

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



MISKOLCI
EGYETEM
UNIVERSITY OF MISKOLC

**SZABÁLYOZÁSI PARAMÉTEREK
ÁTHELYEZHETŐSÉGÉNEK KUTATÁSA
EMPIRIKUS ÉS DIAGNOSZTIKAI
MÓDSZEREKKEL**

TÉZISFÜZET

KÉSZÍTETTE:

Móré Ádám

Okleveles villamosmérnök

**HATVANY JÓZSEF INFORMATIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORI
ISKOLA**

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ:

Prof. Dr. Kovács László József
egyetemi tanár

TUDOMÁNYOS VEZETŐK:

Dr. Trohák Attila
egyetemi docens

Dr. Rabab Benotsmane
egyetemi docens

Miskolc, 2026

Tartalomjegyzék

1.	BEVEZETÉS	1
1.1.	A TÉMA AKTUALITÁSA ÉS A TUDOMÁNY JELENLEGI ÁLLÁSA 1	
1.1.	A DISSZERTÁCIÓ CÉLJA	3
2.	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	5
2.1.	EMPIRIKUS MIGRÁCIÓS ADATBÁZIS.....	5
2.1.1.	MÓDSZERTANI PROBLÉMAFELVETÉS.....	5
2.1.2.	KUTATÁSI EREDMÉNYEK.....	6
2.1.3.	I. TÉZIS MEGFOGALMAZÁSA	7
2.2.	HÁROMLÉPCSŐS DIAGNOSZTIKAI PIPELINE	8
2.2.1.	MÓDSZERTANI PROBLÉMAFELVETÉS.....	8
2.2.2.	KUTATÁSI EREDMÉNYEK.....	9
2.2.3.	II. TÉZIS ÉS ALTÉZISEK MEGFOGALMAZÁSA	10
2.3.	MIGRÁLHATÓSÁG KVANTITATÍV DÖNTÉSTÁMOGATÁSA	11
2.3.1.	MÓDSZERTANI PROBLÉMAFELVETÉS.....	11
2.3.2.	KUTATÁSI EREDMÉNYEK.....	12
2.3.3.	III. TÉZIS ÉS ALTÉZISEK MEGFOGALMAZÁSA	14
2.4.	MCDM ÉS TOPSIS ALAPÚ MIGRÁLHATÓSÁGI FORMALIZÁLÁS ÖSSZEHASONLÍTÁSA	16
2.4.1.	MÓDSZERTANI PROBLÉMAFELVETÉS.....	16
2.4.2.	KUTATÁSI EREDMÉNYEK.....	16
2.4.3.	IV. TÉZIS MEGFOGALMAZÁSA	18
3.	ÖSSZEFOGLALÁS.....	20
4.	SAJÁT PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA	23
4.1.	A DISSZERTÁCIÓHOZ KÖTHETŐ INDEXÁLT PUBLIKÁCIÓK	23
4.2.	A DISSZERTÁCIÓHOZ KÖTHETŐ EGYÉB PUBLIKÁCIÓK	23

5. FELHASZNÁLT IRODALMAK 25

1. BEVEZETÉS

1.1. A téma aktualitása és a tudomány jelenlegi állása

A programozható logikai vezérlők az ipari automatizálás meghatározó komponensei, és a 21. században is a megbízható, determinisztikus folyamatirányítás egyik alapplatformját jelentik. A PLC-alapú rendszerek hosszú élettartamúak: gyakran több mint egy évtizeden keresztül ugyanazon hardver- és firmware-környezetben üzemelnek, miközben a kapcsolódó technológiai folyamat, a vezérlőprogram és a szabályozási paraméterek üzemi tapasztalatok alapján fokozatosan validálódnak [1]–[5]. Ez a gyakorlat iparilag racionális, ugyanakkor szükségszerűen magában hordozza az elavulás problémáját is.

A korszerűsítés, a támogatás megszűnése, a perifériák cseréje vagy a gyártósori integráció miatt a PLC-architektúraváltás előbb-utóbb elkerülhetetlenné válik. A gyakorlatban ilyenkor gyakran az történik, hogy a meglévő vezérlőprogramot és az ahhoz tartozó PI-paramétereket a mérnökök változtatás nélkül viszik át az új CPU-, firmware- vagy analóg I/O-környezetbe. Ez a feltételezés abból indul ki, hogy ha a fizikai folyamat és a magas szintű vezérlési logika változatlan, akkor a zárt hurkú szabályozási viselkedésnek is változatlanoknak kell maradnia. A migrációs szakirodalom azonban elsősorban a programkonverzió, a platform-kompatibilitás és a szabványalapú átalakítás kérdéseire koncentrálnak, a zárt hurkú dinamikai ekvivalenciát pedig többnyire nem kezeli önálló problémaként [6]–[9].

A kérdés azért kritikus, mert a PI-szabályozó diszkrét idejű implementációja nem csak az elméleti algoritmustól, hanem a

ciklusidőtől, a kvantálási lépcsőktől, az analóg-digitális és digitális-analóg átalakítástól, valamint a végrehajtási környezet időzíteni sajátosságaitól is függ. A klasszikus modellalapú szabályozástechnika ugyan alkalmas egy adott rendszer leírására, de PLC-architektúraváltás esetén a teljes zárt hurkú rendszer pontos modellje a gyakorlatban nem írható fel megbízhatóan. A kvantálás, a mintavételi jitter és a belső végrehajtási eltérések a rendszer effektív diszkrét dinamikáját módosíthatják akkor is, ha a folyamat és a szabályozó formális szerkezete változatlan marad [10]–[12].

A PI-szabályozás mind tudományos, mind ipari szempontból továbbra is releváns. PLC-alapú környezetben a PI-struktúra robusztussága, egyszerű paramétereizhetősége és determinisztikus végrehajtása miatt széles körben alkalmazott maradt. Pinto és munkatársai kimutatták, hogy a PLC-ben megvalósított PI-szabályozás jól illeszthető ipari korlátozásokhoz [13], Panchal és munkatársai pedig szintszabályozási környezetben igazolták a PI-megoldás gyakorlati használhatóságát [14]. Huba eredményei arra is rámutattak, hogy a PID deriváló ága zajérzékeny, ezért sok ipari alkalmazásban a tényleges megvalósítás PI-szerűvé válik [15].

A klasszikus és adaptív hangolási módszerek ugyanakkor nem a paraméterek invarianciáját vizsgálják, hanem kifejezetten új paraméterkészlet előállítására törekcsenek. Az autotuning és optimalizációs megközelítések a célrendszer válasza alapján újraszámítják, vagy módosítják a paramétereket, vagyis implicit módon maguk is abból indulnak ki, hogy az eredeti paraméterkészlet más architektúrán nem feltétlenül marad érvényes. Ez jól látható a ciklusidőre

és a numerikus implementációra érzékeny módszerekben, valamint a neurális, fuzzy, GA- és PSO-alapú eljárásokban is [16]–[24].

A fentiek alapján a PI-paraméterek migrálhatósága nem kezelhető pusztán implementációs részletként. Tudományos értelemben zárt hurkú dinamikai kompatibilitási problémáról van szó, amelyben azt kell megítélni, hogy a referenciaarchitektúrán validált paraméterkészlet mennyiben őrzi meg viselkedési tulajdonságait egy új PLC-architektúrán. Erre a szakirodalomban nem áll rendelkezésre általános, folyamatfüggetlen és kvantitatív módszertan. Ez a hiány indokolta kutatásom kiindulópontját és a modellfüggetlen, empirikus, majd diagnosztikai és döntéstámogató irányba épített vizsgálati keretrendszer kidolgozását.

1.1. A disszertáció célja

Kutatásom célja a PI-szabályozóparaméterek migrálhatóságának vizsgálata PLC-architektúraváltás esetén, különös tekintettel arra a gyakori ipari helyzetre, amikor a vezérlőprogram és a hozzá tartozó PI-paraméterek változtatás nélkül kerülnek át egy új hardver- és firmware-környezetbe. A dolgozat központi kérdése az volt, hogy a zárt hurkú szabályozási viselkedés milyen mértékben marad meg különböző CPU-, firmware- és analóg I/O-konfigurációk esetén azonos PI-paraméterek mellett.

Ennek érdekében elsőként olyan kontrollált, reprodukálható laboratóriumi környezetet alakítottam ki, amelyben a szabályozási kör minden nem PLC-hez kötődő eleme változatlan maradt, így az eltérések közvetlenül a vezérlőoldali architektúraváltásra vezethetők vissza. E

környezetben empirikus adatbázist hoztam létre több CPU-, firmware- és I/O-felbontás kombinációjával.

További céloom egy olyan folyamatfüggetlen, zárt hurkú diagnosztikai módszer kidolgozása volt, amely nem igényli a fizikai folyamat explicit matematikai modelljét, mégis képes feltárni a migráció szempontjából releváns stabilitási, dinamikai és felhalmozási eltéréseket. Ezt követően a diagnosztikai eredményeket egységes döntési térbe rendezve kívántam megalkotni a migrálhatóság kvantitatív értékelésének formalizált, többkritériumos keretét, majd azt geometriai alapú TOPSIS-rangsorolással összevetni.

A disszertáció végső célja egy olyan gyakorlatorientált, ugyanakkor tudományosan megalapozott módszertan létrehozása volt, amely támogatja a PLC-cserékhez kapcsolódó mérnöki döntéseket, csökkenti az utólagos újrahangelés bizonytalanságát, és objektív alapot ad annak megítéléséhez, hogy egy adott PI-paraméterkészlet változtatás nélkül migrálható-e, finomhangolást igényel-e, vagy újraparaméterezést tesz szükségessé.

2. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Az alábbi fejezetben a módszertani problémafelvetések, az elért új tudományos eredmények és a tézisek kerülnek bemutatásra.

2.1. Empirikus migrációs adatbázis

2.1.1. Módszertani problémafelvetés

Az empirikus bizonyítás elsődleges módszertani problémája abból fakadt, hogy a szakirodalom ugyan részletesen tárgyalja a PLC-programmigráció technikai kérdéseit, de a PI-paraméterek változtatás nélküli átvitelének dinamikai következményeiről csak közvetett információkat ad. Sergejev és munkatársai, Holtrop és munkatársai, valamint a szabványalapú migrációt vizsgáló szerzők is elsősorban a programkonverzióra, a kompatibilitásra és a validációra koncentráltak [6]–[9]. E munkákból az látszik, hogy platformváltás után gyakran szükség van kézi beavatkozásra, de nem áll rendelkezésre olyan empirikus adatbázis, amely azonos PI-paraméterek mellett, kontrollált feltételek között mutatná meg a zárt hurkú viselkedés módosulását.

A probléma másik oldala az volt, hogy a migráció hatását a lehető legtisztábban kellett izolálni. Egy valós ipari folyamat esetén a szenzorok, beavatkozók, zavarások és terhelésváltozások elfedhetik vagy torzíthatják az architektúraváltásból eredő különbségeket. Ezért olyan referenciaarchitektúrára és olyan egyszerű, szenzormentes elsőrendű folyamatmodellre volt szükség, amelyben a mérési lánc bizonytalansága

minimalizálható, miközben a PI-szabályozás szempontjából releváns amplitúdó-, idő- és hibaalapú eltérések számszerűsíthetők maradnak.

2.1.2. Kutatási eredmények

A vizsgálatokhoz egy RC-taggal reprezentált, elsőrendű, szenzormentes folyamatmodellt alkalmaztam, amelyhez rögzített PI-paraméterkészlet tartozott. A Basic referenciaarchitektúrához képest összesen tizenöt további Case-konfigurációt vizsgáltam; ezek a CPU-típus, a firmware-verzió, valamint az analóg bemeneti és kimeneti modulok felbontása szerint különböztek egymástól. A teljes mérési protokoll során azonos referenciajeleket, azonos ciklusidőt és azonos numerikus feldolgozást használtam, így a megfigyelt különbségek kizárólag a PLC-architektúra módosulásának tulajdoníthatók.

A szinuszos gerjesztés alkalmasnak bizonyult a kvázi-stacionárius követési viselkedés, a fáziseltolódás, az amplitúdócsillapodás és az integrált hibák összehasonlítására. A négyszögjeles gerjesztés ezzel szemben érzékenyen feltárta a tranziens szakasz változásait, így a túllövés, a felfutási idő, a beállási idő és a jelalak torzulásai egyaránt számszerűen összevethetők voltak. Az eredmények egyértelműen igazolták, hogy azonos PI-paraméterek mellett a zárt hurkú válasz több konfigurációban mérhető és reprodukálható módon eltért a referenciaarchitektúrától.

Kimutattam, hogy a migráció hatása nem egyetlen teljesítménymutató mentén jelenik meg. Egyes konfigurációkban elsősorban az amplitúdó és a fázis változott, másokban a tranziens válasz romlott, míg több esetben az integrált hibamértékek és az állandósult viselkedés módosult

jelentősen. Ebből az következett, hogy a migrálhatóság nem értelmezhető bináris tulajdonságként. Az empirikus adatbázis alapján elkülöníthetővé váltak a változtatás nélkül migrálható, a korlátozottan migrálható – azaz finomhangolást igénylő – és a nem migrálható architektúrák.

Az empirikus adatbázis módszertani jelentősége túlmutatott az első eredményen. Egyrészt bizonyította, hogy a PI-paraméterek változtatás nélküli átvitele még egyszerű laboratóriumi körülmények között sem tekinthető általánosan érvényes eljárásnak. Másrészt referenciát adott a később kidolgozott folyamatfüggetlen diagnosztikai és döntéstámogató eljárások validálásához is. Így az empirikus vizsgálatok nem csak kiindulási, hanem ellenőrző szerepet is betöltöttek a disszertáció egész szerkezetében.

2.1.3. I. tézis megfogalmazása

A referenciaarchitektúrához viszonyított 15 migrált konfiguráció vizsgálata alapján empirikus mérésekkel igazoltam, hogy azonos PI-szabályozóparaméterek alkalmazása mellett a zárt hurkú szabályozási viselkedés PLC-architektúraváltás esetén mérhető és reprodukálható módon módosul, még elsőrendű folyamatmodell esetén is.

A szinuszos és négyszögjeles értékkövető vizsgálatok alapján kimutattam, hogy a migráció hatása nem egyetlen teljesítménymutató mentén jelentkezik, hanem amplitúdó-, idő- és hibaalapú metriák együttes eltérésében jelenik meg. Ezzel bizonyítottam, hogy a PI-paraméterek változtatás nélküli migrációja nem tekinthető általánosan érvényes eljárásnak, és a migrálhatóság empirikusan több kategóriába

sorolható (migrálható, korlátozottan migrálható, nem migrálható), az elsőrendű folyamatmodellen végzett empirikus validáció keretei között.

A tézishoz kapcsolódó saját publikációk: [S3], [S4], [S5], [S6], [S7], [S9].

2.2. Háromlépcsős diagnosztikai pipeline

2.2.1. Módszertani problémafelvetés

Az empirikus adatbázis létrehozása igazolta a jelenség létezését, de egyben rávilágított annak korlátaira is. A fizikai folyamatra épülő laboratóriumi mérés alkalmas a migrációs probléma bizonyítására, ipari környezetben azonban nem minden esetben hajtható végre kockázatmentesen, gyorsan és gazdaságosan. Ezért olyan módszertani keretet kellett kidolgoznom, amely a migrálhatóságot a technológiai folyamat explicit modellje nélkül, kontrollált zárt hurkú környezetben vizsgálja.

A szakirodalomban a viselkedésalapú ujjlenyomat-megközelítések tipikusan black-box jellegű rendszerelemzésre épülnek. Yadav és munkatársai rámutattak, hogy a bemeneti-kimeneti viselkedésből olyan diszkriminatív jellemzők képezhetők, amelyek alkalmasak rendszerkarakter azonosítására [25], [26], [27]. A PLC-migráció problémájában ezt a szemléletet kellett átültetni úgy, hogy a vizsgálat ne új paramétereket keressen, hanem a már validált PI-paraméterkészlet kompatibilitását értékelje. A módszerrel szembeni alapkövetelmény tehát a folyamatfüggetlenség, a reprodukálhatóság és a többdimenziós viselkedés strukturált feltárása volt.

2.2.2. Kutatási eredmények

Ennek megoldására dolgoztam ki a folyamatfüggetlen, zárt hurkú, háromlépcsős diagnosztikai pipeline-t, amely a Pkrit-, a P-only- és az I-only-vizsgálatok egymásra épülő logikáján alapul. A Pkrit lépcső strukturális előszűrőként működik: az integráló ág kikapcsolásával meghatározható az a kritikus arányos erősítés, amely mellett a zárt hurkú diszkrét rendszer határstabil állapotba kerül. A referenciaarchitektúrához képest mért eltolódás közvetlenül jelzi, hogy a stabilitási tartalék architektúrafüggően módosult-e.

A P-only vizsgálat a kritikus erősítéshez tartozó határstabil dinamikai karaktert rögzíti. Itt nem pusztán az a kérdés, hogy a rendszer stabil marad-e, hanem az, hogy a határstabil oszcilláció jelalakja, periódusa és amplitúdója mennyire egyezik meg a referenciaarchitektúrával. Az eredmények igazolták, hogy a határstabil válasz diagnosztikai ujjlenyomatként használható: a referenciaértékhez közeli Pkrit-et mutató architektúrák dinamikai mintázata is közel maradt a Basic rendszerhez, míg a jelentős stabilitási eltolódást mutató konfigurációk oszcillációs karaktere markánsan módosult.

Az I-only vizsgálat során az arányos ágat kapcsoltam ki, és fix, kis K_i érték mellett kizárólag az integráló ág felhalmozási viselkedését vizsgáltam. Ez a lépcső érzékenyen tárta fel a mintavételi, kvantálási és numerikus implementációs eltéréseket, mert a hibajel diszkrét idejű összegzése kumulatív módon erősíti fel a legkisebb architektúrakülönbségeket is. A válaszfüggvényekből az állandósult hiba, a beállási idő, a felhalmozási sebesség és az esetleges drift egyaránt jól elkülöníthetővé vált.

A pipeline három lépcsője együtt már nem csak azt mutatta meg, hogy a migráció problémát okozhat, hanem azt is, hogy a probléma mely dimenzióban jelenik meg legerősebben. A Pkrit a stabilitási struktúra eltolódását, a P-only a határstabil dinamikai karakter módosulását, az I-only pedig az integráló ág felhalmozási mechanizmusának eltérését ragadta meg. Így a migrálhatóság többdimenziós, viselkedésalapú értelmezése vált lehetővé, amely közvetlenül megalapozta a későbbi kvantitatív formalizálást.

2.2.3. II. tézis és altézisek megfogalmazása

Kidolgoztam és empirikusan validáltam egy folyamatfüggetlen, zárt hurkú, háromlépcsős diagnosztikai módszert (Pkrit – P-only – I-only), amely alkalmas a PI szabályozóparaméterek PLC-architektúraváltás melletti migrálhatóságának strukturált vizsgálatára.

II/1. altézis.

Kimutattam, hogy a PI-paraméterek változtatás nélküli migrációja PLC-architektúraváltás esetén a zárt hurkú diszkrét rendszer stabilitási határát architektúrafüggő módon módosíthatja. A kritikus arányos erősítés empirikus meghatározásával 16 PLC-konfiguráció esetében igazoltam, hogy a Pkrit vizsgálat a diagnosztikai módszer strukturális előszűrő elemeként alkalmazható.

II/2. altézis.

Igazoltam, hogy a határstabil dinamikai karakter P-only konfigurációban a referencia- és célarchitektúra között eltérhet, ami a zárt hurkú diszkrét pólusstruktúra és az effektív dinamika architektúrafüggő módosulására utal. A határstabil válasz jelalakja, oszcillációs karaktere és dinamikai mintázata diagnosztikai ujjlenyomatként használható a migrálhatóság vizsgálatában.

II/3. altézis.

Kimutattam, hogy az integráló ág felhalmozási viselkedése I-only konfigurációban érzékenyen reagál az architektúrafüggő mintavételi, kvantálási és numerikus megvalósítási különbségekre. A felhalmozási dinamika és az állandósult viselkedés eltéréseinek feltárásával a diagnosztikai módszer kiemelten informatív harmadik elemét képezi.

A fentiek alapján igazoltam, hogy a módszer a stabilitási viszonyok, a határstabil dinamikai karakter és az integráló ág felhalmozási viselkedésének elkülönített vizsgálata révén reprodukálható és differenciáló diagnosztikai képet ad a vizsgált architektúrákról.

A tézishoz kapcsolódó saját publikációk: [S1], [S2], [S3], [S8].

2.3. Migrálhatóság kvantitatív döntéstámogatása

2.3.1. Módszertani problémafelvetés

A diagnosztikai pipeline igazolta, hogy a migrálhatóság nem egyetlen számértékkel leírható jelenség. A különböző architektúrák közötti eltérések stabilitási, dinamikai és hibaalapú metriák együttesében

jelennek meg, ezek pedig részben korrelálnak, részben konfliktusos kapcsolatban állnak egymással. Emiatt a migrálhatóság értékelése természeténél fogva többkritériumos döntési probléma, amelyben nem elegendő egyetlen kedvező vagy kedvezőtlen metriára támaszkodni.

A többkritériumos döntéstámogatás módszertana erre a problémára alkalmas matematikai keretet ad. A szakirodalom alapján az MCDM-megközelítések különösen akkor indokoltak, amikor több, eltérő fizikai jelentésű kritériumot kell egységes döntési térbe rendezni [28], [29]. A migrálhatóság esetében az alapfeladat az volt, hogy a Pkrit-, P-only- és I-only-vizsgálatokból származó különböző nagyságrendű és jelentésű metriákat közös, összehasonlítható formára hozzam, majd ezekből objektív kompatibilitási mutatót képezzek.

2.3.2. Kutatási eredmények

A formalizálás első lépéseként minden metriára a referenciaarchitektúrához viszonyított relatív eltérést definiáltam. A kulcsképlet az alábbi alakban írható fel:

$$\delta_{ij} = |x_{ij} - x_{0j}| / |x_{0j}|$$

A relatív eltérések oszloponkénti normalizálásával és egyenlő súlyok alkalmazásával olyan egységes döntési mátrixot hoztam létre, amelyben minden kritérium azonos skálán és azonos jelentőséggel szerepel. A diagnosztikai pipeline logikájával összhangban nem teljesítményoptimalizálási, hanem viselkedési kompatibilitási indexet képeztem, amely a súlyozott normalizált eltérések összegeként értelmezhető:

$$C_i = \sum v_{ij}$$

Az így definiált C_i kompatibilitási index 0 és 1 közötti dimenziótlan mennyiség. A 0 érték a referenciaarchitektúrával való teljes egyezést, a növekvő érték pedig egyre nagyobb globális eltérést jelent. A számított indexek eloszlása nem lineáris, hanem klaszterszerű szerkezetet mutatott, ezért a kategorizálást nem önkényes küszöbértékekre, hanem a minta statisztikai szerkezetére, vagyis a mediánra és a kvartilisekre alapoztam. Ennek eredményeként négyzónás migrálhatósági felosztást vezettem be.

A zónastruktúra a referenciaarchitektúrához legközelebb álló Z1 tartománytól a strukturálisan inkompatibilis Z4 tartományig rendezi az architektúrákat. A 6. fejezet eredményeivel összhangban a Z1 zónába tartozó konfigurációk a referenciaarchitektúrához legközelebb eső viselkedést mutatták, a Z2 és Z3 zónák a finomhangolást igénylő vagy korlátozottan migrálható eseteket reprezentáltak, míg a Z4 zóna a legnagyobb globális eltérést mutató architektúrákat foglalta magában.

A kvantitatív formalizálás lényegi eredménye az volt, hogy a korábban empirikusan azonosított migrációs kategóriákat objektív, reprodukálható és folyamatfüggetlen döntési keretben sikerült újra előállítani. A modell nem pusztán utólagos numerikus címkézést adott az empirikus eredményekre, hanem azok szerkezetét is megőrizte: minél nagyobb volt a stabilitási, dinamikai és hibaalapú összegzett eltérés, annál kedvezőtlenebb zónába került az adott architektúra.

1. táblázat: MCDM-alapú migrálhatósági zónák definiálása

Migrálhatósági zóna	Zóna definíciója
Z1 (erősen migrálható)	$C_i \leq Q1$
Z2 (migrálható)	$Q1 < C_i \leq \check{C}$
Z3 (korlátozottan migrálható)	$\check{C} < C_i \leq Q3$
Z4 (nem migrálható)	$C_i > Q3$

2. táblázat: A vizsgált architektúrák MCDM-alapú kompatibilitási indexe és zónabesorolása

PLC-konfiguráció	C_i érték	Zóna
Basic: PFC1001212	0	Z1
Case1: PFC100 1210	0,05366	Z1
Case2: PFC100 1612	0,5739	Z4
Case3: PFC100 1610	0,3870	Z3
Case4: PFC100FW 1212	0,3112	Z3
Case5: PFC100FW 1210	0,1823	Z1
Case6: PFC100FW 1216	0,5380	Z4
Case7: PFC100FW 1612	0,2078	Z2
Case8: PFC100FW 1610	0,2953	Z2
Case9: PFC100FW 1616	0,4802	Z4
Case10: PFC200 1212	0,1995	Z1
Case11: PFC200 1210	0,2504	Z2
Case12: PFC200 1216	0,4312	Z3
Case13: PFC200 1612	0,1995	Z1
Case14: PFC200 1610	0,2551	Z2
Case15: PFC200 1616	0,4461	Z4

A fenti táblázatok alapján jól látható, hogy a többkritériumos kompatibilitási index a referenciaarchitektúrától való globális viselkedési eltérést nem egyetlen metriára, hanem a teljes diagnosztikai ujjlenyomatra alapozva fejezi ki. A zónabesorolás konzisztensen visszaadta az empirikusan megfigyelt viselkedési különbségeket.

2.3.3. III. tézis és altézisek megfogalmazása

Az általam kidolgozott diagnosztikai módszerből származó metriák egységes döntési térbe rendezésével formalizáltam a PI szabályozóparaméterek PLC-architektúraváltás melletti migrálhatóságának kvantitatív értékelését.

Igazoltam, hogy a referenciaarchitektúrához viszonyított relatív eltérések alapján globális kompatibilitási index képezhető, amely

alkalmas a vizsgált architektúrák migrálhatóságának objektív, reprodukálható és folyamatfüggetlen jellemzésére.

III/1. altézis.

Kimutattam, hogy a Pkrit, P-only és I-only diagnosztikai vizsgálatokból származó stabilitási, dinamikai és hibalapú jellemzők egységes metriatérbe rendezhetők. Igazoltam, hogy a különböző fizikai jelentésű metriák referenciaarchitektúrához viszonyított relatív eltérésként történő felírása lehetővé teszi azok közös, összehasonlítható és normalizálható kezelését.

III/2. altézis.

Igazoltam, hogy a normalizált diagnosztikai eltérésekből többkritériumos kompatibilitási index képezhető, amely a vizsgált architektúrák globális viselkedési eltérését egyetlen kvantitatív mutatóban fejezi ki. Kimutattam, hogy ez az index a migrálhatóságot nem egyedi metriák mentén, hanem a teljes diagnosztikai viselkedés összegzett szerkezete alapján értékeli.

III/3. altézis.

16 PLC-konfiguráció vizsgálata alapján igazoltam, hogy a kompatibilitási index adatvezérelt zónastruktúrába rendezhető, ahol a kvartilis-alapú határképzés a diagnosztikai tér természetes eloszlását tükrözi. Kimutattam, hogy a kialakult zónák konzisztensen reprodukálták az empirikusan azonosított

architektúrák közötti különbségeket, ezáltal folyamatfüggetlen osztályozási keretrendszer adnak a migrálhatóság értékelésére.

A tézishoz kapcsolódó saját publikációk: [S2].

2.4. MCDM és TOPSIS alapú migrálhatósági formalizálás összehasonlítása

2.4.1. Módszertani problémafelvetés

A kompatibilitási index bevezetése után szükségessé vált annak ellenőrzése is, hogy a migrálhatóság kvantitatív értékelésére szolgáló lineáris MCDM-formalizálás mennyiben tekinthető strukturálisan stabil döntési modellnek. A többkritériumos döntéstámogatás szakirodalma alapján erre alkalmas összevetési pontot jelent a TOPSIS, amely az alternatívák ideális és negatív ideális ponttól mért euklideszi távolsága alapján állít fel rangsort [29], [30], [31].

A módszertani kérdés itt már nem az volt, hogy a migrálhatóság formálisan leírható-e, hanem az, hogy a lineáris, súlyozott aggregáció vagy a geometriai normán alapuló rangsorolás ad-e robusztusabb és mérnökiileg jobban értelmezhető képet. A cél nem új metriakészlet kialakítása volt, hanem ugyanazon diagnosztikai döntési tér két különböző formalizálásának összevetése.

2.4.2. Kutatási eredmények

A TOPSIS-értékelés a korábban létrehozott súlyozott normalizált döntési mátrixra épült. A pozitív ideális pont a referenciaarchitektúrához legközelebb eső viselkedést, a negatív ideális pont pedig a

legkedvezőtlenebb kombinációt reprezentálta. A relatív közelségi mutatót a következő kulcsképlet adja meg:

$$T_i = S_i^- / (S_i^+ + S_i^-)$$

A T_i mutató esetében a nagyobb érték kedvezőbb migrálhatóságot jelent. A kvartilis-alapú zónabesorolás alapján a TOPSIS önálló, geometriai elven működő rangsort eredményezett, amely különösen a szélső, markánsan inkompatibilis esetek felismerésében bizonyult hasznosnak. A legkedvezőtlenebb konfigurációk – például a 16 bites kimeneti irányba eltolódó és firmware-váltással kombinált esetek – a TOPSIS szerint is következetesen a Z4 tartományba kerültek.

A részletes összehasonlítás ugyanakkor azt mutatta, hogy a középmezőnyben a TOPSIS kevésbé stabil, mint a lineáris kompatibilitási index. Míg az MCDM-alapú C_i értékek a diagnosztikai pipeline logikájával összhangban, egyenletesebben képezték le a migrálhatósági spektrumot, addig a TOPSIS euklideszi szerkezete érzékenyebben reagált egyes domináns eltérésekre, és a zónahatárok környezetében normageometriai torzítást okozhatott.

Ennek alapján igazoltam, hogy a TOPSIS hasznos kiegészítő validációs eszköz, de elsődleges döntési modellként a lineáris, súlyozott MCDM-formalizálás alkalmasabb. Ez a modell nemcsak kvantitatív, hanem mérnöki szempontból is jobban értelmezhető: közvetlenebb összhangban áll a Pkrit – P-only – I-only diagnosztikai pipeline belső logikájával, és stabilabban reprodukálja az empirikusan megfigyelt migrációs kategóriákat.

3. táblázat: TOPSIS-alapú migrálhatósági zónák definiálása

Migrálhatósági zóna	Zóna definíciója
Z1 (erősen migrálható)	$T_i \geq Q3$
Z2 (migrálható)	$\tilde{T} \leq T_i < Q3$
Z3 (korlátozottan migrálható)	$Q1 \leq T_i < \tilde{T}$
Z4 (nem migrálható)	$T_i < Q1$

4. táblázat: A vizsgált architektúrák TOPSIS-alapú relatív közelségi mutatója és zónabesorolása

Konfiguráció	T_i érték	Zóna
Basic: PFC1001212	0,927886	Z1
Case1: PFC100 1210	0,922965	Z1
Case2: PFC100 1612	0,564559	Z2
Case3: PFC100 1610	0,737798	Z1
Case4: PFC100FW 1212	0,606645	Z1
Case5: PFC100FW 1210	0,903083	Z1
Case6: PFC100FW 1216	0,109924	Z4
Case7: PFC100FW 1612	0,496285	Z3
Case8: PFC100FW 1610	0,490976	Z3
Case9: PFC100FW 1616	0,169645	Z4
Case10: PFC200 1212	0,490330	Z3
Case11: PFC200 1210	0,500858	Z2
Case12: PFC200 1216	0,125069	Z4
Case13: PFC200 1612	0,521934	Z2
Case14: PFC200 1610	0,496479	Z3
Case15: PFC200 1616	0,126386	Z4

Az összehasonlító elemzés alapján a lineáris, súlyozott MCDM-kompatibilitási index bizonyult a migrálhatóság elsődleges döntési modelljének, míg a TOPSIS a szélső, markánsan inkompatibilis esetek megerősítésére használható hasznos kiegészítő eszköz maradt.

2.4.3. IV. tézis megfogalmazása

Bizonyítottam, hogy a lineáris, súlyozott többkritériumos döntési modell (MCDM) a migrálhatóság értékelésére strukturálisan stabilabb és módszertanilag konzisztensebb kompatibilitási

formalizálást biztosít, mint a geometriai normán alapuló TOPSIS-rangsorolás. A lineáris modell a diagnosztikai pipeline logikájával összhangban marad és a döntési tér egészében stabilabb döntési struktúrát eredményez.

Kimutattam, hogy míg a TOPSIS a szélső inkompatibilis esetek azonosításában megerősítő szerepet tölt be, addig a geometriai norma-alapú megfogalmazás miatt a zónahatárok környezetében rangsorolási torzítást eredményezhet, amely eltérítheti a rangsort a viselkedési kompatibilitás diagnosztikai módszer által megalapozott strukturális értelmezésétől. Ezért a lineáris kompatibilitási index a migrálhatóság értékelésére módszertanilag indokoltabb és reprodukálhatóbb elsődleges döntési keretet ad.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

Disszertációmban a PI-szabályozók paramétermigrálhatóságának problémáját vizsgáltam PLC-architektúraváltás esetén, modellfüggetlen módszertani keretben. Kutatásom kiindulópontját az a széles körben alkalmazott ipari gyakorlat jelentette, hogy egy működő rendszer vezérlőprogramját és a hozzá tartozó PI-paramétereket sok esetben változtatás nélkül viszik át új hardver- és firmware-környezetbe. Szisztematikus irodalmi áttekintésem alapján megállapítottam, hogy a szakirodalom ugyan részletesen foglalkozik a PLC-programmigráció, a szabályozóhangolás és a klasszikus, illetve adaptív módszerek kérdésével, a PI-paraméterek változtatás nélküli migrációját, mint zárt hurkú dinamikai kompatibilitási problémát azonban nem kezeli önálló kutatási területként.

Az empirikus szakaszban kontrollált és reprodukálható laboratóriumi környezetet alakítottam ki, amelyben a szabályozási kör minden, a PLC-től független eleme változatlan maradt. A referenciaarchitektúrához viszonyítva több CPU-, firmware- és analóg I/O-konfigurációt vizsgáltam azonos PI-paraméterek, azonos ciklusidő és azonos gerjesztések mellett. Szinuszos és négyszögjeles értékkövető vizsgálatokkal igazoltam, hogy a PI-paraméterek változtatás nélküli migrációja még egyszerű, elsőrendű, szenzormentes folyamatmodell esetén sem tekinthető általánosan érvényes eljárásnak: a zárt hurkú válasz amplitúdója, időkarakterisztikája és hibaszerkezete architektúrafüggően módosul.

Az empirikus adatbázis alapján azt is kimutattam, hogy a migrálhatóság nem bináris tulajdonság, hanem fokozatos jelenség. A vizsgált konfigurációk migrálható, korlátozottan migrálható és nem migrálható csoportokba rendezhetők. Ez a felismerés egyben rávilágított az empirikus eljárás korlátjára is: bár a fizikai folyamatra épülő mérés alkalmas a jelenség bizonyítására, ipari környezetben nem mindig hajtható végre kockázatmentesen és gazdaságosan.

Ebből kiindulva dolgoztam ki a folyamatfüggetlen, zárt hurkú, viselkedésalapú diagnosztikai keretrendszert. A háromlépcsős Pkrit – P-only – I-only pipeline lehetővé tette, hogy a migrálhatóságot ne egyetlen mérőszám, hanem a stabilitási határ, a határstabil dinamikai karakter és az integráló ág felhalmozási viselkedése alapján, strukturált módon értelmezsem. Az eredmények megmutatták, hogy a PLC-architektúraváltás nem csupán kismértékű teljesítményromlást, hanem a zárt hurkú effektív diszkrét dinamika szerkezeti átrendeződését is eredményezheti.

A diagnosztikai eredményeket egységes döntési térbe rendezve formalizáltam a migrálhatóság kvantitatív értékelését. A referenciaarchitektúrához viszonyított relatív eltérésekből globális kompatibilitási indexet képeztem, majd azt adatvezérelt, kvartilisalapú zónákba rendeztem. Ezzel a migrálhatóságot sikerült a mérnöki intuíció szintjéről objektív, reprodukálható és többkritériumos döntési keretbe emelni. A lineáris MCDM-formalizálást TOPSIS-alapú geometriai rangsorolással is összevettem; eredményeim szerint a TOPSIS megerősítő szerepet tölt be a szélső inkompatibilis esetek felismerésében,

ugyanakkor a teljes migrálhatósági spektrum stabil leírására a lineáris kompatibilitási index alkalmasabb.

A dolgozat legfontosabb eredményének azt tekintem, hogy a PI-paraméterek PLC-architektúraváltás melletti migrálhatóságát sikerült egységes, többlépcsős, modellfüggetlen és kvantitatívan értelmezhető tudományos keretrendszerbe emelni. A kutatás gyakorlati jelentősége abban áll, hogy a módszer hozzájárulhat a PLC-cserékhez kapcsolódó szabályozási kockázatok, állásidők és újrahangolási bizonytalanságok csökkentéséhez. További kutatási iránynak tartom a módszer kiterjesztését más PLC-családokra, eltérő gyártói architektúrákra, valamint összetettebb ipari folyamatokra és szabályozási struktúrákra.

4. SAJÁT PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA

4.1. A disszertációhoz köthető indexált publikációk

- [S1] Á. Mór , R. Benotsmane, A. Trohák, “Evaluating the effects of PID control parameter migration in PLC upgrades,” *Pollack Periodica*, vol. 20, no. 3, pp. 96–102, May 2025, <https://doi.org/10.1556/606.2025.01213>
- [S2]  . M r , “A Closed-Loop Diagnostic Method for Evaluating PI Controller Parameter Migration Across Architectures,” *J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 39–44, 2025, <https://doaj.org/article/ae28e064ae5c4258b61646a9509c13dc>
- [S3] A. More, A. Trohak, “Examination of the possibility of adapting the PI algorithm,” *Proceedings of the 2023 24th International Carpathian Control Conference, ICC 2023*, pp. 289–293, 2023, <https://doi.org/10.1109/ICCC57093.2023.10178954>
- [S4]  . M r , „PID algoritmus algoritmiz l sa ir ny t rendszerekben,” *Multidiszciplin ris Tudom nyok*, vol. 12, no. 1, pp. 46–57, May 2022, <https://doi.org/10.35925/j.multi.2022.1.4>

4.2. A disszertációhoz k thet  egyéb publikációk

- [S5]  . M r , A. Trohák, “PI algoritmus adoptálásának vizsgálata intelligens adatgyűjtő módszerrel,” in *XXVI. Tavasz  Sz l Konferencia 2023*, Miskolc: Doktoranduszok Országos Szövetsége (DOSZ), 2023, pp. 413–423.
- [S6]  . M r , A. Trohák, “Szabályozandó szakasz digitális modelljének algoritmizálása ipari vezérlő környezetben,” in *Doktoranduszok fóruma*,

Miskolc: Miskolci Egyetem Tudományos és Nemzetközi Igazgatóság, Nov. 2024, pp. 75–78.

[S7] Á. Mór , “Ipari automatizálás új szintje: Siemens S7-300  s S7-1500 PLC-k közötti migráció lehetőségei és kihívásai,” in 120 éves az Elektrotechnikai  s Elektronikai Intézeti Tanszék elnevezésű Jubileumi Konferencia kiadványa, Miskolc, 2024, pp. 138–141.

[S8] Á. Mór , B. L. Bódi, “PID szabályozó modellezése PLC kimeneti és bemeneti oldalain: kártyacsere hatásának vizsgálata,” in 120 éves az Elektrotechnikai  s Elektronikai Intézeti Tanszék elnevezésű Jubileumi Konferencia kiadványa, Miskolc, 2024, pp. 122–129.

[S9] Á. Mór , A. Trohák, “PI, PID algoritmus paramétereinek adaptálásának vizsgálata genetikus algoritmussal,” in PCS Science 2023: Konferencia kiadvány, Miskolc: Eclipse Solutions Ltd, 2023, pp. 49–56.

5. FELHASZNÁLT IRODALMAK

- [1] K. C. Yao, C. L. Lin, és C. H. Pan, „Industrial Sustainable Development: The Development Trend of Programmable Logic Controller Technology”, *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 6230, köt. 16, sz. 14, o. 6230, júl. 2024, <https://doi.org/10.3390/su16146230>
- [2] M. Foster és C. Hammerquist, „A review of Programmable Logic Controllers in control systems education”, *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, 2010, <https://doi.org/10.18260/1-2--16238>
- [3] E. L. Cesar, G. S. Fernandes, M. T. N. Kagami, és T. N. Calisto, „Technological obsolescence management of electrical equipment and automation systems”, 2019 *IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee Conference, PCIC 2019*, o. 303– 310, szept. 2019, <https://doi.org/10.1109/PCIC30934.2019.9074525>.
- [4] E. V. Nascimento, V. dos Santos, és R. V. Aroca, „An Applied Approach for Integrating Legacy PLC-Based Systems into Industry 4.0 Environments using Low-Code Platforms”, jan. 2026, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-8503985/v1>
- [5] A. Alqoud, D. Schaefer, és J. Milisavljevic-Syed, „Industry 4.0: a systematic review of legacy manufacturing system digital retrofitting”, *Manuf. Rev. (Les. Ulis)*., köt. 9, o. 32, 2022, <https://doi.org/10.1051/mfreview/2022031>
- [6] A. Sergejev, S. Thompson, L. Stambeck, A. Posa, és P. Hazaveh, „Efficient Way of Converting outdated Allen Bradley PLC-5 System into Modern ControlLogix 5000 suit”, júl. 2020, <https://doi.org/10.18260/1-2-370.620-35989>
- [7] K. L. Holtrop, P. A. Anderson, és P. S. Mauzey, „Improvements to the cryogenic control system on DIII-D”, *Proceedings - Symposium on Fusion Engineering*, o. 401– 404, 2003, <https://doi.org/10.1109/fusion.2003.1426669>
- [8] S. M. Salman, A. V. Papadopoulos, S. Mubeen, és T. Nolte, „A systematic migration methodology for complex real-Time software systems”, *Proceedings - 2020 IEEE*

- 23rd International Symposium on Real-Time Distributed Computing, ISORC 2020, o. 192–200, máj. 2020, <https://doi.org/10.1109/ISORC49007.2020.00041>
- [9] W. W. Dai, V. N. Dubinin, és V. Vyatkin, „Migration from PLC to IEC 61499 Using Semantic Web Technologies”, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.*, köt. 44, sz. 3, o. 277–291, márc. 2014, <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2013.2264671>
- [10] D. F. Delchamps, „Stabilizing a Linear System with Quantized State Feedback”, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, köt. 35, sz. 8, o. 916–924, 1990, <https://doi.org/10.1109/9.58500>
- [11] W. Zhang, M. S. Branicky, és S. M. Phillips, „Stability of networked control systems”, *IEEE Control Systems Magazine*, köt. 21, sz. 1, o. 84–97, 2001, <https://doi.org/10.1109/37.898794>
- [12] W. Yu, D. I. Wilson, és B. R. Young, „Control performance assessment in the presence of sampling jitter”, *Chemical Engineering Research and Design*, köt. 90, sz. 1, o. 129–137, jan. 2012, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.06.007>
- [13] J. E. M. G. Pinto és mtsai., „PLC Implementation of Piecewise Affine PI Controller Applied to Industrial Systems with Constraints”, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems 2019 30:3*, köt. 30, sz. 3, o. 311–322, febr. 2019, <https://doi.org/10.1007/s40313-019-00456-z>
- [14] P. Panchal, A. Patel, és J. Barve, „PI control of level control system using PLC and LabVIEW based SCADA”, *2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control, ICIC 2015*, o. 1196–1201, júl. 2015, <https://doi.org/10.1109/IIC.2015.7150929>
- [15] M. Huba, „Filter choice for an effective measurement noise attenuation in PI and PID controllers”, *Proceedings - 2015 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2015*, o. 46–51, ápr. 2015, <https://doi.org/10.1109/ICMECH.2015.7083946>

- [16] K. H. Kim, J. E. Bae, S. C. Chu, és S. W. Sung, „Improved Continuous-Cycling Method for PID Autotuning”, *Processes* 2021, Vol. 9, Page 509, köt. 9, sz. 3, o. 509, márc. 2021, <https://doi.org/10.3390/pr9030509>
- [17] I. Naşcu, R. De Keyser, S. Folea, és T. Buzdugan, „Development and evaluation of a PID auto-tuning controller”, *2006 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, AQTR*, o. 122–127, 2006, <https://doi.org/10.1109/AQTR.2006.254510>
- [18] J. Lima, R. Menotti, J. M. P. Cardoso, és E. Marques, „A methodology to design FPGA-based PID controllers”, *Conf. Proc. IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern.*, köt. 3, o. 2577–2583, 2006, <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2006.385252>
- [19] L. L. T. Chan, T. Chen, és J. Chen, „PID based nonlinear processes control model uncertainty improvement by using Gaussian process model”, *J. Process Control*, köt. 42, o. 77–89, jún. 2016, <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2016.03.006>
- [20] S. Ganjefar és M. Farahani, „Damping of subsynchronous resonance using self-tuning PID and wavelet neural network”, *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, köt. 31, sz. 4, o. 1259–1276, júl. 2012, <https://doi.org/10.1108/03321641211227537>
- [21] C. F. Hsu, C. J. Chiu, és J. Z. Tsai, „Auto-tuning PID controller design using a sliding-mode approach for DC servomotors”, *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, köt. 4, sz. 1, o. 93–110, márc. 2011, <https://doi.org/10.1108/17563781111115813>
- [22] V. Chopra, S. K. Singla, és L. Dewan, „Comparative Analysis of Tuning a PID Controller using Intelligent Methods”, *Acta Polytechnica Hungarica*, köt. 11, sz. 8, o. 235–249, 2014, <https://doi.org/10.12700/APH.11.08.2014.08.13>
- [23] M. H. Ahmad, K. Osman, és S. I. Samsudin, „Design of proportional integral and derivative controller using particle swarm optimization technique for gimbal system”, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, köt. 26, sz. 2, o. 714–722, máj. 2022, <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v26.i2.pp714-722>

- [24] T. Shiohara és Y. Maeda, „Enhanced Auto-Tuning of Feedback Controllers with Aggressive Search Ensuring Stability and Its Application to Galvano Scanner”, *IEEJ Journal of Industry Applications*, köt. 13, sz. 5, o. 539–546, szept. 2024, <https://doi.org/10.1541/ieejia.23013778>
- [25] P. Yadav, A. Feraudo, B. Arief, S. F. Shahandashti, és V. G. Vassilakis, „Position paper: A systematic framework for categorising IoT device fingerprinting mechanisms”, *AIChallengeIoT 2020 - Proceedings of the 2020 2nd International Workshop on Challenges in Artificial Intelligence and Machine Learning for Internet of Things*, köt. 20, o. 62–68, nov. 2020, <https://doi.org/10.1145/3417313.3429384>
- [26] O. Lountain, J. Tuke, H. Brown, K. Redman, S. Wilczek, és M. A. Humphries, „A multivariate extension to the standard 4σ criterion for comparison of forensic glass evidence”, *Forensic Sci. Int.*, köt. 338, o. 111386, szept. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2022.111386>
- [27] N. S. Aghili, M. Rasekh, H. Karami, V. Azizi, és M. Gancarz, „Rapid identification of multiplex camellia oil adulteration based on lipidomic fingerprint using laser assisted rapid evaporative ionization mass spectrometry and data fusion combined with machine learning”, *LWT*, köt. 228, o. 118078, júl. 2025, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113863>
- [28] S. S. Bohra és A. Anvari-Moghaddam, „A comprehensive review on applications of multicriteria decision-making methods in power and energy systems”, *Int. J. Energy Res.*, köt. 46, sz. 4, o. 4088–4118, márc. 2022, <https://doi.org/10.1002/er.7517>
- [29] E. M. Mohamed, B. Bouikhalene, F. Ouatik, és S. Safi, „AHP and TOPSIS methods applied in the field of scientific research”, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, köt. 14, sz. 3, o. 1382–1390, jún. 2019, <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v14.i3.pp1382-1390>
- [30] Wd. S. R. Naura, St. H. Mansyur, és P. Purnawansyah, „APPLICATION OF GROUP DECISION MAKING IN DETERMINING CULINARY TOURISM WITH TOPSIS AND BORDA METHODS”, *JITK (Jurnal Ilmu Pengetahuan dan*

Teknologi Komputer), köt. 9, sz. 2, o. 236–246, febr. 2024,
<https://doi.org/10.33480/jitk.v9i2.5017>

- [31] C. Kahraman, S. C. Onar, és B. Oztaysi, „Fuzzy Multicriteria Decision-Making: A Literature Review”, *International Journal of Computational Intelligence Systems*, köt. 8, sz. 4, o. 637–666, júl. 2015,
<https://doi.org/10.1080/18756891.2015.1046325>