



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

Nyilvános védés teljes bizottsága:

Elnök:

Prof. Dr. Berek Lajos

Titkár:

Dr. Ószi Arnold

Tagok:

Dr. Puskás Béla

Dr. Varga Péter János

Dr. Jobbágy Szabolcs

Bírálok:

Prof. Dr. Berek Tamás

Dr. Horváth Richárd

Nyilvános védés időpontja:

2026.

**D12) NYILATKOZAT A MUNKA ÖNÁLLÓSÁGÁRÓL, IRODALMI FORRÁSOK
MEGFELELŐ MÓDON TÖRTÉNT IDÉZÉSÉRŐL**

NYILATKOZAT

**A MUNKA ÖNÁLLÓSÁGÁRÓL, IRODALMI FORRÁSOK
MEGFELELŐ MÓDON TÖRTÉNT IDÉZÉSÉRŐL**

Alulírott Szén István kijelentem, hogy „Hidrogénbiztonság proaktív és reaktív szemléletben” című benyújtott doktori értekezést magam készítettem, és abban csak az irodalmi hivatkozások listáján megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, a forrás megadásával egyértelműen megjelöltem.

Budapest, 2025. december 12.



alíírás

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	7
A tudományos probléma megfogalmazása	9
Célkitűzések.....	11
A téma kutatásának hipotézisei.....	12
Kutatási módszerek.....	13
Az értekezés felépítése.....	14
1 A KUTATÁS ELMÉLETI ÉS FOGALMI KERETEI.....	15
1.1 Releváns biztonságtechnikai alapfogalmak meghatározása.....	15
1.1.1 Veszélyek a hidrogénnel kapcsolatban	17
1.1.2 Hidrogénipari-incidensek kvantitatív elemzése.....	17
1.1.3 A HAZOP meghatározó pozíciója a hidrogéniparban	18
1.2 A HAZOP alapjai	20
1.3 A fuzzy logika és a bioinspirált algoritmusok alapjai	22
1.4 Összefoglalás: On-line kockázatértékelő rendszerek követelményei	25
2 FUZZY - HAZOP LEHETŐSÉGEK ÉS KORLÁTOK.....	26
2.1 A HAZOP-ot bemutató hidrogéntechnológiai modell és annak határai	26
2.2 A HAZOP és a fuzzy logika kombinálása	28
2.2.1 Egy új, TSK-fuzzy alapú, modell megalkotásának indoklása	29
2.3 A kisnyomású, HAZOP-modell, MAMDANI megközelítéssel	30
2.3.1 A tartálymodell továbbfejlesztése.....	32
2.3.2 Szintetikus adatok, a 10 DataSet és a tesztkörnyezet definiálása	35
2.3.3 A validáció minőségi mutatói.	37
2.3.4 A Mamdani FIS-el felépített modellem eredményei	39
2.3.5 A Mamdani-HAZOP eredményeinek összefoglalása:	44
2.4 A kisnyomású, HAZOP tartálymodell, TSK megközelítéssel	45
2.4.1 Fuzzy rendszerek koncepcionális és alkalmazásbeli összehasonlítása.....	45
2.4.2 A Mamdani- és TSK-fuzzy közötti strukturális megfeleltetés	47
2.4.3 A TSK-fuzzy implementálása a Mamdani-HAZOP modellre.....	48

2.4.4	A TSK konzekvens tagjában szereplő súlyparaméterek beállítása.....	50
2.4.5	Konzekvens tagok paraméterérzékenységi próbája	51
2.4.6	A TSK-alapú HAZOP modell felépítése a MATLAB-ban	54
2.4.7	Összefoglalás: A TSK alapú HAZOP eredményeinek bemutatása	54
2.4.8	Kiegészítő vizsgálat (számítási idő) és konklúzió	61
3.	BIOINSPIRÁLT ALGORITMUSOK INTEGRÁLÁSA	65
3.1	A proaktív védelem és az ACS-FORCE keretrendszer.....	65
3.2	Az ACS alapjai, biológiától az utazó ügynök problémájáig.....	66
3.3	Az ACS integrálása a TSK-alapú HAZOP-ba	67
3.3.1	Az ACS alkalmazásának célkitűzései.....	68
3.3.2	A hangyák kollektív viselkedésének alapja	70
3.4	A célfüggvény súlyozási stratégiáinak gyakorlati jelentősége.....	74
3.4.1	Súlytényezők értelmezése és hatása az optimalizációra	74
3.4.2	Üzemeltetési stratégiák a súlytényezők függvényében	75
3.5	A TSK és ACS integrációja	76
3.5.1	A súlyozás komplex szerepköre a TSK-ACS hibrid HAZOP-ban.....	77
3.5.2	Manuális számítási példa egy adatszoporton.....	77
3.6	Az integrált, TSK-ACS eredményeinek bemutatása.....	80
3.6.1	Az értékelési metodika: inkrementális felépítésű, komparatív elemzés ...	81
3.6.2	Az ACS kolónia-teljesítménye	82
3.6.3	Összefoglalás (A TSK és a TSK+ACS)	84
4	ÚJ ESEMÉNYOSZTÁLYOZÁSI KERETRENDSZER	87
4.1	A meglévő eseményosztályozási rendszerek korlátai	87
4.2	Kutatási módszertan és a validációs eljárások	91
4.2.1	Hiányos, hidrogénspecifikus kockázati dimenziók	91
4.2.2	Modellalkotással kapcsolatos alapkövetelmények	92
4.2.3	A használatban lévő osztályozási rendszerek hiányosságai	92
4.2.4	Validációs eljárások.....	93
4.3	A HISI-modell alapjai	93
4.3.1	A modell alkalmazási köre	93
4.3.2	A HISI-modell koncepcionális kidolgozása és dimenziói.....	94

4.3.3	A HISI-skála szintjeinek formális definíciói és a logikai alapelvek.....	96
4.4	A HISI-skála pontozási rendszere.....	96
4.5	A HISI-empirikus validációja	97
4.5.1	Alkalmazott adatforrások és esettanulmányok	97
4.5.2	Rövid esetösszefoglalók	98
4.5.3	Esetek besorolása a HISI-skála alapján	100
4.5.4	Megbízhatóságot vizsgáló eljárások - bevezetés.	101
4.5.5	Konzisztenciaanalízis kvalitatív módon	101
4.5.6	Konzisztenciaanalízis kvantitatív módon: Cronbach- α mutató	104
4.5.7	Érzékenységvizsgálat.....	109
4.6	Összefoglalás.....	111
	Új tudományos eredmények:.....	112
	Ajánlások	114
	IRODALOMJEGYZÉK	115
	TÉZISPONTOKHOZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK.....	128
	RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK.....	129
	TÁBLÁZATJEGYZÉK.....	131
	ÁBRAJEGYZÉK.....	132
	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	135

BEVEZETÉS

*„Soha nem tudsz megváltoztatni dolgokat az által, hogy harcolsz a létező valóság ellen.
Hogy megváltoztass valamit, építs egy új modellt, ami elavulttá teszi a már létezőt.”*

Richard Buckminster Fuller

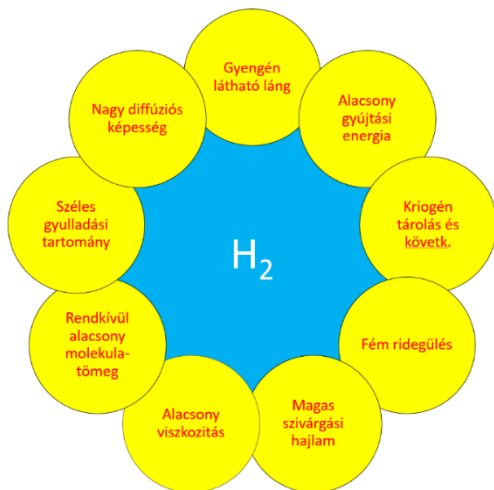
Magánemberként mélyen elkötelezett vagyok a környezetvédelem mellett, amely számomra etikai kérdés és a jövő generációi iránti felelősség is. Ez a belső motiváció szorosan összefonódik az energetikai rendszerek biztonságos és fenntartható működésének kutatásával, különösen ott, ahol a technológiai innováció és a környezeti fenntarthatóság egyaránt meghatározó. A klímaváltozás mérséklésének egyik kulcseleme az energiaforrás-összetétel optimalizálása. A lignit, szén és kőolajszármazékok égetése jelentős üvegházhatású gáz- és toxikusrészeszecske-kibocsátással jár [1][2], ami a globális felmelegedést fokozza, miközben súlyos egészségügyi és társadalmi terheket is okoz [3][4][5]. A fosszilis alapú energiatermelés, a gazdaság energiafüggősége, a geopolitikai feszültségek és az ellátási láncok sérülékenysége mind rávilágítanak energiarendszereink törékenységére.

A 21. század energetikai átmenetének meghatározó eleme a hidrogén. Az EU, valamint számos nemzeti kormány - köztük Magyarország kormánya is - a szén-dioxid-kibocsátás csökkentése érdekében kiemelt célként kezeli a hidrogéntekológia bevezetését. A hidrogén kulcsszerepet játszik az elektrifikációban, az energiaszektorok összekapcsolásában és a környezetvédelemben, továbbá a szezonális energiátárolásra és rugalmas villamosenergia-szabályozásra is alkalmas. Felhasználása ipari folyamatokban, közlekedésben és hőtermelésben egyaránt lehetséges. A zöld- és kékhidrogén előállítása, valamint alkalmazása új technológiai infrastruktúrát és ellátási láncokat igényel, ugyanakkor növeli a biztonságtechnikai kockázatok jelentőségét. A hidrogén sajátos fizikai és kémiai tulajdonságai - kis molekulatömeg, magas diffúziós képesség, széles gyulladási tartomány, nehezen észlelhető láng - egyedi kihívásokat támasztanak a tervezés és a kockázatértékelés területén. Kutatásomban kiemelt figyelmet fordítottam a hidrogéntekológia biztonságos üzemeltetéséhez szükséges mérnöki, szabályozási és infrastrukturális feltételek feltárására, amelyek alapvetőek a technológia széleskörű, rendszerszintű integrációjához.

A téma aktualitása

A fent említett környezeti terhek csökkentésének egyik mérföldköve az Európai Zöld Megállapodás, amelyet az EU 2019-ben mutatott be. Ez az elmúlt évtized egyik legátfogóbb politikai, gazdasági és társadalmi stratégiája, amely meghatározza a 2020-2050 közötti időszakot, fő célja pedig az EU klímasemlegessége 2050-re. A program nemcsak a szén-dioxid-kibocsátás csökkentésére, hanem átfogó gazdasági és társadalmi átalakulásra is irányul, kiemelve a fenntartható növekedést, az erőforrás-hatékonyt és a biodiverzitás védelmét [6]. A célok elérését uniós és nemzeti kvóták, részfeladatok segítik. Magyarország egyik legfontosabb releváns dokumentuma a Nemzeti Energia- és Klímaterv (NEKT), melynek legújabb változatát a Kormány 2024. október 16-án nyújtotta be az Európai Bizottságnak [7]. A terv szerint 2030-ra a megújulók részaránya eléri a 30%-ot, a naperőművi kapacitás pedig 12 000 MW-ot. A gyorsan bővülő PV-kapacitások a kedvező hatások mellett a villamosenergia-hálózatban stabilitási, frekvencia- és feszültségtartási problémákat, valamint fokozódó piaci volatilitást is okoznak. A villamosenergia-piaci árak egyre gyakrabban ingadoznak, dinamikusan és kiszámíthatatlanul változnak, nő a szórásuk, s ezzel párhuzamosan csökken az energiabiztonság. A kedvezőtlen hatások mérsékléséhez elengedhetetlen az energiátárolás rendszerszintű integrációja, szabályozási szolgáltatásokba való bevonása és technológiai skálázhatósága.

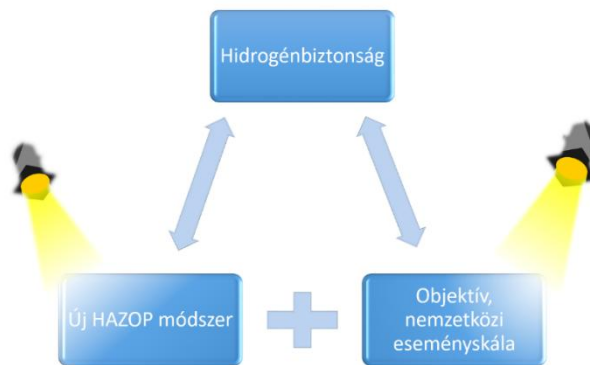
Az energiátárolás ígéretes módszere a hidrogén energiahordozóként való alkalmazása. Elektrolízissel előállítva lehetővé teszi a megújulók időszakos túlermelésének hosszú távú tárolását, ami különösen fontos a szezonális energiátárolás szempontjából, ahol a kereslet és a kínálat időben eltér [8][9][10][11]. A hidrogén emellett közvetlenül is hasznosítható az iparban és a közlekedésben, hozzájárulva e szektorok dekarbonizációjához. A nagy hatótávú közúti, dízelüzemű vasúti és kőolajszármazék-alapú tengeri szállítás jelentős hidrogénfelhasználási potenciált kínál, ami mérsékelheti a szektor karbonlábnyomát [12][13]. A nehezen elektrifikálható ágazatokban, például acélgyártás, vegyipar, cementipar, a hidrogént redukálószerként vagy nagy hőmérsékletű tüzelőanyagként alkalmazhatja, jelentősen mérsékelve a szén-dioxid-kibocsátást [14][15]. A hidrogénre épülő technológiák integrációja így kulcsszerepet játszhat az EU 2050-es klímasemlegességi céljainak elérésében. Ugyanakkor a hidrogén számos biztonságtechnikai kihívást is felvet, amelyek kezelése elengedhetetlen a technológia széles körű, és társadalmilag is elfogadott alkalmazásához.



1. ábra: A hidrogén biztonsági kihívásai (saját szerkesztés)

A hidrogén fizikai és kémiai tulajdonságai sajátos kockázatokat hordoznak. Rendszerszintű nehézséget jelent az infrastruktúra (pl.: a nagy nyomású tároló- és töltőállomások) kialakítása, miközben a szabályozási és szabványosítási keretek gyakran elmaradnak a technológiai fejlődéstől. A lakossági és ipari biztonságérzet, valamint a kockázatpercepció szintén meghatározó a társadalmi elfogadásban, különösen igaz ez a városi környezetben [16][17][18][19].

A biztonságtechnikai kihívások megfelelő mérnöki és szabályozói válaszokkal kezelhetők, de ehhez elengedhetetlen az on-line módszerekkel támogatott, szubjektivitást csökkentő kockázatelemzés. Hidrogénipari balesetek esetén javasolt egy objektív eseményskála, amely elősegítené a tanulási folyamatokat és a tapasztalatcserét.



2. ábra: Kutatási területem fókuszai (saját szerkesztés)

A tudományos probléma megfogalmazása

A hidrogénrendszerek elterjedésével új biztonsági kihívások jelentek meg, amelyek több ponton eltérnek a hagyományos energiahordozók kockázataitól. Rendkívül alacsony gyulladási energiája (0,017 mJ), széles gyulladási tartománya (4-75% V/V), nagy diffúziós képessége és szabad szemmel alig látható lángja olyan kockázati profilt eredményez, amelyhez a hagyományos kockázatelemző módszerek csak korlátozottan illeszkednek. Továbbá a hidrogéntekológiák új szerelelemeket (pl.: 350-700 bar-os kompresszorok, PEM tüzelőanyagcellák, PEM/AEM elektronizálók) integrálnak, amelyek dinamikus kölcsönhatásai, komplexebb biztonsági megközelítést igényelnek.

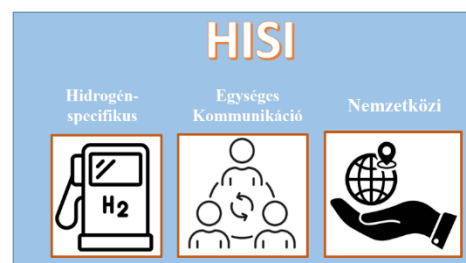
A **HAZOP** (Hazard and Operability Study) a folyamatbiztonsági elemzések egyik legelterjedtebb módszere, azonban statikus (tervezési szakaszban, off-line) jellege miatt

nem alkalmas a rendszerek működés közbeni értékelésére. A HAZOP-eljárás nagymértékben támaszkodik a szakértői csoportok szubjektív értékeléseire. Indokolt lenne a módszer fejlesztése, különösen az adatalapú, IoT világban, ahol a valós idejű monitoring, a nagy adatállományok elemzése és a mesterséges intelligencia eszközei lehetőséget teremthetnek a HAZOP dinamikus és adaptív alkalmazására. A hidrogén esetében, ahol a körülmények gyorsan és nehezen kiszámítható módon változhatnak, különösen fontos a valós idejű, szubjektivitás-csökkentett, adatvezérelt biztonsági elemzés és gyors döntés-beavatkozás. (részletesebb kifejtés az 1.2 fejezetben található).

Jelenleg még kihívást jelent a hidrogénnel kapcsolatos biztonsági események osztályozása és azok összehasonlíthatósága. A meglévő skálarendszerek, mint például az INES (nukleáris) vagy ARAMIS (vegyipari), nem alkalmazhatók a



4. ábra: Az intelligens HAZOP (iHAZOP) legfontosabb elemei (saját szerkesztés).



3. ábra: A Hydrogen Incident Severity Indicator (HISI) fontosabb elemei (saját szerkesztés).

hidrogéntechnológiákra. Meglátásom szerint kívánatos lenne egy egységes, kvantitatív és kvalitatív besorolási keretrendszer, mely támogatja az adatalapú, kooperatív tanulást és a globális kockázatsökkentési stratégiák hatékony kialakítását.

Disszertációm 2. és 3. fejezetében a HAZOP módszertan fejlesztése érdekében végzett kutatási eredményeim mutatom be

A disszertációm 4. fejezetében pedig egy új, egységes eseményskálát definiálok és validációs eljárásokkal bizonyítom annak elméleti és gyakorlati használhatóságát.

Összefoglalva: A hidrogéntechnológiák terjedése új biztonsági kihívásokat eredményez, amelyek a kockázatelemző módszerek felülvizsgálatát teszik szükségessé. A HAZOP korlátai és a hidrogénspecifikus veszélyek összetettsége indokolja egy valós idejű, adatvezérelt megközelítés kialakítását, míg a megfelelő incidensskála hiánya nehezíti a kockázati szintek objektív értékelését és kommunikációját.

Célkitűzések

- C1:** Célom egy valós idejű, HAZOP-alapú kockázatértékelési keretrendszer kidolgozása hidrogéntechnológiai 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) hidrogéntechnológiai 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.

A téma kutatásának hipotézisei

Értekezésemben a következő hipotézisekből indulok ki.

- H1:** Feltételezem, hogy a TSK-fuzzy logikán alapuló HAZOP-modell megbízhatóbb, gyorsabb kockázatdetektálást biztosít hidrogéntechnológiai alkalmazásokban, mint a Mamdani-fuzzy logikán alapuló HAZOP-modell.
- H2:** Feltételezem, hogy egy TSK-fuzzyval támogatott HAZOP-rendszer bioinspirált optimalizációval kiegészítve hatékonyabban képes csökkenteni a szakértői szubjektivitást azáltal, hogy súly- és szabályrendszer-optimalizáció révén javítja a modell konzisztenciáját és növeli számítási sebességét. Mindez alkalmas alapot teremt a valós idejű kockázatértékelés megvalósításához.
- H3:** Feltételezem, hogy a jelenlegi ipari baleset-minősítési rendszerek nem alkalmasak a hidrogénipari objektumok következményalapú, hidrogénspecifikus minősítésére, ezért szükséges egy új, multidimenziós skálaszerkezetet alkotni.
- H4:** Feltételezem, hogy az általam kidolgozott HISI-modell konzisztens, stabil és érzékeny kategorizálást biztosít hidrogénipari incidensek elemzése során. Tehát azonos nagyságrendű következményekhez azonos súlyossági szinteket rendel, a határértékek mentén megfelelő érzékenységgel reagál, és mindezen túl iparágfüggetlenül alkalmazható minden olyan biztonsági esemény osztályozására, ahol a hidrogén meghatározó szerepet játszik az előállítás, feldolgozás, szállítás vagy felhasználás bármely környezetében.

Kutatási módszerek

Kutatásomat interdiszciplináris megközelítésben végeztem, melynek 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 az Elsevier tudományos adatbázisára, szakkönyvekre, előadásokra és releváns médiatartalmakra épült. Az elemzésekhez nyilvánosan elérhető, hiteles adatbázisokat használtam, az empirikus komponens pedig saját megfigyelésekkel és analitikus értelmezésekkel egészült ki.

A **proaktív módszertani keret** kialakításában a nemzetközi szakirodalom áttekintése és a modellalkotási stratégia meghatározása után a Mamdani- és a TSK-típusú fuzzy rendszerek hidrogéntechnológiai alkalmazhatóságát vizsgáltam. A modellezés MATLAB-környezetben zajlott, szintetikus adatgenerálással és részletes, alapos tagsági függvény-paraméterezéssel. A célok alapján kedvezőbb modell, a TSK-fuzzy továbbfejlesztését egy bioinspirált optimalizációs elem, az Ant Colony System (ACS) integrálása tette lehetővé, amely dinamikusan hangolta a fuzzy súlyparamétereket és a szabályokat. Az így létrehozott ACS-FORCE keretrendszer alapot nyújt a real-time fuzzy-alapú HAZOP-elemzések megvalósításához. A fuzzy modellek teljesítményét többdimenziós értékelési rendszerrel vizsgáltam (konfúziós mátrix, kockázatdetektálási arányszámok), kiegészítve leíró statisztikai mutatókkal, páros t-próbával és inkrementális elemzéssel.

A **reaktív módszertani megközelítés** kialakítása szisztematikus, nemzetközi szakirodalmi áttekintésre és annak kritikai értékelésére épült, amely alapján feltártam a meglévő iparbiztonsági 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 (empirikus validáció) és kvantitatív módszerekkel történt, Cronbach- α mutatóval, valamint egyváltozós érzékenységvizsgálattal (One-At-a-Time, OAT). A két megközelítés összehangolt elemzése biztosította, hogy a HISI-skála módszertanilag megalapozott, robusztus és gyakorlatban alkalmazható eszközként illeszkedjen a hidrogénbiztonsági értékelések rendszerébe.

Az értekezés felépítése

A **Bevezetés** fejezetben megfogalmazom a kutatás alapját képező tudományos problémát, annak aktualitását, valamint a kapcsolódó kutatási célkitűzéseket. Ismertetem továbbá a dolgozatban vizsgált hipotéziseket, és áttekintést adok a kutatás módszertani kereteiről.

Az értekezés szerkezete egymásra épülő lépésekben vezeti végig az olvasót az elméleti megalapozástól a gyakorlati alkalmazásig.

- **Az 1. fejezet** az elméleti alapfogalmak és a kutatás kereteinek összefoglalását tartalmazza. Ez a fejezet teremti meg azt a tudományos háttérrel, amelyre a későbbi modellalkotás épül.
- **A 2. fejezet (H1-T1)** a HAZOP-fuzzy integráció lehetőségeire fókuszál. Itt kerülnek bemutatásra a Mamdani- és TSK-fuzzy rendszerek, valamint azok összehasonlító vizsgálata és validációja.
- **A 3. fejezet (H2-T2)** a TSK-fuzzy modellhez kapcsolódó metaheurisztikus optimalizációra koncentrál, különös tekintettel az általam kidolgozott ACS-FORCE keretrendszerre.
- **A 4. fejezet (H3 és H4 – T3 és T4)** középpontjában az új, általam megalkotott HISI-skála áll, amely a hidrogéntechnológiai incidensek objektív és hidrogénspecifikus osztályozását célozza.

Az értekezés logikai felépítése így egy proaktív (2-3. fejezet) és reaktív (4. fejezet) szemléletet ötvöző struktúrát követ: a proaktív elem a kockázatok előrejelzését és minimalizálását célozza (HAZOP-fuzzy, TSK-ACS integráció), míg a reaktív elem a bekövetkezett incidensek szisztematikus és hidrogénspecifikus értékelését biztosítja (HISI-skála).

Értekezésem szakirodalmi feldolgozásának záró időpontja: 2025. május 3.

1 A KUTATÁS ELMÉLETI ÉS FOGALMI KERETEI

Tekintettel a hidrogéntechnológia rendkívüli komplexitására és multidiszciplináris jellegére, e fejezet célja azon alapfogalmak és módszertani keretek tisztázása és definiálása, amelyek egységes értelmezése elengedhetetlen ahhoz, hogy a dolgozat olvasása során a különböző szakterületekről érkező szakértők és kutatók azonos jelentéstartalommal használják a terminusokat, és ezáltal biztosított legyen a bemutatott eredmények következetes értelmezése és tudományos kommunikációja.

1.1 Releváns biztonságtechnikai alapfogalmak meghatározása

Veszély (hazard): olyan állapot, helyzet vagy anyag, amely potenciálisan kárt okozhat emberekben, állatokban, a környezetben vagy vagyontárgyakban. A veszély önmagában is létezik (pl.: toxikus vegyi anyag, mozgó gép, villamos vezeték), és kategorizálható fizikai, kémiai, biológiai, ergonómiai és pszichoszociális típusokra [91][92][93].

Kockázat (risk): a veszélyből eredő kár bekövetkezésének valószínűsége és súlyossága. Míg a veszély statikus, a kockázat a körülmények függvényében dinamikusan változik [92][93].

Kockázatelemzés (risk assessment): szisztematikus folyamat a veszélyek azonosítására és a kockázatok értékelésére. Lépései: azonosítás, veszélyeztetettek meghatározása, kockázatok értékelése, védelmi intézkedések végrehajtása, dokumentálás és felülvizsgálat. Alkalmazott módszerei közé tartozik a „Mi lenne ha...” elemzés, az ellenőrzőlisták és a HAZOP. Célja a veszélyek feltárása mellett a rendszerszintű változások és megelőző intézkedések azonosítása [20][21][22][52][94].

Sztöchiometrikus keverék: egy éghető anyag és az oxidálószer olyan arányú elegye, amelyben az égési reakcióhoz pontosan annyi oxidálószer van jelen, amennyi a tüzelőanyag teljes elégéséhez szükséges. Leegyszerűsítve, azt is mondhatjuk, nincs se felesleges üzemanyag, se felesleges oxigén, így elméletileg minden reagáló molekula „párra talál”. $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + h\ddot{o}$, így 2 mol H_2 elégetéséhez 1 mol O_2 szükséges, tehát az oxigén térfogataránya a keverékben $\frac{1}{3}$, azaz $\approx 33,3\%$, de a levegő csak 21% oxigént tartalmaz, a többi zömmel nitrogén így a sztöchiometrikus hidrogén-levegő keverékben az elegy kb. 29,5 tf% hidrogént tartalmaz. A sztöchiometrikus pont közelében a legkisebb a gyújtási energia, a hidrogén itt gyullad be a legkönnyebben [25].

Gyújtási energia (minimum ignition energy, MIE): az a legkisebb energia, amely egy éghető anyag-oxidálószer keverékben önfenntartó égést, azaz lángterjedést indít.

Lényege, hogy a gyújtás elegendő aktív részecskét (gyököt) hoz létre a lánreakció fenntartásához. Hidrogén esetében ez különösen alacsony, $\approx 0,017$ mJ sztöchiometrikus elegyben, míg metánnál $\approx 0,28$ mJ, tehát a hidrogén közel tízszer kisebb energiával is begyullad. Összehasonlításképp: egy műszálas ruha levételekor keletkező sztatikus szikra 1-10 mJ energiát hordoz [25].

Ipari incidens (industrial incident) és ipari baleset (industrial accident): A nemzetközi szakirodalom áttekintése során megállapítottam, hogy joghézag azonosítható a hazai szabályozásban: a Munkavédelmi törvény (Mvt.) [95], a Seveso III hazai átültetése [96] és a Katasztrófavédelmi törvény [97] sem definiálja az „ipari incidens” és „ipari baleset” fogalmát. Az Mvt. kizárólag a munkabalesetet határozza meg [95; 87§(3)], mint a munkavállalót érő egyszeri külső hatásból eredő sérülést, mérgezést, egészségkárosodást vagy halált. A Seveso III-hoz kapcsolódó szabályozás és a Katasztrófavédelmi törvény ezzel szemben a „veszélyes anyagokkal kapcsolatos súlyos baleset” [97; 3§29] és „esemény” [97; 3§30] kategóriáit alkalmazza. A nemzetközi szakirodalom [19][28][98][99] és szabványok [100][101][102] ezzel szemben tágabb terminológiát használnak: az industrial accident minden ipari környezetben bekövetkező, tényleges kárt okozó eseményt jelöl (személyi sérülés, halál, anyagi vagy környezeti kár), míg az industrial incident minden nem kívánt, az üzemszerű működéstől eltérő eseményt magában foglal, függetlenül a károkozástól. Dolgozatomban, az ipari balesetet a kárral járó eseményekre, az ipari incidenst pedig minden, nem kívánatos, üzemszerű működéstől eltérő eseményre használom.

Biztonságkritikus rendszerek (safety-critical systems): A fogalom gyakori a nemzetközi szakirodalomban, és bár az MSZ EN IEC 61508 [103] szabvány említi - a biztonsági integritási szintek (SIL 1-4) definiálásával együtt -, a magyar jogrendben nincs pontos meghatározása. Értekezésemben biztonságkritikus rendszernek tekintem azokat, amelyek meghibásodása vagy rendellenes működése tömeges vagy súlyos sérülést, halált, jelentős vagyoni vagy környezeti kárt okozhat [23].

A káresemény-kommunikáció: (incident communication) a biztonsági menedzsment és kríziskezelés kulcseleme, mivel helytelen kommunikáció esetén a helyzet súlyosbodhat. A hidrogénesemények gyakran tűzzel és robbanással járnak, ezért a HISI-skála kapcsán áttekintett szakirodalom [104][105][106][107] alapján a cél a tiszta, tárgyilagos információátadás és az események összehasonlíthatóságának biztosítása.

1.1.1 Veszélyek a hidrogénnel kapcsolatban

Nagy nyomás és spontán gyulladás: a hidrogént kompresszált (200-700 bar) vagy kriogén formában célszerű tárolni, ami önmagában kihívás; nagy sebességű áramlás esetén külső gyújtóforrás nélkül is gyulladhat [24]. A hidrogén, a **nagy reakcióképessége** és a **kivételes éghetősége** miatt különösen **robbanásveszélyes** anyag. **Rendkívül kis energia is elegendő a gyulladáshoz**, a láng gyorsan terjed, és a széles éghetőségi tartomány miatt már kis koncentráció is potenciálisan veszélyes. Ha a hidrogén a szivárgást követően azonnal gyújtóforrással találkozik, akkor hidrogén **sugártűz** (jet fire) keletkezik, míg ha a hidrogénszivárgás után, késleltetett gyújtás történik az **robbanást** (explosion) vonhat maga után [25]. A hidrogén tisztán, koromképződés nélkül ég, látható **fény** kibocsátása csekély, ezért világos környezetben **szinte észrevehetetlen**. A hidrogén nagy diffúziós képessége azt jelenti, hogy a molekulák rendkívül gyorsan terjednek más gázok (pl.: levegő), komponensei között, illetve képesek áthatolni különböző anyagokon (permeáció), így például a fémeken is, tömítéseken vagy mikroszkopikus repedéseken. **Alacsony viszkozitása** elősegíti a mikroszkopikus réseken való szivárgást, növelve a tömítési problémákat. Az acéltartályos hidrogénszállításnak ugyan megvannak az évtizedes tapasztalatai, de ma már azt is tudjuk, hogy az acéltartály szénatomjait a hidrogén dekarbonizálja, így a tartály képes rideggé és áteresztővé válni (hydrogen embrittlement: ezt nevezzük **„hidrogénridegségnek”**), amiből előbb következik a szivárgási, majd a környezetvédelemi, gyulladási és esetleg a robbanási probléma.

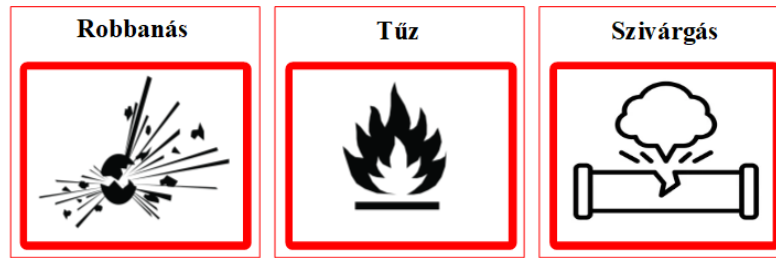
1.1.2 Hidrogénipari-incidensek kvantitatív elemzése

Kutatásom során részletesen foglalkoztam a dokumentált, hidrogénipari balesetek kvantitatív elemzésével [SZI5(2023), SZI7(2024), SZI9(2024), SZI10(2025), SZI11(2025), SZI13(2025)]. A dolgozat terjedelmi korlátai miatt itt csak az összegző megállapításom fogalmazom meg: A **balesetek számát és súlyosságát nemcsak az ipari aktivitás, hanem a jelentési rendszerek fejlettsége és a biztonságtechnikai szabályozás is meghatározza**. A kvantitatív elemzés mellett elengedhetetlen az adatszolgáltatás strukturális különbségeinek figyelembevétele [25][27-42][55].

A hidrogénipari-incidensek végkimenetele és azok kiváltó okai

A hidrogénipari incidensek három leggyakoribb végkimenetele a robbanás, a tüzeset és a gyulladás nélküli szivárgás. Ezek gyakran összefüggnek, de a biztonságtechnikai elemzésben külön kezelendők, mivel eltérő megelőzési és válaszhelyettesítő intézkedéseket

igényelnek. A robbanás jelentős emberi és anyagi kárt okoz, a tüzesetek gyors beavatkozást követelnek, míg a szivárgások rejtett, hosszú távú veszélyt jelentenek.



5. ábra: A hidrogénincidensek leggyakoribb végkimenetele (saját szerkesztés)[28][32]

Az 5. ábrán látható hármas felosztás kulcsfontosságú a hidrogéntechnológiák megbízható kockázatmenedzsmentjének szempontjából. Az eseményeket kiváltó okokat megvizsgálva azt tapasztaltam, hogy a legtöbb halálesetet (59 fő) és sérülést (231 sérült)

okozó balesetek kiváltó oka: hibás tervezés, nem megfelelő anyaghasználat, hibás kivitelezés, a megfelelő felügyelet hiánya, az elhanyagolt karbantartási előírások, vagy azok be nem tartása, üzemeltetési hibák és kezelői tévedések.



6. ábra: A legtöbb halálesetet és személyi sérülést kiváltó okok (saját szerkesztés) [26-32]

1.1.3 A HAZOP meghatározó pozíciója a hidrogéniparban

Az előzőekben bemutatott balesetek és kiváltó okaik alapján kutatásom fókuszát a hidrogéniparban alkalmazott kockázatelemzési módszerek feltérképezésére irányítottam. Vizsgáltam, mely eljárások terjedtek el a gyakorlatban, melyek bizonyultak hatékonyak, és feltártam a korlátaikat, valamint a továbbfejlesztési lehetőségeket a védelmi rendszerek hatékonyságának növelése érdekében [55][56].

Kockázatelemzési módszerek a dokumentált Európai projektek esetén

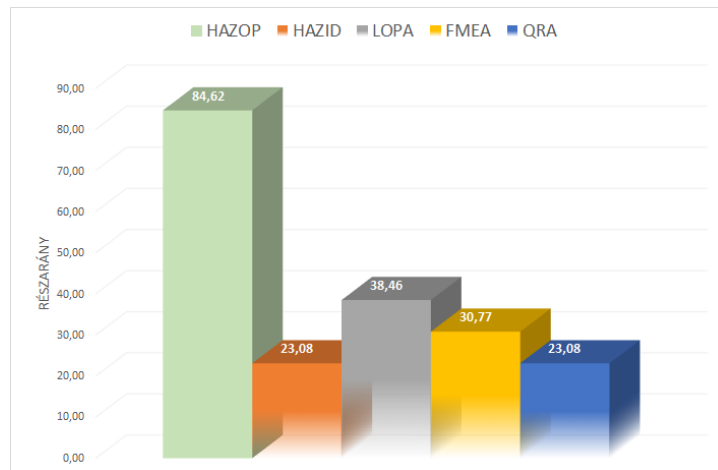
Kutatásom során tíz európai hidrogénprojektet azonosítottam, amelyek dokumentációjában (pl.: projektjelentés, honlap, videó, blog, podcast) szerepel kockázatelemzés [33-42]. Ezen túl Magyarországon három további projektet jelöltem, részben szakmai konzultációk, részben saját részvételem révén, mivel a Bükkábrányi Energiapark hidrogénprojektjében a kezdetektől részt veszek.



7. ábra: A vizsgált 13 projekt elhelyezkedése Európában (saját szerkesztés)

Sorszám	Projekt neve	Ország	Régió/város	Kockázatelemzés módszere				
				HAZOP	HAZID	LOPA	FMEA	QRA
1	HyDeploy	Egyesült Királyság	Keele University	x				x
2	H2Future	Ausztria	Linz					
3	REFHYNE	Németország	Wesseling	x				
4	HyNet	Egyesült Királyság	Liverpool környéke					x
5	Northern Netherlands Hydrogen Valley	Hollandia	Észak-nyugat hollandia	x	x			
6	H2 Mobility	Németország	országos	x			x	x
7	H2V Normandy	Franciaország	Normandia	x	x	x		
8	HEAVENN	Hollandia	Észak-kelet hollandia	x				x
9	GreenHyScale	Dánia	Skive	x	x		x	
10	HyBalance	Dánia	Hobro	x		x	x	
11	Bükkábrány	Magyarország	Bükkábrány	x		x		
12	Aquamarin	Magyarország	Kardoskút	x		x		
13	MOL	Magyarország	Százhalombatta	x		x		

1. táblázat: A vizsgált 13 projekt adatai és a használt kockázatelemzési módszerek (saját szerkesztés).



8. ábra: A vizsgált tíz projekt esetén a kockázatelemzési módszerek százalékos aránya (saját szerkesztés)

A 8. ábrán látható oszlopdiaagramból egy nagyon fontos következtetés vonható le. Az európai projektek kapcsán a kockázatelemzési módszerek közül kiemelkedik a HAZOP, a HAZOP mellett dominánsan jelen van a LOPA (Layer of Protection Analysis) és a FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) de említésre méltó a QRA (Quantitative Risk Assessment) és a HAZID (Hazard Identification) is. A kockázatelemzési módszerek közül a HAZOP széles körben alkalmazott és elismert eljárásnak számít az ipari gyakorlatban, különösen a vegyiparban, valamint a nagynyomású, potenciálisan veszélyes technológiákat alkalmazó rendszerek tervezésében. **Az 1. táblázat és a 8. ábra alapján kijelenthetjük, hogy a HAZOP egy kulcsfontosságú eljárás a hidrogéniparban, így érdemes erre a kockázatelemzési módszerre fókuszálni.**

1.2 A HAZOP alapjai

A HAZOP napjaink egyik legelterjedtebb folyamatbiztonsági elemzési módszere, amelyet az 1960-as években az Imperial Chemical Industries (ICI) fejlesztett ki a vegyipari üzemek komplex biztonsági kihívásainak kezelésére. Azóta, de facto iparági szabvánnyá vált a nagy megbízhatóságú, veszélyes rendszerek körében [43]. A módszer a tervezési fázisban alkalmazható, strukturált eljárás: a rendszert részfunkciókra (node-okra) bontja, majd „vezényszavak” (guide words) segítségével azonosítja az üzemszerű működéstől való eltéréseket, feltárja a kockázatok okait és következményeit. Előnye, hogy kiterjedt szakirodalom és módszertani útmutatók támogatják [44][45]. Az elemzés multidiszciplináris szakértői csapattal zajlik, amely lépésről lépésre vizsgálja a rendszer minden részét „mi lenne, ha?” kérdések mentén (pl.: „Mi történne, ha a nyomás túl magas lenne?”, „Mi történne, ha egy szelep meghibásodna?”). Új létesítményeknél rendszerint teljes körű HAZOP készül, de ez erőforrás-igényes: egy komplex üzem elemzése akár 10-15 mérnök több hónapos munkáját és több ezer oldalas dokumentációt igényelhet. Dolgozatomban ezért egy már megépült hidrogénipari objektum [46] részelemzésén keresztül mutatom be a módszertan gyakorlati alkalmazását. A HAZOP sikerének kulcsa a multidiszciplináris megközelítés: a folyamatmérnökök, üzemeltetők, karbantartók és biztonságtechnikai szakértők integrált szemlélete biztosítja a technikai, üzemeltetési és biztonsági szempontok együttes vizsgálatát.

A klasszikus HAZOP korlátai és kihívásai

A szakirodalomban a HAZOP módszertan kapcsán az alábbi leggyakoribb hibák és korlátok azonosíthatók [43][44][47][48]:

- szubjektivitás és a kvalitatív ítéletekből fakadó bizonytalanság,
- a módszertan alkalmazása elsősorban a tervezési szakaszra korlátozódik, utókövetés nélkül,
- a szakértői dominancia a HAZOP-csoportban, amely a vélemények homogenizálódásához és az alternatív nézőpontok háttérbe szorulásához vezethet, csökkentve a kockázatértékelés relevanciáját és sokszínűségét,
- a végeredmény erőteljes függése a szakértői csoport tapasztalatától, amely különösen kockázatos a pilot projektek során,
- jelentős idő- és humánerőforrás-igény,
- a „guide word” alapú megközelítés erős korlátozottsága, amelynek következtében az atipikus hibák rejtve maradhatnak,
- túlzott mértékű dokumentációfüggés, amely hiányos adatok esetén a vizsgálandó esetek kimaradását eredményezheti,
- a kombinált hibák kezelésének hiánya,
- a hosszú távú, elhúzódó események figyelmen kívül hagyása, mivel a fókusz elsősorban a normálistól eltérő rövid idejű eseményekre korlátozódik (pl.: túl magas/alacsony áramlás, zárt szelep stb.)

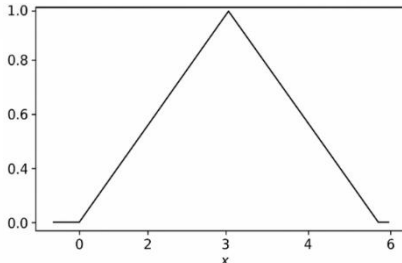
Kutatásom szempontjából lényeges, hogy a HAZOP, a jelenlegi formájában nem támogatja az on-line, valós idejű döntéstámogatást, és hiányzik belőle a kvantifikálhatóság. A kvantitatív és valós idejű módszerek hiánya nemcsak erőforráspazarláshoz vezethet, hanem az egyre komplexebb ipari létesítményekben a biztonsági szintet is csökkenti. A hidrogénhez kapcsolódó veszélyforrások (1.1.1), a baleseti elemzések (1.1.2) és a HAZOP szerepének áttekintése alapján megállapítható, hogy a valós idejű és számszerűsíthető megközelítések kidolgozása jelentős kutatási és fejlesztési potenciált képvisel.

HAZOP		
Szempont	Előny	Hátrány
Kockázatteltárás mélysége	Strukturált és részletes elemzést tesz lehetővé	Nem foglalkozik a hibák kombinációjával
Objektivitás	Több szakterület összehangolt munkáját ösztönzi	Eredmények a résztvevők személyétől és dinamikájától függenek
Kvantifikálhatóság	-	Nem szolgáltat számszerű adatokat a kockázatokra
Módszertani rugalmasság	Széles körben alkalmazható különböző iparágakban	Erősen a guide word rendszerhez kötött
Erőforrásigény	Nem igényel komplex szoftveres infrastruktúrát	Idő- és humánerőforrás-igényes
Emberi tényező hatása	Tapasztalati tudás közvetlenül érvényesülhet	Szubjektív torzításokra érzékeny
Különleges hibák kezelése	-	Atipikus vagy nem sablonos hibák rejtve maradhatnak
On-line használhatóság	-	Nem támogatja a valós idejű adatáramlást, automatizált kockázati döntést

2. táblázat: A HAZOP módszer előnyei és hátrányai - összehasonlító táblázat (saját szerkesztés) [43][44][47][48].

1.3 A fuzzy logika és a bioinspirált algoritmusok alapjai

A fuzzy logika: A fuzzy elmélet alapjait **Lotfi A. Zadeh** fektette le 1965-ben megjelent *Fuzzy Sets* című tanulmányában [108]. A fuzzy halmazok a klasszikus halmazelmélet általánosításai, ahol a tagság nem kizárólagos, hanem fokozatosan értelmezhető [65].



9. ábra: Fuzzy tagsági függvény - háromszög (saját szerkesztés)

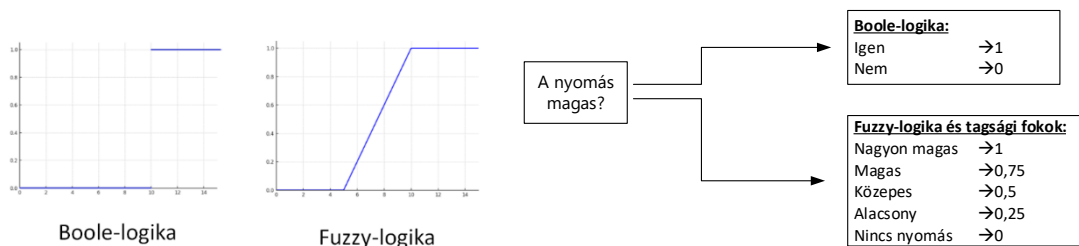
$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & c \leq x \end{cases}$$

A fuzzy halmazelmélet a hagyományos karakterisztikus függvény kiterjesztésére épül: az univerzum minden eleméhez a $[0,1]$ intervallumból rendelhető számérték, amely a halmazhoz tartozás mértékét fejezi ki. A fuzzy halmazt a tagsági függvény definiálja, amely különböző alakú lehet (pl.: háromszög, trapéz, Gauss-görbe), de a gyakorlatban a kezelhetőség miatt többnyire szakaszonként lineáris. Az egyik legelterjedtebb forma a háromszögfüggvény, amelyet három paraméter (a, b, c) határoz meg [65][121].

Feltétel, hogy $a \neq b$ és $b \neq c$, ekkor $\mu_A(x)$ azt mutatja meg, hogy az x érték mennyire tagja az „A” nevű fuzzy halmaznak.

- Ha, $x \leq a$: nincs tagság $\mu_A(x)=0$, x még kívül esik a halmazon
- Ha, $a \leq x \leq b$: a tagság lineárisan nő 0-ról 1-re, hiszen: $\frac{x-a}{b-a}$
- Ha, $b \leq x \leq c$: a tagság lineárisan csökken 1-ről 0-ra, hiszen: $\frac{c-x}{c-b}$
- Ha, $c \leq x$: nincs tagság $\mu_A(x)=0$, x már kívül esik a halmazon

A tagsági függvényekhez nyelvi kategóriák (pl.: alacsony, közepes, magas) rendelhetők, ami emberközelivé teszi a rendszert. Ez kapcsolódik a HAZOP során használt nyelvi változókhoz is. A fuzzy logika első gyakorlati alkalmazását **Ebrahim Mamdani** valósította meg az 1970-es években, amikor egy gőzgép működését fuzzy szabálybázisú vezérlőrendszerrel irányította. Munkája mérföldkő volt, mivel igazolta, hogy a fuzzy logika nemcsak elméleti, hanem mérnöki problémák hatékony kezelőeszköze is [120][121]. A fuzzy rendszerek szabályalapú logikát használnak, ahol a „ha... akkor...” típusú szabályok nem binárisak (0/1), hanem fokozatokat képviselnek. Például: „ha a hőmérséklet magas, akkor a ventilátor sebessége legyen magas.” Ez a rugalmasság teszi lehetővé, hogy a fuzzy logika hatékonyan kezelje a bizonytalanságot és a folyamatosan változó paramétereket [65][66][67][119][121].



10. ábra: A Boole-logika és a Fuzzy-logika szemléltetése (saját szerkesztés)

A **Fuzzy Inference System** - FIS vagy szabályalapú következtetési rendszer egy olyan számítási keretrendszer, amelyet a fuzzy, logikai szabályok segítségével valósít meg. A rendszer a bemeneti változókat (crisp értékek) fuzzy halmazokhoz rendeli (fuzzifikáció). A „ha...akkor...” szabályok antecedens-konzekvens struktúrája alapján meghatározza a szabályok aktiválási fokát, majd ezek kombinációjával generál fuzzy kimenetet, amelyet számértékű kimenetre alakít (defuzzifikáció). A FIS, így képes nyelvi tudás és bizonytalan információk formális feldolgozására is [65][66][67] [119][121].

$$HA \ x_1 \ IS \ A_1 \ \text{ÉS} \ x_2 \ IS \ A_2 \ \text{AKKOR} \ y \ IS \ B$$

- **ANTECEDENS tag:** $HA \ x_1 \ IS \ A_1 \ \text{ÉS} \ x_2 \ IS \ A_2 \rightarrow$ pl.: HA a hőmérséklet magas
- **KONZEKVENS tag:** $AKKOR \ y \ IS \ B \rightarrow$ pl.: AKKOR a ventilátor sebessége magas)

Az **antecedens halmazok** azok a fuzzy halmazok (pl.: alacsony, közepes, magas), amelyek az inputváltozókhoz tartoznak, és amelyeket a feltételben használunk [65].

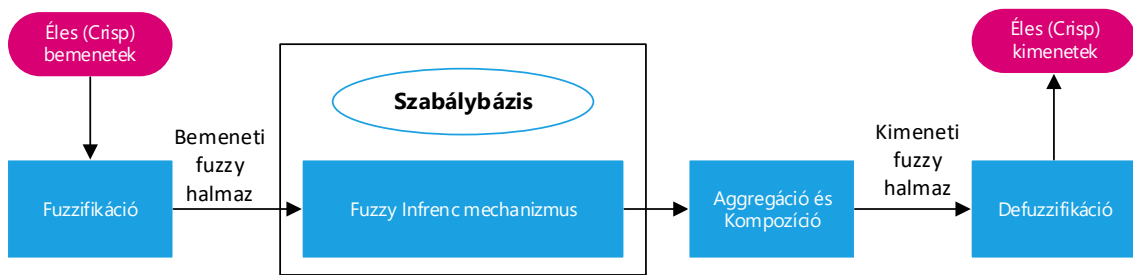
A **fuzzifikáció**, azt a folyamatot jelenti, amely során a hagyományos, éles értékeket átalakítjuk fuzzy értéké. Ez azt jelenti, hogy az adott értéket hozzárendeljük egy vagy több fuzzy halmazhoz egy tagsági függvény segítségével. Például, ha van egy hőmérsékleti adatunk (mondjuk 25 °C), a fuzzifikáció során meghatározzuk, hogy ez az érték milyen mértékben tartozik például a "hűvös", "meleg" vagy "forró" kategóriákba [66].

A **defuzzifikáció**, az a folyamat amely a fuzzy következtetésekből ismét egy éles, konkrét értéket állít elő. Ez azért szükséges, mert a kimeneteket gyakran valós, konkrét értékek formájában kell megadni a fizikai rendszerek számára, például hogy pontosan milyen fokozatra állítsuk a motort vagy a fűtést [65].

Az **inferencia** mechanizmusa, az ami a fuzzy szabályokat feldolgozza és a bemenetek alapján meghozza a megfelelő döntéseket. Ez az a lépés, ahol a fuzzy szabályok alapján a bemeneti értékekből következtetéseket vonunk le [65] [68].

Az **aggregáció**, az egyes aktivált szabályok kimeneti fuzzy halmazait egyesítjük egy egyetlen kimeneti fuzzy halmazzá. Az aggregált kimeneti fuzzy halmaz a teljes rendszer

„válasza” a bemeneti feltételekre, ez fog defuzzifikációval konkrét (crisp) értéké alakulni, pl.: szivattyú-fordulatszám = 63%-ra.



11. ábra: Klasszikus-fuzzy folyamatábra (saját szerkesztés)

Mamdani vs. TSK-fuzzy: A fuzzy logika fejlődése során többféle modell és rendszer született, amelyek különféle alkalmazásokhoz igazodnak. Az első mérnöki és talán legismertebb mérnöki megközelítés az a klasszikus- és általános- néven is gyakran hivatkozott rendszerváltozat, ami a Mamdani-fuzzyt jelöli, de a mérnöki gyakorlatban szintén népszerű a Takagi-Sugeno-Kang (TSK) fuzzy is. Mindegyik megközelítés az alapötletre, a fokozatos tagságra és az emberi logikához hasonló szabályalapú vezérlésre épül, de a kimenet kezelése és a számítási hatékonyság szempontjából jelentősen eltérnek.

A FIS bemutatása során láthattuk a klasszikus fuzzy szabály felírását:

Mamdani-fuzzy szabály: $HA\ x_1\ IS\ A_1\ \text{ÉS}\ x_2\ IS\ A_2\ AKKOR\ y\ IS\ B$

TSK-fuzzy szabály: $HA\ x_1\ IS\ A_1\ \text{ÉS}\ x_2\ IS\ A_2\ AKKOR\ y = f(x_1, x_2)$

A TSK szemléletben a konzekvens tag nem fuzzy halmaz, hanem egy determinisztikus függvény, mely gyakran lineáris vagy konstans, pl.:

$$f(x_1, x_2) = p_0 + p_1x_1 + p_2x_2$$

Egyes szabályok kimenetei a szabály aktiválási fokával **súlyozottan átlagolódnak:**

$$y = \frac{\sum_i w_i f_i(x)}{\sum_i w_i}$$

ahol, w_i – az i – edik szabály antecedensének aktiválási foka

A Mamdani-fuzzy főleg egyszerű vezérlési feladatokra alkalmas, ahol a szabályok és azok logikai kapcsolatai jól érthetők és kevésbé komplexek. Ez a típus jól használható ott, ahol nincs szükség nagy pontosságra, de fontos a rugalmasság és az intuitív szabályrendszer. A Mamdani féle fuzzy rendszer egy kiterjesztett, strukturált forma, amelyet kifejezetten a magyarázhatóságra és emberi szabályalkotásra optimalizáltak. Ahogyan fent láthattuk, a szabályok kimenete itt fuzzy halmaz, így jobban tükrözi az emberi gondolkodást.

A TSK fuzzy rendszer, viszont nagy számítási hatékonyságot és pontosságot biztosít, mivel - ahogyan a fenti szabályok összehasonlításánál is látható - a szabályok kimenete

nem fuzzy halmaz, hanem tipikusan egy lineáris egyenlet. Ez lehetővé teszi, hogy a rendszer gyorsabban működjön, és jól illeszkedjen más numerikus vagy prediktív algoritmusokhoz, például irányítástechnikában, energiarendszerekben, vagy járműdinamika szabályozásban. Hátránya, hogy kevésbé átlátható és nehezebb szakértői szabályokat beépíteni manuálisan.

Összefoglalva, a kutatás szempontjából legfontosabb különbséget:

- A Mamdani-konzekvens → **fuzzy halmaz, így defuzzifikáció szükséges.**
- A TSK-konzekvens → **numerikus függvény, így közvetlen, gyors számítás, és közvetlen illeszthetőség egy adaptív és/vagy optimalizációs algoritmusokhoz.**

Bioinspirált algoritmusok (bioinspired algorithms): olyan optimalizálási módszerek, amelyek a természetben megfigyelhető jelenségekből, élőlények viselkedéséből vagy biológiai folyamatokból merítenek ihletet. Előnyük a rugalmasság, az egyszerű adaptálhatóság és a széles körű alkalmazhatóság mérnöki, gazdasági és informatikai területeken [77][78][79][109]. A bioinspirált algoritmusok sikerének kulcsa a globális és a lokális keresés közötti egyensúly megteremtése. A módszerek forrásai sokfélék lehetnek, pl.: rajntelligencia-alapú eljárások, az evolúciós algoritmusok. A legújabb fejlesztések, mint a rozmárok viselkedését modellező Walrus Optimization Algorithm vagy a Bobcat Optimization Algorithm, jól mutatják a dinamikus fejlődést és sokszínűséget [109].

1.4 Összefoglalás: On-line kockázatértékelő rendszerek követelményei

Souza és munkatársai [69] szerint az adaptív és online kockázatértékelő rendszerek kulcsfontosságú követelményei közé tartozik a bizonytalanság kezelésének képessége, a valós idejű monitorozás és a dinamikus rekonfiguráció.

Összefoglalva és szintetizálva a vonatkozó szakirodalmat [69][70][71][72][73]:

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, hogy a döntések megalapozottak és operatív szinten is alkalmazhatók legyenek. Elvárás, hogy a rendszer érzékelni tudja a bemeneti adatok megbízhatatlanságát, és ilyen esetekben figyelmeztetést kell küldjön az operátornak,

2 FUZZY - HAZOP LEHETŐSÉGEK ÉS KORLÁTOK

Ismertettem a HAZOP hidrogéntechnológiai szerepét (1.1.3), majd az 1.2 fejezetben tömören összefoglaltam a módszer lényegét. A 2. fejezet célja a jelenleg használt HAZOP korlátainak feltárása és azoknak a kutatási és innovációs irányoknak a bemutatása, amelyek hozzájárulhatnak a hidrogéntechnológia biztonsági szintjének növeléséhez [54][55][56]. Alapvető elvárás a számítási bonyolultság kezelése, a konzisztens és megbízható működés, valamint gyors reakcióképesség. Ez különösen fontos biztonságkritikus ipari környezetben, ahol a gyors visszajelzés és beavatkozás kulcsfontosságú a súlyos következmények megelőzésében. A disszertáció terjedelmi korlátai nem teszik lehetővé egy teljes HAZOP folyamat részletes bemutatását, ezért egy megvalósult létesítmény [46] részelemének módosított modelljét dolgoztam fel. Ez a megközelítés biztosítja a módszer követhetőségét, valamint lehetőséget ad a matematikai modell bemutatására és validálására. A bükkábrányi energiapark részletei titoktartási kötelezettség miatt nem ismertethetők az értekezésemben, azonban nyilvános információk elérhetők az objektum hivatalos oldalán [46]. A kutatás központi célja nem a HAZOP-folyamat teljes reprodukciója, hanem egy olyan módszertani keretrendszer kidolgozása, amely a megközelítés alapjainak lefektetését és alkalmazhatóságának demonstrálását szolgálja.

2.1 A HAZOP-ot bemutató hidrogéntechnológiai modell és annak határai

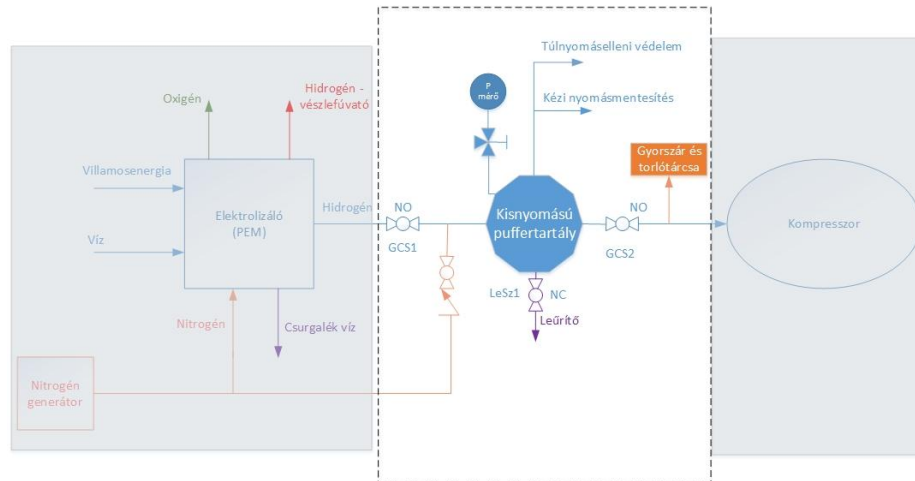
A bükkábrányi energiaparkban, egy 22MW-os csúcsteljesítményű naperőmű mellé telepítettük Magyarország első, zöldhidrogént előállító, PEM (Polymer Electrolyte Membrane) típusú, 1 MW-os névleges teljesítményű elektrolizáló berendezését [46].



12. ábra: Előtérben a kisnyomású puffertartály és a kompresszor, háttérben az elektrolizáló [110] (szerkesztett)

A 14. ábrán az előtérben egy kisnyomású puffertartály látható (szürke, állóhengeres tartály a tetőszerkezet alatt), amelynek feladata az elektrolizálóból érkező hidrogén rövid idejű, tárolása a kompresszor előtt. A 15. ábrán, ugyanezen tartály

központi elhelyezkedése mellett megfigyelhetők annak gépészeti kapcsolatai. A HAZOP elemzés, kutatáshoz kapcsolódó részét és a későbbi matematikai modelleket a rajzon szaggatott vonallal körülhatárolt területre végzem el. Ez a rész a rendszerösszetettségek tekintetében megfelelő bonyolultságot biztosít a magyarázatok és levezetések bemutatásához, miközben az átláthatóság továbbra is megmarad.



13. ábra: A számításokhoz és a szemléltetéshez használt tesztmodell (saját szerkesztés)

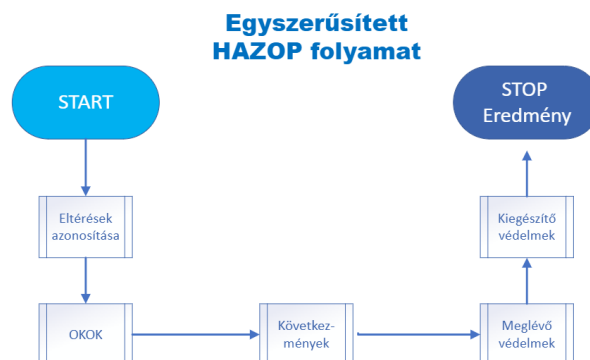
A modellel a célom, hogy egyszerűen szemléltetni tudjam a HAZOP módszert és a matematikai modellek működését. A HAZOP elemzés célja a lehetséges veszélyek és működési akadályok azonosítása a puffertartály működése során, különösen a nyomás, áramlás és a szelep műveletek vonatkozásában.

Elemzési paraméterek:

Nyomás (37-43 barg közötti üzemi nyomás); **Áramlás** (0-70 kg/h közötti áramlás); **Szelepműveletek** (zárt/nyitott).

Vezényszavak (guide words): magas/alacsony; túlzott/hiányos; megfelelő/nem megfelelő.

A fent látható elemzési paramétereket a vezényszavak segítségével egy szakértőkből álló team elemzi. A magyarázat érdekében elkészítettem az egyszerűsített folyamatábrát (14. ábra).



14. ábra: A HAZOP-folyamat egyszerűsített folyamatábrája (saját szerkesztés, a [43][44] alapján)

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 leírás	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, nitrogén generátor ellenőrzése
Áramlás	Hiányos áramlás	GCS2, GCS2 gömcsap vagy gyorszár hibás működése, szivárgás	Puffertartály leürülése, nyomáshiány, kompresszor leállás, szivárgás, szűrőráng 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, Szűrőráng, robbanás	Redundáns szelepek	Szelepek rendszeres karbantartása, működésük ellenőrzése
Szelepművelet	Nem megfelelő nyitás	Kézi nyomásmentesítő szelep elakadása	Nyomás felgyülemzése, túlnyomás	Túlnyomás elleni védelem	Kézi szelep rendszeres tesztelése

3. táblázat: A klasszikus HAZOP formája és struktúrája a tesztmodellre.

2.2 A HAZOP és a fuzzy logika kombinálása

A HAZOP módszertan korlátainak felismerése számos kutatót ösztönzött alternatív megközelítések kidolgozására. Az egyik ígéretes irány a fuzzy logika alkalmazása, amely kvalitatív → kvantitatív átmenetet biztosít, és az „IF–THEN” szabályok révén formalizálja a szakértői tudást. A fuzzy hatékonyan kezeli a bizonytalanságot és szubjektivitást, így realisabb kockázatbesorolás érhető el [49][50][51][52].

Solkloei és munkatársai [53] hibrid módszert javasoltak, amely a HAZOP-ot hangyakolónia algoritmussal integrálja. Ez lehetővé teszi a bizonytalanságok kezelését, valamint a kockázati tényezők közötti összetett, nemlineáris kapcsolatok leírását. Eredményeik azt mutatják, hogy a bioinspirált algoritmusok fuzzy rendszerekkel kombinálva növelhetik a kockázatértékelés hatékonyságát és megbízhatóságát [53].

Jellemző	Klasszikus HAZOP	Fuzzy logikával bővített HAZOP
Kockázatértékelés	Minőségi, kategóriákra hagyatkozik (kvalitatív).	Folytonos értékelés fuzzy tagságok alapján (kvantitatív).
Bizonytalanság kezelése	Implicit, szakértői konszenzusra épít.	Explicit, vita esetén fuzzy értékeket rendel, kezeli a részleges igazságot
Eredmény formája	Eltérések listája súlyossági kategóriákkal, ajánlásokkal.	Eltérések listája fuzzy kockázati pontszámokkal és rangsorral; prioritizálható kimenet
Több kritérium bevonása	Általában két fő tényező (valószínűség, következmény) kvalitatív mérlegelése.	Több tényező integrálható (pl.: következmény súlyossága, eseménygyakoriság, stb.), fuzzy súlyokkal vehető figyelembe.
Szubjektivitás	Erősen függ a csapat percepciójától.	Csökkenti a szubjektív torzítást azáltal, hogy a szakértői véleményeket matematikai halmazokkal egyesíti.

4. táblázat: A Klasszikus HAZOP és a hibrid HAZOP összehasonlítás (saját szerkesztés) [47][48][49][50][51][53]

2.2.1 Egy új, TSK-fuzzy alapú, modell megalkotásának indoklása

Solukloei és munkatársai által ismertett tanulmány [53] alapos elemzése ugyan számos értékes fejlesztést és új megközelítést tár fel, sőt számomra különösen figyelemre méltó, hogy módszerük a tűz, robbanás- és toxikus kibocsátások területére alkalmazták, mely szoros rokonságot mutat az általam vizsgált hidrogéntechnológiai problémakörrel, ugyanakkor kutatási tervem és célkitűzéseim szempontjából a fenti munka bizonyos hiányosságokat is mutat. **Solukloei és munkatársai ugyanis Mamdani-típusú fuzzy logikát alkalmaztak, ami, aggregációt és defuzzifikációt igényel**, ez pedig a számítási idő szempontjából nem tekinthető optimálisnak. A kutatók rámutatnak arra, hogy a fuzzy módszertan ugyan képes jól kezelni a homályosságot és bizonytalanságot, a szabályalapú modell újraalkotása viszont minden iterációnál idő- és erőforrásigényes folyamat [53]. A probléma gyökere feltehetően abban rejlik, hogy a Mamdani-fuzzyhoz kapcsolódó következtetési rendszerek (FIS - Fuzzy Inference System) teljesítménye drasztikusan romlik, ha a bemeneti dimenzió száma növekszik vagy ha a szabályok száma nő.

Tekintettel arra, hogy a biztonságkritikus rendszerekben az on-line működés és a valós idejű válaszképesség alapkövetelmény, a Mamdani-rendszer a számítási igények miatt nem biztosítja a szükséges és elvárt időbeli reakcióképességet. Már az I. hipotézisem felállítása során is megfogalmaztam, s továbbra is tartom azt a feltételezést, hogy a Mamdani-fuzzy logikára épülő HAZOP-eljárások a számítási kapacitás, az időbeli reakcióképesség és a döntési konzisztencia szempontjából nem alkalmasak a megfelelő döntéstámogatás biztosítására. E hiányosság indokolja egy új modell megalkotását.

Solukloei és munkatársai által megalkotott HAZOP+ACS integrált rendszerre jellemző, hogy:

- A szakértők továbbra is nyelvi kategóriákkal dolgoznak.
- a Mamdani-fuzzy nem támogatja hatékonyan a numerikus kockázatbecslést, amiből adódóan, a hidrogéntechnológia on-line monitoring vagy real-time folyamatirányító rendszerekbe történő integrálás nem végezhető el kompromisszummentesen.
- Az IoT (Internet of Things) rendszerek előnyei sem érvényesíthetők hatékonyan a biztonságkritikus üzemek kockázatértékelésének a területén.

Ha megvizsgáljuk az 1.4 fejezetben bemutatott követelményeket, akkor beláthatjuk, hogy bár roppant értékes a Solukloei és munkatársai által publikált eredmény, de a real-time, „adatvezérelt-kockázatértékelés” az eddig meglévő modellekkel nem valósítható meg.

2.3 A kisnyomású, HAZOP-modell, MAMDANI megközelítéssel

Szabályszám [118][120][121]:

$$N_{szabály} = \prod_{i=1}^m |\mathcal{L}_i|$$

ahol:

$N_{szabály}$ – a szabályok száma

m – a bemeneti változók száma

\mathcal{L}_i – az i – edik bemenet nyelvi címkéinek halmaza

A 2.1 fejezet alapján a definiált modellhez tartozó szabályszám:

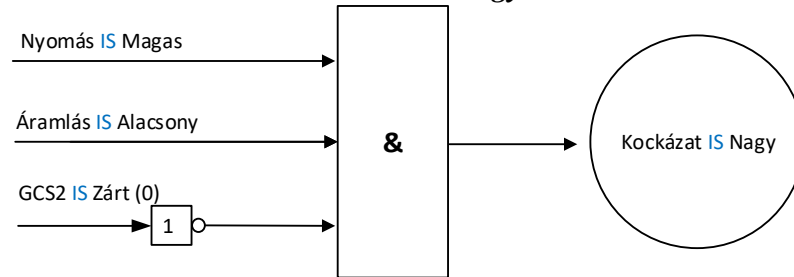
$$N_{szabály} = 3 \times 3 \times 2 = 18$$

Változó	Fuzzy rendszer nyelvi értéke	Szabályok száma
Nyomás	Alacsony, Normál, Magas	3
Áramlás	Alacsony, Normál, Magas	3
Szelep-állapot	Zárt (0), Nyitott (1)	2
Összes fuzzy szabály száma: $3 \times 3 \times 2 = 18$		

5. táblázat: A modell Mamdani-fuzzy alapú adatai (saját szerkesztés)

A fuzzy logika alapján egy szabály a következőképpen írható le:

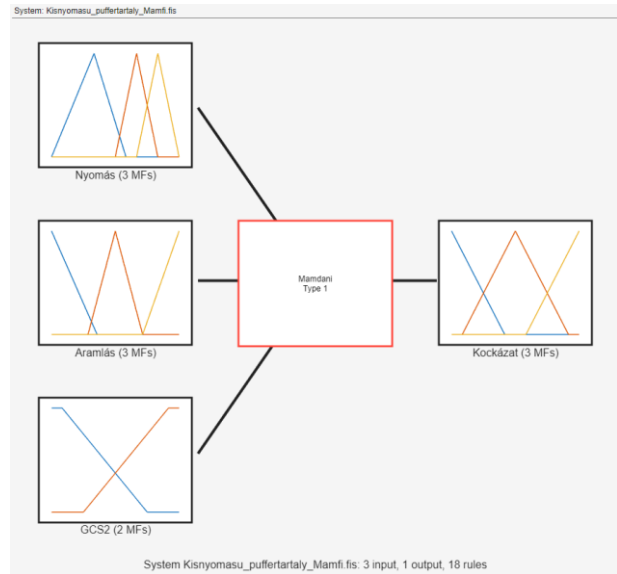
**IF Nyomás IS Magas AND Áramlás IS Alacsony AND GCS2 IS Zárt THEN
Kockázat IS Nagy**



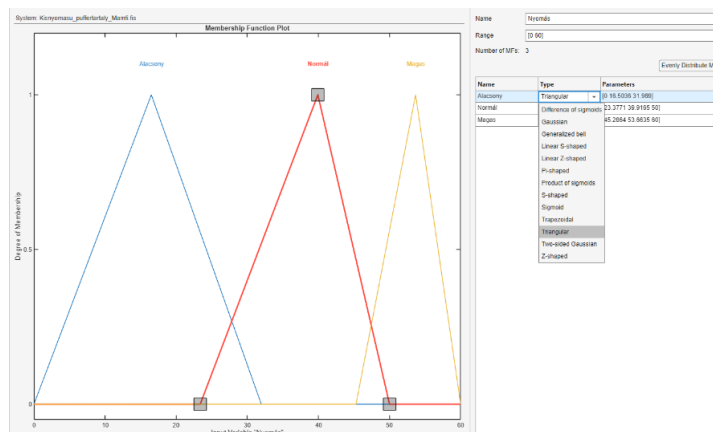
15. ábra: A fenti példaszabály, logikai ábrája (saját szerkesztés)

A modell validálása érdekében felépítettem a kapcsolódó Mamdani-fuzzy következtetési rendszert (MATLAB, R2024b, majd R2025a és Fuzzy Logic Designer). A tesztelési és finomhangolási folyamatokat ebben a környezetben végeztem.

A MATLAB R2025a-verzió kiemelkedően jól használható, alkalmazott matematikai szinten a fuzzy rendszerek fejlesztése érdekében, a Fuzzy Logic Designer App pedig egy kiváló kutató-fejlesztői lehetőség, ugyanis az alkalmazás lehetővé teszi Mamdani és TSK rendszerek grafikus tervezését (16. ábra) és finomhangolását is. A tagsági függvények (membership functions - MF) és az „if-then” szabályrendszer interaktív definiálása, valamint azok paraméterezése intuitív módon történik az alkalmazás vizuális felületén keresztül.



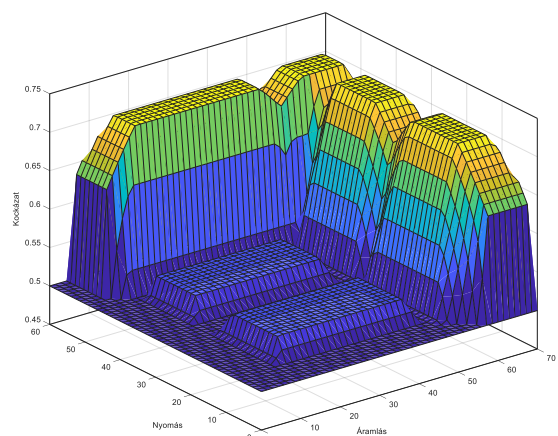
16. ábra: A Matlab modell vázlatja, forrás: Matlab Fuzzy Logic Designer (saját szerkesztés)



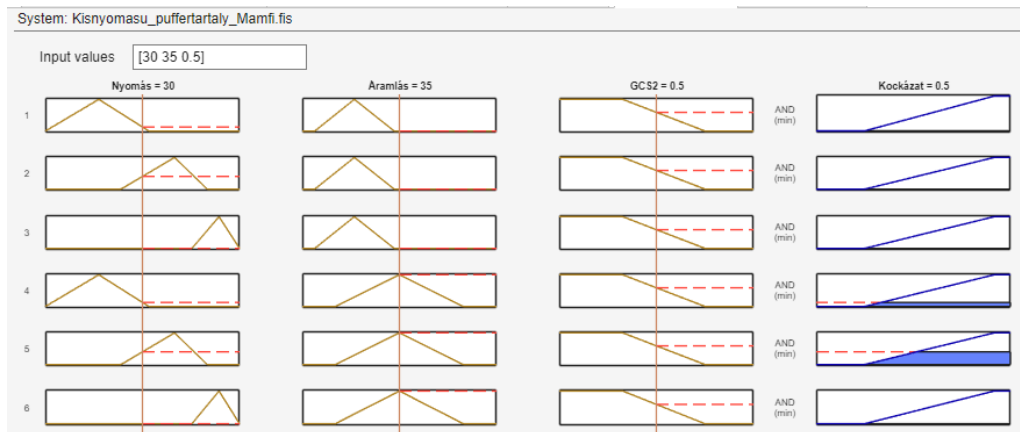
17. ábra: Tagsági függvények paraméterei, Matlab Fuzzy Logic Designer (saját szerkesztés)

A Fuzzy Logic Designer, fejlett vizualizációs eszközei révén szemléletesen és informatívan jeleníthetjük meg eredményeinket. A 18. ábrán a kimenetet (kockázat) ábrázolom, két bemeneti változó (nyomás/áramlás) alapján.

A szabályállítást is (rule inference process) lépésről lépésre lehet nyomon követni, így az átláthatóság és interpretálhatóság is kiváló.



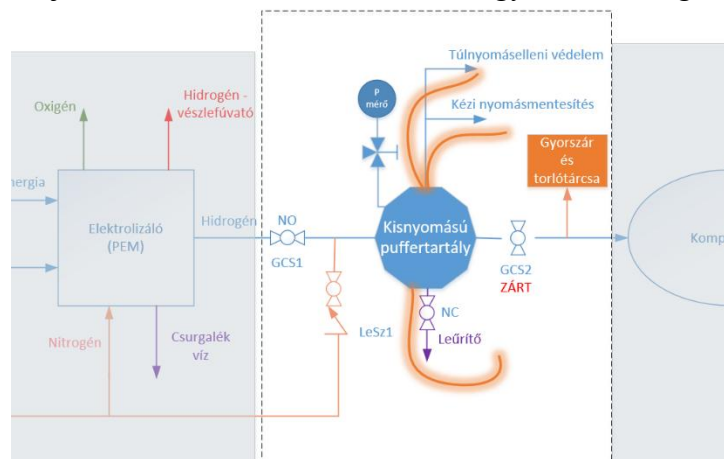
18. ábra: Control surface - A kockázat értéke a nyomás és áramlás függvényében, forrás: Matlab Fuzzy Logic Designer (saját szerkesztés)



19. ábra: Rule Inference - a szabályok grafikus megjelenítése, forrás: Matlab Fuzzy Logic Designer (saját szerkesztés)

2.3.1 A tartálymodell továbbfejlesztése

A hidrogénipari-kockázatok feltárásával kapcsolatos szakirodalomkutatásaim eredményei összhangban vannak egy 2021-ben publikált tanulmánnyal, melyet a National Renewable Energy Laboratory (NREL) és a Marylandi Egyetem közösen jegyez, amiben megállapítják, hogy a hidrogénrendszerekben **a szivárgás a leggyakoribb rendellenes állapot**, mely hosszútávú és súlyos kockázatokat jelent. A tanulmány hangsúlyozza, hogy a szivárgások gyakoriságának és mértékének bizonytalansága korlátozza a kockázatok pontos megértését és kezelését [83]. Az Oxford Energy Institute, egy 2024-es jelentése szerint a hidrogénellátási láncban, a legmagasabb szivárgási arányok a föld feletti tartálytárolás esetén fordulhatnak elő [84]. A korábbi szakirodalomkutatásomra és a fenti adatokra támaszkodva **megállapítottam, hogy a hidrogénipari rendszereknél a szivárgás és annak detektálása a biztonság szempontjából kritikus fontosságú**. A szakirodalmi adatok szerint a nem észlelt szivárgások 25-40%-kal csökkenthetik a biztonsági rendszerek megbízhatóságát a hidrogéninfrastruktúrában [85][86][87][88]. Figyelembe véve, hogy a hidrogénrendszerekre jellemző a nehezen észlelhető, de gyakori szivárgás, amely észlelés hiányában katasztrofális következményekkel járhat, **a fejlesztett modelletem egy anomálfigyelő ággal egészítettem ki**. Ha a GCS2 szelep zárt állapot mellett áramlás detektálható a



20. ábra: Áramlási anomália szemléltetése (saját szerkesztés)

kisnyomású tartályból, akkor az alábbi esetek valamelyike állhat fenn:

- Túlnyomás elleni védelem (PRV - Pressure Relief Valve) aktív → biztonsági működés, így az operátor tud az eseményről.
- Kézi (MAN - Manual) nyomásmentesítő szelep nyitva → az operátor biztosan jelzést kap az eseményről, vagy ő adott utasítást a helyszínen lévő személyzetnek,
- Leürítő-szelep (DRAIN) nyitva → az operátor biztosan jelzést kap az eseményről, vagy ő adott utasítást a helyszínen lévő személyzetnek,

Feltételezésem a modellel kapcsolatban: Minden, tartályból elvezető szelep zárt állapotban van és mégis van áramlási jel a bemeneti oldalon vagy nyomáscsökkenés tapasztalható a tartályban, akkor azt feltételezem, hogy a rendszer szivárog, Ezt neveztem el áramlási anomáliának, hiszen üzemszerűen működő, zárt rendszer esetén áramlási jel nem mérhető. Annak érdekében, hogy az áramlási anomáliát detektálhassam, s ezzel a szivárgási állapotra is megoldást adjak a modellben, definiálni kell egy „mérhető” nyelvi kategóriát az áramlásra, ez viszont a szabályok számát növelné (nagyobb rendszerben ez sokkal kritikusabb), ami a számítási hatékonyságot csökkenti.

A „szabálysám-robbanás” elkerülése, Boole-algebra alkalmazásával

A fuzzy szabálybázis komplexitásának egyik kulcsproblémája, hogy a szabályok száma gyorsan növekszik a bemenetek számával és az állapothalmazok részletességével.

- A fuzzy szabálytér, az anomáliafigyelés nélkül, 18 szabályt tartalmaz (5. táblázat),

$$N_{szabály} = 3 \times 3 \times 2 = 18$$
- A szabálysám az áramlás „mérhető” (az eddigi három változó helyett, négy változó) nyelvi kategóriájának definiálásával már 24 szabályra növekedne.

$$N_{szabály} = 3 \times 4 \times 2 = 24$$

- Ha a fuzzy szabálytérben szeretném a meglévő szabályok mellett a PRV-MAN-DRAIN szelepfunkciókat (kétállapotú logika: nyitott vagy zárt) is kezelni, akkor a szabályok száma már 192 lenne.

$$N_{szabály} = \underbrace{3 \times 4 \times 2}_{\text{Nyomás, Áramlás, GCS2}} \times \underbrace{2 \times 2 \times 2}_{\text{PRV, MAN, DRAIN}} = 192$$

Mamdani-fuzzy rendszerben a szabálysám növelése egyenes arányban növeli a számítási időt és a memóriát [65] [119][121]. Ez azt jelenti, hogy a fenti esetben, amikor a szabálysám 18-ról 192-re növekszik, akkor a számítási idő és a „futtatási költség” (egy minta kiértékelése) 10,66-szorosra növekszik. Többek között ez az egyik oka annak, hogy egy nagyszámú adatponttal rendelkező, komplex üzem szempontjából a Mamdani-fuzzy

hátrányosnak tekinthető. A mérnöki szabotosság érékében itt meg kell jegyezni, hogy vannak olyan matematika megközelítések (ritkaszabály alkalmazása, bemenetek összevonása, hierarchikus rendszer kialakítása, szinguláris érték felbontás, klaszterezés...stb), amik lehetővé teszik a szabálysám-redukciót. Meglátásom szerint, én a fenti módszerektől egy sokkal egyszerűbb villamosmérnöki megközelítést alkalmaztam és végül a klasszikus Boole-algebrát használtam fel.

Annak érdekében, hogy a szabálysám-robbanást és a számítási kapacitás növekedést elkerüljem, logikai értékeket (0 vagy 1) állítok be a PRV-re, a MAN-ra és a DRAIN-re. A fenti feltételeken túl a logikai kapcsolatokat úgy definiáltam, hogy az anomálfigyelés akkor és csak akkor aktíválódjon, ha a GCS2 szelep zárt (0) állapotba kerül.

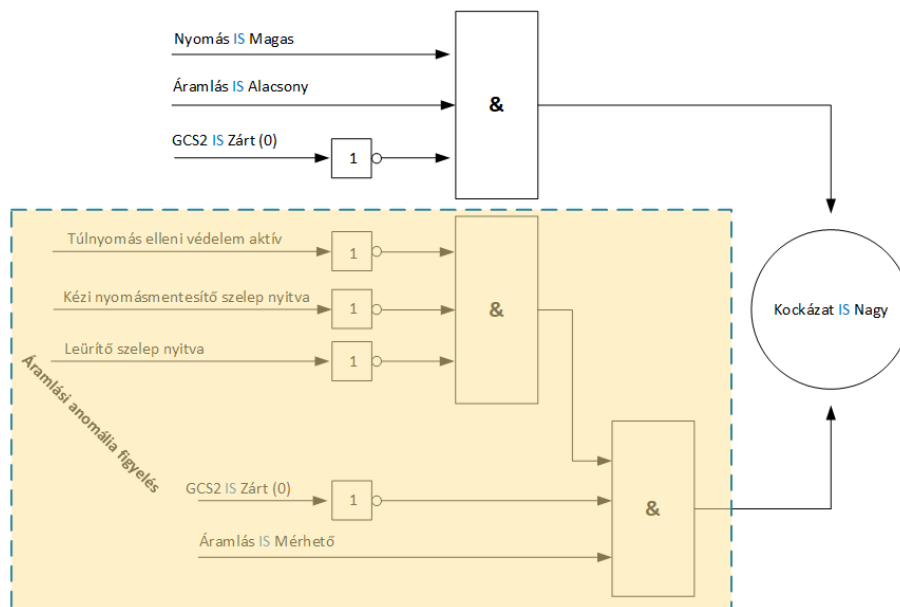
$$\mathbf{Anom} = \underbrace{(GCS2 = 0)}_{\text{zárt gyorszár}} \wedge \underbrace{(Aramlás \geq Q_{meas})}_{\text{mérhető/"túl nagy" áramlás}} \wedge \underbrace{\neg PRV \wedge \neg MAN \wedge \neg DRAIN}_{\text{nincs megengedett kiáramlási út}}$$

ahol:

Q_{meas} – egy beállítható határérték

PRV; MAN; DRAIN, ha 0, akkor zárva, így az anomália \rightarrow negációval az AND-be

Amennyiben ezt a Boole-algebrai logikát követjük, elérhetjük, hogy nem növeljük meg a fuzzy szabályrendszer komplexitását, így végeredményben növelhetjük a rendszer biztonságát, számítási kapacitás növekedése nélkül.



21. ábra: Egy példa az anomálfigyelés megvalósítására (saját szerkesztés)

A következő táblázatba összefoglaltam, hogy az anomálfigyelő, szivárgást detektáló logikai ágnak köszönhetően milyen új eredményt értem el a modellen:

Szempont	Alap modell	Bővített modell
Üzemszerű helyzetek	kezelve	kezelve
Rejtett szivárgásfigyelés	nem érzékeny rá	érzékeli (GCS2 zárt + áramlás)
Diagnosztikai robusztusság	korlátozott	megnövelt
Emberi interpretálhatóság	jó	kiváló (külön ág az anomáliának)

6. táblázat: Az anomálfigyelő-ággal bővített modell és az alapmodell összehasonlítása (saját szerkesztés)

2.3.2 Szintetikus adatok, a 10 DataSet és a tesztkörnyezet definiálása

A szintetikus adatgenerálást tudományos szempontból először szakirodalmi szinten közelítettem [89][90][111], majd a MATLAB környezetben vizsgáltam meg a gyakorlati megvalósítás lehetőségeit. A szintetikus adatok szerepe egyre jelentősebb a tudományos modellezésben és a validációs eljárásokban, mivel a valós adatokat tartalmazó idősorok gyakran hiányosak, nem nyilvánosak vagy adatvédelmi korlátozások miatt nem használhatók fel. Ezen akadály áthidalására a szintetikus adatok statisztikai jellemzőik révén, megbízhatóan reprezentálják a valós rendszereket, így lehetővé teszik a modellek fejlesztését, validálását és azok összehasonlítását valós adatok nélkül is.

A bemeneti értékek jellemzőinek definiálása:

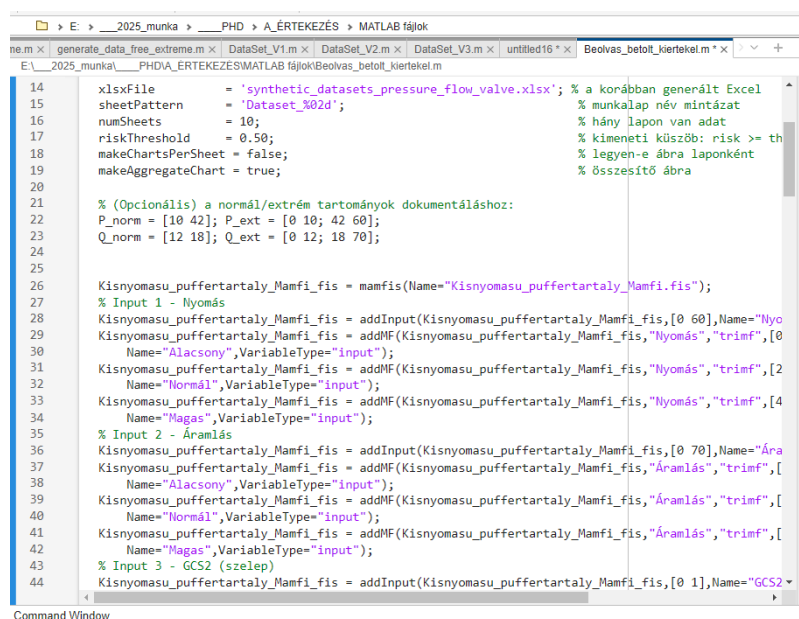
A modellben a nyomást (P) és az áramlást (Q) folyamatos analóg értékekkel reprezentáltam, amelyeket normálosztás alapján generáltam. A két változó között korrelációt alakítottam ki a technológiai kölcsönhatások szemléltetése érdekében (például a nyomás növekedése gyakran az áramlás növekedésével jár együtt). Az üzemi határértékek figyelembevételével a generált véletlen értékeket „clippeléssel” korlátoztam annak érdekében, hogy a nyomás- és áramlásértékek a szimuláció során az adott üzemre jellemző, reális tartományban maradjanak. A szelepállapotok modellezése során egyszerűsítést alkalmaztam: ebben a kutatási fázisban a szelepeket kizárólag a két diszkrét állapotban (nyitott/zárt) vettem figyelembe. Az átmeneti állapotok (részlegesen nyitott/részlegesen zárt állapot) kezelése jelenleg nem képezte a vizsgálatom tárgyát, ugyanakkor a kutatás további szakaszaiban célom a modell kiterjesztése a szelepek áteresztőképességének, mechanikai állapotának és üzemszerű működésének figyelembevételével. A diszkrét állapotokat Bernoulli-eloszlású valószínűségi változókkal reprezentáltam. A valós üzemeltetési körülményekhez való illeszkedés

érdekében a nyomásértékekhez Gauss-zajt adtam. A hosszú, véletlenszerű sorozatokat rövid idejű, blokkokkal egészítettem ki, aminek az oka és célja az extrém helyzetek szimulációs adatainak reprezentálása.

A modellek (Mamdani, TSK, TSK+ACO) teljesítményének objektív és reprodukálható értékeléséhez nem elegendő egyetlen szintetikus adathalmaz. A szakirodalmi forrásokra [89][90][111] támaszkodva, a validáció robusztusságát több, egymástól független adatkészlet eredményének együttes vizsgálata biztosíthatja. Ebből adódóan a vizsgálatok során 10 darab, egyenként 1000 elemű szintetikus „DataSetet” állítottam elő a MATLAB segítségével (22. ábra), amelyek mindegyike tartalmazza a normál üzemállapotok reprezentációját, továbbá egy rövid, extrémállapot-blokkot is. Az extrém blokkok a valós hidrogéntechnológiai környezetben előforduló ritka, de kritikus tranzienseket imitálják. A blokkok adatsoron belüli helyzete és azok jellemzői (amplitúdók, szórások) datasetenként, véletlenszerűen változnak, így a modell érzékenysége és stabilitása különböző, mégis kontrollált scenáriók mellett vizsgálható. A generált adathalmazok mindegyikét egységes feldolgozási lépések követik (pl.: skálázás, üzemi határértékekhez illesztett „clipping” módszerrel), majd a minták a fent ismertetett FIS bemeneteire kerülnek. A kimeneti döntések és a datasethez tartozó referencia („ground truth”) címkék összehasonlításából épül fel a konfúziós mátrix (TP, TN, FP, FN), ezekből pedig számítással kerül megállapításra a négy kockázatdetektálási-arányszám (TPR, FPR, Coverage, SSI) – ezekről

részletesen a következő alfejezetben (2.3.3) írok.

A mutatók és arányok minden datasetre külön-külön kerülnek kiszámításra, de ezek közlése a dolgozat terjedelmi korlátai miatt nem lehetséges, így az aggregált statisztikai eredményeket közlöm dolgozatomban.

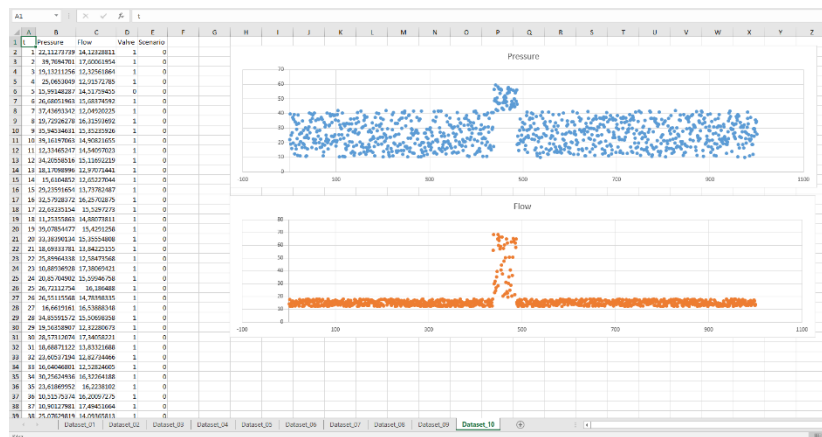


```
14  xlsFile      = 'synthetic_datasets_pressure_flow_valve.xlsx'; % a korábban generált Excel
15  sheetPattern = 'Dataset_002d'; % munkalap név mintázat
16  numSheets    = 10; % hány lapon van adat
17  riskThreshold = 0.50; % kimeneti küszöb: risk >= th
18  makeChartsPerSheet = false; % legyen-e ábra laponként
19  makeAggregateChart = true; % összesítő ábra
20
21  % (Opcionális) a normál/extrém tartományok dokumentálásához:
22  P_norm = [10 42]; P_ext = [0 10; 42 60];
23  Q_norm = [12 18]; Q_ext = [0 12; 18 70];
24
25
26  Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_fis = mamfis(Name="Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi.fis");
27  % Input 1 - Nyomás
28  Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_fis = addInput(Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_fis,[0 60],Name="Nyomás");
29  Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_fis = addMF(Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_fis,"Nyomás","trimf",[0
30  Name="Alacsony",VariableType="input"]);
31  Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_fis = addMF(Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_fis,"Nyomás","trimf",[2
32  Name="Normál",VariableType="input"]);
33  Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_fis = addMF(Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_fis,"Nyomás","trimf",[4
34  Name="Magas",VariableType="input"]);
35  % Input 2 - Áramlás
36  Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_fis = addInput(Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_fis,[0 70],Name="Áramlás");
37  Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_fis = addMF(Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_fis,"Áramlás","trimf",[
38  Name="Alacsony",VariableType="input"]);
39  Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_fis = addMF(Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_fis,"Áramlás","trimf",[
40  Name="Normál",VariableType="input"]);
41  Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_fis = addMF(Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_fis,"Áramlás","trimf",[
42  Name="Magas",VariableType="input"]);
43  % Input 3 - GCS2 (szélep)
44  Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_fis = addInput(Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_fis,[0 1],Name="GCS2");
```

22. ábra: Szintetikus adatgenerálás és DataSet-megadás, forrás: MATLAB

A szintetikus adatok előállításakor, a reprodukálhatóság biztosítása érdekében a beépített pszeudo-véletlenszám generátort használtam, rögzített kezdőmaggal (seed: rng(42)), amely a MATLAB környezetben alapértelmezetten a Mersenne-Twister (MT-19937) algoritmus. Ennek köszönhetően a datasetek minden futtatás alkalmával bitpontosan ugyanazokat az értékeket hozzák létre, így az eredmények teljes mértékben reprodukálhatók. (További adatok: Ezen adatokon túl a használt MATLAB verziója: R2025a, biztosította: Óbudai Egyetem, felhasználó: Szén István, licence: 4xxxxx0, a Fuzzy Logic Toolbox, a számítási környezet (Windows 10 Pro, Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @ 1.60GHz, eszközazonosító: 9xxxxxD-xxxx-xxxC-8xx5-AxxxxxxxE, (x-ek jelentése és oka: adatvédelem – nyilvános dolgozat). A szabályrendszer és a tagsági függvények optimális konfigurációját nem egyetlen adathalmazra optimalizáltam, hanem a „train-validation-test” logika mentén választottam ki. Ezzel biztosítottam, hogy a háttérben működő szabályrendszer bizonyíthatóan a „legjobb” a vizsgált környezetben, és a közölt teljesítménymutatók torzítatlanul tükrözik a rendszer várható on-line viselkedését.

A 23. ábrán, illusztrációként látható az egyik „Dataset” adathalmaz, a két pontdiagramon pedig látszik a normál üzemi működést és az extrém helyzetet reprezentáló véletlenszerű ponthalmaz.



23. ábra: Generált DataSet egyike, nyomás és térfogatáramlás szemléltetése, MS Excel (saját szerkesztés)

2.3.3 A validáció minőségi mutatói.

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

7. Táblázat: Validációs mutatók rövidítése és értelmezése (saját szerkesztés)

Az eredmények és a modellalkotási folyamat objektív értékelése érdekében az empirikus validáció módszerét alkalmaztam. López és munkatársai esettanulmányokon keresztül mutatták be a validáció lényegét [89], míg Frederick és Bowden a Test Validation Summary (TVS) módszert ismertették részletesen, különös hangsúlyt fektetve a predikciós teljesítmény és az arányok értékelésének jelentőségére [90]. Kutatásomban a validáció mérésére minőségi mutatókat definiáltam, ezek leképzéséhez a konfúziós mátrixot használtam, miközben következetesen figyelembe vettem az arányok fontosságát is [90].

N=100		Pozitív	Negatív
		TP (18)	FP (10)
Pozitív			
Negatív		FN (10)	TN (70)

24. ábra: Konfúziós mátrix, a mintapéldára (saját szerkesztés)

Egy példán keresztül mutatom be az egyedi minőségi mutatók (7. táblázat) és az arányok jelentését! Tételezzük fel, hogy a minta szám (N=100), melyből 20 minta valódi veszélyt, 80 minta viszont teljesen üzemszerű jellemzőket reprezentál. A választott minőségi mutatókból képzett arányok, melyek alapján a validációt és az összehasonlítást elvégeztem [89][90][111].

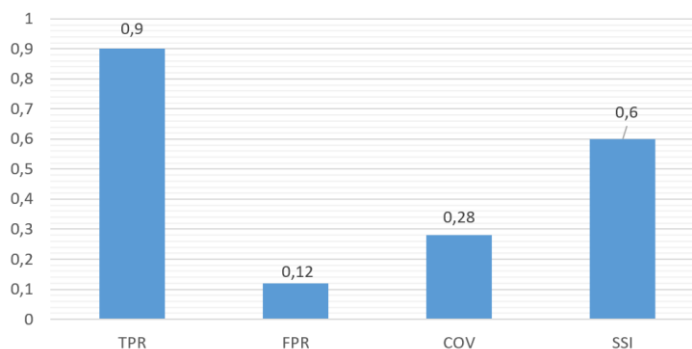
Mutató neve	Jelentés	Képlet	Jelentőség
Találati arány (TPR)	A modell helyesen azonosította a valós kockázatos eseteket.	$\frac{TP}{TP + FN}$	Mennyire érzékeny a modell?
Fals pozitív arány (FPR)	A modell akkor is riasztott, amikor nem kellett volna. „a téves riasztások gyakoriságát mutatja.”	$\frac{FP}{FP + TN}$	Mennyire <u>stabil</u> kerüli-e a vakriasztást?
Biztonsági érzékenységi index (SSI)	Kombinált hatékonysági mutató. „egyidejűleg veszi figyelembe a helyesen és tévesen azonosított kritikus eseteket”	$\frac{TP}{TP + FP + FN}$	A kockázatos minták hány százalékát azonosítja hatékonyan?
Lefedettség (Coverage)	Az érzékelési <u>aktivitás</u> mértéke.	$\frac{TP + FP}{N}$	A vizsgált esetek mekkora részében adott valamilyen riasztást a modell

8. Táblázat: Validációhoz kapcsolódó kockázatdetektálási-arányok és azok értelmezése (saját szerkesztés)

$TPR = \frac{TP}{TP+FN} = \frac{18}{18+2} = \frac{18}{20} = 0,9$	A modell 90% -ban felismeri a veszélyt.
$FPR = \frac{FP}{FP+TN} = \frac{10}{10+70} = \frac{10}{80} = 0,125$	A modell 12,5% -ban tévesen azonosította a veszélyt.
$SSI = \frac{TP}{TP+FP+FN} = \frac{18}{18+10+2} = \frac{18}{30} = 0,6$	A modell a releváns esetek 60% -át azonosította helyesen.
$COV = \frac{TP+FP}{N} = \frac{18+10}{100} = \frac{28}{100} = 0,28$	Az összes eset 28% -át veszélyre „pozitívnak” ítélte.

9. táblázat: Validációhoz kapcsolódó kockázatdetektálási-arányok számítása (saját szerkesztés)

Validációs arányszámok



25. ábra: Validációs, kockázatdetektálási-arányszámok - mintapélda (saját szerkesztés)

A fenti mintaszámítást bemutató modell magas találati aránnyal (90%) képes azonosítani a veszélyes állapotokat, ugyanakkor a mérsékelt hamis pozitív arány (12,5%) és az alacsony lefedettség (28%) azt mutatja, hogy a rendszer inkább „konzervatív döntési stratégiát követ.” A biztonsági érzékenységi index 60%-os értéke azt jelzi, hogy bár a veszélyhelyzetek döntő többségét felismeri, a teljes hatékonyság további finomhangolással javítható.

2.3.4 A Mamdani FIS-el felépített modellem eredményei

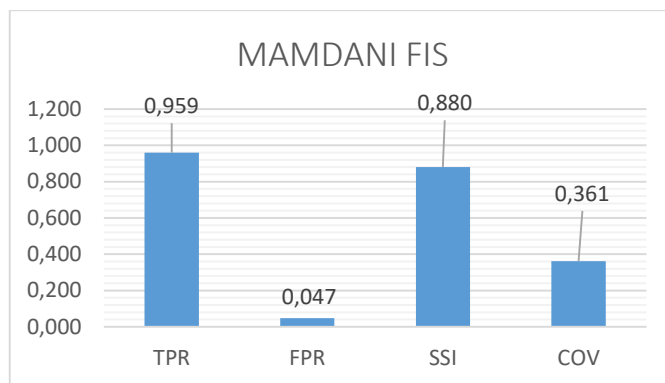
Egy szintetikus adatsor alapján, 1000 mintából, a következő eredményeket kaptam.

Összes minta száma	1000	
Összes pozitív minta → valóban veszélyes	344	
Összes negatív minta → valóban biztonságos	656	
TP	330	ennyi esetben a modell helyesen riasztott valódi veszélyre.
TN	625	ennyi esetben helyesen nem adott riasztást.
FP	31	ennyi esetben a modell tévesen riasztott, pedig nem volt kockázat
FN	14	ennyi veszélyes esetet a modell nem érzékelt

10. táblázat: A modell futásából származó eredmények (saját szerkesztés)

Jellemző	Eredmény	Jelentés
Találati arány (TPR)	≈ 0,959	A valós veszélyek 95,9%-át detektálta a fuzzy modell
Fals pozitív arány (FPR)	≈ 0,047	A modell 31-szer riasztott tévesen, ez 4,7%.
Biztonsági érzékenység (SSI)	0,88	A modell megbízhatóan és biztonságosan működik, a legtöbb valódi veszélyt képes volt azonosítani, kevés téves riasztással.
Fedezet (Coverage)	0,361	Az esetek mindössze 36,1%-ra adott riasztást. A modell a potenciálisan kockázatos állapotok jelentős részét nem aktiválja döntési szinten.

11. táblázat: Mamdani-fuzzy számszerűsített, összehasonlítható eredményei (saját szerkesztés)



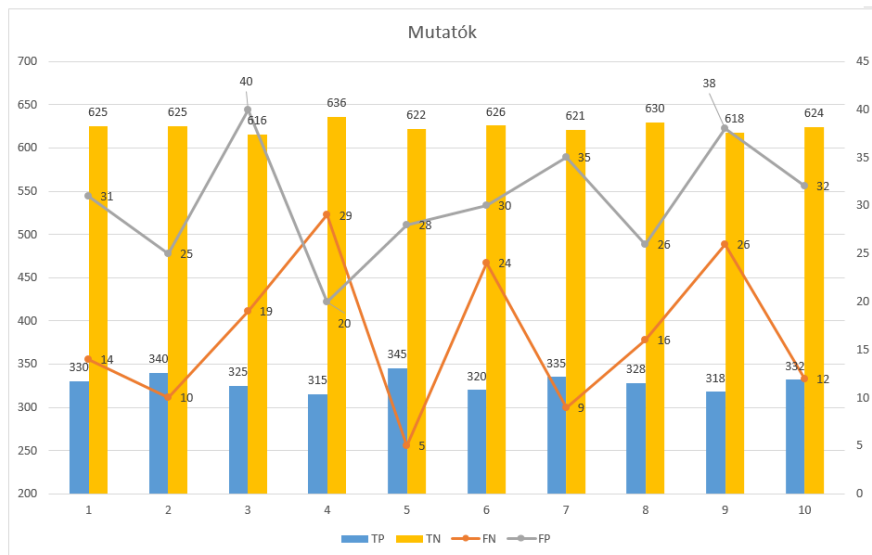
26. ábra: A Mamdani-fuzzy logikával felépített modell kockázatdetektálási-arányszámai (saját szerkesztés)

A Mamdani-fuzzy eredményeinek bemutatása

A Mamdani-fuzzy és HAZOP-modell hidrogéntechnológiai validációjának egyik legfontosabb feladata volt, hogy a modellteljesítményt ne egyetlen adatkészlet alapján, hanem több, egymástól független DataSeten vizsgáljam meg. Ennek érdekében tíz különböző, azonos statisztikai tulajdonságokkal rendelkező adathalmaz került előállításra és kiértékelésre, amelyek mindegyikére kiszámításra kerültek a biztonsági teljesítményt reprezentáló egyedi validációs mutatók, valamint az ezekből számított validációs arányszámok (27. ábra). Az eddigi vizsgálatok célja az volt, hogy feltárhatók legyenek a mutatók variabilitásai, stabilitási jellemzői és reprodukálhatósága is. Ezáltal átfogó képet kapjunk a Mamdani logikára épülő HAZOP kockázatdetektációs tulajdonságának képességeiről, a rendszer megbízhatóságáról és gyakorlati alkalmazhatóságáról.

DataSet sorszám	TP	FN	FP	TN	TPR	FPR	SSI	Coverage
1	330	14	31	625	0,959	0,047	0,880	0,361
2	340	10	25	625	0,971	0,038	0,902	0,365
3	325	19	40	616	0,945	0,061	0,859	0,365
4	315	29	20	636	0,916	0,030	0,906	0,335
5	345	5	28	622	0,986	0,043	0,913	0,373
6	320	24	30	626	0,930	0,046	0,865	0,350
7	335	9	35	621	0,974	0,053	0,892	0,370
8	328	16	26	630	0,953	0,040	0,879	0,354
9	318	26	38	618	0,925	0,058	0,850	0,356
10	332	12	32	624	0,965	0,049	0,892	0,364
Átlag	328,8000	16,4000	30,5000	624,3000	0,9524	0,0465	0,8838	0,3593
Szórás	9,6471	7,9331	6,1146	5,7552	0,0230	0,0094	0,0210	0,0111

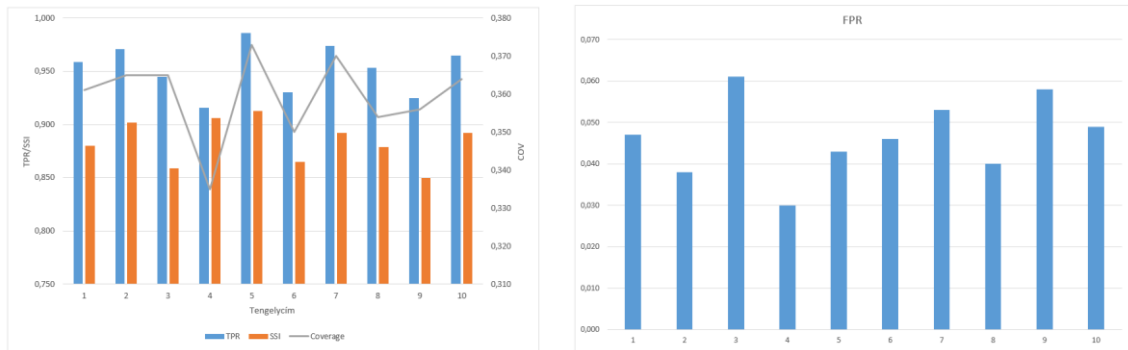
27. ábra: A 10 db, 1000 mintás szintetikus DataSet, Mamdani-FIS eredményei, összevont mutatói (saját szerkesztés)



28. ábra: A konfúziós mátrix mutatói Mamdani-Hazop esetén (saját szerkesztés)

A 28. ábrán a kék oszlopban a True Positive (TP) értéke 315-345 között változik, nagy kilengések nem láthatók, így megállapíthatom, hogy a TP alapján a modell stabilan azonosítja a valódi pozitív esetek döntő többségét. A True Negative (TN) értéke szintén homogén, így kijelenthető, hogy a valódi negatív esetek azonosítása is stabil. A narancsszínű vonal a False Negative (FN), ami nagyobb ingadozásokat mutat. A 4. és az 5. adatsor elemzésében, ez a mutató ugrásszerű eltérést produkál, nagy változással, s ez az érzékenység hirtelen csökkenését reprezentálja. A False Positive (FP) változása nagyon hasonló az FN értékhez, nem tekinthető sem kiemelkedően jónak, sem kiemelkedően rossznak.

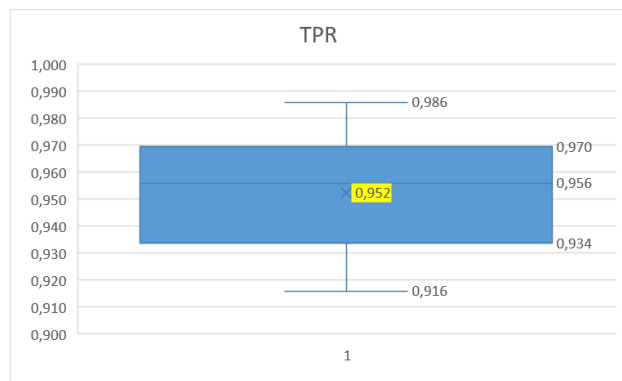
A kapott eredmények alapján kijelenthetem, hogy a Mamdani-HAZOP modell teljesítménye kiegyensúlyozott képet mutat. A helyesen azonosított TP (valódi pozitív) és TN (valódi negatív) esetek száma viszonylag magas, míg a FP (hamis riasztások) és az FN (kihagyott veszélyek) közepes mértékben fordulnak elő. Ez abból adódhat, hogy az optimalizált paraméterezés eredményeként a rendszer a valós kockázatok nagy részét felismeri, de a fuzzy logika bizonytalanságkezelő jellegéből fakadóan nem képes minden esetet hibamentesen besorolni. Megállapíthatjuk, hogy a modell elkerüli a túlzott vakriasztásokat és a kritikus helyzetek többségét is időben detektálja. A teljesítmény, datasetenkénti variabilitása azt mutatja, hogy a modell általánosan robusztus, de bizonyos minták érzékenyebben hatnak az FP és FN értékekre, ami a fuzzy szabályrendszer inherens tulajdonságainak tudható be.



29. ábra: A TPR, SSI és a Coverage (bal oldal) és az FPR (jobb oldal) Mamdani-HAZOP esetén (saját szerkesztés)

A 29. ábra rávilágít arra, hogy a modell érzékenysége (TPR-kék oszlop, az ábra bal oldalán) stabilan magas, minden esetben 0,92 feletti (4. dataset). A biztonsági érzékenységi index (SSI-sárga oszlop, az ábra bal oldalán) jellemzően 0,88 körüli értékeket mutat, de datasetenként kisebb ingadozás figyelhető meg, ami a hamis pozitív és hamis negatív értékek hatásának tulajdonítható. A lefedettség (Coverage – szürke vonal, az ábra bal oldalán) végig szűk tartományban mozgott (0,335-0,375), de nem ideális a mértéke, ezt a tulajdonságot alaposabban szükséges vizsgálni.

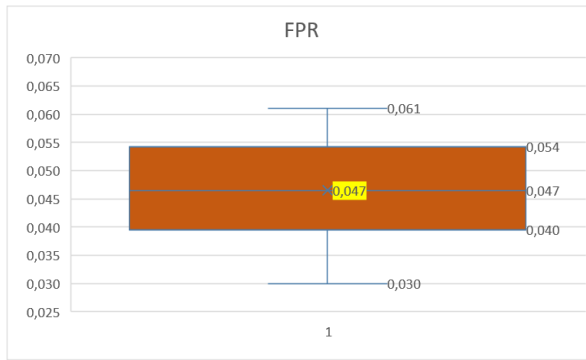
A részletek felderítése érdekében a kockázatdetektálási arányokat ún. boxplot ábrázolás segítségével is megvizsgálom. Az ábrázolás célja egyben ábrázolni az átlagot (sárga jelölés) a mediánt, a minimum és maximum érték jelzése, valamint az első- és a harmadik kvartilist. A találati arány (TPR) eloszlását bemutató boxplot (30. ábra) azt mutatja, hogy a medián érték 0,956, míg az átlag kissé alacsonyabb (0,952). Ez arra utal, hogy a TPR értékei enyhén aszimmetrikus eloszlást mutatnak, néhány datasetben a TPR értéke



30. ábra: Mamdani-FIS, TPR - boxplot (saját szerkesztés)

alacsonyabb volt, ami az átlagot lefelé húzta. A medián magasabb értéke ugyanakkor jelzi, hogy a legtöbb datasetnél a modell érzékenysége stabilan 95% körül alakult.

A hamis pozitív arány (FPR) eloszlását a 31. ábra mutatja. A medián érték 0,047, míg a



teljes tartomány 0,030 és 0,061 közé esik. Az első és harmadik kvartilis (0,040 és 0,054) közötti szűk intervallum arra utal, hogy a modell téves riasztásainak aránya datasetenként csak kis mértékben ingadozik, ami a rendszer stabilitását jelzi.

31. ábra: Mamdani-FIS, FPR - boxplot (saját szerkesztés)



32. ábra: Mamdani-FIS, SSI és Coverage boxplot (saját szerkesztés)

A Biztonsági Érzékenységi Index (SSI) eloszlását a 32. ábra mutatja. Az átlagos érték 0,884, a medián pedig 0,886, ami jelzi, hogy az eloszlás közel szimmetrikus. Az SSI értékek szűk intervallumban (0,85-0,913) mozognak, az interkvartilis tartomány 0,864-0,903 közé esik. Ez arra utal, hogy a modell teljesítménye a különböző datasetekben stabil és megbízható. A legalacsonyabb SSI (0,850) esetében ugyan enyhébb teljesítménycsökkenés tapasztalható, de még ez az érték is elfogadható a biztonságos működés szempontjából.

A Coverage eloszlását a 32. ábra mutatja. Az átlagos érték 0,359, a medián pedig 0,363, ami kissé aszimmetrikus eloszlásra utal. Az értékek 0,335-0,373 közötti tartományban mozognak, az interkvartilis tartomány pedig kifejezetten szűk (0,353-0,366). Ez arra enged következtetni, hogy a modell a különböző adatkészleteken konzisztens módon működik, és az esetek körülbelül egyharmadát minősíti kockázatosnak. Bár ez a stabilitás előnyös, a relatíve alacsony lefedettség arra is rámutat, hogy a rendszer szelektíven aktiválja a riasztásokat, ami bizonyos kockázati állapotok kimaradását eredményezheti.

2.3.5 A Mamdani-HAZOP eredményeinek összefoglalása:

A szakirodalmi kutatás alapján várt eredményeket, az általam épített modell felülmúlta. A modell teljesítménye kifejezetten jó, ami meglátásom szerint nem véletlen, hiszen ez volt a disszertáció alapját képező tanulómodell, így a kialakításra, paraméterezésre és szabályalkotásra szánt idő jelentősen meghaladta a realitásokat, s ennek köszönhető a szabályillesztés pontos volt, a modell pedig könnyedén átlátható, de figyelembe véve a kitűzött célokat és a hidrogénüzemekkel kapcsolatos veszélyeket, kritikával élek a kapott eredményekkel kapcsolatban.

- Bár maga a TPR értéke kifejezetten jó (30. ábra), az FP értéke az összes datasetre vonatkoztatva magas (27-28. ábra). Ez azt jelenti, hogy a hamis riasztások száma nem kellően alacsony. Gyakorlati oldalról vizsgálva, a hamis riasztások magas gyakoriság az operatív személyzet számára fásultságot, fókuszvesztést, dekoncentrátságot és figyelemzavart okozhat. Következmény: az operátorok reakciókészségének csökkenése, növekvő válaszügy. Eredmény: növekszik a rendszer meghibásodásának vagy a balesetek bekövetkezésének valószínűsége.
- A Coverage értéke ugyan stabil, de tartósan alacsony maradt, ami arra utal, hogy a szabálybázis és/vagy a tagsági függvények struktúrája nem képes minden releváns kockázatot lefedni.
- Ahogyan fent már jeleztem, a FN értéke nem kifejezetten magas, de 1000 mintából 5-29 között változik az értéke. Ez azért fordulhat elő, mert a modell „kompromisszumot kötött” a hamis riasztások csökkentése érdekében, de ennek ára az, hogy néhány valós kockázat detektálása elmarad. Tekintettel, hogy a rendszert specifikusan hidrogénüzemre kívánom optimalizálni, ez az érték nem fogadható el.
- A tagsági függvények és a szabálybázis finomhangolása még egy ilyen kisméretű modell esetén is időigényes. Egy komplexebb, dinamikus változásokkal terhelt rendszer esetén a feladatra fordított idő a jelenlegi tapasztalatom alapján nem becsülhető meg reálisan, de feltételezésem szerint emberi léptékben nem végezhető el kompromisszummentesen és maradéktalanul a paraméterezés.

Összességében a Mamdani-fuzzy logikára épülő HAZOP modell eredményei igazolták, hogy a rendszer képes magas érzékenységet ($TPR > 0,92$) és stabil biztonsági teljesítményt elérni. Ugyanakkor a hamis riasztások viszonylag magas gyakorisága, a Coverage mutató tartósan alacsony értéke, valamint a kihagyott pozitív

esetek jelenléte azt mutatja, hogy **a modell teljesítménye felülről korlátos**. A tagsági függvények és a szabálybázis paraméterezése bár jelentős erőforrás-ráfordítással optimalizálható, a kapott eredmények arra utalnak, hogy a Mamdani-típusú fuzzy rendszerek nem alkalmasak on-line kockázatdetekciós feladatok, biztonságkritikus környezetben történő alkalmazására. **Ebből következik, hogy indokolt a TSK-alapú megközelítések vizsgálata.**

2.4 A kisnyomású, HAZOP tartálymodell, TSK megközelítéssel

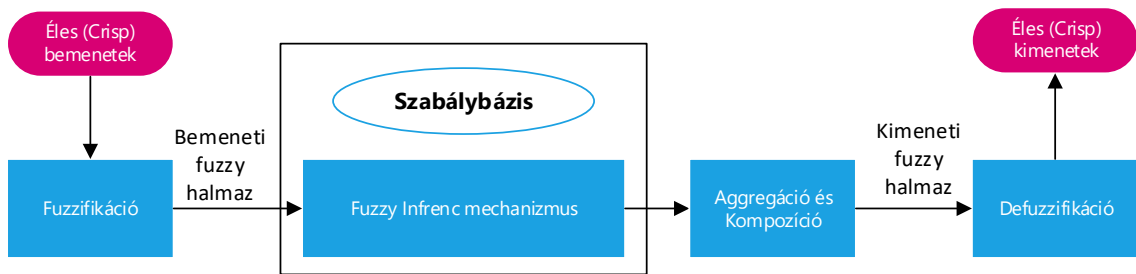
A következőkben a 2.3. fejezetben bemutatott, kisnyomású tartálymodellt, a TSK-fuzzy keretrendszerbe helyezem át, hogy lehetővé váljon a két megközelítés hidrogénipari környezetben történő közvetlen összehasonlítása, a bemutatott metrikák alapján.

2.4.1 Fuzzy rendszerek koncepcionális és alkalmazásbeli összehasonlítása

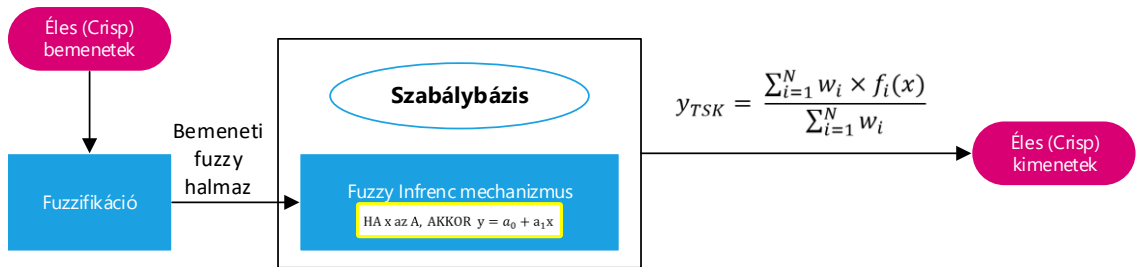
Már a dolgozat elején is utaltam arra, hogy a HAZOP-módszertan szövegesen megfogalmazott szabályrendszere természetes módon illeszkedik a Mamdani-típusú fuzzy rendszerek nyelvi alapú megközelítéséhez. Ez a koncepcionális összhang kutatási szempontból indokoltá és logikussá tette a Mamdani-fuzzy keretrendszer alkalmazását az eddigi kutatásokban[49][50][53]. A HAZOP-módszertan és a fuzzy logika integrációja eddig elsősorban a feldolgozóipari alkalmazásokban jelent meg; a hidrogénteknológia területén e megközelítés alkalmazásáról azonban tudomásom szerint még nem születtek publikált eredmények. Az eddig elért eredményeim, valamint a fuzzy rendszerek mélyebb megismerése arra ösztönzött, hogy vizsgálataimat a Takagi-Sugeno-Kang (TSK) fuzzy rendszerek irányába is kiterjesszem. TSK-modell szerkezeti sajátosságai révén számítási hatékonyságban és analitikus kezelhetőségben lényeges előnyt biztosítanak. A két megközelítés közötti fő különbség a szabályok konzekvens részében jelenik meg: míg a Mamdani-modell nyelvi változókat és fuzzy halmazokat alkalmaz, addig a TSK-modell explicit matematikai függvényekkel operál, amelyek folyamatos és analitikusan kezelhető kimenetet biztosítanak. Ez különösen előnyös olyan mérnöki problémákban, ahol a gyors numerikus kiértékelés vagy a függvények további matematikai feldolgozása (pl. optimalizáció, stabilitásvizsgálat) szükséges.

A TSK-rendszerek numerikus kimenete lehetővé teszi a defuzzifikáció és a komplex aggregációs műveletek elhagyását, ami jelentősen növeli az on-line adatfeldolgozás sebességét és megbízhatóságát. A kimenetek közvetlen numerikus formája továbbá jól illeszkedik a metaheurisztikus optimalizációs eljárásokhoz, amelyek a szabálybázis és

súlyparaméterek adatvezérelt finomhangolását teszik lehetővé. Míg a Mamdani-megközelítés erőssége a szemantikus átláthatóság, a TSK-rendszer alkalmazása nagyobb pontosságot, számítási hatékonyságot és adaptivitást biztosít biztonságkritikus, valós idejű ipari környezetekben..



33. ábra: Mamdani-fuzzy folyamatára [65] (saját szerkesztés)



34. ábra: TSK-fuzzy folyamatára [65] (saját szerkesztés)

A fenti két ábrán a két rendszer grafikus vázlata látható. A Mamdani- és TSK-fuzzy rendszerek közös kiindulópontja, hogy a crisp bemeneteket fuzzy tagsági függvényekkel írják le. A Mamdani-modellben a szabályok következményei is fuzzy halmazok, ezért a feldolgozás aggregációt, kompozíciót és végül defuzzifikációt igényel, amely a fuzzy kimenetet éles értéké alakítja. A TSK-rendszer szabályainak feltételrésze hasonló felépítésű, azonban a konzekvens rész explicit matematikai függvényt tartalmaz. A szabályok aktiválása után a kimenet a tagsági fokok szerinti súlyozással közvetlenül numerikus formában kapjuk meg, defuzzifikáció és kimeneti fuzzy halmazok aggregációja nélkül. Ez a modell, számítási szempontból hatékonyabb [65-66][119-120].

Mamdani-fuzzy számítási lépések, példákkal	TSK fuzzy számítási lépések, példákkal
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 $\mu_{akt} = \min(\mu_{Magas}(x1), \mu_{Alacsony}(x2))$	2B - Szabály aktiválás - szabály erőssége: $w_k = y_i^{(1)}(x1) \times y_j^{(2)}(x2)$
3A - Kimeneti szabály leképezése pl.: Nagy kockázat	3B - Szabály kimenetének számítása: $z_k = a_1^{(k)}(x1) + a_2^{(k)}(x2) + c^{(k)}$
4A - Aggregáció, itt több szabály eredményét egyesítjük $\mu_{outp(y)} = \max(\mu_1(y1), \mu_2(y2) \dots)$	4B - Súlyozottátlag-képzése: $y^* = \frac{\sum_{k=1}^N w_k \times z_k}{\sum_{k=1}^N w_k}$
5A - Defuzzifikáció, pl.: súlyozott középpont. $y^* = \frac{\int y \times \mu_{outp(y)} dy}{\int \mu_{outp(y)} dy}$	
Jellemző: érthető, de számításigényes, így valós idejű működésre korlátozott	Jellemző: Lineáris algebrai számítások, gyors, kompakt, valós idejű rendszerekbe illeszthető

12. táblázat: Mamdani- és TSK-fuzzy összehasonlítása, [65][66][119] [120] (saját szerkesztés)

Tulajdonság	Mamdani-fuzzy	TSK-fuzzy
Szabálykimenet típusa	Nyelvi	Numerikus
Defuzzifikáció szükséges?	Igen	Nem
Kimeneti folytonosság	Diszkrét	Folytonos
A kimenet deriválható	Nem	Igen
Automatizálhatóság	Korlátozott	Teljes mértékben
Valós idejű alkalmazás	Korlátozott	Alkalmas

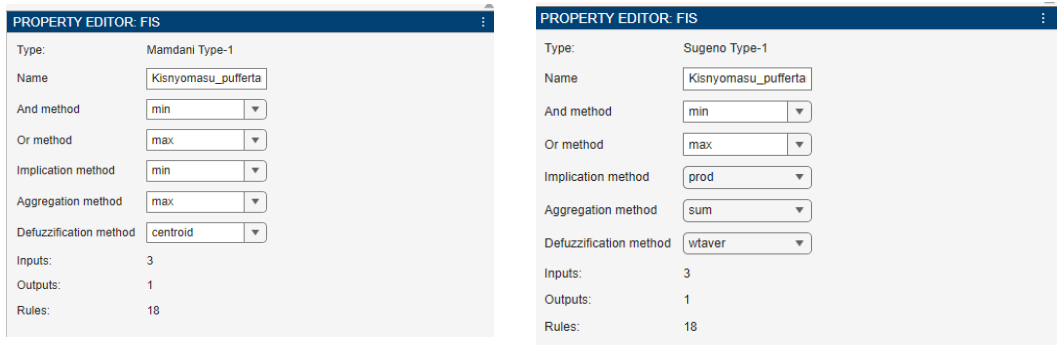
13. táblázat: Mamdani- és TSK-fuzzy összehasonlítása. [65][66][119] [120] (saját szerkesztés)

2.4.2 A Mamdani- és TSK-fuzzy közötti strukturális megfeleltetés

Első hipotézisem vizsgálatához a korábban ismertetett Mamdani-fuzzy HAZOP-modell strukturáját követve, MATLAB-ban elkészítettem a TSK-alapú HAZOP-modellt is. A két modell felépítése azonos szervezőelveken alapul: megegyeznek a bemeneti változók, a tagsági függvények és a szabálybázis logikája. Eltérés kizárólag a TSK-rendszer konzekvens-függvény alapú formalizmusa miatt jelentkezik. A modell mérete lehetővé tette a kezdeti súlyok manuális beállítását, mivel egy három bemenetű rendszer még átlátható és hangolható.

2.4.3 A TSK-fuzzy implementálása a Mamdani-HAZOP modellre

A 33. és 34. ábra alapján a TSK-fuzzy modellezés és Mamdani-fuzzy modellezés első lépései lényegében megegyeznek egymással. Ahogyan az összehasonlításban is írtam, a fő különbség a szabályok konzekvens részében jelentkezik. A TSK esetén, az implikáció típusa itt azt jelenti, hogy hogyan képezzük a szabály súlyát. A 12. táblázatban is látható, hogy míg a Mamdani-fuzzy esetén végbemegy az aggregáció és a defuzzifikáció, addig a TSK-fuzzy esetén valójában egy súlyozottátlag-képzés történik. Az aggregáció a TSK esetén valójában egy súlyozott összeg a szabálykimenetekből, látható a 35. ábrán a „sum” jelölés. A defuzzifikáció pedig egy súlyozott átlag (wataver → weighted average).



A

Mamdani-fuzzy esetén a centroid defuzzifikáció:

35. ábra: MATLAB: Property Editor (Fuzzy Logic Designer) - bal oldal: MAMDANI, jobb oldal: TSK

$$y = \frac{\int y \times \mu_{outp}(y) dy}{\int \mu_{outp}(y) dy}$$

A TSK-fuzzy esetén a súlyozottátlag-képzés:

$$y = \frac{\sum_{k=1}^N w_k \times z_k}{\sum_{k=1}^N w_k}$$

ahol:

w_k = a szabály aktiváltsági foka,

z_k = a szabály konzekvensének értéke

$$w_k = y_i^{(1)}(x_1) \times y_j^{(2)}(x_2)$$

$$z_k = a_1^{(k)}(x_1) + a_2^{(k)}(x_2) + c^{(k)}$$

A HAZOP-modellem szempontjából:

Bemenetek	Jellemző	Paraméter
x_1	Nyomás (bar)	alacsony/normál/magas
x_2	Áramlás	alacsony/normál/magas
x_3	GCS2 - szelep	0: zárt, 1: nyitott

14. táblázat: TSK alapú HAZOP-modellem bemeneti változói (saját szerkesztés)

A TSK-fuzzy esetén megjelenik a három bemeneti változó (x_1, x_2, x_3), majd megtörténik a súlyokkal kombinált lineáris egyenlet kiszámítása. Az egyenlet eredménye pedig egy numerikus érték, szemben a Mamdani rendszerrel, ahol nyelvi változók állnak rendelkezésünkre.

Típus	Antecedens-tag	Konzekvens-tag
Mamdani	IF Nyomás IS Magas AND Áramlás IS Alacsony AND GCS2 IS Zárt	THEN Kockázat IS Nagy
TSK	IF Nyomás IS Magas AND Áramlás IS Alacsony AND GCS2 IS Zárt	<i>THEN Kockázat = $a_1 \cdot \text{Nyomás} + a_2 \cdot \text{Áramlás} + a_3 \cdot \text{Szelepállapot} + \text{Konstans}$</i>

15. táblázat: Mamdani és TSK esetén az antecedens- és konzekvens tagok (saját szerkesztés)

A súlyozottátlag-képzéséből adódóan, a TSK rendszer globális kimenete közvetlenül numerikus formában adódik. Dolgozatomban szempontjából a Mamdani- és a TSK-megközelítés közötti különbség kulcsfontosságú. Míg a Mamdani-modell jól illeszkedik a HAZOP-módszertan szöveges szabályrendszeréhez, a TSK-rendszer lehetővé teszi a kockázat numerikus, 0–1 vagy 0–100 (%) skálán történő közvetlen meghatározását. Ez nemcsak a kiértékelés sebességét növeli, hanem megteremti a kapcsolatot a metaheurisztikus optimalizációs és on-line kockázatelemzési eljárásokkal is.

A szakirodalomban a HAZOP fuzzy integrációja eddig főként Mamdani-típusú megközelítésekre korlátozódott, a TSK-alapú koncepciót azonban nem vizsgálták. Ennek oka, hogy a korábbi kutatások elsősorban a Mamdani-rendszer nyelvi-szemantikai előnyeit hangsúlyozták. Az általam kidolgozott TSK-fuzzy HAZOP-modell ezért újszerű tudományos eredmény, amely hozzájárulhat a hidrogéntechnológiai és más biztonságkritikus rendszerek adatvezérelt, valós idejű kockázatfelügyeletéhez.

A TSK-fuzzy rendszerek gyakorlati alkalmazásának legnagyobb kihívása a súlyparaméterek meghatározása. Minden szabályhoz külön lineáris egyenlet tartozik, így a bemeneti dimenziók növekedésével a paraméterszám exponenciálisan emelkedik. Példaként említem most meg, hogy egy tíz bemenetet tartalmazó rendszer, három-három fuzzy taggal változónként, már 59 049 (3^{10}) szabály kombinációját igényli, ami 649 539 (10 db súlyparaméter + 1 konstans $\rightarrow 59\,049 \times 11$) súlyérték manuális beállítását jelentené. Ez a gyakorlatban kivitelezhetetlen feladat, különösen valós ipari környezetben, ahol a rendszer működése nem teszi lehetővé az azonnali visszacsatolást az egyes súlyok hatásáról, és a döntési következmények akár hónapokkal vagy évekkel később jelentkeznének. Nehezíti a helyzetet, hogy a bemeneti változók közötti hatások és súlyok nem lineárisak, azaz a nyomás súlya az áramlás és a szelepállapot függvényében

más és más módon befolyásolja a kockázati szintet. Ilyen esetekben a szakértői intuíció, nem alkalmas nagy dimenziójú, komplex rendszerek súlyainak precíz és optimalizált meghatározására.

2.4.4 A TSK konzekvens tagjában szereplő súlyparaméterek beállítása

A TSK-fuzzy HAZOP modell konzekvens részében szereplő súlyparaméterek értékei a kockázati kimenet formálásának kulcsfontosságú elemei. Ezek a paraméterek egyfelől numerikus formában reprezentálják a különböző bemeneti változók kockázatra gyakorolt hatását, másfelől lehetővé teszik a rendszer viselkedésének finomhangolását. A paraméterek meghatározásánál alapvető szempont volt, hogy a fizikai folyamatok mérnöki logikája és a biztonságkritikus követelmények egyaránt tükröződjenek: a nyomás növekedését pozitív előjelű súly modellezi, az áramlás esetében pedig negatív súly fejezi ki a kockázatsökkentő hatást. A szelepp állapot szintén kiemelt tényező, amely zárt helyzetben a kockázat növeléséhez, nyitott helyzetben annak csökkentéséhez vezet. A szivárgás jelenléte magas pozitív súllyal került beépítésre, ezzel is hangsúlyozva a folyamatbiztonsági kockázat jelentőségét. A konstans tag bevonása pedig azt szolgálja, hogy a modell soha ne adjon teljes biztonsági (nulla kockázati) visszajelzést.

Jellemző	Beállított súly	Hatás
Nyomás	+0,7	A pozitív előjel a nyomás súlyában, növeli a kockázatot, egységnyi nyomásnövekedés 0,7 egységnyi kockázatsúlyozást okoz.
Áramlás	-1,8 (szándékosan túlsúlyozott állapot)	A negatív előjelű súly, itt azt jelenti, hogy ha nő az áramlás, csökken a kockázat. Magas áramlás esetén valószínű, hogy nincs torlódás, ezért az általam felvázolt logikában nem alakul ki túlnyomás. A szám abszolútértéke nagy, így az áramlás gyorsan kompenzálhatja a nyomást.
Szelepp állapot	$+0,8 \cdot (1 - GCS2)$	A súly pozitív előjelű, a szelepp állapot kritikus fontosságú a rendszer nyomása szempontjából. Állapot: 0 = zárt, 1 = nyitott <ul style="list-style-type: none"> • Ha zárt: $(1 - GCS2)$: $1 - 0 = 1 \rightarrow$ növeli a kockázatot • Ha nyitott: $(1 - GCS2)$: $1 - 1 = 0 \rightarrow$ csökkenti a kockázatot
Szivárgás	+1,2	Ha az anomáliadetektálás aktív, akkor a szivárgás jelentősen növeli a kockázatot.
Konstans	+0,1	A paraméterezés során arra törekedtem, hogy a modell (mint kritikus biztonságú ipari létesítmény) arra törekedtem, hogy semmilyen körülmények között NE adjon teljes biztonsági visszajelzést, s erre a konstans választása egy ideális lehetőség (pl.: emberi tényező, korábbi hibák)

16. táblázat: TSK - súlyok és azok jelentése

Szándékos túlsúlyozás és annak hatása:

Formális képlet:

IF Nyomás IS Magas AND Áramlás IS Alacsony AND GCS2 IS Zárt THEN →

$$\text{Kockázat} = 0,7 \times x_1 - 1,8 \times x_2 + 0,8 \times (1 - x_3) + 1,2 \times 1 + 0,1$$

Normalizálást követően a fenti képlet:

$$\text{Kockázat} = 0,7 \left(\frac{\text{nyomás érték}}{60} \right) - 1,8 \left(\frac{\text{áramlás érték}}{70} \right) + 0,8 \left(1 - \frac{\text{GCS2}}{100} \right) + 1,2 \times 1 + 0,1$$

majd a tartománygarancia biztosítás érdekében a számítás végén egy tartomány ellenőrzés és

$$\min(\max(\text{Kockázat}, 0) 1) \text{clamp}$$

$$\text{clamp}(x; a, b) = \begin{cases} a & \text{ha } x < a \\ x & \text{ha } a \leq x \leq b \\ b & \text{ha } x > b \end{cases}$$

Vagyis ha a kockázati érték kisebb mint az alsó határ, akkor beállítjuk az alsó határra, ha nagyobb mint a felső határ, akkor a felső határra állítjuk, ha a két határérték között van, akkor változatlanul hagyjuk. A fenti példában egyértelműen (szándékos torzítás) látható, hogy az áramlás (x_2) növekedésének túl nagy kockázatcsökkentő ereje van (-1,8). Ez ahhoz vezethet, hogy a rendszer túlzott módon alulértékeli a kockázatot még akkor is, ezt teszi egy ilyen paraméterkészlet mellett, ha a nyomás magas és a szelep zárva van. Ez különösen akkor lehet veszélyes, ha például szivárgás esetén az áramlás értéke elnyomja a többi veszélyt jelentő tényezőt.

2.4.5 Konzekvens tagok paraméterérzékenységi próbája

A MATLAB alapú TSK modellezés kezdeti szakaszában a vizsgálatok két eltérő megközelítésben valósítottam meg, s az így szerzett tapasztalatok szolgálták alapul a végleges súlyparaméter-készlet meghatározásához.

- A bemeneti változók értékét rögzítettem, miközben egy adott súlyparaméter értékét változtattam,
- A másik módszerben scenárióalapú számításokat végeztem, amelyek tipikus üzemi állapotok és lehetséges kockázati helyzetek elemzésére épültek, de az áramlási súlyparamétert szándékosan túlsúlyozott állapotba helyeztem és annak értéke (-1,8) a próba során nem változik.

A. Súlyparaméter-érzékenység fix áramlási értékek mellett.

Ezen súlyparaméter-érzékenységi vizsgálat során a bemeneti változókat fix értéken tartottam, és kizárólag az áramlás súlyparaméterét módosítottam. A vizsgálat célja annak feltárása, hogy a kimeneti kockázati érték milyen mértékben és milyen irányban változik

az áramlás súlyának módosítása esetén. Az alábbi esetben egy kifejezetten nagy kockázattal (nagy nyomás, zárt szelep és mégis jelentős áramlás) járó helyzetet állítottam be, így minden esetben a kockázat értékének (clamp nélkül) 1 felett kellene adódnia.

Számítási értékek	
Nyomás [barg] - x_1	53,7 (max.: 60)
Nyomás súlyparaméter - a_1	+0,7
Áramlás [kg/h] - x_2	22,1 (max.: 70)
Áramlás súlyparamétere - a_2	A vizsgálat tárgya
Szelep (GCS2) - zárt állapot - x_3	0
A GCS2 súlyparamétere - a_3	+ 0,8·(1 - GCS2)
Konstans	+ 0,1
Szivárgás	nincs

17. táblázat: TSK, Fix bemeneti érték a próba súlyparaméterekhez (saját szerkesztés)

$$\begin{aligned}
 \text{Kockázat} &= a_1 \frac{x_1}{60} + a_2 \frac{x_2}{70} + 0,8 \left(1 - \frac{x_3}{100}\right) + c = \\
 &= 0,7 \frac{53,7}{60} + a_2 \frac{22,1}{70} + 0,8 \left(1 - \frac{0}{100}\right) + 0,1 =
 \end{aligned}$$

Áramlási súlyparaméter - a_2	
túlsúlyozott	$a_2 = -1,8$
normál	$a_2 = -1,0$
alulsúlyozott	$a_2 = -0,2$

18. táblázat: Fix bemeneti paraméter mellett a súlyparaméter változtatása (saját szerkesztés)

$$\text{Kockázat}_1 = (0,7 \times 0,895) + (-1,8 \times 0,316) + (0,8 \times 1) + 0,1 = 0,9577$$

$$\text{Kockázat}_2 = (0,7 \times 0,895) + (-1 \times 0,316) + (0,8 \times 1) + 0,1 = 1,2105$$

$$\text{Kockázat}_3 = (0,7 \times 0,895) + (-0,2 \times 0,316) + (0,8 \times 1) + 0,1 = 1,463$$

Súlyozás	Kockázat értéke	Jelentés
Túlsúlyozott áramlás: $a_2 = -1,8$	0,958	Az áramlás negatív súlya csökkenti a kockázati értéket → alacsonyabb kockázat mint a realitás.
Optimális súlyozású áramlás: $a_2 = -1$	1,211	Magas áramlás és magas nyomás → életszerű kockázati szint.
Alulsúlyozott áramlás: $a_2 = -0,2$	1,463	Magas kockázati érték az áramlásnak szinte nincs hatása a kockázat mértékére.

19. táblázat: A paraméterérzékenység I. eredményei (saját szerkesztés)

Belátható, hogy az ilyen fuzzy rendszerek hatékony és megbízható hangolásához automatizált optimalizálási módszerekre van szükség, hiszen a súlyparaméterezés

alapvetően befolyásolja a rendszer döntési konzisztenciáját. Az általam felépített modell összesen 18 szabályt tartalmaz, 3db jól értelmezhető és emberi figyelemmel is követhető, ám az ipari létesítmények esetén a szabálybázis nem vagy nagyon nehezen lenne emberi képességekkel átlátható, így a következő fejezetben részletesen kitérek a súlyparaméterek metaheurisztikus optimalizációs eljárására. 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 a biztonságkritikus alkalmazások - például hidrogénalapú energetikai rendszerek - esetében is megbízható és prediktív megoldást nyújtanak.

B. Súlyparaméter-érzékenység vizsgálat, változó bemeneti értékek (szcenáriók) mellett, de fixált és túlsúlyozott áramlási súlyparaméter.

Az „A” esetben a bemeneti változók értékét fixen tartottam, és kizárólag egy adott súlyparamétert változtattam, hogy feltárjam annak hatását a kimeneti kockázati értékre. A „B” esetben ezzel ellentétes logikát alkalmaztam: a súlyparamétereket rögzítettem, miközben a bemeneti változók értékeit módosítottam annak érdekében, hogy elemezni lehessen, miként befolyásolja a különböző üzemállapotok változása a modell viselkedését. A két vizsgálati stratégia kiegészíti egymást. Tekintettel arra, hogy a számítási módszertant fent részletesen bemutattam, e helyen már kizárólag a vizsgálatok eredményeit közlöm táblázatos formában.

Szcenário	Nyomás (P) [barg]	Áramlás (F) [kg/h]	Szelepállapot (V)	Szivárgás indikátor (L)	Kockázat számított	Kockázat (clamp)
Extrém magas P, alacsony F, Zárt G, L-igaz	55	10	0	1	2,485	1
Magas P, Közepes F, részben zárt G, L-0	45	30	20	0	0,494	0,494
Alacsony P, magas F, nyitott szelep, nincs szivárgás	20	60	100	0	-1,21	0
Üzemzavar állapot!!! Extrém magas P, nagyon magas F, zárt szelep, nincs szivárgás jelzés	55	65	0	0	-0,13	0
Normál P, közepesen magas F, részben nyitott szelep, nincs szivárgás	30	35	60	0	-0,13	0

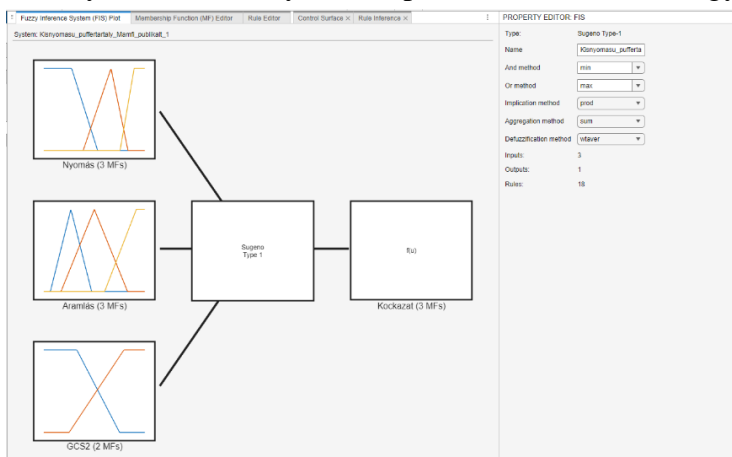
20. táblázat: A paraméterérzékenység II. eredményei (saját szerkesztés)

A fenti táblázat eredményei egyértelműen rámutatnak arra, hogy még nyilvánvalóan üzemzavaros állapotok esetén is előfordulhat olyan súlyparaméter-beállítás, amely torzítja a modell kimenetét, és a valós kockázati szintet alulértékeli. Ez szélsőséges

esetben ahhoz vezethet, hogy a rendszer nem generál időben riasztást, holott a folyamatbiztonság szempontjából ez indokolt lenne. Mindez alátámasztja, hogy a súlyparaméter megfelelő megválasztása a TSK-fuzzy alapú HAZOP modell kialakításában kritikus fontosságú.

2.4.6 A TSK-alapú HAZOP modell felépítése a MATLAB-ban

Amint azt a 2.4.2 fejezetben ismertettem, a Mamdani- és a TSK-modell lehető legpontosabb megfeleltetésére törekedtem annak érdekében, hogy az összehasonlítás érvényes és tudományos szempontból is elfogadható legyen. A fenti ábrán a TSK-modell



struktúrája látható három bemeneti változóval, Sugeno-típusú FIS formájában (a MATLAB sajátossága, hogy a TSK - Takagi-Sugeno-Kang - elnevezésből a Sugeno nevet használja), 18 szabály alkalmazásával.

36. ábra: A TSK-alapú HAZOP modell felépítése a MATLAB rendszerben, forrás: MATLAB R2025a (saját szerkesztés)

Látható a 38. ábrán, hogy a kimenet lineáris típusal reprezentált, a paraméterkészlete numerikus érték, vagyis a kimenet közvetlenül számolható képletből adódik, nincs szükség nyelvi kategóriákra és defuzzifikációra.

PROPERTY EDITOR: OUTPUT		
Name	Kockázat	
Range	[0 1]	
Number of MFs:	3	
<input type="button" value="Evenly Distribute MFs"/>		
Name	Type	Parameters
Lin_Risk_1	Linear	[0.0067 0.0036 0.001 0.1]
Lin_Risk_2	Linear	[0.0025 0.0079 -0.001 0.15]
Lin_Risk_3	Linear	[0.0092 0.0014 0.0005 0.05]

37. ábra: MATLAB, TSK-fuzzy kimeneti paraméterei (saját szerkesztés)

2.4.7 Összefoglalás: A TSK alapú HAZOP eredményeinek bemutatása

A kutatás során szerzett modellezési tapasztalataim, lehetővé tették a szabálybázis optimalizálását és a Mamdani-fuzzy rendszeren végzett vizsgálatok kiterjesztését a TSK logikára. A folyamatban kulcsszerepet játszottak a paraméterérzékenységi vizsgálataim (2.4.4-2.4.5 fejezet) és a számítások során nyert tapasztalataim, valamint a korábban bemutatott szintetikus adatgenerálás eredményei (2.3.2 fejezet). A Mamdani rendszerben alkalmazott tíz szintetikus adatsort integráltam a TSK-fuzzy modell bemeneteire, amellyel biztosítottam az objektív és összehasonlítható elemzést. A MATLAB

környezetben, a Fuzzy Logic Toolbox alkalmazásával finomhangoltam a tagsági függvényeket és a szabálybázis szerkezetét. Ennek eredményeként a TSK-modell - a Mamdani modellel összevetve - szignifikánsan kiegyensúlyozottabb teljesítményt mutatott. Az elért eredményeket a következő táblázat és ábrák foglalják össze, amelyek alapján, az első hipotézisemhez kapcsolódóan megfogalmazom új kutatási eredményeim.

MAMDANI								
DataSet sorszám	TP	FN	FP	TN	TPR	FPR	SSI	Coverage
1	330	14	31	625	0,959	0,047	0,880	0,361
2	340	10	25	625	0,971	0,038	0,902	0,365
3	325	19	40	616	0,945	0,061	0,859	0,365
4	315	29	20	636	0,916	0,030	0,906	0,335
5	345	5	28	622	0,986	0,043	0,913	0,373
6	320	24	30	626	0,930	0,046	0,865	0,350
7	335	9	35	621	0,974	0,053	0,892	0,370
8	328	16	26	630	0,953	0,040	0,879	0,354
9	318	26	38	618	0,925	0,058	0,850	0,356
10	332	12	32	624	0,965	0,049	0,892	0,364
Átlag	328,800	16,400	30,500	624,300	0,952	0,047	0,884	0,359
Szórás	9,647	7,933	6,115	5,755	0,023	0,009	0,021	0,011

Takagi-Sugeno-Kang								
DataSet sorszám	TP	FN	FP	TN	TPR	FPR	SSI	Coverage
1	559	13	8	420	0,977	0,019	0,892	0,567
2	552	20	11	417	0,965	0,026	0,879	0,563
3	560	12	7	421	0,979	0,016	0,896	0,567
4	555	17	9	419	0,970	0,021	0,884	0,564
5	561	11	10	418	0,981	0,023	0,893	0,569
6	554	18	6	422	0,969	0,014	0,890	0,560
7	557	15	12	416	0,974	0,028	0,881	0,569
8	553	19	9	419	0,967	0,021	0,882	0,562
9	558	14	11	417	0,976	0,026	0,885	0,569
10	556	16	8	420	0,972	0,019	0,886	0,564
Átlag	556,500	15,500	9,100	418,900	0,973	0,021	0,887	0,565
Szórás	3,028	1,912	1,912	3,028	0,005	0,005	0,006	0,003

38. ábra: Teljesítménymérési mutatók MAMDANI- és TSK-fuzzy esetén (Saját szerkesztés)

Az előző ábrán, a nyers adatokon kívül két fontos leíró statisztikai mutatót (átlag és szórás) már fel is tüntettem, melyeket folyamatosan figyeltem az alap adatfeldolgozás során is.

- Az átlag megmutatja, hogy a modell tipikusan milyen értékeket ad (pl.: TSK átlagos TPR-értéke: 0,973, míg a Mamdani esetében ugyanezen érték: 0,952, tehát a TSK a TPR átlag szempontjából pontosabb.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

- A szórás jelzi a stabilitást, konzisztenciát. Ha egy modell szórása kisebb, akkor kevésbé ingadozik a teljesítménye a különböző adatállományokon, vagyis megbízhatóbb, robusztusabb.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Az eredmények értékelése során a fenti alapstatisztikai mutatók mellett olyan leíró jellemzők alkalmazása mellett döntöttem, melyek a középértékek és a szóródás komplexebb értelmezését is lehetővé teszik, így a következő jellemzőket is felhasználtam az elemzéshez:

- medián: a középső értéket jelöli, amely kevésbé érzékeny a szélsőértékekre, így robusztus képet ad a tipikus teljesítményről. A minta értékeit növekvő sorrendbe rendeztem, majd alkalmaztam a következő képletet (páros számú minta esete):

$$\text{Medián} = \frac{x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1}}{2}$$

- minimum és maximum értékek: a lehetséges szélső viselkedéseket szemléltetik, ami különösen biztonságkritikus rendszerek esetében fontos.

$$\text{Min} = \min(x_1, x_2, x_3 \dots x_n), \quad \text{Max} = \max(x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$$

- relatív szórás: az ingadozás mértékét az átlaghoz viszonyítva fejezi ki, ezáltal a stabilitás és robusztusság összehasonlítására alkalmas.

$$\text{Relatív szórás} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i} \times 100 [\%]$$

- inter-kvartilis tartomány (IQR): a középső 50% terjedelmét méri, és a belső szóródás érzékeltetésével kiegészíti az átlag és medián által mutatott képet.

- Első kvartilis (Q_1): az adatok 25%-a ennél kisebb vagy egyenlő,
- Harmadik kvartilis (Q_3): az adatok 75%-a ennél kisebb vagy egyenlő.

$$\text{IQR} = Q_3 - Q_1$$

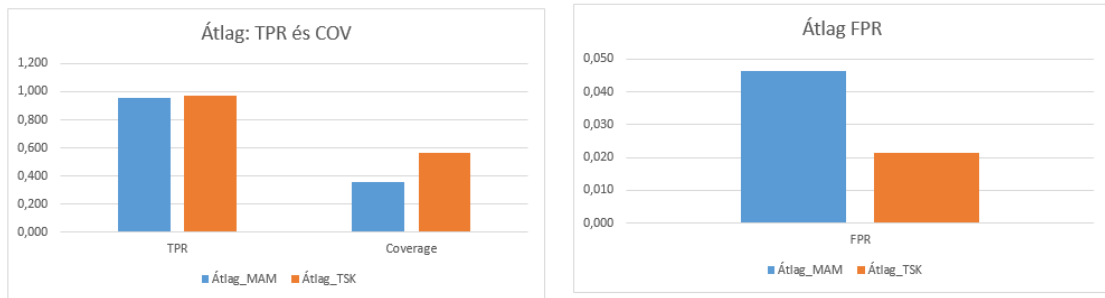
A fenti mutatók együttes alkalmazása lehetővé teszi a modellek teljesítményének objektíve és sokoldalú összehasonlítását.

	TP	FN	FP	TN	TPR	FPR	SSI	Coverage
Átlag MAM	328,800	16,400	30,500	624,300	0,952	0,047	0,884	0,359
Átlag TSK	556,500	15,500	9,100	418,900	0,973	0,021	0,887	0,565
Szórás MAM	9,647	7,933	6,115	5,755	0,023	0,009	0,021	0,011
Szórás TSK	3,028	3,028	1,912	1,912	0,005	0,005	0,006	0,003
Medián MAM	329,000	15,000	30,500	624,500	0,956	0,047	0,886	0,363
Medián TSK	556,500	15,500	9,000	419,000	0,973	0,021	0,886	0,566
MIN_MAM	315,000	5,000	20,000	616,000	0,916	0,030	0,850	0,335
MIN_TSK	552,000	11,000	6,000	416,000	0,965	0,014	0,879	0,560
MAX_MAM	345,000	29,000	40,000	636,000	0,986	0,061	0,913	0,373
MAX_TSK	561,000	20,000	12,000	422,000	0,981	0,028	0,896	0,569
Relatív szórás MAM	2,934	48,372	20,048	0,922	2,419	20,155	2,373	3,088
Relatív szórás TSK	0,544	12,335	21,010	0,723	0,544	21,234	0,640	0,573
Első kvartilis MAM	321,250	10,500	26,500	621,250	0,934	0,041	0,869	0,355
Harmadik kvartilis MAM	334,250	22,750	34,250	625,750	0,970	0,052	0,900	0,365
Inter-kvartilis (IQR)_MAM	13,000	12,250	7,750	4,500	0,036	0,011	0,031	0,011
Első kvartilis TSK	554,250	13,250	8,000	417,250	0,969	0,019	0,883	0,563
Harmadik kvartilis TSK	558,750	17,750	10,750	420,000	0,977	0,025	0,892	0,569
Inter-kvartilis (IQR)_TSK	4,500	4,500	2,750	2,750	0,008	0,006	0,009	0,005

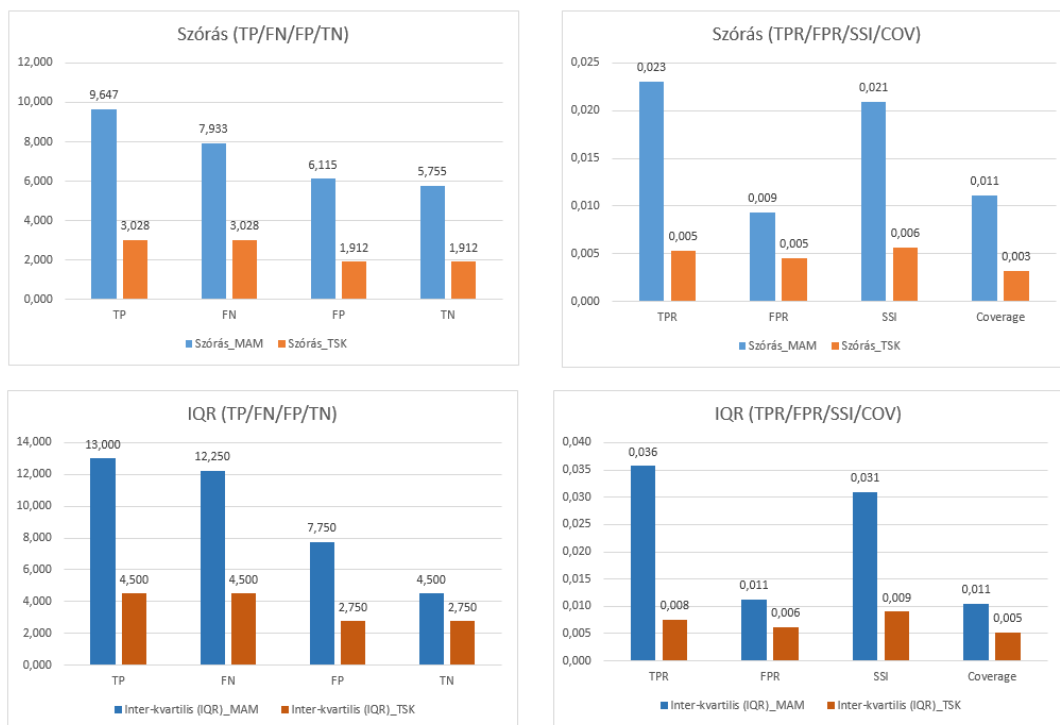
21. táblázat: Statisztikai mutatók, összefoglaló táblázata - MAM-TSK HAZOP, (saját szerkesztés)

A deskriptív statisztikai-mutatók alapján megállapítható, hogy a TSK-modell nemcsak átlagos teljesítményét tekintve bizonyult kedvezőbbnek a Mamdani-modellnél, 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.

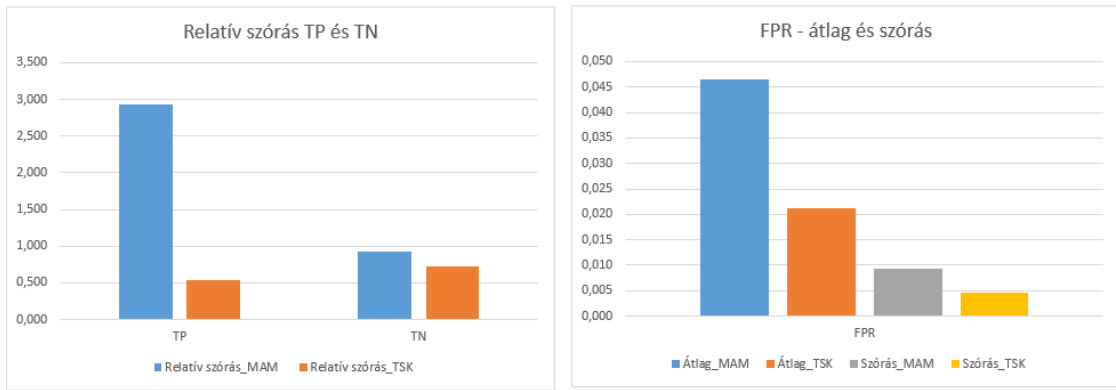


39. ábra: Kockázatedetektálási mutatók - Mamdani és TSK összehasonlítás (Saját szerkesztés)



40. ábra: Validációs mutatók - Mamdani és TSK összehasonlítás (Saját szerkesztés)

Ez arra utal, hogy a TSK-modell eredményei sokkal konzisztensebbek a különböző adatállományokon. A relatív szórás összevetése is ezt támasztja alá, például a TP esetében a TSK értéke ötször alacsonyabb, mint a Mamdani modellé, ami a kimeneti stabilitás jelentős javulását jelzi. Ugyanakkor az FPR mutatónál megfigyelhető, hogy bár a TSK abszolút értékben kedvezőbb átlagot ad, a relatív szórás torzítóan magas, mivel a mutató alapszintje nagyon alacsony. Ezért a relatív szórás önmagában nem alkalmas az FPR jellemzésére, ott az abszolút átlag és a szórás adja a valósabb képet. Összességében a TSK-modell a vizsgált mutatók többsége alapján eredményesebb és megbízhatóbb a Mamdani-modellnél.



41. ábra: Validációs mutatók és Fals Pozitív Arány (átlag, szórás) - Mamdani és TSK összehasonlítás (saját szerkesztés)

A kockázatdetektálási mutatók átlagainak relatív vizsgálata

A leíró statisztika adatainak összehasonlítása kutatási szempontból nagyon izgalmas feladat és kellőképpen informatív, azonban ha teljesítményjavulást szeretnénk számszerűsíteni, akkor a mértékadó arányszámokat célszerű összehasonlítani, relatív összehasonlítás módszerével.

$$\frac{TPR_{TSK}}{TPR_{MAM}} = \frac{0,973}{0,952} \approx 1,022$$

A TPR szempontjából a TSK-modell relatív szempontból 2,2% javulást eredményezett átlagosan, míg abszolút szempontból 2,1%-ot ($0,973 - 0,952 = 0,021$). Ez talán nem tűnik kifejezetten magas számnak, de ha vonatkoztatjuk 1000 kockázatos eseményre, akkor amíg a Mamdani-fuzzy 952 eseményt képes azonosítani, addig a TSK 973-at, így tehát a növekményünk +21, helyesen detektált, potenciálisan veszélyes esemény.

$$\frac{FPR_{TSK}}{FPR_{MAM}} = \frac{0,021}{0,047} \approx 0,45$$

Az FPR mutatóban mért különbség azt mutatja, hogy a TSK-modell abszolút értékben 2,5 százalékponttal kevesebb téves riasztást ad, ami relatív 54%-os csökkenésnek felel meg. Ez gyakorlati értelemben azt jelenti, hogy ezer olyan eset közül, ahol a rendszernek nem kellene riasztania, a Mamdani-modell átlagosan 46 téves riasztást generál, míg a TSK-modell csupán 21-et.

$$\frac{SSI_{TSK}}{SSI_{MAM}} = \frac{0,887}{0,884} \approx 1,003$$

Az SSI mutató esetében a TSK-modell csupán 0,003 abszolút eltéréssel, relatíve 0,3%-kal teljesít jobban a Mamdani-modellnél. Ez a különbség statisztikailag és gyakorlati

szempontból is marginális, vagyis a két modell biztonsági érzékenysége lényegében azonosnak tekinthető.

$$\frac{COV_{TSK}}{COV_{MAM}} = \frac{0,565}{0,359} \approx 1,57$$

A Coverage mutató esetében a TSK-modell 0,206 abszolút eltéréssel, relatíve 57%-kal szélesebb lefedettséget biztosít, mint a Mamdani-modell. Gyakorlati értelemben ez azt jelenti, hogy 1000 potenciális esemény közül a TSK átlagosan több mint 200-zal többet képes lefedni, ami az online kockázatdetektálás megbízhatóságát jelentősen növeli.

A relatív vizsgálat összefoglalása:

A relatív összehasonlítás eredményei alapján a TSK-modell több teljesítménymutatóban kedvezőbb eredményt ad a Mamdani-modellhez képest. A TPR esetében mérsékelt, de következetes javulás figyelhető meg, míg az FPR értéke jelentősen, közel felére csökken. A Coverage mutatóban a TSK-modell mintegy 57%-kal szélesebb lefedettséget biztosít, ami érdemi különbségnek tekinthető. Az SSI mutatóban ugyanakkor lényeges eltérés nem mutatható ki, ami arra utal, hogy a biztonsági érzékenység szempontjából a két modell hasonló teljesítményt nyújt. Összességében tehát a TSK-modell bizonyos kritikus mutatókban előnyt jelent, de nem minden dimenzióban. Tekintettel, hogy a fuzzy logikával alaposan megismerkedtem, feltételezem, hogy az SSI mutatóban tapasztalt felső korlát részben a fuzzy szabályrendszer koncepcionális kereteiből, részben a mutató definíciójából fakad. Mivel a Mamdani- és a TSK-rendszer azonos szabálybázisra és bemeneti változókra épül, a biztonsági érzékenység tekintetében nem mutatkozik lényegi eltérés. A TSK-modell előnyei elsősorban a számítási pontosságban, az alacsonyabb téves riasztási arányban és a szélesebb lefedettségben érvényesülnek, míg az SSI értékét a szabálybázis szerkezete és a fuzzy halmazok definiálása határozza meg, amelyek mindkét modellben közel azonosak.

Szignifikancia és páros t-ptóba

A Mamdani- és TSK fuzzy eredményei,

- a leíró statisztika és a
- relatív összehasonlítás szempontjából is reálisnak tűntek,

de hogy minden tudományos kétségem eloszlassam és megbizonyosodjak, hogy a megfigyelt különbségek nem csupán véletlen ingadozások eredményei, keresnem kellett egy harmadik statisztikai módszert, ami a fentiekől eltérő metodikával rendelkezik.

Korábbi tanulmányaim alapján, a páros t-próbára esett a választásom, amely két, egymással kapcsolatban lévő adatsor átlagos eltéréseinek szignifikanciáját vizsgálja.

A módszer adaptációja a kutatásra: minden egyes dataset esetében meghatározom a két modell közötti különbséget, majd statisztikailag ellenőrzöm, hogy az eltérés átlaga szignifikánsan különbözik-e nullától. A teszt eredményei így objektív alapot nyújtanak annak megállapításához, hogy a TSK-modell teljesítményjavulása valóban reprodukálható és szignifikáns-e a vizsgált mutatók (TPR, FPR, SSI, COV) tekintetében.

A folyamat rövid összefoglalása:

I. Eltérés meghatározása minden datasetre.

$$d_i = x_{i,TSK} - x_{i,MAM}$$

II. Átlagolom a különbséget → majd meghatározom a különbségek szórását

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad \rightarrow \quad s_d = \sqrt{\frac{\sum (d_i - \bar{d})^2}{n - 1}}$$

III. t-statisztika

$$t = \frac{\bar{d}}{\frac{s_d}{\sqrt{n}}}$$

IV. szabadságfok (10 DataSet esetén → 9 (10-1=9) -független adatpontok száma

$$df = n - 1$$

V. p-érték: a „t” érték összevetése az „α” - szignifikanci (valószínűségi változó, hogy tévesen elutasítjuk a nullhipotézist) értékkel, amit én 0,05-re választottam, de két oldalra osztva ez azt jelenti 0,025 valószínűséghez tartozó érték—táblázat [122], így ha a fenti df=9, akkor a kritikus érték 2,262. A számítási feladatokat MS Excel segítségével végzem el, a fenti képletek alapján [122].

Páros (kétmintás) t-próba				
df	9	Megjegyzés: HAZOP Kisnyomású-puffertartály MAMDANI-fuzzy vs. TSK-fuzzy		
szignifikanciaszint	0,05			
kétioldali t-próba	0,025			
táblázatból	2,262			
	TPR	FPR	SSI	COV
t-értéke	3,15	7,49	0,027	65,17
p-értéke	0,0118	0,000037	0,979	2,4E-13
SZIGNIFIKÁNS?	igen	jelentősen	nem	jelentősen

22. táblázat: Páros t-próba - szignifikancia vizsgálat (saját szerkesztés)

Következtetés:

A páros t-próba eredményei azt mutatják, hogy a TSK-modell teljesítményjavulása 4 mutatóból, 3 esetén statisztikailag is szignifikáns. A TPR esetében mérsékelt, de szignifikáns növekedés figyelhető meg ($p \sim 0,012$). Az FPR értéke rendkívül szignifikánsan csökken ($p < 0,001$). A Coverage mutatóban a TSK-modell előnye egyértelmű és erőteljesen szignifikáns ($p \ll 0,001$). Mindezekkel szemben az SSI mutatóban nem mutatható ki statisztikai különbség ($p = 0,979$), ami alátámasztja, hogy a biztonsági érzékenység tekintetében a két modell közel azonos teljesítményt nyújt.

2.4.8 Kiegészítő vizsgálat (számítási idő) és konklúzió

Dolgozatomban elsősorban a Mamdani- és a TSK-fuzzy rendszerek koncepcionális különbségeire és alkalmazhatóságára koncentráltam, így a számítási idő kérdése eredetileg csak résztényezőként merült fel. A szintetikus adatokkal történő műveletek és a kapcsolódó modellfuttatások már érzékelhető volt némi eltérés a két rendszer között. Markáns különbségeket egy véletlennek (hibás kód és utasítás) köszönhetően tapasztaltam, ugyanis a 10, egyenként 1000 mintát tartalmazó DataSet-et, véletlenül tízszer, egymást követően futtattam le, vagyis összesen 100 000 bemenet feldolgozását végeztem el a két modellen. A tapasztalt futásidőbeli eltérések nagysága önmagában is indokoltta tette, hogy a számítási időt önálló vizsgálati szempontként vonjam be a kutatásba. A 2.3.2 fejezetben ismertetett szoftver- és hardverkörnyezet egyértelműen jelzi, hogy az adatfeldolgozás nem ipari folyamatokra optimalizált számítógépen történt. Ugyanakkor a vizsgálatok mindkét modell esetében azonos környezetben zajlottak, így a relatív összehasonlítás érvényessége nem sérül. Ebből következően a futásidőbeli különbségek nem az alkalmazott hardver eltérő teljesítményéből, hanem a Mamdani- és TSK-modellek eltérő számítási struktúrájából adódnak. Fontos hangsúlyozni, hogy egy modern, komplex, on-line szenzorokkal, folyamatirányító rendszerrel és távvezérléssel felszerelt ipari objektumban a 100 000 adat feldolgozása egy időegység alatt nem tekinthető elrugaskodott mennyiségnek; valójában a feldolgozandó adatok száma ennél jóval nagyobb is lehet, a rendszer komplexitásától függően. A futásidő összehasonlításához egy egységes mérési protokollt dolgoztam ki, amelynek célja a Mamdani- és a TSK-alapú HAZOP modellem relatív teljesítményének objektív vizsgálata azonos környezetben és azonos bemeneti adatok felhasználásával. A mérési környezet és a beállítások megegyeztek: mindkét modell a 2.3.2 fejezetben ismertetett hardver- és szoftverkörnyezetben futott,

- azonos szálkezelési beállítások mellett (a Parallel Toolbox és a GPU gyorsítás nem került alkalmazásra). A JIT fordítás és a cache-hatás kiegyenlítésére minden mérés előtt egy „warm-up” futtatást végeztem.
- Az adatállomány, a korábban már felhasznált, empirikus validációt segítő 10 DataSet-ből állt, amely összesen 10 000 adatmintát tartalmaz. Ezt a 10 darabos adatsomagot 10-szer futtattam egymást követően, s ezt a teljes ciklust 10 alkalommal futtattam le.
- A szabálybázis mindkét esetben a korábban rendelkezésre álló 18 szabályból állt, a bemeneti tagsági függvények teljesen megegyeztek; a különbség kizárólag a konzekvens részben jelentkezett, ahogyan azt korábban jeleztem a 2.4.2-2.4.3. fejezetben.

- Az időmérést MATLAB környezetben hajtottam végre, elsősorban a „timeit” függvény alkalmazásával, amely nagyobb stabilitást biztosít, de összehasonlításképpen a klasszikus „tic-toc” párost is használtam.
- A sorrendi torzítás elkerülésére a két modell futtatási sorrendjét véletlenszerűen váltogattam.

```

function measure_runtime()
% ----- Fájlnév -----
dataFile = 'synthetic_datasets_pressure_flow_valve.xlsx';
fisFileTSK = 'Kisnyomasu_puffertartaly_TSK_publikalt_1.fis';
fisFileMAM = 'Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_publikalt.fis';
outFile = 'runtime.xlsx';

% ----- Modellek betöltése -----
fisTSK = readfis(fisFileTSK);
fisMAM = readfis(fisFileMAM);

% ----- Adatok betöltése (rugalmas, többféle elrendezést kezel) -----
X = readAllDatasetsAsMatrix(dataFile);
% Ellenőrzés
if size(X,2) < 3
    error('A bemenetben legalább 3 oszlopnak (nyomás, áramlás, szelep) kell lennie.');
```

42. ábra: Az időmérés megvalósítása MATLAB-ban (saját szerkesztés)

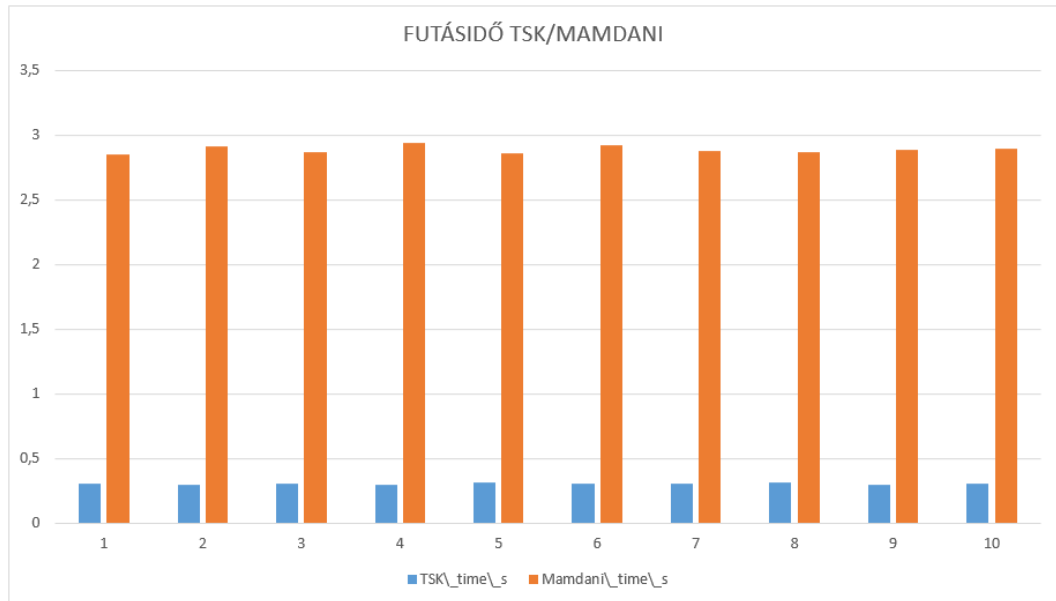
- A vizsgálatok alatt minden háttérfolyamatot korlátoztam (pl.: lemez-I/O, grafikai megjelenítés, naplózás).

Az eredmények kiértékelésénél itt is több statisztikai mutatót vettem figyelembe: az átlagos futásidőt, a szórást, a mediánt. A szignifikancia vizsgálatára a futásidők ismételt mérései alapján páros t-próbát is alkalmaztam. Kiegészítő jelleggel skálázási vizsgálatokat is végeztem, különböző bemeneti elemszámokra, amelyek várakozásaim szerint lineáris futásidő-növekedést mutattak, de eltérő meredekséggel: a TSK-modell kisebb, míg a Mamdani-modell nagyobb konstans tényezővel növelte a számítási időt.

Run	TSK_time_s	Mamdani_time_s
1	0,31	2,85
2	0,298	2,91
3	0,305	2,87
4	0,299	2,94
5	0,315	2,86
6	0,302	2,92
7	0,307	2,88
8	0,312	2,87
9	0,3	2,89
10	0,308	2,9

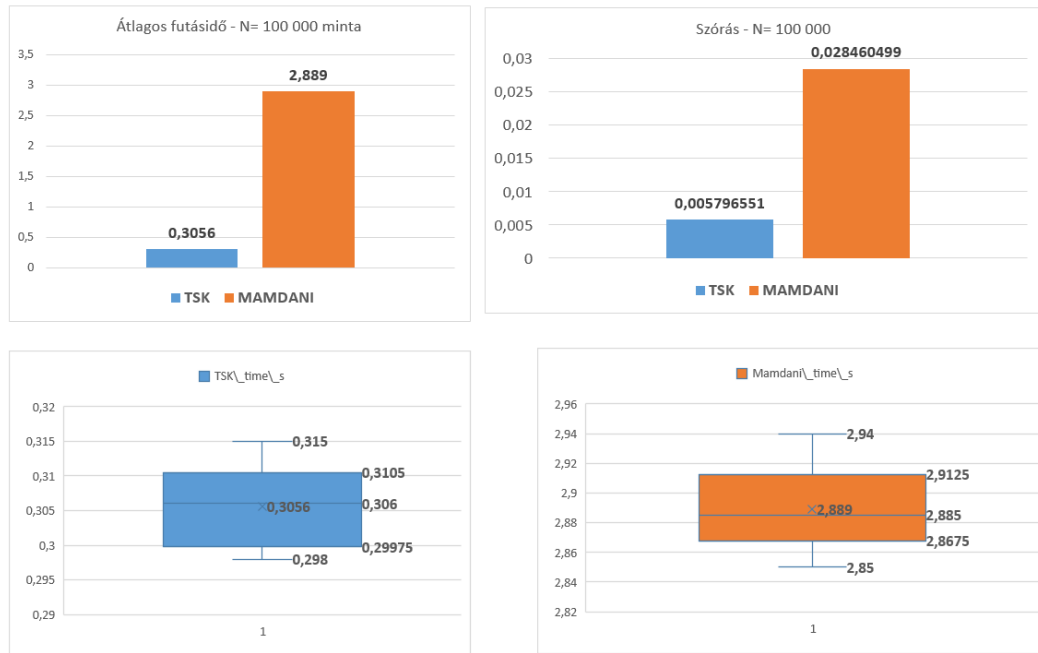
	Átlagos futási	Szórás	Medián
TSK	0,3056	0,0058	0,306
MAMDANI	2,889	0,02846	2,885
Relatív kapcsolat	9,45353	4,9099	9,4281

23. táblázat: Futásidő adatok - 100 000 mintára (saját szerkesztés)



24. táblázat: Futásidő [sec.] - 100 000 mintára (saját szerkesztés)

A futásidő-vizsgálatok eredményei egyértelmű különbséget mutattak a Mamdani- és a TSK-alapú fuzzy rendszerek között nagy adathalmaz (100 000 minta) feldolgozása esetén. A TSK-modell átlagos futásideje mindössze 0,31 másodperc körül alakult, míg a Mamdani-modellé megközelítette a 2,89 másodpercet, amely közel tízszeres feldolgozási sebességkülönbséget jelentett a TSK javára.



43. ábra: Futásidő statisztikai jellemzői

A páros t-próba eredménye:

- $t=246,31$
- $p < 0,00000000000000000016$ ($\approx 1,52 \times 10^{-18}$), Ez azt jelenti, hogy a Mamdani és a TSK futásideje között mért különbség rendkívül szignifikáns

A különbség szignifikanciáját páros t-próbával is igazoltam, amely rendkívül alacsony p-értéket adott ($p \ll 0,001$), így a TSK-modell gyorsaságbeli előnye nem véletlen ingadozás következménye. A különbség oka a két rendszer számítási struktúrájából fakad (lásd 2.4.1 fejezet), s ez a szerkezeti eltérés a futásidőben tapasztalt nagyságrendi különbség elsődleges magyarázata.

Összefoglalva: Megállapítható, hogy a TSK-modell nemcsak pontossági mutatókban (TPR, FPR, Coverage) mutatott kedvezőbb eredményeket, hanem a számítási hatékonyság tekintetében is egyértelmű előnyt biztosított. Mindez erősíti, hogy a TSK- fuzzy logika lényegesen alkalmasabb a nagy mintaszámú, valós idejű kockázatelemzési feladatokhoz, különösen biztonságkritikus ipari rendszerek online monitorozására.

3. BIOINSPIRÁLT ALGORITMUSOK INTEGRÁLÁSA

A nemzetközi szakirodalom és a korábbi elemzések alapján megállapítható, hogy a TSK-fuzzy rendszerek kiválóan alkalmasak numerikus kockázatbecslésre, mivel képesek nemlineáris be- és kimeneti kapcsolatok modellezésére kompakt és jól szabályozható struktúrában [74][75][76]. Ugyanakkor a szabálybázis és a paraméterek optimalizálása, valamint a tagsági függvények illesztése jelentős számítási kapacitást és célzott keresési stratégiát igényel. E kihívásokra 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 [77][78][79]. Az ACO integrálása a TSK-fuzzy rendszerbe felgyorsítja a tanulási folyamatot, mivel az algoritmus nagy keresési térben is gyorsan talál jó megoldásokat, ezáltal javítja a modell generalizációs képességét és prediktív pontosságát [80]. A TSK-ACO kombináció különösen előnyös valós idejű, zajos vagy hiányos adatokkal jellemezhető hidrogéntekológiai környezetben, mivel konzisztens és robusztus szabályrendszerek kialakítását teszi lehetővé [53][81][82].

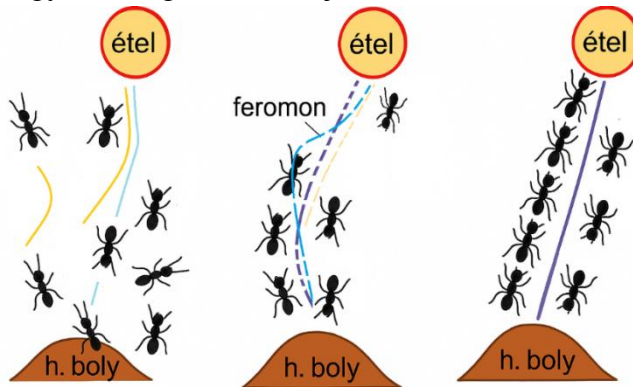
3.1 A proaktív védelem és az ACS-FORCE keretrendszer

A feldolgozott szakirodalom alapján megállapítom, hogy a Mamdani-alapú HAZOP és ACS (Ant Colony System) kombinációja már létező eljárás [53], azonban a módszert eddig off-line környezetre fejlesztették. **Az általam kidolgozott módszer** szintén az ACS-metaheurisztikára épülő keresési stratégiát alkalmazza, de az eddigiektől eltérően, én a Mamdani-fuzzy helyett, **TSK-fuzzyt** használok matematikai módszerként és a fejlesztés célja, hogy az új módszer **on-line, HAZOP-elvű, kritikus biztonsági technológiai környezetben** legyen alkalmazható, **real-time kockázatelemzés** céljából.

Ezen feladat végrehajtása érdekében, kidolgoztam egy kombinált keretrendszert, melynek az ACS-FORCE (Ant Colony System and Fuzzy Optimization for Real-time Critical Environments) nevet adtam. Az előző fejezetben bemutatott TSK-alapú rendszert a hangyakolónia-rendszerrel (ACS) kombináltam, így a fent említett előnyöket a matematikai modellem elvi szinten képes megvalósítani, mellyel Célom a proaktív védelem megvalósítása hidrogéntekológiai környezetben. Az optimalizáció és a gyors kockázatdetektálás révén, gyors operatív döntéseket kívánok támogatni, melyek révén elkerülhető a személyi sérülés vagy a jelentős anyagi-, környezeti kár.

3.2 Az ACS alapjai, biológiától az utazó ügynök problémájáig.

A hangyák egyik különleges képessége, hogy nagyon csekély vizuális tájékozódási képességük ellenére, gyorsan képesek megtalálni a hangyaboly és az élelem közötti legrövidebb útvonalat [77][78][81][122]. A hangyák a táplálékkeresés során feromont¹ hagynak maguk után, s jellemző a viselkedésükre, hogy a később érkező hangyák a



44. ábra: Hangyák viselkedése a táplálékkeresés során (saját szerkesztés)

feromonnyomokat követik. Jellemzően, a döntési pontokon nem tudják előre, melyik út a rövidebb, az első hangyák véletlenszerűen döntenek, hogy milyen irányba forduljanak. A rövidebb útvonalon egyre sűrűbben és egyre több hangya

fordul meg, ezért ott felhalmozódik a feromon. Ahogyan növekszik az utat bejárt hangyák száma, egyre pontosabban rajzolódik ki az optimális útvonal, ami egy pozitív visszacsatolást indít el, s néhány pillanat alatt a kolónia „tudatában” megjelenik a legoptimálisabb döntés, a legrövidebb út nyomvonala. A folyamatban minden hangya lokális szabály szerint mozog, de kolónia szinten létrejön egy eredmény, ami valójában a kollektív tudat, a feromon, műszaki értelemben egy elosztott, külső memória.

A hangyák életének három kulcseleme, az algoritmus szempontjából [77][78][122]:

- **Feromon-kommunikáció:** Az egyedek a környezetben mozogva lerakott kémiai jelekhez igazítják útvonalukat. A nagyobb feromon-koncentráció a jobb döntések (rövidebb utak) felé tereli az egyedeket.
- **Önszerveződés:** A hangyakolóniában nincs központi irányítás. A kollektív tudat a sok apró, lokális döntés és a pozitív/negatív visszacsatolás eredménye.
- **Kollektív intelligencia:** A kolónia magasszintű viselkedése úgy jön létre, hogy az egyedek egyszerű szabályokat követnek, a feromonnyom pedig információt tárol és oszt meg a kolónián belül, ahol mindenki tudja, hogy az adott információ mit jelent, mit kell tenni a közösség érdekében.

¹ A feromon olyan illékony kémiai jelzőanyagok, amelyet egy adott faj egyedei bocsátanak ki, és amelyet ugyanazon faj más egyedei érzékelnek (kommunikációs cél), így viselkedésüket vagy fiziológiájukat az anyag befolyásolja [123].

Az Ant Colony System (ACS) algoritmust Marco Dorigo és Luca Maria Gambardella fejlesztették ki az 1990-es évek közepén, és 1997-ben publikálták az IEEE Transactions on Evolutionary Computation folyóiratban [125]. Az ACS a korábbi Ant System továbbfejlesztett változata, amely pontosabban modellezi a kolónia kollektív tanulási mechanizmusait. Fő újításai közé tartozik a **pseudo-véletlen arányos állapotátmeneti szabály, a lokális és globális feromonfrissítések kombinációja, valamint az intenzifikáció és diverzifikáció egyensúlyát biztosító heurisztikus stratégia.** E fejlesztéseknek köszönhetően az ACS a kombinatorikus optimalizálási problémák, különösen a „Traveling Salesman Problem (TSP)” megoldásában bizonyítottan hatékonyabb és stabilabb teljesítményt nyújt, mint elődei [82][125].

3.3 Az ACS integrálása a TSK-alapú HAZOP-ba

Kutatói pályafutásom szempontjából jelentős előnyt jelentett, hogy a villamosenergia-hálózatokkal kapcsolatos tanulmányaim és korai kutatásaim során rendszeresen használtam a gráfelmélet eszköztárát. Tekintettel arra, hogy az ACS a gráfelmélet egy speciális alkalmazásaként is értelmezhető, a módszer jelenlegi kutatásomban történő integrálása és gyakorlati alkalmazása különösen gördülékenyen valósult meg. Szakirodalmi forrásokra támaszkodva azt tapasztaltam, hogy az ACS hatékonyan alkalmazható a fuzzy súlyparaméterek optimalizálására [53][81][82].

Kapcsolódva a dolgozat 2. fejezetéhez és a bemutatott HAZOP-modellhez:

	Antecedens-tag	Konzekvens-tag
TSK fuzzy	IF Nyomás IS Magas AND Áramlás IS Alacsony AND GCS2 IS Zárt	THEN Kockázat = $a_1 \cdot \text{Nyomás} + a_2 \cdot \text{Áramlás} + a_3 \cdot \text{Szelepállapot} + \text{Konstans}$

25. táblázat: TSK-fuzzy, antecedens és konzekvens tagja (saját szerkesztés)

Bemeneti változók	Fizikai jellemző
x_1	Nyomás
x_2	Áramlás
x_3	GCS2 - állapot

A konzekvens tag formálisan felírva, a korábban definiált anomáлияfigyelő ággal:

$$\begin{aligned} \text{Kockázat} &= a_1 \cdot \text{Nyomás} + a_2 \cdot \text{Áramlás} + a_3 \cdot \text{Szelepállapot} + a_4 \cdot I_{\text{anomális}} + \text{Konstans} = \\ &= a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot (1 - x_3) + a_4 \cdot \text{anomáлия} + b \end{aligned}$$

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

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

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

$b_i \in \mathbb{R}$ – a konstans tag

y – a rendszer által becsült kockázat

A TSK alapú HAZOP modell konzekvens részében található súlyparaméterek ($a_1, a_2, a_3 \dots a_n$) meghatározó szerepet töltenek be a kimenetek (kockázat) alakulásában. Egyrészt számszerűen kifejezik az egyes bemeneti változók hozzájárulását a kockázati szinthez, másrészt lehetőséget biztosítanak a modell működésének és válaszainak pontos illesztésére. A súlyparaméterek részletes tárgyalását a 2.4.5 fejezet tartalmazza, ahol a súlyparaméterek érzékenységi vizsgálata is bemutatásra került, ezért a jelen fejezetben erre nem térünk ki, de fontos jelezni, hogy ezeket a súlyokat egy optimális halmazban célszerű formalizálni, amelyet az ACS algoritmus keresési mechanizmusa határoz meg.

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

W – optimális súlyhalmaz, 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 így definiált súlyhalmaz lehetőséget ad arra, hogy az ACS által vezérelt keresés a paraméterterben szisztematikusan közelítse a fuzzy rendszer optimális konfigurációját. Ennek eredményeként a szabálybázis egyszerre válik kezelhetőbbé és informatívabbá, miközben a kockázati kimenetek modellezése pontosabb és megbízhatóbb lesz.

3.3.1 Az ACS alkalmazásának célkitűzései

Kutatásomban az ACS alkalmazásának kettős célja van. Egyrészt a **súlyvektorok optimalizálása** révén biztosítja a TSK-fuzzy rendszer teljesítményének további javítását, másrészt a **szabálybázis** redundáns vagy kevésbé releváns kombinációinak szűkítésével hozzájárul a modell egyszerűsítéséhez. Ez utóbbi lépés különösen fontos a számítási hatékonyság szempontjából, mivel a szabályok számának csökkentése közvetlenül mérsékli a számítási igényt. A két cél együttesen azt eredményezi, hogy a rendszer nemcsak pontosabb és robusztusabb kockázati kimeneteket ad, hanem a gyakorlati alkalmazás szempontjából is gyorsabb és erőforrástakarékosabb működést tesz lehetővé.

A súlyvektorok optimalizálása

Minden fuzzy szabályhoz egy súlyvektor tartozik, amely az egyes bemeneti változókhoz kapcsolódó súlyokat, valamint a konzekvens rész konstans tagját tartalmazza:

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

Az összes szabály súlyvektorának együttesen történő kezelése adja a teljes modell-leíró vektort:

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

Az ACS algoritmus feladata ezen súlyok optimalizálása, melynek eredménye, hogy a kockázati kimenetet a lehető legpontosabban közelíti a rendszer.

A redundás szabálybázis redukciója

A fuzzy szabálybázis redundanciája természetes módon jelentkezik olyan rendszerekben, ahol a modell több bemeneti változó és azok kombinációi alapján épül fel. A bemenetek számának növekedésével a szabályok száma exponenciálisan növekszik, ami egymást ismétlő vagy információtöbbletet nem hordozó szabályok kialakulásához vezet. Ez jelentősen rontja a modell átláthatóságát és növeli a számítási igényeket, különösen komplex ipari környezetekben, ahol nagyszámú szenzor és készülék szolgáltat adatokat. A szabályok hatékony szűkítése „manuális” módszerekkel gyakorlatilag nem valósítható meg, mivel a szabályok közötti átfedések és a nemlineáris összefüggések emberi léptékben áttekinthetlenné válnak. Ebből a tényből következik, hogy indokolt egy olyan optimalizációs technika alkalmazása, amely képes a redundáns szabályok szisztematikus kiszűrésére, miközben megőrzi a folyamat szempontjából kritikus szabályokat. Végeredményben, az így létrejövő, csökkentett szabálybázis gyorsabb, hatékonyabb és pontosabb HAZOP-alapú értékelést tesz lehetővé, ami a biztonságkritikus rendszerek szempontjából kulcsfontosságú.

A súlytér a definiált kisnyomású HAZOP modellben az alábbiak szerint definiálható:

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

Ω – a megoldási tér

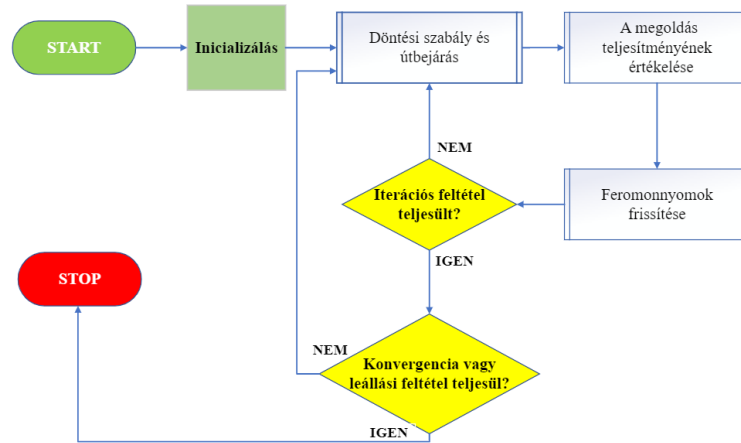
\mathbb{R} – a valós számok halmaza, tehát az optimalizálás folytonos

R - a fuzzy szabályok száma a térben

n - a bemeneti változók száma (nyomás, áramlás, szelep, anomáliafigyelés)

$+1$ - a konstans tag

Ez a 90 dimenziós paraméterter adja meg azt a keresési teret, amelyben az ACS algoritmus mozog. Az algoritmus feladata, hogy ebben a térben találja meg azt a paramétervektort, amely a fuzzy rendszer működését optimálisan közelíti. Amegoldási térben egy hangya 90 paraméterből álló vektort épít, és ezt optimalizálja. A hangyák minden iterációban egy új súlykészletet generálnak.



45. ábra: ACS működése [82][125](saját szerkesztés)

3.3.2 A hangyák kollektív viselkedésének alapja

Egy hangya útválasztása vagy döntése a feromonintenzitás és a heurisztikus érték kombinációján alapul. Bár a döntés egyedi és lokális, a közösség szintjén ez mégis kollektív optimalizációt eredményez, mivel az egyéni választások összhatása a globális optimum felé billenti a rendszert. Az ACS algoritmus működésének egyik központi eleme a döntési szabály, amely meghatározza, hogy egy hangya miként választja ki a következő lépést a keresési térben. Minden egyes hangya valószínűségi alapon dönti el, hogy az aktuális pozíciójából melyik szomszédos csomópont felé haladjon tovább. A választást két tényező együttesen befolyásolja, a feromonintenzitás (τ_{ij}) \rightarrow vonzerő, kollektív jellemző és a heurisztikus érték (η_{ij}), \rightarrow hasznosság, lokális jellemző

A két tényező súlyozott kombinációja adja meg annak valószínűségét, hogy a k -adik hangya az i csomópontból a j csomópontba lép.

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

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

A feromonintenzitás τ_{ij} az $i \rightarrow j$ él kollektív vonzerejét fejezi ki, amely a korábbi iterációk során megtalált megoldások minőségének és gyakoriságának függvényében frissül. Minél nagyobb τ_{ij} , annál valószínűbb, hogy a későbbi hangyák ismét az adott élt választják

$$\tau_{ij}(t + 1) = (1 - \rho) \times \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}$$

ahol

ρ – párolgási ráta ($\rho \in (0,1)$)

$\Delta\tau_{ij}$ – a hangyák által a jelen iterációban elhelyezett feromonmennyiség

A feromonintenzitás egy kollektív jellemző, amely az egész kolónia korábbi tapasztalatát sűríti össze. Értéke attól függ, hogy az adott $i \rightarrow j$ él milyen gyakran és milyen minőségű megoldásokban szerepelt az eddigi iterációk során. Ezáltal a feromonnyom a globális emlékezet szerepét tölti be az algoritmusban.

A heurisztikus érték η_{ij} azt fejezi ki, hogy az $i \rightarrow j$ él választása mennyire ígéretes lokális, (azaz azonnali) szempontból. Tehát, a heurisztika egy olyan minőségi mutató, amely a döntési folyamat során az adott él közvetlen hasznosságát, jóságát méri, függetlenül a globális feromoninformációtól.

$$\eta_{ij} = \frac{1}{1 + hiba_{ij}}$$

- ha a hiba kicsi, pl.: 0 akkor $\eta_{ij} \rightarrow 1 \rightarrow$ jó döntés \rightarrow sokszor jön választja a hangya
- ha a hiba nagy, pl.: 100, akkor $\eta_{ij} \rightarrow 0 \rightarrow$ kevésbé valószínű a választás, rossz döntés, nem választja a hangya

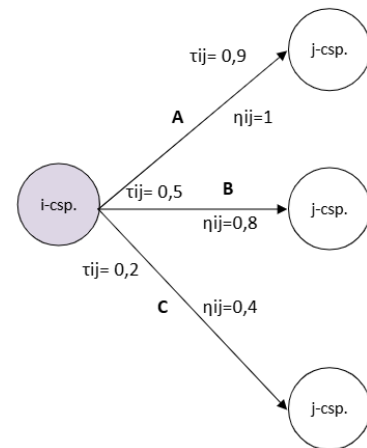
Összefoglalva: Míg a **feromonintenzitás** a közösség felhalmozott **tapasztalatát** reprezentálja, addig a **heurisztikus érték** az adott **döntés minőségét** fejezi ki.

Az ábrán látható egy példa, ami egy hangya mozgását szemlélteti, a magas feromonszint és a jó heurisztika kombinációja dominálja a döntést.

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

Ha például a heurisztika súlyát (β) változtatjuk és fokozzuk az erősségét, 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:

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



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

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

Q – konstans

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

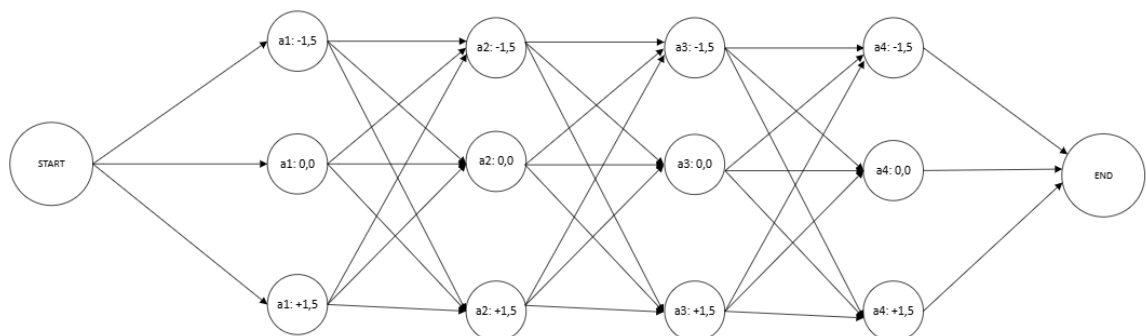
Él	Feromon	Heurisztika	Valószínűség
A	0,9	1	71,9%: legvonzóbb
B	0,5	0,8	25,6% közepes
C	0,2	0,4	2,6% alig választott

46. ábra Egy hangya mozgása i -ből j -be (saját szerkesztés)

A súlyparaméterek optimalizálását gráf reprezentációval végeztem el, 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

$$\vec{w} = [a_1, a_2, a_3]$$



47. 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 célfüggvényem:

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

ahol:

$TPR, FPR, Coverage, SSI$ – (a 8. táblázat alapján és a 2.4.7 tapasztalataira támaszkodva)

$\alpha, \beta, \gamma, \delta \in \mathbb{R}^+$ – súlytényezők \rightarrow a következő fejezetben részletesen kitérek

- A TPR , a Coverage és SSI pozitív hatású mutatók, ezért pozitív előjelű súlyokkal szerepelnek.
- Az FPR (téves riasztási arány) negatív hatású mutató, ezért az negatív előjellel szerepel.

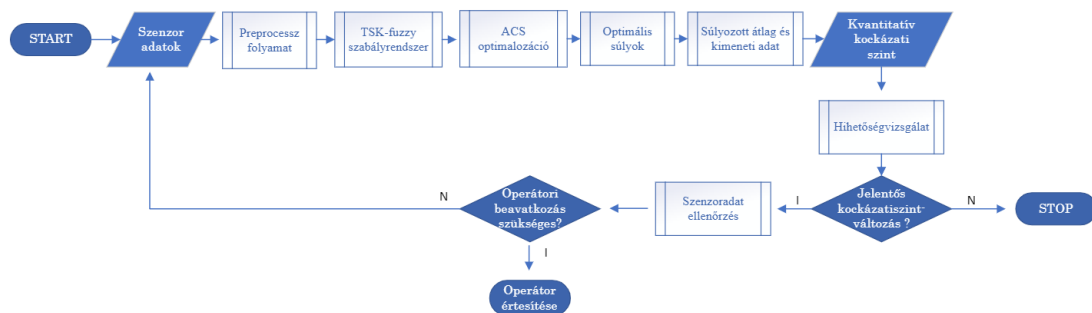
A mutatókat normalizált formában vettem figyelembe annak érdekében, hogy az eltérő skálájuk ne torzítsa az optimalizációt. Az ACS algoritmus a keresési térben az alábbi optimalizációs problémát oldotta meg

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

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

Az ACS által megtalált optimális súlykombinációval generált szabálybázis prediktíven pontos, alacsony riasztási hibaarányt mutat, adaptívan alkalmazkodik a bemeneti tér változásaihoz, és alkalmas a valós idejű biztonságkritikus környezetekben való alkalmazásra

Az ACS-FORCE folyamatábrája



48. ábra: Az ACS-FORCE egyszerűsített folyamatábrája, (saját szerkesztés)

Ahogy a 48. ábrán is látható, hogy az ACS-FORCE algoritmus elvégzi az automatikus szenzoradat-ellenőrzést, amennyiben a híhetőségvizsgálat jelentős eltérést talál. A visszacsatolással növelni tudjuk a modell megbízhatóságát. 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.

3.4 A célfüggvény súlyozási stratégiáinak gyakorlati jelentősége

Az előzőekben bemutatott matematikai célfüggvény és a súlyparaméterek hangolása lehetőséget ad arra, hogy a különböző üzemeltetési stratégiák formalizáltan, optimalizációs keretben jelenjenek meg. A súlyozási stratégiák tehát az elvi, matematikai módszerek gyakorlati megvalósulásai: a megfelelő súlyvektor kiválasztásával a rendszer viselkedése az adott ipari prioritásoknak megfelelően hangolható.

3.4.1 Súlytényezők értelmezése és hatása az optimalizációra

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

- α - a helyes detektálás (TPR) súlya
 - Ha magas az α értéke \rightarrow az algoritmus erősen preferálja a minél nagyobb találati arányt, vagyis a rendszer minden valódi kockázatot igyekszik felismerni.
 - Gyakorlati javaslat: biztonságkritikus iparágakban, így a hidrogéntechológiai környezetben is kiemelten fontos lehet, mert az elmaradt riasztás súlyos következményekkel járhat.
- β - a téves riasztások (FPR) súlya
 - Ha magas a β értéke \rightarrow az algoritmus minimalizálja a téves riasztások számát, még akkor is, ha ez némi találatiarány-csökkenéssel jár.
 - Gyakorlati javaslat: olyan környezetekben fontos, ahol a téves riasztások magas költséggel járnak (pl.: termelés leállás).
- γ - a lefedettség (Coverage) súlya
 - Ha magas a γ értéke \rightarrow a modell minél szélesebb körben képes kockázati scénáriókat lefedni, ezáltal általánosabb és robusztusabb döntéstámogatást ad.
 - Gyakorlati javaslat: akkor indokolt, ha a rendszer komplex és sokféle anomália előfordulhat, amelyeket egy szűk fókuszú modell könnyen figyelmen kívül hagy.
- δ - a biztonsági érzékenységi index (SSI) súlya
 - Ha magas a δ értéke \rightarrow a modell érzékenyen reagál a kis mértékű kockázati változásokra is, vagyis a legkisebb eltérések esetén is képes jelezni.
 - Gyakorlati javaslat: akkor fontos, ha az üzemeltetési filozófia a „*legkisebb kockázat se maradjon észrevétlen*” elven alapul.

3.4.2 Üzemeltetési stratégiák a súlytényezők függvényében

Az ipari és technológiai rendszerek üzemeltetésében a stratégiai szemlélet meghatározza, hogy a működtetés során a **biztonság, a költséghatékonyság, a robusztusság vagy az érzékenység** élvez elsőbbséget. E stratégiák matematikai formalizálása lehetővé teszi, hogy a döntési preferenciák mérhető paraméterekben jelenjenek meg. Biztonságkritikus üzemekben a stratégia megválasztása nemcsak gazdasági, hanem társadalmi és katasztrófavédelmi következményekkel is járhat: a biztonságmaximalizáló megközelítés a kockázatok teljes körű detektálását, míg a költségalapú stratégia a téves riasztások minimalizálását helyezi előtérbe.

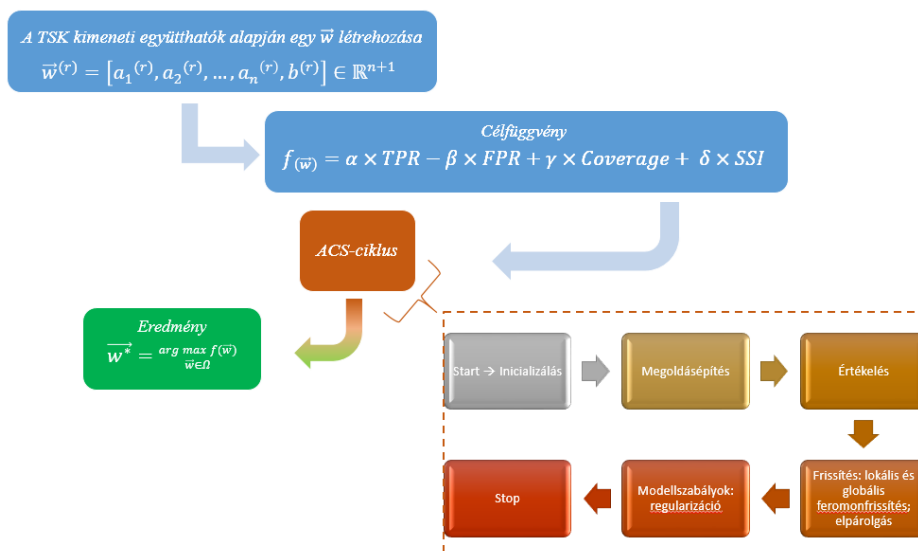
Az utóbbi években az üzemeltetési stratégiák jelentősége tovább nőtt az Európai Unió direktíváinak (SEVESO III, NIS2) a nemzetközi szabványoknak (IEC61511, IEC61508, ISO31000) való megfelelési kötelezettség miatt, amelyek egységesen proaktív biztonsági szemléletet írnak elő [22][63][103][126][127]. Mindez összhangban áll a klasszikus katasztrófavédelmi elvárásokkal is, hiszen a megelőzés és következménycsökkentés csak akkor érvényesülhet, ha a stratégia megfelelő egyensúlyt teremt a biztonsági és működési követelmények között. **A súlyozási stratégiák ezért nem pusztán matematikai eszközök, hanem a modern ipari üzemeltetés gyakorlati támogatói**, hozzájárulva a szabványi és hatósági biztonsági célok teljesítéséhez.

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

26. táblázat: Üzemeltetési stratégiák és súlyparaméterek (saját szerkesztés)

3.5 A TSK és ACS integrációja

A kutatás során a MATLAB Fuzzy Logic Designer alkalmazás átfogó támogatást nyújtott a modellek létrehozása és tesztelése során. A TSK fuzzy modell statikus paraméterezése után a következő lépés a paraméterek (különösen a konzekvens függvények súlyegyütthatói) optimalizálása volt, támaszkodva az ACS logikus és jól követhető matematikai alapjaira [80] [82] valamint támaszkodva a további szakirodalmakra [53][78][79][81][128]. Az integráció lényege abban áll, hogy az ACS a TSK-modell konzekvens függvényeiben szereplő súlyparaméterekből épít „jelölteket”, vagyis olyan súlyvektorokat generál, amelyek a fizikai változók (nyomás, áramlás, szelepállapot stb.) kockázati hatását számszerűsítik. E jelöltek minőségét a TSK-modell „evalfis” alapú kiértékelésével határozom meg, a többkritériumos célfüggvényem (TPR, FPR, Coverage, SSI súlyozott kombinációja) alapján. Az ACS feromon-dinamikája a sikeresebb súlyvektorok irányába tereli a keresést, miközben az elpárolgási mechanizmus biztosítja a diverzitás fenntartását, elkerülve a lokális optimumokba való beragadást. Az így kialakított TSK-ACS hibrid modell egyrészt megőrzi a TSK-rendszerek analitikus, numerikus kimeneti struktúrájának előnyeit, másrészt adaptív módon, adatvezérelten képes a konzekvens paraméterek finomhangolására. Ez különösen előnyös a valós idejű, dinamikus változó hidrogéntechnológiai környezetekben, illetve minden olyan biztonságkritikus rendszerben, ahol a kockázatbecslés gyorsasága és pontossága alapvető követelmény.



49. ábra: TSK és ACS integráció (saját szerkesztés)

3.5.1 A súlyozás komplex szerepköre a TSK-ACS hibrid HAZOP-ban.

Tekintettel, hogy a „súly/súlyozás/súlyparaméter” fogalom a dolgozatban több szinten is előfordul, a dolgozat ezen pontján szükségszerűnek tartom ezt a fogalomkört definiálni és az eddigi információkat röviden összefoglalni.

- A TSK-modellben megjelentek a fizikai paraméterek súlyai, az úgynevezett konzekvens együtthatók, melyek együttesen hatással vannak a TSK-fuzzy kimenetén lévő numerikus értékre.
- Az ACS rendszerben un. belső paraméterként megjelenik a feromon intenzitás, párolgási ráta és a heurisztika súlyozása. Ezen paraméterek nincsenek közvetlen hatással a TSK-kimenetére, hanem az algoritmus keresési stratégiáját befolyásolják
- A célfüggvény súlyai pedig az előző alfejezetben látható üzemeltetési stratégiák és prioritások kialakításában játszanak döntő szerepet, tehát ezek nem fizikai jellemzőkhöz kapcsolódnak, hanem egy értékválasztást tükröznek, mit tartunk fontosnak (pl.: biztonságmaximalizálás vagy költségminimalizálás).

3.5.2 Manuális számítási példa egy adatcsoporton

1. Kiindulási paraméterek

x ₁	nyomás (53,7 barg)
x ₂	áramlás (22,1 kg/h)
x ₃	szelepállapot (0-zárt)
x ₄	anomália (1-szivárgás detektálva)

27. táblázat: Manuális számítási példa, bemeneti értékek (saját szerkesztés)

2. Normalizálás:

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$$

$$x_1 = \frac{53,7}{60} = 0,895; \quad x_2 = \frac{22,1}{70} \approx 0,316;$$

$$x_3 = 0, \text{ zárt}; \quad x_4 = 1, \text{ szivárgás detektálva}$$

3. Kezdeti súlyvektor:

$$\vec{w}_0 = [8,0;0,7,-1,8;0,8;1,2]$$

4. TSK-konzekvens:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot (1 - x_3) + a_4 \cdot x_4$$

A kockázat értékének kiszámítása a kezdeti súlyvektor alapján (első futás):

$$\vec{w}_0 = [8,0;0,7,-1,8;0,8;1,2]$$

$$\begin{aligned} y_i &= 8 + 0,7 \times 0,895 - 1,8 \times 0,316 + 0,8 \times (1 - 0) + 1,2 \times 1 = \\ &= 8 + 0,6265 - 0,5688 + 0,8 + 1,2 \\ &\approx \mathbf{10,06} \end{aligned}$$

5. Küszöbfüggvény:

$$\hat{z}_i(\vec{w}) = \begin{cases} 1, & \text{ha } y_i(\vec{w}) \geq \theta \\ 0, & \text{ha } y_i(\vec{w}) < \theta \end{cases}$$

θ – riasztási küszöb

Tegyük fel, hogy a riasztási küszöb 9,5. Így mivel $10,06 > 9,5 \rightarrow$ riasztás lesz

6. Konfúziós mátrix előállítás (N=998 minta (az egész számok érdekében)):

$$TP(\vec{w}) = \sum_i 1[\hat{z}_i = 1 \wedge z_i = 1] = 328$$

$$FN(\vec{w}) = \sum_i 1[\hat{z}_i = 1 \wedge z_i = 0] = 16$$

$$FP(\vec{w}) = \sum_i 1[\hat{z}_i = 0 \wedge z_i = 1] = 30$$

$$TN(\vec{w}) = \sum_i 1[\hat{z}_i = 0 \wedge z_i = 0] = 624$$

7. Kockázatdetektálási arányszámok:

$$TPR(\vec{w}) = \frac{TP(\vec{w})}{TP(\vec{w}) + FN(\vec{w})} = \frac{328}{344} \approx 0,953$$

$$FPR(\vec{w}) = \frac{FP(\vec{w})}{FP(\vec{w}) + TN(\vec{w})} = \frac{30}{654} \approx 0,046$$

$$COV(\vec{w}) = \frac{TP(\vec{w}) + FP(\vec{w})}{N} = \frac{358}{998} \approx 0,358$$

$$SSI(\vec{w}) = \frac{TP(\vec{w})}{TP(\vec{w}) + FP(\vec{w}) + FN(\vec{w})} = \frac{328}{374} \approx 0,877$$

8. Célfüggvény, egyszerű súlyozással ($\alpha = \beta = \gamma = \delta = 1$)

$$\begin{aligned} f(\vec{w}) &= \alpha \times TPR - \beta \times FPR + \gamma \times Coverage + \delta \times SSI \\ &= 0,953 - 0,046 + 0,358 + 0,877 = \mathbf{2,142} \end{aligned}$$

Súlyvektorok és kapcsolódó kockázatdetektálási paraméterek	
$\vec{w}_0 = [8,0;0,7,-1,8;0,8;1,2]$	$\rightarrow TPR_1 = 0,953; FPR_1 = 0,046; COV_1 = 0,358; SSI_1 = 0,877$
$\vec{w}_1 = [7,5;0,6,-1,0;0,9;1,0]$	$\rightarrow TPR_2 = 0,972; FPR_2 = 0,032; COV_2 = 0,355; SSI_2 = 0,889$
$\vec{w}_2 = [8,2;0,8,-0,2;0,7;1,4]$	$\rightarrow TPR_3 = 0,976; FPR_3 = 0,028; COV_3 = 0,358; SSI_3 = 0,892$

28. táblázat: Számítási példa: súlyvektorok és kockázatdetektálási paraméterek összefoglaló táblázata (saját szerkesztés)

Az egyes súlyvektorok \vec{w}_n meghatározzák a TSK-fuzzy modell konzekvens egyenletét, amelynek alkalmazásával a teljes bemeneti dataset minden mintájára numerikus kockázati kimenetet (y) kapunk. E kimenetek lehetővé teszik a konfúziós mátrix

felépítését (TP/TN/FP/FN), amelyből kiszámíthatók a teljesítménymutatók (TPR, FPR, Coverage, SSI). Így minden súlyvektorhoz egyértelműen hozzárendelhető egy mutatóhalmaz, amely a „jelölt” minőségét számszerűsíti. Az ACS algoritmus ezeket az értékeket használja fel a célfüggvényen keresztül a keresési folyamat irányítására.

$$0. \vec{w}_1 = [7,5; 0,6; -1,0; 0,9; 1,0]$$

$$y = 7,5 + 0,6 \times 0,895 - 1,0 \times 0,316 + 0,9 \times (1 - 0) + 1,0 \times 1 = \\ = 7,5 + 0,537 - 0,316 + 0,9 + 1,0 \\ \approx \mathbf{9,62}$$

$$f_{(\vec{w})_1} = 0,972 - 0,032 + 0,355 + 0,889 = \mathbf{2,184}$$

$$1. \vec{w}_2 = [8,2; 0,8; -0,2; 0,7; 1,4]$$

$$y = 8,2 + 0,8 \times 0,895 - 0,2 \times 0,316 + 0,7 \times (1 - 0) + 1,4 \times 1 = \\ = 8,2 + 0,716 - 0,0632 + 0,7 + 1,4 \\ \approx \mathbf{10,95}$$

$$f_{(\vec{w})_2} = 0,976 - 0,028 + 0,358 + 0,892 = \mathbf{2,198}$$

Sorszám	Súlyvektor	Hatás, ha $x_4=1$	Számított kockázat (minimum cél)	Célfüggvény értéke (maximum cél)
1	\vec{w}_0	a szivárgás súlya + 1,2 tehát a kockázati szint erősen nő, függetlenül a nyomás-áramlás állapottól.	10,06	2,142
2	\vec{w}_1	mérsékeltebb, +1,0 kevésbé emeli meg a kockázatot, viszont így alulértékelheti a veszélyt	9,62 ←	2,184
3	\vec{w}_2	+1.4, erősen „bünteti” a szivárgást, ami a biztonsági kritikus üzemekben előny lehet.	10,95	2,198 ←

29. táblázat: A számítási feladat összefoglaló táblázata (saját szerkesztés)

A számítási eredmények összefoglalása:

Jól látható, hogy a kezdeti súlyparaméternél (w_0) van jobb megoldás. Ha csak a TSK-logikára bízunk a számítást, akkor a 2. eset lenne az ideális, ahol az y értéke 9,62. Ha célfüggvény szerint számítjuk, ekkor viszont a 3. eset a legideálisabb.

Az iteratív optimalizálási folyamat szükségszerűen többlet időigénnyel jár, hiszen az ACS algoritmus a kezdeti fázisban több tucat, esetenként több száz súlyvektort is kiértékel a TSK-modell futtatásán keresztül. Ez a tanulási szakasz azonban csak átmeneti jellegű: amint az algoritmus konvergál egy optimális vagy közel optimális súlyvektorhoz, az így meghatározott paraméterek rögzíthetők a rendszerben. A fixált súlyvektor mellett a TSK-modell futásideje gyakorlatilag megegyezik az alap TSK-ciklus feldolgozási idejével, amely lényegesen alacsonyabb, mint az optimalizáció során tapasztalt futásidők. Fontos hangsúlyozni, hogy a tanulási folyamat akár off-line környezetben is elvégezhető, ezáltal nem befolyásolja a tényleges üzemeltetés folyamatbiztonságát. Az optimalizált paraméterek bevezetését követően a rendszer valós idejű üzemmódban is alkalmazható, stabil és hatékony működést biztosítva.

3.6 Az integrált, TSK-ACS eredményeinek bemutatása

Az összehasonlíthatóság érdekében ugyanazt a tíz, szintetikus DataSetet használtam fel, mint amit előzőleg használtam a Mamdani- és a TSK-rendszer bemutatásakor. A hardver környezetben és operációs rendszerben nem történt változás. Továbbra is a MATLAB keretrendszert használtam, de az ACS esetében már szükséges kilépni a meglévő és kész kereteken kívülre, ugyanis amíg a MATLAB környezet, a Fuzzy Logic Designer appon keresztül, natív módon biztosítja a Mamdani- és TSK-fuzzy rendszerek létrehozásának, paraméterezésének és kiértékelésének lehetőségét, ezzel szemben a metaheurisztikus optimalizációs eljárások, így különösen az hangyakolónia optimalizáció nem képezi részét az alapértelmezett eszközkészletnek. Ennek következtében az ACS integrációját a TSK-modellbe egyedi megoldással kellett megvalósítanom. A feladat megoldására a szakirodalomban is elfogadott módszert követtem: a MATLAB nyílt forráskódú, közösség által fejlesztett moduljait (MATLAB File Exchange) [129][130] és saját implementációt használtam az ACS algoritmushoz. Az így létrehozott ACS-modul képes volt a TSK-fuzzy modell konzekvens tagjait reprezentáló súlyparaméterek vektorát a keresési térben kezelni, jelölteket generálni, valamint a célfüggvény értéke alapján kiértékelni. A kapcsolat a TSK és az ACS között a MATLAB „evalfis” függvényén keresztül valósult meg: minden egyes ACS által generált súlyvektorral futtattam a TSK rendszert, majd a kimeneti értékekből meghatároztam a teljesítménymutatókat (TP, FP, TN, FN) és a kockázatdetektálási arányszámokat (TPR, FPR, COV, SSI), amelyek a célfüggvény bemenetét képezték. Ezzel a megoldással a MATLAB környezetben megőrizhető volt a TSK rendszerek grafikus szerkeszthetősége és vizualizációja,

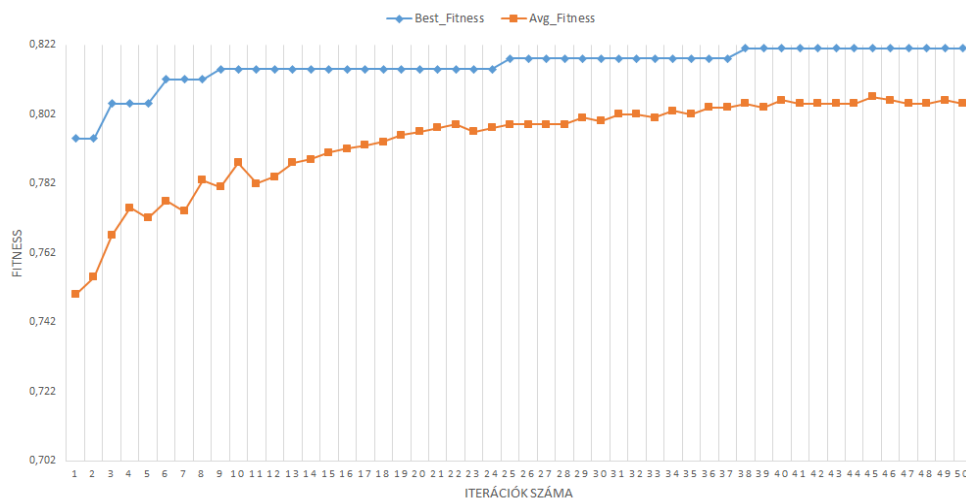
miközben az ACS algoritmus adaptív, iteratív keresési képességei is integrálhatók lettek. Ez a kombinált megközelítés biztosította a metaheurisztikus optimalizáció lehetőségét.

3.6.1 Az értékelési metodika: inkrementális felépítésű, komparatív elemzés

A Mamdani- és TSK-modellek összehasonlítását a 2.4.7 fejezetben mutattam be. Az elemzés kiterjedt a leíró statisztikákra, a relatív összehasonlításra és a páros t-próbák alkalmazására is. Ezzel megalapoztam azt a tudományos keretet, amely alapján a két modell teljesítménye átláthatóan és reprodukálhatóan mérhető. **Amikor azonban a TSK-modellhez integráltam az ACS rendszert és optimalizációs eljárást, nem új összehasonlítási protokoll kialakítását tartottam célszerűnek, hanem egy komparatív elvű, inkrementális felépítésű elemzés elvégzését. Ennek a módszernek az a magyarázata, hogy az integrált TSK+ACS modell szorosan épül az önálló TSK-modellre, valójában annak kiterjesztését jelenti, így véleményem szerint a tudományos relevancia szempontjából a kulcskérdés nem a teljesítménymutatók abszolút értékének újra bemutatása, hanem a TSK-hoz képest elért változás reprezentálása.** Célom ezzel az eljárással az áttekinthetőség biztosítása alacsony információismétlés mellett, illetve az elért eredmények rövid, de egyértelmű bemutatása. Az ACS eredmények reprezentációjának a középpontjába a TSK-modellhez viszonyított eltérések kerülnek, miközben a vizsgálati dimenziók változatlanok maradnak. Ebből adódóan a konfúziós mátrix mutatói (TP, TN, FP, FN) és a kockázatdetektálási arányszámok (TPR, FPR, Coverage, SSI) alapján történik a rendszerek összehasonlítása. Az összehasonlíthatóság metodikai konzisztenciáját ugyanazon statisztikai eszköz, a páros t-próba alkalmazása erősíti, amely lehetővé teszi annak eldöntését, hogy az ACS integrációval elért változások szignifikánsak vagy csupán véletlen ingadozásnak tekinthetők. A választott módszer így továbbra is tudományosan megalapozott, ugyanakkor a disszertáció fókuszát megőrzi, vagyis bemutatja, hogy a TSK-modell már önmagában is előrelépést jelent a Mamdani-megközelítéshez képest, míg az ACS integráció további, mérhető és szignifikáns teljesítményváltozást eredményez. **A futásidő újbóli tesztelése szempontjából a megállapításom az, hogy az iteratív optimalizációs folyamatok, a tanulási szakaszban egyértelműen megnövekedett számítási igénnyel járnak, mivel az algoritmus kezdetben akár több tucat, esetenként több száz súlyvektort értékel ki az ismételt modellfuttatások során. Ez az idő- és erőforrás-ráfordítás szükségszerű velejárója az optimális paraméter-konfigurációk feltérképezésének és a keresési tér alapos bejárásának, ugyanakkor ahogyan fent is**

említettem a tanulási folyamat lezárását követően a rendszer futás ideje a TSK-logikai futásidőre áll, vagy attól még kedvezőbb értékre áll vissza. Ezt azzal a logikai állítással tudom alátámasztani, hogy a keresési folyamat konvergenciájának a beállta után az optimalizáció eredményeképpen meghatározott súlyvektor rögzíthető a rendszerben, s belátható, hogy a futásidő vagy megegyezik az eredeti TSK-rendszer futásidejével, vagy attól akár rövidebb is lehet, ha a fuzzy szabályok optimalizációját is elvégezzük és kivesszük a redundáns feltételeket a szabályrendszerből. Ismételten szeretném felhívni a figyelmet, hogy egy kritikus biztonsági rendszer esetén célszerű a tanulási és tesztelési fázist egy szimulátoron, offline üzem mellett elvégezni, így azok nincsenek hatással a rendszer valós idejű működtetésének folyamatbiztonságára. Az optimalizált paraméterek átvételét követően a rendszer valós idejű üzemeltetése stabilitást és hatékony működést biztosít.

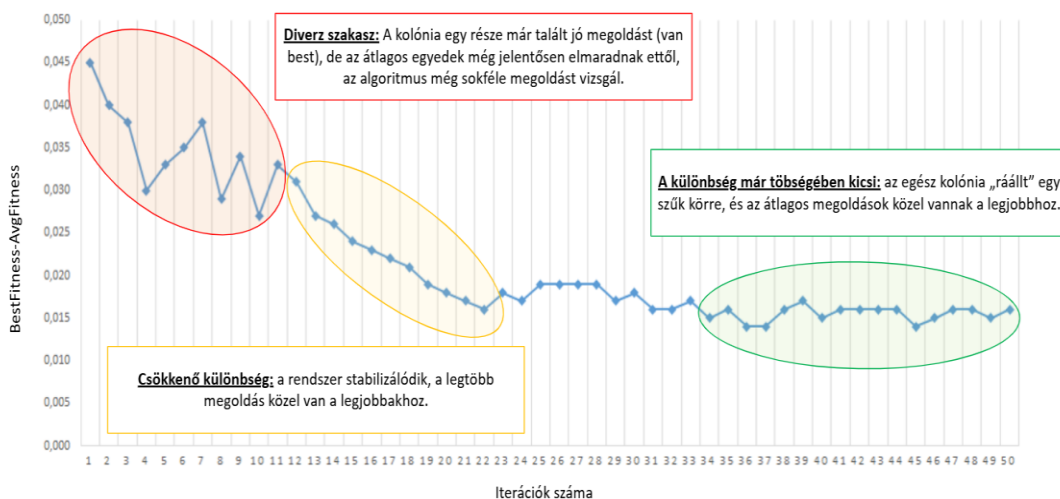
3.6.2 Az ACS kolónia-teljesítménye



50. ábra: ACS - konvergencia, forrás: MATLAB, MS-Excel (saját szerkesztés)

A fenti ábra az ACS algoritmus konvergenciáját szemlélteti a TSK-fuzzy modell súlyparamétereinek optimalizálása során, az algoritmus teljesítménye az iterációk függvényében látható. Az ACS algoritmusnál a „fitness” nem egy absztrakt fogalom, hanem közvetlenül a megoldás minőségéhez kapcsolódó mutatószám. A fenti ábrán az ACS alapú optimalizáció konvergenciáját szemléltetem a best fitness és az average fitness értékek alakulásán keresztül. Jól megfigyelhető, hogy a **Best_Fitness görbe** az első néhány iterációt követően gyors javulást mutat, majd viszonylag hamar stabilizálódik a 0,82 körüli tartományban. Ez arra utal, hogy az algoritmus korai szakaszában sikerült hatékonyan feltárnia a keresési teret, és rövid időn belül közel optimális megoldásokat találni. Az average fitness (**Avg_Fitness**) ezzel párhuzamosan szintén fokozatosan

növekszik, és az iterációs folyamat során egyre közelebb kerül a best fitness görbéhez. Ez a jelenség a populáció homogenizálódását, valamint a megoldások minőségének általános javulását jelzi. A két mutató közötti különbség csökkenése az algoritmus konvergenciájának folyamatát írja le, míg a kezdeti generációkban jelentős eltérés tapasztalható a legjobb és az átlagos megoldások között, addig a 20. iterációtól a futás végére a teljes populáció megközelíti a legjobb megoldás szintjét. Ez arra utal, hogy az ACS belső folyamatai - különösen a feromonfrissítés és a lokális keresési stratégia - hatékonyan egyesítik az explorációt² és az exploítációt³, miközben fokozatosan csökkentik a megoldások közötti diverzitást. A fenti ábra alapján megállapítható, hogy az algoritmus, a 38. iterációt követően stabil konvergenciát mutatott, és sikeresen elérte az optimális vagy közel optimális súlyparaméter-beállítást. Tekintettel, hogy a kiértékelés kifejezetten izgalmas feladat volt számomra, bevezettem egy ACS fogalomkörben nem használt mérőszámot (Best Fitness értékből kivontam az Avg Fitness értéket az adott iterációban) és jelleggörbét, aminek a **konvergencia-gap** nevet adtam, ez látható az 51. ábra. Az ábrán három jellegzetes szakaszt különítettem el, melyet az ábrán színes ellipszisekben jelenítettem meg. A 63. és 64. ábra alapján kijelenthetem, hogy az ACS-alapú optimalizáció révén a rendszer képes volt adaptívan javítani a TSK-fuzzy modell teljesítményét, és megbízhatóan elvezetett egy stabil, érdemben jobb paraméterbeállításhoz.



51. ábra: A Best Fitness és az AVG Fitness különbségének változása - mint konvergencia mutató (saját szerkesztés)

² Az algoritmus, az exploráció révén a keresési tér új, még feltáratlan régióit vizsgálja meg, és ezzel biztosítja, hogy a folyamat ne ragadjon be korán egy lokális optimum környezetébe.

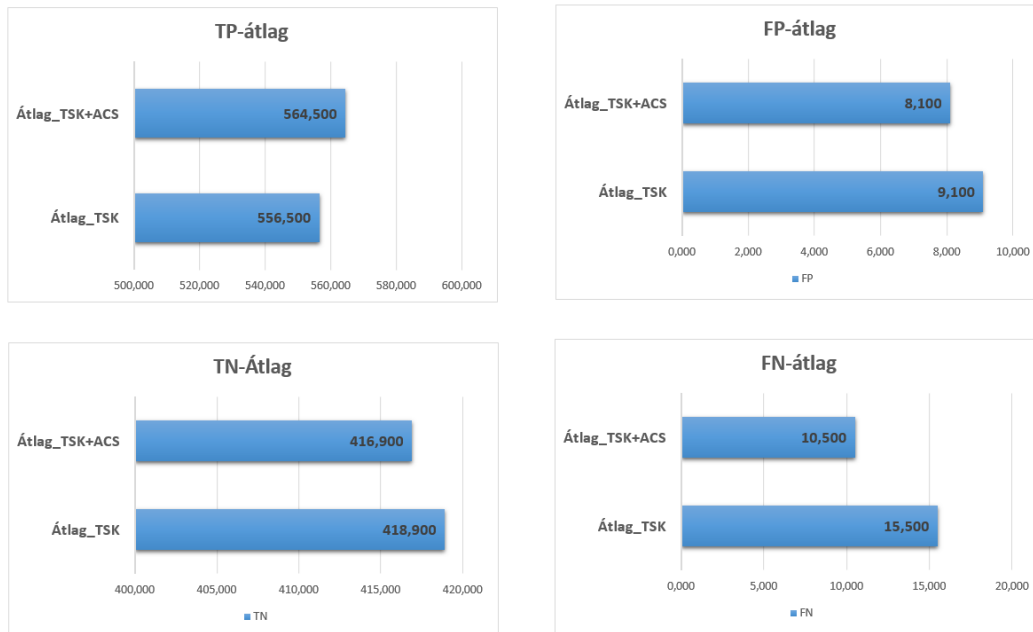
³ A már ígéretesnek azonosított megoldások finomítása és részletes kiaknázása. Célja, hogy a keresést koncentrálja a legjobb ismert régiókra, és ezáltal az algoritmus közelebb jusson az optimális megoldáshoz.

3.6.3 Összefoglalás (A TSK és a TSK+ACS)

A HAZOP-módszertanba integrált TSK-modell már önmagában is jelentős előrelépést jelentett a Mamdani-megközelítéshez képest, amint azt a korábbi fejezetekben részletesen igazoltam. Ugyanakkor a TSK-modellhez kapcsolódó súlyparaméterek kézi meghatározásának szubjektivitása és annak időigényessége, valamint a rendszer komplexitása indokoltá tette a konzekvens rész súlyparamétereinek optimalizációját. Ez a folyamat vezetett el a metaheurisztikus megközelítéshez. Ezen feladat megoldása érdekében integráltam a TSK-modellt az ACS algoritmussal, amely képes a konzekvens súlyvektorok iteratív, adatvezérelt hangolására. Az TSK-ACS hibrid modell így a TSK-modell kibővítése. A kutatás ezen szakaszában már nem volt indokolt újra elvégezni korábban kidolgozott teljes körű összehasonlító protokollt, hiszen a TSK alapmodell elemzésére és értékelésére korábban már részletes számításokat végeztem. Ehelyett az eredmények elemzésének fókuszát a TSK és a TSK+ACS modellek közötti komparatív elvű, inkrementális változások feltárása fordítottam. Annak érdekében, hogy a tudományos keret továbbra is stabil és szilárd maradjon, a teljesítménymutatókon nem változtattam. A módszertani konzisztenciát ismét a páros t-próbával biztosítom, ami - mint, ahogyan erre már utaltam a 2.4.7 fejezetben - lehetővé teszi annak eldöntését, hogy a megfigyelt eltérések statisztikailag szignifikánsak-e. E főfejezet célja annak bemutatása, hogy az ACS integrációja mennyiben járul hozzá a TSK-modell teljesítményének javításához, illetve mely dimenziókban érhető el szignifikáns előrelépés. Az eredményeket az alábbi táblázat foglalja össze.

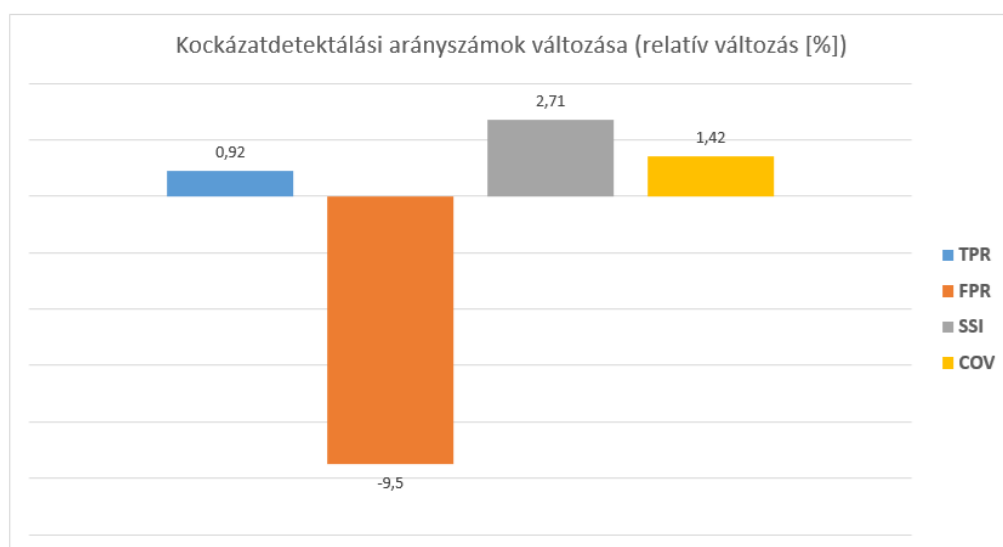
TSK+ACO								
DataSet sorszám	TP	FN	FP	TN	TPR	FPR	SSI	Coverage
1	567	8	7	418	0,986	0,016	0,917	0,574
2	562	13	6	419	0,977	0,014	0,909	0,568
3	565	10	9	416	0,982	0,021	0,911	0,574
4	561	14	8	417	0,976	0,019	0,905	0,569
5	568	7	10	415	0,988	0,023	0,914	0,578
6	563	12	7	418	0,979	0,016	0,910	0,570
7	564	11	8	417	0,981	0,019	0,909	0,572
8	566	9	9	416	0,984	0,021	0,913	0,575
9	560	15	6	419	0,974	0,014	0,906	0,566
10	569	6	11	414	0,989	0,026	0,915	0,580
Átlag	564,500	10,500	8,100	416,900	0,982	0,019	0,911	0,573
Szórás	3,028	3,028	1,663	1,663	0,005	0,004	0,004	0,004

30. Táblázat: Teljesítménymérési mutatók integrált TSK és ACS esetén (Saját szerkesztés)



52. ábra: Konfúziós mátrix releváns mutatói (sárga: TSK+ACS; kék: TSK)(Saját szerkesztés)

A TP kismértékben (kb. 1,44%) nőtt (több valós pozitív detektálás), míg a TN kismértékben (kb. -0,48%) csökkent (kevesebb hamis riasztás), s ez teljes mértékben összhangban van egy szigorúbb veszélyfelismerési képességgel. Ha érzékenység és megbízhatóság alapon vizsgáljuk a rendszerek működését, akkor feltűnő, hogy az FN jelentős mértékben csökkent (kb.: -32%) (jelentősen kevesebb elszalasztott riasztás), miközben az FP-is csökkent (kb.: 11%) (kevesebb téves riasztás). Ennek következménye a TPR javulása (+ 0,92%) és az FPR csökkenése (-9,5%). Ezek együtt a detektálási teljesítmény szisztematikus javulását jelzik.



53. ábra: A kockázatdetektálási arányok relatív változása [%] (saját szerkesztés)

A fenti ábrán látható, hogy a biztonsági érzékenység (SSI) relatív változása +2,71% tehát nemcsak magasabb biztonsági érzékenységet kaptunk, hanem lényegesen stabilabbat is. A lefedettség nőtt (COV, +1,42%), ami szélesebb működési tartományt jelent.

A szignifikancia vizsgálat – eredmények értékelése

Mutató	TSK Átlag	TSK+ACS Átlag	Δ (TSK+ACS) – TSK	Δ [%]	t-érték	p-érték	Szignifikancia
TPR	0,973	0,982	0,009	0,92%	$t \approx 3,0$	$\sim 0,012$	szignifikáns
FPR	0,021	0,019	-0,002	-9,5 %	$t \approx 8,5$	$< 0,001$	jelentősen szignifikáns
Coverage	0,565	0,573	0,008	1,42%	$t \approx 12,0$	$\ll 0,001$	jelentősen szignifikáns
SSI	0,887	0,911	0,024	2,71%	$t \approx 2,7$	$\sim 0,019$	szignifikáns

31. Táblázat: TSK+ACS integrációjának eredménye - t-próba

Az eredmények alapján, a **TSK+ACS integrációja minden mutatóban mérhető javulást eredményezett!**

- különösen az **FPR és Coverage** területén tapasztalt változások **erősen szignifikánsak**.
- A TPR és FPR változása jobb detektálást és kevesebb téves riasztást mutat.
- Az SSI változása érzékenyebb és stabilabb biztonsági viselkedést vízionál.
- A Coverage szélesebb alkalmazási tartományt predikcionál, s itt csak a szórás változása mozdul el alacsonyabb szintre.

4 ÚJ ESEMÉNYOSZTÁLYOZÁSI KERETRENDSZER

Az előző fejezetekben bemutattam a hidrogéntechnológia biztonsági kihívásait és az egyik leggyakoribb kockázatelemzési módszert, a HAZOP-ot. Miközben a szakirodalmat kutattam és a dokumentált eseményeket elemeztem, azt tapasztaltam, hogy jelenleg nem létezik egységes, hidrogénspecifikus eseményosztályozási rendszer. Ezen tényből kiindulva, motivációt éreztem arra, hogy a proaktív szemlélet mellé társítsak egy reaktív megközelítési szemléletet is. Összegezve: a kutatás és a dolgozat egysége valamint az hidrogénspecifikus eseményskála hiánya együttesen megkívánta az új modell felállítását, s ebből a gondolatból született a HISI-modell (Hydrogen Incident Severity Indicator).

4.1 A meglévő eseményosztályozási rendszerek korlátai

A dolgozat bevezető fejezetében részletesen bemutattam, hogy a hidrogén mely fizikai és kémiai tulajdonságai hordoznak fokozott kockázatokat (1. ábra). Ezt követően ismertettem a megújulóenergia-források és a szektorintegráció (földgáz- és villamosenergiaipar, nagyléptékű elektrifikáció a fogyasztói oldalon) eredményeként kibontakozó zöld- és kékhidrogén-termelési technológiák terén elért eredményeket, valamint a hidrogén, ipari, mezőgazdasági és közlekedési alkalmazásait, amelyek új típusú objektumok és infrastrukturális elemek létrehozását eredményezik vagy teszik azt szükségessé. Tekintettel e folyamatokra, feltételezhető a hidrogén veszélyeivel kapcsolatos események gyakoriságának és bekövetkezési valószínűségének növekedése. A hidrogén sajátos fizikai és kémiai jellemzői - különös tekintettel a szivárgás fokozott kockázatára, valamint a láng szabad szemmel történő észlelésének nehézségeire - egyedi biztonságtechnikai kihívásokat vetnek fel.

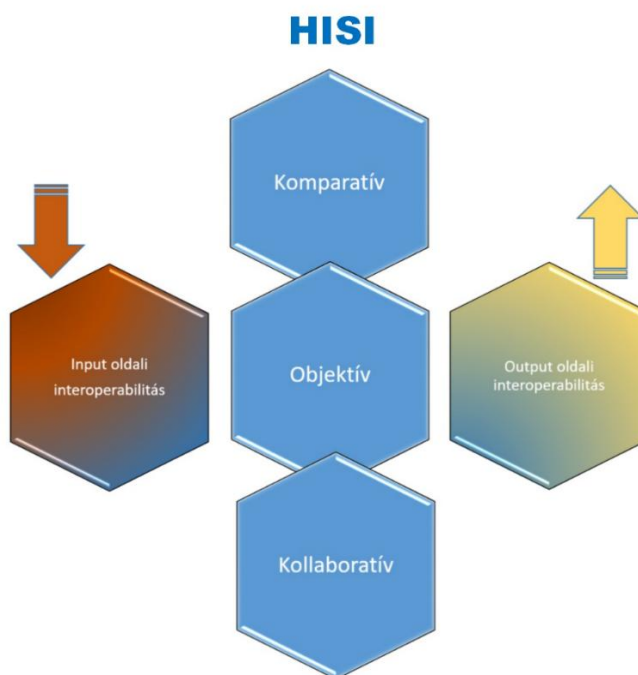
Az elmúlt évtized folyamán bekövetkezett hidrogénincidensek, valamint az ezekről készült eseményjelentések és azok elemzése rámutattak arra, hogy hiányosságok vannak a gyorsan fejlődő és intenzíven terjedő, hidrogéntechnológia eseményeinek a dokumentálása terén. A szakirodalom-kutatásom és a lefedettség hiányok feltárására végzett kutatásom (gap-analízis) megerősítette a fenti sejtésem és megállapítottam, hogy jelenleg nem létezik olyan általánosan elfogadott, többdimenziós súlyossági skála, amely a hidrogéntechnológiák eseményeinek osztályozására teljeskörűen, kompromisszummentesen alkalmas lenne. A szakirodalomban ismert módszerek, modellek vagy skálák jellemzően csak eseti, szűk technológiai fókuszú vagy komponensszintű értékelésre alkalmasak. Példaként említek a szakirodalomból néhány

jól ismert és dokumentált módszertant vagy keretrendszert: Failure Modes and Effects Safety Analysis (FMESA), a Management Oversight and Risk Tree (MORT), az Accidental Risk Assessment Methodology for Industries (ARAMIS), illetve a Hydrogen Component Reliability Database (HyCReD) [54] [55] [61] [62] [63] [64].

Az International Nuclear Event Scale (INES) [131] [132], a European Scale of Industrial Accidents (ESIA) [133] vagy az Analyse, Recherche et Information sur les Accidents (ARIA) [134] és a Hydrogen Incident and Accident Database (HIAD) [135], nem alkalmasak a hidrogénspecifikus események súlyosságának következetes, strukturált osztályozására, a következményalapú értékelésére és a súlyossági besorolására. A HIAD adatbázis, ugyan kifejezetten a hidrogéntechnológiához kapcsolódó eseményeket gyűjti és lehetőséget teremt az elemzésre is, ugyanakkor a HIAD egyik hiányossága, hogy nem rendelkezik strukturált súlyossági skálával. A közelmúltban bekövetkezett és szakmai körökben jól ismert hidrogénrobbanások és balesetek, mint például a 2019-es dél-koreai Gangneung-i laborrobbanás, a 2019-es norvég Bærum község H₂ töltőállomásának robbanása vagy a 2019-es kaliforniai hidrogéntartály-szivárgás azt jelzik, hogy a meglévő osztályozási rendszerek hiányosak vagy alkalmatlanok a hidrogénre jellemző kockázatok összehasonlítása, kommunikációja és értékelése szempontjából. A jelenlegi gyakorlatban a tanulás, a szemléltetés és a tapasztalatok átadása számos esetben nehézkesen és széttöredezetten valósul meg. Meglátásom szerint szükségessé vált egy új, hidrogénspecifikus súlyossági skála kidolgozása, amely alkalmas az események iparágfüggetlen összehasonlítására, objektív értékelésére és a kockázatkommunikáció támogatására. A hidrogéntechnológiák széleskörű elterjedése - beleértve az energetikai, ipari, logisztikai, valamint a személy- és áruszállítási szektort, továbbá a kísérleti laboratóriumi alkalmazásokat - is indokoltá teszi egy új, egységes értékelési skála kialakítását. Egy új skála kialakítása nemcsak a szemléletformálás és az oktatás hatékonyságát növeli, hanem hozzájárul a fejlettebb és komplexebb biztonságvédelmi módszerek kidolgozásához, a tapasztalatok rendszerezett átadásához, valamint a döntéshozatali folyamatok tudományosan megalapozott előkészítéséhez. Kiemelten fontosnak tartom hangsúlyozni, hogy a HISI egy interoperábilis keretrendszer, így illeszthető más iparági vagy nemzetközi osztályozási rendszerekhez is, függetlenül azok technológiai háttérétől (vegyipar, szolgáltatási szektor, mezőgazdaság...stb.). A fentiekből adódóan a HISI lehetővé teszi a hidrogénnel kapcsolatos balesetek objektív

értékelését is, valamint használatával megvalósíthatunk egy egységes súlyossági besorolását.

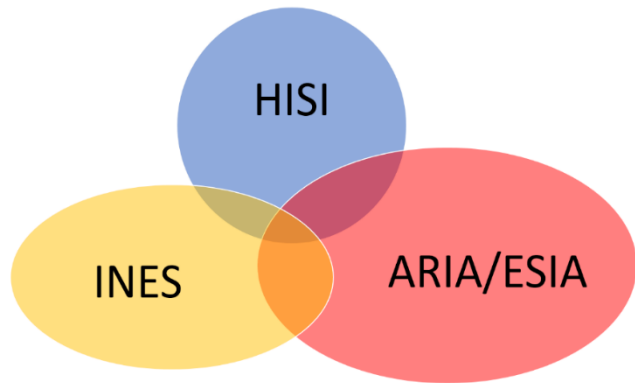
Munkám célja, hogy egy új, kifejezetten hidrogénesemények osztályozására szolgáló, tudományos alapokon létrehozott súlyossági skálával járuljak hozzá a hidrogénipar biztonságának fejlesztéséhez, és ez a skála hasznos kiegészítője legyen a már széleskörben használt ipari eseményosztályozási rendszereknek, így az mind a bementi, mind a kimeneti oldalon interoperábilis és kollaboratív szemléletű, az objektivitás fenntartása mellett pedig eseményösszehasonlításra alkalmas skálaszerkezettel rendelkezik.



54. ábra: A HISI-modell alapjai (saját szerkesztés)

A kutatás, a tudományos újdonságtartalmon túl jelentős ipari és szabályozási relevanciával is rendelkezik, hozzájárulva a jövő hidrogéngazdaságának biztonságos, ám mégis ütemes fejlődéséhez, ami végső soron a környezetvédelmi célok (az emberi társadalom fennmaradása) elérésének, az energiaellátás fenntarthatóságának és a gazdasági versenyképesség megőrzésének alapvető feltételét képezi.

A különböző iparágakban alkalmazott baleseti, súlyossági skálák eltérő célokra és jogi keretekre épülnek, ezért a hidrogénnel kapcsolatos események értékelése során a skálák alkalmazhatósága elsősorban az adott létesítmény típusától és a szabályozási környezettől függ. Nukleáris létesítményekben bekövetkező balesetek esetén, amennyiben az esemény a nukleáris biztonságot érinti, az INES az egyetlen hivatalosan elfogadott nemzetközi értékelési rendszer, amely kötelezően alkalmazandó a hivatalos jelentésekben. Ilyen esetekben a HISI skála csak kiegészítő szerepet tölthet be, lehetővé téve a hidrogénhez kapcsolódó incidens súlyosságának részletes és strukturált elemzését, amely az INES skálán belül gyakran rejtve marad. A 2011-es fukusimai atomerőmű-baleset erre szemléletes példa, az INES skála szerinti 7-es fokozatú besorolás a teljes nukleáris katasztrófa súlyosságát tükrözte, ugyanakkor a reaktorépületekben történt hidrogénrobbanások önálló kockázati jellemzői nem kaptak külön kvantitatív besorolást. A HISI ilyen esetben kiegészítő információt adhatott volna a hidrogénrobbanások fizikai sajátosságairól, következményeiről és azok biztonságtechnikai súlyosságáról, ezzel támogatva a baleset elemzését és a jövőbeni megelőző intézkedések kialakítását. Nem nukleáris, ipari létesítmények esetében, például a veszélyes anyagokkal foglalkozó üzemeknél, az ARIA vagy az ESIA keretrendszerek biztosítanak hivatalos baleseti adatgyűjtést és súlyossági értékelést, ezen rendszerekbe a HISI egy hidrogénspecifikus modulként értelmezhető, lehetővé téve, hogy a hidrogénincidensek összehasonlíthatóan, iparágfüggetlenül és kvantitatív módon kerüljenek értékelésre. Így a HISI nem váltja ki a meglévő skálákat, hanem komplementer eszközként működik közre, amely növeli a baleseti értékelések információtartalmát, javítja az interdiszciplináris kommunikációt és támogatja a szabályozási folyamatok harmonizációját.



55. ábra: A HISI komplementer szerepe és integrálhatósága más rendszerekhez (saját szerkesztés)

4.2 Kutatási módszertan és a validációs eljárások

A szakirodalmi háttér feltárása során, a hidrogéntechnológiai események átfogó elemzésére törekedtem. Kvalitatív elemzéseket végeztem a hidrogénipari balesetekkel kapcsolatban, s ekkor tűn fel, hogy a különböző hidrogéntechnológia események nehezen vagy egyáltalán nem hasonlíthatók össze. A bevezető szakaszban említett adatbázisokkal kapcsolatban kerestem releváns szakirodalmat a ScienceDirect és Scopus adatbázisban, valamint a Researchgate felületén. Az áttekintett szakirodalom alapján a következő megállapításokat teszem [54][55][61][62][63][64][131][132][133][134][135][136].

- a jelenleg alkalmazott ipari eseményosztályozási rendszerek, legyenek általános ipari/nukleáris (INES, ESIA, ARIA) vagy kifejezetten hidrogénre fókuszáló (pl.: HIAD, HIRA) adatbázisok, egyaránt jelentős hiányosságokat mutatnak, amikor a hidrogénipari események sajátos kockázati dimenzióinak kezeléséről van szó.
- jellemző, a strukturált, kvantitatív és hidrogén-specifikus adatok hiánya
- hiányzik az egységes taxonómia és adatmező-struktúra
- jellemző az események „aluljelentése”, valamint a karbantartási, üzemeltetési és emberi tényezők nem megfelelő integrációja

4.2.1 Hiányos, hidrogénspecifikus kockázati dimenziók

A jelenleg használt hidrogénipari eseményosztályozási rendszerek jelentős lefedettség hiányosságokkal küzdenek, amikor a hidrogén-specifikus kockázati dimenziók kezeléséről van szó.

- Sok modell nem foglalkozik kellő részletességgel az anyagok kompatibilitásával és ridegedési problémáival, pedig a hidrogén komoly ridegítő tényezőként lép fel a fémeknél, csökkentve a csövek vagy fémtartályok szerkezeti integritását és mechanikai ellenállóképességét.
- A karbantartási és üzemeltetési állapotok rendszeres ellenőrzésének hiánya miatt gyakran fordulnak elő szivárgások, tömítési és szelephibák, amelyek jelentősen növelik a balesetek kockázatát.

A vizsgált tanulmányok rámutatnak, hogy az emberi és menedzsment tényezők, mint például a nem megfelelő képzés, hibás üzemi protokollok vagy kommunikációs anomáliák, a jelenlegi keretrendszerekben alulreprezentáltak, pedig a legsúlyosabb események jelentős része ezen tényezőkre vezethető vissza [54]. További hiányosság, hogy a folyamatbiztonsági menedzsment elemei, mint például a kockázatcsökkentő

intézkedések vagy a vészhelyzeti tervek sok esetben nem integráltak a meglévő rendszerekbe. A cseppfolyós hidrogén (LH₂) speciális veszélyeit csak kevésbé veszik figyelembe, holott ezek eltérő biztonsági megközelítést igényelnek. A hidrogénspecifikus incidensek összetettsége, mint például a gáz rendkívül gyors diffúziója, a láng észlelésének nehézsége vagy az alacsony gyulladási energia (0,017 mJ, levegőben), tovább növeli annak kockázatát, hogy a meglévő rendszerek nem tudják megfelelően modellezni és értékelni a valós veszélyt. A vizsgált módszerek, mint például a Failure Modes and Effects Safety Analysis (FMESA), a Management Oversight and Risk Tree (MORT), az Accidental Risk Assessment Methodology for Industries (ARAMIS) és a Hydrogen Component Reliability Database (HyCREd), általában korlátozott alkalmazási tartománnyal és technológiaspecifikus fókusszal rendelkeznek, és nem tesznek lehetővé átfogó, többdimenziós súlyossági osztályozást. A fentiek alapján megállapítottam, hogy a szakirodalom a hidrogénre jellemző kockázati tényezők strukturáltabb, integráltabb és empirikusan validált feldolgozását igényli [136][137][138].

4.2.2 Modellalkotással kapcsolatos alapkövetelmények

Szakirodalomkutatásom alapján megállapítottam, hogy egy új, hidrogénspecifikus baleseti skálának strukturált, kvantitatív adatkeretre, egységes taxonómiára, hidrogénspecifikus kockázati dimenziók lefedésére és valós baleseti adatokon alapuló empirikus validációra kell épülnie, miközben kompatibilis marad fejlett elemző eszközökkel és rendszeresen frissített, nyílt adatbázissal biztosítja a naprakész kockázatértékelést [88][136][139][140].

4.2.3 A használatban lévő osztályozási rendszerek hiányosságai

Ahogy fent már említettem, a jelenlegi ipari eseményosztályozási rendszerek nem nyújtanak megfelelő keretet a hidrogéntechnológiákhoz kapcsolódó események súlyossági értékelésére, aminek a részletei:

- az INES kizárólag nukleáris eseményekre alkalmazható skála [131][132],
- az ESIA ugyan ipari balesetek kvantitatív értékelésére szolgál, de nem tartalmaz hidrogénspecifikus paramétereket [133],
- az ARIA egy iparibaleset-adatforrás és eseménytár, de önmagában nem alkalmas a hidrogénesemények szabványosított, többdimenziós súlyossági osztályozására,
- míg a HIAD ugyan hidrogén incidenseket gyűjt, de nem tartalmaz súlyossági besorolást és súlyossági skálát [135].

4.2.4 Validációs eljárások

A vizsgált publikációk közös jellemzője, hogy a validációt, valós ipari események alapján végezték el, konkrét folyamatok feldolgozásával, elemzésével. Ez biztosította, hogy az osztályozási, előrejelző vagy kockázatelemző modellek ne csupán elméleti, hanem gyakorlati szempontból is relevánsak legyenek. Az így kapott modellek megbízható alapot szolgáltattak a szabványosításhoz, a kockázatcsökkentési stratégiák kialakításához és az új biztonsági protokollok kidolgozásához [88][136][137][139][140]. A most bemutatott modellem validálását, is valós eseményekre alapoztam, s a dolgozatban bemutatom a besorolás folyamatát és eredményeit majd a modellhez kapcsolódóan a validációs célok elérése érdekében elvégzem a komplex konzisztencia analízist és az érzékenységvizsgálatot is.

4.3 A HISI-modell alapjai

A Hydrogen Incident Severity Indicatorral a céloom egy egységes, többdimenziós, strukturált súlyossági osztályozási rendszer megalkotása, hidrogéntechnológiai események objektív értékelésének a támogatásához. A HISI további célja, hogy lehetővé tegye az események következetes és összehasonlítható értékelését, elősegítve ezzel a biztonsági kommunikációt, a műszaki- és jogi szabályozást, valamint a kollektív kockázatkezelési stratégiák fejlesztését.

4.3.1 A modell alkalmazási köre

A modell közvetlenül alkalmazható a már meglévő, valamint a jövőben létesülő hidrogéntechnológiai infrastruktúrára is. A kapcsolódó technológiai területek rendkívül dinamikusán fejlődnek és bővülnek, így az alkalmazási kör meghatározása jelenleg nem tekinthető véglegesnek, hiszen az alkalmazási területek sokrétűek. A hidrogén az elmúlt évtizedben megjelent az iparban, az energetikában, a mezőgazdaságban, a közlekedés számos területén és az innovációk révén folyamatosan bővül a felhasználási területe. A tudományos szempontok kielégítése érdekében, mi mégis definiáltunk néhány alkalmazási területet, ugyanakkor jelenleg nem tekinthető teljesnek és lezártnak a felsorolás, az alkalmazási kör így nyitott minden jövőbeni, hidrogénhez kapcsolódó fejlesztési irány előtt.

Definiált alkalmazási területek:

- ipari, fosszilis bázisú hidrogénelőállítás (gőzreformálás, parciális oxidáció, elgázosítás, pirolízis),
- karbonszegény, úgynevezett zöld- és kékhidrogén előállítás (alkáli- és PEM elektrolízis),
- természetes, un. fehérhidrogén források és kitermelési infrastruktúra
- hidrogéntárolás (kis- és nagynyomású gáz valamint kriogén rendszerek),
- hidrogénszállítás (csővezetéki, kötegelt tartályok, tartálykocsik),
- hidrogénfelhasználás
 - közvetlen égetéses eljárások (robbanómotor, kazán, gázturbina),
 - elektrokémiai konverzió (tűzelőanyagcellák),
 - vegyipari felhasználás (ammóniagyártás, kőolajfinomítás, metanolgyártás, szintetikus üzemanyaggyártás),
 - ipari folyamatok (acélgyártás, üveg- és cementipar),
- kísérleti, laboratóriumi hidrogéntechnológiák (előállítás, tárolás, felhasználás, oktatás, kutatás-fejlesztés-innováció)A HISI pozicionálása a nemzetközi rendszerekbe

4.3.2 A HISI-modell koncepcionális kidolgozása és dimenziói

A HISI-skála alapjait a szakirodalmi forrásokra, a nyílt hozzáférésű adatbázisokra épített értékelési dimenziókkal kívánom biztosítani. Amint a bevezetőben kifejtettem, szakirodalmi áttekintésem során jelentős kutatási rést azonosítottam: a meglévő eseményskálák és adatbázisok nem tartalmaznak hidrogénspecifikus jellemzőket. Ennek megfelelően elsődleges céltom e sajátos kockázati profilhoz illeszkedő jellemzők kidolgozása és integrálása. Második fő célkitűzésként arra törekedtem, hogy az általunk megalkotott rendszer illeszkedjen a már létező értékelési keretrendszerekhez, eseményskálákhoz, sőt kiegészítő funkciót és többlettartalmat biztosítson a HISI, ezáltal jogi, műszaki és biztonságtechnika szempontból is harmonizációs funkciót láthat el a hazai, európai és nemzetközi iparbiztonsági gyakorlatban.

Kiemelt jelentőségű az emberi hatások értékelése a nemzetközi szabványokban és biztonsági ajánlásokban. Az Egyesült Államokban az OSHA-PSM (Occupational Safety and Health Administration - Process Safety Management) kötelező előírásai és az API RP 754 (American Petroleum Institute Recommended Practice) ajánlásai a súlyos személyi sérüléseket és a haláleseteket, egyértelműen a legsúlyosabb kategóriába sorolja

[141][142]. Az Európai Unióban a Seveso III irányelv és az eMARS (Major Accident Reporting System) adatbázis kötelezővé teszi a halálos és súlyos sérüléssel járó balesetek jelentését [143][144][145][146][147]. A Center for Chemical Process Safety (CCPS) metodikái külön kezelik a robbanás, tűz és mérgezés okozta sérüléseket [148], az ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) pedig egy szisztematikus, előre definiált rendszert alkalmaz az emberi sérülések és halálesetek statisztikai értékelésére [134]. Ezen alapelvek mentén alkottuk meg azt a koncepciót, hogy a HISI-skála önálló dimenzióként kezelje személyi sérüléseket és a fokozatosság elvét betartva, egyre súlyosabb osztályozást valósítsunk meg, a súlyosbodó személyi sérülések bekövetkezése során, biztosítva a nemzetközi kompatibilitást és az objektív összehasonlíthatóságot.

A HISI, környezeti hatások dimenziója a Seveso III irányelv környezeti kritériumaira (talaj-, víz- és levegőszennyezés) épül, de kiterjeszti azokat a hidrogénspecifikus kibocsátásokra, például a vészhelyzet során a légkörbe jutó hidrogén mennyiségére és a kritikus környezeti receptorok (védett területek, ivóvízbázisok, lakott területek) érintettségére.

A fizikai károk értékelése összhangban van az API RP 754 negyedik szintű (Significant Property Damage) mutatójával, valamint az ARIA és a Chemical Safety Board (CSB) gyakorlatával, amelyek pénzbeli küszöbértékeket és robbanásienergia-értékelést (TNT-ekvivalencia, túlnyomási zónák) alkalmaznak [150][151].

A műszaki meghibásodások dimenzió a CCPS és az OSHA-PSM által meghatározott kritikus biztonsági funkciók működésének értékelésére épül, kiegészítve az ARIA és adatbázisokban szereplő eseménykezelési, un. sikerességi mutatókkal. E négy dimenzió együttesen lefedi a hidrogénes balesetek minden releváns következményét és okát, lehetővé téve, hogy a HISI-skála egyszerre működjön technikai, jogi és kommunikációs eszközként, támogatva a biztonsági események objektív, összehasonlítható és nemzetközileg is összehangolt besorolását. A dimenziók kombinált értékelése biztosítja, hogy a HISI skála a baleset komplex következményprofilját mutathassa meg.



56. ábra: A HISI-skála dimenziói, saját szerkesztés

4.3.3 A HISI-skála szintjeinek formális definíciói és a logikai alapelvek

A skála hét szintet tartalmaz, melyek fokozatosan növekvő súlyosságot tükröznek. A HISI-1 a legkevesbé súlyos esemény. A szintek meghatározása a dimenziók (56. ábra) együttes értékelésével történik. A skála kialakítása során a következő alapelveket vettem figyelembe:

- **logaritmikus hatásszemlélet:** adaptálva az INES skála ezen tulajdonságát, a magasabb szintek exponenciálisan növekvő következményeket reprezentálnak,
- **ordinalitás:** a szintek egyértelmű sorrendiséget követnek, kvalitatív és kvantitatív hatás szerint,
- **pontosság:** minden szintnél jól körülírt határérték található a dimenziók mentén,
- **interoperabilitás:** a skálát úgy terveztem, hogy az alkalmazható legyen a fent definiált alkalmazási körökben (4.3.1), sőt a meglévő skáláknak komplementer eszköze lehessen.

4.4 A HISI-skála pontozási rendszere

A HISI-skála egy hétszintű, négydimenziós pontszám alapú rendszert alkalmazó skála. Minden dimenzióhoz egy 0-5-ig terjedő pontszám tartozik, ahol a magasabb pontszám súlyosabb következményeket jelez (57. ábra). Az egyes dimenziókra adott pontszámok összege adja a HISI-összpontszámot, amely alapján, a szintdefiníciós táblázat (58. ábra) felhasználásával meghatározható a HISI súlyossági kategória. A rendszer célja, hogy a kvalitatív leírásokat és a kvantitatív küszöbértékeket ötvözve egy objektív, reprodukálható és összehasonlítható besorolást biztosítson a hidrogéntechnológiai eseményekre, így a HISI-skála egy eddig fennálló hiányosságot pótol.

Dimenzió	0 pont	1 pont	2 pont	3 pont	4 pont	5 pont
Emberi hatás	Nincs sérülés	≤1 könnyű sérült	≥ 2 könnyű és/vagy 1 súlyos sérült	≥ 2 súlyos sérült és/vagy 1 haláleset	2–3 haláleset	>3 haláleset
Környezeti hatás (elsődleges: légkörbe jutott H ₂ tömeg; másodlagos: receptor érintettsége)	<0,5–1,5 kg; nincs receptor	1,5–5 kg; nincs receptor érintettség	5–200 kg; nincs tartós égés; a hatás lokális és rövid idejű, receptort csak részben érintett	200–500 kg; tartós égés, a hidrogénen kívül más éghető anyag is tartósan égett, receptor biztosan érintett	500-1000 kg; tartós légköri/ökológiai hatás, lokális és regionális hatások, receptor biztosan érintett	>1000 kg; Tartós, regionális légköri/ökológiai hatás receptor biztosan érintett
Fizikai kár (elsődleges: robbanás és/vagy tűz; másodlagos: kár mértéke)	Nincs kár, nincs tűz, nincs robbanás, kár: <10k €	Kis tűz, kézi oltóval oltva; kár: 10k–100k €	Kis tűz, kis kiterjedés, mérsékelt kár: 100k–1 M€	Komplex tűz, több oltási pont jelentős kár: >1 M€	Robbanás, jelentős kár: >1 M€	Robbanás, súlyos károk, az eszköz és/vagy a környezet már nem javítható, kár: >10 M€
Műszaki meghibásodás (elsődleges: emberi-másodlagos: műszaki tényező)	Emberi mulasztás hiba/minden biztonsági rendszer jól működött	Marginális emberi hiba és részleges műszaki hiba, gyors beavatkozás	Emberi hiba/részleges műszaki hiba, az esemény lokális tüzzel vagy robbanással járt	Jelentős emberi hiba/kritikus hiba egy alrendszerben, késleltetett beavatkozás, kiterjedt tűz, robbanás	Több alrendszer hibája, nincs lehetőség megelőző beavatkozásra	Felelőtlen és jelentős emberi hiba és/vagy kritikus rendszerhiba (több fontos alrendszer hibája, hiányossága)

57. ábra: Dimenziók - hatások és pontok, saját szerkesztés

Szint	Összpontszám	Szöveges értékelés
HISI-7	19-20	nagyon súlyos baleset
HISI-6	16-18	súlyos baleset
HISI-5	13-15	baleset – nagy kiterjedés
HISI-4	10-12	baleset – kis kiterjedés
HISI-3	7-9	súlyos üzemzavar – folyamatok ellenőrzése
HISI-2	4-6	üzemzavar – fokozott figyelem + felülvizsgálatok
HISI-1	0-3	eltérés – fokozott figyelem

58. ábra: Szintdefiníciós táblázat, saját szerkesztés

Egy esemény elemzése során, két eredményt kapunk. Az egyik eredmény a HISI-szint melyhez kapcsolódik még egy nagyon egyértelmű és szándékosan rövid szöveges értékelés is. A másik eredmény egy radardiagram, ami szemléletesen mutatja a bekövetkezett esemény jellegét. Ezt a diagrammot, az esemény következményprofiljának tekinthetjük és a HISI-Quadrilemma nevet adtam neki. A quadrilemma egy szemléltető és kommunikációs eszköznek, a gyors tájékoztatás és összehasonlítás érdekében.

4.5 A HISI-empirikus validációja

Egy új biztonsági, súlyossági skála tudományos alátámasztásának egyik módja, ha annak elméleti felépítését és pontozási logikáját valós események adatain végzett empirikus validációval támasztom alá. Az empirikus validáció célja egyrészt a skála gyakorlati működésének ellenőrzése, másrészt a következetesség értékelése.

4.5.1 Alkalmazott adatforrások és esettanulmányok

A validáció első lépéseként gondosan kiválasztott esettanulmányokat soroltam be a HISI hétfokozatú skálájára. Az empirikus validációt több, eltérő jellegű és megbízható adatforrásra alapoztam. Elsődleges kiindulópontként a HIAD szolgált, amelyet

kiegészítettem az ESIA és ARIA adatbázisok adataival, valamint számos nyílt forrásból és az Elsevier által gondozott tudományos adatbázisokból származó információval. A publikációhoz és a dolgozathoz szándékosan olyan eseményeket választottam, amelyek egyrészt széles körben és szabadon hozzáférhetők, másrészt jól reprezentálják a kimenetek közötti jelentős eltéréseket. Fontos kiválasztási szempont volt továbbá, hogy a vizsgálatok státusza lezárt legyen, vagyis a körülményeket a vizsgáló hatóságok teljes körűen, a legjobb tudásuknak megfelelően feltárták, és az eseményekkel kapcsolatban új információ már nem várható. A kiválasztott esetek különböző országokból és létesítménytípusokból származnak, ami biztosítja a módszertani sokféleséget, és egyben növeli a modell robusztusságát. A vizsgálati példánkban szereplő három esemény:

- Kjørbo (2019.06.10.), Norvégia-Sandvika: töltőállomás-robbanás
- Santa Clara (2019.06.01.), USA: tartálykocsi robbanás és tűz
- Gangneung (2019.05.23.), Dél-Korea, laborrobbanás

4.5.2 Rövid esetösszefoglalók

✪ **Kjørbo(Sandvika):** Nyílt téren, egy gyors diszperziós hatású, viszonylag rövid ideig tartó tüzeset történt egy hidrogén-töltőállomáson, A beszámolók szerint két személy könnyebb sérülést szenvedett, azonban mi ezt nem vesszük figyelembe mert megállapítható, hogy a sérülések nem közvetlen hatások voltak, hanem un.: másodlagos balesetek, autó légszákjának a nyitása okozott könnyebb sérülést a 2 személynél. Az esemény mérsékelt, kis helyre koncentrálódó infrastrukturális károkat okozott, a nagynyomású hidrogéntároló tartály ugyan gyakorlatilag megsemmisült, de a tűz nem terjedt át sem a töltőállomás további részére sem a civil lakosság tulajdonára. A tűz 500 méteres körzetében lakott terület is található. A hivatalos vizsgálat megállapította, hogy a balesetet szerelési, telepítési hiba okozta (nem kellő nyomatékkal meghúzott csatlakozó csavarok a nagynyomású hidrogéntartályon). A hiba következménye szivárgás lett, de a vizsgálat során feltárták, hogy a tartály nyomásérzékelője nem működött megfelelően. A jelentések szerint a szivárgás huzamosabb ideig fennállhatott, s a levegő-hidrogén elegy meggyulladásához vezetett. Az eseményt követően az üzemeltető, a NEL Hydrogen, minden norvégiai és több európai állomását ideiglenesen bezárta, a szereléseket felülvizsgálta, és a szerelési folyamatra, valamint annak ellenőrzésére új, szigorított módszert vezetett be [59][152][153].

- ✪ **Santa Clara:** egy moduláris hidrogén szállító trailer töltése közben szivárgást észleltek a gépkocsi kezelői. A gépkocsikezelők, annak ellenére, hogy nem volt engedélyük ilyen tevékenységre, megpróbálták javítani, cserélni a tömítést, de a biztonsági előírásokat nem tartották be (LockOut/TagOut), majd mindezt félreérthető kommunikációval tetézték, amit a kevésbé tapasztalt személy nem jól értett és rossz működtetőgombot nyomott meg, így a hidrogén tömegáram megindult a szabadba, ahol a levegővel keveredve nagy erejű deflagrációs robbanást eredményezett. A folyamat során ezt követően kialakult egy sugárláng, s a tűz átterjedt a szomszédos, parkoló dízel üzemű teherautókra. A riportokban az is olvasható, hogy a kb. 40m-re lévő épület ablakai kitörték a lökéshullám következtében. Személyi sérülés nem történt (fülzúgás és vállfájdalom volt, de a kezelők megmenekültek enyhébb sérülések nélkül). A károk: 4 teherautó és a szállítmányok, valamint 250 kg hidrogén szabadult ki, égett el. A cég elrendelte a biztonsági tréninget és felülvizsgálták a kommunikációs utasításokat és a munkafolyamatokat [154][155].
- ✪ **Gangneung:** egy kísérleti laboratóriumban nagy erejű robbanás történt. A robbanást kiváltó oknak, egy elektrolizáló-cella membránjának a meghibásodását jelölték meg. A kezelők, a hibát nem észlelték időben, mert nem voltak beépített mérőműszerek és nem voltak kidolgozva erre az esetre ellenőrzési folyamatok. A sérült membrán nem választotta el tökéletesen a hidrogént és az oxigént, így a hidrogénáramba oxigén is keveredett, ami egy 40 m³-es, 10 bar-os hidrogéntartályba halmozódott fel. A tartály tartalmát nem monitoringozták, így kialakulhatott a végzetes oxigén-hidrogén keverék, ami gyújtóforrással találkozva detonációt váltott ki. A számítások szerint a robbanás ereje, kb. 50kg TNT-egyenértéknek felelt meg, s a tartály valamint környezetének megsemmisülését okozta, valamint a lökéshullámot még 100m-el távolabb is érezni lehetett, ahol ablakok törtek ki. Sajnálatos módon két ember életét veszítette és további hat személy, sérüléseket szenvedett [57][156][157].

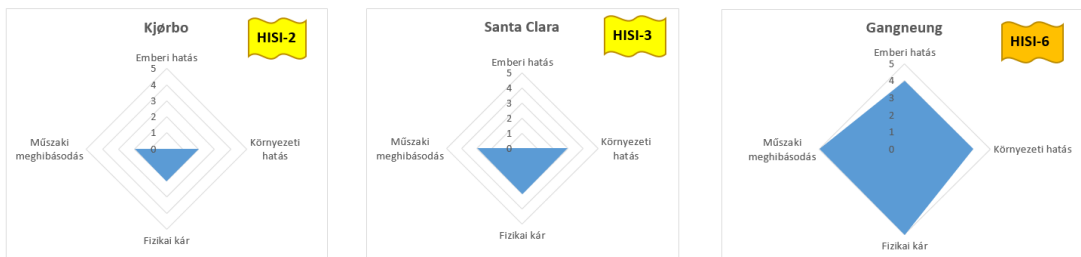


59. ábra: Helyszíni fotók, sorrendben balról jobbra: Kjørbo [158], Santa Clara [159], Gangneung [160]

4.5.3 Esetek besorolása a HISI-skála alapján

A Kjørbo és Santa Clara esetén ugyan előfordultak kisebb sérülések, ezek azonban másodlagos vagy alig értékelhető sérülések voltak. A környezeti károk mindhárom esetben jelentősek voltak, Gangneung esetén a detonációs hatás különösen erőteljesen érvényesült. A részletes pontszámok, a súlyossági besorolások, valamint a HISI-quadrilemmák a 75. ábrán láthatók.

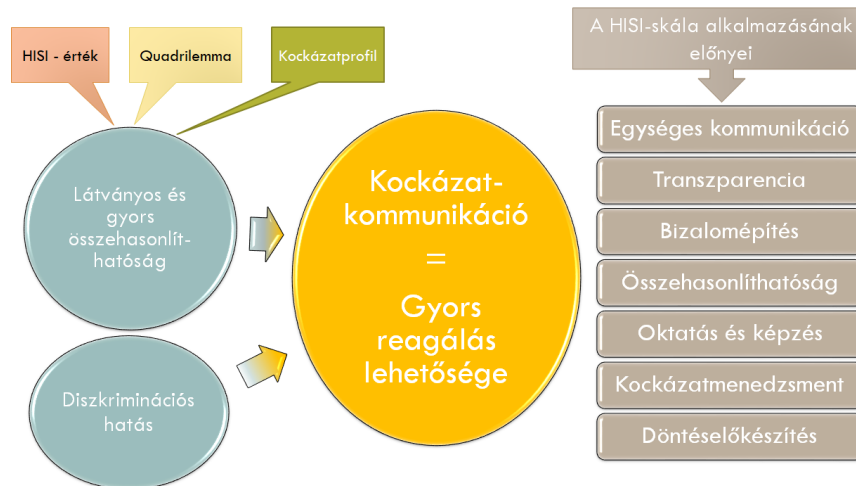
Eset	Emberi hatás	Környezeti hatás	Fizikai kár	Műszaki meghibásodás	Összpontszám	HISI	Szöveges értékelés
Kjørbo	0	2	2	2	6	HISI-2	Üzemzavar – fokozott figyelem + felülvizsgálatok
Santa Clara	0	3	3	3	9	HISI-3	Súlyos üzemzavar – folyamatok ellenőrzése
Gangneung	4	4	5	5	18	HISI-6	Súlyos baleset



60. ábra: Az esettanulmányok besorolása a HISI-skálára és a kapcsolódó quadrilemmák, saját szerkesztés

A táblázatban látható pontszámok és szintek alapján a vizsgált esetek egyértelműen eltérő kockázati kategóriákba sorolhatók, ami igazolja a skála diszkriminációs képességét.

A mellékelt **quadrilemma diagramoknak külön erőssége, hogy a négy dimenzió vizuálisan is összevethetővé válik, és a szintek azonnal értelmezhetők mind szakmai, mind kommunikációs szempontból.** A központból kiinduló tengelyek hossza egyértelműen mutatja a domináns kockázati tényezőket, a feltüntetett HISI-szint pedig gyors tájékozódást biztosít a döntéshozók és a nyilvánosság számára is. Látható az is hogy az első két eset hasonló eseményprofilal rendelkezik, csak Kjørbon a tűz inkább maradt lokális jellegű, és mérsékelt károkat okozott, s ennek a következménye, hogy kedvezőbb az esemény besorolása, mint a Santa Clara esetben. A profilból és a HISI-skálából is látszik, hogy a laborrobbanás egy jelentősen kiterjedtebb és katasztrófális balesetnek minősíthető. Ez a vizualizációs forma nemcsak a technikai elemzést segíti, hanem a kockázatkommunikáció terén is új és hatékony eszköz lehet a hidrogénipari incidensek területén, hiszen egyetlen pillantással átláthatóvá teszi az esemény profilját és súlyosságát.



61. ábra: A HISI-skála alkalmazásának indoklása (saját szerkesztés)

4.5.4 Megbízhatóságot vizsgáló eljárások - bevezetés.

A HISI-skála validálása több, egymást kiegészítő eljárással is támogatható, melyek célja a modell megbízhatóságának, valamint iparágfüggetlen alkalmazhatóságának igazolása. A validáció során kiemelt jelentőséggel bír **a skála belső koherenciáját vizsgáló konzisztenciateszt, melyet az érzékenységvizsgálattal elkészítettem** ki a kutatásom során. A konzisztenciaanalízis, arra irányul, hogy az összehasonlítható nagyságrendű és következményű események egységesen ugyanazon kategóriába kerüljenek besorolásra, valamint hogy a pontozási rendszer belső ellentmondásoktól mentes, logikailag következetes struktúrát alkosson.

Az **érzékenységvizsgálat kvantitatívan** teszteli, hogy kis bemeneti változások (például egy pontnyi növekedés a környezeti hatásban vagy egy haláleset megjelenése) okoz-e besorolási szintváltást, ezáltal mérve a skála „finom-különbségekre” adott reakcióját. E módszerek kombinációja biztosítja, hogy a HISI-modell robusztus, transzparens és döntéstámogatásra alkalmas maradjon különböző ipari környezetben.

4.5.5 Konzisztenciaanalízis kvalitatív módon

A konzisztenciavizsgálat a balesetosztályozási skálák érvényesítésének egyik alapvető módszertani eszköze. Lényege, hogy feltárja, mennyire következetes a skála belső logikája, illetve hogy a rendszer által nyújtott kategorizálás mennyiben tükrözi a vizsgált események nagyságrendi és következményi sajátosságait. Egy megbízható osztályozási keretrendszer elengedhetetlen feltétele, hogy az azonos súlyú és hatású események összehasonlítható módon kerüljenek értékelésre, és ne fordulhasson elő olyan helyzet, hogy a pontozási rendszer belső ellentmondások miatt eltérő kimenetet rendel hasonló esetekhez. A konzisztenciavizsgálat gyakorlati megvalósítása során a skála egyes

dimenziói mentén tipikus eseményforgatókönyvek kerülnek összevetésre. E vizsgálat lehetővé teszi annak ellenőrzését, hogy az eltérő attribútumokkal jellemezhető, de hasonló következményekkel járó esetek azonos kategóriába sorolódnak-e. Amennyiben a rendszer azonos súlyosságú események között következetesen különbséget tesz, az a skála finomhangolását vagy a kategóriák közötti határértékek újradefiniálását teheti szükségessé. Tudományos szempontból a konzisztenciavizsgálat túlmutat a pusztán technikai ellenőrzésen, mivel visszajelzést ad a modell logikai struktúrájáról is. Egy skála akkor tekinthető valóban robusztusnak, ha a különböző dimenziók mentén adott értékelések nemcsak belsőleg koherensek, hanem egyúttal illeszkednek a biztonságstudományi szemléletben általánosan elfogadott oksági és következményrendszerekhez. Ennek hiányában fennáll annak kockázata, hogy a skála használata félrevezető vagy torzított eredményekhez vezet.

A HISI-skála konzisztenciavizsgálata különös jelentőséggel bír, mivel egy hidrogénspecifikus környezetben alkalmazott osztályozási keretrendszerrel van szó. A hidrogéntekológiák sajátos kockázati profilja miatt kulcsfontosságú annak igazolása, hogy a skála képes következetesen kezelni a különböző forrásból eredő, de azonos következményeket kiváltó eseményeket. Ez nemcsak a skála tudományos érvényességét támasztja alá, hanem a gyakorlati alkalmazhatóságát is, hiszen egy inkonzisztens rendszer akadályozná a transzparens incidenskommunikációt és a döntéstámogatási folyamatokat.

Összességében a konzisztenciavizsgálatot tartom a HISI-skála validálásának meghatározó módszerének. Segítségével ellenőrizhető, hogy a skála belső felépítése logikailag koherens, ellentmondásoktól mentes, és alkalmas az események objektív, összehasonlítható kategorizálására. Disszertációmban ezért a konzisztenciavizsgálatot kombináltam az érzékenységvizsgálattal a HISI-skála tudományos megalapozottságának ellenőrzésére és igazolására.

A fenti három eset (4.5.2 fejezet) alapján a konzisztenciavizsgálat kvalitatív eredményei:

- A HISI-skála pontozási rendszere 0 és 5 közötti értéktartományban mozog, ahol minden egyes pontszám világosan definiált, jól definiált kritériumhoz kapcsolódik. A kategóriák közötti különbségek egyértelműek és diszkréten elkülönülnek, ezáltal biztosítva a skála átláthatóságát, valamint az események konzisztens és objektív besorolhatóságát.

- A mintaesetek kvalitatív leírása és a HISI-skála pontozási rendszere koherensen illeszkednek egymáshoz. A narratív eseményleírások tartalmi elemei világosan megfeleltethetők a skála egyes pontértékeinek, így biztosított, hogy az értékelés során az adott esemény következményei és súlyossági szintje pontosan tükröződjön a numerikus besorolásban. Ez az összhang a kvalitatív jellemzők és a kvantitatív pontozás között növeli a skála érvényességét és transzparenciáját, valamint alátámasztja annak alkalmasságát a hidrogéntechnológiai események objektív összehasonlítására.
- Mindhárom vizsgált incidens esetében az egyes dimenziókhoz rendelt pontszámok, az ezekből képzett összpontszám, valamint az értékelési táblázat által mutatott eredmények összhangban állnak egymással, és belső konzisztenciát tükröznek. Ez arra utal, hogy a skála logikai struktúrája következetesen működik, az egyes értékelési elemek között nincsenek ellentmondások, és a dimenziók összevetése megerősíti a teljes rendszer koherenciáját.
- A fotódokumentáció (59. ábra) és a releváns szakirodalmi források összevetése alapján megállapítható, hogy a HISI-skála által generált értékek reális közelítést nyújtanak az események következményeinek megítélésére. Az eredmények összhangja a vizuális bizonyítékokkal és a publikációkban közölt adatokkal alátámasztja a skála alkalmazhatóságát és megbízhatóságát, továbbá erősíti annak érvényességét a hidrogéntechnológiai incidensek objektív értékelésében.
- A HISI-skálát összehasonlítva az INES skálával jelentős vizuális különbségeket láthatunk. Az INES legfontosabb vizuális eleme a színkódolás, amely sárga színtől kezdve (0-3. szint) narancs árnyalatokon át (4-5. szint) egészen a piros színig (6-7. szint) változik, ennek analógiáját én is beépítettem a HISI-skálába (5 szín a hét szintre, mely a súlyosság függvényében halad a zöldtől a pirosig). Az INES egy piramis vagy létra formájú vizuális elrendezésben jelenik meg, ahol a fokozódó súlyosságot a színek fokozatos átmenete szemlélteti ezzel szemben jelentős vizuális és információs újdonságnak tekintem az eseményprofil, ahol a numerikus érték alapján nem csak egy lineáris skálát láthatunk, hanem a dimenziók mentén a komplex (ezáltal a beavatkozás jellege jobban tervezhető) eseményprofil. Ezt a vizuális megjelenítést neveztem el a HISI-quadrilemmának.
- Ez a megoldás lényegesen pontosabb és árnyaltabb képet nyújt az események súlyosságáról, mivel lehetővé teszi a többdimenziós jellemzők egyidejű

vizualizációját. A kvantitatív és kvalitatív elemek integrálása révén a HISI-quadrilemmák nemcsak szakértői környezetben alkalmazhatók, hanem olyan felhasználók számára is értelmezhetők, akik nem rendelkeznek mély biztonságtechnikai vagy tudományos háttérrel. Ezáltal a módszer széles körben alkalmas lehet a lakossági kockázatkommunikáció támogatására, valamint automatizált rendszerekbe való integrációra, például vizuális képfelismerő algoritmusokkal összekapcsolva, amelyek többszintű biztonsági riasztásokat képesek generálni. A HISI-quadrilemmák tehát nem pusztán új vizuális eszközt jelentenek, hanem egy olyan módszertani innovációt is, amely a jövőben a biztonságirányítás és a kockázatkommunikáció egyik kulcselemévé válhat. A HISI-quadrilemmák (60. ábra) vizuális ábrázolásai tehát jól tükrözik az egyes esetek lényegi jellemzőit, mivel az eseményprofil és a HISI-érték együttes megjelenítése egyértelmű és könnyen értelmezhető összképet nyújt. Ez a vizuális reprezentáció jelentősen gyorsítja és hatékonyabbá teszi az eseménykommunikációt, elősegítve a komplex incidensek átlátható, gyors bemutatását és a döntéstámogatási folyamatok információigényének kielégítését.

4.5.6 Konzisztenciaanalízis kvantitatív módon: Cronbach- α mutató

A konzisztenciaanalízis kvantitatív eszközeinek egyik legelterjedtebb módszere a Cronbach- α mutató számítása, amely a belső megbízhatóság mérésére szolgál. A Cronbach- α értéke azt fejezi ki, hogy a skála egyes tételei, dimenziói mennyire koherensen tükrözik ugyanazt a mögöttes konstrukciót. Matematikai értelemben a mutató a tételek közötti korrelációk átlagán alapul, így minél magasabb az α értéke, annál nagyobb a skála belső konzisztenciája.

Legyen X_1, X_2, X_3 és X_4 a HISI-skála négy dimenziója:

X_1	Emberi hatás
X_2	Környezeti hatás
X_3	Fizikai kár
X_4	Műszaki meghibásodás

$$T = \sum_{i=1}^k X_i$$

ahol:

X_i – az i – edik dimenzió

k - a dimenziók száma (esetünkben: 4)

A T , ebben az esetben egy összeg és ez megegyezik a HISI-skála öszpontszám számításával.

Esemény	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
Kjørbo	0	2	2	2
Santa Clara	0	3	3	3
Gangneung	4	4	5	5

A szórásnégyzet, más néven variancia, a szóródást jellemző mérőszám. Azt fejezi ki, hogy az értékek átlagosan mekkora négyzetes eltérést mutatnak a középértékhez (várható értékhez) képest.

Ha

$$\sigma^2(Z) = \text{Var}(Z)$$

és

$$T = \sum_{i=1}^k X_i \dots \rightarrow \text{akkor}$$

$$\sigma^2(T) = \text{Var}\left(\sum_{i=1}^k X_i\right)$$

A variancia lineáris tulajdonsága két változó alapján, az hogy a variancia és kovariancia viselkedése, összegek esetén szabályos, lineáris formában felírható. Az egyes változók varianciái összeadódnak, az összes páronkénti kovariancia pedig kétszeresen jelenik meg, ami így írható fel:

$$\text{Var}(X + Y) = \text{Var}(X) + \text{Var}(Y) + 2\text{Cov}(X, Y)$$

Kiterjesztés több változóra (a HISI négy dimenziója érdekében):

$$\text{Var}\left(\sum_{i=1}^k X_i\right) = \sum_{i=1}^k \text{Var}(X_i) + 2 \sum_{i<j}^k \text{Cov}(X_i, X_j)$$

$$\sigma^2(T) = \sum_{i=1}^k \sigma^2(X_i) + 2 \sum_{i<j}^k \text{Cov}(X_i, X_j)$$

A Cronbach- α eredeti definíciója [162], azt mutatja meg, hogy az összpontszám varianciájának mekkora hányadát adják a közös kovarianciák. Ez az én esetemben az „együttjárás” jelentése a HISI-dimenziók között.

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left(\frac{\sum_{i<j}^k \text{Cov}(X_i, X_j)}{\sigma^2(T)} \right)$$

A nemzetközi gyakorlatban a 0,7 feletti érték általában elfogadhatónak, míg a 0,8-0,9 közötti tartomány kiválónak tekinthető, bár a konkrét értékelési határértékek mindig a vizsgált terület és a kutatási célok függvényében kerülnek meghatározásra.

A HISI-skála esetében a Cronbach- α alkalmazása lehetővé teszi annak számszerűsítését, hogy az egyes dimenziókhöz rendelt pontszámok mennyire illeszkednek egy közös, többdimenziós egységbe (konstruktum), amely az események súlyosságát és következményeit hivatott leírni. Ha a mutató magas belső konzisztenciát jelez, az azt támasztja alá, hogy:

- a dimenziók nem független,
- nem esetleges tényezőket ragadnak meg,
- hanem egy egységes rendszer részei, amelyek együtt képesek megbízható értékelést adni az incidensekről.

Ezzel szemben, ha a Cronbach- α alacsony értéket mutatna, az a skála:

- egyes dimenzióinak újradefiniálását,
- a pontozási kritériumok felülvizsgálatát,
- a kategóriák közötti határértékek pontosítását tenné szükségessé.

A kvantitatív konzisztenciavizsgálat tehát nemcsak statisztikai megerősítést ad a HISI-skála belső logikai koherenciájára, hanem közvetett módon hozzájárul annak tudományos érvényességéhez és gyakorlati alkalmazhatóságához is. A Cronbach- α segítségével igazolható, hogy a skála belső struktúrája ellentmondásmentes, és képes stabil, reprodukálható eredményeket szolgáltatni különböző eseménytípusok esetén. Ez különösen fontos a hidrogénbiztonsági környezetben, ahol az objektív, konzisztens és transzparens értékelés nemcsak tudományos, hanem társadalmi és ipari szempontból is kiemelt jelentőséggel bír.

A konstruktum⁴ az a „változó”, amire a dimenziók együttesen utalnak, így a mi esetünkben ez a baleseti súlyosság. A módszer egyik megkötése, hogy nagyobb esetszámra pontosabb eredményeket ad [161]. A disszertáció terjedelmi korlátai miatt megmaradtam a három, eddig ismertetett esetnél, vállalva, hogy esetleg nem kapunk ideális eredményt. A későbbiekben a kutatás folytatása során egy nagyobb adatbázist kívánok létrehozni a most megkezdett és kidolgozott módszert szeretném kiterjeszteni egy nagyobb számú mintára.

⁴ A konstruktum olyan elméleti „entitás”, amely komplex jelenségeket ragad meg, közvetlen mérhetőséggel nem rendelkezik, ezért a kutató által meghatározott indikátorok, dimenziók és változók segítségével közelíthető és mérhető és dokumentálható.

Eset	Emberi hatás	Környezeti hatás	Fizikai kár	Műszaki meghibásodás
Kjørbo	0	2	2	2
Santa Clara	0	3	3	3
Gangneung	4	4	5	5

62. ábra: A vizsgált esetek - kiindulási állapot a konzisztencia vizsgálathoz, saját szerkesztés

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_i^2}{\sigma_{total}^2} \right)$$

ahol:

k – a dimenziók száma

σ_i^2 – az egyes dimenziók varianciája

σ_{total}^2 – az összpontszám varianciája

Események összpontszáma:

- Kjørbo: $0+2+2+2 = 6,0$
- Santa Clara: $0+3+3+3 = 9,0$
- Gangneung: $4+4+5+5 = 18$

Átlag:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Variancia:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Az emberi hatás dimenzióra számított átlag: $0 + 0 + 4 = 4$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{3} \times 4 = 1,33$$

Az emberi hatás dimenzióra számított variancia:

- Átlagtól való eltérés számítása $\rightarrow (x_i - \bar{x})$:
 - $x_{1K} - \bar{x} = 0 - 1,33 = -1,33$
 - $x_{1SC} - \bar{x} = 0 - 1,33 = -1,33$
 - $x_{1G} - \bar{x} = 4 - 1,33 = 2,67$
- Az átlagtól való eltérések négyzetre emelése $\rightarrow (x_i - \bar{x})^2$:
 - $(-1,33)^2 \sim 1,78$
 - $(-1,33)^2 \sim 1,78$
 - $(2,67)^2 \sim 7,11$

$$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 1,78 + 1,78 + 7,11 = 10,67$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{10,67}{3-1} = \frac{10,67}{2} = 5,33$$

Összefoglaló táblázat:

Dimenzió	Értékek	Átlag	Variancia
Emberi hatás	0,0,4	1,33	5,33
Környezeti hatás	2,3,4	3,00	1,00
Fizikai kár	2,3,5	3,33	2,33
Műszaki meghibásodás	2,3,5	3,33	2,33

Dimenziók varianciája:

- Emberi hatás: variancia: 5,33
- Környezeti hatás: variancia: 1,00
- Fizikai kár: variancia: 2,33
- Műszaki meghib. variancia: 2,33

A dimenziók variancia összege:

$$5,33 + 1 + 2,33 + 2,33 = 10,99 \sim 11$$

Eset	Emberi hatás	Környezeti hatás	Fizikai kár	Műszaki meghibásodás	Összpontszám
Kjørbo	0	2	2	2	6
Santa Clara	0	3	3	3	9
Gangneung	4	4	5	5	18

Esetek dimenzió alapú összpontszáma:

- Kjørbo: 6,0
- Santa Clara: 9,0
- Gangneung: 18

Az esetek összpontszámából számított variancia:

Az összpontszámok varianciája: 39

A Cronbach- α számítása:

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_i^2}{\sigma_{total}^2} \right) =$$

$$\frac{4}{3} \left(1 - \frac{11}{39} \right) = 1,333 \times (1 - 0,282) = 1,333 \times 0,718 = \mathbf{0,957}$$

A kapott Cronbach- α eredmény: 0,957, ahogyan fent említettem, a Cronbach-alfa elméleti tartománya 0 és 1 között van, ahol az 1 érték a maximális belső konzisztenciát jelenti a skálán szereplő tételek között. Ha az érték 0,5 alatt van, akkor a belső konzisztencia nem fogadható el. A gyakorlatban 0,7-0,75-től elfogadhatónak tekintjük a konzisztencia értékét, 0,9 felett pedig kiváló. A 0,957-es érték egyértelműen mutatja már a három mintára is, hogy a rendszer belső konzisztenciája kiváló.

4.5.7 Érzékenységvizsgálat

Az érzékenységvizsgálat a validációs módszertan fontos kiegészítő eszköze, melyet én a fent bemutatott konzisztenciaanalízissel kombinálok. Az érzékenységvizsgálattal, a HISI-skála stabilitását és robusztusságát kívánom mérni. A módszer lényege, hogy megmutassa, mennyire változnak az eredmények akkor, ha a bemeneti paraméterekben kisebb változások, módosulások következnek be. Egy jól megalkotott keretrendszer esetében az apró változtatásoknak csak mérsékelt hatást szabad gyakorolniuk az összpontszámra; ellenkező esetben a skála túlzott érzékenységet mutatna, ami megbízhatatlanná teheti az incidensek besorolását.

Az érzékenységvizsgálat különösen fontos kiegészítése a konzisztenciaanalízisnek. Míg a konzisztenciavizsgálat a skála belső logikai koherenciáját ellenőrzi, az érzékenységvizsgálat dinamikusabb szempontot képvisel: azt értékeli, hogy a modell mennyire stabil különböző körülmények között. Ez a kettő együtt biztosítja, hogy a skála egyszerre legyen logikailag következetes és gyakorlati alkalmazásban robusztus. A HISI-skála esetében az érzékenységvizsgálat kulcsszerepet játszik abban, hogy igazolja: a dimenziókhöz rendelt súlyok, valamint az eseményekhez tartozó pontszámok változtatása nem vezet aránytalanul nagy eltérésekhez a végső besorolásban. Ha például egy adott dimenzióban kismértékű elmozdulás történik, de az összpontszám és a kategória stabil marad, az a skála ellenálló képességét bizonyítja. Ezzel szemben, ha egy kisebb változtatás drasztikus kategóriaváltást eredményez, az arra utal, hogy a pontozási rendszer finomhangolásra szorul.

Összességében az érzékenységvizsgálat a HISI-skála tudományos validálásának nélkülözhetetlen eleme. A konzisztenciaanalízissel együtt átfogó képet ad a skála működéséről: míg a konzisztenciavizsgálat az elméleti-logikai alapokat támasztja alá, addig az érzékenységvizsgálat a gyakorlati alkalmazhatóságot és a robusztusságot erősíti meg. A két módszer együttes alkalmazása garantálja, hogy a HISI-skála megbízható, stabil és széles körben alkalmazható értékelési keretet nyújtson a hidrogénipari események objektív és transzparens besorolásához. Az érzékenységvizsgálat során azonosíthatók a kritikus tényezők, amelyek a legnagyobb hatást gyakorolják a végső besorolásra, és ez alapot ad a döntéshozatal és a biztonsági intézkedések optimalizálásához.

A One-at-a-Time (OAT) módszer az egyik legegyszerűbb és legszélesebb körben használt érzékenységvizsgálati technika. Lényege, hogy a modell bemeneti paramétereit

egyenként változtatjuk meg egy előre meghatározott lépésközzel, miközben a többi változó értékét rögzítjük. Így megfigyelhető, hogy az adott bemenet módosítása milyen mértékben befolyásolja a kimenetet. Az OAT előnye a könnyű implementáció és az eredmények egyértelmű értelmezhetősége, hátránya viszont, hogy nem veszi figyelembe a paraméterek közötti kölcsönhatásokat. Tekintettel, hogy a módszer ezen hátrányával tisztában voltam, részben ezért is végeztem el a megelőző validációs módszerként a konzisztenciaanalízist. Az OAT-módszert számos ipari, közgazdasági, orvosi és mérnöki elemzésben alkalmazzák, például Saltelli és munkatársai összefoglaló tanulmányában is részletesen bemutatják alkalmazását [161] [162].

Legyen a kimeneti függvény: Y

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

ahol:

X_i - a bemeneti változó, a HISI-dimenzió

Y - a HISI pontszám

Az OAT-érzékenységiindex az i -edik bemenetre:

$$S_i = \frac{f(X_1, \dots, X_i + \Delta, \dots, X_n) - f(X_1, \dots, X_i, \dots, X_n)}{\Delta}$$

$$\Delta = +1 \text{ vagy } \Delta = -1$$

Ekkor a kimenet nem folytonos, hanem lépcsős függvény.

$$H = g(f(X_1, \dots, X_n))$$

itt a „ g ” a kategorizáló függvény (pl.: 4 - 6 pont = HISI-2)

Ekkor az OAT érzékenység:

$$S_i^{(\Delta)} = g(f(X_1, \dots, X_i + \Delta, \dots, X_n)) - g(f(X_1, \dots, X_i, \dots, X_n)).$$

A szintdefiníciós táblázatot és a dimenziókhöz kapcsolódó pontozási rendszert úgy alakítottam ki, hogy a HISI-modell optimálisan, mérsékelt érzékenységgel rendelkezzen. A túlzott reakciót és a lomha viselkedést is el szerettem volna kerülni, így a definíciós táblában látható, hogy van egy stabil érték az adott szint középső értéke, viszont a határértékek közelében érzékeny a rendszer.

Kjørbo (0, 2, 2, 2 → összesen 6 pont, HISI-2) - stabil állapotban

+1 pont bármely dimenzióban → 7 pont, HISI-3

-1 pont bármely dimenzióban → 5 pont, HISI-2 marad

- Santa Clara (0, 3, 3, 3 → összesen 9 pont, HISI-3) - stabil állapotban
 - +1 pont bármely dimenzióban → 10 pont, HISI-4
 - 1 pont bármely dimenzióban → 8 pont, HISI-3 marad
- Gangneung (4, 4, 5, 5 → összesen 18 pont, HISI-6) - stabil állapotban
 - +1 pont bármely dimenzióban → 19 pont, HISI-7
 - 1 pont bármely dimenzióban → 17 pont, HISI-6 marad



63. ábra: Érzékenységvizsgálat vizuális szemléltetése (saját szerkesztés)

A validációs tapasztalatok megerősítik, hogy a HISI skála strukturált logikája alkalmas az iparágfüggetlen eseményosztályozásra, és érzékenyen reagál a súlyossági tényezők kombinációjára.

4.6 Összefoglalás

Kutatásom célja egy új, a fejlődő és intenzíven növekvő hidrogéntechnológiához kapcsolódó eseményosztályozási-skála megalkotása volt. Az eredményül kapott Hydrogen Incident Severity Indicator (HISI) skála a kitűzött kutatási céloknak megfelel és a validálás által alkalmasnak bizonyult a kitűzött céljaim megvalósításának az érdekében. Összeségében kijelenthetem, hogy létrejött egy új, hidrogéntechnológiai eseményekre optimalizált többdimenziós, súlyossági osztályozását lehetővé tevő eseményskála, mely az eddig alkalmazott ipari eseményosztályozási rendszereknél jobban alkalmazkodik a hidrogén speciális tulajdonságaihoz. A módszer alkalmazásával jelentősen lerövidíthető a reakciós intézkedési idő és a különböző események összehasonlíthatók, így a proaktív cselekvési módszerek is hatékonyabban fejleszthetők. Az oktatási folyamatok és a preventív védelmi előírások hatékonyabban fejleszthetők, ha az eseményeket és azok hatását objektíven és gyorsan össze tudjuk hasonlítani.

A validációs folyamat során előbb esettanulmányok és szakértői elemzések kerültek felhasználásra, melyeket besoroltam, majd a kapott eredmények lehetővé tették, hogy a validációs folyamatot konzisztenciaanalízissel és érzékenységelemzéssel folytassam.

Tudományos módszerekkel igazoltam a HISI konzisztenciáját, érzékenységét. A HISI modell túlmutat az egyszerű technikai osztályozáson: lehetőséget ad a kockázati kommunikáció, a szabályozás, az oktatás és a biztonsági auditálás területén is. A HISI-modell hozzájárulhat ahhoz, hogy a hidrogéngazdaság fejlődése ne csak fenntartható, hanem biztonságos is legyen, megelőzve ezzel azokat a kockázatokat, amelyek az új technológiák gyors bevezetésével járnak.

A kutatás jövőképe: A rendszer finomítása és egy nagy adatbázis létrehozása 50-100 minősített esettanulmány feldolgozása, ami alapján a HISI-skála paraméterei finomíthatók. Tervezem, hogy elkészítem a skála webes, és táblagépes változatát, annak érdekében, hogy a minősítés az objektumok helyszínéről is elvégezhető legyen. Bízom benne, hogy a további minősítések, és a fejlesztések olyan mértékben fogják növelni a tapasztalatunk, ami a további skálatejlesztések folyamatában is előnyösen használhatóak.

Új tudományos eredmények:

Tézis 1. [SZI1, SZI2, SZI3, SZI4, SZI5, SZI7, SZI8, SZI9, SZI11, SZI12, SZI13, SZI16]

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, SZI14, SZI16]

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, SZI15, SZI17]

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, SZI15, SZI17]

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.

Ajánlások

A HAZOP-hoz kapcsolódó kutatásaimat hidrogénüzemekre fókuszálva végeztem, ugyanakkor a módszertan minden olyan területen alkalmazható, ahol nagy mennyiségű, szenzorokkal gyűjtött adat áll rendelkezésre. A TSK-alapú HAZOP-modell önmagában is jelentős előrelépést jelent a Mamdani-típusú megközelítéshez képest, azonban a súlyparaméterek manuális meghatározása korlátozza az alkalmazhatóságot. Ez tette indokolttá az Ant Colony System (ACS) algoritmus bevonását, amely a súlyvektorok iteratív, adatvezérelt optimalizálását teszi lehetővé. A jövőben más optimalizációs eljárások vizsgálatát és a modell valós hardveres környezetben történő tesztelését is tervezem, ennek érdekében építem az Óbudai Egyetem - Kandó Kálmán Villamosmérnök Kar és EKIK közös kutatólaborját, mely a Szőlő utcai épületében kerül kialakításra. A laboratórium (**H**ydrogen **E**nergy for **R**esponse & **O**perations Laboratory: **H.E.R.O.**) a hidrogéntechnológia és vészhelyzeti energiarendszerek tématerületen, egy modern oktatási-kutatási-innovációs tér lesz, melyben - az oktatási feladatokon túl - karokat átívelő, interdiszciplináris kutatásokat tervezek megvalósítani.

A HISI-skála továbbfejlesztésének egyik legfontosabb iránya egy állami szintű, egységes hidrogénesemény-adatbázis kialakítása, amely a HISI dimenzióira épülő taxonómiával biztosítaná az incidensek összehasonlítható, transzparens feldolgozását. A kétlépcsős bejelentési mechanizmus, valamint az automatizált és szakértői validáció a NIS2 irányelvben megfogalmazott adatintegritási és kiberbiztonsági követelményekkel is összhangban állna. Egy ilyen adatbázis támogatná a proaktív eseménymegelőzést, a reaktív értékelés egységesítését, valamint a trend- és ok-okozati elemzéseket, továbbá lehetővé tenné a mesterséges intelligencián alapuló előrejelző modellek valós adatokon történő validálását. Hosszú távon a HISI-adatbázis a hidrogéntechnológiai biztonságirányítás empirikus alapját teremthetné meg, szabályozói, ipari és tudományos szinten egyaránt.

A megszerzett tudást és tapasztalatot örömmel osztom meg az érdeklődő kutatókkal, bízva abban, hogy a közös munka új eredményekhez vezet, és tartósan hozzájárul a hidrogénbiztonság, a környezetvédelem, a létfontosságú rendszerek védelme és a biztonságkritikus ipari infrastruktúrák fejlődése érdekében végzett tudományos tevékenységhez.

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. Lechtenböhrer, 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. Silvanita, 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 1. 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. Stemm, 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.ijdr.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-elso-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. Yılmaz 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%20próbák%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/feromonokroll1.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.

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; Wühl, Tibor; Molnár, György (szerk.) XXXVIII. Kandó Konferencia 2022 - Kiadvány kötet Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar (2022) 419 p. pp. 69-79. , 11 p.
- [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, Hidrogénüzemek, új és komplex kockázatértékelési rendszere: Új tervezési irányelvek a hidrogénipari létesítmények biztonságának fokozása érdekében. In: Wühl, Tibor (szerk.) KVK Habilitációs és PhD Workshop Minikonferencia: Kiadvány kötet Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar (2024) 124 p. pp. 92-97. , 6 p.
- [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)

RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

ACO	Ant Colony Optimization
ACS	Ant Colony System
ANN	Artificial neural network
App	Applikáció/alkalmazás
	Accidental Risk Assessment Methodology for
ARAMIS	Industries
ARIA	Analyse, Recherche et Information sur les Accidents
ARIMA	Autoregressive integrated moving average
barg	bar gauge: mérőnyomás
DEA	Dinamikus energiaallokáció
DSM	Demand Side Management
eMARS	Major Accident Reporting System
EMS	Energy Management System
ESIA	European Scale of Industrial Accidents
EU	Európai Unió
EU-ETS	Európai Unió - Emissions Trading System
FIS	Fuzzy Inference System
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis
FMESA	Failure Modes and Effects Safety Analysis
FPR	False Positive Rate
GA	Genetikus Algoritmusok
GARCH	Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity

GRU	Gated Recurrent Unit
GWO	Grey Wolf Optimization
HAZID	Hazard Identification
HAZOP	Hazard and Operability Study
HIAD	Hydrogen Incident and Accident Database
HISI	Hydrogen Incident Severity Indicator
HyCReD	Hydrogen Component Reliability Database
INES	International Nuclear Event Scale
IoT	Internet of Things
JRC	Joint Research Centre (European Commission)
LOPA	Layer of Protection Analysis
LSTM	Long Short-Term Memory
MF	Membership Function
MI/AI	Mesterséges Intelligencia/ Artificial intelligence
MIE	Minimum Ignition Energy,
MILP	Mixed-Integer Linear Programming
MORT	Management Oversight and Risk Tree
NEKT	Nemzeti Energia- és Klímaterv
PEM	Polymer Electrolyte Membrane
PRV	Pressure Relief Valve
PSO	Particle Swarm Optimization
PV	Photovoltaic/ napelem
QRA	Quantitative Risk Assessment
RL	Reinforcement learning - megerősítéses tanulás
RNN	Recurrent Neural Network
SARIMA	Seasonal autoregressive integrated moving average
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SIL	Safety Integrity Levels
SRI	Security Sensitivity Index
SVM	Support Vector Machines
SVR	Support Vector Regression
tf%	térfogat százalék
TPR	True Positive Rate
TSK	Takagi-Sugeno-Kang

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat: A vizsgált 13 projekt adatai és a használt kockázatelemzési módszerek (saját szerkesztés).....	19
2. táblázat: A HAZOP módszer előnyei és hátrányai - összehasonlító táblázat (saját szerkesztés) [43][44][47][48].	21
3. táblázat: A klasszikus HAZOP formája és struktúrája a tesztmodellre.	28
4. táblázat: A Klasszikus HAZOP és a hibrid HAZOP összehasonlítás (saját szerkesztés) [47][48][49][50][51][53]	28
5. táblázat: A modell Mamdani-fuzzy alapú adatai (saját szerkesztés)	30
6. táblázat: Az anomálfigyelő-ággal bővített modell és az alapmodell összehasonlítása (saját szerkesztés)	35
7. Táblázat: Validációs mutatók rövidítése és értelmezése (saját szerkesztés)	37
8. Táblázat: Validációhoz kapcsolódó kockázatdetektálási-arányok és azok értelmezése (saját szerkesztés)	38
9. táblázat: Validációhoz kapcsolódó kockázatdetektálási-arányok számítása (saját szerkesztés).....	38
10. táblázat: A modell futásából származó eredmények (saját szerkesztés).....	39
11. táblázat: Mamdani-fuzzy számszerűsített, összehasonlítható eredményei (saját szerkesztés)	39
12. táblázat: Mamdani- és TSK-fuzzy összehasonlítása, [65][66][119] [120] (saját szerkesztés)	47
13. táblázat: Mamdani- és TSK-fuzzy összehasonlítása. [65][66][119] [120] (saját szerkesztés)	47
14. táblázat: TSK alapú HAZOP-modellem bemeneti változói (saját szerkesztés)	48
15. táblázat: Mamdani és TSK esetén az antecendes- és konzekvens tagok (saját szerkesztés)	49
16. táblázat: TSK - súlyok és azok jelentése	50
17. táblázat: TSK, Fix bemeneti érték a próba súlyparaméterekhez (saját szerkesztés)	52
18. táblázat: Fix bemeneti paraméter mellett a súlyparaméter változtatása (saját szerkesztés)	52
19. táblázat: A paraméterérzékenység I. eredményei (saját szerkesztés)	52
20. táblázat: A paraméterérzékenység II. eredményei (saját szerkesztés)	53
21. táblázat: Statisztikai mutatók, összefoglaló táblázata - MAM-TSK HAZOP, (saját szerkesztés).....	56

22. táblázat: Páros t-próba - szignifikancia vizsgálat (saját szerkesztés)	60
23. táblázat: Futásidő adatok - 100 000 mintára (saját szerkesztés).....	63
24. táblázat: Futásidő [sec.] - 100 000 mintára (saját szerkesztés).....	63
25. táblázat: TSK-fuzzy, antecendes és konzekvens tagja (saját szerkesztés).....	67
26. táblázat: Üzemeltetési stratégiák és súlyparaméterek (saját szerkesztés).....	75
27. táblázat: Manuális számítási plda, bemeneti értékek (saját szerkesztés).....	77
28. táblázat: Számítási példa: súlyvektorok és kockázatdetektálási paraméterek összefoglaló táblázata (saját szerkesztés)	78
29. táblázat: A számítási feladat összefoglaló táblázata (saját szerkesztés).....	79
30. Táblázat: Teljesítménymérési mutatók integrált TSK és ACS esetén (Saját szerkesztés)	84
31. Táblázat: TSK+ACS integrációjának eredménye - t-próba.....	86

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A hidrogén biztonsági kihívásai (saját szerkesztés)	9
2. ábra: Kutatási területem fókuszai (saját szerkesztés)	9
4. ábra: A Hydrogen Incident Severity Indicator (HISI) fontosabb elmei (saját szerkesztés).	10
3. ábra: Az intelligens HAZOP (iHAZOP) legfontosabb elemei (saját szerkesztés).	10
5. ábra: A hidrogénincidensek leggyakoribb végkimenetele (saját szerkesztés)[28][32]	18
6. ábra: A legtöbb halálesetet és személyi sérülést kiváltó okok.....	18
7. ábra: A vizsgált 13 projekt elhelyezkedése Európában (saját szerkesztés)	19
8. ábra: A vizsgált tíz projekt esetén a kockázatelemzési módszerek százalékos aránya (saját szerkesztés)	19
9. ábra: Fuzzy tagsági függvény - háromszög (saját szerkesztés)	22
10. ábra: A Boole-logika és a Fuzzy-logika szemléltetése (saját szerkesztés)	23
11. ábra: Klasszikus-fuzzy folyamatábra (saját szerkesztés).....	24
12. ábra: Előtérben a kisnyomású puffertartály és a kompresszor, háttérben az elektrolizáló [110] (szerkesztett)	26
13. ábra: A számításokhoz és a szemléltetéshez használt tesztmodell (saját szerkesztés)	27

14. ábra: A HAZOP-folyamat egyszerűsített folyamatábrája (saját szerkesztés, a [43][44] alapján)	27
15. ábra: A fenti példaszabály, logikai ábrája (saját szerkesztés).....	30
16. ábra: A Matlab modell vázlata, forrás: Matlab Fuzzy Logic Designer (saját szerkesztés)	31
17. ábra: Tagsági függvények paraméterei, Matlab Fuzzy Logic Designer (saját szerkesztés)	31
18. ábra: Control surface - A kockázat értéke a nyomás és áramlás függvényében, forrás: Matlab Fuzzy Logic Designer (saját szerkesztés)	31
19. ábra: Rule Inference - a szabályok grafikus megjelenítése, forrás: Matlab Fuzzy Logic Designer (saját szerkesztés).....	32
20. ábra: Áramlási anomália szemléltetése (saját szerkesztés).....	32
21. ábra: Egy példa az anomáliafigyelés megvalósítására (saját szerkesztés).....	34
22. ábra: Szintetikus adatgenerálás és DataSet-megadás, forrás: MATLAB	36
23. ábra: Generált DataSet egyike, nyomás és térfogatáramlás szemléltetése, MS Excel (saját szerkesztés)	37
24. ábra: Konfúziós mátrix, a mintapéldára (saját szerkesztés).....	38
25. ábra: Validációs, kockázatdetektálási-arányszámok - mintapélda (saját szerkesztés)	39
26. ábra: A Mamdani-fuzzy logikával felépített modell kockázatdetektálási-arányszámai (saját szerkesztés)	40
27. ábra: A 10 db, 1000 mintás szintetikus DataSet, Mamdani-FIS eredményei, összevont mutatói (saját szerkesztés)	40
28. ábra: A konfúziós mátrix mutatói Mamdani-Hazop esetén (saját szerkesztés).....	41
29. ábra: A TPR, SSI és a Coverage (bal oldal) és az FPR (jobb oldal)Mamdani-HAZOP esetén (saját szerkesztés)	42
30. ábra: Mamdani-FIS, TPR - boxplot (saját szerkesztés)	42
31. ábra: Mamdani-FIS, FPR - boxplot (saját szerkesztés)	43
32. ábra: Mamdani-FIS, SSI és Coverage boxplot (saját szerkesztés)	43
33. ábra: Mamdani-fuzzy folyamatábra [65] (saját szerkesztés)	46
34. ábra: TSK-fuzzy folyamatábra [65] (saját szerkesztés).....	46
35. ábra: MATLAB: Property Editor (Fuzzy Logic Designer) - bal oldal: MAMDANI, jobb oldal: TSK.....	48

36. ábra: A TSK-alapú HAZOP modell felépítése a MATLAB rendszerben, forrás: MATLAB R2025a (saját szerkesztés)	54
37. ábra: MATLAB, TSK-fuzzy kimeneti paramétere (saját szerkesztés)	54
38. ábra: Teljesítménymérési mutatók MAMDANI- és TSK-fuzzy esetén (Saját szerkesztés)	55
39. ábra: Kockázatdetektálási mutatók - Mamdani és TSK összehasonlítás (Saját szerkesztés)	57
40. ábra: Validációs mutatók - Mamdani és TSK összehasonlítás (Saját szerkesztés) ..	57
41. ábra: Validációs mutatók és Fals Pozitív Arány (átlag, szórás) - Mamdani és TSK összehasonlítás (saját szerkesztés)	58
42. ábra: Az időmérés megvalósítása MATLAB-ban (saját szerkesztés)	62
43. ábra: Futásidő statisztikai jellemzői	64
44. ábra: Hangyák viselkedése a táplálékszerzés során (saját szerkesztés)	66
45. ábra: ACS működése [82][125](saját szerkesztés)	70
46. ábra Egy hangya mozgása i-ből j-be (saját szerkesztés)	72
47. ábra: ACS - súlyválasztási optimalizációt bemutató gráf, (saját szerkesztés)	72
48. ábra: Az ACS-FORCE egyszerűsített folyamatábrája, (saját szerkesztés)	73
49. ábra: TSK és ACS integráció (saját szerkesztés)	76
50. ábra: ACS - konvergencia, forrás: MATLAB, MS-Excel (saját szerkesztés)	82
51. ábra: A Best Fitness és az AVG Fitness különbségének változása - mint konvergencia mutató (saját szerkesztés)	83
52. ábra: Konfúziós mátrix releváns mutatói (sárga: TSK+ACS; kék: TSK)(Saját szerkesztés)	85
53. ábra: A kockázatdetektálási arányok relatív változása [%] (saját szerkesztés)	85
54. ábra: A HISI-modell alapjai (saját szerkesztés)	89
56. ábra: A HISI komplementer szerepe és integrálhatósága más rendszerekhez (saját szerkesztés)	90
56. ábra: A HISI-skála dimenziói, saját szerkesztés	96
57. ábra: Dimenziók - hatások és pontok, saját szerkesztés	97
58. ábra: Szintdefiníciós táblázat, saját szerkesztés	97
59. ábra: Helyszíni fotók, sorrendben balról jobbra: Kjørbo [158], Santa Clara [159], Gangneung [160]	99
60. ábra: Az esettanulmányok besorolása a HISI-skálára és a kapcsolódó quadrilemmák, saját szerkesztés	100

61. ábra: A HISI-skála alkalmazásának indoklása (saját szerkesztés).....	101
62. ábra: A vizsgált esetek - kiindulási állapot a konzisztencia vizsgálatához, saját szerkesztés	107
63. ábra: Érzékenységvizsgálat vizuális szemléltetése (saját szerkesztés).....	111

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Mindenekelőtt a kedvesemnek Zsigár Zsuzsannának szeretném megköszönni, hogy bátorított, biztatott és a nehéz helyzeteken is segített továbblépni. Köszönöm a türelmét, melyet akkor tanúsított, amikor a szabadidőnk terhére végeztem a kutatással illetve a disszertáció írásával kapcsolatos feladataim.

Köszönettel tartozom Bakosné Dr. Diószegi Mónika és Prof. Dr. Rác Ervin témavezetőimnek is, akik az elképzeléseim a doktori követelmények közé szorították és fókuszálták a célok elérése érdekében.

Köszönettel tartozom a Bükkábrányi Fotovoltaikus Erőmű Projekt Kft és a Bükkábrányi hidrogénüzem munkatársainak is, ugyanis a projekt megvalósulása kellő motivációt szolgáltatott a kutatómunka elvégzéséhez, a folyamatos tanuláshoz és a disszertáció megírásához.

Köszönöm elő opponenseimnek, Dr. Varga Péter Jánosnak, és Prof. Dr. Berek Tamásnak, hogy tanácsaikkal segítettek, illetve véleményeikben építő jellegű kritikát fogalmaztak meg a munkámmal kapcsolatban.

Hálával tartozom a Biztonságtudományi Doktori Iskola oktatóinak, akik rámutattak a tudományos megközelítések és módszerek lényegére és folyamatosan segítettek munkám. Külön köszönöm Farkasné Hronyecz Erikának és Lévay Katalinnak a segítséget, akik mindig segítőkészek voltak és pontos információkkal láttak el.

Köszönöm munkatársaimnak, az Óbudai Egyetem inspiráló közösségének, hogy folyamatosan motiváltak a munkám folytatására.