P. Broadribb, T. V. Rodante, and C. A. Grounds, “CCPS Incident Investigation Book, Third Edition,” *Hazards* 29, IChemE, 2019. [Online]. Available: <https://www.icheme.org/media/19410/hazards-29-paper-30.pdf>. Accessed: Nov. 5, 2024.
- [149] Sydney Water, “HSP-014: HIDRA Health and Safety Procedure,” Feb. 2007. [Online]. Available: <https://www.sydneywater.com.au/content/dam/sydneywater/documents/health-and-safety-procedure-HIDRA.pdf>. Accessed: Dec. 21, 2024.
- [150] G. V. Poje and I. Rosenthal, “The role of the chemical safety board in preventing chemical accidents,” *Hazards* XVI, IChemE, 2001. [Online]. Available: <https://www.icheme.org/media/10150/xvi-paper-05.pdf>. Accessed: Jan. 12, 2024.
- [151] U.S. Chemical Safety Board, “CSB Best Practice Guidance,” [Online]. Available: <https://www.csb.gov/csb-best-practice-guidance/>. Accessed: Oct. 15, 2024.
- [152] Nel Hydrogen, “Status and Q&A regarding the Kjørbo incident,” Jun.–Jul. 2019. [Online]. Available: <https://nelhydrogen.com/status-and-qa-regarding-the-kjorbo-incident/>. Accessed: Aug. 2, 2024.
- [153] Nel ASA: Status update #5 regarding incident at Kjørbo, press release, Nel ASA, Oslo, Jun. 27, 2019. [Online]. Available: <https://nelhydrogen.com/press-release/nel-asa-status-update-5-regarding-incident-at-kjorbo/>. Accessed: Aug. 2, 2024.
- [154] Hydrogen Safety Panel, “AP Santa Clara Incident Review Report Rev1,” Jun. 2021. [Online]. Available: https://h2tools.org/sites/default/files/2021-06/AP_Santa_Clara_Incident_Review_Report_Rev1.pdf. Accessed: Aug. 2, 2024.
- [155] P. Marsh, “Santa Clara Incident Summary: Hydrogen Trailer Transfill Facility Explosion, 1 June 2019,” *Individual Incident Summary Report Rev. 0*, XBP Refining Consultants Ltd., Santa Clara, CA, Aug. 2023. [Online]. Available: <https://www.icheme.org/media/24670/santa-clara-incident-summary-01-jun-19.pdf>. Accessed: Aug. 2, 2024.
- [156] W. Son, S. Lee és J. Woo, “Community acceptance of hydrogen power plant projects: The case of South Korea,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 187, Art. no. 113778, 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113778.

- [157] S. I. Kim and Y. Kim, "Review: Hydrogen tank explosion in Gangneung, South Korea," AICHE Center for Hydrogen Safety Conference, 2019. [Online]. Available: <https://proceedings.aiche.org/chs/conferences/international-center-hydrogen-safety-conference/2019/proceeding/paper/review-hydrogen-tank-explosion-gangneung-south-korea>. Accessed: Aug. 2, 2024.
- [158] InsideEVs, "Hydrogen fueling station explodes," May 23, 2019. [Online]. Available: <https://insideevs.com/news/354223/hydrogen-fueling-station-explodes/>. Accessed: Aug. 2, 2024.
- [159] ABC7 News, "Hydrogen explosion shakes Santa Clara neighborhood," Jun. 3, 2019. [Online]. Available: <https://abc7news.com/post/hydrogen-explosion-shakes-santa-clara-neighborhood/5326601/>. Accessed: Aug. 2, 2024.
- [160] The Korea Times, "Hydrogen tank explosion kills 2 in Gangneung," May 23, 2019. [Online]. Available: <https://www.koreatimes.co.kr/southkorea/society/20190523/hydrogen-tank-explosion-kills-2-in-gangneung>. Accessed: Aug. 2, 2024.
- [161] G. Ursachi, I. A. Horodnic és 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.
- [162] 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.
- [163] L. J. Cronbach, "Coefficient alpha and the internal structure of tests," *Psychometrika*, vol. 16, pp. 297–334, 1951, doi: 10.1007/BF02310555.

8 Publikációk

8.1 A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [SZI1] Istvan Szen, „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.
- [SZI2] 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.
- [SZI3] Szén István, „Energiabiztonság és ami mögötte van” In: Kádár, Péter (szerk.) *Fejezetek az elektrotechnikából II. Budapest, Magyarország : Magyar Elektrotechnikai Egyesület (MEE) (2019)* pp. 153-167. , 15 p.
- [SZI4] Szén István „A hidrogén jelentősége a megújuló energiaforrások integrációjában valamint szerepe a fenntartható energetikában és a „zöld iparban”. In: Temesvári, Zsolt; Wüthrl, 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.

- [SZI5] Szén István, „Hidrogén-biztonság: Balesetek kvantitatív elemzése és biztonságközpontú, új tervezési módszerek fejlesztése”, 1 p. (2023) XXXIX. Kandó Konferencián elhangzott előadás absztraktja,
- [SZI6] Hidrogén-energetika 1. rész, Energiatárolási célok és lehetőségek, a hidrogén értéklánc Elektrotechnika folyóirat 116: 9-10 pp. 28-32. , 5 p. (2023)
- [SZI7] Szén István, „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.
- [SZI8] Szén István, „A hidrogéngazdaság és az e-mobilitás kihívásai és lehetőségei a villamosenergia-rendszer fejlesztésének szempontjából. (HUMDA – SZIE, Győr, 2024).
- [SZI9] Szén István; Rácz Ervin; Bakosné Diószegi Mónika, Hidrogéniüzemek, 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.
- [SZI10] Szén István; Bakosné Diószegi, Mónika; Rácz, Ervin, Hidrogéntechnológiák biztonsági osztályozása: a HISI-modell koncepciója és empirikus validációja. BIZTONSÁGTUDOMÁNYI SZEMLE 7: 113-128., 16 p. (2025)
- [SZI11] Szén István, „A statikus HAZOP-tól az intelligensig, avagy a fuzzyn keresztül az ACS-FORCE keretrendszerig.” In: Temesvári, Zsolt; Wühl, Tibor; (szerk.) XLI. Kandó Konferencia 2025.
- [SZI12] Szén István, „A HAZOP és LCA módszertan integrált alkalmazása a hidrogénszivárgás biztonsági és környezeti kockázatainak értékelésére a zöld átállás és fenntarthatóság kontextusában.” XX. Jubileumi LCA Konferencia, 2025. november 5-6., Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Budapest VIII., Tavaszmező utca 17.
- [SZI13] Szén István; Bakosné Diószegi Mónika; Rácz Ervin, „A HAZOP on-line lehetőségének alapjai és az ACS-FORCE modell. BIZTONSÁGTUDOMÁNYI SZEMLE 8: 117-134. 17p. (2025)
- [SZI14] Szén István, „Hydrogen Incident Severity Indicator (HISI), az új hidrogénspecifikus eseményskála. In: Temesvári, Zsolt; Wühl, Tibor; (szerk.) XLI. Kandó Konferencia 2025.
- [SZI15] Szén István, „On-line HAZOP módszertan fejlesztése fuzzy logika és metaheurisztikus optimalizáció alkalmazásával” In: Wühl, Tibor (szerk.) KVK Habilitációs és PhD Workshop Minikonferencia: Kiadvány kötet Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar (2025)
- [SZI16] Szén István, „Hidrogénincidensek osztályozásának jelenlegi korlátai és egy új eseményskála (HISI) fejlesztése” In: Wühl, Tibor (szerk.) KVK Habilitációs és PhD Workshop Minikonferencia: Kiadvány kötet Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar (2025)

8.2 További tudományos közlemények – társszerzőkkel

A disszertációhoz kapcsolódó kutatási tevékenység során, több olyan publikáció is készült, melyek közvetlenül ugyan nem kerültek beépítésre az értekezésbe, ugyanakkor jelentős szerepet játszottak a módszertani háttér és a kutatói kompetenciák fejlődésében. Ezúton is köszönöm szerzőtársaimnak a szakmai együttműködés lehetőségét.

- [*17] **Szén István**, Dr. Janáky Csaba, Dr. Endrődi Balázs, Pintér László, Koncz Bence, „A bükkábrányi naperőmű megújuló áramtermelését hasznosító innovatív energiatároló technológia fejlesztése” H2 – Hidrogén Hírlevél: A Magyar hidrogén és tüzelőanyag-cella egyesület hírlevele 2021/4 Március (2021)
- [*18] **Szén István**, Imre Emőke, „Hydrogen economy: Globally, domestically and at Óbuda University (2024)” Poster, 7th PANNEX Workshop, Budapest, Hungary – 10-11 June 2024,
- [*19] Endrődi Balázs, Trapp Cintia Alexandra, **Szén István**, Bakos Imre, Lukovics Miklós, Janáky Csaba, „Challenges and Opportunities of the Dynamic Operation of PEM Water Electrolyzers- ENERGIES 18: 9 Paper:2154, 11 p. (2025)
- [*20] 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 2025/1 Március (2025)
- [*21] Sárdy Kata Eszter, **Szén István**, „Hidrogén szerepe az energiabiztonság növelésében a megújuló energiaforrások integrációja mellett.” In: Temesvári, Zsolt; Wüthrl, Tibor; (szerk.) XLI. Kandó Konferencia 2025.