

**FUNDAMENTALS OF THE ON-LINE
HAZOP OPTION AND THE
ACS-FORCE MODELL****A HAZOP ON-LINE LEHETŐSÉGÉNEK
ALAPJAI ÉS AZ
ACS-FORCE MODELL**SZÉN István¹ – BAKOSNÉ DIÓSZEGI Mónika² – RÁCZ Ervin³**Abstract**

HAZOP is a qualitative method traditionally applied during the design phase. Our objective is to integrate HAZOP into on-line, industrial process control systems. Achieving this, however, requires a novel approach. While the integration of fuzzy logic has opened new dimensions in HAZOP analyses [8], its applicability remains limited due to inherent compromises. In our view, Takagi–Sugeno–Kang type fuzzy models may offer a breakthrough, enabling faster and more numerical risk estimation. To address the inherent weaknesses of TSK fuzzy systems, we employ metaheuristic optimization techniques. As part of our research, we have developed a new framework named: ACS-FORCE. Beyond its on-line data processing capabilities, ACS-FORCE provides high sensitivity, robustness, and scalability, thus elevating HAZOP-based risk assessment to a new level.

Keywords

HAZOP, fuzzy, on-line risk assessment, ant colony, industrial process control

Absztrakt

A HAZOP egy tervezési fázisban alkalmazott, kvalitatív, kockázatelemzési módszer. Célunk, hogy a HAZOP -ot, integráljuk az on-line, ipari üzemirányítási folyamatokba. Ehhez viszont új megközelítésre van szükség. A fuzzy logika integrálása új dimenziót nyitott a HAZOP elemzésekben [8], de csak kompromisszumok mellett alkalmazható. Meglátásunk szerint a Takagi–Sugeno–Kang típusú fuzzy modell alkalmazása áttörést jelenthet, mert így gyorsabb, numerikus kockázatbecslés valósítható meg. A TSK-fuzzy gyengeségeit, metaheurisztikus optimalizációval kompenzáljuk, kutatásunk során megalkottunk egy új keretrendszert, melynek az ACS-FORCE nevet adtuk. Az on-line, adatfeldolgozási képességen túl, az ACS-FORCE magas érzékenységet, robusztusságot és skálázhatóságot kínál, s új szintre emeli a HAZOP-alapú kockázatértékelést.

Kulcsszavak

HAZOP, fuzzy, online kockázatértékelés, hangyakolónia, ipari folyamatirányítás

¹szen.istvan@kvk.uni-obuda.hu | ORCID: 0000-0002-1028-0005 | PhD Student, Doctoral School on Safety and Security Sciences Óbuda University | doktorandusz, Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola

²dioszegi.monika@bgk.uni-obuda.hu | ORCID: 0009-0000-3783-5691 | university associate professor, Óbuda University, Bánki Donát Faculty of Mechanical and Safety Engineering | egyetemi docens, Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai mérnöki Kar

³racz.ervin@kvk.uni-obuda.hu | ORCID: 0000-0002-7692-1397 | full professor, Obuda University, Kando Kalman Faculty of Electrical Engineering | egyetemi tanár, Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar

BEVEZETÉS

A biztonságkritikus rendszerekben a kockázatelemzés kiemelkedő fontosságú, mivel ezeknek a rendszereknek a meghibásodása vagy helytelen működése súlyos biztonsági következményekkel járhat. A kockázatelemzés célja a kockázatok azonosítására és mélyebb megértésére irányul, ideértve azok lehetséges következményeit és bekövetkezési valószínűségét, használatával megelőzhető az esetleges balesetek [1][2][3]. A kockázatelemzés területén az egyik legelterjedtebb és legszélesebb körben alkalmazott módszertan a HAZOP (Hazard and Operability Study), amely az 1960-as években a vegyipari biztonságtechnika igényeire válaszul került megalkotásra. Az eltelt évtizedek során a módszer de facto iparági szabvánnyá vált, különösen a nagy megbízhatóságú, veszélyes üzemeltetésű rendszerek körében [4], példaként említjük a petrolkémiai, gázipart és hidrogéntekológiát. A HAZOP a tervezési fázisban alkalmazott, szisztematikus módszer, mely a komplex rendszerek veszélyeinek és működési anomáliáinak azonosítására alkalmas. Módszertani előnye, hogy strukturált. Az összetett rendszereket részfunkciókra (ún. „node-okra”) bontja, majd irányított kulcsszavak (ún. „guide word”) segítségével elemzi azokat. A folyamat során a cél, hogy az üzemszerű működéshez képesti eltéréseket, valamint a kockázatok lehetséges okait és következményeit is feltárja. A HAZOP további előnye, hogy kiterjedt szakirodalom és módszertani útmutatók támogatják [5][6]. Ugyanakkor jelentős emberi erőforrás-igényű és magas szubjektivitással terhelt módszer, amely a döntésekben nagymértékben a szakértők egyéni megítélésére támaszkodik, numerikus konklúzió nélkül [7][8]. A szubjektivitás csökkentésére fuzzy alapú kiterjesztéseket dolgoztak ki, amelyek közül leggyakrabban a Mamdani-fuzzy rendszert alkalmazták [8]. Ez ugyan javította a bizonytalanság kezelését, de továbbra is nyelvi kimeneteket ad, és a defuzzifikációs lépés miatt korlátozottan alkalmazható valós idejű, numerikus kockázateértékelésre. A kutatási rés: jelenleg nincs olyan numerikus, valós idejű és skálázható HAZOP-megoldás, amely ipari környezetben is hatékonyan alkalmazható lenne.

E hiány pótlására jelen kutatás egy Takagi–Sugeno–Kang (TSK) fuzzy modellt és Ant Colony System (ACS) optimalizációt integráló új módszertant mutat be. A TSK-fuzzy közvetlen numerikus kimenete és alacsony számítási igénye lehetővé teszi a valós idejű integrációt ipari folyamatirányító rendszerekbe. Az ACS-optimalizációval kombinált megközelítés csökkenti a szubjektivitást, mérsékeli a nyelvi változók dominanciáját, és pontos, reprodukálható kockázati értékelést biztosít biztonságkritikus környezetben.

KUTATÁSI FELADATUNK ÉS CÉLJAINK

A hidrogéngazdaság széles körű elterjedésének egyik meghatározó feltétele a biztonság fokozása. A hidrogén sajátos fizikai és kémiai tulajdonságai, valamint a történelmi katasztrófák nehezítik a technológia társadalmi és ipari elfogadását, ugyanakkor a környezetvédelmi és energetikai kihívások szükségessé teszik annak fejlesztését és terjedését. Kutatásunk a hidrogéntekológiák integrációjára, ezen belül a biztonságtechnikai kockázatelemzés fejlesztésére fókuszál. Törekszünk arra, hogy az induktív kutatás szempontjainak a figyelembevételével, általános érvényű, interdiszciplináris modellalkotással járuljunk hozzá a hidrogénbiztonság, hidrogéntekológia fejlesztéséhez.

Kutatásunk célja egy olyan rendszer alapjainak kidolgozása, amely empirikus, kvalitatív és kvantitatív elemzésekre [9][10][11] támaszkodva lehetővé teszi a már bizonyítottan hatékony HAZOP módszer, on-line adatfeldolgozással támogatott, folyamatos kockázatelemzési alkalmazását. Új szemlélettel kívánunk élni, eltérve a hagyományos, statikus megközelítéstől, mert a hidrogéntechnológiák kockázati sajátosságai szükségessé teszik, hogy a HAZOP dinamikusan integrálódhasson az üzemirányító rendszerek on-line döntéstámogatási moduljába, azonban ehhez új módszertani és számítási feltételek megteremtése szükséges, mert egy hidrogéngázt tartalmazó fizikai rendszerben a bizonytalanság kezelése kulcsfontosságú a megbízható működés és a biztonság fenntartása érdekében.

Hidrogénrendszerek esetében a bizonytalanság mértékét több tényező is növeli: a hidrogén rendkívül kis molekulamérete elősegíti a szivárgást és a diffúziót, a nagy nyomásértékek és gyors nyomásváltozások dinamikus terhelést jelentenek a berendezésekre és a rendszert alkotó elemekre, míg a magas térfogatáramok fokozzák a rendszer instabilitásának lehetőségét. A szenzoradatok zajossága, pontatlansága és időbeli késése további bizonytalansági forrást jelenthet, ami közvetlenül befolyásolja a kockázatértékelést és a valós idejű folyamatirányítást. Solukloei és munkatársai rámutatnak arra, hogy a fuzzy módszertan képes jól kezelni a bizonytalanságot, az általuk megalkotott szabályalapú modell viszont minden iterációnál idő- és erőforrásigényes [8].

Meglátásunk szerint, a probléma gyökere abban rejlik, hogy a Mamdani-fuzzy inference rendszerek (FIS - Fuzzy Inference System) teljesítménye drasztikusan romlik, ha a bemeneti dimenzió nő (pl.: szenzoradatok) vagy ha a szabályok száma megnő [14]. Kutatási célunk, hogy a HAZOP, egy már elkészül üzem esetén, ne csak a tervezési fázisban legyen elvégezve, hanem az üzemeltetés során is, valós idejű alkalmazásként futhasson a háttérben. Ehhez azonban a fuzzy rendszert optimalizálni kell, sőt újra kell értelmezni! Amíg a Mamdani-fuzzy rendszer kimenete „nyelvi” (pl. „közepes kockázat”), s ez defuzzifikációt igényel, addig a Takagi–Sugeno–Kang (TSK) fuzzy rendszer lineáris kimeneti függvényeket használ, így az jelentősen gyorsabb lehet. Ennek az az előnyös tulajdonsága, hogy közvetlenül implementálható a SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), IoT vagy DCS (Distributed Control System) rendszerekbe és ezáltal a valós üzemi adatok alapján a biztonság szintje növelhető. Természetesen, ezesetben megoldást kell találnunk a szenzoradatok megbízhatósági elemzésére is.

Az on-line kockázatértékelő rendszerek alkalmazása során több kulcsfontosságú követelménynek kell teljesülnie:

- elengedhetetlen a numerikus kockázatértékelés lehetősége, amely kvantitatív alapot biztosít a döntéshozatalhoz,
- a rendszernek elegendően gyors adatfeldolgozási képességgel kell rendelkeznie az on-line működés fenntartása érdekében, miközben a kockázati becslések megfelelő pontossága is biztosított kell legyen,
- a rendszernek alkalmasnak kell lenni arra, hogy érzékelni tudja a bemeneti adatok megbízhatatlanságát, és ilyen esetekben figyelmeztetést kell küldjön az operátornak, jelezve a manuális beavatkozás vagy a rendszerellenőrzés szükségességét.

Megvizsgálva a fuzzy logika szakirodalmát, megállapítottuk, hogy a TSK-fuzzy rendszerek kiválóan alkalmasak numerikus kockázatbecslésre, ugyanakkor a TSK-szabály-

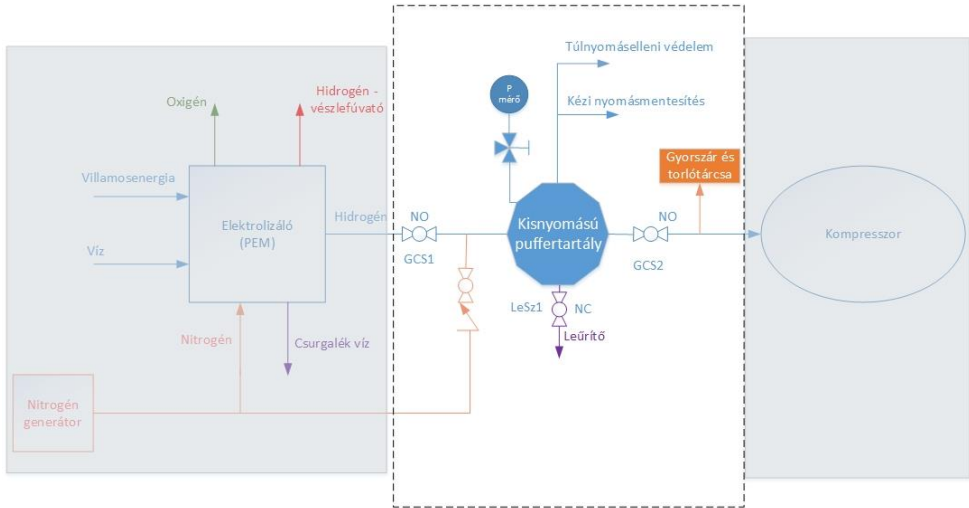
bázis optimalizálása, a paraméterek hangolása, illetve a bemeneti változókhoz tartozó tagfüggvények illesztése szintén jelentős számítási kapacitást és jól definiált keresési stratégiát igényel. E kihívások kezelésére hatékony megoldást kínál a hangyakolónia optimalizációs algoritmus (ACO - Ant Colony Optimization), amely bioinspirált keresési stratégiájával dinamikusan és adaptívan képes feltérképezni az optimális szabálybázist és paraméterkészletet. Feltételezésünk, hogy az ACO algoritmus segítségével a TSK-fuzzy rendszer tanulási folyamata felgyorsítható, mert az algoritmus egy olyan metaheurisztikus módszer, amely gyorsan képes jó megoldásokat keresni nagy keresési térben, így segíthet hatékonyabban megtalálni az optimális TSK paramétereket. Mindeközben növelhető a modell generalizációs képessége és prediktív pontossága is, ami a mi esetünkben annyit tesz, hogy a modell nemcsak a tanulóadatokra ad jó eredményt, hanem ismeretlen, új adatokon is jól teljesíthet, továbbá az előrejelzések pontossága jól közelít a valósághoz. Az iteratív kollektív keresés lehetővé teszi a konzisztens és robusztus szabályrendszerek kialakítását, különösen valós idejű, zajos vagy hiányos adatokkal rendelkező környezetben [12][13].

A feldolgozott szakirodalomban azt tapasztaltuk, hogy a Mamdani elvű fuzzy + HAZOP és ACS (Ant Colony System) kombinációja már kidolgozott eljárás, azonban ez a módszer csak offline körülmények között tesztelt. A valós idejű fuzzy rendszerek összehasonlító elemzése nagyon szűk körben vizsgált kutatási terület és a fuzzy + ACS + valós idejű rendszer alkalmazása a hidrogéninfrastruktúra biztonsági diagnosztikájában jelenleg nem létezik átfogóan kidolgozott, dokumentált, nyilvánosan elérhető formában.

Kidolgoztunk egy új módszert, aminek az ACS-FORCE nevet adtuk: Ant Colony System and Fuzzy Optimization for Real-time Critical Environments. módszerünkben, a fuzzy rendszert támogatja az ACS, ami a szabálystruktúrákat optimalizálja kolóniaviselkedés alapján. Az ACS és TSK kombinációt kifejezetten alkalmasnak találjuk a szabályhalmaz csökkentésére vagy a legveszélyesebb eseményláncok detektálására [13], Megközelítésünk további újdonsága, hogy az optimalizáció eredményként létrejött adathalmazból mi azonnali döntéseket kívánunk támogatni.

A HAGYOMÁNYOS HAZOP BEMUTATÁSA ÉS A TESZTMODELLÜNK

A HAZOP elemzés során egy multidiszciplináris szakértői team, lépésről lépésre elemzi a rendszer minden egyes részét (pl.: szelep nem működést, túlnyomást) és különböző "mi lenne, ha?" kérdéseket tesznek fel. Például: "Mi történne, ha a nyomás túl magas lenne?", "Mi történne, ha a szelep nem működne?". A folyamat szisztematikus és formális, szigorú szabályok mentén alkotott eljárás, melyet új létesítmények esetén szoktak elvégezni. A területi korlátok nem teszik lehetővé egy teljes HAZOP elemzés lefolytatását, hiszen egy komplex üzem esetén ez akár több ezer oldal terjedelmet is elérhet, ezért mi most egy egyszerűsített, de egy valóságban már megépült hidrogénipari objektum [15] részlelmén mutatjuk be a HAZOP módszer gyakorlatát. A modellel szemléltetni kívánjuk a kockázatelemzés módszerét. A bemutatott részelem egy PEM (Polymer Electrolyte Membrane) elektrolízisen alapuló, hidrogén előállító üzem, kisnyomású puffertartályának vizsgálata. Az elemzés célja a lehetséges veszélyek és működési akadályok azonosítása a puffertartály működése során, különösen a nyomás, áramlás és a szelep műveletek vonatkozásában.



1. ábra: A számításokhoz és a szemléltetéshez használt tesztmodellünk, saját szerkesztés

Elemzési paraméterek: Nyomás (37-43 bar közötti normál tartomány), áramlás, szelepműveletek. Vezényszavak (guide words): magas/alacsony; túlzott/hiányos; megfelelő/nem megfelelő.

Paraméter	Lehetséges eltérés	Lehetséges okok	Lehetséges következmények	Meglévő védelmi intézkedések	Ajánlott intézkedések
Nyomás	Túl magas	Nyomásmentesítő szelep meghibásodása	Tartály túlnyomása, robbanás veszélye	Túlnyomás elleni védelem, nyomásmérő	Nyomásmentesítő szelep rendszeres tesztelése és karbantartása
Nyomás	Túl alacsony	Szivárgás a csatlakozásoknál (GCS1, GCS2), hibás leürítés	Hidrogénvesztés, alacsony nyomás miatti folyamat megszakadása	Nyomásmérő, redundáns töltőrendszer	Szivárgásérzékelők telepítése, csatlakozások gyakori ellenőrzése
Áramlás	Túlzott áramlás	Node 1 hiba, Nod 9 hiba,	Túlnyomás, tartály túlterhelése, repedés, szivárgás, robbanás	Nyomásmérő, túlnyomás elleni védelem	Töltési folyamat felügyelete,elektrolizáló ellenőrzése, nitrogéngenerátor ellenőrzése
Áramlás	Hiányos áramlás	GCS2, GCS2 gömcsap vagy gyorszár hibás működése, szivárgás	Puffertartály leürülése, nyomáshiány, kompresszor leállás, szivárgás, szűrőláng vagy robbanás	Gyorszár és gömcsapok ellenőrzése, Node 1 kilépő nyomás ellenőrzése	Gömcsapok és gyorszár karbantartása, kézi működtetés tesztelése, Nyomásmérők ellenőrzése a Nod 1 oldalon, majd a kisnyomású puffertartály oldalán
Szelepművelet	Nem megfelelő zárás	Gömcsapok (GCS1, GCS2) vagy gyorszár meghibásodása	Szivárgás, nyomásproblémák, Szűrőláng, robbanás	Redundáns szelepek	Szelepek rendszeres karbantartása, működésük ellenőrzése
Szelepművelet	Nem megfelelő nyitás	Kézi nyomásmentesítő szelep elakadása	Nyomás felgyülemlése, túlnyomás	Túlnyomás elleni védelem	Kézi szelep rendszeres tesztelése

1. táblázat :A klasszikus HAZOP formája és struktúrája a tesztmodellre, saját szerkesztés

Ahogy az 1. táblázatban is látható, a HAZOP egy kvalitatív módszer, amelynek eredményei szöveges leírások formájában jelennek meg. A rendszer számos előnnyel rendelkezik, ugyanakkor hátrányai közé tartozik, hogy nem kezeli a kombinált hibákat, jelentős idő- és erőforrásigénye van, valamint erősen függ a „guide word” (vezényszó) alapú megközelítéstől. Ennek következtében atipikus hibák rejtve maradhatnak, ha azok nem sorolha-

tók be egy tipikus vezényszó kategóriába. Továbbá, az emberi tényezők (például a tapasztalat, a kreativitás, a szubjektív torzítások és a csoportdinamika) szintén befolyásolhatják a feltárt veszélyek körét [4][5][16][17].

Az egyik ígéretes irány a fuzzy logika integrálása a HAZOP-ba. A szakirodalom számos eredménnyel igazolja a fuzzy logika hozzáadott értékét, így a hagyományos HAZOP bizonytalanságai jobban kezelhetők, és realisabb kockázati szint besorolás érhető el [18][19][20][21]. Fontos kiemelni, hogy a fuzzy-HAZOP kiegészíti, nem helyettesíti a hagyományos HAZOP-ot. A elemzés alapjait továbbra is a guide word-alapú brainstorming adja, s ezt követően lép be a fuzzy logika, a számszerűsítés és értékelés fázisában. Így a két módszer ötvözése biztosítja, hogy ne vesszen el a HAZOP kreatív, feltáró jellege, viszont a kimenet jobban felhasználható legyen a kockázatkezelési döntésekhez.

Anomálfigyelés és a Mamdani-fuzzy alkalmazása a tesztmodellen

Ebben az egyszerű modellben, három változót (nyomás, áramlás, szeleppáallapot) és 18 fuzzy-szabályt írhatunk fel, melyből egy szabály logikailag így írható fel: *IF nyomás IS magas AND áramlás IS alacsony AND GCS2 IS zárt THEN kockázat IS nagy*.

A National Renewable Energy Laboratory (NREL) és a Marylandi Egyetem közös kutatásában megállapították, hogy a hidrogénrendszerekben a szivárgás a leggyakoribb meghibásodási mód. A tanulmány hangsúlyozza, hogy a szivárgások gyakoriságának és mértékének bizonytalansága korlátozza a kockázatok pontos megértését és kezelését [22]. Az Oxford Energy Institute, 2024-es jelentése szerint a hidrogénellátási láncban, a legmagasabb szivárgási arányok a föld feletti tárolás esetén fordulhatnak elő [23]. A hidrogénipari rendszereknél a szivárgás és annak detektálása kritikus fontosságú, mert a szivárgás következtében tűz és robbanás egyaránt kialakulhat. A szakirodalmi adatok szerint a nem észlelt szivárgások 25-40%-al csökkenthetik a biztonsági rendszerek megbízhatóságát a hidrogéninfrastruktúrában [24][25][26][27]. Tekintettel a hidrogénrendszer sajátosságaként (nehezen észlelhető, katasztrofális kimenetű szivárgás) megjelenő kockázatok növekedésére, a modellünket egy anomálfigyelő ággal bővítettük, ami konkrétan azt jelenti, hogy ha a GCS2 szelep zárt állapotában áramlást érzékelünk, akkor a következő üzemserű esetek fordulhatnak elő, melyeket a DCS rendszer érzékel:

- túlnyomás elleni védelem (PRV - Pressure Relief Valve) aktív, vagy
- kézi nyomásmentesítő szelep vagy a leürítő-szelep nyitva,

Viszont ha a DCS-ben nincs aktív jel, a fenti két állapotra és minden, tartályból „kivezető” szelep zárt állapotban, mégis van áramlási jel a bemeneti oldalon, akkor a rendszer valahol szivárog.

Annak érdekében, hogy az anomáliát detektálhassunk a Mamdani-fuzzy rendszerben, definiálni kell egy „mérhető” fuzzy kategóriát is az áramlási univerzumban (eddig volt: túlzott, normál, hiányos, most új változó: mérhető), ez viszont a szabályok számát növelné. A klasszikus fuzzy szabályterünk eddig 18 szabályt (3x3x2) tartalmazott, a bővített szabálytér 24 szabályra (3x4x2) növekedne, de annak érdekében, hogy az ilyen eseteket hatékonyan, nagyobb számítási kapacitás igénye nélkül kezelni tudjuk, logikai értéket állítunk be, s csak akkor figyeljük, ha egy feltétel (pl.: GCS2=0, vagyis zárt) igaz. Amennyiben így járunk el, ekkor nem növeljük meg a szabályrendszer komplexitását.

A modell validálása érdekében a MATLAB-ban (R2024b) a Fuzzy Logic Designer alkalmazás segítségével megterveztünk egy fuzzy következtetési rendszert (FIS) így a tesztelést is el tudtuk végezni, illetve hangolni tudtuk a modellünk viselkedését. A felhasznált validációs mutatók és értelmezésük:

Rövidítés	Jelentés	Értelmezés
N = Sample size	minta száma	A vizsgált minták (szenzoradatok, esetek) száma összesen
TP = True Positive	igaz pozitív	A modell helyesen riasztott, amikor tényleg volt kockázat
TN = True Negative	igaz negatív	A modell helyesen nem riasztott, mert nem volt veszély
FP = False Positive	hamis pozitív	A modell tévesen riasztott, pedig nem volt veszély
FN = False Negative	hamis negatív	A modell nem riasztott, pedig kellett volna

2. táblázat: A mutatók értelmezése, saját szerkesztés

Mutató neve	Jelentés	Képlet	Jelentőség
Találati arány (TPR)	A modell helyesen azonosította a valós kockázatos eseteket	$\frac{TP}{TP + FN}$	Mennyire érzékeny a modell
Fals pozitív arány (FPR)	A modell akkor is riasztott, amikor nem kellett volna	$\frac{FP}{FP + TN}$	Mennyire stabil, kerül a vakriasztást
Fedezet (Coverage)	A modell hány mintát ítélt kritikusnak az összesből	$\frac{TP + FP}{N}$	Az érzékelési aktivitás mértéke
Biztonsági érzékenységi index (SSI)	A kockázatos minták hány százalékát azonosítja hatékonyan	$\frac{TP}{TP + FP + FN}$	Kombinált hatékonysági mutató

3. táblázat: Validációs mutatók számítása és értelmezése, saját szerkesztés

Szimulációs eredményeink 1000 mintára

N - összes minta száma		1000
Összes pozitív minta - valóban veszélyes		344
Összes negatív minta - valóban biztonságos		656
TP	helyes riasztás, valódi veszély	330
TN	helyesen, nem riasztott	625
FP	téves riasztás, nem volt kockázat	31
FN	veszélyes esetek száma, a modell nem érzékelte	14
TPR	A valós veszélyek 96%-át detektálta a modell	0,959
FPR	A modell 10-szer tévesen riasztott	0,047
Coverage	Az esetek 36,1%-ra adott valamilyen riasztást.	0,361
SSI	A modell megbízhatóan és biztonságosan működik, a legtöbb valódi veszélyt képes volt azonosítani, kevés fals riasztással.	0,880

4. táblázat: MATLAB-szimulációs eredményeink, saját szerkesztés

Következtetések

- A riasztások nem túlérzékenyek: a rendszer nem riaszt minden magas nyomásra vagy nagy áramlásra.
- A fuzzy logika érzékeny a kombinációkra, különösen határérték közeli sávokra, ezáltal a modell:
 - korán jelzi a veszélyt, mielőtt a fizikai állapot kritikussá válna,
 - de nem túl gyakran, tehát nincs riasztási infláció.

A TSK-FUZZY ALKALMAZÁSA A TESZTMODELLEN

Egyszerű megoldás: IF Nyomás IS Magas AND Áramlás IS Alacsony AND GCS2 IS Zárt THEN Kockázat = $a_1 \cdot \text{Nyomás} + a_2 \cdot \text{Áramlás} + a_3 \cdot \text{Szelepállapot} + \text{Konstans}$

Anómia detektálással: IF Nyomás IS Magas AND Áramlás IS Alacsony AND GCS2 IS Zárt THEN Kockázat = $a_1 \cdot \text{Nyomás} + a_2 \cdot \text{Áramlás} + a_3 \cdot \text{Szelepállapot} + a_4 \cdot \text{1anómális} + \text{Konstans}$

Bemenetek

Az újdonság a Mamdani–fuzzyhoz képest, hogy itt megjelenik három bemeneti változó (x_1, x_2, x_3), majd a logikai blokk belsejében megtörténik a súlyokkal kombinált lineáris egyenlet kiszámítása. Az egyenlet eredménye pedig egy szám, szemben a Mamdani-fuzzy esetével, ahol egy szöveges eredmény van, amit ahhoz, hogy számot kapjunk még további műveletek (aggregáció és defuzzifikáció) szükségesek.

Bemenetek	Jellemző	Paraméter
x_1	Nyomás (bar)	normál (37-43)
x_2	Áramlás	hiányos/normál/túlzott
x_3	GCS2 - szelep	0: zárt, 1: nyitott

5. táblázat: A TSK-fuzzy paraméterei, saját szerkesztés

Súlyozás

A fuzzy logikán alapuló döntéstámogató rendszerek (különösen igaz ez a Takagi–Sugeno–Kang (TSK) típusú fuzzy modellekre) gyakorlati alkalmazása során a legnagyobb kihívást a súlyparaméterek meghatározása jelenti. Mivel minden fuzzy szabályhoz külön lineáris következmény-egyenlet tartozik, amelyben a bemeneti változókhoz súlyokat (pl.: $a_1, a_2, \dots, a_n$) és egy konstans tagot (b) kell rendelni, a teljes modell paramétereinek száma drámaian megnő a bemeneti dimenziók számának növekedésével. Egy tíz bemenetet tartalmazó rendszer, három-három fuzzy taggal változónként, már több mint ötvenezer szabály kombinációját igényli, ami közel hétszáz ezer súlyérték manuális beállítását jelentené. Ez gyakorlati szempontból szinte kivitelezhetetlen, különösen valós ipari környezetben, ahol a rendszer működése nem tesz lehetővé azonnali visszacsatolást az egyes súlyok hatásáról, és a döntési következmények akár csak hónapokkal vagy évekkel később jelentkezhetnek.

Nehezíti a helyzetet, hogy a bemeneti változók közötti hatások nem lineárisak, azaz a nyomás súlya például az áramlás és a szelepállapot függvényében más és más módon befolyásolja a kockázati szintet. Ilyen esetekben a szakértői intuíció, bár hasznos a szabályrendszer alapvázának kidolgozásában, nem alkalmas nagy dimenziójú rendszerek súlyainak precíz és optimalizált meghatározására. Emellett az ipari alkalmazásokban gyakran több – egymással „versengő” célkitűzésnek kell egyidejűleg megfelelni (pl.: magas találati arány,

alacsony fals pozitív arány, nagy érzékenység és üzemi stabilitás), melyek kézi beállítással nem hozhatók egyensúlyba.

Kutatási modellünkben, a kezdeti súlyokat ember állíthatja be, mely korrigálható, finomhangolható, de távlati szinten ezt a feladatot egy géptanulási-algoritmus tanítja be a rendszernek, egy olyan optimalizációs módszer segítségével, ami a predikciós hibára nézve végez el egy minimum-követelményű optimalizációt. A példa kedvéért mi most szemléltetjük a számítási folyamatot, az áramlás súlyának változtatásával, de a lenti táblázatban összefoglaljuk a súlyok mértékét és azok hatását.

Jellemző	Súlyozás	Hatás
Nyomás	+0,7	A pozitív előjel, növeli a kockázatot, egységnyi nyomásnövekedés, 0,7 egységnyi kockázatnövekedést okoz
Áramlás	-1,8 (túlsúlyozott állapot)	Ez negatív súly: ha nő az áramlás, csökken a kockázat. Magas áramlás esetén valószínű, hogy nincs torlódás, ezért nem alakul ki túlnyomás. A szám abszolút értéke nagy, mert az áramlás gyorsan kompenzálhatja a nyomást.
Szelepállapot	+ 0,8·(1 – GCS2)	zárt= 0, nyitott= 1, Ha zárt: (1 – GCS2): 1-0 = 1 → növeli a kockázatot, Ha nyitott: (1-GCS2): 1-1= 0 → csökkenti a kockázatot
Szivárgás	+1,2	Szivárgás detektálva, anomália detektálás aktív
Konstans	+8	A modellben (kritikus biztonság) arra törekedtünk, hogy semmilyen körülmények között ne adjon teljes biztonsági visszajelzést, s erre a konstans választása egy ideális lehetőség.

6. táblázat: TSK súlyozás és annak magyarázata, saját szerkesztés

ACS alkalmazásának indoklása

IF Nyomás IS Magas AND Áramlás IS Alacsony AND GCS2 IS Zárt THEN Kockázat = $0,7 \times x_1 - 1,8 \times x_2 + 0,8 \times (1 - x_3) + 1,2 \times 1 + 8$

Ha a nyomást ($x_1=53,7$ bar), az áramlást ($x_2=22,1$ kg/h) és a szelepeértéket ($x_3=0$) egy random, fix értéken tartjuk, a konstans értéke +8, akkor az egyenletek súlyozása és annak hatása könnyedén számítható. Az áramlás súlyát három állapot szerint változtatjuk, lesz egy

- túlsúlyozott → Kockázat1
- normál → Kockázat2
- végül egy alulsúlyozott áramlási paraméterünk → Kockázat3

$$Kockázat1 = 0,7 \times 53,7 - 1,8 \times 22,1 + 0,8 \times (1 - 0) + 1,2 \times 1 + 8 = 7,81$$

$$Kockázat2 = 0,7 \times 53,7 - 1 \times 22,1 + 0,8 \times (1 - 0) + 1,2 \times 1 + 8 = 25,49$$

$$Kockázat3 = 0,7 \times 53,7 - 0,2 \times 22,1 + 0,8 \times (1 - 0) + 1,2 \times 1 + 8 = 43,17$$

Súlyozás	Kockázat értéke	Jelentés
Túlsúlyozott áramlás: $a_2=-1,8$	7,81	Az áramlás negatív súlya nagyon erősen csökkenti a kockázati értéket → alacsony kockázat még veszélyes helyzetben is

Súlyozás	Kockázat értéke	Jelentés
Optimális súlyozású áramlás: $a_2=1$	25,49	Az áramlás és nyomás kiegyensúlyozott $\rightarrow$ életszerű kockázati szint
Alulsúlyozott áramlás: $a_2=0,2$	43,17	Az áramlás hatása túl gyenge $\rightarrow$ a modell túlságosan kockázatosnak ítélt szinte minden helyzetet, túlérzékenyvé válik.

7. táblázat: A súlyparaméterek megválasztásának hatása az eredményre, saját szerkesztés

Mindezek fényében belátható, hogy az ilyen fuzzy rendszerek hatékony és megbízható hangolásához automatizált optimalizálási módszerekre van szükség. Ilyen módszer például az ACS, amely képes valós vagy szintetikus generált adatok alapján iteratív módon javítani a szabályok és a hozzájuk tartozó súlyok teljesítményét. Ezen megközelítés a klasszikus kézi hangolással szemben nemcsak skálázható, hanem objektíven értékelhető is a validációs mutatók (TP, FP, FN, TN) alapján, így megbízható és prediktív megoldást nyújtanak.

Mamdani-fuzzy számítási lépések	TSK-fuzzy számítási lépések
1A - Fuzzifikáció, a bemeneti tagsági függvényekkel $\mu_{Magas}^{Nyomás}(x_1) \in [0,1]$ $\mu_{Alacsony}^{Áramlás}(x_2) \in [0,1]$	1B - Fuzzifikáció $\mu_i^{(1)}(x_1), \quad \mu_j^{(2)}(x_2)$
2A - Szabály aktiválás – minimum operátorra $\mu_{akt} = \min(\mu_{Magas}(x_1), \mu_{Alacsony}(x_2))$	2B - Szabály aktiválás, szabály erőssége: $w_k = y_i^{(1)}(x_1) \times y_j^{(2)}(x_2)$
3A - Kimeneti szabály leképzése pl.: Nagy kockázat	3B - Szabály kimenetének számítása: $z_k = a_1^{(k)}(x_1) + a_2^{(k)}(x_2) + c^{(k)}$
4A - Aggregáció, itt több szabály eredményét egyesítjük $\mu_{outp(y)} = \max(\mu_1(y_1), \mu_2(y_2) \dots)$	4B - Súlyozott átlag képzése: $y^* = \frac{\sum_{k=1}^N w_k \times z_k}{\sum_{k=1}^N w_k}$
5A - Defuzzifikáció, pl. súlyozott középpont. $y^* = \frac{\int y \times \mu_{outp(y)} dy}{\int \mu_{outp(y)} dy}$	

8. táblázat: Mamdani-fuzzy és TSK-fuzzy összehasonlítása, saját szerkesztés

SÚLYOK OPTIMALIZÁLÁSA AZ ON-LINE KOCKÁZATELEMZÉS

TSK-fuzzy fent bemutatott alkalmazása igényli a súlyparaméterek optimális megválasztását, ami lényegesen befolyásolja a rendszer hatékonyságát és a megbízhatóságát. A korábbi példákban is láthattuk, hogy bár egyetlen szabály szerkezete numerikusan kezelhető, egy valós rendszerben akár több száz bemeneti kombináció, és ezzel együtt több ezer

paraméter is jelen lehet. A súlyok kézi beállítása nemcsak, hogy szubjektív és időigényes, hanem skálázhatatlan is, és nem biztosítja a szabályok közötti optimalizált együttműködést. Ez különösen igaz, amikor a rendszer célja nemcsak a helyes kockázati előrejelzés, hanem a riasztási logika optimalizálása is (pl.: a fals pozitív (FP) riasztások számának csökkentése mellett a biztonsági érzékenység növelése).

Az ilyen összetett szabálytér automatikus optimalizálására az Ant Colony Optimization (ACO) vagy annak célzottabb változata, az Ant Colony System (ACS) algoritmus kiváló eszköznek bizonyul, melyet Shokouhifar [12] és Solukloei [8] munkáikban már igazoltak. Az ACS egy olyan metaheurisztikus keresési módszer, amely természetes kolóniák viselkedését imitálva képes hatékonyan felfedezni a szabálytér legjobb „útjait” vagyis a legideálisabb súlykombinációit. A TSK-fuzzy rendszerek esetén ez a módszer nem csupán a szabályok súlyainak finomhangolására alkalmazható, hanem akár az egész szabályhalmaz redundanciamentesítésére is használható. A TSK-fuzzy és az ACS együttes, komplex alkalmazásával, eredményként egy egységes, prediktíven is pontos és iparilag is adaptálható fuzzy modell jön létre. Az ACS-alapú optimalizálással nemcsak a számítási hatékonyság javítható, hanem a biztonságtechnikai és az operátori szintű döntéstámogatás is egységes és reprodukálható keretrendszerbe foglalható. Ennek a keretrendszernek az ACS-FORCE - Ant Colony System and Fuzzy Optimization for Real-time Critical Environments) nevet adtuk.

A TSK-fuzzy szabályrendszerünk implementálása az ACS optimalizáláshoz

Az ACS valójában egy sztochasztikus keresési algoritmus, melyet jellemzően kombinatorikus optimalizálási problémák megoldására használunk, további előnye, hogy a mérnöki gyakorlatban jól ismert gráfként modellezhető. A legismertebb kapcsolódó matematika kérdések, a Hamilton-út, a Hamilton-kör vagy az utazó ügynök (TSP - Travelling Salesman Problem) problémája [13].

Szakirodalomkutatásra támaszkodva, bemutattuk, hogy az Ant Colony System (ACS) algoritmus hatékonyan alkalmazható a TSK-fuzzy súlyparaméterek optimalizálására [12], [8]. Az ACS algoritmus a természetes hangyakolónia táplálékszerző viselkedését modellezi. A folyamat lényege, hogy a megoldási tér elemei közötti átmeneteket **feromonnyal** és **heurisztikus információk** vezérlik, amelyeket a „hangyák” lépésről lépésre frissítenek a megoldásépítés során. Kutatásunkban az ACS-t a TSK-fuzzy szabályok konzekvens súlyvektorainak és tagfüggvény-paramétereinek optimalizálására alkalmazzuk. A keresési tér egy irányított gráffal reprezentálható. A későbbiekben ennek részletes matematikai és algoritmikus leírását megadjuk, kitérve a gráfmodell felépítésére, a hangyák útvonalépítési szabályára és a feromonfrissítés lépéseire.

Modellünk TSK szabálya

$$Kockázat = a_1 \cdot Nyomás + a_2 \cdot Áramlás + a_3 \cdot Szelepállapot + a_4 \cdot I_{anomális} + Konstans$$

$$Kockázat = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot (1 - x_3) + a_4 \cdot anomália + b$$

$$y = \sum_{i=1}^n a_i x_i + b$$

x_i – bemeneti változók (pl.: nyomás, áramlás, szelepállapot)

$a_i \in \mathbb{R}$ – a tanulandó súly

$b_i \in \mathbb{R}$ – a konstans tag

y – a rendszer által becsült súly

$$W = \left\{ \vec{w}^{(r)} = [a_1^{(r)}, a_2^{(r)}, \dots, a_n^{(r)}, b^{(r)}] \right\}_{r=1}^R$$

W – optimális súlyhalmaz, ami maximalizálja a fuzzy rendszerünk teljesítményét

$\vec{w}^{(r)}$ – az r szabályhoz tartozó súlyvektor

$a_i^{(r)}$ – az r szabályhoz tartozó, i bemenet súlya

$b^{(r)}$ – az r szabályhoz tartozó, konstans tag

R – a szabályok összes száma

Az ACS alkalmazásának kettő fontos célja van, az egyik a súlyvektorok optimalizálás, a másik az összes szabály kombinációjának szűkítése, végeredményben a gyors számítás lehetővé tételé.

- az összes szabályhoz tartozó súlyvektor és konstans (a_1, a_2, a_3, a_4, b) optimalizálása, így minden szabályhoz tartozik egy súlyvektor,

$$\vec{w}^{(r)} = [a_1^{(r)}, a_2^{(r)}, \dots, a_n^{(r)}, b^{(r)}] \in \mathbb{R}^{n+1}$$

az összes szabály pedig együtt alkot egy teljes modell-leíró vektort, amely

$$W = [\vec{w}^{(1)}, \vec{w}^{(2)}, \dots, \vec{w}^{(R)}] \in \mathbb{R}^{n+1}$$

- az összes szabály kombinációjának szűkítése (redundáns, nem informatív szabályok kiszűrése, így a számítási folyamatok gyorsabbá tétele)

$$\text{A teljes súlytér: } \Omega \subset \mathbb{R}^{R(n+1)}, \rightarrow \Omega \subset \mathbb{R}^{18(4+1)} = \mathbb{R}^{90}$$

Ω – a megoldási tér

$\mathbb{R}$ – a valós számok halmaza, tehát az optimalizálás folytonos

R – a fuzzy szabályok száma a térben

n – a bemeneti változók száma (pl.: nyomás, áramlás, szelep)

$+1$ – a konstans tag

Ez azt jelenti, hogy egy hangya 90 paraméterből álló vektort épít, és ezt próbálja optimalizálni. A hangyák ebben a 90-dimenziós súlytérben mozognak, minden iterációban egy új súlykészletet generálnak, és a fuzzy modell ez alapján számolja a rendszerünk kockázat szintjét, majd a teljesítmény (pl. találati arány, hibaarány) visszacsatolásával a feromoneloszlás frissül.

A hangyák mozgása az élen a valószínűségi döntési szabály alapján

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

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)

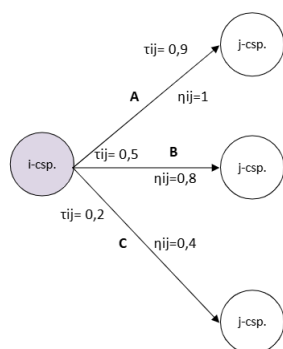
τ_{ij} – az adott paraméterértékhez tartozó feromonintenzitás

η_{ij} – heurisztikus érték, mennyire jó az $i \rightarrow j$ él azonnali szempontból

$$\eta_{ij} = \frac{1}{1 + \text{hiba}_{ij}}$$

$\alpha, \beta \in \mathbb{R}^+$ – súlyok a feromon és heurisztika között

N_i^k – a még látogatható csomópontok a k -adik hangya számára



Példa egy hangya mozgására, melyen látható, hogy a magas feromonszint és a jó heurisztika kombinációja dominál a döntést.

$$P_{ij} = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha \times [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_l [\tau_{il}]^\alpha \times [\eta_{il}]^\beta}$$

Él	Feromon	Heurisztika (β)	Valószínűség
A	0,9	1	71,9%: legvonzóbb
B	0,5	0,8	25,6% közepes
C	0,2	0,4	2,6% alig választott

Ha a heurisztika súlyát (β) változtatjuk és fokozzuk az erősséget, akkor a rendszer egyre inkább a „legjobb” (leginkább illeszkedő) opció felé húz, és a többi lehetőséget szinte kizárja. Ha β túl nagy, a rendszer korai konvergenciára hajlamos (nem próbál ki új lehetőségeket – túl „biztos”).
Feromon frissítés:

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho) \times \tau_{ij} + \rho \times \Delta \tau_{ij}^{best}$$

$$\Delta \tau_{ij}^{best} = \frac{Q}{f(\vec{w})_{best}}$$

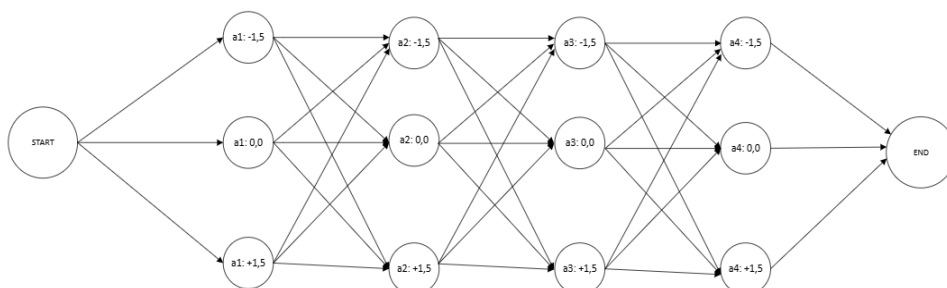
ρ – feromonpárolgási ráta $\rho \in (0,1)$

Q – konstans

az f_{best} – legjobb megoldás költsége (vagy fitness)

A súlyparaméterek optimalizálását gráf-reprezentációval végezzük, ahol:

- A csomópontok a fuzzy szabályok egy-egy súlyparaméterének lehetséges értékeit jelentik (például: -1,5; 0,0, +1,5)
- Az élek a lehetséges átmeneteket jelölik két egymást követő súlykomponens értékei között.
- Egy „hangya” teljes útvonala egy súlyvektor felépítésének felel meg $\vec{w} = [a_1, a_2, a_3]$



2. ábra: ACS - súlyválasztási optimalizációt bemutató gráf, saját szerkesztés

Ez a megközelítés lehetővé teszi, hogy az ACS hatékonyan feltérképezze a súlyvektor teljes keresési terét, miközben a feromonfrissítés adaptívan a jobb szabálykonfigurációk felé tereli a keresést, ezáltal javítva a fuzzy rendszer teljesítményét és konvergenciáját.

Definiált célfüggvényünk

$$f(\vec{w}) = \alpha \times TPR - \beta \times FPR + \gamma \times Coverage + \delta \times SSI$$

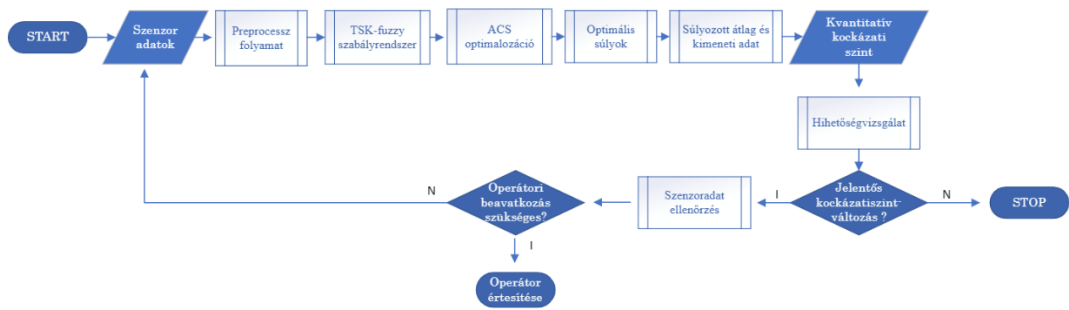
TPR, FPR, Coverage, SSI – a 3. táblázat alapján
 $\alpha, \beta, \gamma, \delta \in \mathbb{R}^+$ – súlytényezők

A legjobb súlykombinációkat tartalmazó szabályhalmaz az ACS-FORCE eredménye, így az prediktíven pontos, alacsony riasztási hibaráttával rendelkezik, adaptív a bemeneti tér változására és alkalmas a valós idejű alkalmazásra is

$$\vec{w}^* = \underset{\vec{w} \in \Omega}{arg\ max} f(\vec{w})$$

$\vec{w}^*$ – az optimális súlyvektor
 $arg\ max f(\vec{w})$ – maximalizálja az $f(\vec{w})$ értékét
 $\vec{w} \in \Omega$ - a keresési térben

Az ACS-FORCE folyamatábrája



3. ábra: Az ACS-FORCE egyszerűsített folyamatábrája, saját szerkesztés

Ahogy a 3. ábrán is látható, hogy az ACS-FORCE algoritmus elvégzi az automatikus szenzoradat-ellenőrzést, amennyiben a hihetőség vizsgálat jelentős eltérést talál. A visszacsatolással növelni tudjuk a modell megbízhatóságát.

Jellemző	csak TSK	ACS-FORCE eredmény
Találati arány (TPR)	0,959	0,96
Fals pozitív arány (FPR)	0,01	0,01
Fedezet (Coverage)	0,361	0,88
Biztonsági érzékenység (SSI)	0,88	0,91

9. táblázat: Szimulációs eredményeink, saját szerkesztés

Az ACS-FORCE automatikusan finomhangolta a szabályokhoz tartozó súlyvektorokat annak érdekében, hogy minimalizálja a fals riasztások arányát (FPR), miközben maximalizálja a predikciós érzékenységet (TPR) a valós lefedettség és az SSI értéket. Bár az önmagában használt TSK-fuzzy TPR és FPR szempontjából kiemelkedően pontos volt, a fedezet és az SSI alacsony értéken maradt, mely arra utal, hogy a modell a potenciálisan kockázatos állapotok jelentős részét nem aktiválja döntési szinten.

Ezzel szemben az ACS-FORCE képes a teljes bemeneti tér nagy részét lefedni. A szabályhalmaz több, eltérő fuzzy premisszát ölel fel, ezáltal a lefedett kockázati állapotok aránya drámaian megnő (88%), miközben a predikciós mutatók (TPR, FPR) is megtartják kiváló szintjüket.

Következtetések, javaslatok

A Mamdani-fuzzy rendszerek intuitív szabályformájuknak köszönhetően könnyen értelmezhetők, ugyanakkor gyakorlati korlátot jelent az aggregáció és a defuzzifikáció számítási összetettsége, különösen igaz ez nagyméretű szabályrendszerek esetén.

Megállapítottuk, hogy a Mamdani-fuzzy rendszerek nyelvi alapú kimeneteket generálnak, amelyeket defuzzifikációval kell numerikus értéké alakítani, ezzel szemben a TSK-fuzzy modellek lineáris vagy affin függvényeket alkalmaznak, így az egyes szabályok kimenete már eleve numerikus. Az aggregáció ebben az esetben egyszerű súlyozott átlagként számítható, a defuzzifikáció pedig a numerikus érték miatt teljes egészében szükségtelen. Ennek köszönhetően a TSK-fuzzy rendszerek lényegesen gyorsabban és alacsonyabb számítási igényel állítanak elő eredményeket (9. táblázat).

Mindezek alapján megállapítható, hogy a TSK-fuzzy modell egyértelműen előnyösebb választás a Mamdani-fuzzy modellel szemben olyan biztonságkritikus rendszerekben, ahol kvantitatív kockázatbecslésre és valós idejű prediktív döntéshozatalra van szükség. A valós idejű feldolgozás képessége lehetővé teszi a folyamatos és pontos kockázatszint-számítást online adatforrások felhasználásával (9. táblázat).

Tulajdonság	Mamdani-fuzzy	TSK-fuzzy
Szabálykimenet típusa	Nyelvi	Numerikus
Defuzzifikáció szükséges?	Igen	Nem
Kimeneti folytonosság	Diszkrét	Folytonos
A kimenet deriválható	Nem	Igen
Számítási idő (1000 minta)	1,2 másodperc	0,15 másodperc
Automatizálhatóság	Korlátozott	Teljes mértékben
Valós idejű alkalmazás	Korlátozott	Alkalmas

10. táblázat: Összefoglaló táblázat a Mamdani és TSK-fuzzy összehasonlítására

A TSK-fuzzy rendszer paramétereizhető súlystruktúrája lehetővé tette, hogy a modell érzékenyen reagáljon a bemeneti jellemzők változásaira, miközben fenntartotta az egyensúlyt a biztonsági érzékenység és a túlriasztási hajlam között. E tulajdonsága alkalmassá teszi olyan ipari környezetekben való alkalmazásra, ahol a sokváltozós, dinamikus változó üzemi állapotok folyamatos figyelése és a kockázati szintek megbízható becslése kulcsfontosságú.

A TSK-fuzzy rendszer előnyösen integrálható prediktív modellekbe, különösen akkor, ha a szabályegyenletek súlyparamétereit Ant Colony System (ACS) optimalizációval hangoljuk. E megközelítés a tesztheinkben növelte a prediktív pontosságot és robusztusságot, még zajos vagy részben hiányos bemeneti adatok esetén is. Szimulációs eredményeken keresztül igazoltuk a z ACS-FORCE létjogosultságát és számítási pontosságát (8. táblázat).

Az alacsony számítási igény és a gyorsan rendelkezésre álló numerikus eredmények révén az ACS-FORCE keretrendszer transzparenssé és auditálhatóvá teszi a kockázattertelési folyamatot, ami kiemelten fontos biztonságkritikus ipari rendszerek esetén.

Terveink a kutatási perspektíva szempontjából:

- a rendszer teljesítményének validálása nagyobb mintaszámú és több bemeneti változót tartalmazó adathalmazon, valamint egy bővített modellverzió megvalósítása, mely lehetővé teszi, hogy statisztikai elemzéseket, többek között konfidenciaintervallum becslését és a szignifikanciavizsgálatot is elvégezzük, amely lehetővé teszi a modell tudományos megbízhatóságának növelését,
- célunk annak vizsgálata, hogy a szintetikus adathalmazon túl lehetőség nyílhat-e valós szenzoradatok felhasználására, annak érdekében, hogy modellünket valós üzemi körülmények között validálhassuk.

ÖSSZEFOGLALÁS

Tudományos szempontból vizsgálva a kérdést, a TSK-fuzzy rendszerek számos területen előnyösebb megoldást nyújtanak a biztonságkritikus rendszerek modellezésére, különösen akkor, ha valós idejű (on-line) adatfeldolgozás a cél. A Mamdani-fuzzy rendszerek alapvető előnye, az emberi gondolkodást utánzó, szabályalapú nyelvi leírás, a gyakorlati implementáció során hátrányba fordul, mivel a defuzzifikáció és az aggregáció műveletei numerikus értelemben számításigényesek, és nehezen skálázhatók többváltozós, gyorsan változó rendszerek esetén. Ezzel szemben a TSK-fuzzy modellek alacsony számítási komplexitásuk és folytonos, determinisztikus kimenetük révén lehetővé teszik, hogy a bemeneti adatok alapján közvetlenül numerikus kockázati szintet számítsunk, anélkül, hogy szükség lenne a klasszikus fuzzy rendszerekre jellemző defuzzifikációs lépésekre. Cikkünkben igazoltuk a TSK-fuzzyhoz kapcsolódóan az ACS szükségességét és a definiált validációs mutatók segítségével rámutattunk az ACS-FORCE algoritmusunk előnyös és hatékony működésére.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Dr. Galambos P. és Dr. Fekete I, Kockázatelemzés lépésről lépésre. ISBN:963 86905 0 X, ETK Szolgáltató Zrt., Budapest
- [2] International Organization for Standardization, „ISO 31000:2018: Risk management — Guidelines, (Edition 2, 2018)”, 2018.
- [3] International Organization for Standardization, "ISO/IEC 31010: Risk management – Risk assessment techniques", 2019.
- [4] SafetyCulture, "HAZOP (Hazard and Operability Study)", [Online]. Elérhető: <https://safetyculture.com/topics/hazop/>. [megtekintve: 2024.03.01.].
- [5] International Electrotechnical Commission, "IEC 61882: Hazard and operability studies (HAZOP studies) – Application guide", 2016.
- [6] 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.
- [7] Z. Li and J. Zhao, "HAZOPCT: A HAZOP analysis completeness tool based on knowledge graph reasoning," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 178, 2025, Art. no. 107025, doi: 10.1016/j.psep.2025.107025.
- [8] 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.
- [9] I. Szén, „Hidrogénbiztonság: Balesetek kvantitatív elemzése és biztonságközpontú, új tervezési módszerek fejlesztése” in XXXIX. Kandó Konferencia 2023, G. Molnár, Zs. Temesvári, and T. Wühl, Budapest, Hungary: Óbudai Egyetem, 2024, pp. 44–49.
- [10] 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: Kiadvány kötet, T. Wühl, Ed. Budapest, Hungary: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, 2024, pp. 92–97.
- [11] I. Szén, "Hidrogén-energetika 1. rész, Energiatárolási célok és lehetőségek, a hidrogén értéklánc," *Elektrotechnika*, vol. 116, no. 9–10, pp. 28–32, Magyar Elektrotechnikai Egyesület, Budapest, 2023.
- [12] M. Shokouhifar „FH-ACO: Fuzzy heuristic-based ant colony optimization for joint virtual network function placement and routing” *Applied Soft Computing*, Volume 107, August 2021, 107401, doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107401
- [13] C. Blum, „Ant colony optimization: A bibliometric review” *Physics of Life Reviews*, Volume 51, December 2024, Pages 87-95, doi.org/10.1016/j.plprev.2024.09.014
- [14] H. Belyadi, A. Haghighat, and T. A. Al-Quraishi, „*Machine Learning Guide for Oil and Gas Using Python: A Step-by-Step Breakdown with Data, Algorithms, Codes, and Applications*, Gulf Professional Publishing, 2021. doi: 10.1016/C2019-0-03617-5. (ISBN: 978-0-12-821929-4)
- [15] Bükkábrányi Energiapark, *Bükkábrányi Energiapark*. [Online]. Elérhető: <https://buk-kabranyienergiapark.hu/> [megtekintés dátuma: 2025. ápr. 20.]
- [16] J. Isimite and P. Rubini, "A dynamic HAZOP case study using the Texas City refinery explosion," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 40, pp. 496–501, Mar. 2016.
- [17] S. Silvianita, M. F. Khamidi, I. Rochani, and D. Chamelia, "Hazard and Operability Analysis (HAZOP) of Mobile Mooring System," *Procedia Earth Planet. Sci.*, vol. 14, pp. 208–212, Dec. 2015. doi: 10.1016/j.proeps.2015.07.103.
- [18] J. Ahn and D. Chang, "Fuzzy-based HAZOP study for process industry," *J. Hazard. Mater.*, vol. 317, pp. 303–311, 2016. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.05.096.
- [19] 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," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 44, pp. 44–52, 2016. doi: 10.1016/j.jlp.2016.08.019.
- [20] 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 Saf. Environ. Prot.*, vol. 144, pp. 310–321, 2020. doi: 10.1016/j.psep.2020.07.034.
- [21] 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.
- [22] 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," presented at the *9th Int. Conf. Hydrogen Safety (ICHS*

- 2021), Edinburgh, UK, Sept. 21–23, 2021. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/79598.pdf>
- [23] Oxford Institute for Energy Studies, "Review of Hydrogen Leakage along the Supply Chain," *Energy Transition*, no. ET41, Nov. 2024. [Online]. Elérhető: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2024/11/ET41-Review-of-Hydrogen-Leakage-along-the-Supply-Chain.pdf>
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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