

On-line HAZOP módszertan fejlesztése fuzzy logika és metaheurisztikus optimalizáció alkalmazásával.

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 legszélesebb körben alkalmazott módszere, amely a potenciális veszélyek és üzemviteli rendellenességek feltárását célozza. Hagyományos formájában azonban a módszer statikus jellegű, így nem képes a működés közben zajló folyamatok adaptív értékelésére. A HAZOP tipikusan offline módon, jelentős szakértői közreműködéssel valósul meg, erősen támaszkodva a résztvevők tapasztalatára. Kutatásom egyik alapvető kiindulópontja, hogy a jelenlegi HAZOP-eljárás nem támogatja a valós idejű döntéshozatalt, és nem biztosít kvantitatív, on-line elemzési lehetőséget. Ez a korlát különösen releváns a modern, digitalizált ipari környezetben, ahol a komplex rendszerek biztonsága és megbízhatósága nagymértékben függ a gyors adatfeldolgozástól és az objektív értékeléstől. A dinamikus és kvantitatív elemzési lehetőségek a biztonsági szint csökkenéséhez is hozzájárulhat a nagy kockázatú üzemekben. Az ipari digitalizáció, az IoT-alapú monitoringrendszerek és a mesterséges intelligenciára épülő adatfeldolgozási technológiák új irányt nyitnak a HAZOP továbbfejlesztésére. Ezek integrálásával a módszer kiegészíthető egy dinamikus, adaptív és részben automatizált megközelítéssel, amely alkalmas a gyors és alátámasztott döntéshozatal támogatására. A hidrogéntechológiák sajátosságai miatt ez a fejlesztési irány kiemelten fontos, mivel az üzemi körülmények gyakran gyorsan és nehezen prognosztizálható módon változnak. Ilyen környezetben elengedhetlenné válik a valós idejű, adatvezérelt és a szubjektivitást minimalizáló biztonsági értékelés, amely lehetővé teszi a proaktív beavatkozási stratégiák kidolgozását. Célkitűzésem olyan továbbfejlesztett HAZOP-koncepció megalkotása, amely megőrzi a módszertan hagyományos erősségeit, ugyanakkor kiterjeszti azt a tervezési fázisból kiinduló, statikus elemzésről egy dinamikus, folyamatirányító rendszerekhez illeszthető formára. Ennek érdekében bemutatom egy új, intelligens HAZOP alaplogikáját, a fuzzy megközelítések alkalmazhatóságát, a Mamdani-típusú rendszerek korlátaikat, valamint a TSK-fuzzy modellek optimalizálásának lehetőségeit hangyakolónia-alapú (ACO) eljárással.

Kulcsszavak: HAZOP, fuzzy, Mamdani, TSK, optimalizáció, ACS, ACO

1 Bevezetés

A HAZOP (Hazard and Operability Study) módszertant eredetileg az 1960-as években dolgozta ki az Imperial Chemical Industries, válaszul a vegyipari üzemekben jelentkező, összetett biztonsági problémák kezelésére [1]. Azóta a nagy kockázatú és magas megbízhatósági követelményű rendszerek tervezésében és üzemeltetésében széles körben alkalmazott ipari alapeljárássá vált. A módszer lényege egy strukturált és szisztematikus kockázatelemzési megközelítés, amely meghatározott vezetékszavak (guide words) segítségével tárja fel az üzemi eltéréseket és az ezekből fakadó potenciális veszélypontokat. A hagyományos HAZOP ugyanakkor számos olyan korlátozással rendelkezik, amelyek a modern, valós idejű adatfeldolgozásra építő ipari környezetben egyre inkább problémát jelentenek. A módszer kvalitatív jellege, szakértői ítéletekre való erős támaszkodása és a számítási háttér hiánya miatt jelentős szubjektivitást hordoz [2]. Azonos rendszert különböző szakértői csoportok vizsgálva eltérő eredményekre juthatnak, ami a módszer konzisztenciáját is korlátozza. A hidrogéntekológiák gyors ütemű fejlődése és terjedése [3][4] tovább fokozza annak szükségességét, hogy a kockázatelemzési eljárások nagyobb mértékben alapuljanak objektív, adatvezérelt és lehetőség szerint valós idejű megközelítéseken [5][6].

2 A HAZOP és a Fuzzy-logika kapcsolata

A fuzzy logika eredete Lotfi A. Zadeh (megjegyzés: 2011. november 7-én, az Óbudai Egyetem disztokorrává avatta) 1965-ben publikált Fuzzy Sets tanulmányára vezethető vissza, amely megalapozta azt a matematikai keretrendszert, amelyet ma széles körben alkalmazunk irányítástechnikai és villamosmérnöki feladatok megoldására [7]. A fuzzy halmazelmélet lényege, hogy a halmaztagság nem bináris módon (0 vagy 1) értelmeződik, hanem folytonos skálán, 0 és 1 közötti tagsági értékekkel. Ez a szemlélet közelebb áll az emberi gondolkodás kategorizációs folyamataihoz, így lehetővé teszi a természetes nyelvi tudáselemek formalizált, matematikai formában történő reprezentálását [8].

A szabályalapú fuzzy következtetési rendszerek (Fuzzy Inference System, FIS) működése több egymásra épülő lépésből áll: a bemenetek fuzzifikációjából, a szabálybázis alkalmazásából, az egyes következtetések aggregációjából, majd a végső kimenet előállításából, amelyet a defuzzifikációs eljárás biztosít. A fuzzifikáció során a klasszikus, éles (crisp) bemeneti értékeket megfelelő tagsági függvények segítségével fuzzy halmazokhoz rendeljük, amelyeket a szabályok antecedens részei aktiválnak [9].

A fuzzy rendszerek két meghatározó megközelítése az 1975-ben Ebrahim Mamdani által ismertetett Mamdani-típusú fuzzy modell, valamint a Takagi–

Sugeno–Kang (TSK) fuzzy logika. A Mamdani-rendszerben a szabályok konzekvens része fuzzy halmazok formájában jelenik meg.

Például:

IF Nyomás IS Magas AND Áramlás IS Alacsony THEN Kockázat IS Nagy.

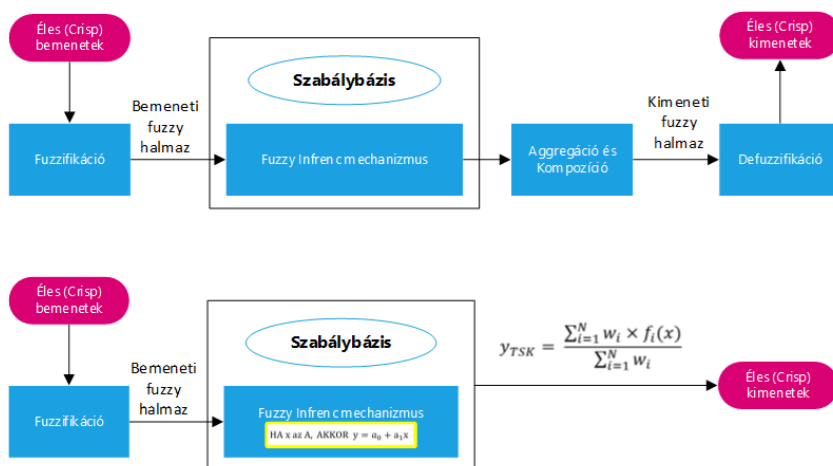
A kimenet meghatározása aggregációs és defuzzifikációs lépések sorozatán keresztül történik, ami jól értelmezhető, de nagy számítási igényű megoldást eredményez, különösen összetett rendszerek esetén [10][11].

A TSK-megközelítés ezzel szemben a konzekvens részben nem fuzzy halmazt, hanem explicit – tipikusan lineáris – matematikai összefüggést alkalmaz.

Egy TSK-szabály például így írható fel:

IF Nyomás IS Magas AND Áramlás IS Alacsony THEN Kockázat = $a_0 + a_1 \cdot \text{Nyomás} + a_2 \cdot \text{Áramlás}$.

Ez a struktúra lehetővé teszi, hogy a kimenet közvetlen számítással, a szabályok aktivációs fokainak súlyozott kombinációjával előálljon, elkerülve az aggregációs és defuzzifikációs lépéseket [12][13].



1. ábra: Mamdani (fent) és TSK-fuzzy (lent) összehasonlítása [23]

A TSK-típusú fuzzy rendszerek több lényeges előnyt kínálnak:

- számítási hatékonyságuk nagymértékben meghaladja a hagyományos fuzzy megközelítéseket;
- a kimeneti függvények folytonosak és deriválhatók, ami kedvező tulajdonság optimalizációs feladatokban;

- numerikus jellegük miatt jól illeszthetők modern, adaptív és optimalizációs algoritmusokhoz [14][15].

2.1 A Mamdani-HAZOP modell validációs eredményei

A szakirodalmi előzmények alapján elvárható teljesítményt a kidolgozott modell számottevően meghaladta. A kedvező eredmények ugyanakkor részben annak tulajdoníthatók, hogy a kutatásom központi elemeként a modell felépítésére, paraméterezésére és a szabálybázis kialakítására az általános ipari gyakorlatot meghaladó idő- és erőforrás-ráfordítás állt rendelkezésemre. Ennek következtében a szabályok illeszkedése különösen pontos lett, a modell pedig jól átlátható szerkezetet mutatott. Mindazonáltal, a kitűzött célok és a hidrogéntechnológiákra jellemző kockázati viszonyok fényében indokolt a kritikai elemzés is. A részletes vizsgálatok alapján az alábbi kiegészítő megállapítások tehetők:

- A TPR értéke kedvező, azonban a hamis riasztások aránya (FP) az összes vizsgált adatkészletet tekintve magas. Ez arra utal, hogy a rendszer a valós események detektálása mellett gyakran generál téves jelzéseket. Egy ipari környezetben ez az operátorok részéről fásultságot, fókuszvesztést és figyelemcsökkenést eredményezhet, ami késleltetett reakcióidőhöz, végső soron pedig a kritikus események felismerésének romlásához vezethet. Ez komoly biztonsági kockázatot jelent, mivel a ténylegesen veszélyes állapotok detektálása és kezelése lassulhat.
- A Coverage mutató bár stabil, de alacsony értéken marad, ami arra utal, hogy a szabálybázis és/vagy a tagsági függvények nem fedik le teljeskörűen a releváns kockázati tartományt. Ez a hiányosság a modell általánosíthatóságát és megbízhatóságát korlátozza.
- A kihagyott pozitív esetek (FN) száma ugyan nem extrém magas, de 1000 mintára vetítve 5–29 közötti értéket vesz fel. Ez vélhetően annak következménye, hogy a modell a hamis riasztások csökkentésére törekedve bizonyos kompromisszumokat vállalt, ami viszont elfogadhatatlan egy hidrogénüzemi környezetben, ahol minden valós kockázat felismerése kiemelt fontosságú.
- A tagsági függvények és a szabálybázis finomhangolása még egy viszonylag kis modell esetében is jelentős időráfordítást igényelt, és ennek ellenére sem sikerült minden teljesítménymutatót optimális értéken stabilizálni. Egy dinamikusan változó, komplex rendszernél a szükséges paraméterezési munka várhatóan emberi léptékkel már nem végezhető el hatékonyan.

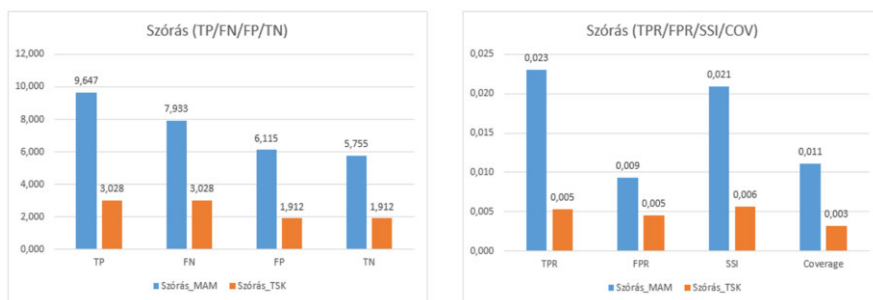
Összességében a Mamdani-fuzzy logikára épülő HAZOP-modell validációja igazolta, hogy a rendszer magas érzékenységre ($TPR > 0,92$) és stabil biztonsági teljesítményre képes. Ugyanakkor a hamis riasztások jelentős aránya, az alacsony

Coverage érték, valamint a fennmaradó kihagyott pozitív események jelenléte arra utal, hogy a modell teljesítménye lényegében felső korlátokba ütközik. Bár a tagsági függvények és a szabálybázis további optimalizációval javíthatók, az eredmények azt mutatják, hogy a Mamdani-típusú fuzzy rendszerek nem alkalmasak on-line kockázatdetekciós feladatok ellátására biztonságkritikus hidrogéntekológiai környezetben. Mindez indokolja a TSK-alapú megközelítések, valamint a metaheurisztikus algoritmusokkal kombinált hibrid modellek további vizsgálatát.

2.2 A TSK-HAZOP modell eredményei

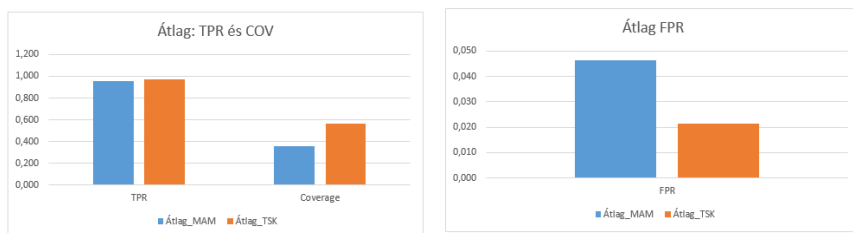
A kutatás során szerzett modellezési tapasztalatok, valamint a MATLAB eszközkészletének részletes megismerése lehetővé tették a szabálybázis célzott optimalizálását és a Mamdani-típusú fuzzy rendszer vizsgálatának kiterjesztését a TSK-logikára. A fejlesztési folyamatban meghatározó szerepet játszottak a paraméterérzékenységi elemzések, a számítási kísérletek során gyűjtött gyakorlati tapasztalatok, valamint a szintetikus adatgenerálási eljárásom eredményei.

A Mamdani-rendszerben alkalmazott tíz szintetikus adatkészletet közvetlenül integráltam a TSK-fuzzy modell bemeneti struktúrájába, biztosítva ezzel az objektív, kontrollált és összehasonlítható modellértékelést. A MATLAB Fuzzy Logic Toolbox segítségével elvégeztem a tagsági függvények és a szabálybázis szerkezeti finomhangolását, amelynek eredményeként a TSK-modell a Mamdani-megközelítéshez képest lényegesen kiegyensúlyozottabb és stabilabb teljesítményt mutatott. A deskriptív statisztikai-mutatók alapján megállapítható, hogy a TSK-modell nemcsak átlagos teljesítményét tekintve bizonyult kedvezőbbnek a Mamdani-moddellnél, hanem a stabilitás és robusztusság szempontjából is. A TSK rendszer átlagosan magasabb TPR-t és Coverage értéket, valamint alacsonyabb FPR-t mutatott, miközben a szórások és inter-kvartilis tartományok minden vizsgált mutató esetében lényegesen kisebbek voltak, mint a Mamdani-fuzzy esetében. A TSK-modell eredményei sokkal konzisztensebbek a különböző adatállományokon, a relatív szórás összevetése is ezt támasztja alá.



2. ábra: Modellösszehasonlítás relatív szórás alapján [23].

Az elvégzett páros t-próba eredményei is egyértelműen jelzik, hogy a TSK-modell teljesítménye a vizsgált négy mutató közül három esetében statisztikailag is igazolható módon javult. A TPR értékében mérsékelt, ugyanakkor szignifikáns növekedés tapasztalható ($p \approx 0,012$). Az FPR mutató esetében a javulás rendkívül erőteljes és nagy szignifikanciaszinttel igazolt ($p < 0,001$). A Coverage mutatóban a TSK-modell előnye markáns és kiemelkedően szignifikáns ($p \ll 0,001$). Ezzel szemben az SSI mutató tekintetében nem mutatható ki érdemi különbség a két modell között ($p = 0,979$), ami arra utal, hogy a biztonsági érzékenység dimenziójában a Mamdani- és a TSK-modell közel azonos teljesítményt nyújt.



3. ábra: TPR, COV és FPR eredmények [23].

Összességében a statisztikai elemzés megerősíti azt a kutatási hipotéziseim, miszerint a TSK-alapú megközelítés több kulcsfontosságú mutatóban szignifikáns előnyt biztosít. Ezek a jellemzők különösen relevánsak napjaink valós idejű, biztonságkritikus ipari alkalmazásaiban, így a doktori kutatásaim során végzett empirikus vizsgálatok egyértelműen igazolták, hogy a TSK-alapú modell teljesítménye jelentősen felülmúlja a Mamdani-megközelítést. A kockázatdetektálási arány (TPR) 2,2%-os javulást mutatott, míg a téves riasztások aránya (FPR) mintegy 54%-kal csökkent. A különbségek statisztikailag is szignifikánsak ($p < 0,001$) [23].

2.3 Futásiidő, Mamdani-HAZOP VS TSK-HAZOP

A szintetikus adatok felhasználása, a teljesítménymutatók optimalizálása és a szabályrendszerek finomhangolása során egyre hangsúlyosabban kirajzolódott a számítási idő jelentősége, amelyet korábbi hipotéziseim még nem kezeltek önálló vizsgálati dimenzióként. Bár a kutatás fő fókusza a Mamdani- és TSK-fuzzy rendszerek koncepcionális és alkalmazási különbségeire irányult, a nagyméretű futtatások egyértelművé tették, hogy a két modell közötti futásidőbeli eltérések nem elhanyagolhatók. Mivel a kísérletek mindkét rendszer esetében azonos hardver- és szoftverkörnyezetben zajlottak, a mért különbségek egyértelműen a modellek eltérő számítási szerkezetéből adódnak, nem pedig külső technikai tényezőkből. A számítási idő vizsgálata ipari szempontból különösen releváns, hiszen modern hidrogéntechológiai rendszerek esetében a valós időben

feldolgozandó adatmennyiség sokszorosan meghaladhatja a vizsgálatban alkalmazott terhelést.

A futásidők összehasonlításához egységes mérési protokollt dolgoztam ki, amely biztosította a két modell objektív és reprodukálható értékelését. Mindkét rendszer ugyanazon bemeneti adatkészlettel, azonos normalizálási eljárással és megegyező szabálybázissal működött, a konzekvens rész struktúrája jelentette az egyetlen módszertani különbséget. Az időmérést MATLAB-ban, elsősorban a *“timeit”* függvény segítségével végeztem, a mérési torzítások minimalizálása érdekében pedig warm-up futtatásokat, véletlenszerű futási sorrendeket és blokkolt mintázatokat alkalmaztam. Az eredmények elemzése – átlag, szórás, medián és páros t-próba felhasználásával – megerősítette, hogy a TSK-modell lényegesen kedvezőbb számítási teljesítményt nyújt, és skálázási szempontból is hatékonyabban kezeli a bemeneti adatmennyiség növekedését.

A dolgozatomban [23] feltüntetett szintetikus adatokon végzett TSK-rendszer átlagos futási ideje mindössze 0,31 másodpercrek bizonyult, szemben a Mamdani-modell 2,89 másodperces feldolgozási idejével.

3 A hangyakolónia (ACS) optimalizáció, az on-line működés pillére.

Az ACS alkalmazása a kutatásomban két alapvető funkciót tölt be. Egyrészt a súlyvektorok optimalizálásával tovább javítja a TSK-fuzzy modell teljesítményét, amely már a korábbi vizsgálatokban is ígéretes eredményeket mutatott. Másrészt hozzájárul a szabálybázis egyszerűsítéséhez azáltal, hogy kiszűri a redundáns vagy csekély információtöbbletet hordozó szabálykombinációkat. Ez a lépés különösen fontos a számítási terhelés csökkentése szempontjából, mivel a szabályok számának mérséklése közvetlenül gyorsítja a modell értékelését. A két cél együttes eredménye, hogy a rendszer pontosabb, robusztusabb és gyakorlati alkalmazásban is hatékonyabb kockázati előrejelzést biztosít.

A súlyvektorok optimalizálása az ACS-eljárás egyik központi feladata. Minden fuzzy szabályhoz egy súlyvektor tartozik, amely a bemeneti változókhoz rendelt együtthatókat és a konzekvens rész konstans tagját foglalja magában. E vektorok összessége alkotja a teljes modellparaméter-teret, amely a jelen kutatásban egy 90 dimenziós folytonos keresési térnek felel meg. Az ACS algoritmus ebben a térben keresi azt a paramétervektort, amely a fuzzy rendszer kimenetét a lehető legpontosabban reprezentálja. Bár az általam definiált modellben a szabályok száma mindössze 18, a paraméterek sokasága miatt a feladat nagy dimenziós optimalizálási problémaként jelenik meg, amelyben minden iteráció során egy-egy új, 90 elemű súlykészlet generálódik.

A szabálybázis redukciója a másik jelentős célterület. A fuzzy rendszerek természetes sajátossága, hogy a bemeneti változók száma és kombinációi könnyen túlméretezett, redundáns szabálykészletet hozhatnak létre. Nagy kockázatú, összetett ipari környezetekben, például a hidrogénüzemekben vagy olajfinomítóknál, ez akár több ezer szabály megjelenéséhez is vezethet, amelyek közül számos már nem hordoz új információt, így rontja a modell átláthatóságát és hatékonyságát. A manuális szabály-redukció ilyen környezetben gyakorlatilag kivitelezhetetlen, ezért indokolt intelligens keresési algoritmusok, például az ACS alkalmazása. Az algoritmus képes a redundáns szabályok kiszűrésére úgy, hogy közben a lényeges folyamatdinamikai mintázatokat megőrzi, ezáltal stabil és kezelhető méretű szabálybázist eredményez.

Összességében az ACS kettős szerepe, a paraméteroptimalizálás és a szabálybázis egyszerűsítése biztosítja, hogy a TSK-fuzzy modell nagy pontossággal, ugyanakkor számítási szempontból hatékony módon működhessen, ami a hidrogéntechológiai biztonsági alkalmazásokban kiemelten fontos.

3.1 TSK és ACS integráció

Az összehasonlíthatóság biztosítása érdekében ugyanazt a tíz szintetikus adatkészletet alkalmaztam, mint a Mamdani- és TSK-modellek korábbi vizsgálatainál. A hardver- és szoftverkörnyezet változatlan maradt, továbbra is a MATLAB platform biztosította a fejlesztési és tesztelési környezetet. Míg azonban a MATLAB, különösen a Fuzzy Logic Designer alkalmazáson keresztül natív módon támogatja a Mamdani- és TSK-rendszerek létrehozását, paraméterezését és kiértékelését, a metaheurisztikus optimalizációs eljárások, így a hangyakolónia-alapú (ACS) algoritmus nem részei az alapértelmezett eszközkészletnek. Ennek következtében az ACS integrálását a TSK-modellbe egyedi fejlesztéssel kellett megoldanom.

A szakirodalomban elfogadott gyakorlathoz igazodva az ACS-modul kialakítása nyílt forráskódú, közösségi MATLAB-komponensek (MATLAB File Exchange) és saját implementáció kombinációjával történt. A létrehozott ACS-modul képes volt a TSK rendszer konzekvens részét meghatározó súlyparaméter-vektorok kezelésére, új jelöltek generálására, valamint a célfüggvény alapján azok értékelésére. A két rendszer közötti kapcsolatot a MATLAB *“evalfis”* függvénye biztosította: minden ACS által előállított súlyvektorral lefuttattam a TSK-modellt, majd a kimenetek alapján kiszámítottam a teljesítménymutatókat (TP, FP, TN, FN), illetve a kockázati arányszámokat (TPR, FPR, COV, SSI). Ezek a célfüggvény bemeneteiként szolgáltak, így az ACS iteratív keresése közvetlenül a modell teljesítményére optimalizált.

4 Konklúzió és összefoglalás

A vizsgálati eredmények azt mutatják, hogy az ACS integrációja a TSK-modell teljesítményét több dimenzióban is javította. A valódi pozitív detektálások száma mérsékelten nőtt (TP: +1,44%), miközben a valódi negatív esetek aránya kis mértékben csökkent (TN: -0,48%), ami összhangban áll egy szigorúbban működő veszélyfelismerési mechanizmussal. A rendszer érzékenységi és megbízhatósági mutatói alapján különösen figyelemre méltó, hogy a kihagyott pozitív esetek száma jelentősen csökkent (FN: -32%), és ezzel párhuzamosan a téves riasztások aránya is mérséklődött (FP: -11%). Ennek eredményeként a TPR kismértékű javulást mutat (+0,92%), míg az FPR számottevően csökkent (-9,5%), ami együttesen a detektálási teljesítmény szisztematikus javulását jelzi.

A biztonsági érzékenység (SSI) értéke 2,71%-kal emelkedett, ami nem csupán érzékenyebb, hanem stabilabb biztonsági viselkedést is jelez. A lefedettség (COV) 1,42%-os növekedése arra utal, hogy az optimalizált modell szélesebb működési tartományban képes megbízható előrejelzést adni. Mindezek alapján az ACS integrációja minden vizsgált teljesítménymutatóban kedvező irányú elmozdulást eredményezett, és különösen az FPR és Coverage tekintetében mutathatók ki erősen szignifikáns javulások.

Összességében a TSK+ACS hibrid modell kiegyensúlyozottabb, érzékenyebb és megbízhatóbb detektálási teljesítményt nyújt, ami alapján az ACS integrációja egyértelműen hozzájárul a kockázati események pontosabb és stabilabb felismeréséhez [23].

5 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] 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 Szlvik 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