

A statikus HAZOP-tól az intelligensig, avagy a fuzzyn keresztül az ACS-FORCE keretrendszerig.

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

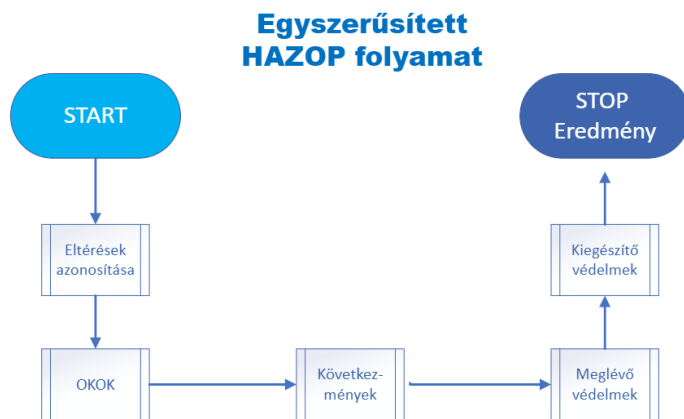
A HAZOP (Hazard and Operability Study) a folyamatbiztonsági elemzések egyik legelterjedtebb és legmegbízhatóbb eszköze, amely a potenciális veszélyforrások és üzemviteli anomáliák azonosítását szolgálja. Hagyományos, statikus megközelítése azonban nem teszi lehetővé a rendszerek működés közbeni, adaptív értékelését. A módszer jellemzően offline módon kerül alkalmazásra, és jelentős humán erőforrást igényel, mivel nagymértékben épít a szakértői csoportok tapasztalatára és szubjektív megítélésére. Kutatásom központi kérdése, hogy a jelenlegi HAZOP-eljárás nem támogatja az on-line, valós idejű döntéshozatalt, és nem biztosít kvantitatív értékelési lehetőséget. Ez a korlátozás különösen problematikus a mai, digitalizált ipari környezetben, ahol a komplex rendszerek megbízhatósága egyre inkább a gyors adatfeldolgozáson és az objektív értékelésen múlik. A valós idejű, kvantitatív megközelítések hiánya nem csupán hatékonyságvesztést okozhat, hanem a biztonsági szint csökkenéséhez is vezethet a nagy kockázatú, összetett üzemekben. Az ipari digitalizáció, az IoT-alapú monitoringrendszerek, valamint a mesterséges intelligencián alapuló elemzési technológiák új lehetőséget kínálnak a HAZOP továbbfejlesztésére. Ezen eszközök integrálása révén a módszer dinamikus, adaptív és részben automatizált formában is alkalmazhatóvá válhat, elősegítve a gyors és megalapozott döntéshozatalt. A hidrogéntechológiák területén ez különösen lényeges, hiszen az üzemi feltételek gyakran gyorsan és nehezen előrejelezhető módon változnak. Ilyen környezetben elengedhetetlen a valós idejű, adatvezérelt és szubjektivitást minimalizáló biztonsági értékelés, amely támogatja a proaktív beavatkozási stratégiákat. Célom, hogy a HAZOP módszertan alapvető erősségeit megőrizve olyan továbbfejlesztett koncepciót dolgozzak ki, amely a hagyományos, tervezési fázisban alkalmazott statikus elemzést dinamikus, on-line folyamatirányító rendszerekbe integrálható formában bővíti ki. Ennek demonstrálására egy mintapéllda segítségével bemutatom a HAZOP működését, a fuzzy logika alkalmazási lehetőségeit, a Mamdani-fuzzy megközelítés korlátait, valamint a TSK-fuzzy rendszerek optimalizálását hangyakolónia-alapú (ACO) módszerrel.

Kulcsszavak: hidrogén, biztonság, HAZOP, Fuzzy, metaheurisztika, hangyakolónia

1 Bevezetés

A HAZOP (Hazard and Operability Study) módszertan az 1960-as években az Imperial Chemical Industries vegyipari üzemeik összetett biztonsági kihívásainak kezelésére fejlesztette ki [1]. Azóta de facto ipari szabvánnyá vált a nagy megbízhatóságú, veszélyes rendszerek tervezésében. A módszer alapelve a strukturált, rendszeres kockázatelemzés vezetékszavak (guide words) segítségével (például túl magas/alacsony nyomás, túlzott/hiányos áramlás) amelyek az üzemi eltéréseket és potenciális veszélyforrásokat azonosítják.

Azonban a klasszikus HAZOP inherent szubjektivitása, kvalitatív jellege és számítási korlátai komoly akadályokat jelentenek a mai valós idejű, adatvezérelt ipari környezetben [2]. Azonos rendszer különböző szakértői csoportokkal végzett HAZOP-elemzése eltérő kimenetet adhat a csoport tapasztalatától, szubjektív megítélésétől függően. A hidrogéntekológiák fejlődése [3][4] különösen kritikussá teszi a gyorsabb, adatvezérelt kockázatelemzési módszerek szükségességét [5][6].



15. ábra: A HAZOP-folyamatárja [23]

2 Fuzzy logika: Mamdani és Takagi-Sugeno-Kang megközelítések

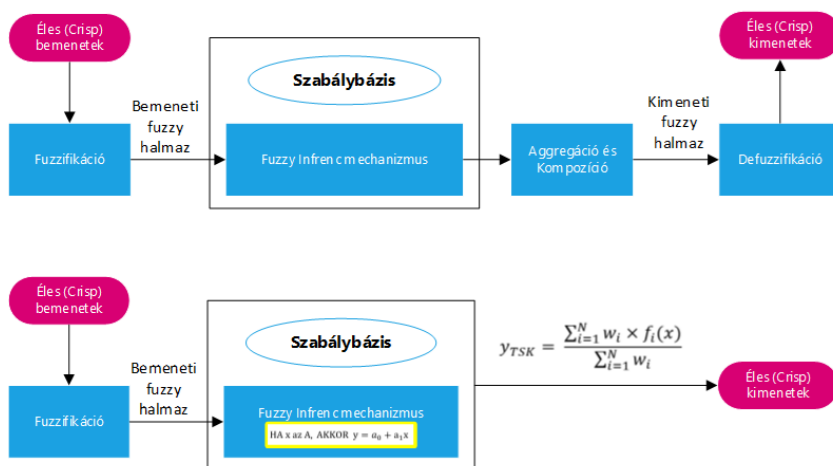
A fuzzy logika Lotfi A. Zadeh 1965-ben megjelent Fuzzy Sets tanulmánya alapján fejlődött ki önálló matematikai módszerré, melyet a szabályozástechnikában és a villamosmérnöki gyakorlatban előszeretettel alkalmazunk [7]. A fuzzy halmazelméleti megközelítés segítségével az elemek egy halmazhoz való tagsága nem kizárólagos (0 vagy 1), hanem fokozatosan értelmezett (0 és 1 közötti folyamatos átmeneti értékkel). Ez az emberi gondolkodáshoz közelebbi

reprezentáció lehetővé teszi a természetes, emberi nyelvben megfogalmazott ismeretek matematikai formalizálását [8].

Az IF-THEN szabályokon alapuló fuzzy következtetési rendszer (Fuzzy Inference System, FIS) működésének fő lépéseit a fuzzifikáció, a szabálybázis, az aggregáció, kompozíció és a defuzzifikáció teszi ki. A fuzzifikáció során a hagyományos, éles (crisp) értékeket fuzzy halmazokhoz rendeljük hozzá, tagsági függvények segítségével. A szabályok az antecedens feltételek alapján aktiválódnak, majd kombinációjukból a végső kimenet áll elő [9].

A fuzzy rendszerek két fő megközelítése az Ebrahim Mamdani által 1975-ben bemutatott Mamdani-fuzzy logika és a Takagi-Sugeno-Kang (TSK) fuzzy logika. A Mamdani-megközelítés a szabályok konzekvens (THEN) részét fuzzy halmazokkal írja le. Egy tipikus Mamdani-szabály: **IF Nyomás IS Magas AND Áramlás IS Alacsony THEN Kockázat IS Nagy**. Ez az eljárás aggregációs és defuzzifikációs lépéseken keresztül konvertálja az eredményt numerikus kimenetű [10][11]. Bár szemantikailag jól értelmezhető a módszer, számítási szempontból korlátokba ütközik, különösen nagy mintaszámok esetén.

A TSK fuzzy megközelítés alapvetően különbözik a Mamdani-módszertől. Míg a Mamdani-rendszer fuzzy halmazokat használ a konzekvens részben, addig a TSK explicit, általában lineáris matematikai függvényt helyez: **IF Nyomás IS Magas AND Áramlás IS Alacsony THEN Kockázat = $a_0 + a_1 \cdot \text{Nyomás} + a_2 \cdot \text{Áramlás}$** . Ez lehetővé teszi, hogy a kimeneti értékek közvetlenül számíthatók legyenek az aktivációs fokok súlyozott átlagolásával, anélkül hogy aggregációs vagy defuzzifikációs lépésekre lenne szükség [12][13].

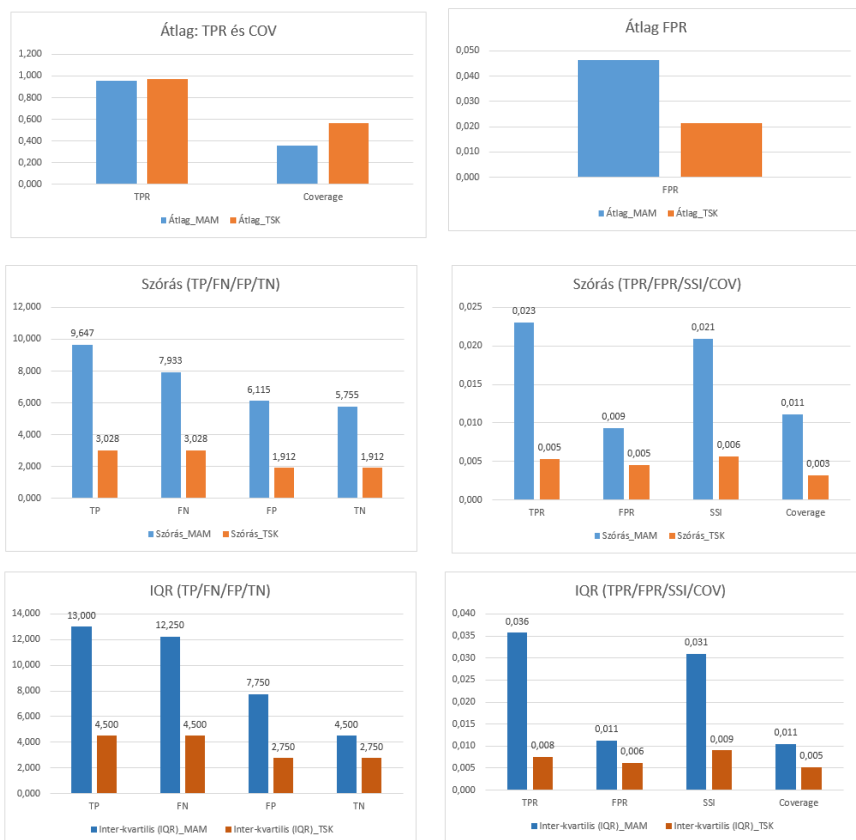


16. ábra: Mamdani és TSK-fuzzy grafikus összehasonlítása [23].

A TSK-fuzzy jelentős előnyöket kínál: (1) a számítási hatékonyság drasztikusan javul; (2) a kimeneti értékek folytonos, így deriválható, (3) a numerikus kimenet

közvetlenül integrálható más adaptív- vagy optimalizációs algoritmusokkal [14][15]. E tulajdonságok napjaink valós idejű, biztonságkritikus alkalmazásainak követelményeivel vannak összhangban.

Doktori kutatási feladataim során, az empirikus validációt alkalmazva kiderült, hogy a TSK-modell a Mamdani-modellhez képest lényegesen jobb teljesítményt nyújt. 100 000 adat feldolgozásánál a TSK-modell átlagos futási ideje 0,31 másodperc volt, míg a Mamdani-modell 2,89 másodpercet vett igénybe – amely közel tízszeres feldolgozási sebességkülönbséget jelent. A kockázatdetektálási mutató (TPR) 2,2%-kal, míg a tévesriasztási arány (FPR) 54%-kal javult. E különbségek statisztikailag szignifikánsak ($p < 0,001$) [23].

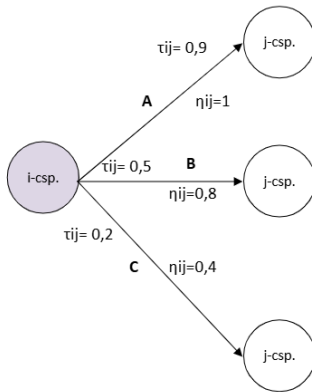


17. ábra: Validációs mutatók - Mamdani és TSK összehasonlítás [23]

3 Az ACS-FORCE keretrendszer: bioinspirált optimalizáció

A TSK-fuzzy logika által kínált előnyök teljes mértékben csak akkor érvényesülnek, ha a konzekvens tagban szereplő súlyparaméterek ($a_0, a_1, a_2, \dots$) optimálisan vannak beállítva. A manuális paraméterhangolás nem csak időigényes és szubjektív, hanem összetett, többdimenziós rendszerekben gyakorlatilag kivitelezhetetlen. Ezt megoldandó feladatként, integráltam a TSK-fuzzy rendszert az Ant Colony System (ACS) metaheurisztikus optimalizációs algoritmussal, létrehozva ezáltal az ACS-FORCE keretrendszert (Ant Colony System and Fuzzy Optimization for Real-time Critical Environments) [16][23].

A hangyakolóniák viselkedésének számítógépes szimulációjára épülő ACS algoritmus különösen jól alkalmazható a TSK fuzzy paraméterek optimalizálásához. Az eljárás során mesterséges hangyák a többdimenziós paraméterterben mozognak, feromonnyomok követésével és heurisztikus irányítás alapján keresik az optimális súlyvektor-kombinációkat [17][18][23]. Az algoritmus feromonfrissítési mechanizmusa biztosítja a globális optimalizációt, míg az elhalványuló feromonok elkerülik a lokális optimumokba való beragadást.



$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}]^\alpha \times [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N_k} [\tau_{il}]^\alpha \times [\eta_{il}]^\beta} & \text{ha } j \in N_k \\ 0 & \text{különben} \end{cases}$$

p_{ij}^k – a k -adik hangya valószínűsége arra, hogy $i \rightarrow j$ lépést választ
 i – a jelenlegi csomópont, ahol a hangya van
 j – a célcsomópont, amelyre a hangya lépni szeretne
 $l \in N_i^k$ – az összes elérhető célcsomópont az i -ből kiindulva (a k -adik hangya számára)
 τ_{ij} – az adott paraméterértékhez tartozó feromonintenzitás
 η_{ij} – heurisztikus érték, mennyire jó az $i \rightarrow j$ él azonnali szempontból
 $\alpha, \beta \in \mathbb{R}^+$ – súlyparaméterek
 N_i^k – a még látogatható csomópontok száma a k -adik hangya számára

Az ACS-FORCE célfüggvénye négy mutatóra támaszkodik: a valós pozitív detektálási arány (TPR), a tévesriasztási arány (FPR), a lefedettség (Coverage) és a biztonsági érzékenység index (SSI) [19] [23]. Ezek normalizált kombinációja teszi lehetővé, hogy az operatív stratégiák (pl. biztonsági maximalizálás vs. költségminimalizálás) formalizálható paraméterzáson keresztül megvalósíthatók legyenek.

Az ACS-FORCE integrációval elért eredmények szignifikánsak: a TSK-modellhez képest a TPR 0,92%-kal nőtt, az FPR 9,5%-kal csökkent, míg a

lefedettség 42%-kal javult [20][23]. A biztonsági érzékenység 2,71%-kal növekedett, ami rzkenyebb és stabilabb biztonsági viselkedésre utal. E javulások statisztikailag szignifikánsak, különösen az FPR és Coverage terén ($p < 0,001$) [23].

4 Következtetések és alkalmazási perspektívák

A klasszikus HAZOP módszertan és a modern fuzzy logika, valamint bioinspirált optimalizáció integrációja új dimenziókat nyit a biztonságkritikus ipari rendszerek kockázatelemzésében. Az ACS-FORCE keretrendszer gyakorlati alkalmazása lehetővé teszi:

- A valós idejű, adatvezérelt kockázatelemzést on-line üzemmódban, amely drasztikusan csökkenti a manuális elemzésre fordított időt;
- A szubjektivitás és emberi torzítások redukálását matematikailag megalapozott, reprodukálható döntéseken keresztül;
- A számítási hatékonyság megőrzésétől a TSK-fuzzy logika révén, amely 10-szerese a Mamdani-módszernek;
- Az operatív stratégiák flexibilis paraméterzálását az ACS-FORCE cél függvényen keresztül, lehetővé téve a biztonsági vs. költség prioritások eseti hangolást.

A tanulmányban bemutatott módszer különösen alkalmas hidrogéntechológiai létesítmények, valamint más biztonságkritikus ipari rendszerek (vegyipar, energetika, feldolgozóipar) on-line monitorozásához. További kutatási irányok közé tartozik más metaheurisztikus algoritmusok teljesítménybeli összehasonlítása, valamint a keretrendszer validálása valódi hardveres rendszereken egy kísérleti laboratóriumi infrastruktúrán.

Stratégia	Domináns súlyparaméterek	Jellemző
Biztonságmaximalizáló	$\alpha \gg \beta, \gamma, \delta$	minden kockázatot fel kell ismerni, még akár úgy is, hogy lesznek téves riasztások
Költségminimalizáló	$\beta \gg \alpha, \gamma, \delta$	a téves riasztások számát csökkenti, azért, hogy ne legyen indokolatlan leállítás
Robosztus működés	α és γ magas	a modell széles lefedettségű és pontos, téves riasztás lehetséges és nem mindenre reagál élesen
Érzékenységorientált	$\delta \gg \alpha, \beta, \gamma$	nagyon kis eltérésekre is élesen reagál

18. ábra: Üzemeltetési stratégiák [23]

Forrásjegyzék

- [1] IEC 61882, Hazard and operability studies (HAZOP studies) – Application guide, 2016.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Szén István, Hidrogén-energetika 1. rész, Energiatárolási célok és lehetőségek, a hidrogén értéklánc, *ELEKTROTECHNIKA* 116 : 9-10 pp. 28-32. , 5 p. (2023)
- [5] K. Hartmann et al., Hydrogen component leak rate quantification for system risk and reliability assessment, 9th Int. Conf. Hydrogen Safety ICHS 2021, Edinburgh, UK, Sept. 2021.
- [6] Oxford Institute for Energy Studies, Review of Hydrogen Leakage along the Supply Chain, *Energy Transition*, no. ET41, Nov. 2024.
- [7] L. A. Zadeh, Fuzzy sets, *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338-353, Jun. 1965.
- [8] J. M. Mendel, Fuzzy Logic Systems for Engineering: A Tutorial, *Proceedings of the IEEE*, vol. 83, no. 3, pp. 345-377, 1995.
- [9] Detreki A. és Szilvik L., Fuzzy rendszerek, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2011.
- [10] J. J. Jassbi et al., A comparison of Mamdani and Sugeno inference systems for a space fault detection application, in *Proc. World Automation Congress WAC*, Budapest, Hungary, Jul. 2006, pp. 1-8.
- [11] Fazekas L., Fuzzy rendszerek alapjai, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2006.
- [12] C.-C. Chen and Y.-T. Liu, Enhanced Ant Colony Optimization with Dynamic Mutation for TSK-Type Fuzzy System Design, *Computational Intelligence and Neuroscience*, vol. 2018, Article ID 9485478, 2018.
- [13] H. Nobahari and S. H. Pourtakdoust, Optimization of fuzzy rule bases using continuous ant colony system, in *Proc. 1st Int. Conf. on Modeling, Simulation and Applied Optimization ICMSAO*, 2005, Paper No. 243.
- [14] 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 Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 723-735, Aug. 2014.

- [15] M. Dorigo and 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.
- [16] R. J. Kuo, B. S. Wibowo, and F. E. Zulvia, Application of a fuzzy ant colony system to solve the dynamic vehicle routing problem, *Applied Mathematics and Modelling*, vol. 40, nos. 23-24, pp. 9990-10001, Dec. 2016.
- [17] C. Blum, Ant colony optimization: A bibliometric review, *Physics of Life Reviews*, vol. 51, pp. 87-95, Dec. 2024.
- [18] H. R. J. Solukloei et al., A fuzzy-HAZOP-ant colony system methodology to identify combined fire and explosion hazards, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2023.
- [19] M. Shokouhifar, FH-ACO: Fuzzy heuristic-based ant colony optimization for virtual network function placement, *Applied Soft Computing*, vol. 107, p. 107401, Aug. 2021.
- [20] W. Hu et al., All-Optical Implementation of the Ant Colony Optimization Algorithm, *Scientific Reports*, vol. 6, p. 26283, 2016.
- [21] J. Ahn and D. Chang, Fuzzy-based HAZOP study for process industry, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 317, pp. 303-311, 2016.
- [22] Y. Yousofnejad, F. Afsari, and M. Eshaghi, Dynamic risk assessment of hospital oxygen supply system by HAZOP and intuitionistic fuzzy, *PLoS One*, vol. 18, no. 2, Feb. 2023.
- [23] Szén István, Óbudai Egyetem-Biztonságtudományi Doktori Iskola, Doktori értekezéstervezet (2025. szeptember 19.), Budapest