



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

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	6
A tudományos probléma megfogalmazása	9
Célkitűzések.....	11
A téma kutatásának hipotézisei.....	11
Kutatási módszerek.....	12
Az értekezés felépítése.....	12
1 A KUTATÁS ELMÉLETI ÉS FOGALMI KERETEI.....	14
1.1 Releváns biztonságtechnikai alapfogalmak meghatározása.....	14
1.1.1 Veszélyek a hidrogénnel kapcsolatban	16
1.1.2 Hidrogénipari-incidensek kvantitatív elemzése.....	17
1.1.3 A HAZOP meghatározó pozíciója a hidrogéniparban	20
1.2 A HAZOP alapjai.....	22
1.3 A fuzzy logika és a bioinspirált algoritmusok alapjai	22
1.4 On-line kockázatértékelő rendszerek követelményei.....	27
2 FUZZY - HAZOP INTEGRÁCIÓS LEHETŐSÉGEK ÉS KORLÁTOK.....	28
2.1 A HAZOP-ot bemutató hidrogéntechnológiai modell és annak határai	28
2.1.1 A klasszikus HAZOP korlátai és kihívásai.....	31
2.2 A HAZOP és a fuzzy logika kombinálása	32
2.2.1 Az új modell megalkotásának indoklása	33
2.3 A kisnyomású, HAZOP tartálymodell, MAMDANI megközelítéssel.....	34
2.3.1 A tartálymodell továbbfejlesztése.....	38
2.3.2 Szintetikus adatok, a 10 DataSet és a tesztkörnyezet definiálása	42
2.3.3 A validáció minőségi mutatói.	45
2.3.4 A Mamdani FIS-el felépített modell eredményeinek struktúrája	48
2.3.5 Az eredmények összefoglaló elemzése, értékelése.....	49
2.4 A kisnyomású, HAZOP tartálymodell, TSK megközelítéssel	57

2.4.1	Fuzzy rendszerek koncepcionális és alkalmazásbeli összehasonlítása.....	57
2.4.2	A Mamdani- és TSK-fuzzy közötti strukturális megfeleltetés	60
2.4.3	A TSK-fuzzy alkalmazása a HAZOP modellre	61
2.4.4	A TSK konzekvens tagjában szereplő súlyparaméterek beállítása.....	63
2.4.5	Konzekvens tagok paraméterérzékenységi próbája	65
2.4.6	A TSK-alapú HAZOP modell felépítése a MATLAB-ban	69
2.4.7	A TSK alapú HAZOP eredményeinek bemutatása.....	70
2.4.8	Kiegészítő vizsgálat - számítási és feldolgozási idő	78
3.	BIOINSPIRÁLT ALGORITMUSOK INTEGRÁLÁSA	82
3.1	A proaktív védelem és az ACS-FORCE keretrendszer.....	83
3.2	Az ACS alapjai, biológiától az utazó ügynök problémájáig.	83
3.3	Az ACS integrálása a TSK-alapú HAZOP-ba	85
3.3.1	Az ACS alkalmazásának célkitűzései	86
3.3.2	A hangyák kollektív viselkedésének alapja	89
3.4	A célfüggvény súlyozási stratégiáinak gyakorlati jelentősége.....	94
3.4.1	Súlytényezők értelmezése és hatása az optimalizációra	94
3.4.2	Üzemeltetési stratégiák a súlytényezők függvényében	95
3.5	A TSK és ACS MATLAB integrációja	97
3.5.1	A súlyozás komplex szerepköre a TSK-ACS hibrid HAZOP-ban.	98
3.5.2	Manuális számítási példa egy adatcsoporton.....	99
3.6	Az integrált, TSK-ACS eredményeinek bemutatása.....	103
3.6.1	Az értékelési metodika: inkrementális felépítésű, komparatív elemzés .	105
3.6.2	Az ACS kolónia-teljesítménye	107
3.6.3	A TSK valamint a TSK+ACS eredményeinek inkrementális és komparatív elvű elemzése	109
4	ÚJ ESEMÉNYOSZTÁLYOZÁSI KERETRENDSZER.....	112
4.1	A meglévő eseményosztályozási rendszerek korlátai	112

4.2	Kutatási módszertan és a validációs eljárások	116
4.2.1	Hiányos, hidrogénspecifikus kockázati dimenziók	116
4.2.2	Modellalkotással kapcsolatos alapkövetelmények	117
4.2.3	A használatban lévő osztályozási rendszerek hiányosságai	118
4.2.4	Validációs eljárások	118
4.3	A HISI-modell alapjai	118
4.3.1	A modell alkalmazási köre	118
4.3.2	A HISI-modell koncepcionális kidolgozása és dimenziói	119
4.3.3	A HISI-skála szintjeinek formális definíciói és a logikai alapelvek	121
4.4	A HISI-skála pontozási rendszere	121
4.5	A HISI-empirikus validációja	122
4.5.1	Alkalmazott adatforrások és esettanulmányok	123
4.5.2	Rövid esetösszefoglalók	123
4.5.3	Esetek besorolása a HISI-skála alapján	125
4.5.4	Megbízhatóságot vizsgáló eljárások - bevezetés.	126
4.5.5	Konzisztenciaanalízis kvalitatív módon	126
4.5.6	Konzisztenciaanalízis kvantitatív módon: Cronbach- α mutató	129
4.5.7	Érzékenységvizsgálat	134
4.6	Összefoglalás	137
	Új tudományos eredmények:	138
	Ajánlások	141
	IRODALOMJEGYZÉK	142
	TÉZISPONTOKHOZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK	156
	RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK	157
	TÁBLÁZATJEGYZÉK	159
	ÁBRAJEGYZÉK	160
	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	164

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

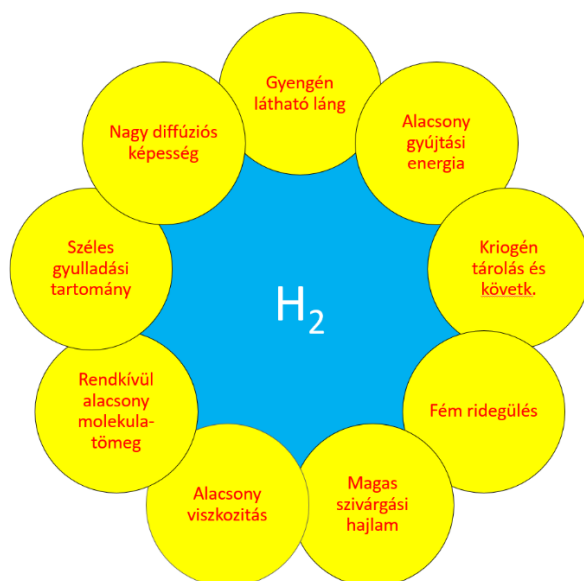
Magánemberként mélyen elkötelezett vagyok a környezetvédelem mellett, amely számomra etikai kérdés és a jövő generációi iránti felelősség is. Ez a belső motiváció szorosan összefonódik az energetikai rendszerek biztonságos és fenntartható működésének kutatásával, különösen ott, ahol a technológiai innováció 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 toxikusrészcseke-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 törékenységre.

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 energiatárolásra 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-hatékonyságot 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, dinamikusán és kiszámíthatatlanul változnak, nő a szórásuk, s ezzel párhuzamosan csökken az energiabiztonság. A kedvezőtlen hatások mérsékléséhez elengedhetetlen az energiatárolás rendszerszintű integrációja, szabályozási szolgáltatásokba való bevonása és technológiai skálázhatósága.

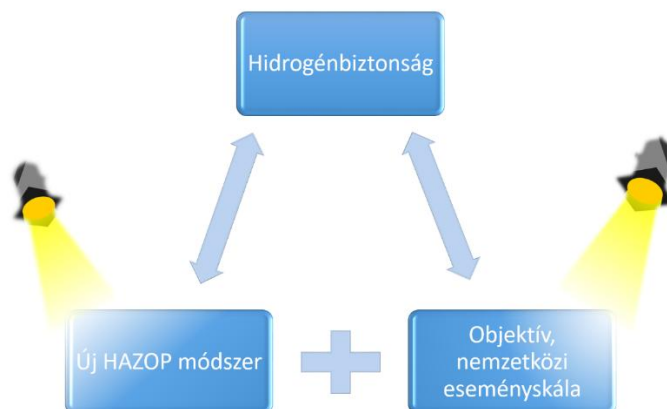
Az energiatárolás ígéretes módszere a hidrogén energiahordozóként való alkalmazása. Elektrolízissel előállítva lehetővé teszi a megújulók időszakos túltermelésének hosszú távú tárolását, ami különösen fontos a szezonális energiatárolás szempontjából, ahol a kereslet és a kínálat időben eltér [8][9][10][11]. 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 karbonlábnymát [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)

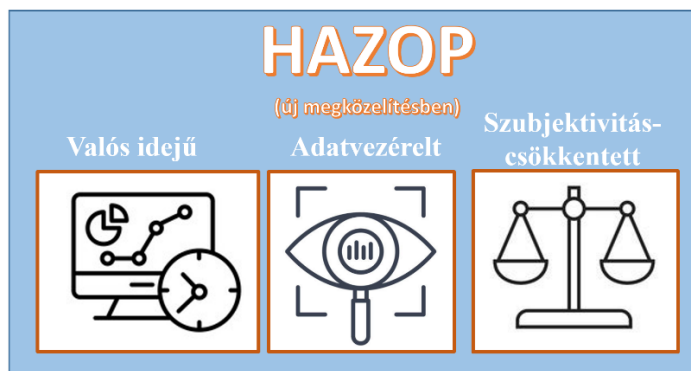
A tudományos probléma megfogalmazása

A hidrogénrendszerek elterjedésével új biztonsági kihívások jelentek meg, amelyek több ponton eltérnek a hagyományos energiahordozók kockázataitól. Rendkívül alacsony gyulladási energiája (0,017 mJ) révén már kis energiájú szikra is elegendő a begyújtáshoz. Összehasonlításként egy műszálas pulóver levételekor keletkező elektrosztatikus kisülés 1-3 mJ, extrém esetben 10-20 mJ is lehet, ami nagyságrendekkel meghaladja a hidrogén gyulladásienergia-küszöbét. 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 szerelemeket (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, de jelenlegi statikus jellege miatt nem alkalmas a rendszerek működés közbeni, adaptív értékelésére. A HAZOP-eljárás napjainkban offline módon alkalmazható, és rendkívül erőforrás-igényes, mivel nagymértékben támaszkodik a szakértői csoportok szubjektív értékeléseire. Egyre inkább indokolt lenne a módszer továbbfejlesztése, 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.
- Jelenleg még kihívást jelent a hidrogénnel kapcsolatos biztonsági **események osztályozása** és azok összehasonlíthatósága. A meglévő rendszerek, mint például az INES (nukleáris) vagy ARAMIS (vegyipari), nem alkalmazhatók megfelelően a hidrogéntekológiákra. Meglátásom szerint kívánatos lenne egy egységes, kvantitatív és kvalitatív besorolási keretrendszer, mely támogatja az adatalapú, kooperatív tanulást és a globális kockázatsökkentési stratégiák hatékony kialakítását.

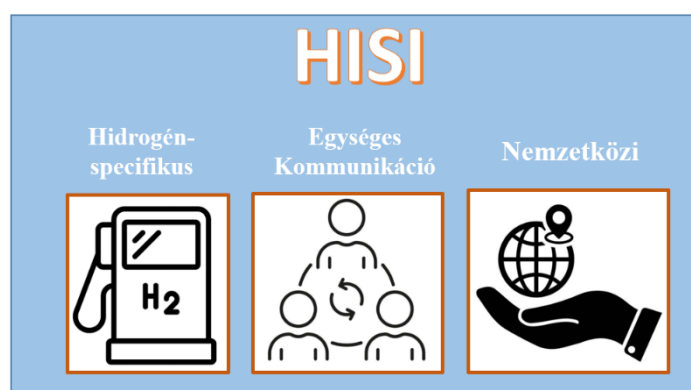
Kutatásom és dolgozatom célja így kettős: egy proaktív biztonsági módszertan alapjainak kidolgozása, valamint egy reaktív, hidrogénspecifikus eseményértékelő rendszer kidolgozása.

- Disszertációm 2. és 3. fejezetében a HAZOP módszertan fejlesztése érdekében végzett kutatási eredményeim mutatom be, ahol egy teljesen új megközelítéssel és integrált matematikai módszerekkel mutatom be az új rendszer alapjait, mely alkalmas a real-time kockázatelemzésre.



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

- A disszertációm 4. fejezetében pedig egy új, egységes eseményskálát definiálok és validációs eljárásokkal bizonyítom annak elméleti és gyakorlati használhatóságát. A HISI-skála figyelembe veszi a technológia specifikus veszélyeit, és támogatja a transzparens, következetes kockázatkommunikációt.



4. ábra: A Hydrogen Incident Severity Indicator (HSI) legfontosabb elmei (saját szerkesztés).

Összefoglalva: A hidrogéntechológiák elterjedése új műszaki megoldások mellett sajátos biztonsági kihívásokat is hoz, amelyek a meglévő kockázatelemző rendszerek újragondolását igénylik. A HAZOP korlátai és a hidrogénspecifikus veszélyek komplexitása indokoltá teszi egy valós idejű, adatvezérelt módszertan kidolgozását. Az incidensskála hiánya pedig nehezíti a kockázati szintek objektív értékelését és kommunikációját. Dolgozatom célja e problémák kezelése egy proaktív HAZOP-keretrendszer és egy reaktív, incidensalapú besorolási rendszer megalkotásával, elősegítve a hidrogénalapú energiarendszerek biztonságos működését.

Célkitűzések

- Kutatásom **elsődleges célja** egy **valós idejű**, kockázatértékelő keretrendszer kialakítása, amely a klasszikus HAZOP alapelveire épít, de kiküszöböli annak időbeli- és döntési konzisztencia alapú korlátait, így támogatva a hidrogéntechnológiai rendszerek biztonságát.
- **Második** célom a HAZOP **szubjektív komponenseinek csökkentése** számszerűsített eredmények és optimalizált szabályrendszer révén.
- **Harmadik célkitűzésem** a meglévő ipari eseményosztályozási rendszerek kritikai vizsgálata hidrogéntechnológiai alkalmazásokban. Igazolni kívánom, hogy e rendszerek nem tartalmazzák a hidrogénspecifikus kockázati dimenziókat, ezért egy következményalapú, empirikusan validálható **osztályozási rendszer koncepcióját dolgozom ki**.
- **Negyedik célom**, hogy az új modell reprodukálható, tudományosan megalapozott és nemzetközileg is alkalmazható biztonsági osztályozási rendszerként szolgáljon. Emellett **iparágfüggetlenül használható legyen** a hidrogénincidensek kommunikációjában, elősegítve a következményalapú egységesítést, a társadalmi elfogadottságot és a jelenleg gyenge jogi-műszaki-biztonságtechnikai szabályozás fejlődését.

A téma kutatásának hipotézisei

Értekezésemben a következő hipotézisekből indulok ki.

- H1:** Feltételezem, hogy hidrogéntechnológiai környezetben a Mamdani-fuzzy logikán alapuló HAZOP-rendszerek korlátozott kockázatdetektálási megbízhatóságot nyújtanak. Ezzel szemben egy Takagi-Sugeno-Kang (TSK) logikán alapuló HAZOP modell, jobb eredményeket érhet el ezen a területen, így alkalmasabb lehet az on-line HAZOP kockázatfelismerő követelményeinek teljesítésére.
- H2:** Feltételezem, hogy hidrogéntechnológiai környezetbe kifejleszthető egy olyan fuzzy támogatott HAZOP rendszer, ami egy bioinspirált optimalizációval kombinálva megteremti az on-line, HAZOP alapú kockázatértékelés alapjait.
- H3:** Feltételezem, hogy a jelenleg használt, iparibaleset minősítési rendszerek (INES, ESIA, ARIA, HIAD) nem alkalmasak a hidrogénipari objektumokhoz kapcsolódó objektív, következményalapú és hidrogénspecifikus baleset minősítésére, ezért szükséges egy új, többdimenziós, skálaszerkezet és pontozási rendszer

definiálása, amely célzottan a hidrogéntechológiai incidensekre fókuszál és elősegíti a balesetekkel kapcsolatos hiteles tájékoztatást és kommunikációt.

H4: Feltételezem, hogy az általam megalkotott új modell empirikusan validálható megtörtént hidrogénipari incidenseken keresztül, konzisztencia-vizsgálat, konstruktum-kapcsolat elemzése és az érzékenységvizsgálat módszereinek alkalmazásával.

H5: Feltételezem, hogy az általam megalkotott új modell iparágfüggetlen módon alkalmazható, minden olyan biztonsági esemény osztályozására, ahol a hidrogén, mint energiahordozó vagy reaktív közeg meghatározó szerepet játszik, függetlenül attól, hogy az esemény előállítási, feldolgozási, szállítási vagy felhasználási környezetben történik.

Kutatási módszerek

Értekezésem célja a hidrogéntechológia átfogó vizsgálata, amely hamar nyilvánvalóvá tette az interdiszciplináris megközelítés szükségességét. Kutatásom középpontjában a kockázatértékelés, a hidrogénipari incidensek, valamint az EU és Magyarország energiasztratégiájához kapcsolódó kihívások álltak. A téma feltárásához kvalitatív, kvantitatív és empirikus módszereket alkalmaztam: szakirodalmi áttekintést, dokumentum- és adatelemzést, valamint esettanulmányok feldolgozását. A szakirodalomkutatás az Elsevier adatbázisára és szabadon hozzáférhető forrásokra épült, kiegészítve online szakkönyvekkel, konferenciaanyagokkal és médiatartalmakkal. Az elemzéshez felhasználtam többek között az ENTSO-e, a MAVIR, a MEKH és a HIAD nyilvános adatait. Áttekintettem a hazai (NEKT, Nemzeti Hidrogénstratégia) és uniós stratégiai dokumentumokat, valamint a kapcsolódó rendeleteket. Az empirikus megközelítést megfigyeléseim és elemzéseim egészítették ki, melyeket mind a napi mérnöki gyakorlatban, mind az Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Karán végzett oktatói munkám során végeztem, biztosítva a téma folyamatos aktualitását.

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 - összhangban a címében is kifejezett proaktív és reaktív szemlélettel - 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** a HAZOP-fuzzy integráció lehetőségeire fókuszál. Itt kerülnek bemutatásra a Mamdani- és TSK-fuzzy rendszerek, valamint azok összehasonlító vizsgálata és validációja. E részhez kapcsolódnak a H1 hipotézis, valamint a T1-T2 tézisek, amelyek a kockázatdetektálás megbízhatóságának javítását célozzák.
- **A 3. fejezet** a TSK-fuzzy modellhez kapcsolódó metaheurisztikus optimalizációra koncentrálnak, különös tekintettel az általam kidolgozott ACS-FORCE keretrendszerre. E fejezethez tartozik a H2 hipotézis, valamint a T3-T4 tézisek, amelyek a súlyoptimalizáció és a valós idejű alkalmazhatóság előnyeit tárják fel.
- **A 4. fejezet** középpontjában az új, általam megalkotott HISI-skála áll, amely a hidrogénteknológiai incidensek objektív és hidrogénspecifikus osztályozását célozza. A fejezethez a H3-H5 hipotézisek, valamint a T5 főtézis és annak altézisei kapcsolódnak, amelyek az események összehasonlíthatóságát, kommunikációját és iparágfüggetlen alkalmazhatóságát igazolják.

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 hidrogéntechológia 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 elégetéséhez szükséges. Leegyszerűsítve, azt is mondhatjuk, nincs se felesleges üzemanyag, se felesleges oxigén, így elméletileg minden reagáló molekula „párba 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 t% 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 láncreakció 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): Az angol nyelvű szakirodalom feldolgozása során jogi hiányosságot azonosítottam a magyar jogrendben: sem a Munkavédelmi törvény (Mvt.) [95], sem a Seveso III irányelv hazai átültetése [96], sem a Katasztrófavédelmi törvény [97] nem definiálja az „ipari incidens” és „ipari baleset” fogalmakat. Az Mvt. csak a munkabalesetet rögzíti [95; 87§(3)], amikor a munkavállalót érő egyszeri külső hatás sérülést, mérgezést, egészségkárosodást vagy halált okoz. A Seveso III-hoz kapcsolódó szabályozás és a Katasztrófavédelmi törvény ehelyett a „veszélyes anyagokkal kapcsolatos súlyos baleset” [97; 3§29] és „veszélyes anyagokkal kapcsolatos esemény” [97; 3§30] fogalmait használja. A nemzetközi szakirodalom [19][28][98][99] és szabványok [100][101][102] szélesebb fogalomkészlettel élnek: az industrial accident minden ipari környezetben bekövetkező, tényleges kárt okozó eseményt jelöl (személyi sérülés, halál, anyagi vagy környezeti kár), míg az industrial incident tágabb kategória, amely minden nem kívánt eseményt lefed, függetlenül a károkozástól. Disszertációmban az ipari baleset alatt a tényleges kárral járó ipari eseményeket, míg ipari incidens alatt minden, az üzemszerű működéstől eltérő, nem kívánatos eseményt értek.

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 begyulladhat [24].
- **nagy reakcióképesség és éghetőség:** 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. Ezek a tulajdonságok indokolják a hidrogén biztonságtechnikai rendszereinek szigorú követelményeit [25].
- **égés, robbanás:** 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) von maga után [25].
- **alacsony gyújtási energia:** 0,017 mJ sztöchiometrikus hidrogén-levegő elegyben lásd az 1.1 fejezetben [25],
- **széles gyulladási tartomány:** már 4% hidrogén a levegőben gyúlékony elegyet képez, 75%-ig éghető.
- **nagy diffúziós képesség:** 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 viszkozitás:** elősegíti a mikroszkopikus réseken való szivárgást, növelve a tömítési problémákat.
- **fémek hidrogénridegsége:** 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 környezetvédelmi, gyulladási és esetleg a robbanási probléma.
- **hidrogén-láng láthatósága:** a hidrogén tisztán, koromképződés nélkül ég, látható fény kibocsátása csekély, ezért világos környezetben szinte észrevehetetlen.

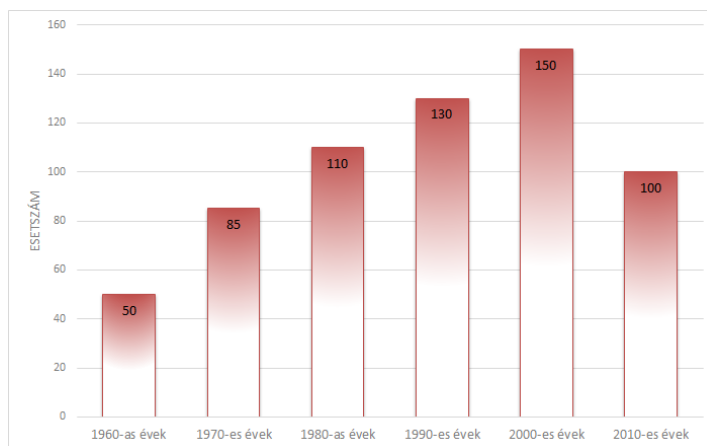
1.1.2 Hidrogénipari-incidensek kvantitatív elemzése

Kutatásom során részletesen foglalkoztam a dokumentált, hidrogénipari balesetek kvantitatív elemzésével. A gyűjtött adatok tekintetében, a következő forrásokra támaszkodtam:

- **Franciaországi** „Le Bureau d’analyse des risques et pollutions industriels, du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires” - Ökológiai, Fenntartható Fejlődési és Energiaügyi Minisztérium, Ipari Kockázat- és Szennyezéselemző Hivatala, mely kezeli az ARIA (Analysis, Research and Information on Accidents) adatbázist [26]. Ez az adatbázis több mint 54 000 Franciaországban vagy külföldön bekövetkezett balesetet vagy incidenst tartalmaz, melyből 997 eset kapcsolható a hidrogénhez (2023. november 10.),
- **Japán**, Vegyibalesetek adatbázisa: „Relational Information System for Chemical Accidents Database (RISCAD) [27].” (2023. november 10.),
- International Association for Hydrogen Safety - HySafe, HIAD 2.0 - free access to the renewed hydrogen incident and accident database (2023. november 10.), [28]
- **Amerikai Egyesült Államok (US/USA):**
 - o The U.S. Chemical Safety Board (CSB), (2023. november 10.), [29]
 - o National Energy Technology Laboratory (NETL), (2023. november 10.), [30]
 - o Hydrogen Tools Portal (2023. november 10.). (2023. november 10.), [31]

Esetszámok

Kutatásaimat a hidrogént alapanyagként vagy termékként érintő vegyipari balesetekre szűkítettem, amelyekből 1960 és 2020 között összesen 626 esetet azonosítottam. Ez 60 év alatt átlagosan 10,4 baleset/évnél felel meg, azonban az eloszlás nem egyenletes: a '90-es évektől az átlag 14, a 2000-es évektől pedig közel 18 baleset/év.



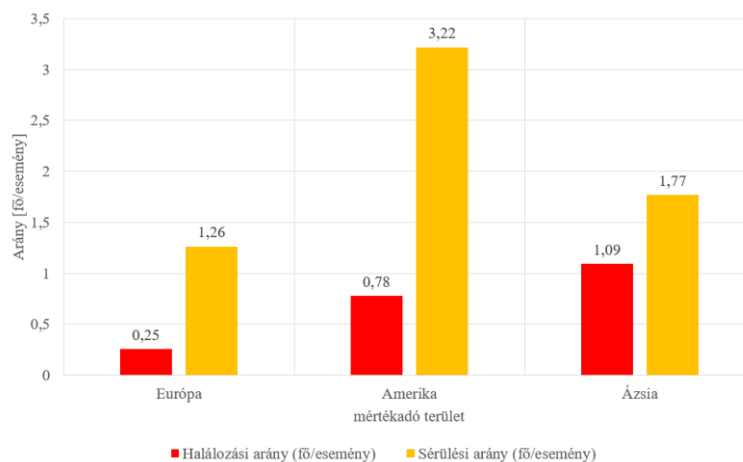
5. ábra: Hidrogénbalesetek száma - évtizedes bontásban (saját szerkesztés)[26][27][28][29][30][31][32]

Az 5. ábra alapján a legtöbb esemény 1990-2010 között történt, különösen a 2000-es években, amikor csúcs figyelhető meg; 2001-ben például 30 esetet regisztráltak [32]. 2010 után az esetszám csökken, ami részben a késleltetett adatfeldolgozásnak és az aluljelentésnek tulajdonítható. Az adatokat a JRC is validálta [32]. A gyűjtött adatokat összevettem a HIAD adatbázissal [28], és teljes összhangot találtam, így a következő megállapításokat tehetem.

Földrajzi megoszlás

- Európa: az esetek több mint fele itt történt ($\approx 57\%$) [26-32][55], ami részben a fejlett incidensjelentési rendszereknek (pl.: ARIA, eMARS) köszönhető. Ez azonban nem feltétlenül tükrözi a globális eseménysűrűséget.
- Amerika: kevesebb esetet regisztráltak, de a következmények súlyosabbak: az átlagos halálozás háromszorosa (0,78 fő/esemény) az európainak (0,25 fő/esemény), a sérülések száma is magasabb (3,22 fő/esemény) [26-32]. Ennek oka lehet technológiai különbség, üzemméret vagy biztonsági kultúra [55].
- Ázsia: mérsékelt esetszám mellett a halálozási arány kiemelkedően magas (1,09 fő/esemény) [26-32].
- Afrika: kevés regisztrált eset, de azok magas halálozási mutatója torzíthatja az összképet [26-32].

Összességében 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 [32].



6. ábra: Dokumentált és validált adatok alapján a hidrogénbalesetek arányszámai (saját szerkesztés) [28][32].

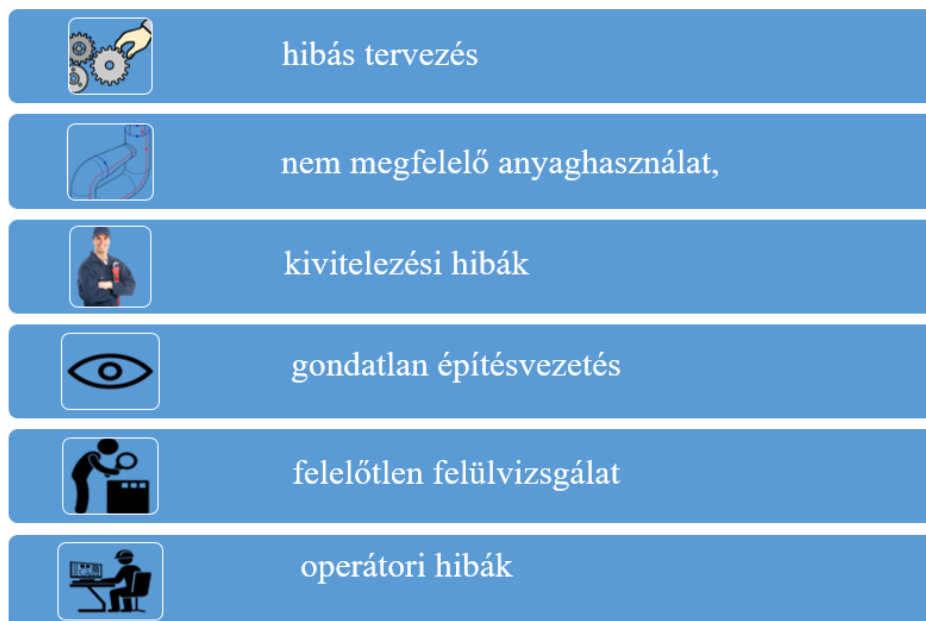
A hidrogénipari-incidensek végkimenetele és azok kiváltó okai

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



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

A 7. ábrán látható hármass felosztás kulcsfontosságú a hidrogénteknológiák 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.



8. 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. A baleseti gyakoriság és a sérülések mértéke rámutatott arra a kérdésre, hogy a jelenlegi kockázatmenedzsment-eljárások mennyiben járulnak hozzá a biztonsági hiányosságokhoz, illetve maga a módszertan lehet-e a problémák egyik forrása. Vizsgáltam, mely eljárások terjedtek el a gyakorlatban, melyek bizonyultak hatékonynak, és feltártam a korlátaikat, valamint a továbbfejlesztési lehetőségeket a védelmi rendszerek hatékonyságának növelése érdekében [55][56].

Kockázatelemzési módszerek a dokumentált Európai projektek esetén

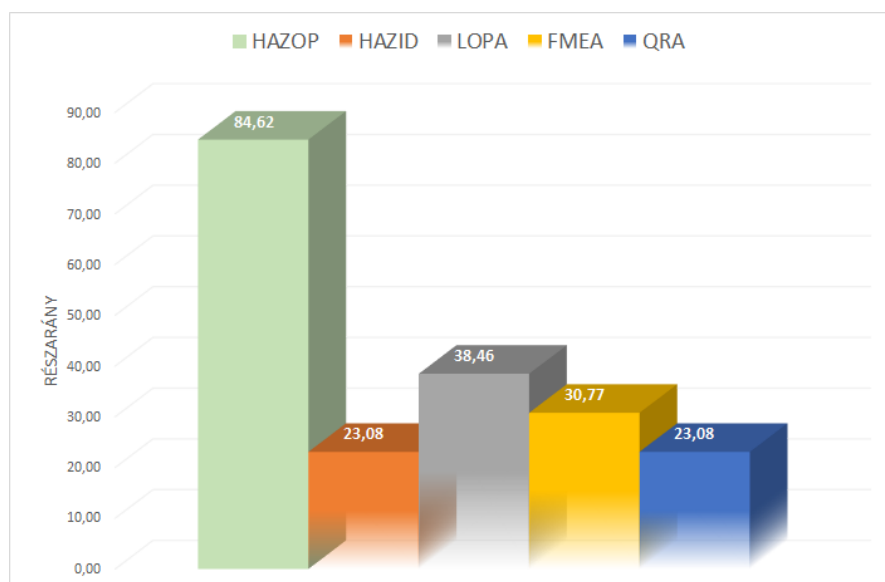
Kutatásom során tíz európai hidrogénprojektet azonosítottam, amelyek dokumentációjában (pl.: projektjelentés, honlap, videó, blog, podcast) szerepel kockázatelemzés [33-42]. Ezen túl Magyarországon három további projektet jelöltem, részben szakmai konzultációk, részben saját részvételem révén, mivel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



9. 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).



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

A 10. ábrán látható oszlopdiagramból egy nagyon fontos következtetés vonható le. Az európai projektek kapcsán a kockázatelemzési módszerek közül kiemelkedik a HAZOP (Hazard and Operability Study), 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 10 ábra alapján kijelenthetjük, hogy a HAZOP egy kulcsfontosságú eljárás a hidrogéniparban, így érdemes erre a kockázatelemzési módszerre fókuszálni a kutatás további részében.

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.

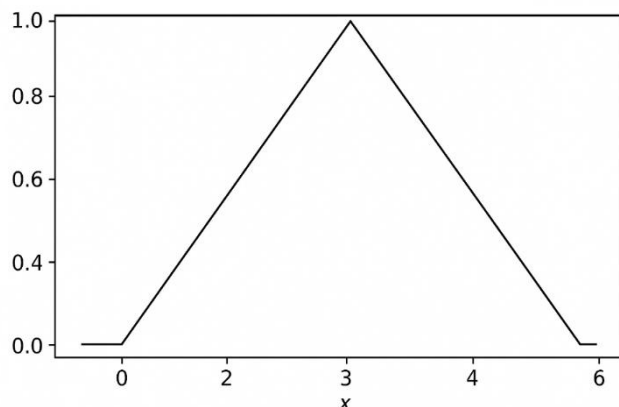
1.3 A fuzzy logika és a bioinspirált algoritmusok alapjai

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 (1/0), hanem fokozatosan értelmezhető. Például a „magas emberek” halmazában valaki nemcsak teljesen magas vagy nem magas lehet, hanem részleges tagsággal is bírhat, például 0,6-os értékkel [65].

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,

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

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].

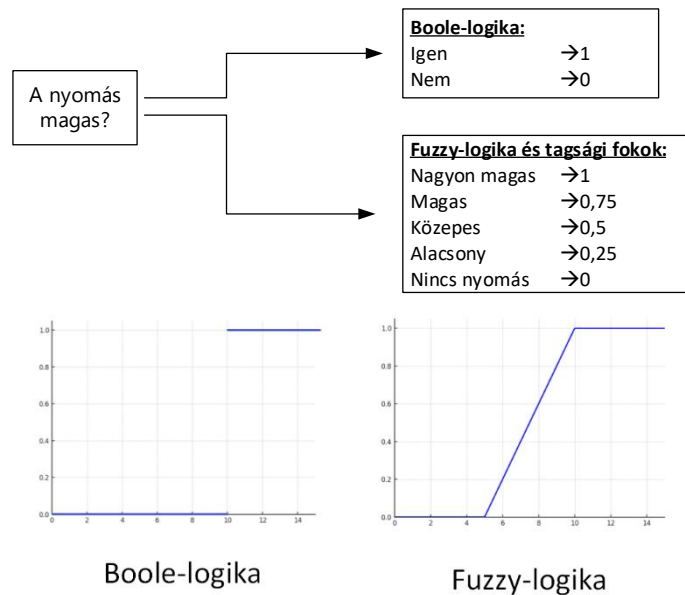
Feltétel, hogy $a \neq b$ és $b \neq c$, ekkor $\mu_A(x)$ azt mutatja meg, hogy az x érték mennyire tagja az „A” nevű fuzzy halmaznak.

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

- 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, mint az alacsony-közepes-magas nyomás vagy a szelepp állapotok. 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].



12. 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]. A folyamatot a 13. ábrán ábrázoltam. Egy tipikus fuzzy szabály:

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

- **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].

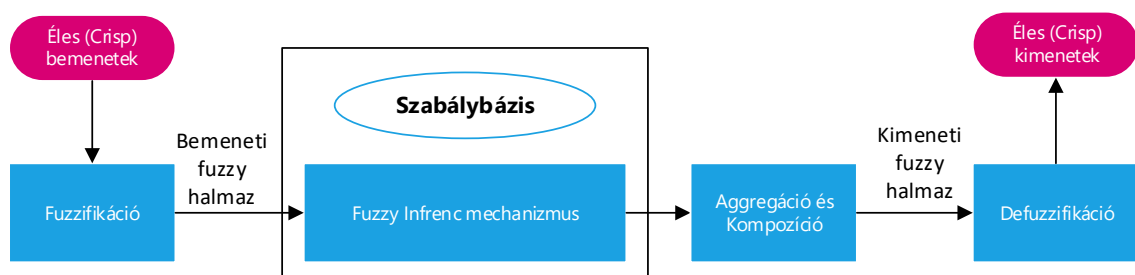
A **fuzzifikáció**, azt a folyamatot jelenti, amely során a hagyományos, éles értékeket átalakítjuk fuzzy értékke. Ez azt jelenti, hogy az adott értéket hozzárendeljük egy vagy több fuzzy halmazhoz egy tagsági függvény segítségével. Például, ha van egy hőmérsékleti adatunk (mondjuk 25 °C), a fuzzifikáció 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**, a fuzzy rendszerben azt a lépést jelenti, amely során 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.



13. 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:

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

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 számomra legfontosabb MAMDANI-TSK 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): A bioinspirált algoritmusok olyan optimalizálási módszerek, amelyek a természetben megfigyelhető jelenségekből, élőlények viselkedéséből vagy biológiai folyamatokból merítenek ihletet. Különösen nagy és összetett problémák esetén hatékonyak, mivel képesek elkerülni a lokális optimumok csapdáját, így növelik a globális optimum megközelítésének esélyét. Előnyük a rugalmasság, az egyszerű adaptálhatóság és a széles körű alkalmazhatóság mérnöki, gazdasági és informatikai területeken [77][78][79][109]. A „No Free Lunch” tétel értelmében nincs univerzálisan legjobb algoritmus, ezért a kutatás folyamatosan új megközelítéseket dolgoz ki. A metaheurisztikus módszerek forrásai sokfélék: a rajntelligencia-alapú eljárások rovarok és madarak kollektív viselkedését utánozzák, az evolúciós algoritmusok a darwini szelekció és mutáció elveit alkalmazzák, a fizikai

alapúak természeti törvényeket és folyamatokat, míg az emberi viselkedés-alapúak társadalmi vagy kulturális mintákat követnek. A legújabb fejlesztések, mint a rozmárok viselkedését modellező Walrus Optimization Algorithm vagy a vadmacskák vadászati stratégiájára épülő Bobcat Optimization Algorithm, jól mutatják a terület dinamikus fejlődését és sokszínűségét. A bioinspirált algoritmusok sikerének kulcsa a globális és a lokális keresés közötti egyensúly megteremtése [109].

1.4 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. Ezeknek a rendszereknek visszacsatolási hurkokat kell tartalmazniuk az adaptivitás működőképessé tétele érdekében és dinamikus metrikák alkalmazását kell alkalmazni a real-time kockázatértékeléshez [70]. Az olyan módszertanok, mint a fuzzy rendszerek, a neurális tanulás és az evolúciós algoritmusok javíthatják a kockázatértékelési modelleket [71]. Az online kockázatalapú biztonsági értékelés lehetővé teszi a biztonsági szintek gyors számszerűsítését, előnyöket kínálva a determinisztikus megközelítésekkel szemben [73].

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,
- további kritikus elvárás, hogy a rendszer érzékelni tudja a bemeneti adatok megbízhatatlanságát, és ilyen esetekben figyelmeztetést kell küldjön az operátornak, jelezve a manuális beavatkozás vagy a rendszerellenőrzés szükségességét. Ezzel megelőzhető, hogy hibás vagy félrevezető adatok alapján szülessenek biztonságkritikus döntések.

2 FUZZY - HAZOP INTEGRÁCIÓS LEHETŐSÉGEK ÉS KORLÁTOK

Az 1.2.3 fejezetben ismertettem a HAZOP hidrogéntechológiai szerepét, majd az 1.3 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 hidrogéntechológia biztonsági szintjének növeléséhez. Célom, hogy a HAZOP előnyeinek megőrzése mellett olyan kiterjesztett megközelítést javasoljak, amely túlmutat a tervezési fázis statikus alkalmazásán, és integrálhatóvá válik dinamikus, on-line folyamatirányító rendszerekbe [54][55][56].

Az ilyen rendszerekkel szemben alapvető elvárás a számítási bonyolultság kezelhetősége, 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. Kutatásom célja ezért egy olyan módszertan kialakítása, amely egyszerűsíti a komplex kiértékelést, rövidebb válaszidőt biztosít, és az új technológiai elemek (szenzorok, IoT, DCS, SCADA) bevonásával növeli a pontosságot.

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 teljes 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.

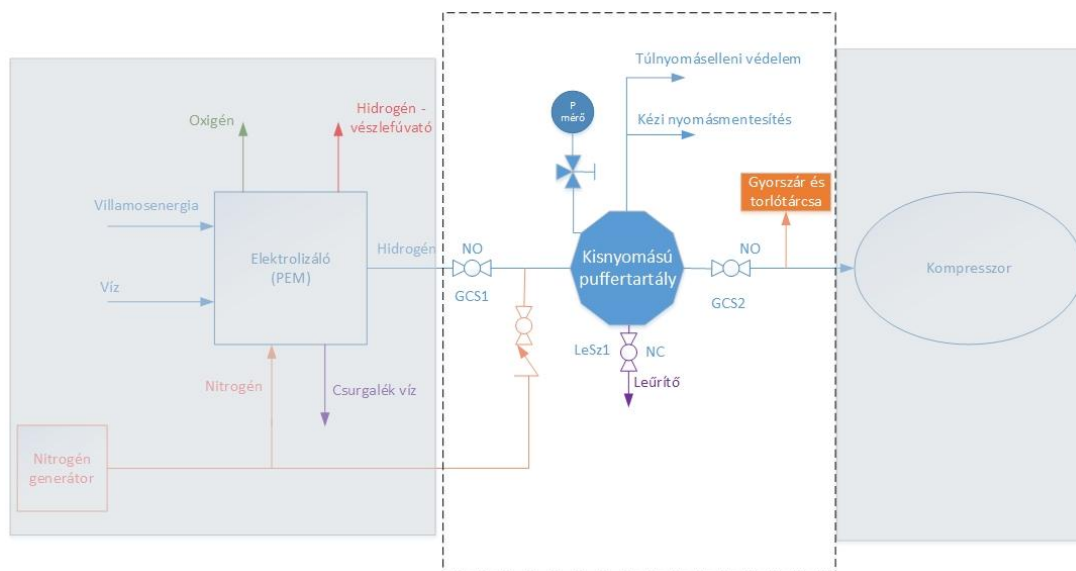
2.1 A HAZOP-ot bemutató hidrogéntechológiai modell és annak határai

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].



14. 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, technológiai 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.



15. ábra: A számításokhoz és a szemléltetéshez használt tesztmodell a Bükkábrányi Energiapark mintájára (saját szerkesztés)

A modellel a célom, hogy egyszerűen szemléltetni tudjam a HAZOP módszerét 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.

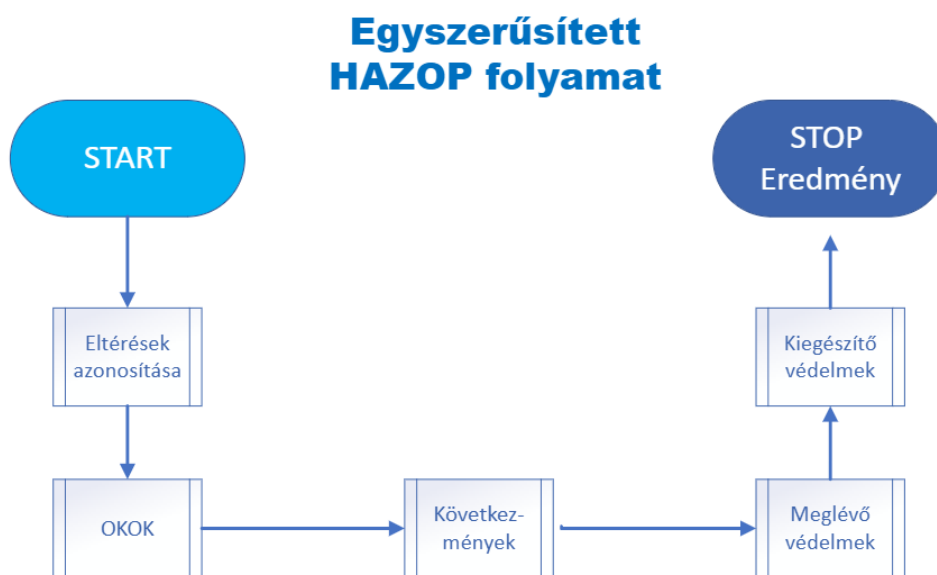
Elemzési paraméterek:

- nyomás (37-43 barg közötti üzemi nyomás),
- áramlás (0-70 kg/h közötti áramlás),
- szelepművelet (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 (16. ábra).



16. 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 leürítés	Hidrogénvesztés, alacsony nyomás miatti folyamat megszakadása	Nyomásmérő, redundáns töltőrendszer	Szivárgásérzékelők telepítése, csatlakozások gyakori ellenőrzése
Áramlás	Túlzott áramlás	Node 1 hiba, Nod 9 hiba,	Túlnyomás, tartály túlterhelése, repedés, szivárgás, robbanás	Nyomásmérő, túlnyomás elleni védelem	Töltési folyamat felügyelete,elektrolizáló ellenőrzése, nitrogéngenerátor ellenőrzése
Áramlás	Hiányos áramlás	GCS2, GCS2 gömcsap vagy gyorszár hibás működése, szivárgás	Puffertartály leürülése, nyomáshiány, kompresszor leállás, szivárgás, szűrőlánc 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 oldalon
Szelepművelet	Nem megfelelő zárás	Gömcsapok (GCS1, GCS2) vagy gyorszár meghibásodása	Szivárgás, nyomásproblémák, Szűrőlánc, robbanás	Redundáns szelepek	Szelepek rendszeres karbantartása, működésük ellenőrzése
Szelepművelet	Nem megfelelő nyitás	Kézi nyomásmentesítő szelep elakadása	Nyomás felgyülemlése, túlnyomás	Túlnyomás elleni védelem	Kézi szelep rendszeres tesztelése

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

2.1.1 A klasszikus HAZOP korlátai és kihívásai

Ahogy a 10. ábra és a 2. táblázat is mutatja, a HAZOP egy kvalitatív módszer, amely szöveges leírásokban rögzíti az azonosított veszélyforrásokat, eltéréseket és következményeket. Mivel nem támaszkodik objektív, numerikus mutatókra, eredményei nagymértékben függenek a résztvevők szakmai kompetenciájától, tapasztalatától és a csoportdinamikától. Ennek következtében ugyanazon rendszer elemzése más és más kimenetet adhat, ha eltérő szakértői csoport végzi. Az emberi tényezők - például kreativitás, szubjektív torzítások és a csoportmunka minősége - tovább növelhetik az eltérést [43][44][47][48]. További korlát, hogy a HAZOP nem szolgáltat kvantitatív adatokat sem a bekövetkezési valószínűségekre, sem a következmények súlyosságára. Ez problémát jelent, ha a döntéshozatal kockázatalapú optimalizálást igényel, például beruházási alternatívák vagy biztonsági intézkedések költség-haszon elemzésénél [43][44][47][48].

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

- szubjektivitás és a kvalitatív ítéletekből fakadó bizonytalanság,
- a szakértői dominancia a HAZOP-csoportban, amely a vélemények homogenizálódásához és az alternatív nézőpontok háttérbe szorulásához vezethet, ezáltal csökkentve a kockázatértékelés relevanciáját és sokszínűségét,
- 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,
- számszerűsített eredmények hiánya (pl.: biztonsági szintek, kockázati besorolások),
- a végeredmény erőteljes függése a szakértői csoport tapasztalatától, amely különösen kockázatos a pilot projektek során,
- a módszertan alkalmazása elsősorban a tervezési szakaszra korlátozódik, utókövetés nélkül,
- a kombinált hibák kezelésének hiánya,
- jelentős idő- és erőforrás-igény,
- 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. Ez a mai technológiai komoly hiányosság. 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 (1.2.1), a baleseti gyakorlat (1.2.2) és a HAZOP szerepének (1.2.3) áttekintése alapján megállapítható, hogy a valós idejű és számszerűsíthető megközelítések kidolgozása jelentős kutatási és fejlesztési potenciált képvisel, amely elengedhetetlen a jövő biztonságos ipari működéséhez.

HAZOP		
Szempont	Előny	Hátrány
Kockázatteltérítés 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

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

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].

Solukloe 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 jelentősen növelhetik a kockázatértékelés hatékonyságát és megbízhatóságát [53]. Ez perspektivikus alternatíva a hagyományos HAZOP korlátainak leküzdésére, különösen ott, ahol komplex, egymással összefüggő kockázatok multidiszciplináris értékelése szükséges.

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; priorizálható 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 Az új modell megalkotásának indoklása

Solukloe és munkatársai által ismertetett 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. Solukloe 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 következtető rendszerek (FIS - Fuzzy Inference System) teljesítménye drasztikusan romlik, ha a bemeneti dimenzió száma növekszik vagy ha a szabályok száma megnő (egy HAZOP-folyamatban ez gyakran több száz szabály - függ az objektum komplexitásától).

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, amely kifejezetten az időbeli válaszképesség javítását célozza, és így alkalmasabb az on-line HAZOP rendszerek működésének támogatására.

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

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

Ha megvizsgáljuk az on-line kockázatértékelő rendszerekkel szembeni követelményeket (1.5 fejezet), 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. Az elemzés alapjait továbbra is a „guide word” alapú „brainstorming” adja, s csak ezt követően lép be a fuzzy logika az értékelés későbbi fázisában.

2.3 A kisnyomású, HAZOP tartálymodell, 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 szabálysám:

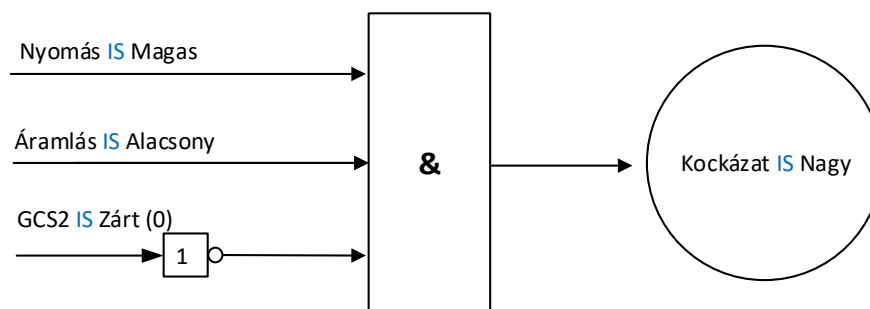
$$N_{szabály} = 3 \times 3 \times 2 = 18$$

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)

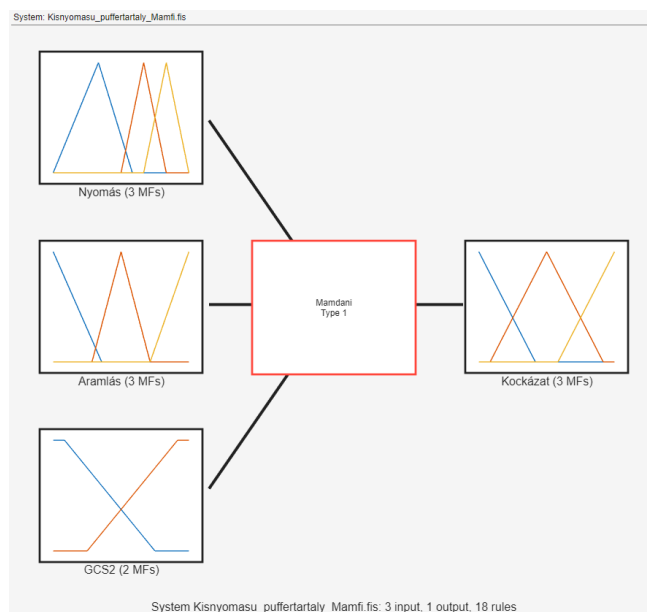
A fuzzy logika alapján egy szabály a következőképpen írható le:

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



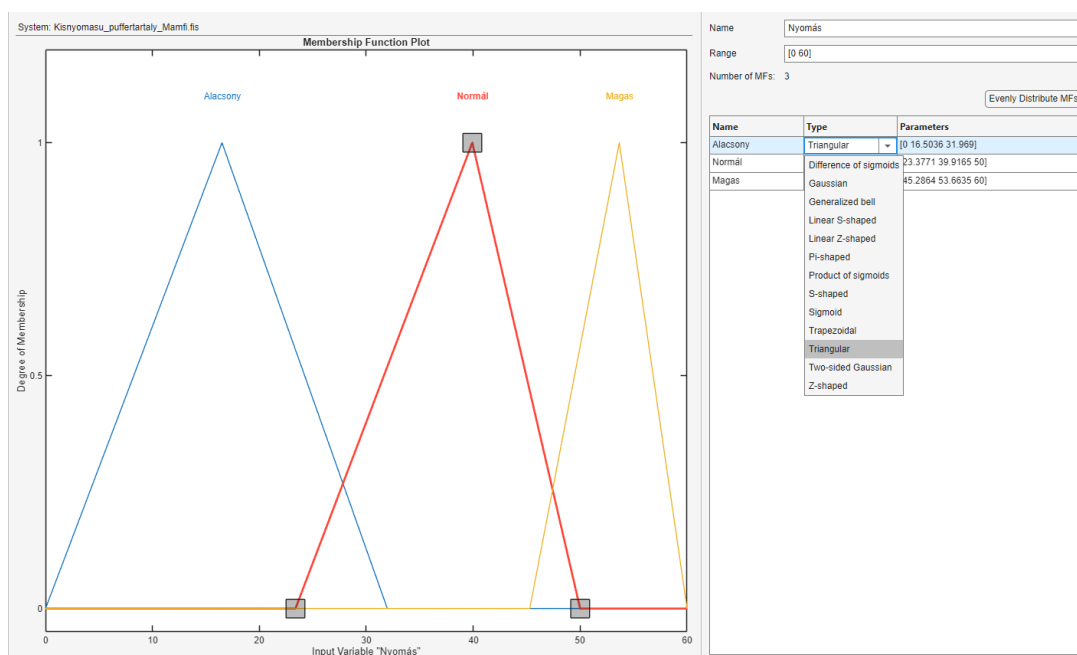
17. ábra: A fenti példaszabály, logikai ábrája (saját szerkesztés)

A modell validálásának érdekében felépítettem a kapcsolódó Mamdani-fuzzy következtetési rendszert (FIS), amelyhez az Óbudai Egyetem által biztosított MATLAB környezetet (előbb: R2024b, majd R2025a) és a Fuzzy Logic Designer alkalmazást használtam. A tesztelési és finomhangolási folyamatokat ebben a környezetben végeztem, amely lehetővé tette a módosítások hatékony és rugalmas megvalósítását.



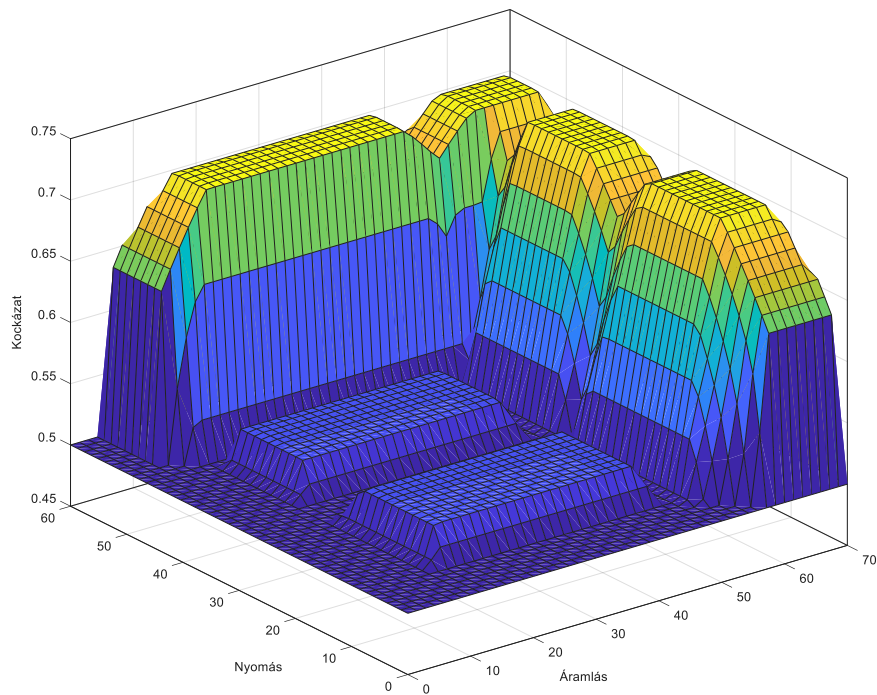
18. ábra: A Matlab modell vázlata, forrás: Matlab Fuzzy Logic Designer (saját szerkesztés)

A MATLAB R2025a-verzió kiemelkedően jól használható, alkalmazott matematikai szinten a fuzzy rendszerek fejlesztése érdekében, sőt az egyetemi licence lehetőséget teremt számos intuitív App és modul telepítésére. Számomra a Fuzzy Logic Designer App egy kiváló kutató-fejlesztői lehetőség, ugyanis az alkalmazás lehetővé teszi Mamdani és TSK fuzzy inference-rendszerek grafikus tervezését (18. 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.

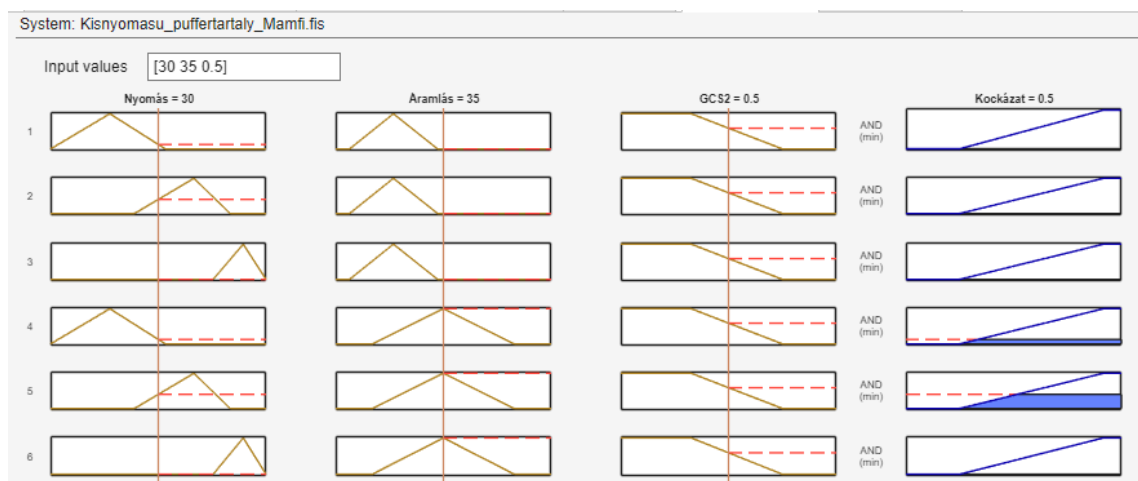


19. ábra: Tagsági függvények paramétereit, Matlab Fuzzy Logic Designer (saját szerkesztés)

A Fuzzy Logic Designer App fejlett vizualizációs eszközöket is tartalmaz. A tervezett fuzzy rendszer viselkedését vezérlési felület (control surface) formájában jeleníthetjük meg, amely a kimenetet (kockázat) ábrázolja két input változón (nyomás/áramlás) kombinációjára. A szabály-bebecslést (rule inference process) lépésről lépésre lehet nyomon követni adott bemeneti értékek esetén, így az átláthatóság és interpretálhatóság jelentősen nő.



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



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

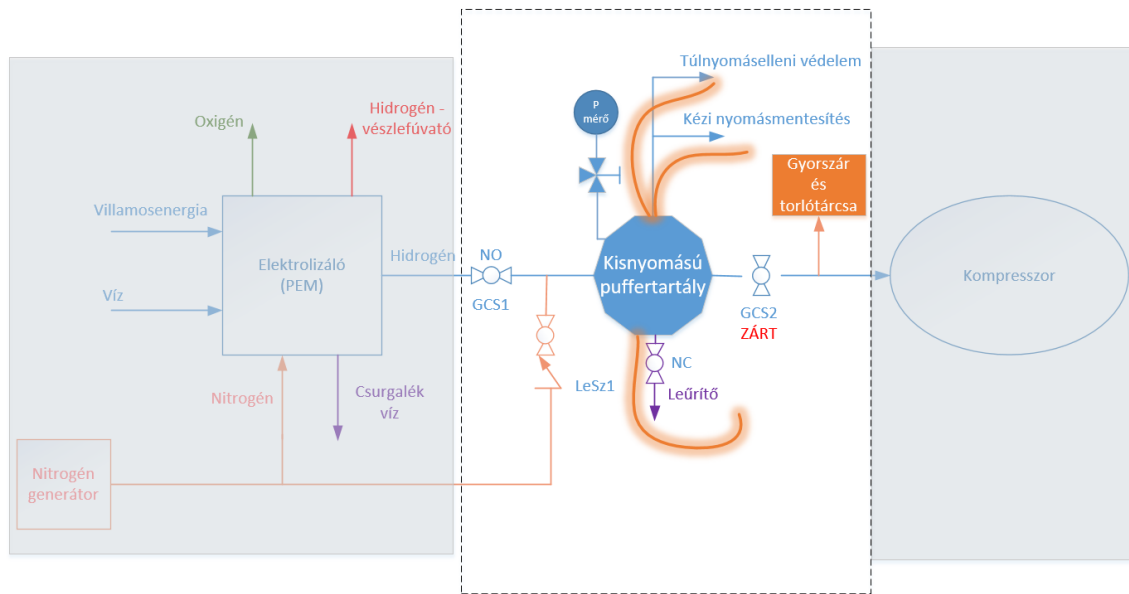
2.3.1 A tartálymodell továbbfejlesztése

A hidrogénipari-kockázatok feltárásával kapcsolatos szakirodalomkutatásaim eredményei (7. ábra) összhangban vannak egy 2021-ben publikált tanulmánnyal, melyet a National Renewable Energy Laboratory (NREL) és a Marylandi Egyetem közösen végzett. Összefoglaló publikációjukban 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 fenti adatokra és kutatásokra támaszkodva megállapítottam, hogy a hidrogénipari rendszereknél a szivárgás és annak detektálása a biztonság szempontjából kritikus fontosságú, mert a szivárgás következtében tűz és robbanás egyaránt kialakulhat. 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 modellemet egy szignifikáns anomáliafigyelő ággal egészítettem ki. Ennek konkrét megvalósulása szerint, ha a GCS2 szelep zárt állapota mellett áramlás detektálható a kisnyomású tartályból, akkor az alábbi esetek valamelyike állhat fenn:

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



22. ábra: Áramlási anomália szemléltetése (saját szerkesztés)

Annak érdekében, hogy az áramlási anomáliát detektálhassam, s ezzel a szivárgási állaputra 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 szabályrobbanás 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” 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 funkciókat is kezelni, akkor a szabályok száma már 192 lenne.

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

A fuzzifikáció, a szabálytüzelés, az aggregáció és a defuzzifikáció lépéseket figyelembe véve, a szabálysám növelése egyenes arányban növeli a számítási időt és a memóriát [65] [119][121].

Ez azt jelenti, hogy a fenti esetben, amikor a szabálysorszám 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 érdekében 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 szabálysorszám-redukciót, ám én ezektől egy sokkal egyszerűbb villamosmérnöki megközelítést alkalmaztam, így a klasszikus Boole-algebrát alkalmaztam. Annak érdekében, hogy a szabálysorszám-robbanást és a számítási kapacitás növekedést elkerüljem, logikai értékeket (0 vagy 1) állítok be:

- D. a túlnyomás elleni védelemre (PRV),
- E. a kézi nyomásmentesítő szelepre (MAN) és
- F. a leürítő szelepre (Drain).

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.

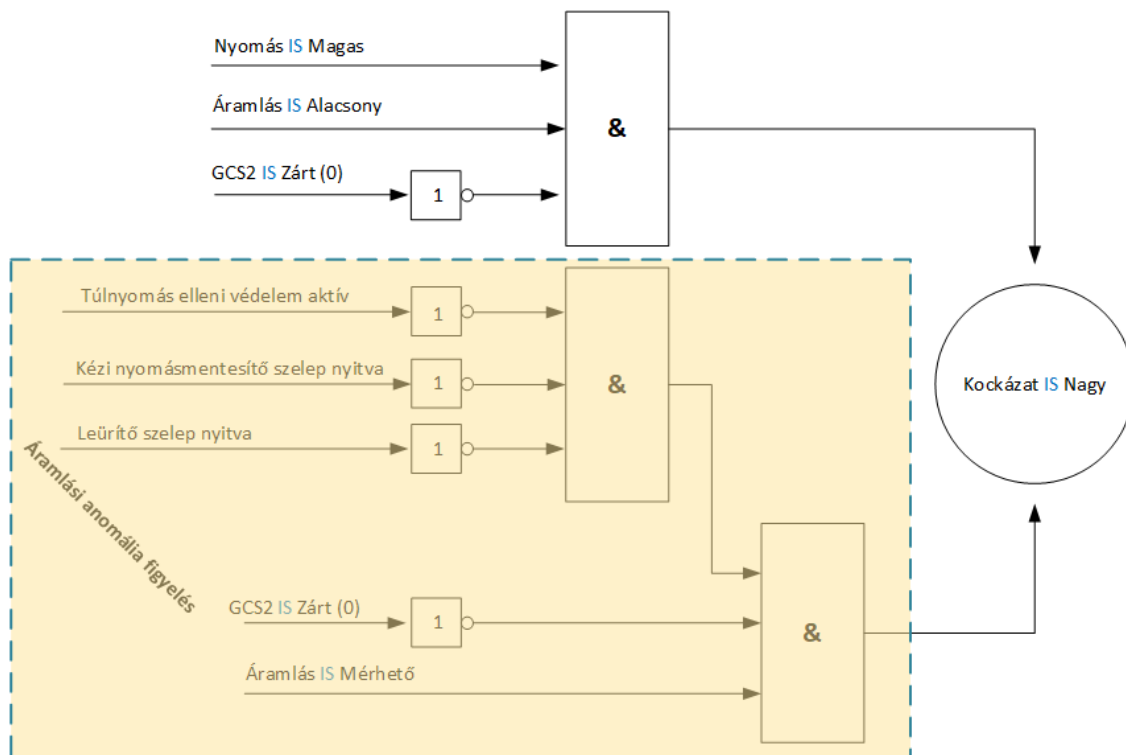
$$\mathbf{Anom} = \underbrace{(GCS2 = 0)}_{\text{zárt gyorszár}} \wedge \underbrace{(Aramlas \geq Q_{meas})}_{\text{mérhető/„túl nagy” áramlás}} \wedge \underbrace{\neg PRV \wedge \neg MAN \wedge \neg DRAIN}_{\text{nincs megengedett kiáramlási út}}$$

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 (20.ábra).



23. ábra: Egy példa az anomáliafigyelés megvalósítására (saját szerkesztés)

A következő táblázatba összefoglaltam, hogy az anomáliafigyelő, 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	érzékeny (GCS2 zárt + áramlás)
Diagnosztikai robusztusság	korlátozott	megnövelt
Emberi interpretálhatóság	jó	kiváló (külön ág az anomáliának)

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

2.3.2 Szintetikus adatok, a 10 DataSet és a tesztkörnyezet definiálása

A szintetikus adatgenerálás területét először szakirodalmi szinten elemeztem [89][90][111], majd a MATLAB környezetben vizsgáltam meg a gyakorlati megvalósítás lehetőségeit. A szintetikus adatok szerepe egyre jelentősebb a tudományos modellezésben és validációban, mivel a valós idősorok gyakran hiányosak, nem nyilvánosak vagy adatvédelmi korlátozások miatt nem felhasználhatók. E problémák áthidalására a szintetikus adatok statisztikai jellemzőik révén megbízhatóan reprezentálják a valós rendszereket, így lehetővé teszik a modellek fejlesztését, validálását és összehasonlítását valós adatok nélkül is.

A modellben a nyomás (P) és az áramlás (Q) folyamatos analóg értékekkel kerültek reprezentálásra, 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 két diszkrét állapotban - nyitott vagy zárt - vettem figyelembe. Az átmeneti állapotok (részlegesen nyitott vagy részlegesen zárt állapot) kezelése jelenleg nem képezte a vizsgálat tárgyát. Ugyanakkor a kutatás további szakaszaiban célom a modell kiterjesztése a szelepek áteresztőképességének, mechanikai állapotának és üzemszerű működésének figyelembevételével. Így a későbbiekben a teljesen nyitott és teljesen zárt állapotok mellett vizsgálhatóvá válik azoknak a szelepeknek a viselkedése is, amelyek mechanikai tulajdonságaik alapján lehetővé teszik a részleges állapotok modellezését. A fentiekben leírt 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, 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 (24. 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 tranzieneket 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 összekapcsolásából épül fel a konfúziós mátrix (TP, TN, FP, FN), ezekből pedig számítással kerül megállapításra a négy kockázatdetektálási-arányszám (TPR, FPR, Coverage, SSI). A mutatók és arányok minden datasetre külön-külön kerülnek kiszámításra (31. ábra), de ezek közlése a dolgozat terjedelmi korlátai miatt nem lehetséges, így az aggregált statisztikai eredményeket közlöm.

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. Ezen adatokon túl a használt MATLAB verziója: R2025a, biztosította: Óbudai Egyetem, felhasználó: Szén István, licence: 4xxxxxx0, a Fuzzy Logic Toolbox, a számítási környezet (Windows 10 Pro, Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @ 1.60GHz, eszközazonosító: 9xxxxxxD-xxxx-xxxC-8xx5-AxxxxxxxxxxxE), amelyek együttesen biztosítják a vizsgálatok átlátható és megismételhetőségét karakterét (x-ek jelentése és oka: adatvédelem). A szabályrendszer és a tagsági függvények optimális konfigurációját nem egyetlen adathalmazra optimalizáltam, hanem a „train→ validation→ test” logika mentén választottam ki. A szabály- és paraméterhangolás a validációs halmazon történik, a végső mutatókat kizárólag a független tesztkészleteken publikálom. Ezzel biztosítom, hogy a háttérben működő szabályrendszer bizonyíthatóan a „legjobb” a vizsgált környezetben, és a közölt teljesítménymutatók torzítatlanul tükrözik a rendszer várható on-line viselkedését és ezzel a szemléletmóddal biztosíthatom a felépített HAZOP-fuzzy modellek robusztusságának és általánosíthatóságának az ellenőrzését.

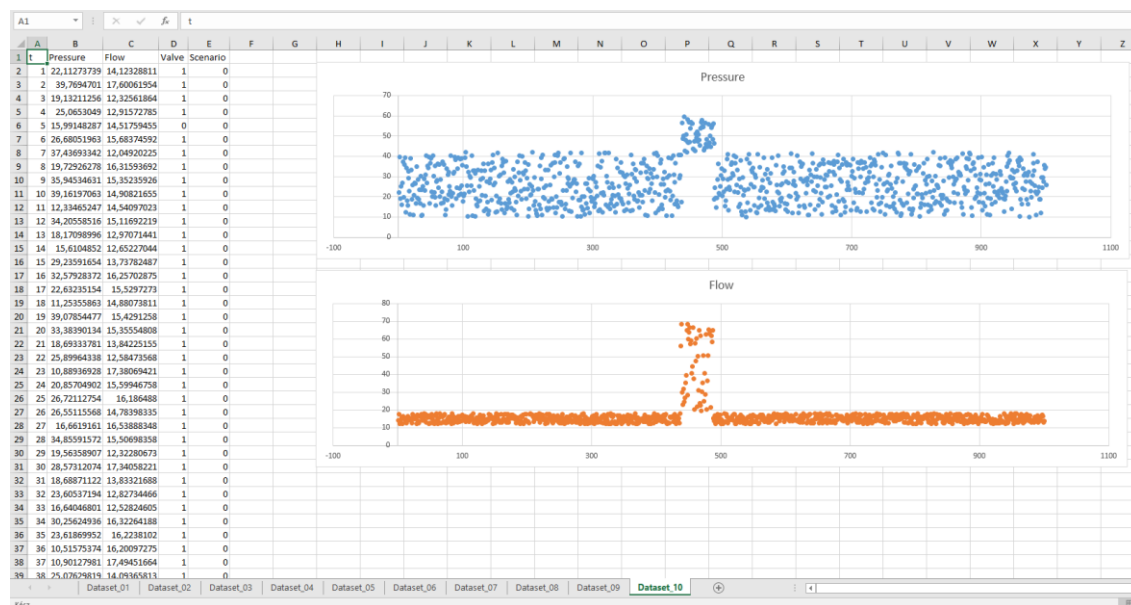
```

E:\_2025_munka\_PHD\A_ÉRTEKEZÉS\MATLAB fájlok\Beolvas_betolt_kiertekel.m
14  xlsxFilename = 'synthetic_datasets_pressure_flow_valve.xlsx'; % a korábban generált Excel
15  sheetPattern = 'DataSet_%02d'; % 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 (szelep)
44  Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_fis = addInput(Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_fis,[0 1],Name="GCS2");

```

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

A 25. ábrán, illusztrációként látható az egyik „Dataset” adathalmaza, a két pontdiagrammon pedig látszik a normál üzemi működést és az extrém helyzetet reprezentáló véletlenszerű pontthalmaz.



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

2.3.3 A validáció minőségi mutatói.

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].

A modellezést és a kiértékelést a MATLAB R2025a környezet Fuzzy Logic Toolbox-ának és Fuzzy Logic Designer alkalmazásának segítségével valósítottam meg. Az adatok a 13. ábra szerinti folyamaton haladnak keresztül, majd ezt a Mamdani FIS mechanizmus révén kimeneti változókká alakítom azokat, mely értékeket az alább definiált validációs mutatókban jelenítem meg. Kutatásomban a validáció mérésére minőségi mutatókat definiáltam, ezek leképzéséhez a konfúziós mátrixot használtam, miközben következetesen figyelembe vettem az arányok fontosságát is [90].

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 értelmzése (saját szerkesztés)

Egy példán keresztül mutatom az egyedi minőségi mutatók és az arányok jelentését! Tételezzük fel, hogy a minta szám (N=100), melyből 20 minta valódi veszélyt, 80 minta viszont teljesen üzemyszerű jellemzőket reprezentál.

N=100	Pozitív (eredmény)	Negatív (eredmény)
Valós pozitív (20)	TP=18	FP=10
Valós negatív (80)	FN=2	TN=70

A választott minőségi mutatókból képzett arányok, melyek alapján a validációt és az összehasonlítást elvégeztem [89][90][111].

- G. **TPR - True Positive Rate:** az érzékenységet méri, vagyis hogy a modell milyen arányban képes felismerni a valóban kockázatos eseteket.
- H. **FPR - False Positive Rate:** a téves riasztások gyakoriságát mutatja, amely a rendszer stabilitásának egyik fő indikátora.
- I. **SSI - Security Sensitivity Index:** egy kombinált mutató, amely egyidejűleg veszi figyelembe a helyesen és tévesen azonosított kritikus eseteket, így a biztonsági szempontból leginkább releváns teljesítménymutatónak tekinthető.
- J. **COV - Coverage:** a rendszer aktivitásának mérőszáma, amely azt mutatja meg, hogy a vizsgált esetek mekkora részében adott valamilyen riasztást a modell.

Mutató neve	Jelentés	Képlet	Jelentőség
Találati arány (TPR)	A modell helyesen azonosította a valós kockázatos eseteket.	$\frac{TP}{TP + FN}$	Mennyire érzékeny a modell?
Fals pozitív arány (FPR)	A modell akkor is riasztott, amikor nem kellett volna.	$\frac{FP}{FP + TN}$	Mennyire <u>stabil</u> , kerüli-e a vakriasztást?
Biztonsági érzékenységi index (SSI)	Kombinált hatékonysági mutató.	$\frac{TP}{TP + FP + FN}$	A kockázatos minták hány százalékát azonosítja hatékonyan?
Lefedettség (Coverage)	Az érzékelési aktivitás mértéke.	$\frac{TP + FP}{N}$	A modell hány mintát ítelt „pozitívnak” az összesből?

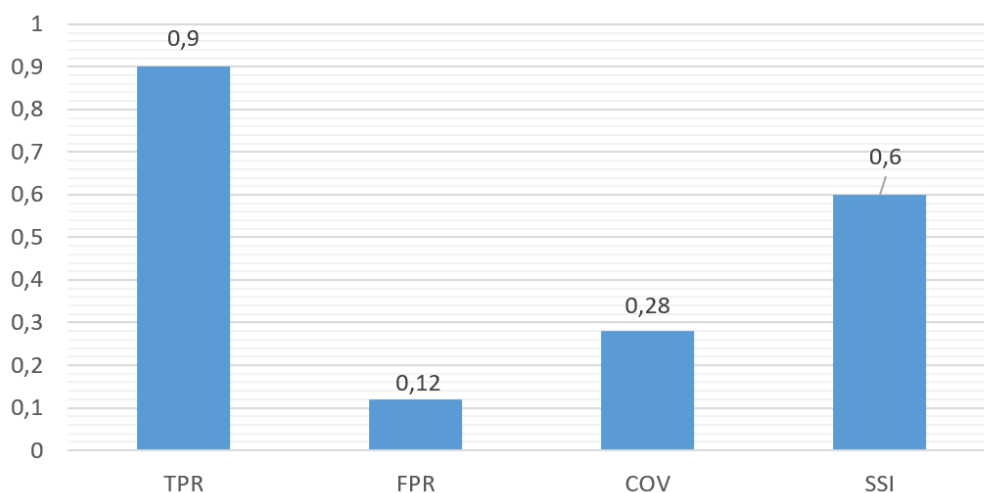
8. táblázat: Validációhoz kapcsolódó kockázatdetektálási-arányok és azok értelmezése (saját szerkesztés)

$TPR = \frac{TP}{TP+FN} = \frac{18}{18+2} = \frac{18}{20} = 0,9$	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.

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

26. ábra: Konfúziós mátrix -a mintapéldára (saját szerkesztés)

Validációs arányszámok



27. ábra: Validációs, kockázatdetektálási-arányszámok - mintapéllda (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, például a fuzzy tagsági függvények és szabályrendszerek paramétereinek módosításával.

2.3.4 A Mamdani FIS-el felépített modell eredményeinek struktúrája

Egy szintetikus adatsor alapján, 1000 mintából, finomhangolást követően 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

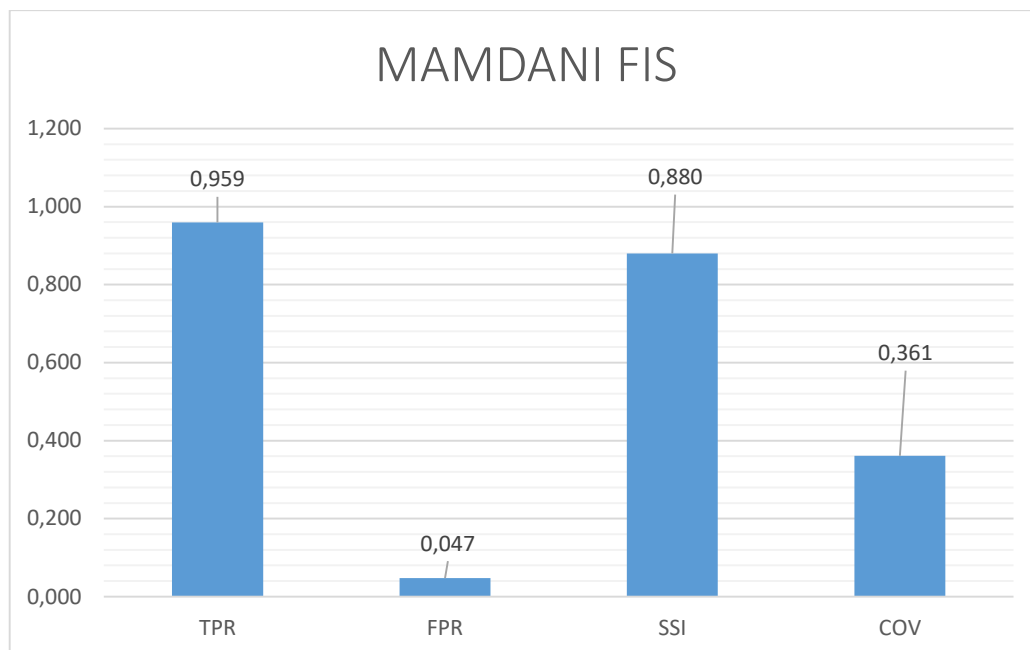
9. táblázat: A modell futásából származó eredmények (saját szerkesztés)

N=1000		Pozitív	Negatív
Pozitív	330	31	
Negatív	14	625	

28. ábra: A Mamdany-fuzzyhoz tartozó konfúziós mátrix

Jellemző	Eredmény	Jelentés
Találati arány (TPR)	$\approx 0,959$	A valós veszélyek 95,9%-át detektálta a fuzzy modell
Fals pozitív arány (FPR)	$\approx 0,047$	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.

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

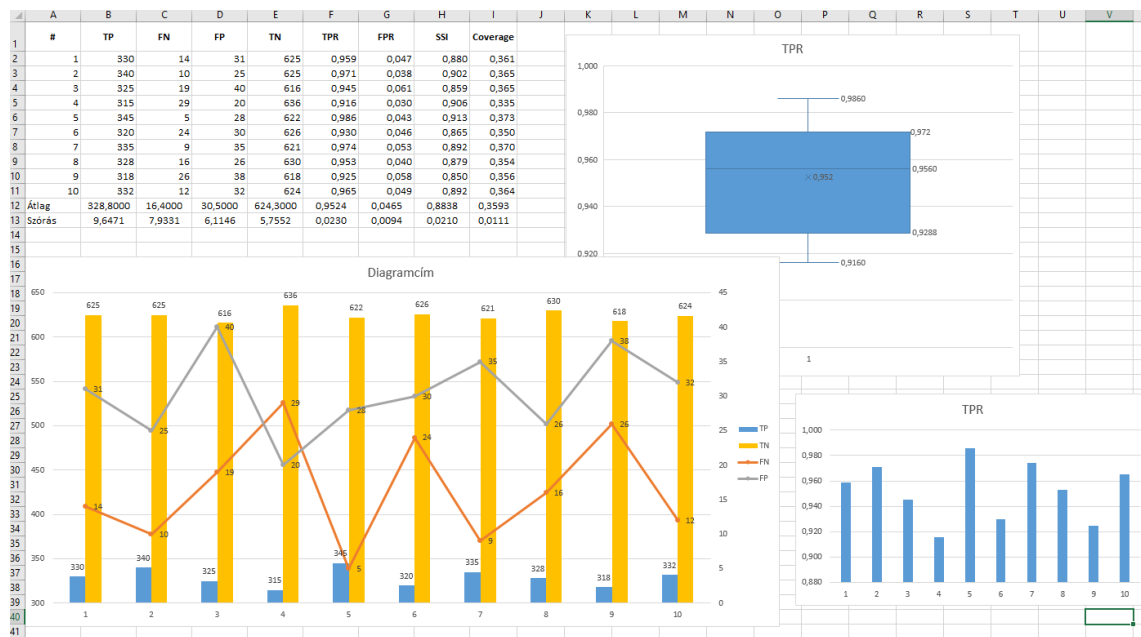


29. ábra: A Mamdani-fuzzy logikával felépített modell kockázatdetektálási-arányszámai (saját szerkesztés)

2.3.5 Az eredmények összefoglaló elemzése, értékelése

A HAZOP-Fuzzy modell hidrogéntechnológiai validációjának egyik legfontosabb feladata volt, hogy a modell teljesítményt ne egyetlen adatkészlet alapján, hanem több, egymástól független DataSeten vizsgáljam meg. Ennek érdekében tíz különböző, azonos statisztikai tulajdonságokkal rendelkező adathalmaz került előállításra és kiértékelésre (30. ábra), amelyek mindegyikére kiszámításra kerültek a biztonsági teljesítményt reprezentáló egyedi mutatók, valamint az ezekből számított arányszámok (31. és 32. ábra).

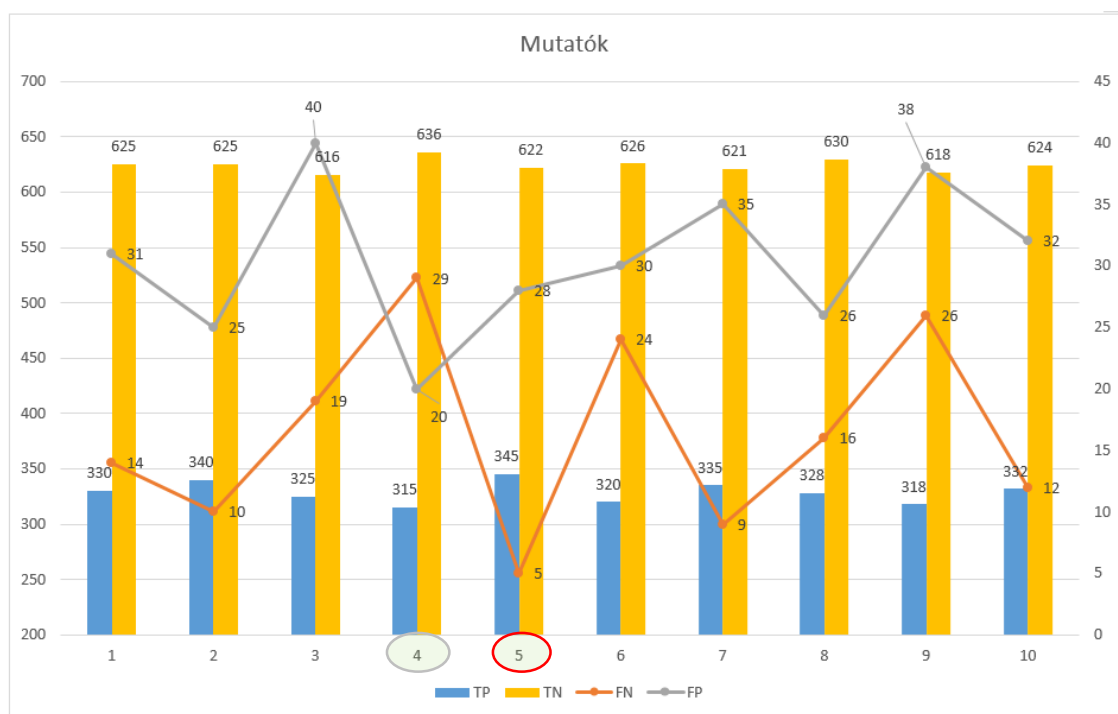
Az eddigi vizsgálatok célja az volt, hogy ne csak egyedi eredmények álljanak rendelkezésre, hanem feltárhatók legyenek a mutatók variabilitásai, stabilitási jellemzői és reprodukálhatósága is. Ezáltal átfogó képet kapunk a fuzzy logikára épülő HAZOP kockázatdetektációs tulajdonságának képességeiről, a rendszer megbízhatóságáról és gyakorlati alkalmazhatóságáról.



30. ábra: MS Excel - adatelemzés, munkaközi anyag (saját szerkesztés)

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

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

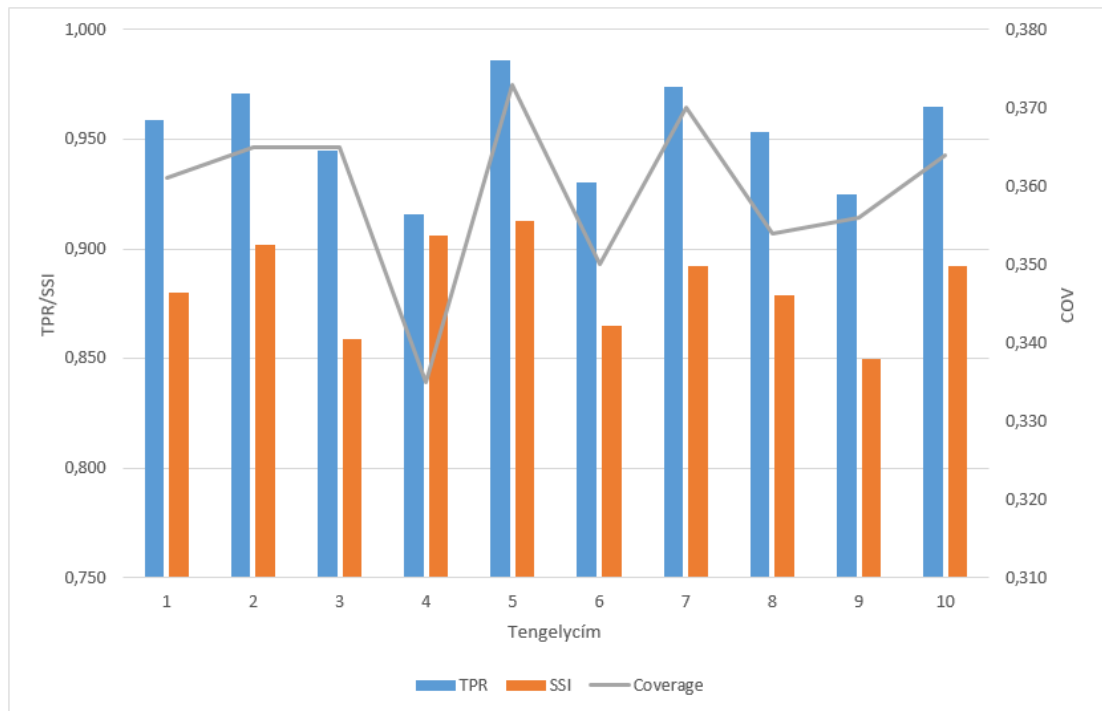


32. ábra: A konfúziós mátrix mutatói Mamdani-Hazop esetén (saját szerkesztés)

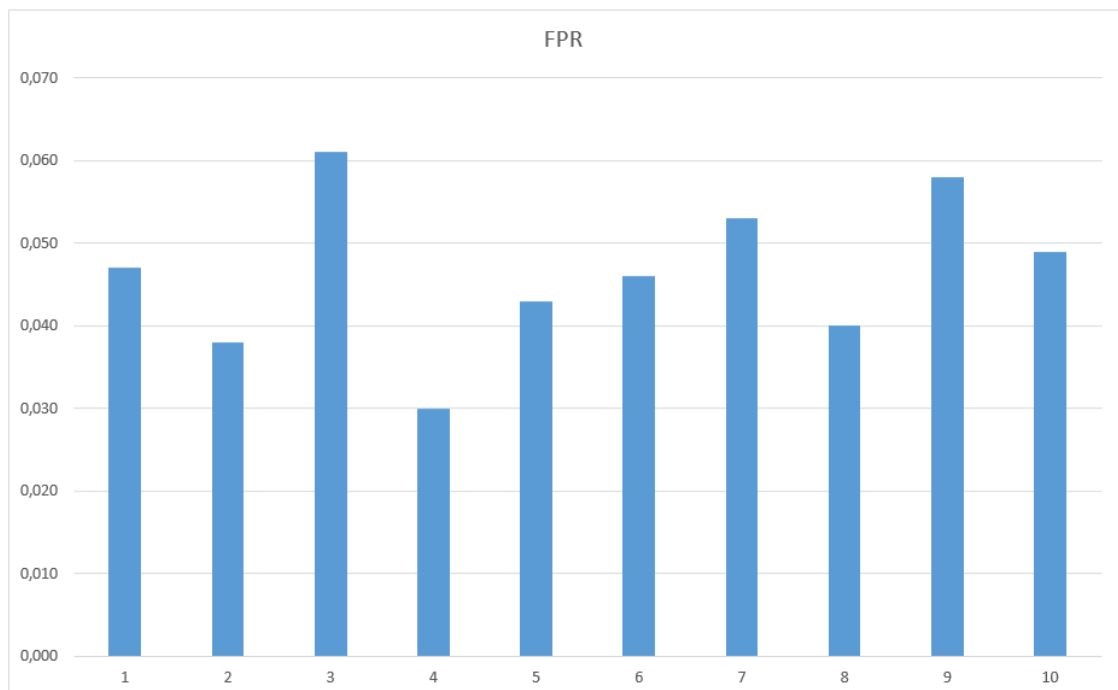
A 32. ábrán a kék oszlopban a True Positive (TP) értéke 315-345 között változik, nagy kilengések nem láthatók, így megállapíthatom, hogy a TP alapján a modell stabilan azonosítja a valódi pozitív esetek döntő többségét. A True Negative (TN) értéke szintén homogén, így kijelenthető, hogy a valódi negatív esetek azonosítása is stabil. A narancsszínű vonal a False Negative (FN), ami nagyobb ingadozásokat mutat, de felhívom a figyelmet arra, hogy ez az érték egy másodlagos tengelyen van ábrázolva, aminek más a felbontása, mint az előző, elsődleges skáláknak. A 4. és az 5. adatsor (az ábrán, bekarikázott két adatsor) elemzésében, ez a mutató ugrásszerű eltérést mutat, 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.

Összeségében, a 10 adatkészlet alapján az mondható el a felépített és vizsgált Mamdani-FIS alapú HAZOP modell viselkedéséről, hogy a modell teljesítménye kiegyensúlyozott képet mutat. A helyesen azonosított valódi pozitív (TP) és valódi negatív (TN) esetek száma viszonylag magas, míg a hamis riasztások (FP) és a kihagyott veszélyek (FN) 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.



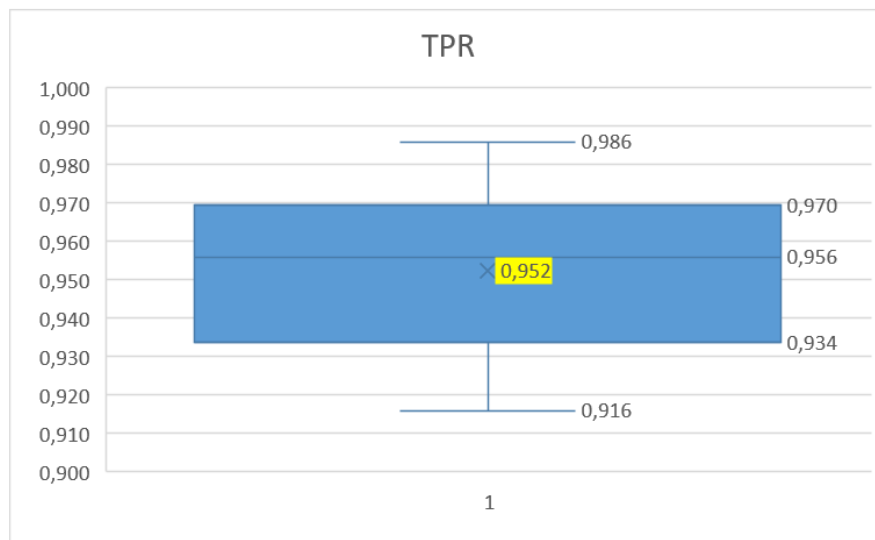
33. ábra: A TPR, SSI és a Coverage Mamdani-HAZOP esetén (saját szerkesztés)



34. ábra: Az FPR önálló ábrázolása Mamdani-HAZOP esetén (saját szerkesztés)

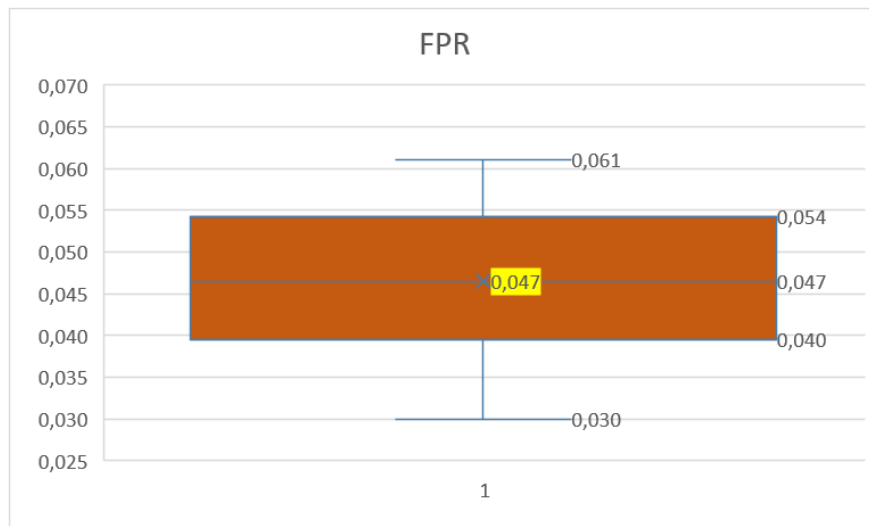
A 33. ábra rávilágít arra, hogy a modell érzékenysége (TPR) stabilan magas, minden esetben 0,92 feletti (4. dataset). A biztonsági érzékenységi index (SSI) jellemzően 0,88 körüli értékeket mutat, de datasetenként kisebb ingadozás figyelhető meg, ami a hamis pozitív és hamis negatív értékek hatásának tulajdonítható. A lefedettség (Coverage) végig szűk tartományban mozgott (0,335-0,375), de nem ideális a mértéke, ezt a tulajdonságot alaposabban szükséges vizsgálni.

A részletek felderítése érdekében a kockázatedetektálási arányokat un. boxplot ábrázolás segítségével vizsgálom meg. Az ábrázolás célja egyben ábrázolni az átlagot (sárga jelölés) a medián, a minimum és maximum érték jelzése, valamint az első- és a harmadik kvartilis ábrázolása.



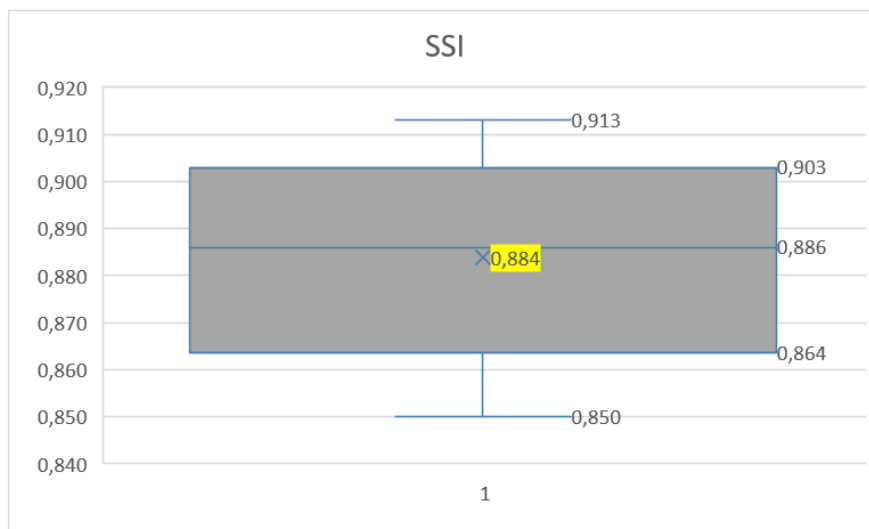
35. ábra: Mamdani-FIS, TPR - boxplot (saját szerkesztés)

A találati arány (TPR) eloszlását bemutató boxplot - 35. 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 alacsonyabb volt, ami az átlagot lefelé húzta. A medián magasabb értéke ugyanakkor jelzi, hogy a legtöbb datasetnél a modell érzékenysége stabilan 95% körül alakult.



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

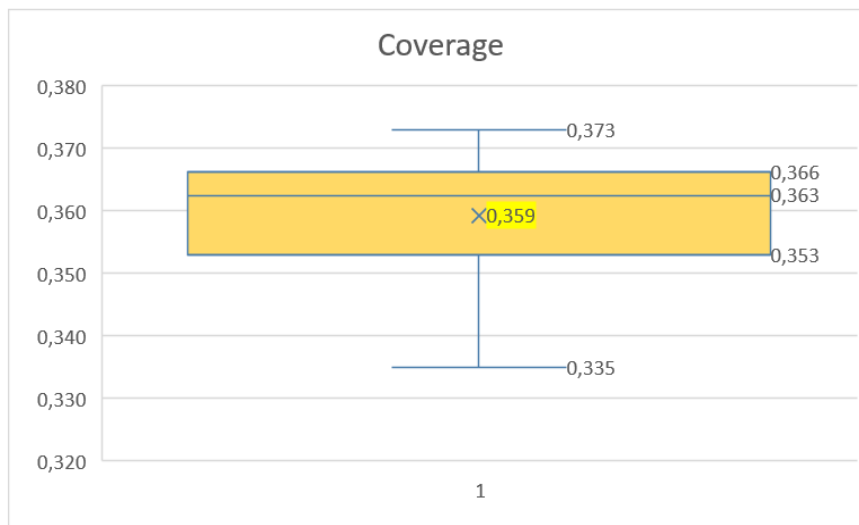
A hamis pozitív arány (FPR) eloszlását a 36. ábra mutatja. A medián érték 0,047, míg a teljes tartomány 0,030 és 0,061 közé esik. Az első és harmadik kvartilis (0,040 és 0,054) közötti szűk intervallum arra utal, hogy a modell téves riasztásainak aránya datasetenként csak kis mértékben ingadozik, ami a rendszer stabilitását jelzi.



37. ábra: Mamdani-FIS, SSI - boxplot (saját szerkesztés)

A Biztonsági Érzékenységi Index (SSI) eloszlását a 37. 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.



38. ábra: Mamdani-FIS, Voverage - boxplot (saját szerkesztés)

A Coverage eloszlását a 38. 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.

A Mamdani FIS eredményeinek összefoglalása:

A szakirodalmi kutatás alapján várt eredményeket az általam felépített 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 saját munkám tekintetében. Kritikus szemmel megvizsgálva az adatokat a következő kiegészítő megállapításokat teszem:

- K. Bár maga a TPR értéke kifejezetten jó (35. ábra), az FP értéke az összes datasetre vonatkoztatva magas (31-32. ábra). Ez azt jelenti, hogy a hamis riasztások száma nem kellően alacsony, így egy valós ipari környezetben a hamis riasztások magas

gyakoriság az operatív személyzet szempontjából fásultságot, fókuszvesztést, dekoncentrálttságot és figyelemzavart eredményezhet. Következmény: az operátorok reakciókészségének csökkenése, mely komoly biztonsági kockázat, mert a valóban kritikus állapotok észlelését és az azokra adott válaszütemet jelentősen késlelteti a fáradtság. Végsőeredmény: hogy növekszik a rendszer meghibásodásának vagy a balesetek bekövetkezésének valószínűsége.

- L. 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.
- M. 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 rendszer „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.
- N. A tagsági függvények és a szabálybázis finomhangolása még egy ilyen kisméretű modell esetén is időigényes és még ennél a rendszerméretnél sem sikerült minden mutatót optimális szinten stabilizálni. 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 maradéktalanul a paraméterezés

Összességében a Mamdani-fuzzy logikára épülő HAZOP modell validációja igazolta, 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, valamint a metaheurisztikus optimalizálással kombinált hibrid modellek vizsgálata.

2.4 A kisnyomású, HAZOP tartálymodell, TSK megközelítéssel

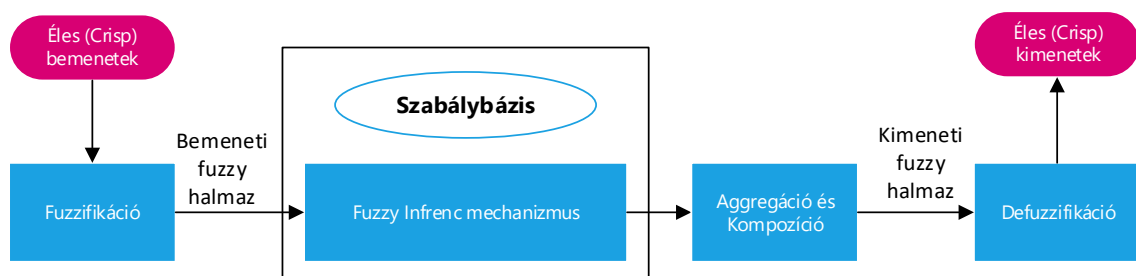
A következőkben a 2.3. fejezetben bemutatott, kisnyomású tartálymodellt, a TSK fuzzy keretrendszerbe helyezem át, hogy lehetővé váljon a két megközelítés hidrogénipari környezetben történő közvetlen összehasonlítása, a fent bemutatott kockázatdetektálási mutatók alapján.

2.4.1 Fuzzy rendszerek koncepcionális és alkalmazásbeli összehasonlítása

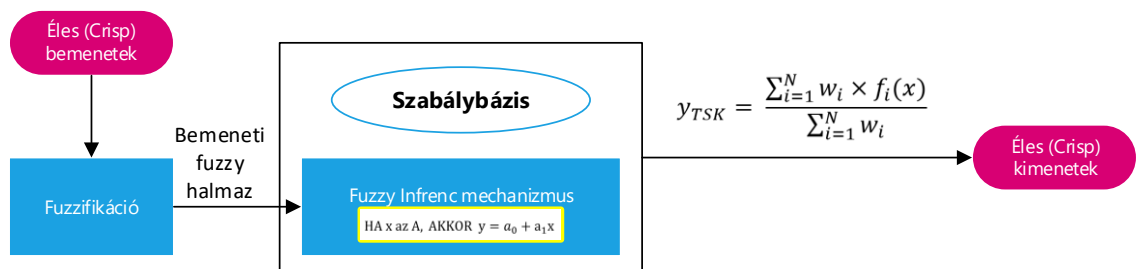
Már a dolgozat elején is utaltam arra, hogy a HAZOP-módszertan szövegesen megfogalmazott szabályrendszere természetes módon illeszkedik a Mamdani-típusú fuzzy rendszerek nyelvi alapú megközelítéséhez. Ez a koncepcionális összhang kutatási szempontból indokoltá és logikussá tette a Mamdani-fuzzy keretrendszer alkalmazását az eddigi kutatásokban [49] [50] [53]. A HAZOP-módszertan és a fuzzy logika integrációja eddig elsősorban a feldolgozóipari alkalmazásokban jelent meg; a hidrogéntekológia területén e megközelítés alkalmazásáról azonban tudomásom szerint még nem születtek publikált eredmények. Kutatásaim során ugyanakkor nyilvánvalóvá vált, hogy bizonyos részterületeken, különösen az on-line alkalmazhatóság tekintetében, már most kirajzolódnak a fuzzy-alapú HAZOP módszer kihívásai. Az eddig elért eredményeim, valamint a fuzzy rendszerek mélyebb megismerése arra ösztönzött, hogy vizsgálataimat a Takagi-Sugeno-Kang (TSK) fuzzy rendszerek irányába is kiterjesszem, tekintettel arra, hogy az alkalmazott matematikai kutatások e modell esetében kedvezőbb választóról és a szabálybázis kezelhetőségéről számolnak be.

A Mamdani-típusú fuzzy rendszerek és a TSK fuzzy modellek ugyan szoros matematikai rokonságot mutatnak, mert mindkettő a fuzzy logika alapelveire épít és szabálybázison alapú döntéstámogatást valósít meg. A TSK-fuzzy rendszerek számos szempontból mégis előnyösebbek lehetnek, különösen akkor, ha a cél a predikció pontosságának növelése és a számítási hatékonyság javítása. A két megközelítés közötti alapvető különbség a szabályok konzekvens részében fedezhető fel. Amíg a Mamdani-modell fuzzy halmazokra és nyelvi változókra épülő következményeket alkalmaz, addig a TSK-modellben a konzekvens rész explicit matematikai függvényekkel operál. Ennek következtében a TSK fuzzy rendszer globális kimenete folytonos, analitikusan kezelhető függvény, amely integrálható és differenciálható, amennyiben a konzekvens függvények maguk is folytonosak. Ez a tulajdonság jelentős gyakorlati előnyöket biztosít, pl.: lehetővé teszi a TSK modellek közvetlen integrációját gradiens-alapú optimalizációs eljárásokba, adaptív és prediktív szabályozókba, valamint elősegíti a klasszikus

szabályozásméleti módszerekkel (pl.: Lyapunov-analízis, lineáris mátrix-egyenlőtlenségek) való kombinálhatóságot. A Mamdani-modell ezzel szemben inkább az emberi szakértői tudás, nyelvi leírására és interpretálhatóságára alkalmas, ugyanakkor analitikai tulajdonságai jelentősen korlátozottabbak a defuzzifikációs eljárások komplexitása miatt. Összességében a Mamdani-megközelítés előnye a szemantikai érthetőség és a szabályalapú nyelvi reprezentáció, míg a TSK rendszer erőssége az analitikus kezelhetőség, a numerikus pontosság és a mérnöki alkalmazásokhoz való szoros illeszkedés. A TSK fuzzy rendszerben nincs szükség az aggregációs, kompozíciós és defuzzifikációs lépésekre, mivel a kimenetek közvetlenül numerikus formában állnak elő. Ez jelentős előnyt kínál on-line adatfeldolgozásban, hiszen nemcsak a kiértékelés sebességét növeli, hanem lehetővé teszi a szabálybázis numerikus optimalizálását metaheurisztikus algoritmusokkal, amelyek természetüknél fogva kvantitatív adatokon működnek hatékonyan.



39. ábra: Mamdani-fuzzy folyamatábra [65] (saját szerkesztés)



40. ábra: TSK-fuzzy folyamatábra [65] (saját szerkesztés)

A két rendszer grafikus absztraktja látható a 39. és 40. ábrán. Ami közös a két rendszerben, hogy mind a Mamdani-, mind a TSK fuzzy rendszer crisp (éles, numerikus) bemeneti értékekből indul ki. A Mamdani-fuzzy rendszerben (39. ábra) a bemeneti változókat először fuzzy halmazokhoz tartozó tagsági függvények segítségével jellemezzük (pl.: alacsony hőmérséklet, közepes nyomás). A rendszer szabályai ezekre a nyelvi változókra épülnek, például: ha a hőmérséklet magas ÉS a nyomás alacsony, akkor a kimenet közepes. A fuzzifikált bemenetek a szabálybázison keresztül kerülnek

feldolgozásra, majd az eredmények aggregálódnak és kompozíció révén egyesülnek. Végül a defuzzifikációs lépés alakítja vissza a fuzzy kimeneti halmazt éles (crisp) értékké, amely a rendszer kimeneteként jelenik meg [65][66][119] [120].

A Takagi-Sugeno-Kang fuzzy rendszerben (40. ábra) a bemeneti változókat szintén fuzzy halmazokhoz tartozó tagsági függvények segítségével jellemezzük (pl.: alacsony hőmérséklet, közepes nyomás). A szabályok feltételrészé tehát hasonló módon nyelvi kategóriákra épül, azonban a konzekvens részben nem fuzzy halmazok, hanem explicit matematikai függvények szerepelnek. Például: ha a hőmérséklet magas ÉS a nyomás alacsony, akkor a kimenet = $2,3 + 0,5 \cdot \text{hőmérséklet} - 0,8 \cdot \text{nyomás}$. A fuzzifikált bemenetek itt is aktiválják a szabályokat, a kimeneteket pedig a tagsági fokok alapján súlyozottan kombináljuk. Ennek következtében a Mamdani-rendszerrel ellentétben a TSK-ban nincs szükség a kimeneti fuzzy halmazok aggregációjára és kompozíciójára, valamint a defuzzifikációs lépésre sem, mivel a végeredmény közvetlenül éles (crisp) numerikus értéként adódik [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 $\mu_{akt} = \min(\mu_{Magas}(x_1), \mu_{Alacsony}(x_2))$	2B - Szabály aktiválás - szabály erőssége: $w_k = y_i^{(1)}(x_1) \times y_j^{(2)}(x_2)$
3A - Kimeneti szabály leképzése pl.: Nagy kockázat	3B - Szabály kimenetének számítása: $z_k = a_1^{(k)}(x_1) + a_2^{(k)}(x_2) + c^{(k)}$

4A - Aggregáció, itt több szabály eredményét egyesítjük $\mu_{outp(y)} = \max(\mu_1(y1), \mu_2(y2) \dots)$	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

11. 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

12. 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 struktúráját követve a MATLAB R2025a Fuzzy Logic Toolboxban elkészítettem a TSK-alapú változatot 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, ami lehetővé teszi a két megközelítés közvetlen összehasonlítását és a különbségek pontos feltárását.

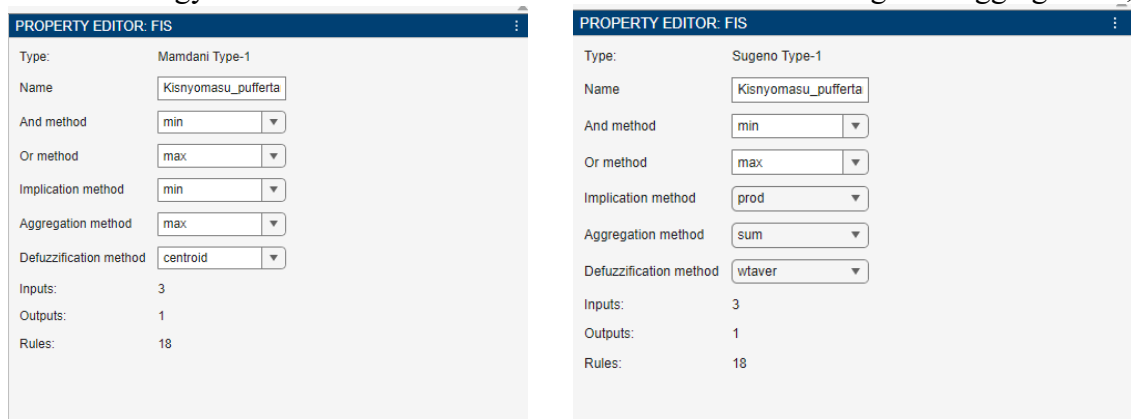
A modell mérete lehetővé tette a kezdeti súlyok manuális beállítását, mivel egy három bemenetű rendszer még átlátható és finomhangolható. A kutatás későbbi szakaszában a paraméterek optimalizálását gépi tanulási algoritmussal kívánom megvalósítani, amely a predikciós hibát minimalizáló elven tanítja be a súlyokat.

2.4.3 A TSK-fuzzy alkalmazása a HAZOP modellre

A modell bemenetei és logikai szerkezete megegyezik a Mamdani-fuzzy rendszerével. Mindkét megközelítés éles (crisp) bemeneti értékeket használ, amelyeket fuzzifikációval alakít fuzzy tagsági fokokká. A bemeneti változókhoz rendelt tagsági függvények (háromszög, trapéz, Gauss stb.) és az IF-rész nyelvi változói mindkét rendszerben azonos módon alkalmazhatók, így a fuzzy inferencia első lépései (a bemeneti adatok fuzzy reprezentációja és a szabályok aktiválása) lényegében megegyeznek.

A fő különbség a szabályok konzekvens részében jelentkezik: a Mamdani-rendszer fuzzy kimeneteket aggregáció és defuzzifikáció útján alakít vissza éles értéké, míg a TSK rendszerben a szabályok következményeit explicit, konstans vagy lineáris matematikai függvények írják le, amelyek közvetlenül tartalmazzák a bemeneti változókat..

A TSK esetén, az implikáció típusa itt azt jelenti, hogy hogyan képezzük a szabály súlyát. A 11. 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. Ahogyan fent már említettem a TSK esetén nincs szükség sem aggregációra,



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

sem defuzzifikációra, ez a MATLAB egyik sajátossága, hogy ezt így jelöli. Az aggregáció a TSK esetén valójában egy súlyozott összeg a szabálykimenetektől, látható a 41. ábrán a „sum” jelölés. A defizzifikáció pedig egy súlyozott átlag (wtaver → weighted average).

A Mamdani-fuzzy esetén a centroid defuzzifikáció:

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

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

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

A TSK-fuzzy esetén megjelenik 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, s ahhoz hogy ebből numerikus értéket kapjunk még további műveletek elvégzése (aggregáció, kompozíció és defizzufikáció) szükséges.

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</i> = $a_1 \cdot \text{Nyomás} + a_2 \cdot \text{Áramlás} + a_3 \cdot \text{Szelepállapot} + \text{Konstans}$

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

A súlyozottátlag-képzéséből adódóan a TSK fuzzy rendszer globális kimenete közvetlenül numerikus formában adódik, ezért nincs szükség aggregációs, kompozíciós és defuzzifikációs lépésekre.

Dolgozatom 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 hidrogéntechológiai 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. Emellett az ipari alkalmazásokban gyakran több - egymással „rivalizáló” - célkitűzésnek kell egyidejűleg megfelelni (pl.: magas találati arány, alacsony fals pozitív arány, nagy érzékenység és üzemi stabilitás), melyek kézi beállítással nem hozhatók optimum állapotba.

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 tükröződjének: a nyomás növekedését pozitív előjelű súly modellezi, az áramlás esetében pedig negatív súly fejezi ki a kockázatcsökkentő hatást. A szelepállapot 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, figyelembe véve az emberi tényezőt és a rejtett hibák lehetőségét is. A következő táblázat foglalja össze a beállított súlyparamétereket, azok előjelét, nagyságát és a mögöttük álló mérnöki indoklást.

Jellemző	Beállított súly	Hatás
Nyomás	+0,7	A pozitív előjel a nyomás súlyában, növeli a kockázatot, egységnyi nyomásnövekedés 0,7 egységnyi kockázatnövekedést 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.
Szelepállapot	$+0,8 \cdot (1 - GCS2)$	A súly pozitív előjelű, a szelepállapot kritikus fontosságú a rendszer nyomása szempontjából. Állapot: 0 = zárt, 1 = nyitott - 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)

15. 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 nem állt rendelkezésemre olyan referencia, amely alapján közvetlenül meghatározható lett volna az ideális súlyparaméterkészlet. Ezért a paraméterek értelmezéséhez és finomhangolásához kísérleti vizsgálatokat végeztem. A vizsgálatok két eltérő megközelítésben valósítottam meg:

- 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.

Az így szerzett tapasztalatok szolgáltak alapul a végleges súlyparaméter-készlet meghatározásához.

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 (maximum érték: 60; üzemi nyomás 40)
Nyomás súlyparaméter - a_1	+0,7
Áramlás [kg/h] - x_2	22,1 (maximum érték: 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

16. 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	$a_2 = - 0,2$

17. 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.

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

Mindezek fényében 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 fizikiai paraméterek mellett, így a modellezés és a Mamdani, illetve a TSK modell teljesítményparaméterei összehasonlíthatók, ám a komplex ipari létesítmények esetén a szabálybázis nem vagy nagyon nehezen lenne emberi kapacitásokkal 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 első esetben a bemeneti változók értékét fixen tartottam, és kizárólag egy adott súlyparamétert változtattam, hogy feltárjam annak hatását a kimeneti kockázati értékre. A második 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.

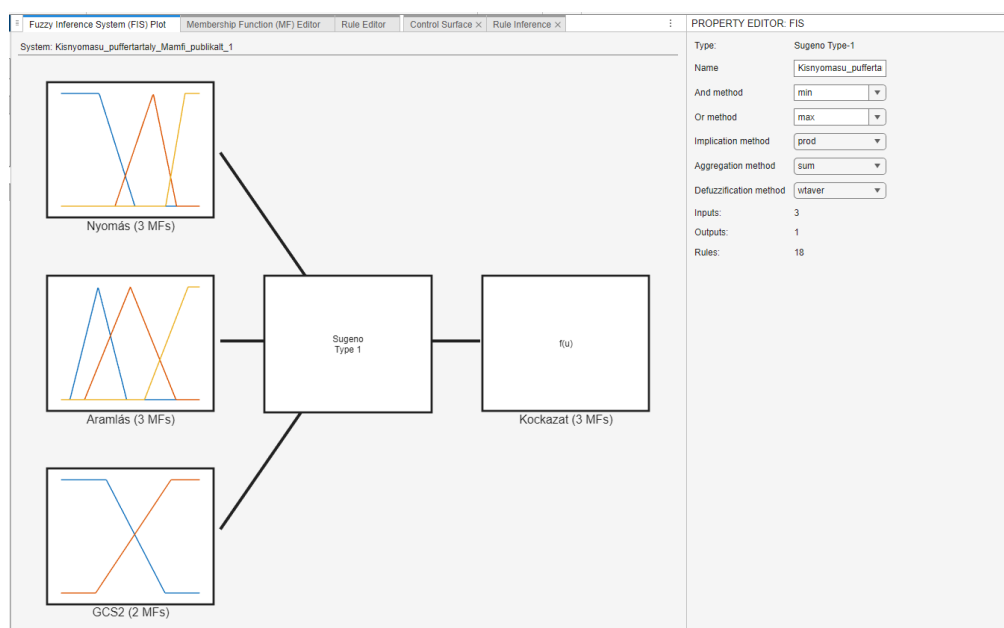
Tekintettel arra, hogy a számítási módszertant fent részletesen bemutattam, e helyen már kizárólag a vizsgálatok eredményeit közlöm táblázatos formában.

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

19. 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



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

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 elfoadható 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.

PROPERTY EDITOR: OUTPUT

Name

Kockazat

Range

[0 1]

Number of MFs:

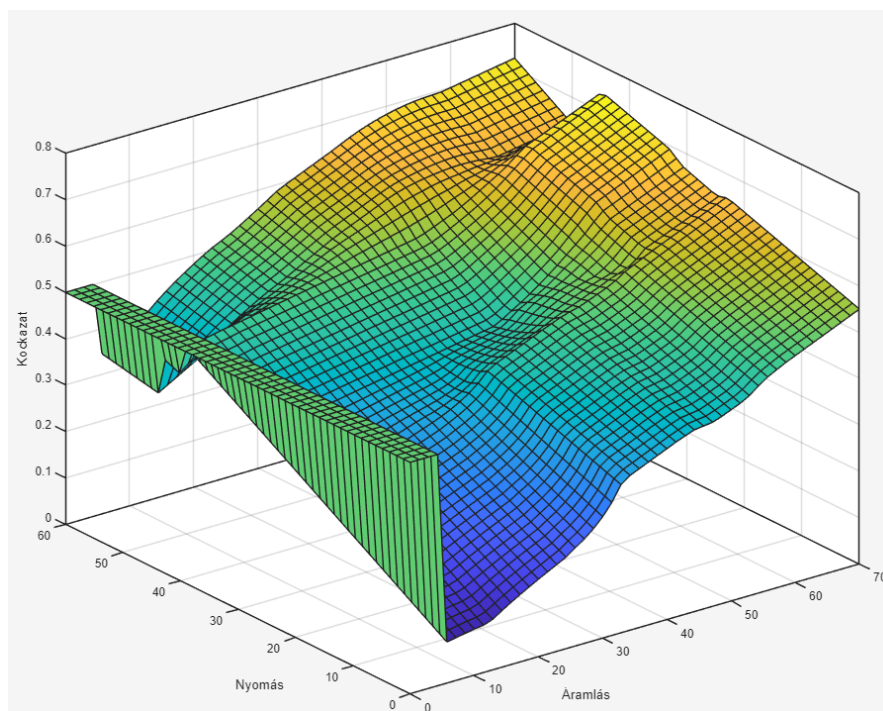
3

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]

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

Jól látható a fenti ábrán a kimenet lineáris típussal reprezentált, a paraméterkészlete pedig normalizált, numerikus érték, explicit függvény, Vagyis a kimenet közvetlenül számolható képletből adódik, nincs szükség nyelvi kategóriákra és defuzzifikációra.



45. ábra: Matlab, TSK-HAZOP, Surface megjelenítés (saját szerkesztés)

A Control Surface grafikus megjelenítése lehetővé teszi a fuzzy szabályrendszer kimenetének vizuális értelmezését a bemeneti változók függvényében. Az így ábrázolt felület jól szemlélteti a modell viselkedését, segíti a súlyparaméterek hatásának értelmezését, valamint alkalmas a szabálybázis konzisztenciájának és esetleges anomáliáinak feltárására is.

2.4.7 A TSK alapú HAZOP eredményeinek bemutatása

A kutatás során szerzett modellezési tapasztalataim, valamint a MATLAB eszközkészletének alapos megismerése és alkalmazása lehetővé tette 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

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

A fenti ábrán, a nyers adatokon kívül két fontos leíró statisztikai mutatót (áttal és szórás) már fel is tüntettem (ezeket folyamatosan figyeltem az alap adatfeldolgozás során is), az adott jellemző átlagát és az eredmények szórását.

- 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):

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

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

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

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

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

- 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.

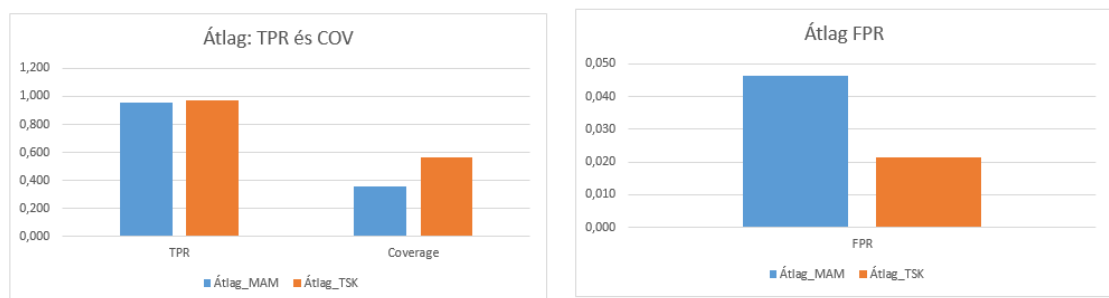
$$IQR = Q_3 - Q_1$$

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

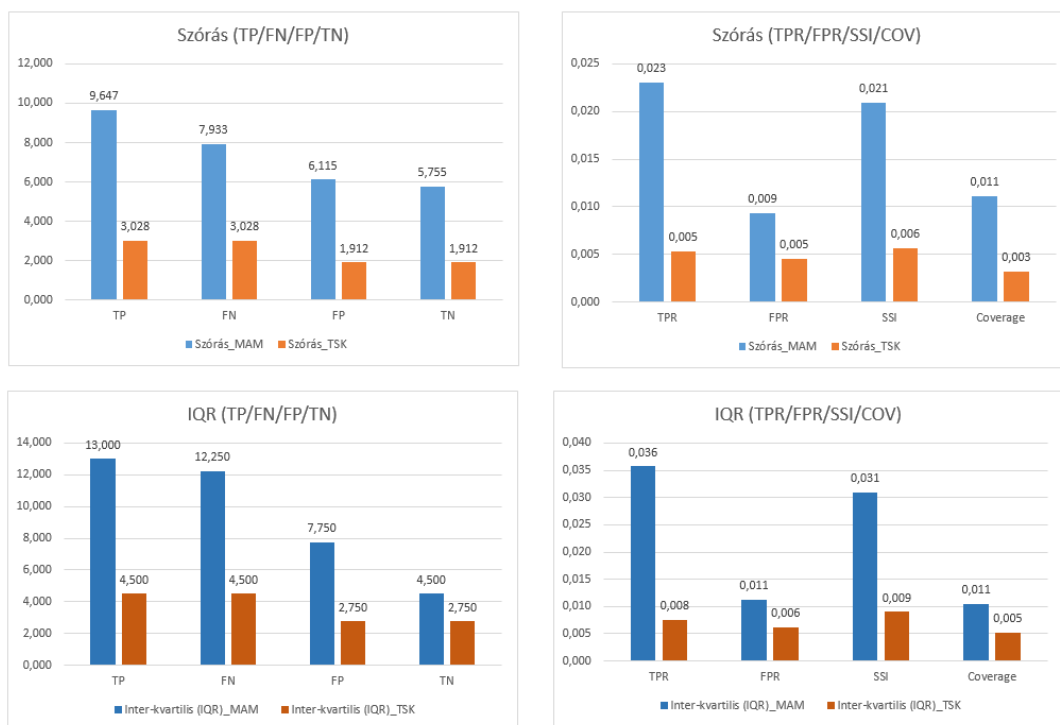
	TP	FN	FP	TN	TPR	FPR	SSI	Coverage
Átlag_MAM	328,800	16,400	30,500	624,300	0,952	0,047	0,884	0,359
Átlag_TSK	556,500	15,500	9,100	418,900	0,973	0,021	0,887	0,565
Szórás_MAM	9,647	7,933	6,115	5,755	0,023	0,009	0,021	0,011
Szórás_TSK	3,028	3,028	1,912	1,912	0,005	0,005	0,006	0,003
Medián_MAM	329,000	15,000	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 kvarilis_MAM	321,250	10,500	26,500	621,250	0,934	0,041	0,869	0,355
Harmadik kvarilis_MAM	334,250	22,750	34,250	625,750	0,970	0,052	0,900	0,365
Inter-kvarilis (IQR)_MAM	13,000	12,250	7,750	4,500	0,036	0,011	0,031	0,011
Első kvarilis_TSK	554,250	13,250	8,000	417,250	0,969	0,019	0,883	0,563
Harmadik kvarilis_TSK	558,750	17,750	10,750	420,000	0,977	0,025	0,892	0,569
Inter-kvarilis (IQR)_TSK	4,500	4,500	2,750	2,750	0,008	0,006	0,009	0,005

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

A deskriptív vagy leíróstatisztikai-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-kvarilis tartományok minden vizsgált mutató esetében lényegesen kisebbek voltak, mint a Mamdani-fuzzy esetében.

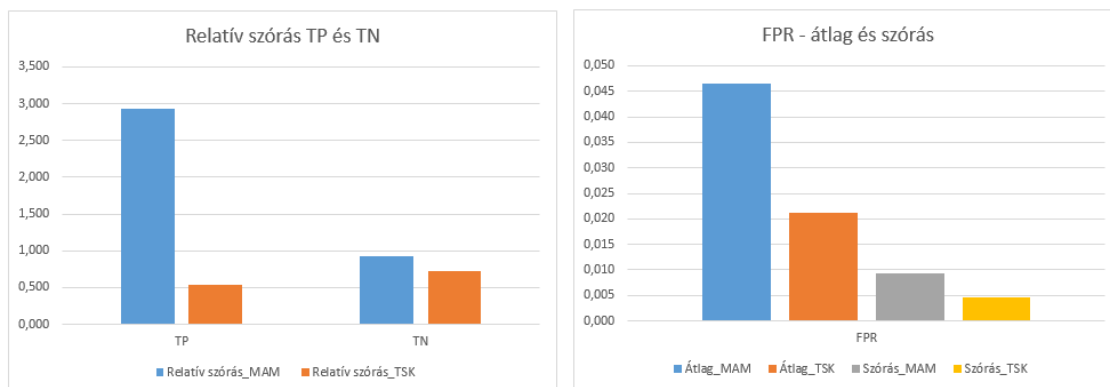


47. ábra: Kockázatdetektálási mutatók - Mamdani és TSK összehasonlítás (Saját szerkesztés)



48. 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 modellté, 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.



49. 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 fentiektől 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

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

- 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

21. 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~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 (indoklás és új hipotézis a relatív) de erre már . Az eredmények összességében megerősítik a hipotézist, hogy a TSK-modell több kritikus dimenzióban előnyösebb, míg más mutatókban nem mutat szignifikáns eltérést.

2.4.8 Kiegészítő vizsgálat - számítási és feldolgozási idő

A szintetikus adatok integrálása, a teljesítménymutatók optimalizálása és a szabályrendszerek finomhangolása során egy olyan tényezőre lettem figyelmes, amelyet a hipotézisben korábban nem fogalmaztam meg élesen, ugyanakkor az on-line rendszerek szempontjából kiemelt jelentőséggel bír és ez nem más mint a számítási idő. 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 során azonban már érzékelhető volt némi eltérés. Markáns különbségeket egy véletlennek (hibás kód és utasítás) köszönhetően tapasztaltam, ugyanis a jelenség akkor vált igazán szembetűnővé, amikor a 10, egyenként 1000 mintát tartalmazó DataSet-et tízszer, egymást követően futtattam le, vagyis összesen 100 000 bemenet feldolgozását végeztettem 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 elrugaszkodott 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 (nyomás, áramlás, szelepállapot). Ezt a 10 darabos adatcsomagot 10-szer futtattam egymást követően, így összesen 100 000 adat feldolgozását vártam el és végeztem el, majd ezt a teljes ciklust 10 alkalommal futtattam le.
- A normalizálást és az esetleges előfeldolgozást a két modell számára azonos módon hajtottam végre.
- 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 (1. TSK→ 2. Mamdani, illetve 1. Mamdani→2. TSK sorrendek váltakoztatásával), illetve blokkolt mintázatokat („A-B-B-A”) is alkalmaztam.
- A méréseket leginkább biztosító befolyásmentességet úgy biztosítottam, hogy, a vizsgálatok alatt minden háttérfolyamatot korlátoztam (pl.: lemez-I/O, grafikai megjelenítés, naplózás).

```

1 function measure_runtime()
2     % ----- Fájlnév -----
3     dataFile = 'synthetic_datasets_pressure_flow_valve.xlsx';
4     fisFileTSK = 'Kisnyomasu_puffertartaly_TSK_publikalt_1.fis';
5     fisFileMAM = 'Kisnyomasu_puffertartaly_Mamfi_publikalt.fis';
6     outFile = 'runtime.xlsx';
7
8     % ----- Modellek betöltése -----
9     fisTSK = readfis(fisFileTSK);
10    fisMAM = readfis(fisFileMAM);
11
12    % ----- Adatok betöltése (rugalmas, többféle elrendezést kezel) -----
13    X = readAllDatasetsAsMatrix(dataFile);
14    % Ellenőrzés
15    if size(X,2) < 3
16        error('A bemenetben legalább 3 oszlopnak (nyomás, áramlás, szelep) kell lennie.');
```

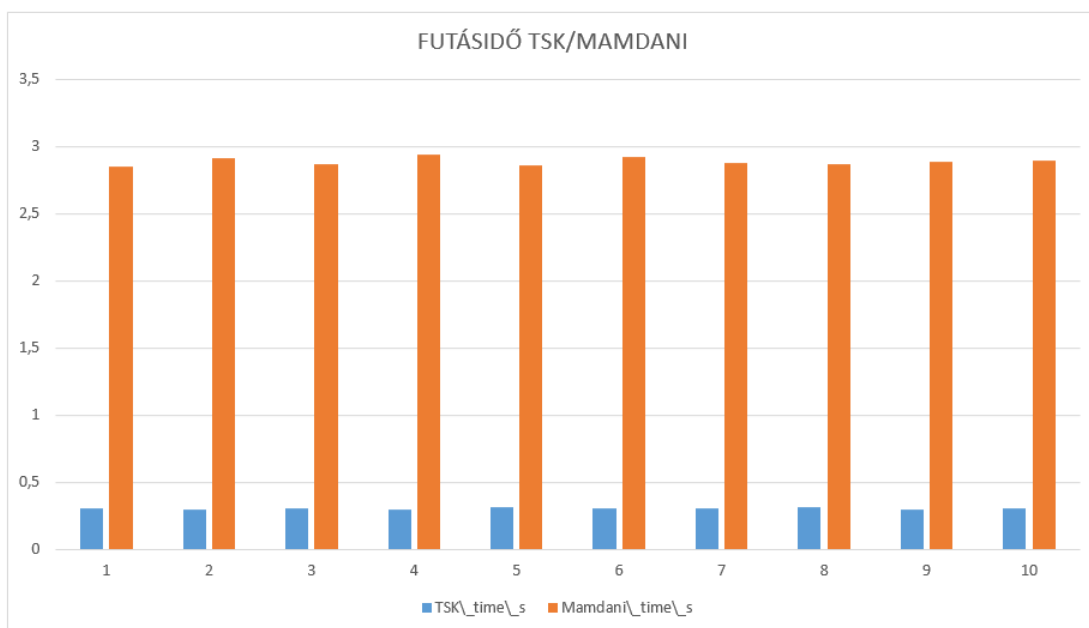
50. ábra: Az időmérés megvalósítása MATLAB-ban (saját szerkesztés)

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.

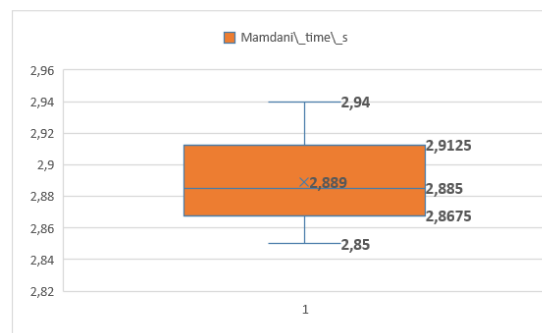
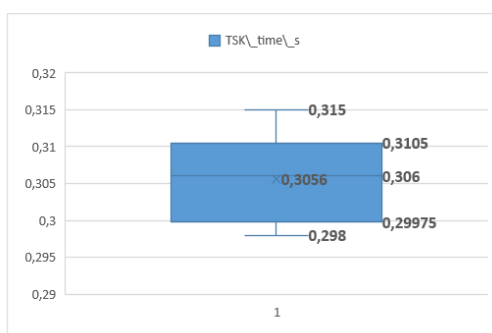
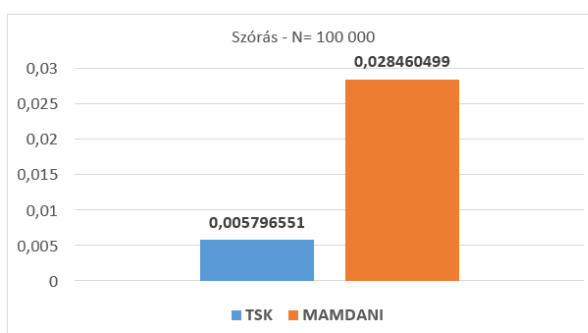
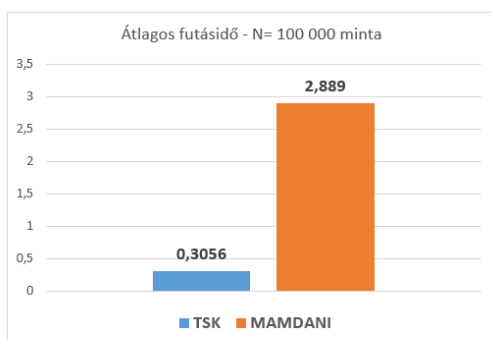
Run	TSK_time_s	Mamdani_time_s
1	0,31	2,85
2	0,298	2,91
3	0,305	2,87
4	0,299	2,94
5	0,315	2,86
6	0,302	2,92
7	0,307	2,88
8	0,312	2,87
9	0,3	2,89
10	0,308	2,9

	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

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



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



51. 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 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 relatív vizsgálatból – 22. táblázat, 82 oldal - látszik, hogy a pontos érték: 9,45) a TSK javára. 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 magyarázható véletlen ingadozással. A különbség oka a két rendszer számítási struktúrájából fakad (lásd 2.4.1 fejezet). A Mamdani-modell minden szabály aktiválását követően aggregációs és defuzzifikációs műveleteket hajt végre, amelyek számításigényesek, különösen nagy mintaszám esetén. Ezzel szemben a TSK-modellben a kimeneti értékek explicit matematikai függvényekből származnak, így a kimenet a szabályok aktivációs fokainak súlyozott átlagolásával közvetlenül számítható. Ez a szerkezeti eltérés a futásidőben tapasztalt nagyságrendi különbség elsődleges magyarázata.

Összességében megállapítható, hogy a TSK-modell nemcsak pontossági mutatókban (TPR, FPR, Coverage) mutatott kedvezőbb eredményeket, hanem a számítási hatékonyság tekintetében is egyértelmű előnyt biztosított. Mindez megerősíti, hogy a TSK fuzzy logika lényegesen alkalmasabb a nagy mintaszámú, valós idejű kockázatelemzési feladatokhoz, különösen biztonságkritikus ipari rendszerek (pl.: hidrogéntechnológiai folyamatok) online monitorozásában.

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 hidrogéntechnológiai környezetben, mivel konzisztens és robusztus szabályrendszerek kialakítását teszi lehetővé [53][81][82]..

3.1 A proaktív védelem és az ACS-FORCE keretrendszer

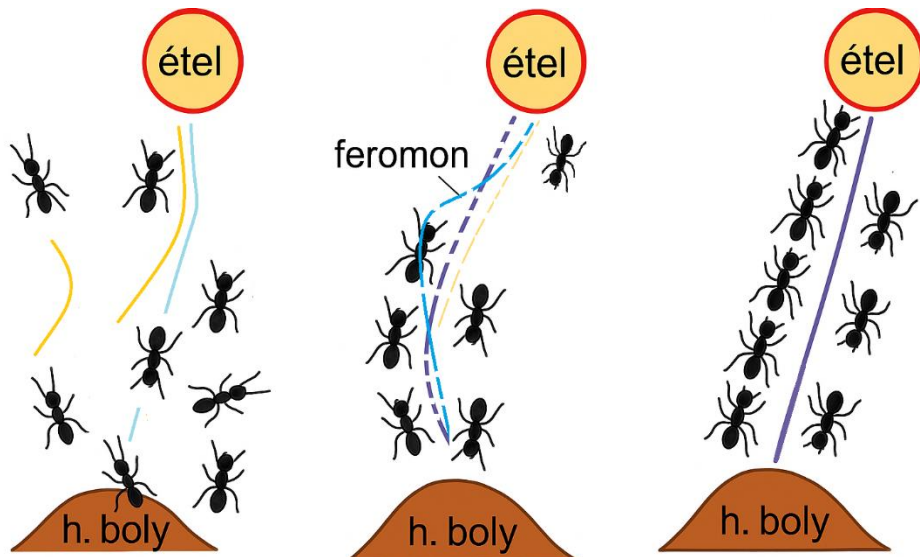
A feldolgozott szakirodalom alapján megállapítom, hogy a Mamdani-alapú HAZOP és ACS (Ant Colony System) kombinációja már kidolgozott és validált eljárás [53], azonban a módszert eddig off-line környezetre tesztelték és készítették el. Az általam fejlesztett rendszer szintén az ACS-metaheurisztikára épülő 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. Célom a proaktív védelem megvalósítása hidrogéntechnológiai környezetben. Az optimalizáció és a gyors kockázatdetektálás révén, azonnali operatív döntéseket kívánok támogatni, melyek révén elkerülhető a személyi sérülés vagy a jelentős anyagi-, környezeti kár.

3.2 Az ACS alapjai, biológiától az utazó ügynökök problémájáig.

A hangyák különleges képessége, hogy úgy képesek megtalálni a hangyaboly (kolónia) és az élelemforrás közötti legrövidebb útvonalat, hogy nincs vagy nagyon csekély vizuális tájékozódási képességgel rendelkeznek [77][78][81][122]. A hangyák a táplálékkeresés (foraging) során feromont¹ raknak le a talajra, s gyakran az jellemző a viselkedésükre, hogy az előző hangyák által lerakott feromont követik. Jellemzően, a döntési pontokon nem tudják előre, melyik út a rövidebb, az első hangyák véletlenszerűen döntenek, hogy jobbra vagy balra forduljanak.

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].



52. ábra: Hangyák viselkedése a táplálékszerzés során (saját szerkesztés)

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 jelentős része „tudatában” megjelenik a legoptimálisabb döntés, vagyis a legrövidebb út nyomvonala. Matematikai és műszaki értelemben a feromon egy elosztott, külső memória. Érdekesség, hogy minden hangya lokális szabályok szerint mozog, de az összesített hatás egy kollektív tudást eredményez.

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 (rövidebb) utak felé tereli őket.
- **Önszerveződés:** A hangyák nem rendelkeznek központi irányítással. A kollektív útvonalhálózat 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 feromon nyom pedig információt tárol és oszt meg a közösségen belül, ahol mindenki tudja, hogy az adott információ mit jelent, mit kell tenni a közösség érdekében.

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 pszeudo-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

Az Ant Colony System (ACS) egy sztochasztikus keresési algoritmus, amelyet elsősorban kombinatorikus optimalizálási problémák megoldására alkalmaznak. Kutatói pályafutásom szempontjából jelentős előnyt jelentett, hogy a villamosenergia-hálózatokkal kapcsolatos tanulmányaim és későbbi 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. Szakirodalomkutatásra 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:

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

24. 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 anomáiafigyelő ággal:

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

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

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-típusú fuzzy HAZOP modell konzekvens részében található súlyparaméterek ($a_1, a_2, a_3 \dots a_n$) meghatározó szerepet töltenek be a kockázati kimenetek 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 térek 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

Az ACS alkalmazásának kettő fontos célja van a jelen kutatásban. Egyrészt a súlyvektorok optimalizálása révén biztosítja - az egyébként is impozáns eredményeket felmutató (lásd 2.4.7 fejezet) - 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 elsődleges feladata ezen súlyok olyan optimalizálása, amely a fuzzy rendszer teljesítményét maximalizálja, illetve az adott kockázati kimenetet a lehető legpontosabban közelíti.

- **Szabálykombinációk szűkítése**

A fuzzy szabálybázis redundanciájának kialakulása természetes következménye annak, hogy a modell különböző bemeneti változókból és ezek kombinációiból épül fel. Minél több bemenet és lehetséges értékkombináció szerepel a rendszerben, annál nagyobb a valószínűsége annak, hogy egymáshoz hasonló vagy azonos információt hordozó szabályok is létrejönnek. Ez a jelenség különösen hangsúlyosan jelenik meg komplex ipari környezetekben, például hidrogénüzemekben vagy olajfinomítókban, ahol több ezer mérőpont szolgáltat folyamatos adatokat. Ilyen esetekben a szabályok száma könnyen több nagyságrenddel is meghaladhatja a ténylegesen szükséges mennyiséget, ami a redundancia mellett a modell átláthatóságát és számítási hatékonyságát is rontja. A tapasztalat azt mutatja, hogy a szabálybázis mérete megfelelő optimalizálási technikákkal jelentősen csökkenthető anélkül, hogy ez a modell pontosságának érdemi romlásával járna. A manuális redukció ugyan elméletileg lehetséges, de gyakorlatilag nem hatékony megközelítés, mivel a szabályok közötti átfedések és összefüggések száma egy komplex rendszerben emberi szinten már nem kezelhető. Ezért indokolt olyan automatizált, intelligens keresési algoritmusok, mint az ACS alkalmazása, amelyek képesek a szabálybázis szisztematikus szűrésére és egyszerűsítésére.

Tapasztalataim alapján ilyen redundancia vagy „szabálydúsulás” jelentkezik pl.: a hidrogénkompresszorok üzemeltetése során is, ahol a bemeneti nyomás, a fokozatok közötti nyomáskülönbség, a gázáramlás és a hőmérsékleti viszonyok alapján akár több ezer szabály is keletkezhet. Ezek közül azonban számos szabály már nem ad új információt a rendszer állapotáról, hanem redundánsan ismétli más szabályok következtetéseit. Egy ilyen összetett környezetben a manuális szabályredukció gyakorlatilag nem oldható meg, hiszen a paraméterek közötti nemlineáris összefüggések emberi szinten már áttekinthetetlenek. Az ACS algoritmus alkalmazásával viszont lehetőség nyílik a redundáns és kevésbé informatív szabályok szisztematikus kiszűrésére, miközben a kritikus folyamatdinamikai jellegzetességeket a modell változatlanul megőrzi!

A teljes súlytér az általam definiált kisnyomású HAZOP modellben az alábbiak szerint definiálható:

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

Ω – a megoldási tér

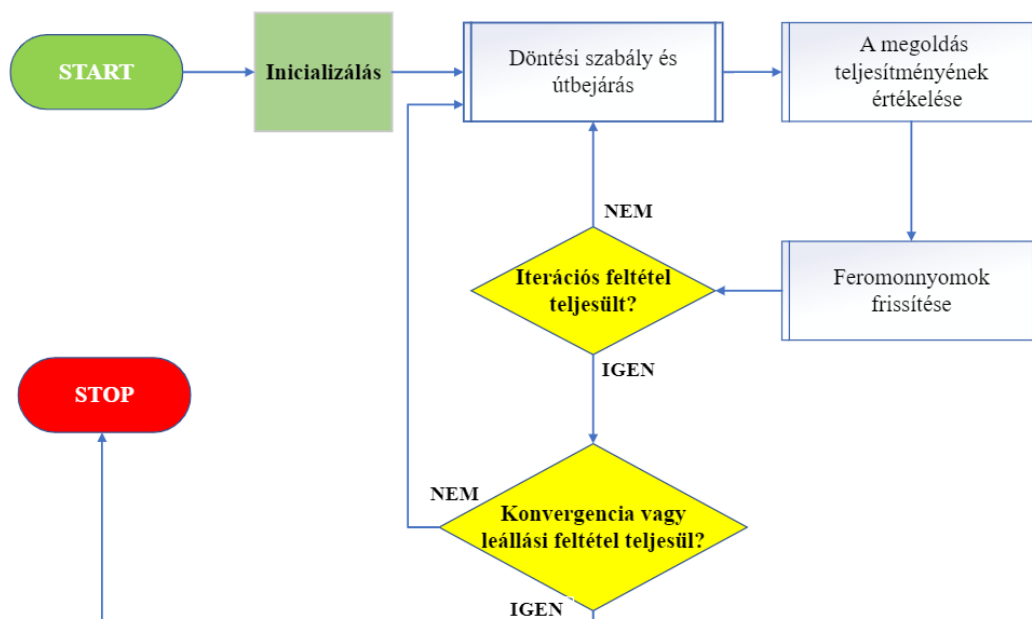
$\mathbb{R}$ – a valós számok halmaza, tehát az optimalizálás folytonos

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 (például a kockázati kimenet megbízhatóbb leírása szempontjából). Bár a szabályok száma önmagában alacsony, a paraméterek sokasága miatt a probléma mégis komplex és nagy dimenziós optimalizálási feladatként jelentkezik. Ez azt jelenti, hogy egy hangya 90 paraméterből álló vektort épít, és ezt próbálja optimalizálni. A hangyák ebben a 90-dimenziós súlytérben mozognak, minden iterációban egy új súlykészletet generálnak.



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

Összességében tehát az ACS egyszerre biztosítja a fuzzy modell paramétereinek optimalizálását és a szabálybázis komplexitásának kezelhető szinten tartását. Ez a kettős cél teszi lehetővé, hogy a rendszer pontos, ugyanakkor számítási szempontból mégis hatékony lehessen.

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 szinten történik, 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
- valamint 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.

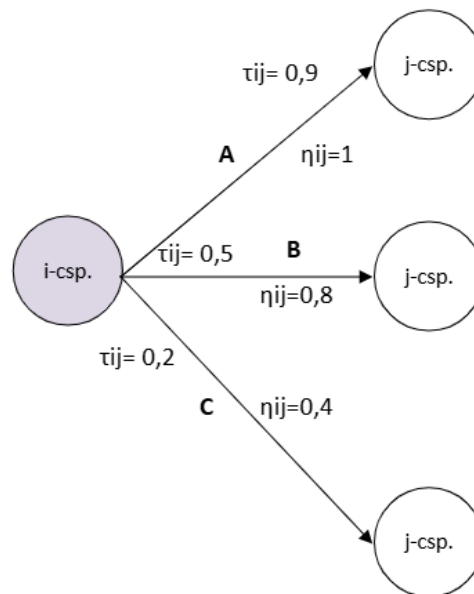
A heurisztikus érték η_{ij} azt fejezi ki, hogy az $i \rightarrow j$ él választása mennyire ígéretes lokális, (azaz azonnali) szempontból. Tehát, a heurisztika egy olyan minőségi mutató, amely a döntési folyamat során az adott él közvetlen hasznosságát, jóságát méri, függetlenül a globális feromoninformációtól.

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

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

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

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



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

25. táblázat: Egy hangya mozgása i-ből, j-be

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

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 $\rho \in (0,1)$

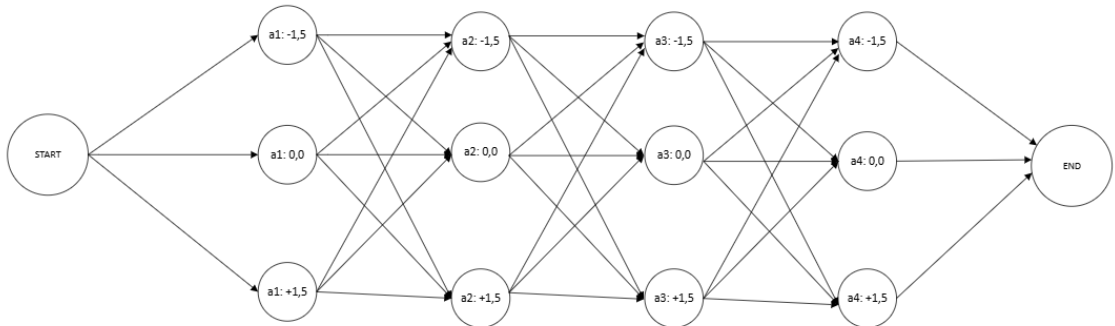
Q – konstans

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

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

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



54. 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

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

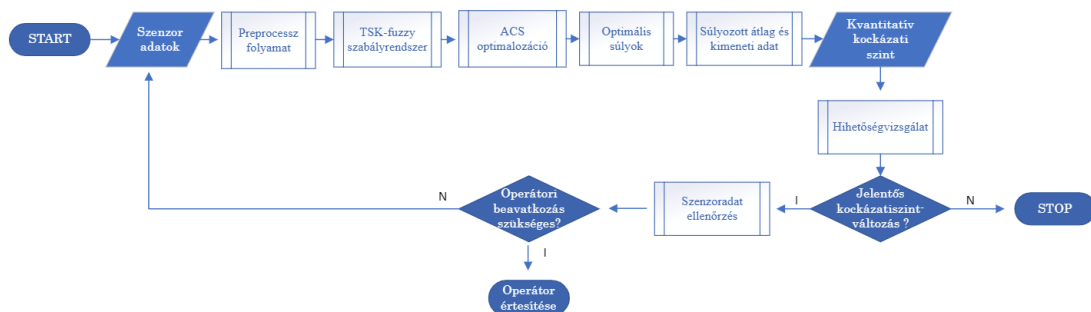
$\vec{w}^*$ – az optimális súlyvektor, amely a célfüggvényt maximalizálja

$\arg \max f(\vec{w})$ – 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



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

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

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 scenáriókat 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 hagyyna.
- 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 kulcsfontosságú szerepet játszik. Az üzemeltetési stratégiák meghatározzák, hogy a rendszer tervezése és működtetése során mely szempontok élveznek prioritást: a biztonság, a költséghatékonyság, a robusztusság vagy éppen a szenzitivitás. E stratégiák tudományos formalizálása - például a súlyozási elvek segítségével - lehetővé teszi, hogy az egyes döntési filozófiák explicit módon, mérhető paraméterekhez kötődve jelenjenek meg.

Különösen a biztonságkritikus üzemek esetében (pl.: hidrogéntechnológiai létesítmények, vegyipari üzemek, energetikai infrastruktúrák) az üzemeltetési stratégia megválasztása nem pusztán gazdasági, hanem társadalmi és katasztrófavédelmi következményekkel is járhat. Egy biztonságmaximalizáló stratégia például előnyben részesíti a kockázatok legteljesebb detektálását, még a téves riasztások növekedésének árán is, míg egy költségminimalizáló stratégia a téves riasztások csökkentésére fókuszál, a termelési folyamatok zavartalanságát helyezve előtérbe.

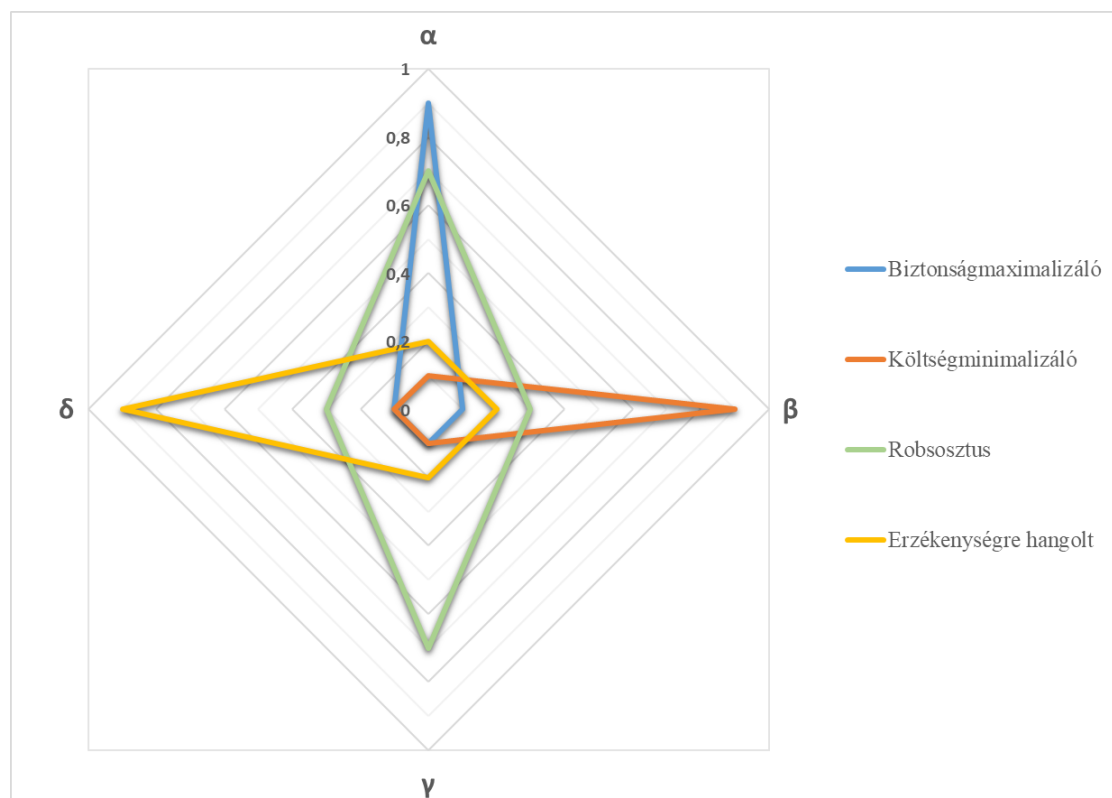
Az utóbbi években az üzemeltetési stratégiák kérdésköre, hazánkban is új megvilágításba került egyrészt az Európai Unió direktívák (SEVESO III, NIS2,) másrészt a nemzetközi szabványok (IEC61511, IEC61508, ISO31000) honosítása kapcsán, melyek összességében is megkövetelik a proaktív biztonsági megközelítést. Mindez a klasszikus katasztrófavédelmi elvárásokkal is összhangban van, hiszen egy katasztrófahelyzet megelőzése vagy a következmények enyhítése csak akkor lehetséges, ha a működtetési stratégia képes egyensúlyt teremteni a biztonság, a költség, a robusztusság és az érzékenység követelményei között [22][63][103] [126] [127].

Ebből adódóan a súlyozási stratégiák nem pusztán matematikai kísérletek, hanem a modern ipari rendszerek üzemeltetésében egyre inkább gyakorlati jelentőséggel bíró eszközök, amelyek hozzájárulnak szabványi, direktíva szintű és a katasztrófavédelmi szabályozásokban megfogalmazott biztonsági célok teljesítéséhez.

Üzemeltetési stratégiák: példa

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
Érzékenységsorientált	$\delta \gg \alpha, \beta, \gamma$	nagyon kis eltérésekre is élesen reagál

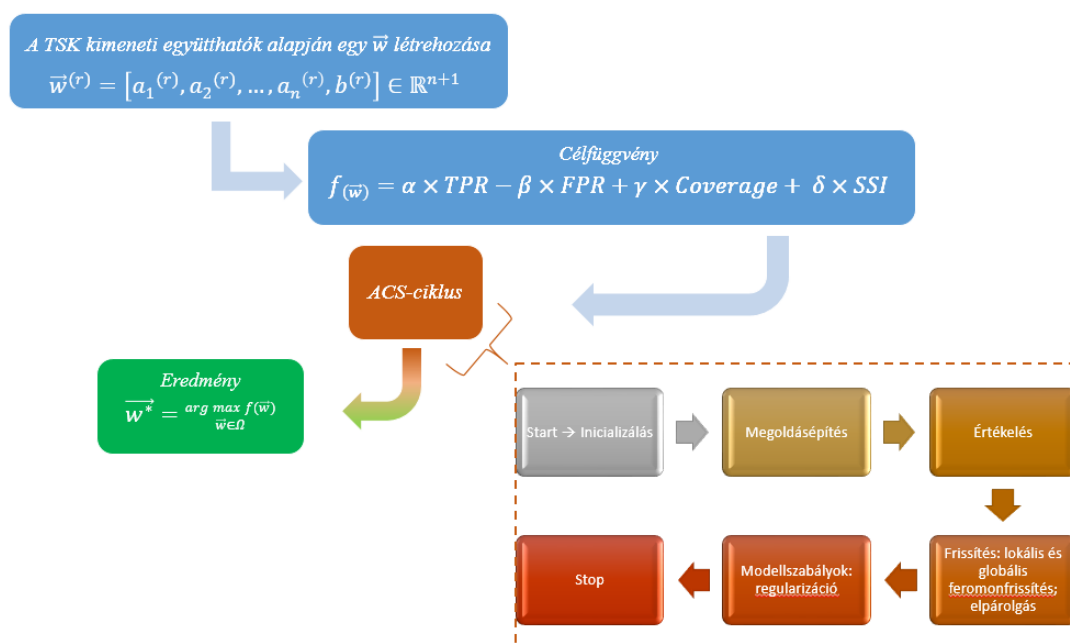
26. táblázat: Üzemeltetési stratégiák és súlyparaméterek (saját szerkesztés)



56. ábra: Optimalizálási súlyparaméterek és kapcsolódó üzemeltetési stratégiák (saját szerkesztés)

3.5 A TSK és ACS MATLAB 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, szelepp állapot 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 hidrogéntekológiai környezetekben, illetve minden olyan biztonságkritikus rendszerben, ahol a kockázatbecslés gyorsasága és pontossága alapvető követelmény.

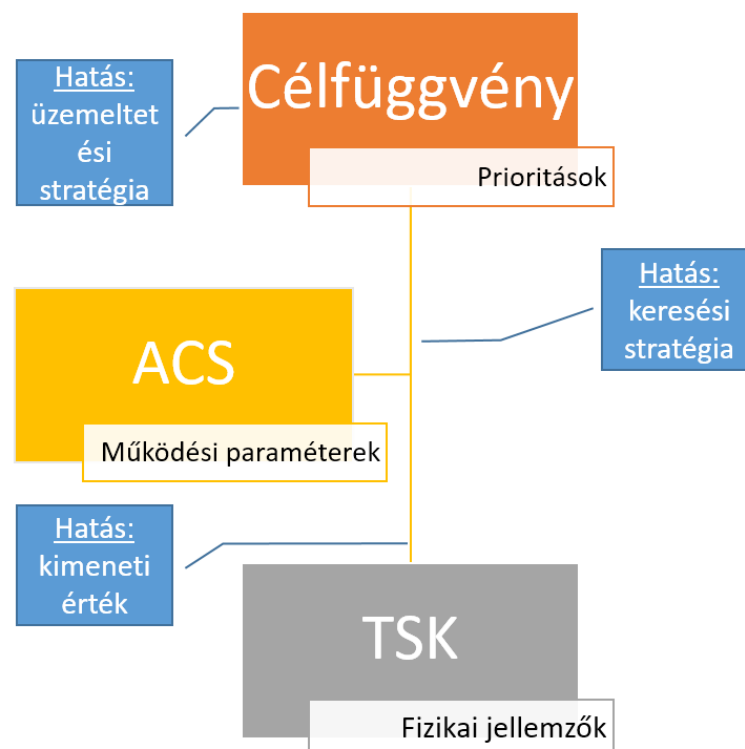


57. ábra: TSK és ACS integráció (saját szerkesztés)

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

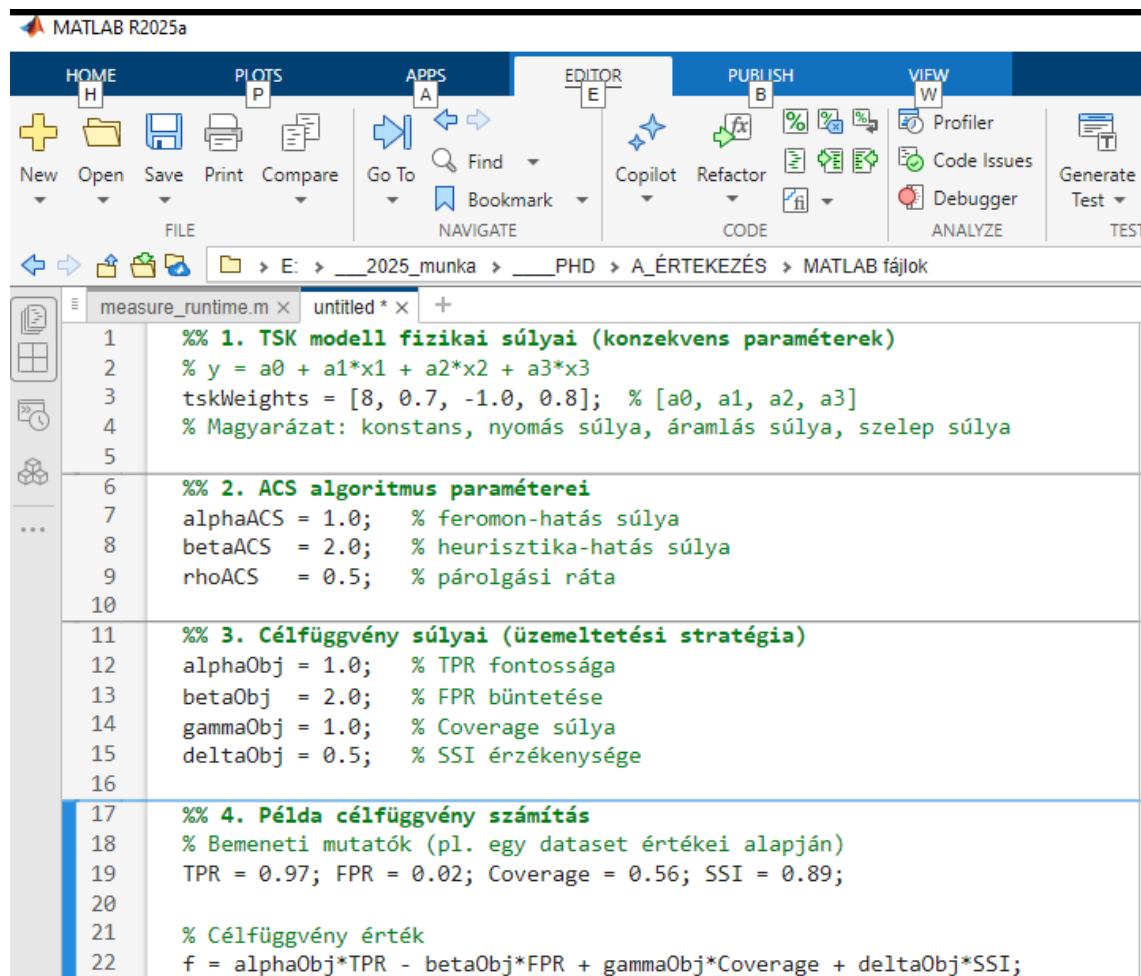
Tekintettel, hogy a „súly/súlyozás/súlyparaméter” fogalom a dolgozatban több szinten is előfordul, valamint a MATLAB-programozás során is figyelmesen kell a változókat kezelni, a dolgozat ezen pontján szükségszerűnek tartom ezt a fogalomkört és az eltérő szintek súlyozását egyértelműen definiálni és az eddigi információkat röviden összefoglalni.

- A TSK-modellben megjelentek a fizikai paraméterek súlyai, az úgynevezett konzekvens együttthatók, 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).



58. ábra: A súlyozás szintjei, befolyása és hatása (saját szerkesztés)

A MATLAB programozás szintaktikai korlátai miatt az integráció során a görög betűk helyett angol változatokat definiáltam, melyre az alábbi ábrán mutatok egy példát.



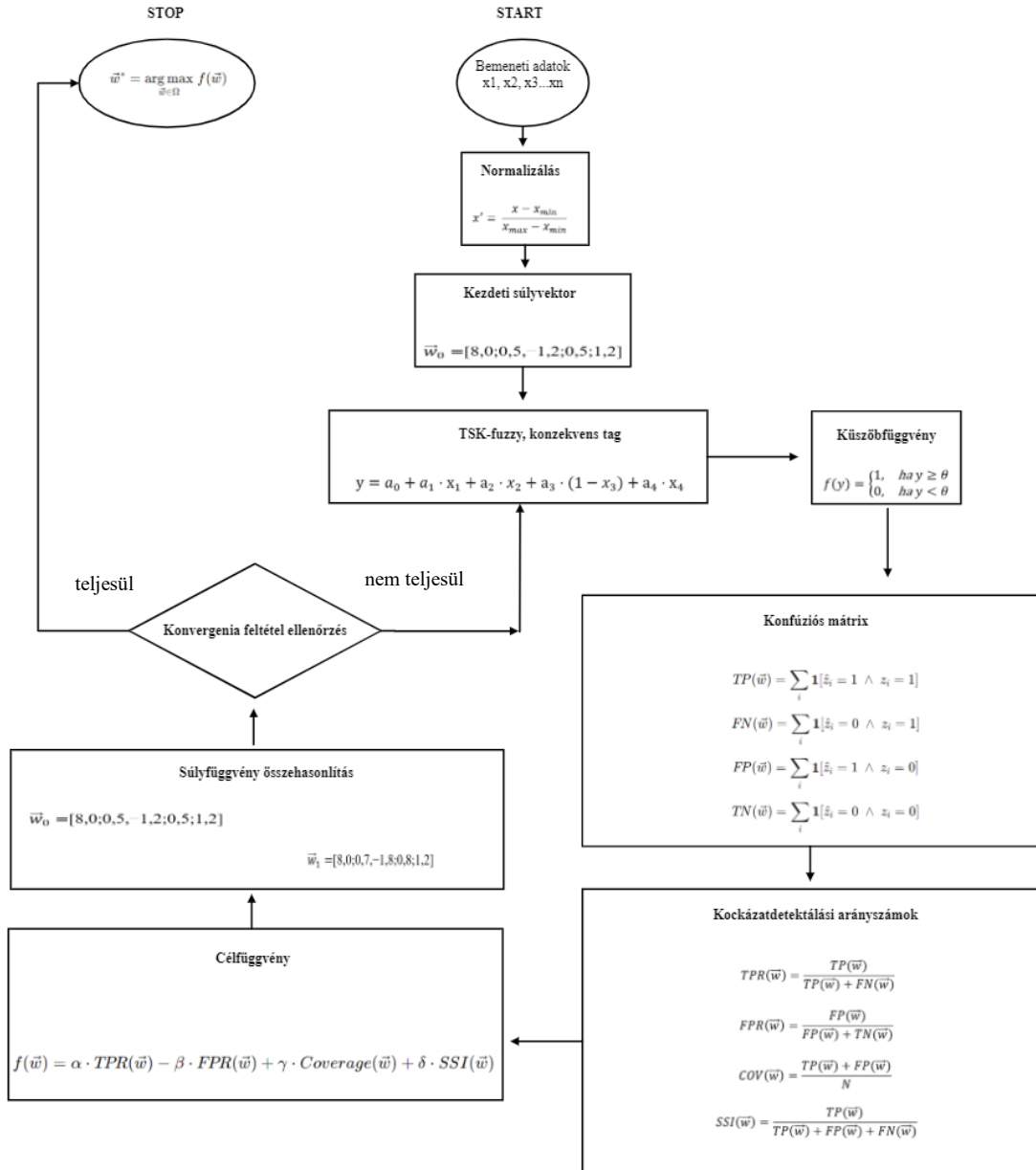
59. ábra: Súlyparaméterek kezelése MATLAB-ban (saját szerkesztés)

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 plda, bemeneti értékek (saját szerkesztés)



60. ábra: Az algoritmus matematika folyamatábrája (saját szerkesztés)

2. Normalizálás:

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

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

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

3. Kezdeti súlyvektor:

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

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):

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

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

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 előállítása (N=998 minta):

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

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

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

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

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 ($\alpha = \beta = \gamma = \delta = 1$), (itt még nincs alkalmazva az üzemeltetési stratégia kiválasztása):

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

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.

$$\begin{aligned} 2. \quad \vec{w}_1 &= [7,5;0,6,-1,0;0,9;1,0] \\ y &= 7,5 + 0,6 \times 0,895 - 1,0 \times 0,316 + 0,9 \times (1 - 0) + 1,0 \times 1 = \\ &= 7,5 + 0,537 - 0,316 + 0,9 + 1,0 \\ &\approx \mathbf{9,62} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} 3. \quad \vec{w}_2 &= [8,2;0,8,-0,2;0,7;1,4] \\ y &= 8,2 + 0,8 \times 0,895 - 0,2 \times 0,316 + 0,7 \times (1 - 0) + 1,4 \times 1 = \\ &= 8,2 + 0,716 - 0,0632 + 0,7 + 1,4 \\ &\approx \mathbf{10,95} \end{aligned}$$

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

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:

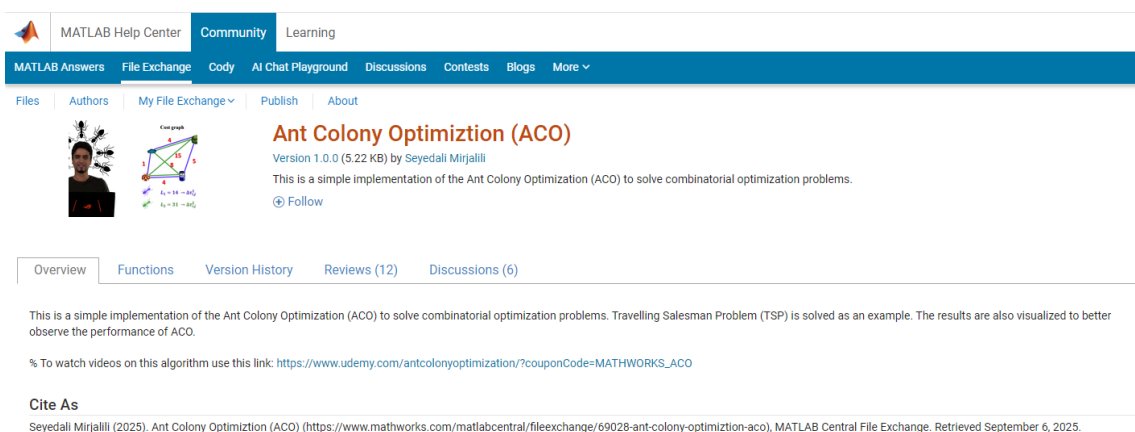
Jól látható, hogy a kezdeti súlyparaméternél (w_0) van jobb megoldás. Ha csak a TSK-logikára bízunk a számítást, akkor a 2. eset lenne az ideális, ahol az y értéke 9,62. Ha célfüggvény szerint számítjuk, ekkor viszont a 3. eset a legideálisabb.

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.



MATLAB Help Center Community Learning

MATLAB Answers File Exchange Cody AI Chat Playground Discussions Contests Blogs More

Files Authors My File Exchange Publish About

Ant Colony Optimization (ACO)
Version 1.0.0 (5.22 KB) by Seyedali Mirjalili
This is a simple implementation of the Ant Colony Optimization (ACO) to solve combinatorial optimization problems.
Follow

Overview Functions Version History Reviews (12) Discussions (6)

This is a simple implementation of the Ant Colony Optimization (ACO) to solve combinatorial optimization problems. Travelling Salesman Problem (TSP) is solved as an example. The results are also visualized to better observe the performance of ACO.

% To watch videos on this algorithm use this link: https://www.udemy.com/antcolonyoptimization/?couponCode=MATHWORKS_ACO

Cite As
Seyedali Mirjalili (2025). Ant Colony Optimization (ACO) (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/69028-ant-colony-optimization-aco>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved September 6, 2025.

61. ábra: MATLAB File Exchange - ACO [129][130]

```

169
170 %% 9. ACS OPTIMALIZÁCIÓ ALGORITMUS
171 fprintf('\n== ACS OPTIMALIZÁCIÓ INDÍTÁSA ==\n');
172
173 % ACS paraméterek
174 aco_params = struct();
175 aco_params.n_ants = 20; % Hangyák száma
176 aco_params.max_iter = 50; % Maximális iterációk
177 aco_params.alpha = 1.0; % Feromon súly
178 aco_params.beta = 2.0; % Heurisztikus súly
179 aco_params.rho = 0.1; % Párolgási ráta
180 aco_params.q0 = 0.9; % Exploit vs explore
181 aco_params.bounds = [-2, 2]; % Paraméter korlátok
182
183 % ACS optimalizáció futtatása
184 [best_params, best_fitness, fitness_history] = acs_optimize(...
185     @(params) objective_function(params, X_norm, Y_target, membership_centers, membership_widths), ...
186     total_params, aco_params);
187
188 fprintf('\nOptimalizáció befejezve!\n');
189 fprintf('Legjobb fitness érték: %.4f\n', -best_fitness);
190
191 %% 10. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE
192 fprintf('\n== VÉGSŐ EREDMÉNYEK ==\n');
193
194 % Legjobb modell tesztelése
195 best_tsk_params = reshape(best_params, R, n_params_per_rule);
196 [y_final, anomaly_final] = evaluate_tsk_fuzzy(X_norm, best_tsk_params, membership_centers, membership_widths);
197 [y_binary_final, conf_final] = apply_threshold_and_confusion(y_final, Y_target, 0.5);
198
199 % Végző metrikák
200 TPR_final = conf_final.TP / (conf_final.TP + conf_final.FN + 1e-6);
201 FPR_final = conf_final.FP / (conf_final.FP + conf_final.TN + 1e-6);
202 Coverage_final = (conf_final.TP + conf_final.TN) / length(Y_target);
203 SSI_final = TPR_final - FPR_final;
204
205 fprintf('\n--- VÉGSŐ TELJESÍTMÉNY METRIKÁK ---\n');
206 fprintf('TPR (Sensitivity): %.3f\n', TPR_final);
207 fprintf('FPR (Fall-out): %.3f\n', FPR_final);
208 fprintf('Coverage (Accuracy): %.3f\n', Coverage_final);
209 fprintf('SSI (Skill Index): %.3f\n', SSI_final);
210 fprintf('\nKonfúziós mátrix:\n');

```

62. ábra: Az optimalizálás feltételeinek és paramétereinek beállítása - MATLAB R2025a (saját szerkesztés)

3.6.1 Az értékelési metodika: inkrementális felépítésű, komparatív elemzés

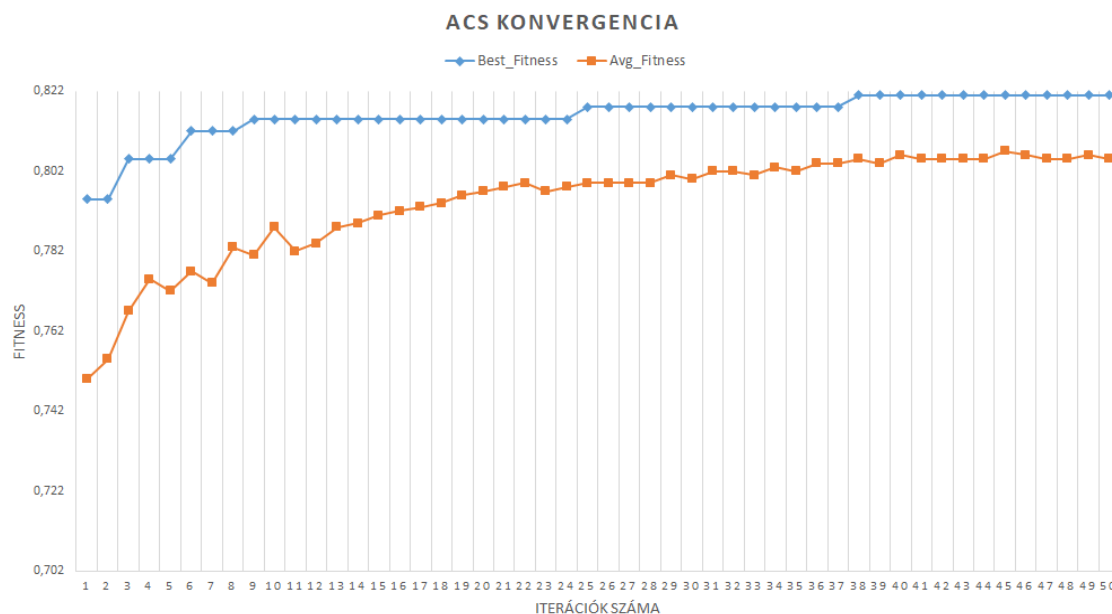
A Mamdani- és TSK-modellek összehasonlítását a 2.4.7 fejezetben részletes, több szinten is elvégeztem. Az elemzés kiterjedt a leíró statisztikákra, a relatív összehasonlításra és a páros t-próbák alkalmazására is. Ezzel megalapoztam azt a tudományos keretet, amely alapján a két modell teljesítménye átláthatóan 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 (javulás és/vagy romlás) 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 - meglátásom szerint - 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 igényvel 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 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, off-line 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

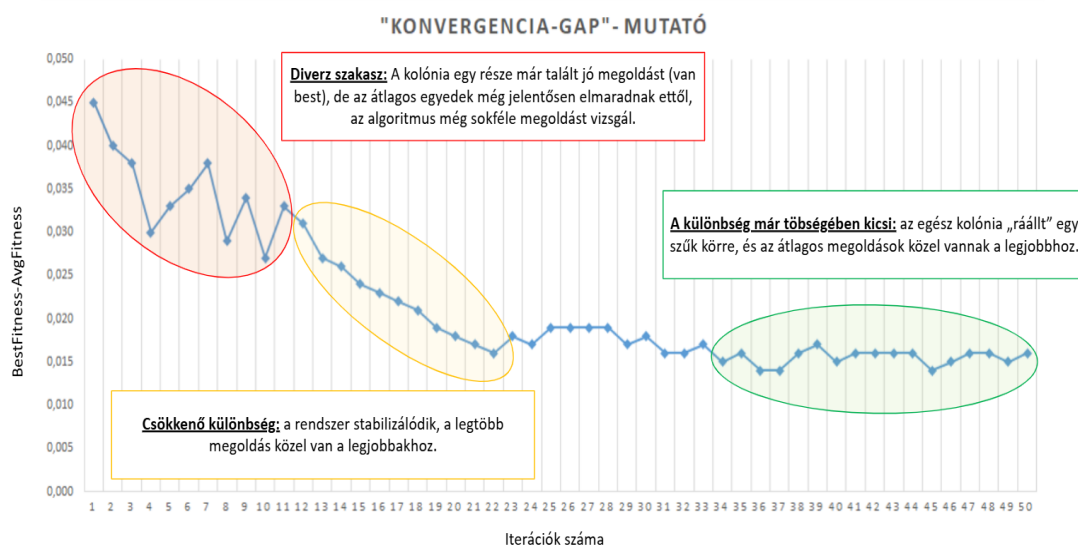


63. ábra: ACS - konvergencia, forrás: MATLAB, MS-Excel (saját szerkesztés)

A fenti ábra az ACS algoritmus konvergenciáját szemlélteti a TSK-fuzzy modell súlyparamétereinek optimalizálása során, az algoritmus teljesítménye az iterációk függvényében követhető nyomon. 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 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 a Avg Fitness értéket az adott iterációban) és jelleggörbét, aminek a konvergencia-gap nevet adtam, ez látható a 64. ábrán. 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.



64. 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.

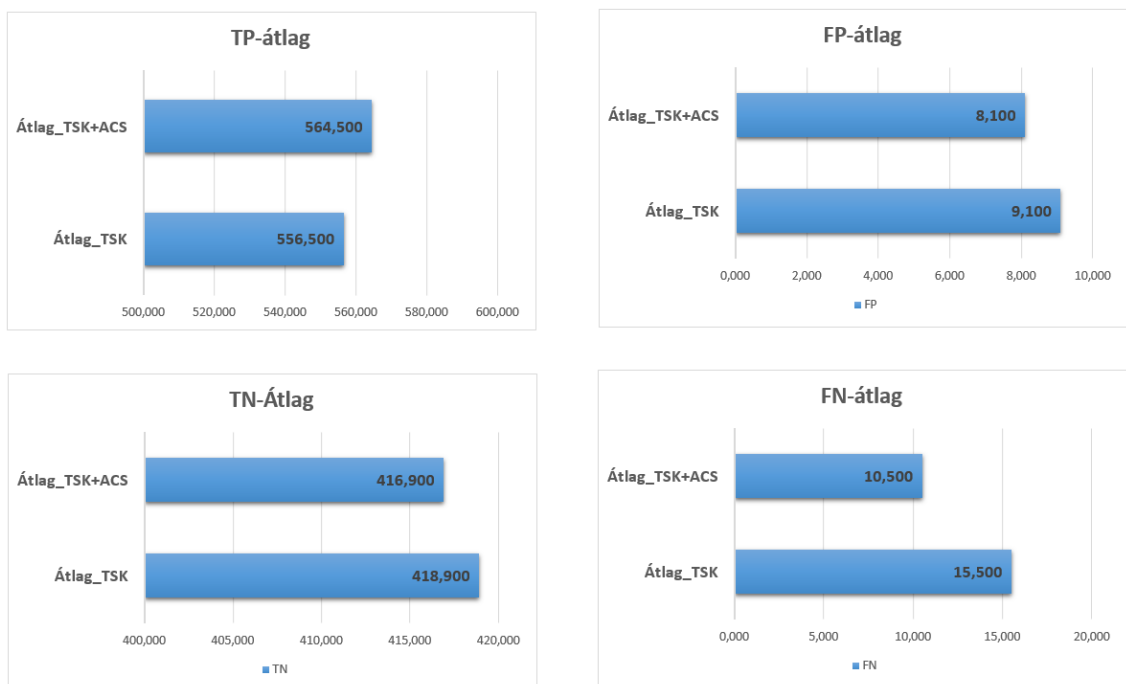
³ A már ígéretesnek azonosított megoldások finomítása és részletes kiaknázása. Célja, hogy a keresést koncentrálja a legjobb ismert régiókra, és ezáltal az algoritmus közelebb jusson az optimális megoldáshoz.

3.6.3 A TSK valamint a TSK+ACS eredményeinek inkrementális és komparatív elvű elemzése

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 indokoltta 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

65. ábra: Teljesítménymérési mutatók integrált TSK és ACS esetén (Saját szerkesztés)

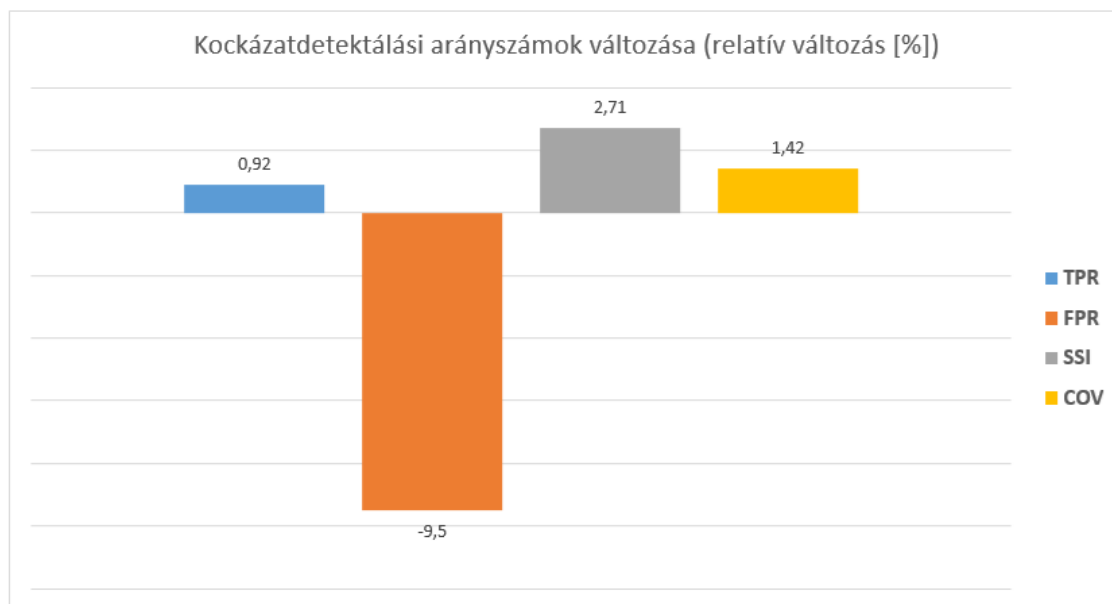


66. ábra: Konfúziós mátrix releváns mutatói (sárga: TSK+ACS; kék: TSK)(Saját szerkesztés)

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.



67. 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

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

Az eredmények alapján az ACS integrációja minden mutatóban mérhető javulást eredményezett, amelyből 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 vizionál, míg a Coverage → szélesebb alkalmazási tartomány predikcionál, s itt csak a szórás változása mozdul el alacsonyabb szintre....lefedettség szórása nőtt (kisebb konzisztencia).

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.

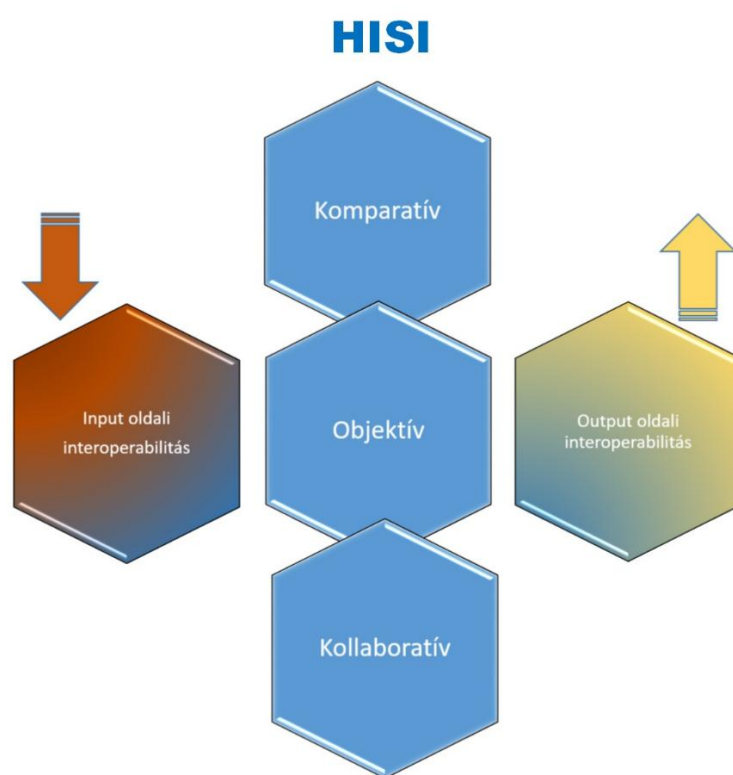
Az elmúlt évtized folyamán bekövetkezett hidrogénincidensek, valamint az ezekről készült eseményjelentések és azok elemzése rámutattak arra, hogy hiányosságok vannak a gyorsan fejlődő és intenzíven terjedő, hidrogéntechnológia eseményeinek a dokumentálása terén. A szakirodalom-kutatásom és a lefedettség 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 értékelésre és a súlyossági besorolására. A HIAD adatbázis, ugyan kifejezetten a hidrogéntekológiához 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 hidrogéntekológiák 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

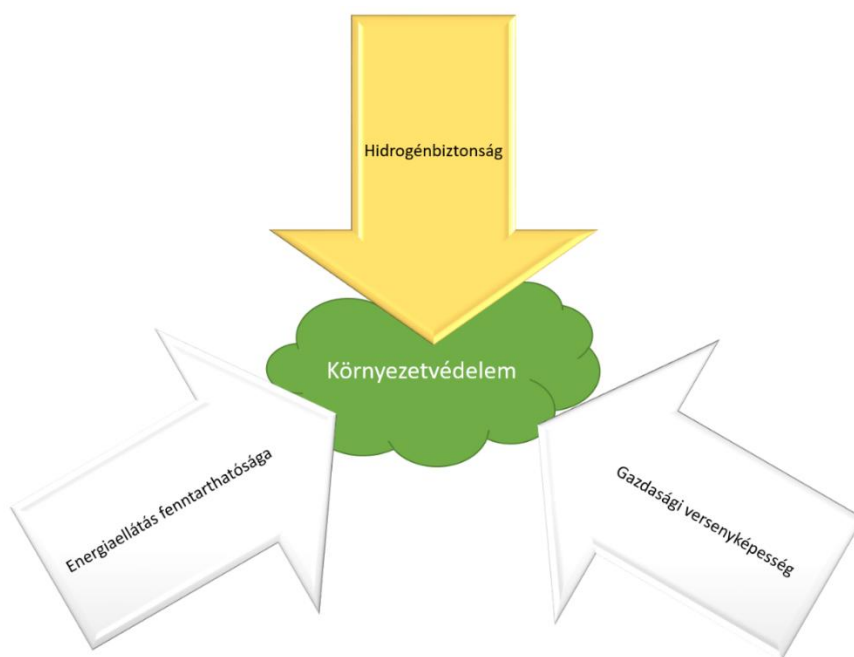
értékelését is, valamint használatával megvalósíthatunk egy egységes súlyossági besorolását.

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.



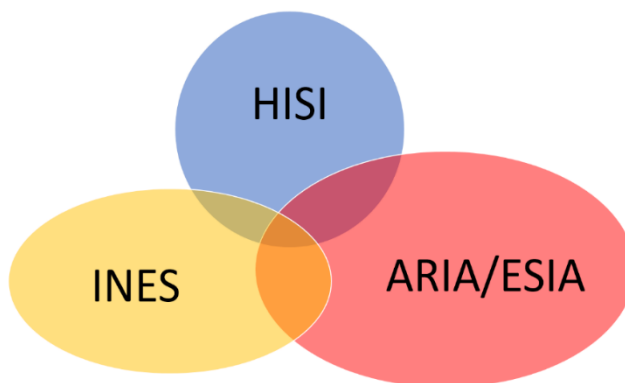
68. ábra: A HISI-modell alapjai (saját szerkesztés)

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.



69. ábra: A HISI - modell globális céljai és motivációs háttere (saját szerkesztés)

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



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

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 (70. ábra), amely növeli a baleseti értékelések információtartalmát, javítja az interdiszciplináris kommunikációt és támogatja a szabályozási folyamatok harmonizációját.

4.2 Kutatási módszertan és a validációs eljárások

A szakirodalmi háttér feltárása során, a hidrogéntechológiai események átfogó elemzésére törekedtem. Kvalitatív elemzéseket végeztem a hidrogénipari balesetekkel kapcsolatban, s ekkor tűn fel, hogy a különböző hidrogéntechológia 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 [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 hidrogéntekológiákhoz 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 szolgáltatnak a szabványosításhoz, a kockázatcsökkentési stratégiák kialakításához és az új biztonsági protokollok kidolgozásához [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 célom egy egységes, többdimenziós, strukturált súlyossági osztályozási rendszer megalkotása, hidrogéntekológiai 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 hidrogéntekológiai infrastruktúrára is. A kapcsolódó technológiai területek rendkívül

dinamikusan 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 nagy nyomású 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 hidrogéntekológiák (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 célom 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.



71. 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 legkevésbé súlyos esemény. A szintek meghatározása a dimenziók (2. ábra) együttes értékelésével történik. A skála kialakítása során a következő alapelveket vettük 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 (72. ábra). Az egyes dimenziókra adott pontszámok összege adja a HISI-összpontszámot, amely alapján, a szintdefiníciós táblázat (73. 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 hidrogéntechológiai 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 tűzzel 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)

72. 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

73. 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 légzsákjának 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 nyomatékkel 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. [152][153].

- ❖ **Santa Clara:** egy moduláris hidrogénszállító trailer töltése közben szivárgást észleltek a gépkocsi kezelői. A gépkocsikezelők, annak ellenére, hogy nem volt engedélyük ilyen tevékenységre, megpróbáltak 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 áterjedt a szomszédos, parkoló dízel üzemű teherautókra. A riportokban az is olvasható, hogy a kb. 40m-re lévő épület ablakai kitörték a lökeshullám 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 lökeshullámot még 100m-el távolabb is érezni lehetett, ahol ablakok törtek ki. Sajnálatos módon két ember életét veszítette és további hat személy, sérüléseket szenvedett [156][157].



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

4.5.3 Esetek besorolása a HISI-skála alapján

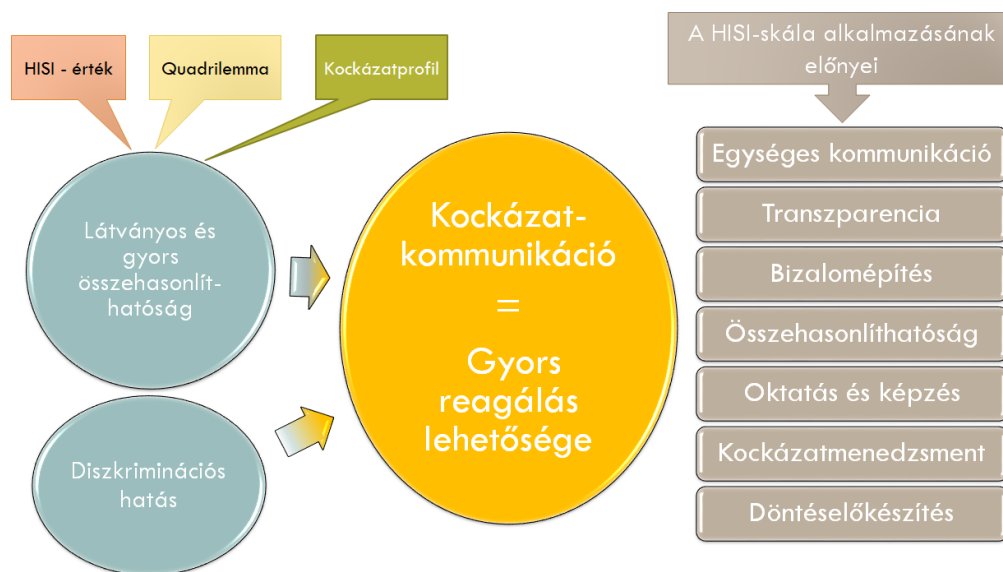
A Kjørbo és Santa Clara esetén ugyan előfordultak kisebb sérülések, ezek azonban másodlagos vagy alig értékelhető sérülések voltak. A környezeti károk mindhárom esetben jelentősek voltak, Gangneung esetén a detonációs hatás különösen erőteljesen érvényesült. A részletes pontszámok, a súlyossági besorolások,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



75. 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 eseményprofillal 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 katasztrofális 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.



76. 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 a skála belső koherenciájának értékelésére szolgál. 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 keretrendszerről van szó. A hidrogéntechológiák 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, ellentmondásokról 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 (74. 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 szintől 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 háttértudással. 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 (75. 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 HSI-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 HSI 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 [164], 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 dimenziókhoz 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 esetszámba 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.

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

77. 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: $0 + 0 + 4 = 4$

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.

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

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 dimenziókhoz 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 [162] [163].

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-érzékenységinde克斯 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 dimenziókhoz 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

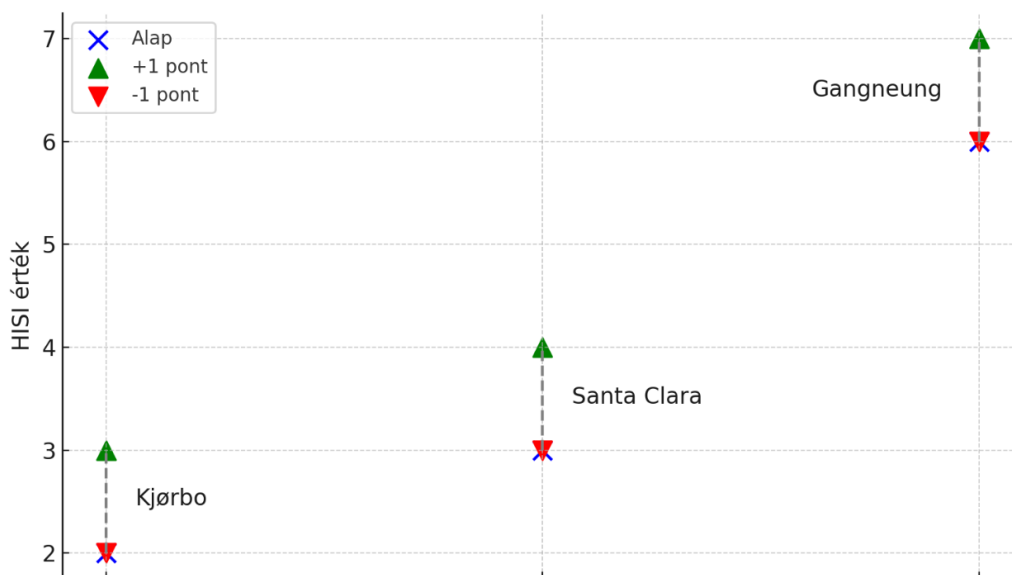
+1 pont bármely dimenzióban → 10 pont, HISI-4

-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



78. 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 hidrogéntekológiához 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, hidrogéntekológiai eseményekre optimalizált többdimenziós, súlyossági osztályozását lehetővé tévő 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. Tervezzem, 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 skáafejlesztések folyamatában is előnyösen hasznosíthatók.

Új tudományos eredmények:

Tézis 1. (kapcsolódó hipotézis: H1) [SZI1, SZI2, SZI3, SZI4, SZI5, SZI7, SZI8, SZI9, SZI11, SZI12, SZI13, SZI16]

Vizsgálataimmal igazoltam, hogy a HAZOP módszertan fuzzy logikával való integrációja többféle modellformában is megvalósítható, és a modellválasztás alapvetően meghatározza a kockázatértékelés megbízhatóságát és alkalmazhatóságát.

- **Altézis 1.1**

Bizonyítottam, hogy a szöveges szabályrendszeren alapuló Mamdani-fuzzy logika ugyan természetes módon illeszkedik a kvalitatív elvű HAZOP-modellhez az mégis számítási és analitikai korlátokkal bír.

- **Altézis 1.2**

Megalkottam egy új, eddig a szakirodalomban nem vizsgált TSK-fuzzy logikán alapuló HAZOP-modellt, amely explicit numerikus kimenetei révén homogénebb eredménystruktúrát és analitikailag kezelhetőbb szerkezetet biztosít, mint a korábban már megalkotott Mamdani-alapú modell.

Tézis 2. (kapcsolódó hipotézis: H1) [SZI1, SZI2, SZI3, SZI4, SZI5, SZI7, SZI8, SZI9, SZI11, SZI12, SZI13, SZI16]

Vizsgálataimmal igazoltam, hogy a HAZOP-módszertan alkalmazása során, a TSK-fuzzy modell több szempontból is kedvezőbb teljesítményt és jobb hatékonyságot nyújt a Mamdani-fuzzy megközelítéssel szemben, ezáltal alkalmasabb a valós idejű, biztonságkritikus HAZOP alkalmazásokhoz.

- **Altézés 2.1**

A TSK-modell kedvezőbb eredményt nyújt több teljesítménymutatóban (TPR +2,2%, FPR ~50%-kal alacsonyabb, Coverage +57%), míg az SSI tekintetében nem mutatkozott lényeges különbség.

- **Altézés 2.2**

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

Tézis 3. (kapcsolódó hipotézis: H2) [SZI7, SZI9, SZI11, SZI12, SZI13, SZI16]

Vizsgálataimmal igazoltam, hogy a TSK-fuzzy logikán alapuló HAZOP-modell teljesítménye tovább javítható ACS-metaheurisztikus optimalizációval.

- **Altézés 3.1**

A TSK-modell önmagában is jobb kompromisszumot biztosít a detektálási pontosság és a téves riasztások minimalizálása között, azonban TSK-ACS hibrid modellel elért eredmények nagyobb érzékenységet és alacsonyabb téves riasztási arányt mutatnak, miközben a lefedettség értéke is emelkedett. Ez a megközelítés tudományos újdonságként bizonyítja, hogy a TSK+metaheurisztikus kombináció alkalmasabb a biztonságkritikus hidrogéntechnológiai rendszerek on-line HAZOP-elemzésére, mint bármely hagyományos fuzzy logikai modell.

Tézis 4. (kapcsolódó hipotézis: H2) [SZI3, SZI7, SZI8, SZI9, SZI11, SZI12, SZI13, SZI14, SZI16]

Az előző tézisekben bemutatott eredmények összegzéseként megalkottam a hagyományosan szakértői ülések keretében alkalmazott HAZOP-módszer on-line, real-time adatfeldolgozáson alapuló keretrendszerének alapjait. A TSK-fuzzy logika és az ACS-alapú súlyoptimalizáció integrációja lehetővé tette a gyors, numerikusan megalapozott kockázatértékelést, amely jelentősen felgyorsítja a döntéstámogatást. Az így létrehozott módszer alapvetően új perspektívát nyújt a biztonságkritikus rendszerek (pl.: hidrogéntechnológia, folyamatirányítás, IoT-alapú ipari környezetek) kockázatelemzésében, és hozzájárul a HAZOP evolúciójához az adatalapú mérnöki megközelítések irányába.

Tézis 5. [SZI2, SZI4, SZI5, SZI7, SZI10, SZI14, SZI15, SZI17]

Megalkottam egy új, többdimenziós, hidrogéntechológiai környezetre optimalizált balesetosztályozási skálát, amely jelentősen túlmutat a jelenleg alkalmazott nemzetközi iparbiztonsági rendszereken. Az általam létrehozott új keretrendszer (HISI-modell) alkalmas a hidrogénipari események objektív összehasonlítására, a transzparens incidenskommunikáció támogatására, valamint a döntés-előkészítési folyamatok megalapozására.

- **Altézis 5.1 (kapcsolódó hipotézis: H3)**

Igazoltam, hogy a HISI modell négydimenziós felépítése (emberi hatás, környezeti hatás, fizikai kár, műszaki meghibásodás) képes átfogóan reprezentálni a hidrogénipari események következményeit, és ezáltal egy olyan skálaszerkezetet biztosít, amely alkalmas a jövő hidrogénipari objektumainak biztonsági osztályozására.

- **Altézis 5.2 (kapcsolódó hipotézis: H4)**

Igazoltam, hogy a HISI modell konzisztencia- és érzékenységvizsgálattal validálható. Azonos nagyságrendű következmények azonos kategóriába sorolódnak, míg a határértékek mentén bekövetkező kisebb változások kategóriaváltást eredményeznek. Ez a skála stabilitását és biztonságkritikus érzékenységét egyaránt bizonyítja.

- **Altézis 5.3. (kapcsolódó hipotézis: H5)**

Igazoltam, hogy a HISI modell alkalmazása iparágfüggetlenül elősegíti a hidrogén-események következményalapú egységesítését. A modell ezzel pótolja a jelenlegi osztályozórendszerek hiányosságait, és a hidrogéntechológiák biztonságának fejlődését szolgálja.

Ajánlások

A HAZOP-hoz kapcsolódó kutatásaimat elsősorban a hidrogénüzemekre vonatkozóan végeztem, azonban a vizsgálati módszertan kiterjeszthető minden olyan területre, ahol adatalapú, szenzorokkal felügyelt és központilag feldolgozott adatbázis áll rendelkezésre.

A HAZOP-módszertanba integrált TSK-modell önmagában is jelentős előrelépést jelentett a hagyományos Mamdani-megközelítéshez képest, amint azt a korábbi fejezetekben részletesen bemutattam. Ugyanakkor a TSK-modellhez tartozó súlyparaméterek manuális meghatározása – szubjektív jellege, időigényessége és a rendszer összetettsége miatt – indokoltá tette a konzekvens rész súlyparamétereinek optimalizálását.

E megfontolás vezetett a metaheurisztikus megközelítés alkalmazásához. Ennek érdekében a TSK-modellt integráltam az Ant Colony System (ACS) algoritmussal, amely képes a konzekvens súlyvektorok iteratív, adatvezérelt módon történő hangolására. A jövőben célom e kutatási irány folytatása, különösen más metaheurisztikus algoritmusok teljesítményének összehasonlító vizsgálata révén.

Gyakorlati szempontból a rendszer működésének validálását egy kísérleti modell felállításával kívánjuk elvégezni. Ennek részeként 2026-ban az Óbudai Egyetem területén létrehozzuk a Hidrogéntechológiai Laboratóriumi Infrastruktúrát. A szükséges beszerzések és közbeszerzési eljárások lezárása 2025 október–november hónapjaiban várható. Az így kialakított laboratóriumi környezet lehetőséget biztosít majd a fent bemutatott matematikai modell valós, hardveres rendszerben történő tesztelésére és továbbfejlesztésére.

A HISI-skála további fejlesztésének egyik legígéretesebb iránya egy állami szintű, központilag koordinált hidrogénesemény-adatbázis létrehozása, amely egységes elvek mentén gyűjtené, validálná és értékelné a hidrogéntechológiai incidensek adatait. Az adatbázis célja az események objektív, összehasonlítható és transzparens feldolgozása, amely alapot biztosít a proaktív kockázatkezeléshez és a döntéshozatal támogatásához. A rendszer kialakítása során kiemelt szempont az egységes adatmodell és takszonómia kialakítása a HISI-skála dimenzióira építve, kiterjesztve azt a fizikai, egészségügyi, környezeti és üzemeltetési következményekre. A bejelentési mechanizmus kétlépcsős (előjelentés és zárójelentés) struktúrája biztosítaná az adatok időszerűségét és teljességét, míg a formai és tartalmi validáció automatizált sémavizsgálattal és szakértői ellenőrzéssel

történne. Az így létrejövő adatbázis nemcsak a biztonságkritikus események egységes dokumentálását szolgálná, hanem a HISI-értékek statisztikai összehasonlíthatóságát és trendalapú elemzését is lehetővé tenné.

Az ilyen típusú rendszer kialakítása a NIS2 irányelvben megfogalmazott kiberbiztonsági és adatintegritási követelményekkel is összhangban állna, hiszen a hidrogénteknológia mint kritikus infrastruktúra a jövő energiarendszerének szerves része. A központi adatbázis megvalósítása elősegítené a proaktív eseménymegelőzést, a reaktív eseményértékelés egységesítését, valamint az incidensekkel kapcsolatos nyilvános kommunikáció hitelességét. Az állami szinten koordinált, HISI-kompatibilis adatgyűjtés hosszú távon lehetővé tenné a nemzeti és nemzetközi trendek elemzését, az incidensek ok-okozati mintázatainak feltárását, és a mesterséges intelligencián alapuló előrejelző modellek (pl. TSK–ACS rendszerek) valós adatokon történő validálását. Mindezek révén a HISI-adatbázis a hidrogénteknológiai biztonságirányítás empirikus tudásbázisává válhatna, amely egyszerre szolgálja a szabályozói, az ipari és a tudományos közösség érdekeit.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Carbon Dioxide and Climate a Scientific Assessment- National Academy of Sciences, Washington, D.C. (1979), National Research Council; Assembly of Mathematical and Physical Sciences; Climate Research Board; Ad Hoc Study Group on Carbon Dioxide and Climate, <https://nap.nationalacademies.org/catalog/12181/carbon-dioxide-and-climate-a-scientific-assessment> (letöltve: 2023. december 15.)
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) - AR6 Synthesis Report, Climate Change 2023, Switzerland (2023.) <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- [3] Juciano Gasparotto, Kátia Da Boit Martinello (2021) Coal as an energy source and its impacts on human health - Energy Geoscience, Volume 2, Issue 2, April 2021, pp 113-120, (letöltve: 2023. december 14.)
- [4] Deaths associated with pollution from coal power plants - The National Institutes of Health (NIH), a part of the U.S. Department of Health and Human Services, <https://www.nih.gov/news-events/nih-research-matters/deaths-associated-pollution-coal-power-plants> (megtekintve: 2023. december 15.)
- [5] Particulate pollution from coal associated with double the risk of mortality than PM2.5 from other sources - Harvard T.H. Chan School of Public Health <https://hsph.harvard.edu/news/particulate-pollution-from-coal-associated-with->

- [double-the-risk-of-mortality-than-pm2-5-from-other-sources/](#) (megtekintve: 2023. december 15.)
- [6] Európai Bizottság: The European Green Deal <https://ec.europa.eu/stories/european-green-deal> (letöltve: 2023.08.17.)
 - [7] Európai Bizottság: Magyarország Nemzeti Energia- és Klímaterve (2021-2030), Hungary -Final updated NECP 2021-2030 (2024.10.16.) https://commission.europa.eu/publications/hungary-final-updated-necp-2021-2030-submitted-2024_en (letöltve: 2024.10.16.)
 - [8] Yisong Zhang, Q.S. Hua, Li Sun, Qie Liu (2020) Life Cycle Optimization of Renewable Energy Systems Configuration with Hybrid Battery/Hydrogen Storage: A Comparative Study - *Journal of Energy Storage*, Volume 30, August 2020 (letöltve: 2022.01.18.)
 - [9] Daniele Groppi, Davide Astiaso G., Gianluigi L. B., Fabrizio C., Livio D. S. (2018) Analysing economic and environmental sustainability related to the use of battery and hydrogen energy storages for increasing the energy independence of small islands. *Energy Conversion and Management*, Volume 177, 1 December 2018, Pages 64-76 (letöltve: 2022.01.18.)
 - [10] Mohamed Bahloul, Shafiuzzaman K. Khadem (2020): An analytical approach for techno-economic evaluation of hybrid energy storage system for grid services, *Journal of Energy Storage*, Volume 31, October 2020 (letöltve: 2022.01.18.)
 - [11] Andrea Monforti Ferrario, Francisco J.V., Francisca S.M., José M.A., Enrico B., Luigi M. Hydrogen vs. Battery in the Long-term Operation. A Comparative Between Energy Management Strategies for Hybrid Renewable Microgrids, *Intelligent Modelling and Control in Renewable Energy Systems* (24 April 2020). <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/4/698> (megtekintve: 2022.01.19.)
 - [12] David Parra, Luis Valverde, F. Javier Pino, Martin K. Patel (2019): A review on the role, cost and value of hydrogen energy systems for deep decarbonisation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 10, March 2019, Pages 279-294 (letöltve: 2022.05.02.)
 - [13] Mathias Böhm, Abraham F.D.R., Johannes P., Maider V., Sebastian H-P. Beatriz N.C. (2022): 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*, Volume 47, Issue 89, 1. Nov. 2022, pp 38003-38017 (letöltve: 2022.12.20.)
 - [14] Stefan Lechtenböhrer, Lars J. Nilsson, Max Åhman, Clemens Schneider (2016): Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification - Implications for future EU electricity demand, *Energy*, Volume 115, Part 3, 15 November 2016, pp 1623-1631

- [15] Annika Boldrini, Derck Koolen, Wina Crijns-Graus, Machteld van den Broek (2024): The impact of decarbonising the iron and steel industry on European power and hydrogen systems, *Applied Energy* (letöltve: 2024.06.12.)
- [16] Marina Blohm, Franziska Dettner (2023): Green hydrogen production: Integrating environmental and social criteria to ensure sustainability, *Smart Energy*, Volume 11, August 2023 (letöltve: 2024.08.04.)
- [17] Norafneeza N., Tamarai M.A., Rafiziana Md K., Arshad A., Aishah A.J., Tuan A.T.A., Mohd F.A.K. (2023): Hydrogen application and its safety: An overview of public perceptions and acceptance in Malaysia, *Process Safety and Environmental Protection* Volume 180, December 2023, pp. 686-698 (letöltve: 2024.08.08.)
- [18] Joel A. Gordon, Nazmiye B.O., Anwar H., Seyed A.N. (2024) Necessary and sufficient conditions for deploying hydrogen homes: A consumer-oriented perspective, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 69, 5 June 2024, pp 982-1021 (letöltve: 2024.08.08.)
- [19] Tomoya Suzuki, Yu-ichiro Izato, Atsumi 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*, Volume 71, 2021, ISSN 0950-4230, Volume 361, 1 May 2024, (letöltve: 2024.08.11.)
- [20] V.T. Covello, M.W. Merkhofer, „Risk Assessment Methods, Approaches for Assessing Health and Environmental Risks”, Springer, New York, ISBN: 978-0-306-44382-4, 1993
- [21] T. Aven, „Risk Analysis”, 2nd Edition, Wiley, ISBN: 978-1-119-05779-6, 2016
- [22] ISO 31000:2018, Risk Management - Guidelines, International Standard, 2nd Edition, 2018
- [23] John Rushby, „Critical System Properties: Survey and Taxonomy”, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 43, No. 2, pp. 189-219, USA, 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* Volume 40, Issue 25, Pages 8281-8289, Elsevier, 2015.
- [25] Vladimir Molkov, „Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering I.” bookbone.com ISBN: 978-87-403-0226-4, 2012
- [26] ARIA: Analysis, Research and Information on Accidents adatbázis, Franciaország <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/> letöltve: (2023. november 10.).
- [27] RISCAD: Relational Information System for Chemical Accidents Database <https://r2.aist-riss.jp/> letöltve: (2023. november 10.).

- [28] International Association for Hydrogen Safety - HySafe and HIAD: Hydrogen Incident and Accident Database <https://hysafe.info/hiad-2-0-free-access-to-the-renewed-hydrogen-incident-and-accident-database> letöltve: (2023. november 10.).
- [29] CSB: U.S. Chemical Safety Board, <https://www.csb.gov/>, letöltve: (2023. november 10.).
- [30] DOE-NETEL: U.S. Department of Energy-National Energy Technology Laboratory, <https://www.netl.doe.gov>, letöltve: (2023. november 10.).
- [31] H2-Hydrogen Tools: U.S. Department of Energy- Office of Energy Efficiency and Renewable Energy's Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office with the Pacific Northwest National Laboratory, <https://h2tools.org>, letöltve: (2023. november 10.).
- [32] A. Campari, A. J. Nakhal Akel, F. Ustolin, A. Alvaro, A. Ledda, P. Agnello, P. Moretto, R. Patriarca, and N. Paltrinieri, "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 - Hidrogén project, Egyesült királyság, Elérhető: <https://hydeploy.co.uk> (megtekintve: 2024. augusztus 02.)
- [34] H2Future - Hidrogén project, Ausztria, Elérhető: <https://www.h2future-project.eu> (megtekintve: 2024. augusztus 02.)
- [35] REFHYNE - Hidrogén project, Németország, Elérhető: <https://www.refhyne.eu> (megtekintve: 2024. augusztus 03.)
- [36] HyNet - Hidrogén project, Egyesült királyság, Elérhető: <https://hynet.co.uk> (megtekintve: 2024. augusztus 03.)
- [37] H2 Mobility - Hidrogén project, Németország, Elérhető: <https://h2-mobility.de> (megtekintve: 2024. augusztus 04.)
- [38] H2V Normandy - Hidrogén project, Franciaország, Elérhető: <https://h2v.eu/hydrogen-valleys/normandy-hydrogen> (megtekintve: 2024. augusztus 04.)
- [39] HEAVENN - Hidrogén project, Hollandia, Elérhető: <https://heavenn.org> (megtekintve: 2024. augusztus 06.)
- [40] GreenHyScale - Hidrogén project, Dánia, Elérhető: <https://greenhyscale.eu> (megtekintve: 2024. augusztus 06.)
- [41] HyBalance - Hidrogén project, Dánia, Elérhető: <https://hybalance.eu> (megtekintve: 2024. augusztus 10.)
- [42] Big HIT - Hidrogén project, Egyesült királyság, Elérhető: <https://www.bighit.eu> (megtekintve: 2024. augusztus 10.)
- [43] SafetyCulture, "HAZOP (Hazard and Operability Study)", [Online]. Elérhető: <https://safetyculture.com/topics/hazop/>. (megtekintve: 2024.03.01.)

- [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, *Bükkábrányi Energiapark*. [Online]. Elérhető: <https://bukkabranyienergiapark.hu/> (megtekintés időpontja: 2024. ápr. 20.)
- [47] J. Isimite and P. Rubini, "A dynamic HAZOP case study using the Texas City refinery explosion," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 40, pp. 496-501, Mar. 2016.
- [48] S. Silvianita, M. F. Khamidi, I. Rochani, and D. Chamelia, "Hazard and Operability Analysis (HAZOP) of Mobile Mooring System," *Procedia Earth Planet. Sci.*, vol. 14, pp. 208-212, Dec. 2015. doi: 10.1016/j.proeps.2015.07.103.
- [49] J. Ahn and D. Chang, "Fuzzy-based HAZOP study for process industry," *J. Hazard. Mater.*, vol. 317, pp. 303-311, 2016. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.05.096.
- [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," *J. Loss Prev. Process Ind.*, 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 Saf. Environ. Prot.*, 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. 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: Kiadvány kötet, 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, Magyar Elektrotechnikai Egyesület, Budapest, 2023.

- [57] Y. Lee, M. H. Cho, M. C. Lee, and Y. J. Kim, "Evaluating hydrogen risk management policy PR: Lessons learned from three hydrogen accidents in South Korea," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 63, pp. 24536-24547, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.04.186.
- [58] "Bekövetkezett az első hidrogén kút robbanás," *e-cars.hu*, Jun. 12, 2019. [Online]. Available: <https://e-cars.hu/2019/06/12/bekovetkezett-az-elso-hidrogen-kut-robbanas/>
- [59] N. Ade, B. Wilhite, and H. Goyette, "An integrated approach for safer and economical design of hydrogen refueling stations," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 56, pp. 32713-32729, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.135.
- [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, és 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, szept. 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," *J. Hazard. Mater.*, 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)," *Int. J. 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 (letöltve: 2024.08.15.)
- [66] T. L. Kóczy and D. Tikk, *Fuzzy rendszerek*, ISBN: 978-963-279-709-0 Budapest, Hungary: Typotex Elektronikus Kiadó Kft., 2013. (letöltve: 2024.08.15.)
- [67] J. Fodor, *Gépi intelligencia I. - Előadásanyagok*, BMF NIK IMRI, [Online]. Available: <https://uni-obuda.hu/fodor/gi1.html> (Prof. Dr. Fodor János : Előadások 1-6) (letöltve: 2024.08.15.)
- [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.unipub.lib.uni-corvinus.hu (letöltve: 2024.08.15.)

- [69] V. E. S. Souza, A. Lapouchnian, W. N. Robinson, and J. Mylopoulos, "Awareness requirements for adaptive systems," Technical Report DISI-10-049, Dept. of Information Engineering and Computer Science, University of Trento, Aug. 2010. (letöltve: 2024.08.15.)
- [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](https://doi.org/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, H. L. Larsen, D. D. Zeng, D. Hicks, and G. Wagner, Eds., Lecture Notes in Computer Science, vol. 5376, Berlin, Germany: Springer, 2008, pp. 3-12, doi: [10.1007/978-3-540-89900-6_2](https://doi.org/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](https://doi.org/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 Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 258-265, Feb. 2003, doi: [10.1109/TPWRS.2002.807091](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.3846/aviation.2018.6983).
- [76] J. J. Jassbi, P. J. A. Serra, R. A. Ribeiro, and A. Donati, "A comparison of Mandani and Sugeno inference systems for a space fault detection application," in *Proc. World Automation Congress (WAC)*, Budapest, Hungary, Jul. 2006, pp. 1-8, doi: [10.1109/WAC.2006.376033](https://doi.org/10.1109/WAC.2006.376033).
- [77] H. Nobahari and S. H. Pourtakdoust, "Optimization of fuzzy rule bases using continuous ant colony system," in *Proc. 1st Int. Conf. on Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO)*, Sharjah, U.A.E., Feb. 2005, Paper No. 243.
- [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 Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 723-735, Aug. 2014, doi: [10.1109/TFUZZ.2013.2272480](https://doi.org/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, Article ID 9485478, 15 pages, 2018, doi: [10.1155/2018/9485478](https://doi.org/10.1155/2018/9485478).
- [80] L. M. Gambardella, M. Dorigo, M. Middendorf, and T. Stützle, “Guest editorial: special section on ant colony optimization,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 4, pp. 317-319, Aug. 2002, doi: [10.1109/TEVC.2002.802446](https://doi.org/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*, Volume 107, August 2021, 107401, doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107401
 - [82] C. Blum, „Ant colony optimization: A bibliometric review” *Physics of Life Reviews*, Volume 51, December 2024, Pages 87-95, doi.org/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," presented at the *9th Int. Conf. Hydrogen Safety (ICHS 2021)*, Edinburgh, UK, Sept. 21-23, 2021. [Online]. Elérhető: <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/79598.pdf> (megtekintve: 2024. december 15.)
 - [84] Oxford Institute for Energy Studies, "Review of Hydrogen Leakage along the Supply Chain," *Energy Transition*, no. ET41, Nov. 2024. [Online]. Elérhető: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2024/11/ET41-Review-of-Hydrogen-Leakage-along-the-Supply-Chain.pdf> (megtekintve: 2025. január 12.)
 - [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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.1177/1073191108325005).

- [91] L. Szabó, „Mi a biztonság?”, Pécsi Határőr Tudományos Közlemények, vol. XIII, pp. 73-84, 2012. [Online]. Elérhető: https://unipub.lib.uni-corvinus.hu/2820/1/VT_2017n4p84.pdf (Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar)
- [92] What is the Difference Between a Hazard and a Risk, Human Focus, May 22, 2025. [Online]. Elérhető: <https://humanfocus.co.uk/blog/difference-between-hazard-and-risk/>
- [93] The Difference Between Hazard and Risk: What You Need to Know, Worksafe UK, Apr. 16, 2024. [Online]. Elérhető: <https://www.worksafe.uk.com/risk-assessment/hazard-vs-risk-whats-the-difference/>
- [94] Z. Nazir and M. H. J. Bollen, "Operational risk assessment of transmission systems: A review," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 164, p. 109995, 2024, doi: 10.1016/j.ijepes.2024.109995
- [95] 1993. évi XCIII. törvény a munkavédelemről
- [96] 234/2011. (XI. 10.) Korm. rendelet a katasztrófavédelemről és a hozzá kapcsolódó egyes törvények módosításáról szóló 2011. évi CXXVIII. törvény végrehajtásáról
- [97] 2011. évi CXXVIII. törvény a katasztrófavédelemről és a hozzá kapcsolódó egyes törvények módosításáról
- [98] E. Stemn, C. Bofinger, D. Cliff, and M. E. Hassall, "Failure to learn from safety incidents: Status, challenges and opportunities," Safety Science, vol. 101, pp. 313-325, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.ssci.2017.09.018.
- [99] A. Mesa-Gómez, J. Casal, and F. Muñoz, "Risk analysis in Natech events: State of the art," Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol. 64, p. 104071, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.jlp.2020.104071.
- [100] ISO 45001:2018, "Occupational health and safety management systems, Requirements with guidance for use," ISO 45001:2018, 2018.
- [101] IEC 60050 - IEV 903-01: Risk assessment / Safety and risk reduction
- [102] IEC 60050 - IEV 821-12: Reliability, availability, maintainability and safety
- [103] MSZ EN 61508-1:2010 "Villamos/elektronikus/programozható elektronikus biztonsági rendszerek működési biztonsága.
- [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, és 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.

- [106] S. Pooransingh, A. Kibble, és 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, és 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, és G. Gandomi, "Bobcat Optimization Algorithm: an effective bio-inspired metaheuristic algorithm for solving supply chain optimization problems," *Scientific Reports - Nature Publishing Group*, vol. 14, p. 12281, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-70497-1.
- [110] Átadták Magyarország első zöldhidrogén üzemét a Bükkábrányi Energiaparkban," HH2, 2024. [Online]. Elérhető: <https://hh2.hu/atadtak-magyarorszag-elso-zoldhidrogen-uzemet-a-bukkabranyi-energiaparkban/>
- [111] H. H. M. Mahmoud, W. Wu, és Y. Wang, "Mechanisms for data validation using Blockchain Technology in Water Distribution System," *Proc. 27th International Conference on Automation & Computing*, University of the West of England, Bristol, UK, pp. 1-6, Sep. 2022.
- [112] J. Wu, M. Wang, and D. Infield, "A novel statistical model for synthetic wind speed data generation," *Applied Energy*, vol. 165, pp. 990-1005, Feb. 2016. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.12.083.
- [113] N. Mohammed, B. C. Fung, P. C. K. Hung, and C. Lee, "Synthetic Data Generation for Privacy-Preserving Machine Learning," *Technical Report*, 2020.
- [114] G. M. Tina and S. Gagliano, "Probabilistic generation of synthetic solar radiation data," *Renewable Energy*, vol. 46, pp. 30-40, Oct. 2012. doi: 10.1016/j.renene.2012.02.013.
- [115] M. S. Alam, R. Y. Zhong, and A. K. Maruf, "Synthetic load profiles generation for residential buildings: A bottom-up approach," *Applied Energy*, vol. 301, p. 117492, Dec. 2021. doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117492.
- [116] Y. Li, Y. Wang, Y. Yang, and D. Han, "Synthetic daily electricity load profile generation method based on activity patterns," *Expert Systems with Applications*, vol. 138, p. 112816, Dec. 2019. doi: 10.1016/j.eswa.2019.07.028.
- [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, 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] Detrekői A. és Szilávik L., "Fuzzy rendszerek," ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2011.
- [121] Fazekas L., "Fuzzy rendszerek alapjai," Akadémiai Kiadó, Budapest, 2006.
- [122] Szegedi Tudományegyetem - Elektronikus Tananyag Archívum (SZTE-ETA), Statisztikai próbák, Kétmintás t-próba, [Online]. Elérhető: <https://eta.bibl.u-szeged.hu/1721/10/11-12.%20Statisztikai%20próba%20-%20ANOVA.pdf>,
- [123] W. Hu, K. Wu, P. P. Shum, N. I. Zheludev, és C. Soci, "All-Optical Implementation of the Ant Colony Optimization Algorithm," Scientific Reports, vol. 6, p. 26283, 2016.
- [124] IMREI Z., VUTS J., TÓTH M. - Bogárferomonok a környezetkímélő növényvédelemért, [Online], Elérhető: www.csalomoncsapdak.hu/8lszakcikkeink/feromonokrol11.pdf
- [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.
- [126] International Electrotechnical Commission, *IEC 61511: Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector*, Parts 1-3, IEC, 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," Appl. Math. Modell., vol. 40, nos. 23-24, pp. 9990-10001, Dec. 2016
- [129] Seyedali Mirjalili (2025). Ant Colony Optimization (ACO) [Online]. Elérhető: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/69028-ant-colony-optimization-aco>), MATLAB Central File Exchange. (megtekintve 2025. március 12.)
- [130] File Exchange - MATLAB Central , [Online] Elérhető: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/?s_tid=gn_mlc_fx_files (megtekintve 2025. március 12.)
- [131] International Atomic Energy Agency (IAEA), "INES - The International Nuclear and Radiological Event Scale User's Manual," IAEA, Vienna, 2013.
- [132] OECD/NEA, "The International Nuclear and Radiological Event Scale (INES) - A Guide for Communicators," OECD Publishing, Paris, 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," Ministère de la Transition écologique, [Online]. <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr> [megtekintve: 2024. október 12.]
- [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," *Int. J. 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 *Proceedings of the 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, és E. Vyazmina, "Statistics, Lessons Learnt and Recommendations from Analysis of HIAD 2.0 Database," 2021.
- [140] J. Wen, M. Maroño, P. Moretto, E. Reinecke, P. Sathiah, E. Studer, E. Vyazmina, és D. Melideo, "Statistics, Lessons Learned and Recommendations from Analysis of HIAD 2.0 Database," *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022.
- [141] U.S. Occupational Safety and Health Administration, "Process Safety Management" [Online]. Available: <https://www.osha.gov/process-safety-management>. [megtekintve: 2024. október 15].
- [142] American Petroleum Institute, "Recommended Practice 754 Fact Sheet: Process Safety Indicators for the Refining and Petrochemical Industries," Szeptember 2021. [Online]. elérhető: <https://www.api.org/-/media/Files/Oil-and-Natural-Gas/Refining/Process%20Safety/RP-754-Fact-Sheet.pdf>
- [143] Directive 2012/18/EU - Seveso III, Európai Unió, "Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances," *Official Journal of the European Union* L197, o. 1-37, 2012. júl. 24. [Online]. Elérhető: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/18/oj/eng>. [Hozzáférés dátuma: 2024. aug. 02.]
- [144] Major Accident Reporting System (eMARS) Európai Bizottság, Joint Research Centre, "Major Accident Reporting System (eMARS)," 2018. ápr. 25. [Online].

- Elérhető: https://knowledge4policy.ec.europa.eu/projects-activities/major-accident-reporting-system-emars_en. [Hozzáférés dátuma: 2023. aug. 02.].
- [145] Introduction to EU Environmental Law - ERA Module, European Academy of Law (ERA), "Introduction to EU Environmental Law - Module 8, Part 2," [Online]. Elérhető: https://www.era-comm.eu/Introduction_EU_Environmental_Law/EN/module_8/part_2/part_2_1.html. [Hozzáférés dátuma: 2024. aug. 02.].
- [146] eMARS Statisztikák - European Commission, Joint Research Centre (JRC), "eMARS Statistics," [Online]. Elérhető: <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/statistics/statistics>. [Hozzáférés dátuma: 2025. május. 03.].
- [147] eMARS Balesetkereső oldal - European Commission, Joint Research Centre (JRC), "eMARS Accident Search," [Online]. Elérhető: <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/accident/search>. [Hozzáférés dátuma: 2025. május. 03.].
- [148] R.C. Stokes, Q.A. Baker, M.P. Broadribb, T.V. Rodante, C.A. Grounds, "CCPS Incident Investigation Book, Third Edition," Hazards 29, IChemE, 2019. [Online]. Elérhető: <https://www.icheme.org/media/19410/hazards-29-paper-30.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 2024. november 05.].
- [149] Sydney Water, "HSP-014: HIDRA Health and Safety Procedure," 2007. febr. [Online]. Elérhető: <https://www.sydneywater.com.au/content/dam/sydneywater/documents/health-and-safety-procedure-HIDRA.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 2024. december 21.].
- [150] G.V. Poje, I. Rosenthal, "The role of the chemical safety board in preventing chemical accidents," Hazards XVI, IChemE, 2001. [Online]. Elérhető: <https://www.icheme.org/media/10150/xvi-paper-05.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 2024. január. 12.].
- [151] U.S. Chemical Safety Board (CSB), "CSB Best Practice Guidance," [Online]. Elérhető: <https://www.csb.gov/csb-best-practice-guidance/>. [Hozzáférés dátuma: 2024. október 15].
- [152] Nel Hydrogen, "Status and Q&A regarding the Kjørbo incident," 2019. jún.-júl. [Online]. Elérhető: <https://nelhydrogen.com/status-and-qa-regarding-the-kjorbo-incident/>. [Hozzáférés dátuma: 2024. aug. 02.].
- [153] N. Ade, B. Wilhite, and H. Goyette, "An integrated approach for safer and economical design of Hydrogen refueling stations," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 45, no. 58, pp. 32713-32727, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.105.
- [154] H2Tools - Santa Clara Incident Review Report
Hydrogen Safety Panel, "AP Santa Clara Incident Review Report Rev1," 2021. jún. [Online]. Elérhető: https://h2tools.org/sites/default/files/2021-06/AP_Santa_Clara_Incident_Review_Report_Rev1.pdf. [Hozzáférés dátuma: 2024. aug. 02.].

- [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]. Elérhető <https://www.icheme.org/media/24670/santa-clara-incident-summary-01-jun-19.pdf> [Hozzáférés dátuma: 2024. aug. 02.].
- [156] Y. Lee, M.H. Cho, M.C. Lee, and 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, pp. 24536-24547, 2023
- [157] S.I. Kim, Y. Kim, "Review: Hydrogen Tank Explosion in Gangneung, South Korea," Center for Hydrogen Safety Conference, AIChE, 2019. [Online]. Elérhető: <https://proceedings.aiche.org/chs/conferences/international-center-hydrogen-safety-conference/2019/proceeding/paper/review-hydrogen-tank-explosion-gangneung-south-korea>. [[Hozzáférés dátuma: 2024. aug. 02.].].
- [158] Fotó: [insideevs.com](https://insideevs.com/news/354223/hydrogen-fueling-station-explodes/), "Hydrogen Fueling Station Explodes," InsideEVs, May 23, 2019. [Online]. Elérhető: <https://insideevs.com/news/354223/hydrogen-fueling-station-explodes/>
- [159] Fotó: [abc7news.com](https://abc7news.com/post/hydrogen-explosion-shakes-santa-clara-neighborhood/5326601/), "Hydrogen explosion shakes Santa Clara neighborhood," ABC7 News, June 3, 2019. [Online]. Elérhető: <https://abc7news.com/post/hydrogen-explosion-shakes-santa-clara-neighborhood/5326601/>
- [160] Fotó: [www.koreatimes.co.kr](https://www.koreatimes.co.kr/southkorea/society/20190523/hydrogen-tank-explosion-kills-2-in-gangneung), "Hydrogen tank explosion kills 2 in Gangneung," The Korea Times, May 23, 2019. [Online]. Elérhető: <https://www.koreatimes.co.kr/southkorea/society/20190523/hydrogen-tank-explosion-kills-2-in-gangneung>
- [161] G. Ursachi, I. Horodnic, C. Zait, "How reliable are measurement scales? External factors with influence on Cronbach's alpha," *Procedia Economics and Finance*, vol.23, pp.679-686, 2015.
- [162] G. Ursachi, I. A. Horodnic, and 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
- [163] 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.
- [164] Cronbach, L.J. Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika* 16, 297-334 (1951). <https://doi.org/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, Zolt; 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, Zolt; 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, Hidrogéntekológiák 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, Zolt; Wühl, Tibor; (szerk.) XLI. Kandó Konferencia 2025 - Kiadvány kötet Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar (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: .(2025)
- [SZI14] Sárdy Kata Eszter, Szén István, „Hidrogén szerepe az energiabiztonság növelésében a megújuló energiaforrások integrációja mellett.” In: Temesvári, Zsolt; Wühl, Tibor; (szerk.) XLI. Kandó Konferencia 2025 - Kiadvány kötet Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar (2025).
- [SZI15] Szén István, „Hydrogen Incident Severity Indicator (HISI), az új hidrogénspecifikus eseményskála. In: Temesvári, Zsolt; Wühl, Tibor; (szerk.) XLI. Kandó Konferencia 2025 - Kiadvány kötet Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar (2025).
- [SZI16] 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)
- [SZI17] 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)

(Megjegyzés: A szürke betűkkel szedett publikációk megjelenése folyamatban, a nyilvános védésre elvileg mind megjelenik és feltöltésre kerül az MTMT-be)

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 - megerősítéssel 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).	21
2. táblázat: A klasszikus HAZOP formája és struktúrája a tesztmodellre.	30
3. táblázat: A HAZOP módszer előnyei és hátrányai - összehasonlító táblázat (saját szerkesztés) [43][44][47][48].	32
4. táblázat: A Klasszikus HAZOP és a hibrid HAZOP összehasonlítás (saját szerkesztés) [47][48][49][50][51][53]	33
5. táblázat: A modell Mamdani-fuzzy alapú adatai (saját szerkesztés)	35
6. táblázat: Az anomáliafigyelő-ággal bővített modell és az alapmodell összehasonlítása (saját szerkesztés)	41
7. táblázat: Validációs mutatók rövidítése és értelmezése (saját szerkesztés).....	45
8. táblázat: Validációhoz kapcsolódó kockázatdetektálási-arányok és azok értelmezése (saját szerkesztés)	46
9. táblázat: A modell futásából származó eredmények (saját szerkesztés).....	48
10. táblázat: Mamdani-fuzzy számszerűsített, összehasonlítható eredményei (saját szerkesztés)	48
11. táblázat: Mamdani- és TSK-fuzzy összehasonlítása, [65][66][119] [120] (saját szerkesztés)	60
12. táblázat: Mamdani- és TSK-fuzzy összehasonlítása. [65][66][119] [120] (saját szerkesztés)	60
13. táblázat: TSK alapú HAZOP-modellem bemeneti változói (saját szerkesztés)	62
14. táblázat: Mamdani és TSK esetén az antecendes- és konzekvens tagok (saját szerkesztés)	62
15. táblázat: TSK - súlyok és azok jelentése	64
16. táblázat: TSK, Fix bemeneti érték a próba súlyparaméterekhez (saját szerkesztés) ..	66
17. táblázat: Fix bemeneti paraméter mellett a súlyparaméter változtatása (saját szerkesztés)	66
18. táblázat: A paraméterérzékenység I. eredményei (saját szerkesztés)	67
19. táblázat: A paraméterérzékenység II. eredményei (saját szerkesztés)	68
20. táblázat: Statisztikai mutatók, összefoglaló táblázata - MAM-TSK HAZOP, (saját szerkesztés)	73
21. táblázat: Páros t-próba - szignifikancia vizsgálat (saját szerkesztés)	77

22. táblázat: Futásidő adatok - 100 000 mintára (saját szerkesztés).....	80
23. táblázat: Futásidő [sec.] - 100 000 mintára (saját szerkesztés).....	81
24. táblázat: TSK-fuzzy, antecendes és konzekvens tagja (saját szerkesztés).....	85
25. táblázat: Egy hangya mozgása i-ből, j-be	91
26. táblázat: Üzemeltetési stratégiák és súlyparaméterek (saját szerkesztés).....	96
27. táblázat: Manuális számítási plda, bemeneti értékek (saját szerkesztés).....	99
28. táblázat: Számítási példa: súlyvektorok és kockázatdetektálási paraméterek összefoglaló táblázata (saját szerkesztés)	102
29. táblázat: A számítási feladat összefoglaló táblázata (saját szerkesztés)	103

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A hidrogén biztonsági kihívásai (saját szerkesztés)	8
2. ábra: Kutatási területem fókuszai (saját szerkesztés)	8
3. ábra: Az intelligens HAZOP (iHAZOP) legfontosabb elemei (saját szerkesztés).	10
4. ábra: A Hydrogen Incident Severity Indicator (HISI) legfontosabb elmei (saját szerkesztés).	10
5. ábra: Hidrogénbalesetek száma - évtizedes bontásban (saját szerkesztés)[26][27][28][29][30][31][32]	17
6. ábra: Dokumentált és validált adatok alapján a hidrogénbalesetek arányszámai (saját szerkesztés) [28][32].....	18
7. ábra: A hidrogénincidensek leggyakoribb végkimenetele (saját szerkesztés)[28][32]	19
8. ábra: A legtöbb halálesetet és személyi sérülést kiváltó okok (saját szerkesztés) [26- 32]	19
9. ábra: A vizsgált 13 projekt elhelyezkedése Európában (saját szerkesztés)	20
10. ábra: A vizsgált tíz projekt esetén a kockázatelemzési módszerek százalékos aránya (saját szerkesztés)	21
11. ábra: Fuzzy tagsági függvény - háromszög (saját szerkesztés)	23
12. ábra: A Boole-logika és a Fuzzy-logika szemléltetése (saját szerkesztés)	24
13. ábra: Klasszikus-fuzzy folyamatábra (saját szerkesztés).....	25
14. ábra: Előtérben a kisnyomású puffertartály és a kompresszor, háttérben az elektrolizáló [110] (szerkesztett).	29

15. ábra: A számításokhoz és a szemléltetéshez használt tesztmodell a Bükkábrányi Energiapark mintájára (saját szerkesztés).....	29
16. ábra: A HAZOP-folyamat egyszerűsített folyamatábrája (saját szerkesztés, a [43][44] alapján)	30
17. ábra: A fenti példaszabály, logikai ábrája (saját szerkesztés).....	35
18. ábra: A Matlab modell vázlata, forrás: Matlab Fuzzy Logic Designer (saját szerkesztés)	36
19. ábra: Tagsági függvények paraméterei, Matlab Fuzzy Logic Designer (saját szerkesztés)	36
20. ábra: Control surface - A kockázat értéke a nyomás és áramlás függvényében, forrás: Matlab Fuzzy Logic Designer (saját szerkesztés)	37
21. ábra: Rule Inference - a szabályok grafikus megjelenítése, forrás: Matlab Fuzzy Logic Designer (saját szerkesztés).....	37
22. ábra: Áramlási anomália szemléltetése (saját szerkesztés).....	39
23. ábra: Egy példa az anomáliafigyelés megvalósítására (saját szerkesztés).....	41
24. ábra: Szintetikus adatgenerálás és DataSet-megadás, forrás: MATLAB	44
25. ábra: Generált DataSet egyike, nyomás és térfogatáramlás szemléltetése, MS Excel (saját szerkesztés)	44
26. ábra: Konfúziós mátrix -a mintapéldára (saját szerkesztés)	47
27. ábra: Validációs, kockázatdetektálási-arányszámok - mintapélda (saját szerkesztés)	47
28. ábra: A Mamdany-fuzzyhoz tartozó konfúziós mátrix	48
29. ábra: A Mamdani-fuzzy logikával felépített modell kockázatdetektálási-arányszámai (saját szerkesztés)	49
30. ábra: MS Excel - adatelemzés, munkaközi anyag (saját szerkesztés)	50
31. ábra: A 10 db, 1000 mintás szintetikus DataSet, Mamdani-FIS eredményei, összevont mutatói (saját szerkesztés)	50
32. ábra: A konfúziós mátrix mutatói Mamdani-Hazop esetén (saját szerkesztés).....	51
33. ábra: A TPR, SSI és a Coverage Mamdani-HAZOP esetén (saját szerkesztés).....	52
34. ábra: Az FPR önálló ábrázolása Mamdani-HAZOP esetén (saját szerkesztés).....	52
35. ábra: Mamdani-FIS, TPR - boxplot (saját szerkesztés)	53
36. ábra: Mamdani-FIS, FPR - boxplot (saját szerkesztés)	54
37. ábra: Mamdani-FIS, SSI - boxplot (saját szerkesztés).....	54
38. ábra: Mamdani-FIS, Voverage - boxplot (saját szerkesztés).....	55

39. ábra: Mamdani-fuzzy folyamatábra [65] (saját szerkesztés)	58
40. ábra: TSK-fuzzy folyamatábra [65] (saját szerkesztés)	58
41. ábra: MATLAB: Property Editor (Fuzzy Logic Designer) - bal oldal: MAMDANI, jobb oldal: TSK.....	61
42. ábra	61
43. ábra: A TSK-alapú HAZOP modell felépítése a MATLAB rendszerben, forrás: MATLAB R2025a (saját szerkesztés)	69
44. ábra: MATLAB, TSK-fuzzy kimeneti paraméterei (saját szerkesztés)	69
45. ábra: Matlab, TSK-HAZOP, Surface megjelenítés (saját szerkesztés)	70
46. ábra: Teljesítménymérési mutatók MAMDANI- és TSK-fuzzy esetén (Saját szerkesztés)	71
47. ábra: Kockázatdetektálási mutatók - Mamdani és TSK összehasonlítás (Saját szerkesztés)	73
48. ábra: Validációs mutatók - Mamdani és TSK összehasonlítás (Saját szerkesztés) ..	74
49. ábra: Validációs mutatók és Fals Pozitív Arány (átlag. szórás) - Mamdani és TSK összehasonlítás (saját szerkesztés)	74
50. ábra: Az időmérés megvalósítása MATLAB-ban (saját szerkesztés)	80
51. ábra: Futásidő statisztikai jellemzői.....	81
52. ábra: Hangyák viselkedése a táplálékszerzés során (saját szerkesztés).....	84
53. ábra: ACS működése [82][125](saját szerkesztés)	89
54. ábra: ACS - súlyválasztási optimalizációt bemutató gráf, (saját szerkesztés)	92
55. ábra: Az ACS-FORCE egyszerűsített folyamatábrája, (saját szerkesztés).....	93
56. ábra: Optimalizálási súlyparaméterek és kapcsolódó üzemeltetési stratégiák (saját szerkesztés)	96
57. ábra: TSK és ACS integráció (saját szerkesztés)	97
58. ábra: A súlyozás szintjei, befolyása és hatása (saját szerkesztés).....	98
59. ábra: Súlyparaméterek kezelése MATLAB-ban (saját szerkesztés).....	99
60. ábra: Az algoritmus matematika folyamatábrája (saját szerkesztés)	100
61. ábra: MATLAB File Exchange - ACO [129][130]	104
62. ábra: Az optimalizálás feltételeinek és paramétereinek beállítása - MATLAB R2025a (saját szerkesztés)	105
63. ábra: ACS - konvergencia, forrás: MATLAB, MS-Excel (saját szerkesztés)	107
64. ábra: A Best Fitness és az AVG Fitness különbségének változása - mint konvergencia mutató (saját szerkesztés)	108

65. ábra: Teljesítménymérési mutatók integrált TSK és ACS esetén (Saját szerkesztés)	110
66. ábra: Konfúziós mátrix releváns mutatói (sárga: TSK+ACS; kék: TSK)(Saját szerkesztés)	110
67. ábra: A kockázatdetektálási arányok relatív változása [%] (saját szerkesztés)	111
68. ábra: A HISI-modell alapjai (saját szerkesztés)	114
69. ábra: A HISI - modell globális céljai és motivációs háttere (saját szerkesztés)	115
71. ábra:A HISI komplementer szerepe és integrálhatósága más rendszerekhez (saját szerkesztés)	115
71. ábra: A HISI-skála dimenziói, saját szerkesztés	121
72. ábra: Dimenziók - hatások és pontok, saját szerkesztés	122
73. ábra: Szintdefiníciós táblázat, saját szerkesztés	122
74. ábra: Helyszíni fotók, sorrendben balról jobbra: Kjørbo [158], Santa Clara [159], Gangneung [160]	124
75. ábra: Az esettanulmányok besorolása a HISI-skálára és a kapcsolódó quadrilemmák, saját szerkesztés	125
76. ábra: A HISI-skála alkalmazásának indoklása (saját szerkesztés)	126
77. ábra: A vizsgált esetek - kiindulási állapot a konzisztencia vizsgálathoz, saját szerkesztés	132
78. ábra: Érzékenységvizsgálat vizuális szemléltetése (saját szerkesztés)	137

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Mindenekelőtt az eletársamnak 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, aki az elképzeléseim a doktori követelmények közé szorították és fókuszálták tettek 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.

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.