FIZIKAI ÉS ELEKTROTECHNIKAI SZEMINÁRIUM 2025 KIADVÁNYA

A SZEMINÁRIUMON ELHANGZOTT ELŐADÁSOK KIVONATAI

Miskolc

2025. december 12.

ISBN 978-963-358-415-6

Fizikai és Elektrotechnikai Szeminárium

2025. december 12.

Kiadta:

Miskolci Egyetem
Gépészmérnöki és Informatikai Kar
Fizikai és Elektrotechnikai Intézet
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

Szerkesztette:

Dr. Kovácsné Dr. Molnár Judit
egyetemi docens
Miskolci Egyetem

Szervező Bizottság tagjai:

Prof. Dr. Bodnár István, Dr. Kovácsné Dr. Molnár Judit

Tudományos Bizottság tagjai:

Dr. Bencs Péter, Dr. Béres Miklós, Dr. Bolló Betti, Prof. Dr. Bodnár István, Dr. Kovácsné Dr. Molnár Judit, Dr. Kozsely Gábor, Dr. Matusz-Kalász Dávid, Dr. Nagy Ádám, Dr. Nándori István, Dr. Olajos Péter, Prof. Dr. Paripás Béla, Dr. Pszota Gábor, Dr. Radányi László Ádám, Dr. Szaszák Norbert Tibor

ISBN 978-963-358-415-6

Miskolc

2025

A kiadványban megjelenő publikációk lektoráltak!
A kiadványban megjelenő tartalomért és a forrásmegjelölésért a kiadó és a szerkesztő felelősséget nem vállal! A teljes felelősség a szerző(ke)t terheli!

ELŐSZÓ

A Miskolci Egyetem minden évben számos közleményt jelentet meg, melyek évtizedek óta hozzájárulnak a tudományos élet fejlődéséhez. Ehhez csatlakozik a Fizikai és Elektrotechnikai Szeminárium 2025 című konferencia előadásaiból készült publikációk elektronikus kiadványa. A Szeminárium Szervező Bizottsága fontos feladatának tekinti, hogy a különböző tudományterületeken folyó tudományos publikációs tevékenységnek színvonalas publikálási lehetőséget biztosítson.

A színvonalat a Szervező Bizottság azzal is biztosítani kívánta, hogy a kötetben megjelenő valamennyi cikk alapos lektorálási folyamaton és Szerkesztő Bizottsági értékelésen ment keresztül. A lektorálás alapos és szakmailag igényes elvégzése nem kis feladatot rótt a felkért lektorokra, amiért ezúton is köszönetünket fejezzük ki valamennyi közreműködő lektornak.

A kiadvány jól tükrözi azt a szerteágazó tudományos tevékenységet, amely a villamos- és gépészmérnöki tudományok területén folyik. A folyóiratban közreadott cikkek egyaránt lefedik a klasszikus villamosmérnöki területeket, így a villamos- és erőműenergetikát, az elektronikai tervezést és gyártást, az automatizálást és infokommunikációt, valamint a jármű- és teljesítményelektronika legkülönbözőbb területeit, de számos cikket találunk a környezetvédelem és a gépészeti tudományok témaköreiből is.

Feltétlenül meg kell említenünk, hogy a kiadvány kiemelt célja lehetőséget teremteni a villamos és gépészmérnöki tudományok területén tevékenykedő, műszaki tudományos kutatást folytató egyetemi hallgatók, oktatók és a tudományterületet művelő szakemberek számára az aktuális munkáik, kutatási eredményeik bemutatására, ezzel elősegítve a szakmai fejlődésüket.

Jelen kiadványban a Fizikai és Elektrotechnikai Szeminárium 2025 című konferencia 2025. december 12-én elhangzott előadások írásos anyagai olvashatók. A Szeminárium a Magyar Tudomány Ünnepe 2025. évi rendezvénysorozatának részeként került megrendezésre.

Kelt: Miskolc, 2025. december 15.

Prof. Dr. Bodnár István és Dr. Kovácsné Dr. Molnár Judit

KIEMELT TÁMOGATÓNK

TARTALOMJEGYZÉK

Bodnár István
MÉG NEM TALÁLTAM KI, DE MÁR RAJTA VAGYOK... AVAGY A SZELLEMI KIÉGÉS KONTRA PUBLIKÁCIÓS KÖTELEZETTSÉG 4

Szabó Norbert, Bodnár István
AZ ELEKTROTECHNIKAI ÉS ELEKTRONIKAI TANSZÉK ELEKTORNIKAI, ALIAS LIE6 LABORATÓRIUMÁNAK KORSZERŰSÍTÉSE 13

Kovács Attila, Kovácsné Molnár Judit, Jármai Károly
KORREKCIÓS FÜGGVÉNYEK ÉS JAVÍTÓ ALGORITMUSOK A GÉPI TANULÁSBAN 20

Bárány-Kovács Ágnes, Kállai Viktória, Szepesi Gábor
A PÁLINKAKÉSZÍTÉS SORÁN AZ ELŐDESZTILLÁTUM LEVÁLASZTÁSÁNAK SZIMULÁCIÓS VIZSGÁLATA.....32

Szepesi L. Gábor
KONTAKT NÉLKÜLI HŐÁTVITEL VIZSGÁLATA CSŐVEZETÉKEK ESETÉBEN.....38

Petrik Máté
ÁLLÓHENGERES TÁROLÓTARTÁLYOK BERUHÁZÁSI KÖLTSÉGÉNEK ÖSSZEHASONLÍTÓ ELEMZÉSE, KÜLÖNBÖZŐ SZABVÁNYOK SZERINT 43

Nagy Ádám, Pszota Gábor, Nyergesy Eszter Napsugár, Márián István Gábor, Nándori István
MAGANYAG VIZSGÁLATA TERMÁLIS FRG MÓDSZERREL 51

Pszota Gábor, Nagy Ádám, Nyergesy Eszter Napsugár, Márián István Gábor, Nándori István
NEUTRONCSILLAGOK MAXIMÁLIS TÖMEGE ÉS AZ EXTRÉM MAGANYAG FÁZISAI 55

Nyergesy Eszter Napsugár, Márián István Gábor, Nándori István
A KOZMOLÓGIAI KONSTANS ELŐJELE A KORAI UNIVERZUMBAN 59

Béres Miklós, Jenyó Tamás, Paripás Béla
TÁVOLI FÖLDRENGÉSEK HATÁSA A MISKOLCI EGYETEM A2 ÉPÜLETÉNEK REZGÉSEIRE.....65

Béres Miklós, Korózs József, Iszály Zsófia, Márián István Gábor, Nándori István
A MÁGNESES NANORÉSZECSKE-HIPERTERMIA TÉRBELI LOKALIZÁCIÓJÁNAK MÉRÉSE MERŐLEGES AC ÉS DC TEREK KOMBINÁCIÓJÁVAL 73

Szaszák Norbert
A CSŐTEKERCS SZIVATTYÚ MODELL KÉSZÍTÉSE ÉS MÉRŐRENDSZER ÖSSZEÁLLÍTÁSA ANNAK ÁRAMLÁSTECHNIKAI VIZSGÁLATAIHOZ 78

Korózs József, Béres Miklós, Iszály Zsófia, Márián István Gábor, Nándori István
MEGFELELŐ DISZPERZ RENDSZER MEGTALÁLÁSA ÉS STABILIZÁLÁSÁNAK LEHETŐSÉGEI A MÁGNESES HIPERTERMIÁHOZ ORVOSI ALKALMAZÁSOK SORÁN.....84

Bolló Betti
PERFORÁLT LEMEZ FURATA UTÁN KIALAKULÓ HIDRODINAMIKAI KAVITÁCIÓ NUMERIKUS SZIMULÁCIÓJA 89

Petercsák Dominik, Molnár Sándor, Bolló Betti
ÁRAMLÁSTANI JELLEMZŐK NUMERIKUS VIZSGÁLATA TRANSZVERZÁLIS TESLA SZELEPBEN.....95

Hegedüs Botond László, Bencs Péter
A HIDROGÉNHAJTÁS SZEREPE A KÖZLEKEDÉS DEKARBONIZÁCIÓJÁBAN 101

Husztek Anna, Iszály Zsófia, Márián István Gábor, Nándori István
MÁGNESES LÁZTERÁPIA: AZ MRSH ÉS SLLG MODELLEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA 109

Szaszák Norbert
CSŐTEKERCS SZIVATTYÚ MODELL ÁRAMLÁSI JELLEMZŐINEK LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATA 116

Balogh Noémi Enikő, Bencs-Nagy Nóra, Bencs Péter
HIDROGÉN A JÖVŐ ÜZEMANYAGA KOCKÁZATOK, BIZTONSÁG ÉS A TÖLTŐÁLLOMÁSOK SZABÁLYOZÁSA.....120

Olajos Péter
H1 KONTRA H2, AVAGY MIT TUDHAT EGY KÁLYHA.....133

Olajos Péter
ÁRAMFEJLESZTŐK FESZÜLTSÉGSZABÁLYZÓINAK JAVÍTÁSI ÉS FEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEI.....141

Móré Ádám, Papp Mátyás
BIZTONSÁGI ÖV DETEKTÁLÁSA TITÁN-DIOXID ALAPÚ INFRAVÖRÖS JELÖLÉSSEL DMS RENDSZEREKBEN 150

Majoros Ákos, Móré Ádám
AUTOMATIZÁLT NÖVÉNYTERMESZTÉS OPTIMALIZÁLÁSA GENETIKUS ALGORITMUSOKKAL ÉS SZENZOR VEZÉRELT PROTOTÍPUS SEGÍTSÉGÉVEL...154

Móré Ádám, Kovács Gábor
INTELLIGENS MÉRŐBOT FEJLESZTÉSE TENGERI TEKNŐS FÉSZKEK NEM-INVAZÍV DETEKTÁLÁSÁRA.....159

Tóth Dániel
CSAPÁGYVIZSGÁLATOK SPM ELJÁRÁSSAL 164

Tóth Dániel
GÖRDÜLŐCSAPÁGYAK SPEKTRUMANALÍZISE.....168

Tóth Dániel, Fekete Tamás
MEGMUNKÁLÓGÉPEK SAJÁTFREKVENCIÁI 172

Tugyi Levente
A ROBBANÁSBIZTOS NEM-VILLAMOS GYÁRTMÁNYOK FELÜLVIZSGÁLATÁNAK GYAKORLATA.....176

Hegyi Ádám, Bodnár István
AZ EURÓPAI VILLAMOSENERGIA PIAC EGYSÉGESÍTÉSE ÉS A SZABVÁNYOS KIEGYENLÍTŐ SZABÁLYOZÁSI SZOLGÁLTATÁSOK KIALAKULÁSA 182

Kozsely Gábor, Medgyesi Gyula
PRIMER ELEMEK TERHELÉSES ÉS RELAXÁCIÓS FESZÜLTSÉGTRANZIENS KÍSÉRLETEK EREDMÉNYE ÉS ELMÉLETI MAGYARÁZATA.....192

Medgyesi Gyula, Kozsely Gábor
MÉRÉSTECHNIKAI MÓDSZER PRIMER ELEMEK TERHELÉSI ÉS RELAXÁCIÓS FESZÜLTSÉGTRANZIENSÉNEK VIZSGÁLATÁHOZ 206

Radányi László Ádám
IPAR ÉS FELSŐOKTATÁS KAPCSOLATA AZ ELMÚLT ÉVTIZEDEKBEN. HOGYAN HASZNÁLHATÓAK A MODERN MINŐSÉG ÉS TERMELÉKENYSÉG FEJLESZTŐ TECHNOLÓGIÁK KÖZÜL A LEAN ÉS A TPM A FELSŐOKTATÁSBAN? 214

Radányi László Ádám, Veres Laura
NAPELEMTELEP DRÓNOKKAL TÖRTÉNŐ DIAGNOSZTIKÁJÁNAK FEJLESZTÉSE A GRÁFELMÉLET FELHASZNÁLÁSÁVAL 224

Radányi László Ádám
KÉPELEMZÉSI LEHETŐSÉGEK A NAPELEMEK DIAGNOSZTIKÁJÁBAN.....232

Baibhaw Kumar, Szamosi Zoltán
MAGYARORSZÁG VÍZENERGIA-POTENCIÁLJA – VÍZGAZDÁLKODÁSI ÉS ENERGETIKAI MEGFONTOLÁSOK 240

Veres Gergő Drótos Gábor
ASZIMMETRIKUS QUBITKONFIGURÁCIÓK VIZSGÁLATA A FÉLIG ESZKÖZFÜGGETLEN KVANTUMHITELESÍTÉS ESZKÖZEIVEL 246

Tollár Sándor
SZÉLTURBINA LAPÁTPROFIL-ÍVELTSÉG JEGESEDÉSI ÉRZÉKENYSÉGRE GYAKOROLT HATÁSÁNAK NUMERIKUS VIZSGÁLATA 252

Matusz-Kalász Dávid
SZERVES NAPELEMEK FEJLŐDÉSTÖRTÉNETE 259

Matusz-Kalász Dávid
A PEROVSZKIT NAPELEMEK FEJLŐDÉSTÖRTÉNETE.....269

Matusz-Kalász Dávid
A FESTÉK-ÉRZÉKENYÍTETT NAPELEMEK HELYE A MODERN FOTOVOLTAIKUS TECHNOLÓGIÁK PALETTÁJÁN 279

Jobbágy Marcell
MESTERSÉGES INTELLIGENCIA ALKALMAZHATÓSÁNAK VIZSGÁLATA AZ ENERGETIKÁBAN 287

Gómez Pablo Pancorbo, Radányi László Ádám
COMPARISON OF THE SPANISH AND THE HUNGARIAN ENERGY SYSTEMS. WHAT ARE THE COMMON CHALLENGES AND HOW CAN WE HELP EACH OTHER? 296

Husniddin Khayrullaev
TRANSIENT THERMAL SIMULATION OF A MULTI-LAYER PHOTOVOLTAIC PANEL USING THE LEAPFROG-HOPSCOTCH METHOD.....304

Ammar Ammar, Kumar Baibhaw, Szamosi Zoltán
DEVELOPMENT OF A WEB-BASED CARBON FOOTPRINT CALCULATOR FOR UNIVERSITY STUDENTS 311

MÉG NEM TALÁLTAM KI, DE MÁR RAJTA VAGYOK... AVAGY A SZELLEMI KIÉGÉS KONTRA PUBLIKÁCIÓS KÖTELEZETTSÉG

I HAVEN'T FIGURED IT OUT YET, BUT I'M ALREADY ON IT... OR INTELLECTUAL BURNOUT VERSUS PUBLICATION OBLIGATION

BODNÁR István

Ph.D., intézetigazgató, intézeti tanszékvezető, egyetemi tanár, istvan.bodnar@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

Kivonat: *A tanulmány a szellemi kiégés és a publikációs kényszer kapcsolatát vizsgálja az egyetemi oktatók és kutatók életében. Rávilágít arra, hogyan torzulhat a motiváció az oktatói és kutatói szerepek közötti egyensúly hiánya miatt. Bemutatja a klasszikus és modern motivációelméleteket, valamint azok alkalmazhatóságát a felsőoktatási környezetben. Külön figyelmet szentel a „publish or perish" jelenség pszichológiai és szakmai következményeinek. A cikk célja a kiégés megelőzését és a fenntartható tudományos teljesítmény elősegítését támogató szemléletformálás.*

Kulcsszavak: *szellemi kiégés, motiváció, publikációs kényszer, felsőoktatás, mesterséges intelligencia*

Abstract: *The study investigates the relationship between intellectual burnout and the pressure to publish in the academic environment. It explores how motivation can deteriorate due to the imbalance between teaching and research roles. Classic and modern motivation theories are reviewed, highlighting their relevance to higher education. Special attention is given to the psychological and professional impacts of the "publish or perish" phenomenon. The paper aims to promote awareness and strategies for preventing burnout and ensuring sustainable academic performance.*

Keywords: *intellectual burnout, motivation, publication pressure, higher education, artificial intelligence*

1. BEVEZETÉS

Napjaink felgyorsult, rohanó világában szinte soha sincs semmire annyi időnk, mint amenynyire szükségünk lenne. Emiatt gyakran szelektálunk a feladatok között és csak azokat végezzük el, amelyek magasabb prioritást kapnak. Amik pedig nem fontosak, vagy az elvégzésének hiánya nem jár következményekkel, azokat halogatjuk, vagy el sem végezzük. Egy egyetemi oktató életében az elsődleges és lenagyobb prioritású feladat a minőségi oktatás, annak minden velejárójával együtt. Ilyen például a saját tudásának fejlesztése, a tananyagok folyamatos aktualizálása, új módszerek bevezetése a változó tudásháttérű hallgatók fejlesztése érdekében. Az oktatáson túl a kutatás és az elért eredmények publikálása tartozik még egy oktató alapfeladatai közé. A mérnökképzésben a kutatómunka nagyban hozzá tud járulni az oktatás minőségi fejlesztéséhez és a korszerű tudás átadásához. A tapasztalt oktatók feladata az utánpótlás nevelés is hiszen a tapasztalataik átadása nélkül új oktatógenerációk nem nevelhetők ki. Ezen "feladatok" aránya jellemzően az oktatói ranglétra szerinti beosztástól függ. Nem mindenkitől lehet ugyanazt elvárni, ezért szükséges az egyensúlyra való törekvés. Ugyanakkor az oktatás, kutatás és utánpótlásnevelés mellett számos kötelezettség társul egy oktatóra, amelyek sokszor a hasznos feladatoktól veszik el az időt. Tipikus példa erre az adminisztratív feladatok.

Az oktatók életében is eljön az a pillanat, amikor a feladatok aránytalanná válnak és a mindennapi munkájuk eltolódik az értelmetlen feladatok teljesítésének irányába. Ezt jellemzően demotivációként élik meg, amely hosszú távon kiégéshez vezet. Ugyanez az eredménye annak is, ha valaki túlhajszolt. A kiégés hatása megjelenhet az oktatásban, kutatásban és publikálásban is. Tekintve, hogy egy oktató elsődleges feladata az oktatás, ezért leginkább a kutatás és publikálás fog háttérbe szorulni. Ilyenkor a mesterséges intelligenciához fordulunk, amely az utóbbi

hónapokban napi szintű részévé vált az életünknek.

A mesterséges intelligencia a kiégést az alábbiakban definiálta:
"A kiégés (burnout) egy fizikai, érzelmi és mentális kimerültséggel járó állapot, amely hosszan tartó stressz, túlterheltség vagy folyamatos frusztráció következtében alakul ki – leggyakrabban a munkával kapcsolatban, de nem kizárólag ott."

2. SZELLEMI KIÉGÉS

A tudós google-ben a "szellemi kiégés" szópárra 16.000 db találatot kaptam, mindösszesen 0,1 másodperc alatt. Ezen számokból jól látható, hogy kiterjedt magyar nyelvű irodalma van a témának. Rákerestem a "burnout" szóra is. 2.100.000 db találat 0,08 másodperc alatt. Kíváncsiságból rákerestem az "energiaválság" szóra is. Itt mindösszesen csak 1.260 db találatot kaptam 0,1 másodperc alatt. A "publikálás" szóra 4.510 db találat született 0,11 másodpercen belül. Az "oktatás" szóra 101.000 db találat 0,05 másodperc alatt. A "mesterséges intelligencia" szópár 0,08 másodpercen belül 13.900 db találatot hozott.

Kiégés definíciója (emberi szinten): A kiégés egy olyan állapot, amelyben az ember úgy érzi, hogy kimerült, cinikussá vagy közönyössé válik a munkája (vagy más fontos tevékenysége) iránt, és úgy érzi, hogy csökken a hatékonysága és teljesítőképessége. Ez nem pusztán fáradtság vagy rossz hangulat – hanem egy mélyebb, tartós és káros állapot, ami testi és lelki egészségre is kihat.

A kiégés három fő jellemzője:
1. Kimerültség – Fizikai és érzelmi szinten is. Úgy érzed, hogy „nincs több benned", még akkor sem, ha alszol vagy pihensz.
2. Deperszonalizáció / cinizmus – Az illető elidegenedik a munkájától, más emberektől, közönyössé vagy cinikussá válik.
3. Csökkent hatékonyság – A személy úgy érzi, hogy semmit nem ér el, amit csinál, csökken az önértékelése, és nem látja értelmét a tevékenységének.

Fontos megjegyezni: A kiégés nem gyengeség, és nem is csak „lustaság" vagy „panaszkodás". Az Egészségügyi Világszervezet (WHO) már hivatalosan is elismeri a kiégést, mint munkahelyi eredetű szindrómát.

Ajánlott irodalmak ehhez a témához [1-5]:

- Edú-Valsania, S.; Laguía, A.; Moriano, J. A.: "Burnout: A Review of Theory and Measurement." Int. J. Environ. Res. Public Health 19(3):1780, 2022. Áttekinti a kiégés elméletét, dimenzióit, mérőeszközeit. PMC
- Monsalve-Reyes, C. S. és mtsai: "Burnout syndrome and its prevalence in primary care nursing: a systematic review and meta-analysis." BMC Family Practice, 2018. A kiégés előfordulásáról, különösen alapellátásban dolgozó ápolók körében. BioMed Central
- Tsou, M-T. és mtsai: "Burnout and metabolic syndrome among healthcare workers: Is subclinical hypothyroidism a mediator?" Journal of Occupational Health, 2021. Különös összefüggés a kiégés és fizikai egészségi állapotok között. OUP Academic
- Inţă, R-F.: "A Literature Review About Burnout Syndrome and How it Can Be Prevented." Acta Medica Transilvanica 26(4), 2021. Irodalmi áttekintés a kiégés prevenciójáról. Paradigma
- Weber, A.; Jaekel-Reinhard, A.: "Burnout Syndrome: A Disease of Modern Societies?" Occupational Medicine 50(7):512-517, 2000. Korábbi, de klasszikus áttekintés a kiégés,

mint társadalmi probléma.

Más megközelítésben a kiégés a motiváció hiányaként fogható fel. A mesterséges intelligencia szerint:

A motiváció legegyszerűbben úgy definiálható, mint az a belső vagy külső erő, amely cselekvésre készteti az embert és meghatározza, milyen irányba, milyen intenzitással és mennyi ideig tart ki a viselkedésében. Másképp fogalmazva: a motiváció az, amiért valamit csinálunk – legyen az tanulás, munka, sport vagy bármilyen más tevékenység.

Egy kicsit részletesebben:

- Belső (intrinzik) motiváció: amikor valamit önmagáért csinálunk, mert érdekesnek, élvezetesnek vagy értékesnek tartjuk (pl. valaki azért tanul zenét, mert szereti a zenét).
- Külső (extrinzik) motiváció: amikor a cselekvés mögött valamilyen külső jutalom vagy elvárás áll (pl. fizetés, elismerés, büntetés elkerülése).

Pszichológiai értelemben tehát a motiváció a viselkedés „motorja" – elindítja, irányítja és fenntartja a célorientált tevékenységet. Másképp fogalmazva: a motiváció az a pszichikus állapot, amely a szükségletek, vágyak, célok és ösztönök által vezérelve aktiválja és fenntartja az egyén cselekvéseit egy adott cél eléréséig.

Ezt gyakran három fő komponenssel írják le:

1. Irány (direction) – mit választunk, mire irányul a cselekvés (pl. tanulás vs. szórakozás).
2. Intenzitás (intensity) – mennyi energiát fektetünk bele.
3. Kitartás (persistence) – meddig tartjuk fenn a viselkedést a cél eléréséig.

Példák:

- Egy diák belsőleg motivált, ha azért tanul, mert érdekli a téma és fejlődni akar.
- Ugyanez a diák külsőleg motivált, ha azért tanul, hogy jó jegyet kapjon vagy elkerülje a szidást.
- Egy sportoló motivációját fokozhatja a siker vágya, de csökkenheti a kudarcélménytől való félelem.

3. A MOTIVÁCIÓ FŐBB ELEMEI

3.1. Maslow-féle szükséglethierarchia (1943)

Abraham Maslow szerint a motivációt szükségletek hierarchiája irányítja, amelyek piramisszerűen egymásra épülnek:

1. Fiziológiai szükségletek – éhség, szomjúság, alvás stb.
2. Biztonsági szükségletek – védelem, stabilitás, biztonság.
3. Szociális szükségletek – szeretet, hovatartozás, kapcsolatok.
4. Elismerés iránti szükségletek – megbecsülés, önbecsülés.
5. Önmegvalósítás – saját potenciálunk kiteljesítése.

Az elmélet szerint az alsóbb szintű szükségletek kielégítése után jelenik meg az igény a magasabb szintek iránt.

3.2. Herzberg kéttényezős elmélete (1959)

Frederick Herzberg szerint a munkahelyi motiváció két külön tényezőből áll:

1. Higiénés tényezők – a munkakörnyezethez kötődnek (pl. fizetés, biztonság, vezetés minősége). Ezek hiánya elégedetlenséget okoz, de önmagukban nem motiválnak.
2. Motivátorok – a munkatartalomhoz kötődnek (pl. elismerés, felelősség, fejlődés). Ezek növelik az elégedettséget és a teljesítményt.

Tehát a jó munkakörnyezet nem motivál, csak megelőzi az elégedetlenséget; az igazi motiváció a munkában rejlő értelmes kihívásból fakad.

3.3. Deci és Ryan – Önmeghatározás-elmélet (Self-Determination Theory, 1985)

Az egyik legmodernebb és legelfogadottabb motivációelmélet. Azt állítja, hogy az emberek akkor a legmotiváltabbak, ha három alapvető pszichológiai szükségletük kielégül:

1. Autonómia – szabad döntés, önirányítás érzése.
2. Kompetencia – a hatékonyság és fejlődés megtapasztalása.
3. Kapcsolódás – másokhoz való tartozás, elfogadás érzése.

Ha ezek teljesülnek, belső motiváció jön létre; ha nem, akkor a motiváció külsővé vagy kényszerűvé válik.

3.4. McClelland-féle motivációs szükségletek (1961)

David McClelland három kulcsfontosságú motívumot különböztetett meg:

1. Teljesítménymotívum (nAch) – vágy a kiválóságra, a sikerre.
2. Hatalommotívum (nPow) – befolyás, irányítás igénye.
3. Kapcsolatmotívum (nAff) – társas kapcsolatok, elfogadás vágya.

Minden embernél más dominál és ez befolyásolja, hogyan reagál a kihívásokra vagy jutalmakra.

3.5. Vroom – Elváráselmélet (Expectancy Theory, 1964)

Victor Vroom szerint a motiváció racionális döntési folyamat eredménye. Három tényező határozza meg:

1. Elvárás (expectancy) – hiszem, hogy erőfeszítésem sikerhez vezet.
2. Instrumentalitás – a siker tényleg jutalmat hoz.
3. Valencia (valence) – a jutalom értékes számomra.

Ha ezek mind magasak, a motiváció is erős; ha bármelyik hiányzik, csökken.

Összegzés tehát a motiváció:

- egy belső hajtóerő, ami irányt, energiát és kitartást ad a viselkedésnek,
- lehet belső (önmagáért) vagy külső (jutalomért),
- és különböző elméletek más-más szempontból magyarázzák, miért teszünk erőfeszítéseket egy célért.

Magyar ajánlott irodalmak ehhez a témához [6-10]:

- Atkinson, R. L., Atkinson, R. C., Smith, E. E., & Bem, D. J. (1995). Pszichológia. Budapest: Osiris Kiadó. Átfogó pszichológiai tankönyv, külön fejezet foglalkozik a motiváció és érzelem témájával.
- Bagdy Emőke – Telkes József (1988): Személyiségfejlesztő módszerek az iskolában. Budapest: Tankönyvkiadó. Gyakorlatorientált, pedagógiai szempontból vizsgálja a motivációt.
- Klein Sándor (2004): Munkapszichológia. Budapest: Edge 2000 Kiadó. A munkahelyi és szervezeti motiváció egyik legfontosabb magyar szakirodalma.
- Nagy József (2000): Az iskola belső világa. Budapest: OKKER Kiadó. Az iskolai motiváció és tanulási motiváció részletes elemzése.
- Rókusfalvy Pál (1997): Motiváció és személyiség. Budapest: Akadémiai Kiadó. Klasszikus magyar pszichológiai mű, elméleti és empirikus megközelítésekkel.

Angol nyelvű ajánlott irodalmak ehhez a témához [11-16]:

- Maslow, A. H. (1954). Motivation and Personality. New York: Harper & Row. A híres szükséglethierarchia eredeti forrása.
- Herzberg, F., Mausner, B., & Snyderman, B. B. (1959). The Motivation to Work. New York: Wiley. A kéttényezős elmélet alapműve.
- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (1985). Intrinsic Motivation and Self-Determination in Human Behavior. New York: Plenum Press. Az önmeghatározás-elmélet (Self-Determination Theory) alapvető forrása.
- McClelland, D. C. (1961). The Achieving Society. Princeton, NJ: Van Nostrand. A teljesítmény-, hatalom- és kapcsolódási motívumokat tárgyalja.
- Vroom, V. H. (1964). Work and Motivation. New York: Wiley. Az elváráselmélet (Expectancy Theory) klasszikus forrása.
- Reeve, J. (2018). Understanding Motivation and Emotion. 7th ed. Hoboken, NJ: Wiley. Modern, könnyen érthető, egyetemi szinten is használt összefoglaló.

4. MOTIVÁCIÓ A FELSŐOKTATÁSBAN

4.1. Mi motiválja az egyetemi oktatót?

Az egyetemi oktatókat és kutatókat általában többféle – belső és külső – motivációs tényező vezérli, de a hangsúly és a motiváció forrása eltérhet attól függően, hogy valaki inkább oktatásra vagy kutatásra fókuszál. Nézzük külön-külön és összefüggéseiben.

Belső (intrinzik) motivációk:

- Tudás átadásának öröme: Az oktatót motiválhatja, hogy mások fejlődését segítse, tudást közvetítsen, inspiráljon.
- Szakmai identitás és hivatástudat: Sok oktató az oktatást „küldetésnek” érzi, ami erős belső hajtóerőt jelent.
- Tanítás kreativitása: Az oktatói munka sokszor teret ad az önkifejezésre, új módszerek kipróbálására, hallgatókkal való interakcióra.
- Hallgatói visszajelzés: Pozitív visszajelzések, sikeres vizsgák, diákok eredményei megerősítik az oktató önhatékonyságát.

Külső (extrinzik) motivációk:
- Elismerés és presztízs: A jó tanári munka elismerése (pl. oktatói díjak, hallgatói megbecsülés) erős külső motiváló tényező.
- Munkahelyi stabilitás: Állandó pozíció, előléptetés lehetősége, habilitáció, professzori kinevezés.
- Anyagi juttatások: Bár ez sokszor nem döntő tényező, de számít (pl. ösztöndíjak, pótlékok, további megbízások).

4.2. Mi motiválja az egyetemi kutatót?

Belső motivációk:
- Tudományos kíváncsiság: A kutatókat jellemzően a „miért" kérdések hajtják – a felfedezés öröme, az új tudás létrehozása.
- Szakmai önmegvalósítás: A kutatás lehetőséget ad az önállóságra, kreativitásra, intellektuális kihívásokra.
- Szakmai kompetencia érzése: A sikeres publikációk, kutatási eredmények megerősítik a kutató szakmai identitását.
- Közösségi hasznosság: Sok kutatót motivál, hogy munkája hozzájárul a társadalom fejlődéséhez, innovációhoz vagy emberi jóléthez.

Külső motivációk:
- Tudományos elismerés: Publikációk, idézettség, hivatkozások, konferenciaszereplések, díjak.
- Kutatási pályázatok és források: Az anyagi támogatás (grant, ösztöndíj, projektfinanszírozás) fenntartja a kutatás lehetőségét.
- Karrierelőmenetel: Habilitáció, tudományos fokozat (PhD, DSc), nemzetközi együttműködések.
- Intézményi elvárások: Publikációs nyomás („publish or perish"), teljesítményértékelés, pályázati sikerek.

4.3. Különbségek és átfedések

Az egyetemi oktató és kutató motivációjának különbségeit és átfedéseit az 1. táblázat hasonlítja össze.

1. táblázat: *Különbségek és átfedések.*

Szempont	Oktató	Kutató
Fő cél	Tudás átadása, nevelés	Új tudás létrehozása
Belső motiváció	Hivatás, pedagógiai siker	Tudományos kíváncsiság, önmegvalósítás
Külső motiváció	Elismerés, hallgatói visszajelzés	Publikációs elismerés, kutatási források
Kihívások	Hallgatói érdeklődés fenntartása	Finanszírozási verseny, publikációs nyomás
Közös pont	Szakmai elhivatottság, fejlődési vágy, presztízs, tudás iránti szenvedély	

Kapcsolódás az elméletekhez:
- Deci & Ryan (1985): Az oktató és kutató motivációját is erősen befolyásolja az autonómia, a kompetencia és a kapcsolódás érzése.
- Herzberg (1959): A „motivátorok” (elismerés, fejlődés, felelősség) mindkét szerepben fontosabbak, mint a „higiénés tényezők” (fizetés, környezet).
- Maslow (1954): Az oktatói és kutatói karrier csúcsa gyakran az önmegvalósítás szintjén jelenik meg.

5. PUBLIKÁCIÓS KÉNYSZER

A publikációs kényszer (angolul publish or perish) az a nyomás, amelyet az akadémiai rendszer a kutatókra helyez, hogy folyamatosan és nagy mennyiségben publikáljanak tudományos cikkeket, mert a szakmai előmenetelük, finanszírozásuk és elismertségük nagyrészt ezeken a publikációkon múlik.

Másképp: A publikációs kényszer az az intézményi és kulturális elvárás, amely a kutatói teljesítményt döntően a megjelent tudományos közlemények számával és minőségével méri.

Miért alakult ki?

A modern tudományos világban a kutatók karrierértékelése kvantitatív mutatókon alapul:
- publikációk száma,
- folyóiratok impaktfaktora,
- idézettség (hivatkozások száma),
- h-index és egyéb bibliometriai mutatók.

Ezek alapján döntenek például:
- pályázati támogatásról (OTKA, Horizon Europe stb.),
- előléptetésről,
- kutatási státuszról vagy pozícióról,
- nemzetközi együttműködésekben való részvételről.

Pozitív oldalai:
- Tudományos teljesítmény ösztönzése: motivál a folyamatos kutatásra, eredmények közzétételére.
- Transzparencia: a publikálás révén a tudás nyilvánosan hozzáférhető, ellenőrizhető.
- Szakmai fejlődés: a publikációs tevékenység tudományos vitákhoz, kapcsolatokhoz és nemzetközi láthatósághoz vezet.

Negatív következményei:
- Túlzott mennyiségi szemlélet: a „több cikk = jobb kutató” logika háttérbe szoríthatja a valódi tudományos értéket.
- Felületes vagy „darabolt” publikációk: ugyanazon kutatás több részre bontása, hogy több cikk szülessen („salami slicing”).
- Stressz és kiégés: folyamatos nyomás a teljesítményre és pályázásra.
- Etikai problémák: plagizálás, adathamisítás, „önidézetelés”, „predátor folyóiratok” megjelenése.
- Előnyben részesített témák: a „publikálható” vagy „trendinek számító” témák irányába tolja a kutatást, nem feltétlenül a társadalmilag leghasznosabb irányokba.

Elméleti összefüggés:

A publikációs kényszer jól értelmezhető Deci és Ryan önmeghatározás-elmélete (Self-Determination Theory) alapján:

- amikor a kutatók külső elvárásoknak próbálnak megfelelni (pályázatok, pontszámok), a külső motiváció dominál;
- ez gyengítheti a belső, autonóm motivációt – a kutatás iránti szenvedélyt és kíváncsiságot.

Ajánlott irodalom ehhez a témához [17-20]:

- Anderson, M. S., & Louis, K. S. (1994). The graduate student experience and subscription to the norms of science. Research in Higher Education, 35(3), 273–299.
- Müller, R. (2014). Racing for what? Anticipation and acceleration in the work and career practices of academic life science postdocs. Forum: Qualitative Social Research, 15(3).
- Frey, B. S. (2010). Withering academia? CESifo Working Paper Series.
- Kovács, K. (2018). „Publikálj vagy pusztulj" – A tudományos teljesítmény kényszere. Magyar Tudomány, 179(4), 451–462.

6. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

A tanulmány rávilágít arra, hogy a felsőoktatásban dolgozó oktatók és kutatók mindennapjait egyre inkább meghatározza a szellemi kiégés veszélye és a publikációs kényszerből fakadó nyomás. A motivációelméletek alapján látható, hogy a külső elvárások (pályázati követelmények, teljesítményértékelés, publikációs mutatók) könnyen háttérbe szoríthatják a belső, autonóm motivációt, amely a valódi tudományos és oktatói elhivatottság alapja. Az egyensúly felborulása hosszú távon a szakmai teljesítmény, a kreativitás és az innováció csökkenéséhez vezethet.

A szellemi kiégés megelőzése érdekében elengedhetetlen az önismeret fejlesztése, a munka–magánélet egyensúlyának tudatos megőrzése, valamint az intézményi támogatás erősítése. A mesterséges intelligencia és digitális eszközök megfelelő alkalmazása segíthet a rutin- és adminisztratív terhek csökkentésében, így több idő maradhat az oktatásra és a kutatás valódi értékére.

Következtetésként megfogalmazható, hogy a felsőoktatás fenntartható fejlődéséhez nem csupán teljesítménymutatók, hanem emberközpontú szemlélet és motivációtámogató környezet szükséges. Az oktatói és kutatói munka akkor maradhat hosszú távon eredményes, ha a szakmai kiválóságot nem a mennyiségi, hanem a minőségi elvárások irányítják.

7. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] EDÚ-VALSANIA, S.; LAGUÍA, A.; MORIANO, J. A.: *Burnout: A Review of Theory and Measurement.* Int. J. Environ. Res. Public Health 19(3):1780, 2022. Áttekinti a kiégés elméletét, dimenzióit, mérőeszközeit. PMC

[2] MONSALVE-REYES, C. S. etal.: *Burnout syndrome and its prevalence in primary care nursing: a systematic review and meta-analysis.* BMC Family Practice, 2018.

[3] TSOU, M-T. etal: *Burnout and metabolic syndrome among healthcare workers: Is subclinical hypothyroidism a mediator?* Journal of Occupational Health, 2021.

[4] INŢĂ, R-F.: *A Literature Review About Burnout Syndrome and How it Can Be Prevented.* Acta Medica Transilvanica 26(4), 2021.

[5] WEBER, A.; JAEKEL-REINHARD, A.: *Burnout Syndrome: A Disease of Modern Societies?* Occupational Medicine 50(7):512-517, 2000.

[6] ATKINSON, R. L., ATKINSON, R. C., SMITH, E. E., & BEM, D. J.: *Pszichológia.* Budapest: Osiris Kiadó. 1995.

[7] BAGDY E., TELKES J.: *Személyiségfejlesztő módszerek az iskolában.* Budapest: Tankönyvkiadó. 1988.
[8] KLEIN S.: *Munkapszichológia.* Budapest: Edge 2000 Kiadó. 2004.
[9] NAGY J.: *Az iskola belső világa.* Budapest: OKKER Kiadó. 2000.
[10] RÓKUSFALVY P.: *Motiváció és személyiség.* Budapest: Akadémiai Kiadó. 1997.
[11] MASLOW, A. H.: *Motivation and Personality.* New York: Harper & Row. 1954.
[12] HERZBERG, F., MAUSNER, B., & SNYDERMAN, B. B.: *The Motivation to Work.* New York: Wiley. 1959
[13] DECI, E. L., & RYAN, R. M.: *Intrinsic Motivation and Self-Determination in Human Behavior.* New York: Plenum Press. 1985.
[14] MCCLELLAND, D. C.: *The Achieving Society.* Princeton, NJ: Van Nostrand. 1961.
[15] VROOM, V. H.: *Work and Motivation.* New York: Wiley. 1964.
[16] REEVE, J.: *Understanding Motivation and Emotion.* 7th ed. Hoboken, NJ: Wiley. 2018.
[17] ANDERSON, M. S., & LOUIS, K. S.: *The graduate student experience and subscription to the norms of science.* Research in Higher Education, 35(3), 273–299. 1994.
[18] MÜLLER, R.: *Racing for what? Anticipation and acceleration in the work and career practices of academic life science postdocs.* Forum: Qualitative Social Research, 15(3). 2014.
[19] FREY, B. S.: *Withering academia?* CESifo Working Paper Series. 20210.
[20] KOVÁCS, K.: *„Publikálj vagy pusztulj" – A tudományos teljesítmény kényszere.* Magyar Tudomány, 179(4), 451–462. 2018.

AZ ELEKTROTECHNIKAI ÉS ELEKTRONIKAI TANSZÉK ELEKTORNIKAI, ALIAS LIE6 LABORATÓRIUMÁNAK KORSZERŰSÍTÉSE

MODERNIZATION OF THE ELECTRONIC, ALIAS LIE6 LABORATORY OF THE DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

SZABÓ Norbert[1], BODNÁR István[2]

[1]mesteroktató, norbert.szabo1@uni-miskolc.hu
[2]Ph.D., intézetigazgató, intézeti tanszékvezető, egyetemi tanár, istvan.bodnar@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

Kivonat: *A tanulmány a Miskolci Egyetem Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszékének Elektronikai (LIE6) Laboratóriumának felújítását mutatja be. A Laboratórium az 1950-es évek elején létesült és először az 1980-as években korszerűsítették. A labor az utóbbi majd 40 évben teljesen elavult és felújítása elkerülhetetlenné vált. A felújítás első fázisára ez évben került sor, amely magába foglalta az építészeti felújításon kívül a meglévő laborpultok korszerűsítését is. A laboratórium új kapcsolószekrényt is kapott.*

Kulcsszavak: *elektronikai laboratórium, felújítás, GANZ-Hera, oktatás*

Abstract: *This paper presents the renovation of the laboratory of Electronic (LIE6) of the Department of Electrical Engineering and Electronics of the University of Miskolc. The laboratory was established in the early 1950s and was first modernized in the 1980s. The laboratory has become completely obsolete in the last 40 years and its renovation has become inevitable. The first phase of the renovation took place this year, which included, in addition to the architectural renovation, the modernization of the existing laboratory desks. The laboratory also received a new switch cabinet.*

Keywords: *electronic laboratory, renovation, GANZ-Hera, education*

1. BEVEZETÉS

A Miskolci Egyetem Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszékének jogelődjét 1904-ben alapították Selmecbányán Fizikai és Elektrotechnikai Tanszék néven. A Tanszék 1919-ben Sopronba költözött, ahol 1947-ben kettévált, így önálló tanszékekként létrehozva a Fizika Tanszéket és az Elektrotechnika Tanszéket. A Fizika Tanszéket 1949-ben, az Elektrotechnika Tanszéket pedig 1950-ben újraalapították Miskolcon. A miskolci alapítású Elektrotechnika Tanszék az első félévben a Csengery Gusztáv utcában található kórházban, majd pedig a Fizika Tanszékkel egy helyen, a Földes Ferenc Gimnáziumban működött. Jelenlegi helyét (A3 épület II. emelet) csak két évvel később foglalhatta el, amikorra az Egyetemváros oktatási épületi elkészültek, és a ma A3 nevet viselő épület is átadásra került. Ezt követően a soproni Elektrotechnika Tanszék folyamatosan áttelepült Miskolcra. A két Elektrotechnika Tanszék (soproni és miskolci) 1959-ben egyesült, így a Tanszék Sopronban megszűnt, ezzel együtt a selmecbányai és soproni hagyatékok Miskolcra kerültek, amelyek eszmei értékét mai napig becsüljük és őrizzük [1, 2].

Az 1970-es és 1980-as években az oktatás és a kutatás az elektronika, mikroelektronika és méréstechnika irányában bővült. Ez a változás a Tanszék nevében is megjelenítésre került, létrejött az Elektrotechnikai-Elektronikai Tanszék. A tanszék 1989-ben csatlakozott a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki Karán alapított Informatikai Intézethez. A Tanszék laboratóriumait ekkor nevezték át, amely megnevezést mai napig használjuk, annak ellenére, hogy közben új intézeti, illetve tanszéki struktúra alakult ki az egyetemen. A LIE elnevezés tehát a következőket jelenti **L**aboratórium **I**nformatikai (Intézet) **E**lektrotechnikai (-Elektronikai Tanszék) [2].

Tanszékünk az elmúlt három évtizedben az informatikai és a villamos szakterületű oktatás jelentős megerősödése miatt hol önálló intézetként, hol pedig intézeti tanszékként működött. 2019-ben visszatértünk a gyökerekhez és a Selmeci Hagyományoknak megfelelően a Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, azon belül pedig az Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék nevet viseljük [2].

2. AZ ELEKTRONIKA MEGJELENÉSE AZ OKTATÁSBAN

Az „elektronika", mint önálló tudományterület fokozatosan alakult ki és a felsőoktatásban is csak fokozatosan jelent meg a 20. század első felében.

2.1. Az elektronika megjelenése a felsőoktatásban

1900-as évek eleje – a fizika és villamosságtan részeként [3, 4]:

- Az „elektronika" szó még nem volt használatban.
- Az elektromosságtannal, vákuumcsövekkel és rádiótechnikával kapcsolatos ismeretek a fizika vagy villamosmérnöki tanszékek oktatásán belül jelentek meg.
- Az első elektronikus eszközök (pl. diodák, triódák) a 1900–1910-es években váltak kutatási témává.

1920–1930-as évek – rádiótechnika és elektroncsöves áramkörök [3, 4]:

- Az egyetemeken és műszaki főiskolákon (pl. Berlin, Cambridge, MIT) külön rádiótechnikai kurzusokat indítottak.
- Ezeket már kifejezetten „elektronikus" áramkörökkel foglalkozó oktatásnak tekinthetjük.

1940–1950-es évek – az elektronika, mint önálló tanszék [3, 4]:

- A második világháború után a radar, kommunikációs és számítógépes fejlesztések miatt az elektronika kiemelt szerepet kapott.
- Ekkor kezdtek megjelenni az első „Elektronika Tanszékek" a világ nagy műszaki egyetemein (pl. MIT, Stanford, Moszkvai Energetikai Intézet, stb.).
- Magyarországon a Budapesti Műszaki Egyetemen (BME) az 1950-es években szerveződtek az első elektronikai tanszékek a Villamosmérnöki Karon belül.

1960–1970-es évek – integrált áramkörök és félvezető-elektronika [3, 4]:

- A tranzisztor (1947) és az integrált áramkör (1958) megjelenésével az elektronika önálló mérnöki diszciplína lett.
- Ettől kezdve szinte minden műszaki egyetemen külön Elektronikai vagy Mikroelektronikai szakirány létezett.

2.2. Az elektronika megjelenése a magyar felsőoktatásban

Előzmények (1900–1945) [3, 4]:

- A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (akkor még Magyar Királyi József Műegyetem) villamosmérnöki képzése a 1900-as évek elején főként villamosságtannal és energetikával foglalkozott.
- Az „elektronika", mint szó és tantárgy ekkor még nem létezett; az ehhez kapcsolódó ismereteket rádiótechnika, vákuumcsöves erősítők, és méréstechnika tárgyakban oktatták.

- A két világháború között (1920–1939) több professzor – például Zipernowsky Károly tanítványai – már elektronikus jelenségekkel is foglalkoztak (pl. katódsugárcsövek, rádiófrekvenciás áramkörök).

Az elektronika önállósodása (1945–1960) [3, 4]:
- A második világháború után a technológiai fejlődés (radar, rádió, televízió, elektroncsöves számítógépek) miatt az elektronika stratégiai fontosságú lett.
- A BME Villamosmérnöki Karán az 1949-es tantervi reform során elektronikai irány különült el a korábbi „erősáramú” és „gyengeáramú” szakágak között.
- 1951–1952-ben létrejött az első Elektronikus Áramkörök Tanszék, illetve az Elektronikai Laboratórium, amely az elektronikus méréstechnikát és áramkörtervezést oktatta.

A tranzisztor és az integrált áramkör kora (1960–1980) [3, 4]:
- Az 1960-as években a félvezető-technológia (tranzisztorok, diódák, IC-k) megjelenésével a „félvezető-elektronika” önálló oktatási területté vált.
- 1962-ben a BME-n megalakult a Félvezető-elektronikai Tanszék, amely később a Mikroelektronika és Technológia Tanszék néven működött tovább.
- Ebben az időszakban indult el az Elektronikai és Műszertechnikai szakirány, majd később a Mikroelektronikai szakmérnöki képzés is.
- A Kandó Kálmán Műszaki Főiskola (ma Óbudai Egyetem) szintén az 1960-as évek végétől oktatott elektronikát gyakorlati mérnökképzés keretében.

Modern korszak (1980–napjainkig) [1, 2, 3, 4, 5]:
- Az 1980–1990-es években a mikroprocesszorok és digitális áramkörök megjelenésével az elektronika oktatása digitális irányba tolódott.
- A BME-n ekkor jött létre az Elektronikus Eszközök Tanszék és a Mikroelektronikai Technológia Tanszék, később ezek integrálódtak az Elektronikus Eszközök és Technológia Tanszékké.
- Az elektronika ma a BME Villamosmérnöki és Informatikai Karának (VIK) egyik alappillére, és több egyetemen (pl. Pannon Egyetem, Debreceni Egyetem, Óbudai Egyetem) is önálló szak vagy specializáció.
- A Miskolci Egyetemen az 1970-es és 80-as években az oktatás és a kutatás az elektronika, mikroelektronika és méréstechnika irányában bővült. Ez a változás a tanszék nevében is megjelenítésre került az 1980-as években az Elektrotechnika Tanszék neve kiegészült, így létrejött az Elektrotechnikai-Elektronikai Tanszék.

Az elektronika jövője? [6, 7, 8, 9, 10]:
1. Fejlettebb félvezető-technológiák
   - A szilícium mellé új anyagok (pl. grafén, germánium, GaN – gallium-nitrid, MoS_2) lépnek, amelyek gyorsabb, energiatakarékosabb eszközöket tesznek lehetővé.
   - A 3D integrált áramkörök és chiplet architektúrák forradalmasítják a processzorgyártást – nem egyetlen nagy chip lesz, hanem több kisebb, specializált egység kapcsolódik össze.

2. Elektronika és mesterséges intelligencia összeolvadása
   - Az AI-chipek (pl. neuromorfikus processzorok) az emberi agy mintájára működnek, ami hatalmas energiahatékonyságot és sebességet hozhat.
   - A jövő eszközei (szenzorok, robotok, okoseszközök) valós időben tanulnak és alkalmazkodnak majd a környezethez.
3. Zöld és fenntartható elektronika
   - Az új generációs áramkörök biológiailag lebomló vagy újrahasznosítható anyagokból készülhetnek.
   - Az energiafogyasztás csökkentése és a ritkaföldfémek kiváltása kulcstéma lesz.
4. Bioelektronika és ember–gép interfészek
   - Az agy–számítógép kapcsolat (BCI) fejlődése lehetővé teszi, hogy gondolatvezérléssel irányítsunk gépeket.
   - Beültethető szenzorok és okosprotézisek is egyre fejlettebbek lesznek – a biológia és elektronika határai elmosódnak.
5. Kvantum- és poszt-szilikon korszak
   - A kvantumelektronika (pl. kvantumtranzisztorok, kvantumérzékelők) új fizikai elveket használ.
   - A spintronika és fototronika a töltés helyett az elektron spinjét vagy fényrészecskéket használ információhordozónak.
6. Minden összekapcsolódik – IoT 2.0
   - A jövőben nem csak „okos” eszközök lesznek, hanem önszerveződő, hálózatba tanuló rendszerek (pl. okosvárosok, önvezérlő gyárak).
   - A vezeték nélküli energiaátvitel és ultrasebességű kommunikáció (6G és azon túl) mindent összekapcsol majd.

Az 1. táblázat összefoglalja, hogy az elektronika megjelenéstől napjainkig az egyes korszakokban hogyan jelent meg az elektronika az oktatásban.

1. táblázat: *Az elektronika korszakai a felsőoktatásban.*

Időszak	Fő fejlemény	Oktatási forma
1900–1945	Villamosságtan, rádiótechnika	Fizika/villamosmérnöki tárgyak részeként
1945–1960	Elektronikai tanszékek alakulása	Gyengeáramú irány, elektronikai kurzusok
1960–1980	Félvezető-elektronika, IC-technológia	Elektronikai és mikroelektronikai szakirányok
1980–2000	Digitális és számítógépes elektronika	Önálló tanszékek, szakmérnöki képzés
2000–	Mikro- és nanoelektronika, beágyazott rendszerek	BSc–MSc szakirányok, doktori programok

3. A LIE6 MIKROELEKTRONIKAI LABORATÓRIUM

Az Elektronika Tanszék laboratóriumainak elődje az 1950-es évek elején került kialakításra. Akkoriban 2 db laboratóriumot alakítottak ki, mindkét laboratórium egyenként csaknem 120 m^2

alapterületű volt, 2-2 bejárattal és 8 ablakkal. A laborokban fából készült asztalok és vitrines szekrények helyezkedtek el, amelyekben a méréshez használt műszereket tárolták.

A laboratóriumokat nem csak elektrotechnikai és akkori elektronikai ismeretek oktatására hozták létre, hanem az alapvető fizikai és villamos mennyiségek mérései, laborgyakorlatai is itt történtek.

A laboratóriumokat az 1970-es években kettéosztották, középen elfalazták, így két-két kisebb alapterületű, de egymással tükörszimmetrikus laboratóriumot alakítva ki. A két-két laboratórium funkciója az eredetivel megegyező maradt és a felszereltség sem változott jelentősebb mértékben.

A laboratóriumok első korszerűsítésére az 1980-as években került sor. Ebben az évtizedben mind a 4 laboratórium megújuláson esett át. A laborokat 1985 augusztusában (a minőségi bizonyítvány alapján egészen pontosan 1985. július 25-én) adták át, így az 1985/86 tanév első félévében a hallgatók már használatba is tudták venni.

A megújulás kiterjedt az építészeten át a laborpultok, valamint a műszerpark cseréjére is. A laborokban az akkoriban legkorszerűbbnek tartott GANZ-Hera laborpultok kerültek beépítésre. A laboratóriumok kialakítására 5 millió forintot fordítottak, amely mai értékben 500 millió forintnak felel meg. A Villamos gépek I, a Villamos gépek II, és a Teljesítményelektronikai laboratórium 6-6 db, míg a Mikroelektronikai laboratórium 9 db pultot kapott (1. ábra). Ezzel a Tanszék egyidőben 27 mérőhelyen, összesen 54 hallgatónak tudott mérést biztosítani.

1. ábra: *A LIE6 labor pultjainak kinézete és műszerezettsége 1985-2025 közötti időszakban.*

A Tanszék oktatói állománya és vezetői az elmúlt 10-15 évben folyamatos cserélődésen esett át, emiatt a laboratórium felújítását senki sem merte felvállalni. Napjainkra gyakorlatilag a tanszék teljes állománya lecserélődött. Nem csak az általunk kinevelt fiatalok közül sikerült itt tartani néhány főt, hanem sikerült másik egyetemről, illetve egyetemen belül más tanszékről, valamint az iparból is átvenni kollégákat. Mindezeknek köszönhetően a tanszéki kollektíva átlag- és a medián életkora sem éri el a 40 évet. Ezzel a Gépészmérnöki és Informatikai Kar egyik, ha nem a legfiatalabb átlagéletkorú tanszékévé váltunk, miközben a kar legrégebbi alapítású, legöregebb tanszéke vagyunk.

A labor bontásának megkezdése előtt kialakítottunk egy koncepciót, amely magában foglalta a teljes belsőépítészeti megújulást, valamint saját tervezésű és egyedileg legyártott laborpultok kialakítását és a korszerűtlen eszközök, berendezések cseréjét, új bútorzat beszerzését is.

A kidolgozott koncepciót bemutattuk ipari partnerünknek a MOL Petrolkémiának, akiknek megtetszett, így anyagi támogatást nyújtott a laboratórium korszerűsítésére. Ennek köszönhetően a labor elkészülte után a MOL Elektronikai Mérőlabor névre kereszteljük át.

A munkálatok ugyan még folyamatban vannak, de már elkezdődött az új pultok kialakítása is. A 2. ábra az építészeti felújítás befejezése után, az új szekrényeket és pultfelépítményeket szemlélteti. A laboratórium várhatóan 2026. tavaszán fog elkészülni.

2. ábra: *A LIE6 labor kialakításának pillanatképe 2025. novemberében.*

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmány a Miskolci Egyetem Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszékének LIE6 elektronikai laboratóriumának felújítását mutatja be. A laboratóriumot az 1950-es években hozták létre, és első korszerűsítése 1985-ben történt, amikor a GANZ-Hera által gyártott modern laborpultokat és új berendezéseket építettek be. A beruházás akkoriban mintegy 5 millió forintba került, ami mai értéken kb. 500 millió forintnak felel meg. A labor azóta eltelt csaknem 40 évben teljesen elavult, így 2025-ben megkezdődött az átfogó felújítás, amely a következőket foglalta magában: belsőépítészeti modernizálás; saját tervezésű, egyedi laborpultok gyártása; új mérőeszközök és bútorzat beszerzése; új kapcsolószekrény és korszerű hálózati infrastruktúra kialakítása.

A projekt ipari partnerrel, a MOL Petrolkémiával együttműködésben valósul meg, amely pénzügyi támogatást biztosított a fejlesztéshez. Az új labor a MOL Elektronikai Mérőlabor nevet kapja és várhatóan 2026 tavaszán készül el.

A tanulmány a labor történeti áttekintése mellett kitér az elektronika felsőoktatásban való megjelenésére is – a 20. század eleji fizikai és rádiótechnikai oktatástól kezdve egészen a modern mikro- és nanoelektronikáig. A tanulmány kronologikusan bemutatja, hogyan vált az elektronika az egyetemi mérnökképzés önálló pillérévé Magyarországon és a világban.

A LIE6 labor megújítása nem csupán infrastrukturális fejlesztés, hanem a tanszék történetének és hagyományainak megőrzése is. A múlt értékeire épülő korszerű labor biztosítja az oktatás jövőbeli színvonalát. Az ipari együttműködés (MOL támogatása) modellértékű példa az egyetem–ipar kapcsolat erősítésére, amely mindkét fél számára előnyös. A fiatal tanszéki kollektíva és a korszerű infrastruktúra kombinációja lehetővé teszi, hogy a Miskolci Egyetem a modern elektronikai oktatás egyik regionális központjává váljon. Az elektronika oktatásának történeti áttekintése jól rávilágít arra, hogy az innováció folyamatos alkalmazkodást kíván – az új labor ennek a szemléletnek a folytatása. A fejlesztés nem zárul le az átadással: a labor hosszú távon az oktatás, kutatás és ipari együttműködés integrált tere lesz.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] ÉRSEK, D.: *Az Elektrotechnikai Tanszék története 1974-ig.* p. 10. 1974.

[2] BODNÁR, I., BOROS, R. R., MATUSZ-KALÁSZ, D., OLAJOS, P., SZABÓ N., SOMOGYINÉ MOLNÁR, J., KOZSELY, G., ERDŐSY, D., MOLNÁR, S., JENYÓ, T., PINTÉR, J. M.: *Az Elektrotechnikai és Elektronikai Tanszék Villamos gépek és hajtások, alias LIE2 laboratóriumának felújítása.* Elektrotechnikai és Elektronikai Szeminárium 2022: konferencia előadások publikációi, Miskolc-Egyetemváros, Magyarország, Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék 135 p. pp. 42-55., 14 p. 2022.

[3] https://www.ett.bme.hu/tanszekunk Megtekintés dátuma: 2025. november 12.

[4] https://www.bme.hu/egyetem-multja-tortenete Megtekintés dátuma: 2025. november 12.

[5] https://geik.uni-miskolc.hu/intezetek/FEI/index.php Megtekintés dátuma: 2025. november 12.

[6] https://www.atlascopco.com/hu-hu/compressors/air-compressor-blog/future-of-electronics-industry Megtekintés dátuma: 2025. november 12.

[7] https://www.guiahardware.es/hu/j%C3%B6v%C5%91beli-f%C3%A9lvezet%C5%91-anyagok/ Megtekintés dátuma: 2025. november 12.

[8] https://jovogyara.hu/kozeppontban-az-elektronikai-ipar-jovoje.html Megtekintés dátuma: 2025. november 12.

[9] https://www.magyar-elektronika.hu/tartalom/ellenallo-kepesseg-a-valtozo-elektronikai-kornyezetben Megtekintés dátuma: 2025. november 12.

[10] https://gyartastrend.hu/cikk/az-ai-es-az-elektronika-frigye Megtekintés dátuma: 2025. november 12.

KORREKCIÓS FÜGGVÉNYEK ÉS JAVÍTÓ ALGORITMUSOK A GÉPI TANULÁSBAN

CORRECTION FUNCTIONS AND REFINEMENT ALGORITHMS FOR ENHANCING THE PERFORMANCE OF MACHINE LEARNING MODELS

KOVÁCS Attila[1], KOVÁCSNÉ MOLNÁR Judit[2], JÁRMAI Károly[3]

[1]PhD hallgató, attila.kovacs@zf.com
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék;

[2]PhD, egyetemi docens, judit.molnar@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék;

[3]PhD, professzor emeritus, karoly.jarmai@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet,
Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék;

Kivonat: *A tanulmány célja a korrekciós függvények és az optimalizáláson alapuló finomító algoritmusok szerepének vizsgálata és bemutatása a gépi tanulási modellek teljesítményének javításában, különösen az ipari környezetben alkalmazott prediktív anomáliaészlelési feladatokban. A gépi tanulási modellek teljesítménye nagymértékben függ az adat előfeldolgozás, a modellarchitektúra és az utófeldolgozási módszertan minőségétől. Számos gyakorlati alkalmazásban – különösen az idősoros előrejelzésben és az anomáliaészlelésekben – a hagyományos betanítási folyamat önmagában nem elegendő, mivel a modell bizonytalansága, a strukturális torzítás és a ritka események kezelése speciális utólagos kalibrációs és finomító mechanizmusokat igényel. Ez a tanulmány szisztematikus áttekintést nyújt a korrekciós függvények (pl. főkomponens-analízis (PCA), négyzetes predikciós hiba (SPE)/Q-statisztika, Hotelling-féle T², Bayes-kalibráció) és az adaptív javító algoritmusok (pl. genetikus algoritmusok (GA), részecskeraj-optimalizálás (PSO), szimulált hőkezelés (SA), Gauss-féle keverékmodell (GMM) és együttes-alapú technikák) szerepéről a gépi tanulási folyamatok teljesítményének javításában. A modellek egy valós ipari adathalmazzal lettek betanítva, amely villamosenergia-hálózati elemzések és harmonikus betáplálláson alapuló terhelési körülmények alapján lett összeállítva.*

Kulcsszavak: *gépitanulás; korrekciós függvények; anomália-detekció; főkomponens-analízis (PCA); Bayes-i súlyozás/kalibrálás; Long Short-Term Memory (LSTM) alapú idősorelemzés és előrejelzés hibakompenzáció.*

Abstract: *The aim of this study is to investigate and demonstrate the role of correction functions and optimization-based refinement algorithms in enhancing the performance of machine learning models, particularly in predictive anomaly detection tasks applied in industrial environments. The performance of machine learning models is highly dependent on the quality of data preprocessing, model architecture, and post-processing methodology. In many practical applications – particularly in time-series forecasting and anomaly detection – the conventional training pipeline alone is insufficient, as model uncertainty, structural bias and the handling of rare events require specialized post-hoc calibration and refinement mechanisms. This study provides a systematic overview of the role of correction functions (e.g. Principal Component Analysis (PCA), Squared Prediction Error (SPE)/Q-statistics, Hotelling's T², Bayesian calibration) and adaptive improvement algorithms (e.g. Genetic Algorithms (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Simulated Annealing (SA), Gaussian Mixture Model (GMM) and ensemble-based techniques) in enhancing the performance of machine learning pipelines. The models were trained using an industrial dataset compiled from power network analytics and harmonic injection-based loading conditions.*

Keywords: *machine learning; correction functions; anomaly detection; Principal Component Analysis (PCA); Bayesian weighting/calibration; Long Short-Term Memory (LSTM) time-series forecasting and error compensation.*

1. BEVEZETÉS

A villamos harmonikusok az energia minőségére gyakorolt káros hatásuk következtében egyre nagyobb figyelmet kapnak, hiszen legtöbb esetben az iparban a saját, belső elosztóhálózatokra modern, nem lineáris fogyasztók csatlakoznak. A tanulmányhoz felhasznált saját villamos harmonikus adatokat a vizsgált ipari berendezések harmonikus injektációi adják [1]. Már korábban megvizsgáltuk, hogy fel lehet-e használni a villamos felharmonikusok áramspektrum adatait gépek, berendezések állapotának monitorozására és ha igen, akkor hogyan. Lehetséges-e a rendelkezésre álló adatok segítségével anomália detektálást végezni a meghibásodások és az állapotváltozások előrejelzése érdekében. Esetlegesen klaszterezéssel, vagyis egyedi hiba típusok hozzáadásával lehetséges-e a meghibásodások osztályozása. Az így feltárt anomáliákat hogyan lehet prediktív karbantartásra alkalmazni. Az analízis során felfedett anomáliák a tényleges meghibásodásokkal, a berendezések valós állapot adataival időben összevetve lettek validálva. A gyakorlati eredmények azt mutatják, hogy ez az irány ígéretes, azonban a gépi tanulási modellek hatékonyságát tovább kell növelni a pontosabb predikciók érdekében [2]. A gépi tanulás modellek (Machine Learning - ML) és a teljes adatfeldolgozás folyamatok (ML pipeline) teljesítmény növelése érdekében korrekciós függvények és javító algoritmusok lettek tesztelve. A gépi tanulási modellek pontossága, vagyis a tényleges és a predikált adatok közötti távolság minimálissá tétele kulcsfontosságú a gyakorlati alkalmazásokban. A kutatók több irányból közelítik meg a modell teljesítmény növelését. Az első ezek közül az adatszintű módszerek alkalmazása (pl. data augmentation, balancing), melyek azt vizsgálják, hogyan rontja le az osztályozó modellek teljesítményét az, ha az adatok erősen kiegyensúlyozatlanok [3]. Erre a legfontosabb megoldások például az oversampling, undersampling és a SMOTE módszerek, melyek javítják a kisebbségi osztály felismerését, elősegítve ezzel, hogy ilyen adatállományokból megbízhatóbb modelleket lehessen alkotni. Egy másik irány a modell és algoritmusszintű beavatkozások (regularizáció, hiperparaméter-optimalizálás), melyek célja, hogy a gépi tanulási modelleket stabilabbá és általánosíthatóbbá lehessen tenni [4-5]. A regularizáció célja a túlillesztés csökkentése úgy, hogy korlátozza a modell komplexitását vagy bünteti a túl nagy súlyokat. A hiperparaméter-optimalizálás olyan módszereket fog össze (pl. Bayesian, grid vagy random search), amelyekkel megtalálhatók a modell legjobb beállításai a teljesítmény maximalizálása érdekében. A kettő együtt kulcsfontosságú a pontos és robusztus modellek fejlesztésében. Egy másik irány pedig a metaszintű eljárások (ensemble learning, transfer learning, AutoML), melyek növelik a modellek pontosságát és stabilitását azzal, hogy több gyenge modellt kombinálnak egy erősebb előrejelzővé [6]. Az ensemble learning különösen hatékony zajos, komplex vagy kis mintaszámú adathalmazok esetén. A transfer learning koncepciója lehetővé teszi tudás átvitelét egy forrásfeladatról egy új, hasonló célfeladatra, valamint elemzi a különböző típusokat (inductive, transductive, unsupervised) és azok alkalmazási területeit [7]. Különösen hasznos olyan helyzetekben, ahol kevés a címkézett adat, vagy költséges az adatgyűjtés. Az AutoML rendszerek működése a hiperparaméter-optimalizálásra, a modellválasztásra, a pipeline-építésre és a meta-learningre épül [8]. Célja, hogy automatizálja a teljes ML folyamatot, csökkentve az emberi szakértelem szükségességét. Központi módszerei a Bayesian optimization, evolutionary search és a neurális architektúra keresés (NAS).

A cikkben vizsgáljuk a korrekciós függvényeket, gyakorlati alkalmazási példákat is bemutatva. A szakirodalomban több kutatási irány foglalkozik a témával, a residual learning és stacking módszerek a modell maradék hibáira építenek másodlagos előrejelzéseket. A debiasing és bootstrap bias correction technikák a torzítások mérséklését célozzák. A Bayes-féle kalibráció (Bayesian calibration) a prediktív bizonytalanság finomítását szolgálja, a modell paramétereinek valószínűségi alapú finomhangolását végzi [9]. A célja egy olyan keretrendszer megalkotása, amely figyelembe veszi a modell bizonytalanságát, a megfigyelési zajt és a szisztematikus

eltéréseket. A megközelítés pontosabb, robusztusabb és megbízhatóbb paraméterbecslést eredményez, különösen komplex szimulációs vagy prediktív modellek esetében. Míg az evolúciós algoritmusok (Genetic Algorithms - GA, Particle Swarm Optimization - PSO) az optimális paraméterek és döntési küszöbök keresésével javítják a teljesítményt. A genetikus algoritmus biológiai evolúciós folyamatokat, szelekciót, keresztezést és mutációt utánozva keresi az optimális megoldást [10]. A GA különösen hatékony komplex, nemlineáris, többparaméteres optimalizálási problémák esetén, ahol klasszikus módszerek könnyen elakadnak lokális optimumokban. A PSO algoritmus a rajok kollektív viselkedését modellezi [11]. A részecskék a keresési térben mozogva kommunikálnak és fokozatosan javítják pozíciójukat. A PSO gyors, konvergenciaképes és hatékony olyan optimalizálási feladatokban, ahol nagy a keresési tér és komplex a célfüggvény.

A korrekciós függvények és javító algoritmusok egymást kiegészítő szerepet töltenek be, előbbiek lokális, gyors beavatkozást kínálnak, míg utóbbiak globális, adaptív javítást tesznek lehetővé. Egy korszerű gépi tanulási pipeline, például a PCA–LSTM–GMM kombináció, hatékonyságát jelentősen növelheti, ha a kimeneti szakaszban mindkét típusú módszert alkalmazzuk. A korrekciós függvények és javító algoritmusok több szinten is beavatkozhatnak a gépi tanulási folyamatba. A korrekciós függvények főleg statikus, szabályalapú eszközök, míg a javító algoritmusok dinamikus, kereső/tanuló folyamatok. A korrekciós függvények és javító algoritmusok széles eszköztárat kínálnak a legegyszerűbb statisztikai szűrőktől a komplex AutoML-rendszerekig. A módszerek közös jellemzője, hogy a modell megbízhatóságát növelik és csökkentik a hibás előrejelzések kockázatát. A gépi tanulási modellek és a teljes adatfeldolgozási folyamatok programozási feladatait, optimalizálását, valamint a modellek villamos harmonikus adatokon való tesztelését MATLAB fejlesztői környezetben végeztük el (MATLAB R2024a és b, valamint MATLAB R2025a és b) [12]. Meg kell jegyezni, hogy a MATLAB programozási környezet miatt az egyes ábrák és táblázatok minősége eltérhet az egyéb grafikai megjelenítések minőségétől.

2. A KUTATÁS CÉLJA

A 2024 és 2025 években a hálózatanalízishez kapcsolódó mérési adatok alapján megvizsgáltuk, hogy lehetséges-e villamos harmonikus adatokkal anomália detekciót, anomáliák klaszterezését és prediktív karbantartást végezni. A kutatás eredményei ígéretesek voltak, de szükségessé vált a gépi tanulási modellek teljesítményének javítása [2]. A jelenlegi kutatás célja ezen módszerek rendszerezett áttekintése villamos hálózatanalízis mérési adatok felhasználásával gyakorlati alkalmazási példákon keresztül. A tudásfelfedezés adatbázisokban KDD (Knowledge Discovery in Databases) egy olyan folyamat, amelynek célja a nagy mennyiségű adatokból való strukturált tudás felfedezése és kinyerése. A KDD nem csupán adatbányászatot jelent, hanem egy komplex folyamatot, amely több lépésből áll és amelyben az adatelőkészítés, -elemzés, mintázatfelismerés és értelmezés is szerepet kap. Az adat-bányászat, adattudomány napjainkban kiemelt kutatási terület. Jelen kutatás elméleti alapjait Abonyi et al. (2007) könyve adta [13], amely a klaszterezés (cluster analysis) módszertanát tárgyalja, különös tekintettel annak adatbányászati és rendszerazonosítási alkalmazásaira. A szerzők matematikailag megalapozott, ugyanakkor alkalmazásorientált megközelítést kínálnak, amely hasznos lehet kutatók, mérnökök és adatelemzők számára egyaránt. Az elméletileg megalapozott, gyakorlatias kézikönyv kiemelten hasznos azok számára, akik ipari, mérnöki vagy tudományos környezetben kívánják alkalmazni a klaszterezés eszköztárát. Jelen kutatás célja az volt, hogy átfogó képet adjon a korrekciós függvények és javító algoritmusok szerepéről a gépi tanulásban, kategorizálja a főbb megközelítéseket, valamint bemutassa azok alkalmazását egy energetikai anomáliadetektáló rendszer példáján. A cél, hogy gyakorlati alkalmazási példákon keresztül bemuta-

tásra kerüljön a korrekciós függvények és javító algoritmusok szerepe a gépi tanulásban, ismertetve legyen azok hatása egy villamos harmonikus adatokat használó, gépi anomáliákat detektáló rendszer predikciós teljesítményének javításában.

3. KORREKCIÓS FÜGGVÉNYEK

A korrekciós függvények egyszerű, determinisztikus szabályok, vagy statisztikai formulák segítségével korrigálják lokálisan a kimenetet (pl. negatív értékek nullára állítása, küszöbhangolás ROC-görbe alapján, outlier szűrés z-score módszerrel). Erre épül például nemlineáris mérőrendszerekhez a mélytanulás-alapú hibakompenzációs módszer [14], amely olyan DNN-alapú korrekciós függvényt alkalmaz, amely képes a szenzorok szisztematikus és véletlen hibáit tanulással kompenzálni. A módszer jelentősen javítja a mérési pontosságot és rugalmasan illeszthető különböző ipari mérőeszközökhöz. Fontos kiemelni, hogy a módszerben a klasszikus hibajavító algoritmusokat felváltja egy adaptív, adatvezérelt megközelítés. A korrekciós függvények gyors és könnyen értelmezhető beavatkozást kínálnak.

A korrekciós függvények és javító algoritmusok kutatása szorosan kapcsolódik a gépi tanulási modellek megbízhatóságának és általánosíthatóságának kérdéséhez. A prediktív modellek, neurális hálók, mélytanulási architektúrák, valamint a statisztikai detektorok számos alkalmazásban bizonyultak hatékonynak, a pénzügyi idősorok előrejelzésétől az egészségügyi diagnosztikán át egészen az energetikai rendszerek állapotfelügyeletéig. Ugyanakkor ezen rendszerek gyakorlati használata során rendre előkerül egy kritikus probléma, az ML modellhibák, téves anomália detekciók és predikciók jelenléte. A következőkben konkrét függvények hatásait vizsgáljuk a villamos harmonikus adat alapú LSTM (Long Short-Term Memory) modell teljesítményére.

3.1. PCA - Principal Component Analysis

A PCA önmagában egy dimenziócsökkentő transzformációs módszer, szűk értelemben véve nem tipikus korrekciós függvény és nem is javító algoritmus. A PCA korrekciós függvényként történő alkalmazása esetén, streaming adatokra használva, determinisztikus matematikai transzformációnak mondhatjuk. Ugyan folyamatosan frissíti az adatfolyamokon a transzformációt, de továbbra is determinisztikus előfeldolgozó módszer. Zaj, redundáns jellemzők kiszűrésére, adattisztításra és egyszerűsítésre szolgál, nem tanul adaptívan. Sokszor a rengeteg adat és adatkategóriák miatt a dimenziók száma nagyon magas, ezért ki kell szűrni azokat a változókat, amelyek kis mértékben járulnak hozzá az adatok varianciájához. Csak azon főkomponensek megtartása szükséges, amelyek a legtöbb információt tartalmazzák (ezzel csökken a zaj hatása is). Ha túl sok a bemeneti változó (feature) és kevés a minta, a modell könnyen túlilleszkedhet. Nagy dimenziós adatoknál az algoritmusok (pl. klaszterezés, gépi tanulás) lassabbak és több memóriát igényelnek. A főkomponens-analízissel csökkenthető a paramétertér. Például lehetséges, hogy 50 villamos harmonikus rend amplitúdóit szeretnénk elemezni, de kiderül, hogy ezek közül csak 5-6 komponens felel az adatok 95%-os varianciájáért. A PCA segítségével ezek a komponensek használandóak a további elemzésre, míg a többiek elhanyagolhatóak. Az 1. táblázatban saját kutatási adatok alapján is látható, hogy az első 5 sajátérték lefedi a variancia 98,053%-át. Mint láthatjuk, az első főkomponens magyarázza az adatok 58,196%-át.

1. táblázat: *Sajátértékek táblázatos eloszlása.*

Sajátérték indexe	***Sajátérték***	***Magyarázott variancia [%]***	***Kumulált variancia [%]***
1	0,276	58,196	58,196
2	0,125	26,479	84,675
3	0,029	6,113	90,788
4	0,018	3,842	94,630
5	0,016	3,424	98,053
6	0,005	1,082	99,135
7	0,001	0,277	99,412
8	0,0008	0,159	99,571
9	0,0004	0,076	99,646
10	0,0003	0,068	99,714
11	0,0003	0,064	99,779
12	0,0002	0,047	99,825
13	0,0001	0,029	99,854
14	0,0001	0,028	99,882

3.2. RST - Rough Set Theory

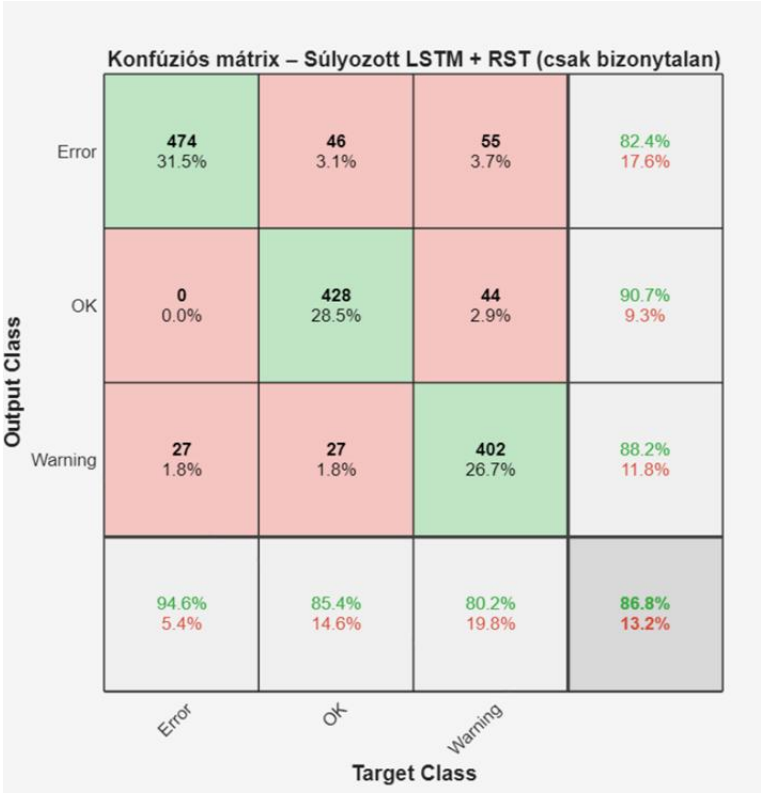
Az RST, vagyis a durva halmazelmélet, Zdzisław Pawlak által bevezetett módszer (1982), amely az adatok bizonytalanságának és pontatlanságának kezelésére szolgál. A RST fő gondolata, hogy egy adathalmazban nem minden elem különíthető el egyértelműen, azaz léteznek pontatlan vagy homályos osztályok. A következőkben bemutatjuk, hogy villamos harmonikus adatokkal, súlyozott LSTM és RST kombináció használatával hogyan tudjuk növelni az ML modell hatékonyságát, illetve a klaszterezés pontosságát.

Az 1. ábrán láthatjuk az LSTM és RST kombinált módszer konfúziós mátrixát súlyozott predikcióra saját kutatás adatok alapján. A mátrix a rendszer háromosztályos kimenetét mutatja: Error, OK és Warning kimeneteket. A sorok a modell által jelzett kimenetek, míg az oszlopok a valódi osztályok. A mátrix alapján elkülöníthetjük az egyes osztályokat és helyes besorolásaik mértékét:

- Error osztály (hibaállapot): 474/575 helyes besorolás (amely 82,4%-os arányt jelent). Ez rendkívül fontos ipari környezetben, hiszen a modell a tényleges hibákat nagy arányban felismeri, ami magas megbízhatóságot jelent.
- OK osztály (nagyon erős felismerés): 428/472 helyes besorolás, amely 90,7%. Ez azt jelenti, hogy a rendszer tökéletesen megtanulta a normál működésre jellemző mintázatot.
- Warning osztály (közepes felismerés): 402/501 helyes besorolás, ami 80,2%. A Warning tipikusan átmeneti állapot, ezért sokszor nehezebb elkülöníteni.

A rossz besorolások mintázata is megállapítható:

- Error-ból tévesen Warning 55 eset,
- OK-ból Warning 44 eset,
- Warning-ból Error: 27 eset.



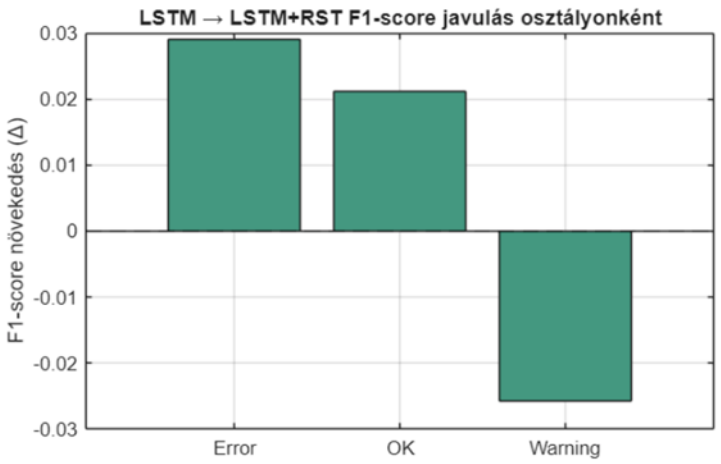
1. ábra: *Konfúziós mátrix kiértékelés az LSTM+RST súlyozott predikcióra (instabil minták).*

A konfúziós mátrix után vizsgáljuk meg LSTM+RST modell F1-score jellemzőjének változását is. Az F1-score az egyik legfontosabb teljesítménymutató az osztályozási és anomáliadetektálási modellek értékelésében. Az F1-score akkor jó, ha a modell kiegyensúlyozottan detektál és nem torzít egyik irányba sem. Az alacsony F1-score azt jelzi, hogy a modell vagy túl sok hamis riasztást ad, vagy túl sok hibát nem vesz észre, tehát nem megbízható a döntéseiben. Ha a modell egyensúlya felborul a találati arány és a megbízhatóság között, az F1-score gyorsan lecsökken. Az F1-score akkor romlik le, ha sok a hamis riasztás (FP), ilyenkor a modell túl sok mindent tekint hibásnak (rossz precision), vagy sok a kihagyott anomália (FN), ilyenkor a modell nem érzékeny eléggé (rossz recall). Az F1-score tipikus értelmezése: 0,9-1,0 kiváló, pontos és érzékeny modell; 0,8-0,9 jó egyensúly, kisebb hibák; míg 0,6-0,8 közepes, egyik mutató gyengül (FP vagy FN nő); valamint F1-score<0,6 gyenge a modell vagy túldetektál vagy kihagy anomáliákat.

A 2. ábrán láthatjuk, hogy ha az RST korrekciót hozzáadjuk a modellünkhöz, hogyan változik meg annak teljesítménye.

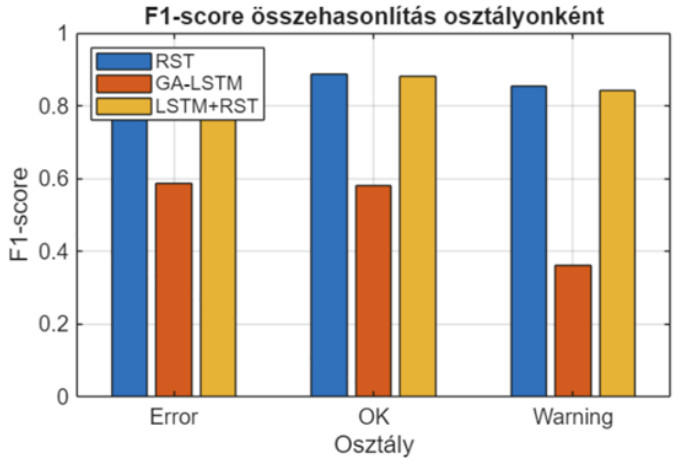
- Error osztály F1-score: +0,03 a javulás mértéke. A rendszer jobban kezeli a hibás eseteket, kevesebb a Warning/OK tévesztése, ezáltal nagyobb megbízhatósága van hibadetektálásnál. Ez egy fontos eredmény ipari feladatok esetén.
- OK osztály: +0,02, azaz a normál működés detektálása is pontosabb lett.
- Warning osztály: –0,025, azaz romlás következett be.

Az RST szabályalapú korrekció az átmeneti (Warning) állapotot gyakran átsorolja Error vagy OK irányába, ezért csökkent a Warning F1-score. Ez viszont tudatos stratégia, hiszen az RST célja, hogy a bizonytalan zónákat tisztázza: vagy hiba (Error), vagy rendben (OK). A Warning tehát egy segédosztály, amelyet a súlyozott rendszer redukál. Ez iparilag elfogadott stratégia, mert a Warning kategória interpretálása sokszor kevésbé egyértelmű.



2. ábra: *LSTM vs LSTM+RST F1-score javulás osztályonként.*

A 3. ábrán az F1-score értékek összehasonlítása látható osztályonként. Ez a leginformatívabb grafikon, mert egyszerre mutatja az RST szabály-rendszer teljesítményét (RST), a GA-val optimalizált LSTM teljesítményét (GA-LSTM) és a kettő kombinációjának a teljesítményét (LSTM+RST).



3. ábra: *F1-score összehasonlítás osztályonként.*

Láthatjuk, hogy a GA-optimalizált LSTM gyenge a Warning és OK osztályokban. Az F1-score GA-LSTM esetében az Error ~0,60, OK: ~0,58, Warning: ~0,32. Ebből az adatokból az következik, hogy az LSTM hajlamos túláltalánosítani és keveset tanul a ritkább osztályokból. Ezzel szemben az RST önmagában is magas pontosságot ad, az F1-score értékek alakulása: Error: ~0,78, OK: ~0,80, Warning: ~0,84. Ez mutatja, hogy az RST kiválóan kezeli az elhatárolható mintázatokat, de nem modellezi a hosszú távú időbeli összefüggéseket. A kombinált LSTM + RST messze a legjobb mindhárom osztályban, hiszen az F1-score értékei: Error: ~0,88, OK: ~0,90, Warning: ~0,84. A teljes rendszer minden osztályban jobb, mint bármelyik komponens külön-külön. Ez igazolja. hogy a GA-val optimalizált LSTM a dinamikát tanulja, az RST a döntési felületet tisztítja és korrigálja, a kettő együtt pedig a hibrid optimum lesz. Megállapíthatjuk, hogy a GA-val optimalizált LSTM és az RST szabályalapú korrekció együttes alkalmazása jelentős teljesítményjavulást eredményezett a háromosztályos állapotfelismerési feladatban. Az F1-score értékek osztályonkénti elemzése azt mutatja, hogy a súlyozott LSTM+RST megoldás minden osztályban felülmúlja mind az önálló GA-LSTM-et, mind az

önálló RST modellt. A legnagyobb javulás az Error osztályban figyelhető meg (+0,03), ami különösen fontos ipari diagnosztikai környezetben. Összességében a hibrid rendszer a dinamikus mintázatok (LSTM) és a szabályalapú döntési logika (RST) előnyeit kombinálva egy robusztus, nagy pontosságú állapotfelismerési modellt eredményez.

4. JAVÍTÓ ALGORITMUSOK

A javító algoritmusok, jellemzően összetettebb keresésen, vagy tanuláson alapuló megoldások (pl. GA, PSO, AutoML, ensemble módszerek). A javító algoritmusoknak nagyobb a számítási igénye, de képesek adaptív és globális szintű hibajavításra, dinamikus kereséssel és optimalizációval. A szakirodalomban több kutatási irány foglalkozik a témával. Az egyik ilyen a residual learning és hibajavító metamodellek. Utóbbi alapja, hogy az elsődleges modell hibáin tanítunk be egy másodlagos modellt (pl. döntési fa vagy GMM). Megtanulja, mikor hibázik az elsődleges modell és adott esetben javítja is azt. A residual learning megközelítés a modell által elkövetett hibákból tanuló másodlagos modellekre épít. A kutatások kimutatták, hogy a reziduális hibák modellezése hatékonyan csökkenti az elsődleges modell tévedéseit

4.1. PCA - Principal Component Analysis

A PCA-t javító algoritmusként használva a komponensek számát, a kernel paramétereket és az egyéb PCA-beállításokat kereső/optimalizáló eljárás a modell leképezésének minőségét és szeparálhatóságát javítja. Így már dinamikus javító mechanizmus lesz, mert folyamatosan optimalizálja a modell beállításait a rendszer visszajelzései alapján. A dinamikus javító mechanizmus azt jelenti, hogy a PCA beállításai (például a komponensek száma és a kernelparaméterek) nem fix értékek, hanem egy optimalizáló algoritmus által folyamatosan, automatikusan frissülnek. Ennek eredményeként a modell önhangoló, adaptív módon javítja a leképezés és az anomália-szeparálás minőségét. A kernel paraméterek, vagy más néven magfüggvény-paraméterek pedig olyan beállítások, amelyek meghatározzák, hogyan vetíti a kernel-alapú algoritmus (pl. Kernel PCA, SVM, GMM) az adatokat egy magasabb dimenziós térbe, ahol azok jobban elkülöníthetők. A kernel paraméterek tehát meghatározzák a nemlineáris leképezés karakterét és optimalizálásuk kulcsfontosságú a dimenziócsökkentés és anomália-szeparálás hatékonyságának növeléséhez. Lehetőség van a PCA-t a teljes ML pipeline részeként optimalizálni, az automatikus modell-keresés során az AutoML-be integrálva. A PCA és Ensemble több különböző transzformációt kombinál, így az ensemble logika miatt inkább javító módszernek minősül, amelyben több különböző redukciós stratégia erősíti egymást. Ez a metódus megegyezik a korrekciós függvényeknél ismertetett PCA főkomponens elemzéssel, melyet már láthattunk korábban, ezért most nem kerül tárgyalásra.

4.2. SMC - Sliding Mode Control

Az SMC egy robusztus, nemlineáris szabályozási technika, amelyet gyakran alkalmaznak olyan rendszerekben, ahol jelentős a bizonytalanság, a nemlinearitás vagy a külső zavarhatás. Az SMC célja, hogy a rendszer állapotát egy előre meghatározott csúszó felületre (sliding surface) kényszerítse, majd ezen tartsa, ahol a dinamikus viselkedés jól kontrollálható. Első lépésben definiálni kell a rendszer állapottereiben egy csúszó felületet. A vezérlő biztosítja, hogy az állapot gyorsan erre a felületre kerüljön és ott is maradjon. A vezérlő kapcsoló jellegű, így képes nagy robusztusságot biztosítani. A csúszó fázisban a rendszer viselkedése független a paraméter-bizonytalanságoktól és zavaroktól. Előnye a nagyfokú robusztusság a modellhibákkal és külső zavarásokkal szemben. Nem szükséges hozzá pontos modell, elég a dinamikai tartomány

ismerete. A stabilitása matematikailag garantálható (Lyapu-nov-elmélet). Hátránya a Chattering probléma, azaz a kapcsoló jel zajt vihet a rendszerbe, valamint nehéz a gyakorlati implementációja nagy mintavételi frekvencia nélkül. Az SMC tervezése komplex rendszerek esetében bonyolult lehet.

Jelen cikkben az SMC saját kutatási adatokon a predikciók klaszterezésére, illetve annak pontosságának javítására lett alkalmazva. A 4. ábrán látható az SMC függvény alkalmazásának a hatása az időstabilitási metrikákra. Az időstabilitási metrikák azt mutatják meg, hogy egy modell döntései (pl. anomália/normál állapot) milyen mértékben maradnak állandóak egymást követő időpillanatokban, illetve milyen gyakran és mennyire indokolatlanul vált állapotot. A 4. ábra a következőképpen értelmezhető:

- Stabilitás (flip csökk.): 84,8%-kal kevesebb állapotváltás („flip”) történt a modell kimenetében, a rendszer nem reagál a zajra, és folyamatosabb döntéseket hoz. Ez nagyon pozitív, a korrekciós mechanizmus hatékonyan simítja a kimenetet.
- Szegmensszám csökk.: az észlelt eseményszakaszok (anomália-szegmensek) száma 86,5%-kal csökkent, a modell összefüggőbb viselkedést mutat és nem szakad meg feleslegesen.
- Átl. eseményhossz növ.: az átlagos eseményhossz több mint hétszeresére nőtt, de a növekedés egy részét a „clip” korlátozza a grafikonban (a kijelezhető max. ±200%), ezért szerepel a grafikon jelmagyarázatában a „clipped”. A rendszer erősen kisimított, tartós jellegű döntéseket hoz, ez a legtisztább indikátora a megnövekedett időstabilitásnak. Ez azt mutatja, hogy az SMC összefogja a rövid, zajos detektálásokat, ezáltal megbízhatóbbá válik az időbeli jel.
- Riasztási idő arány változás: a teljes vizsgált időszakban az anomáliának detektált minták aránya 8,6%-kal nőtt, a rendszer kissé érzékenyebb lett, de ez természetes velejárója a stabilabb működésnek. Ez elfogadható kompromisszum: kissé több időt tölt „anomália” állapotban, de cserébe sokkal konzisztens.

4. ábra: *SMC hatása az időstabilitási metrikákra.*

Összességében elmondható, hogy az SMC bevezetése drasztikusan javította a modell időbeli stabilitását: csökkent a váltások és szakaszok száma, miközben az események tartósabbak lettek. A rendszer kevésbé érzékeny a pillanatnyi zajra, és folyamatosabb, megbízhatóbb kimenetet ad. Az enyhe riasztási időnövekedés természetes mellékhatás, de az általános időstabilitás jelentősen nőtt.

A 2. táblázat a villamos harmonikus mérési adatok adatsorainak klaszterezését mutatja, szakaszokra bontva. Minden sor egy adott mérési tartományt (adatblokkot) jelöl, amelyhez egy meghibásodási típus (ELEC, MECH vagy MIXED) tartozik. Az adatsorban a SegStart a szegmens kezdő indexe. Például az első sorban a szegmens a 3. adattól indul és a 2295. villamos harmonikus mérési adatnál ér véget. A SegEnd a szegmens befejező indexe. A SegLen a SegStart-tól SegEnd-ig a szegmens hossza, megmutatja hány mintát tartalmaz az adott szakasz.

2. táblázat: *Anomália-idővonal szegmentálásának eredménye.*

SegStart	***SegEnd***	***SegLen***	***Type***
3	99	97	"ELEC"
122	133	12	"ELEC"
165	388	224	"ELEC"
414	429	16	"MECH"
455	692	238	"ELEC"
698	729	32	"MECH"
735	1297	563	"ELEC"
1335	1346	12	"MIXED"
1432	1437	6	"MIXED"
1445	1451	7	"MECH"
1473	1506	34	"MECH"
1520	1527	8	"MECH"
1531	1676	146	"MECH"
1680	1688	9	"MECH"
1701	1712	12	"MECH"
1733	1746	14	"MIXED"
1764	1783	20	"MECH"
1811	1895	85	"ELEC"
1903	2295	393	"ELEC"

A szegmens típusát (Type) a klaszterezés során elkülönített anomália osztályok jelölik. Ebben az esetben a villamos harmonikus adatokon alapuló anomália detekció klaszterezés útján lett elő állítva a segTag alapján. Ezáltal megkülönböztetünk elektromos típusú (ELEC), mechanikus jellegű (MECH) és kevert, azaz elektro-mechanikus típusú (MIXED) szegmenst, amely az egyértelműen nem eldönthető típust jelöli. Az egymást követő anomália minták össze lettek vonva egy szegmenssé. A módszer egy nagyon hasznos diagnosztikai eszköz a prediktív karbantartásban vagy anomália-elemzésben.

4.3. LSTM, GA, PCA, GMM, SPE/Q-stat, Hotelling T^2 és Bayes-súlyozás kombinációja

Ez a fejezet egy példán keresztül összefoglalja a kombinált súlyozás alkalmazását a kutatási adatokon. A kombinációk célja a modellek teljesítményének növelése, az anomáliák pontosabb felismerése és a robusztusabb előrejelzés biztosítása. A genetikus algoritmus jelentősen javítja a rendszer teljesítményét azzal, hogy optimális paramétereket keres, melyekkel az előrejelzés, anomáliadetektálás és klaszterezés együttesen a lehető legjobban működik. Nézzünk néhány lehetséges kombinációs esetet. A PCA+LSTM kombinációja esetén, a PCA előfeldolgozásként kiszűri a zajt és csökkenti a dimenziót, ami javítja az LSTM tanulási stabilitását és csökkenti az overfittinget. Hátránya lehet, ha túl sok információt dob el, akkor az LSTM alul tanulhat. A GMM+LSTM esetén, a GMM előszűrheti az adatokat, valószínűségi klaszterezést ad, majd az

LSTM predikciót készít. Javítja az anomáliadetektálást, mert a GMM bizonytalanságát az LSTM időfüggősége kiegészíti. De akár romlást is előidézhet, ha a GMM rosszul választott klaszterszám miatt félrevezető valószínűségeket ad. A PCA+SPE/Q-stat + Hotelling T^2 egy klasszikus kombináció a multivariáns folyamatellenőrzésben. A PCA dimenziót csökkent, a Hotelling T^2 az eltérést méri a főkomponens-térben, az SPE pedig a maradék hibát. Együtt kiegyensúlyozott képet adnak (T^2 a globális eltérés, SPE a lokális hiba). A Bayes-súlyozás+LSTM/PCA/GMM együttes alkalmazása esetén a Bayes-súlyozás több modell kimenetét vagy a bizonytalanságát kombinálja. Például LSTM+GMM predikciók súlyozott egyesítésekor az egyik modell erősebb ott, ahol a másik gyengébb. Javítja a robosztusságot és kalibrációt, de rosszul megválasztott prior, vagyis bizalmi súly esetén, torzíthat. A prior azt fejezi ki, hogy milyen mértékben bízunk előzetesen az egyik modellben vagy hipotézisben. Az LSTM+Hotelling T^2/SPE kombinációt a hibák utólagos kiértékelésére használják, vagyis az LSTM predikciós hibáira rá lehet engedni a T^2/SPE statisztikát. Ez javítja az anomáliaérzékenységet, de ront, ha az LSTM alul tanult és sok alapzajt visz a statisztikába. Sajnos terjedelmi okokból a kombinált módszerekkel kapcsolatos saját mérések eredményei egy következő cikkben lesz megjelentetve.

A 3. táblázat az alapkiindulási gépi tanulási modell (ML_baseline) teljesítményét (ami jelen esetben egy politopikus polinom súlyokkal előállított modell), hasonlítja össze a kombinált módszerek alkalmazása utáni (TP_LMI_LSTM_PCA_GA) modell teljesítményével.

3. táblázat: *ML modellek teljesítmény paramétereinek összehasonlító táblázata.*

Metrika	***Egyszerű_ML_baseline modell***	***TP_LMI_LSTM_PCA_GA kombinált modell***	***Változás***
RMSE ↓	0,085	0,054	- 36,5%
MAE ↓	0,065	0,039	- 40,0%
MAPE ↓	21,3%	12,6%	- 40,8%
F1-score ↑	71,2%	84,3%	+18,4%
Silhouette ↑	0,380	0,640	+ 68,4%

Láthatjuk, hogy minden egyes vizsgálati metrika esetében javulás következett be az alap modell teljesítményéhez képest. A táblázat pontos kiértékelését megelőzően definiáljuk a jelöléseket, az egyes metrikák jelentését és azok határértékeit. A csökkenés jelölése: ↓, míg a növekedésé: ↑. Az RMSE (Root Mean Square Error) a négyzetes középérték hiba, amely a predikált (y^) és a valós (y) értékek közötti négyzetes hiba gyöke. Méri a modell átlagos eltérését, minél kisebb az érték, annál pontosabb az előrejelzés. 0,0-0,1 között kiváló, 0,1-0,2 között közepes, míg 0,3 felett gyenge a modell pontossága. Esetünkben a csökkenés −36,5%, ami jelentős javulás. A MAE (Mean Absolute Error) az abszolút hibák átlaga, amely az átlagos eltérés nagyságát mutatja a valós és becsült értékek között. 0,0-0,05 esetén nagyon jónak, 0,05-0,1 elfogadhatónak, míg 0,15 felett gyengének minősül. Esetünkben a csökkenés −40%, azaz a kombinált modellnek jobb lett az átlagos pontossága. A MAPE (Mean Absolute Percentage Error) az átlagos abszolút százalékos hiba, amely 10% alatt kiválónak, 10–20% jónak, 20-50% közepesnek, míg 50% felett gyengének mondható. Az új modellünk esetében ez 21,3%-ról 12,6%-ra, vagyis jóról kiváló szintre javult. Az F1-score jellemzőt már a 3. ábrán láthattuk: 71,2%-ról 84,3%-ra (+18,4%), tehát jóról kiváló szintre javult, ami erős általánosító képességet mutat. A Silhouette-index a klaszterezés és anomáliák elkülöníthetőségének mértéke: 0,7-1,0 között nagyon jó, 0,5-0,7 között jó, 0,25-0,5 között közepes, míg 0,25 alatt gyenge elkülönülésről beszélhetünk. A mi esetünkben 0,380-ról 0,640-re (+68,4%) növekedett, ez azt jelenti, hogy a klaszterek jól elkülönülnek, az anomáliák tisztábban felismerhetőek.

5. KÖVETKEZTETÉSEK

Láthattuk, hogy a javító algoritmusok és korrekciós függvények kombinációja jelentősen csökkentheti a téves pozitív és negatív riasztások arányát. A ROC-görbék és F1-score mutatók alapján kimutatható, hogy a kalibrációs és ensemble módszerek különösen hatékonyak a predikciós teljesítmény növelésében. Ugyanakkor az algoritmusok futtatásának ideje jelentősen nőhet, különösen GA vagy AutoML esetén, ami korlátozhatja a valós idejű alkalmazásokat. Az eddigi kutatások alapján elmondható, hogy villamos harmonikusok felhasználásával is meg lehet valósítani prediktív karbantartást. Az anomáliák detektálásával, a villamos harmonikus adatokkal előrejelezhető, amikor a berendezésünk állapota az alap hibamentes állapothoz képest megváltozik. A detekció hatékonysága természetesen attól függ, hogy a gépi tanulási modellünket mennyire sikeresen hoztuk létre. Ez azért fontos, hogy csak valós gyakorlati tényeken alapuló állapotokról kapjunk értesítéseket. Sajnos terjedelmi okokból, sok más fontos korrekciós függvény és javító algoritmus nem kerülhetett be ebbe a cikkbe, ezért azok az eredmények majd a jövőben lesznek publikálva.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] KOVÁCS, A., SOMOGYINÉ MOLNÁR, J., JÁRMAI, K.: *Electrical Transients in Industrial Facilities.* Energies. Vol. 17 No. 17. pp. 1-33. Paper: 4215. 2024.

[2] KOVÁCS, A., KOVÁCSNÉ MOLNÁR, J., JÁRMAI, K.: *Villamos harmonikusok vizsgálata anomália detektálás céljából.* Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok. XX. évfolyam. 3. szám. pp. 111-125. 2025.

[3] HE, H., GARCIA, E. A.: *Learning from Imbalanced Data*. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. Vol. 21. No. 9. pp. 1263-1284. 2009.

[4] NG, A.: *Feature selection, L1 vs. L2 regularization, and rotational invariance.* In Proc. 21st Int. Conf. Machine Learning (ICML), Banff, Canada, 2004.

[5] SNOEK, J., LAROCHELLE, H., ADAMS, R. P.: *Practical Bayesian Optimization of Machine Learning Algorithms.* Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS), pp. 2960-2968. 2012.

[6] ROKACH, L.: *Ensemble-based classifiers.* Artificial Intelligence Review. Vol. 33 No. 1-2. pp. 1-39. 2010.

[7] PAN S. J., YANG, Q.: *A Survey on Transfer Learning.* IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. Vol. 22 No. 10. pp. 1345-1359. 2010.

[8] HUTTER, F., KOTTHOFF, L., VANSCHOREN, J.: *Automated Machine Learning: Methods, Systems, Challenges.* Springer, 2019.

[9] KENNEDY, M. C., O'HAGAN, A.: *Bayesian calibration of computer models.* Journal of the Royal Statistical Society: Series B. Vol. 63 No. 3. pp. 425-464. 2001.

[10] HOLLAND, J. H.: *Genetic algorithms.* Scientific American. Vol. 267 No. 1. pp. 66-72. 1992.

[11] KENNEDY J., EBERHART, R.: *Particle swarm optimization.* In Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks, Perth, Australia, 1995, pp. 1942-1948.

[12] The MathWorks, Inc.: MATLAB User's Guide, Natick, Massachusetts, USA, 2023.

[13] ABONYI, J., FEIL, B.: *Cluster Analysis for Data Mining and System Identification.* Verlag AG, Basel, 2007.

[14] ZHAO, H. CHEN, S., XU, X.: *Data-driven error compensation for nonlinear measurement systems using deep neural networks*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol. 69. No. 7. pp. 4565-4577. 2020.

A PÁLINKAKÉSZÍTÉS SORÁN AZ ELŐDESZTILLÁTUM LEVÁLASZTÁSÁNAK SZIMULÁCIÓS VIZSGÁLATA

SIMULATION INVESTIGATION OF PRE-DISTILLATE SEPARATION DURING THE PROCESS OF PÁLINKA-PRODUCTION

BÁRÁNY-KOVÁCS Ágnes[1], KÁLLAI Viktória[2], SZEPESI Gábor[3]

[1]MSc, agneskovacs00@gmail.com
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

[2]PhD, egyetemi docens, viktoria.kallai@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

[3]PhD habil., egyetemi tanár, gabor.szepesi@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

Kivonat: *A pálinka lepárlása során számos illékony vegyület van jelen, amelyek minősége és mennyisége döntően befolyásolja a termék tulajdonságait. Az egyik ilyen illékony komponens az etil-acetát, amely, ha megfelelő mennyiségben van jelen kellemes, gyümölcsös ízt kölcsönöz az alkoholos italnak, de ha koncentrációja ennél magasabb, a pálinka csípős szagú és kellemetlen ízű lesz. Ebben a cikkben ChemCAD folyamatszimulációs szoftver segítségével vizsgáljuk a pálinkalepárlás folyamatát. Két különböző esetet vizsgáltunk, amelyek az első és a középső desztillátum megfelelő szétválasztására, valamint azok etanol- és etil-acetát tartalmára összpontosítottak.*
Az „A" esetben az előpárlat desztillációs idejét, valamint az elő- és középpárlat összetételét vizsgáljuk a nyomás függvényében.
A „B" esetben a gyakorlatban gyakran előforduló, azaz a kívántnál több etil-acetátot tartalmazó előpárlatot vizsgáljuk újradesztillációval; a cél a hígítás mértékének az elő- és középpálatra gyakorolt hatásának vizsgálata.

Kulcsszavak: *pálinka, etil-acetát, desztilláció, folyamatszimulátor*

Abstract: *During the distillation of pálinka, several volatile compounds are present, the quality and quantity of which decisively affect the properties of the product. One such volatile component is ethyl-acetate, which, when present in sufficient quantities, gives the alcoholic beverage a pleasant, fruity taste, but if its concentration is higher than this, the pálinka will have a pungent odor and bad taste. In this article ChemCAD process simulation software is used to investigate the process of the palinka production. Two different cases were investigated, for the proper separation of the first and middle distillates and their ethanol and ethyl acetate contents.*
In case 'A', The distillation time of the pre-distillate and the composition of the pre- and middle distillate as a function of pressure is investigated.
In case 'B', pre-distillate, which often occurs in practice, i.e. containing more ethyl acetate than desired is investigated by redistillation; the goal is to find out the effect of the degree of dilution on the pre- and middle distillate.

Keywords: *pálinka, ethyl-acetate, distillation, process simulation*

1. PÁLINKAKÉSZÍTÉS FOLYAMATA

A pálinka egy nagyon népszerű alkoholos ital Magyarországon és számos más országban. A magyar törvények szerint a pálinka hungarikum, amelynek a következő követelményeknek kell megfelelnie [1]:

- Kizárólag Magyarországon termesztett gyümölcsből készül (nem sűrített, aszalt), és adalékanyagoktól mentes.
- Magyarországon desztillálják és palackozzák.
- Alkoholtartalma lepárlás után maximum 86%, palackozás után minimum 37,5%.
- A pálinkát különféle gyümölcsökből készítik. Az alapanyag legfontosabb kritériumai a cukortartalom, mivel ez határozza meg az ital alkoholtartalmát az alkoholos erjedés során,

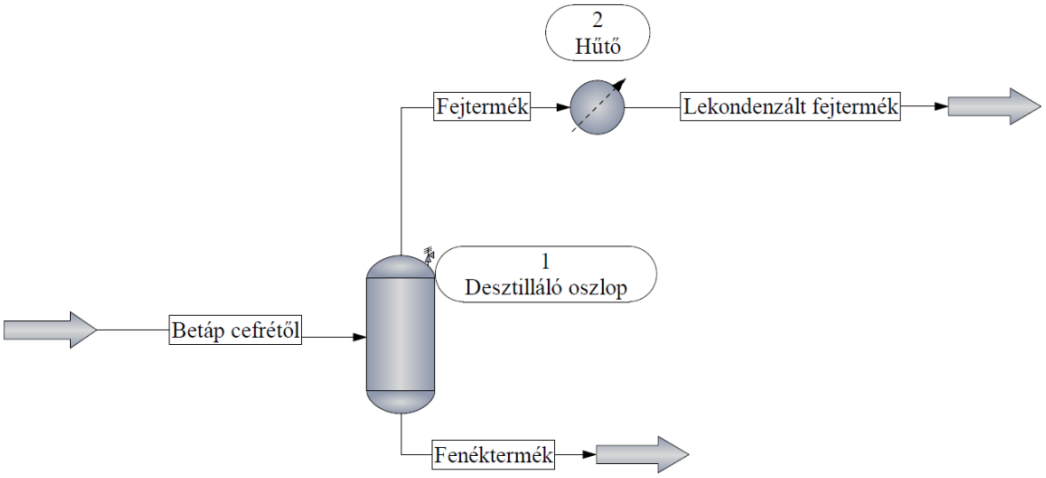
valamint a gyümölcs aromája, mivel ez is megjelenik a pálinkában [2].

A pálinkakészítés folyamatának főbb lépései:

- Cefrekészítés: a pálinkakészítés folyamata a megfelelő gyümölcs kiválasztásával és tisztításával kezdődik. A gyümölcs felhasználható egészben, gyümölcspépként vagy gyümölcslé formájában. A kiválasztott gyümölcsnek frissnek és kellően érettnek kell lennie (a megfelelő cukortartalom kulcsfontosságú a későbbi lépésekben) [2].
- Erjedés: a gyümölcspép cukortartalma az alkoholos erjedés során alkohollá és szén-dioxiddá alakul. A cefre erjedését élesztő és enzimek indítják el, a hőmérséklet, a pH és az oxigén mennyisége pedig nagymértékben befolyásolja a folyamatot [2].
- Az élesztő addig fejti ki hatását, amíg a cukortartalom teljes egészében alkohollá nem alakul, vagy amíg az etanoltartalom eléri a kb. 15 térfogatszázalékot, mivel ezen a szinten mérgező az élesztőre, és az erjedési folyamat leáll [3].
- Lepárlás: ahhoz, hogy az erjesztett cefréből az alkoholt a kívánt aromával és ízzel együtt kinyerjük, lepárlásra van szükség. A pálinka lepárlása során a folyamat nehézsége, hogy a két fő komponens (etil-alkohol és víz) azeotróp elegyet alkot, ami lehetetlenné teszi a komponensek tiszta elválasztását egymástól a hagyományos lepárlással [4].
- Érlelés, palackozás, tárolás: a lepárlás után a pálinkát érlelni kell, hogy az ízek beérhessenek és összekeveredhessenek. Az érleléshez általában fémhordókat használnak, de előfordul olyan is, hogy fából (tölgy, eper) készült hordókat használnak, ilyenkor a fő szempont, hogy a pálinka „lélegezzen”, ezáltal lágyítsa az ízeket. Az érlelés után a kívánt alkoholtartalmat desztillált víz hozzáadásával állítják be 37,5-60% közötti értékre [2].

1.1. Etil-acetát - etanol – víz rendszer desztillációja

Az etil-acetát, etanol és víz összetételű rendszer minimális forráspontú ternáris azeotrópot és három bináris azeotrópot képez. A tanulmány során ChemCAD folyamatszimulátor szoftverben [5] NRTL termodinamikai modellel [6] vizsgáltuk a rendszert. Az 1. ábra az elkészített modell ábráját mutatja be.



1. ábra: *A vizsgált rendszer ChemCAD szoftverkörnyezetben*

A vizsgált paraméterek időbeli változásának vizsgálatához instacioner szimulációt alkalmaztunk. A legtöbb esetben 2 óra volt az alkalmazott időtartam a szimuláció futtatási ideje, az időlépték 30 másodperc volt. Az 1. ábrán látható 1 j. készülékbe bevitt hőteljesítmény 10 kW volt és a benne lévő anyag kezdeti hőmérséklete 20°C volt.

2. VIZSGÁLT ESETEK

A tanulmány célja az elő- és középpárlat vizsgálata volt, miközben néhány rá ható különböző paraméter változtatásra került.

„A” eset: az elő- és középpárlat vizsgálata a nyomás változtatásával. Ezekben a szimulációkban a nyomás változtatásának hatását vizsgáltuk, mivel a nyomás jelentős befolyással bír az elegy azeotrop pontjaira.

„B” eset: Az „elődesztillált” pálinka minőségének javítása újradesztillációval. Vizsgáltuk a hígítás mértékének hatását a túl sok etil-acetátot tartalmazó pálinka újradesztillációja során.

Az eredmények az összes szimuláció esetén a következő pontok alapján kerültek értékelésre és összehasonlításra:

- az előpárlat desztillációjáig eltelt idő,
- az előpárlat etil-acetát tartalma,
- az előpárlat desztillációs ideje,
- az előpárlat etanol tartalma,
- a középpárlat etil-acetát tartalma,
- a középpárlat etanol tartalma.

3. EREDMÉNYEK

3.1. „A” eset: elő- és középpárlat vizsgálata a nyomás módosításával

A vizsgálat célja annak meghatározása, hogy a nyomás hogyan befolyásolja a pálinkakészítés folyamatát. Hat esetet vizsgáltunk, amikor a nyomást 0,5 és 10 bar között változtattuk. Egy esetben a nyomást rögzített volt, emiatt a desztillátum tömegárama megváltozott. A kezdeti etil-acetát-tartalom 1,3 g (ez pl. az őszibarackcefrére jellemző összetétel), az etanol-tartalom 6 kg, a víztartalom pedig 42,5 kg volt. A középpárlat térfogata minimum 3 l volt.

1. táblázat: *Az „A” esetben az előpárlat eredményei*

Nyomás [bar]	0,5	0,75	1	2,5	5	10
Az előpárlat desztillációs ideje [h]	0,075	0,092	0,108	0,117	0,150	0,183
Az előpárlat etanol tartalma [kg]	0,731	0,860	0,921	1,032	1,269	1,505
Az előpárlat térfogata [ml]	1,170	1,438	1,722	1,926	2,580	3,354

Az eredmények alapján (1. táblázat) elmondható, hogy 1 barnál alacsonyabb nyomás alatt az előpárlat desztillációja felgyorsul, így az azzal együtt eltávolított etanol mennyisége is csökken.

A pálinka lepárlása során fontos a minimálisra csökkenteni az előpárlat mennyiségét, mivel ez a térfogat a benne lévő etanollal együtt mindenképpen megsemmisítésre kerül, így a pálinka lepárlása során a nyomás növelése költségvetési szempontból mindenképpen negatív.

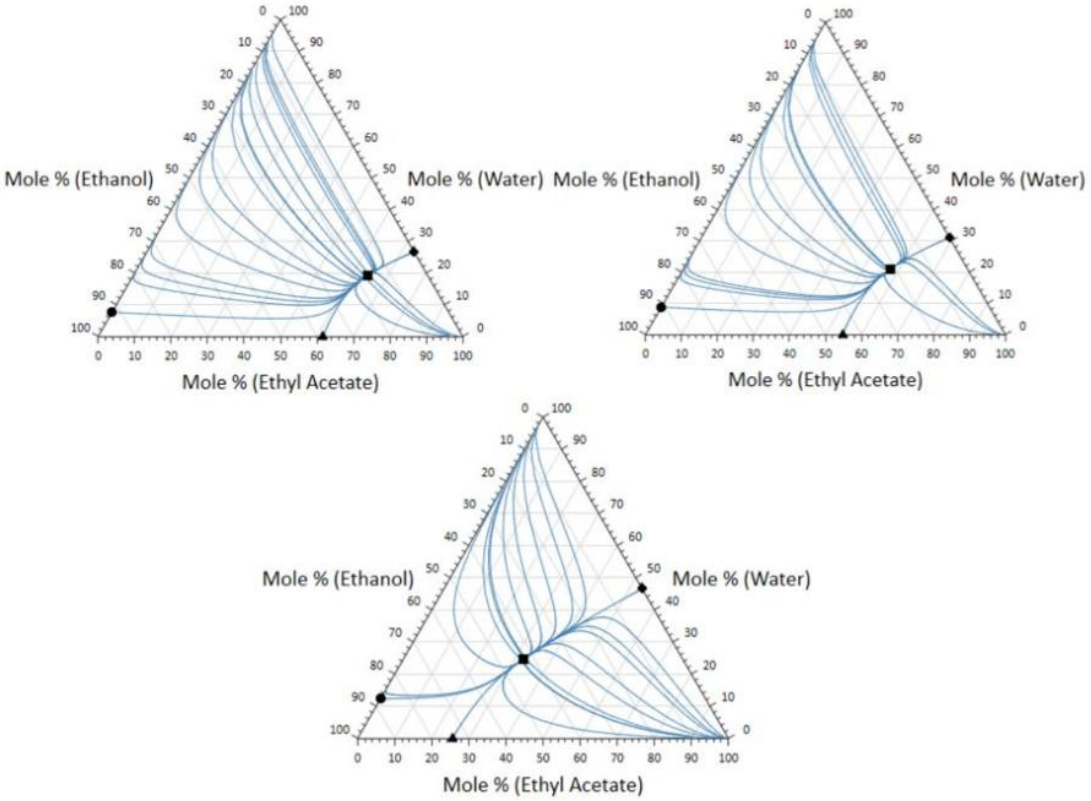
Az előpárlat térfogata a nyomás növekedésével növekszik, ami a növekvő desztillációs időknek és a növekvő tömegáramnak köszönhető.

2. táblázat: *Az „A” esetben a középpárlat eredményei*

Nyomás [bar]	0,5	0,75	1	2,5	5	10
A középpárlat desztillációs ideje [h]	0,20	0,20	0,19	0,18	0,18	0,17
A középpárlat etanol tartalma [kg]	57,51	55,35	54,47	51,25	47,15	43,63
A középpárlat térfogata [ml]	3,12	3,14	3,05	3,03	3,15	3,05

A térfogatáram a nyomás növekedésével egyértelműen nőtt, így a desztillációs idő csökkent. Az etanol százalékos aránya a nyomás növekedésével csökkent, valószínűleg annak köszönhető, hogy az előpárlatban a nyomás növekedésével egyre több etanol távozott a rendszerből, így amikor a középpárlatot lepároltuk, a rendszer kevesebbet tartalmazott belőle.

A nyomás növelésével az előpárlat lepárlási ideje nőtt, a középpárlaté pedig csökkent. A pálinka lepárlása során kedvező, ha a folyamat rövidebb idő alatt zajlik le, de a középpárlat lepárlási ideje nem csökken olyan mértékben, mint amennyi idő alatt az előpárlat lepárlási ideje nő, így a kettőt összeadva a lepárlási folyamat teljes hossza a nyomás növekedésével növekszik.



2. ábra: *Az etil-acetát - etanol - víz elegy összetételi diagramja 0,5 (bal felső), 1 (jobb felső) és 10 (alsó) bar nyomáson ChemCAD folyamatszimulátor szoftverkörnyezetben*

Az egyszerű desztilláció során a nyomásnak nagyon erős hatása van a folyamat hatékonyságára, mivel az azeotrop pont befolyásolásával határozza meg a maximális elválasztást. Amint a 2. ábrán látható, 1 bar nyomás alatt az azeotrop pont a pálinka lepárlása szempontjából kedvező irányba mozdul el (nagyobb elválasztást tesz lehetővé), míg 1 bar nyomás felett már kevésbé kedvező elválasztást tesz lehetővé.

Ebben a háromkomponensű elegyben a bináris azeotropok közül a legfontosabb a víz-etanolra vonatkozó pont, mivel az elegy többnyire ezt a két komponenst tartalmazza. Minél gaz-

daságosabb a desztillációs folyamat, annál nagyobb arányban tudunk etanolt kinyerni a cefréből, ezért a víz-etanol bináris azeotrop pont a legfontosabb. A 4. táblázatban a víz-etanol bináris azeotrop és a tercier azeotrop összetételét mutatjuk be a különböző vizsgált nyomásokon, a ChemCAD számításai alapján, az NRTL termodinamikai modell szerint.

3. táblázat: *Azeotrop összetételek a nyomás függvényében*

Nyomás [bar]		0,5	0,75	1	2,5	5	10
Bináris azeotrop összetétel [mol%]	Etanol	92,4	91,8	91,2	90,0	88,8	87,7
	Víz	7,6	8,2	8,8	10,0	11,2	12,3
Ternáris azeotrop összetétel [mol%]	Etanol	16,6	19,3	21,3	28,4	34,9	43,0
	Víz	19,1	20,3	21,1	23,4	24,5	24,6

A 3. táblázat adatai azt mutatják, hogy a nagyobb nyomás nem kedvez a folyamatnak, mivel a bináris elegy azeotrop pontján az etanol-összetétel egyre alacsonyabb.

3.2. „B” eset: Az „előpárlatos” pálinka minőségének javítása újból történő lepárlással

Helyes számítások alapján könnyen eldönthető, hogy mennyi ideig tart az előlepárlás, de a gyakorlatban ez nem ilyen egyszerű, és gyakran előfordul, hogy az előpárlat és a középpárlat közötti váltás nem megfelelően történik, ezért a pálinka túl sok etil-acetátot tartalmaz. Ennek a problémának az egyik megoldása a pálinka hígítása és újralepárlása lehet. Nagy tapasztalatot igényel annak a hígítási aránynak a meghatározása, ami a probléma megoldásához vezet, miközben a lehető legkevesebb etanol megsemmisítésével jár a folyamat, és ez volt a „B” vizsgálat során a cél.

4. táblázat: *A „B” esetben az előpárlat eredményei*

A pálinkához adott desztillált víz tömege [kg]	0,0	0,8	2,0	4,5	8,0	20,0
Az etanol térfogatszázaléka a hígított pálinkában [%]	60	50	40	30	20	10
Az előpárlat desztillációs ideje [h]	0,93	1,12	1,38	1,59	0,58	0,21
Az előpárlat etil-acetát-tartalma [g]	2,67	2,67	2,66	2,66	2,66	2,68
Az előpárlat etanol tartalma [kg]	1,52	1,51	1,48	1,28	0,73	0,31

A fejtermék tömegáramát rögzítettük: 3 kg/h értékre, a középdesztilláció ideje 1 óra volt. A vizsgálathoz a pálinka 800 mg/l etil-acetátot tartalmazott, amelynek koncentrációját az előző esetekhez hasonlóan 180 mg/l-re csökkentettük, és ezt 3 liter középpárlatra alkalmaztuk. Az adagban az etil-acetát mennyisége 3,2 g, az etanolé 1,9 kg volt. A desztillált víz tömege az első esetben 1,6 kg volt, majd a 4. táblázatban látható értékek szerint növekedett, így a kezdeti, körülbelül 60%-os etanoltartalom 50, 40, 30, 20, 10%-ra csökkent.

A középdesztilláció eredményeit az 5. táblázat mutatja be.

Az első három esetben az etil-acetát-tartalom tekintetében határérték feletti szám adódott, mivel a középpárlat kevesebb volt, mint 3 liter, így az előpárlat elválasztása során 3 liter térfogatra számított etil-acetát-tartalom a kisebb térfogatban nagyobb koncentrációt mutat. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy ilyen nagy mennyiségű hígítással még nem érjük el a kívánt célt, és alacsonyabb etil-acetát-tartalmú desztillált vizet vagy pálinkát kell hozzáadni.

Az erősebben hígított keverékek esetén alacsonyabb etil-acetát- és etanoltartalom jelent meg a középpárlatban, ami érthető az alacsonyabb koncentrációjuk miatt. A legnagyobb hígítás azonban kiemelkedik a többi adat közül, ebben az esetben magasabb etil-acetát- és etanoltartalom maradt a középpárlatban, amit részben a lecsökkent elődesztillációs idő okozhat, mivel ez

több etanolt hagyott a rendszerben.

5. táblázat: *A „B” esetben a középpárlat eredményei*

A pálinkához adott desztillált víz tömege [kg]	0,0	0,8	2,0	4,5	8,0	20,0
Az etanol térfogatszázaléka a hígított pálinkában [%]	60	50	40	30	20	10
A középpárlat desztillációs ideje [h]	669,9	521,1	369,9	159,9	59,5	136,2
A középpárlat etil-acetát-tartalma [g]	59,2	47,6	36,3	23,1	15,7	25,7
A középpárlat etanol tartalma [kg]	0,8	1,0	1,4	3,1	3,0	2,9

4. KÖVETKEZTETÉSEK

A vizsgálatok alapján a következő megállapítások tehetők.

Az elő- és középpárlat vizsgálata a nyomás változtatásával („A” eset): A nyomás növelésének következtében az előpárlatot megelőző idő és az előpárlat desztillációs ideje is növekszik, így az előpárlat etanoltartalma, valamint tömegárama és térfogata is növekszik. A középpárlat desztillációs ideje a nyomás növekedésével csökken, ez a nyomás növekedésével növekvő tömeg- és térfogatáramnak köszönhető, ami a kívánt térfogat rövidebb idő alatti elpárolgását eredményezi. A nyomás növelésével a középpárlat etanol térfogatszázaléka is csökkent. A nyomás és a középpárlat etil-acetát-tartalma között nem állapítható meg egyértelmű összefüggést.

Az „előpárlatos” pálinka minőségének javítása újradesztillálással („B” eset): nem találtak egyértelmű összefüggést az azonos számú szennyezőanyagot tartalmazó pálinka magasabb hígítása és az előpárlat desztillációs ideje között. A hígítás mennyiségének növelésével az előpárlatban lévő etanol mennyisége egyértelműen csökkent. A hígítás mennyiségének növelésével a sűrűség is nőtt, így a középpárlat térfogatárama csökkent.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] HARCSA, I., M., NÁBRÁDI, A., TAR I.: *Hungarian spirits pálinka as a ‘Hungaricum’ I. Literature review and practical approaches,* APPLIED STUDIES IN AGRIBUSINESS AND COMMERCE, Vol. 8, No. 2-3, pp. 133-141, 2014

[2] LÁSZLÓ, Z., HODÚR, C., CSANÁDI, J.: *Pálinka: Hungarian distilled fruit*, TRADITIONAL FOODS, pp. 313-318, Boston, 2016

[3] MINH TUAN, P.: *Production and quality analysis of some spirits from fruits – thesis,* MAGYAR AGRÁR-ÉS ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM, 2022

[4] GREEN, D., W., PERRY, R., H.: *Perry’s Chemical Engineers’ Handbook, Eight Edition*, MCGRAW-HILL, 2008.

[5] CHEMSTAION: *ChemCAD User Guide*, 2007

[6] MA, S., SHANG, X., LI, L., SONG, Y, PAN, Q., SUN, L: *Energy-saving thermally coupled ternary extractive distillation process using ionic liquids as entrainer for separating ethyl acetate-ethanol-water ternary mixture,* SEPARATION AND PURIFICATION TECHNOLOGY, Vol. 226, pp. 337-349, 2019

KONTAKT NÉLKÜLI HŐÁTVITEL VIZSGÁLATA CSŐVEZETÉKEK ESETÉBEN

HEAT TRANSFER IN CASE OF CONTACTLESS PIPES

SZEPESI L. Gábor

PhD habil., egyetemi tanár, gabor.szepesi@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

Kivonat: *Hőátviteli folyamatok során jelentősen befolyásolják a hőátvitelben szereplő közegek anyajellemzői a kialkuló hőátviteli tényező értékét. Olyan esetekben, ahol az egyik vagy mindkét közeg gáz halmazállapotú a hőátvitel hatásosságának a növelése érdekében felületnövelt csöveket szükséges alkalmazni. Vannak olyan speciális alkalmazások, ahol a közegek semmilyen körülmények között nem keveredhetnek, ezért közvetítőközeget alkalmaznak. Jelen cikkben arra látható matematikai számítási eljárás, amely során egyszerű csővezetékek közötti hőcsere valósul meg levegő közvetítő közeg segítségével.*

Kulcsszavak: *hőátvitel, kontakt nélküli cső, véges differenciák módszere*

Abstract: *During heat transfer processes, the properties of the media involved in the heat transfer significantly affect the value of the resulting heat transfer coefficient. In cases where one or both media are gaseous, it is necessary to use pipes with increased surface area to increase the efficiency of heat transfer. There are special applications where the media cannot mix under any circumstances, therefore a transfer medium is used. This article shows a mathematical calculation procedure in which heat exchange between simple pipelines is achieved using air as a transfer medium.*

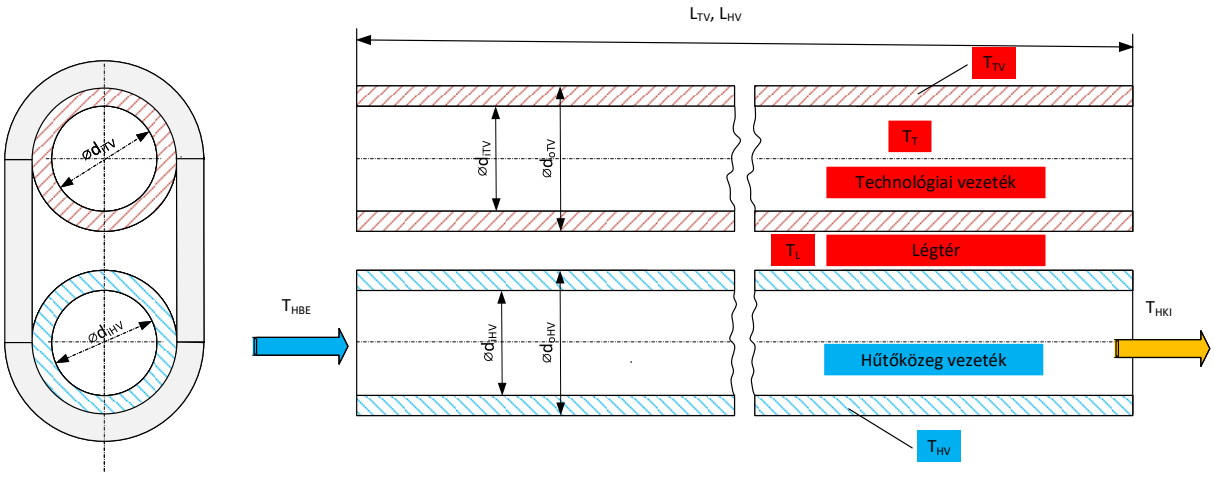
Keywords: *heat transfer,contactless pipe, Finite difference method*

1. BEVEZETÉS

Technológiai közegek hűtése/fűtése esetén a műszaki gyakorlatban jellemzően rekuperatív hőcserélőket alkalmaznak abban az esetben, ha a technológiai és a hőközlő közeg nem érintkezhet. Ilyen esetben a hőcserélőkre vonatkozó általános összefüggések segítségével meghatározható a szükséges hőátadó felület. Vannak olyan speciális területek (jellemzően gyógyszeripar), ahol egy esetleges csőrepedés a technológiai közeget károsíthatja, ezzel jelentős anyagi kár keletkezhet. Az ilyen jellegű esetek elkerülésére egy újabb közvetítő közeget alkalmaznak, melyek természetesen a hőátvitel hatékonyságát rontják. Az alábbi probléma matematikai modellezésére egy hőátviteli eljárást dolgoztam ki olyan esetre, ahol a technológiai csővezetéket egy meghatározott hőmérsékletre szükséges lehűteni technológiai szempontokból.

2. A VIZSGÁLT TECHNOLÓGIAI ELRENDEZÉS

A vizsgálat során egy technológiai vezeték szellőztetése már megtörtént, annak hőmérséklete adott. A feladat során egy hűtőfolyadék segítségével szükséges a technológiai vezetékben lévő levegő közeget egy meghatározott hőmérséklet alá csökkenteni. A vizsgált matematikai modell ábráját és az alkalmazott jelöléseket szemléltetni az 1-es ábra.



1. ábra: *A vizsgált matematikai modell*

Fázisok közötti hőátvitel számítására konvekció esetén a Newtoni hőátadási törvény a meghatározó, mely differenciális alakban az alábbi módon írható fel:

$$dQ = \alpha \cdot A \cdot (T_f - T) \cdot d\tau$$

Egy zárt térrész entalpiaváltozása az alábbi egyszerű összefüggéssel számolható:

$$dQ = c_v \cdot m \cdot dT \cdot d\tau$$

ahol c_v a fajhő, m a zárt tér tömege, dT a hőmérsékletváltozás.

Abban az esetben ha szabadkonvekció (nem kényszerített áramlás) valósul meg, a kialakuló hőátadási tényező az alábbi összefüggéssel számolható [1]:

$$\mathrm{Nu} = \left\{ 0{,}6 + \frac{0{,}387 \cdot \mathrm{Ra}^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0{,}559}{\mathrm{Pr}}\right)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2$$

ahol Ra a Rayleigh-szám, Pr a Prandtl-szám. Az összefüggés abban az esetben érvényes, ha a $\mathrm{Ra} < 10^{12}$.

Értelmezés szerint a Ra szám:

$$\mathrm{Ra} = \frac{\rho \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot l^3 \cdot g}{\eta \cdot a}$$

ahol ρ a közeg sűrűsége, β a közeg köbös hőtágulási tényezője, ΔT a hőmérsékletkülönbség, l a jellemző geometriai méret, g a nehézségi gyorsulás, η az áramló közeg dinamikai viszkozitása, a a hődiffúziós tényező.

A csövek belsejében kialakuló hőátadási tényező turbulens esetben (Re>10000) a Dittus-Boelter összefüggéssel határozható meg [2]:

$$\mathrm{Nu} = 0{,}023 \cdot \mathrm{Re}^{0{,}8} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}4}$$

Lamináris áramlás esetén (Re<2300) az alábbi összefüggés alkalmazható:

$$\mathrm{Nu} = C \cdot \mathrm{Pe}^{0,23} \cdot \left(\frac{d}{L}\right)^{0,5}$$

3. SZÁMÍTÁSI ELJÁRÁS A HŐMÉRSÉKLETEK MEGHATÁROZÁSÁRA

A számítások során az első lépés a kilépő hűtőközeg hőmérsékletének a meghatározásra, melyre az alábbi összefüggés írható fel:

$$M_H \cdot c_H \cdot (T_{HKI} - T_{HBE}) = \alpha_H \cdot A_H \cdot LMTD$$

ahol $LMTD$: a mértékadó hőmérsékletkülönbség, mely a $LMTD = ((T_{HV} - T_{HBE}) + (T_{HV} - T_{HKI}))/2$ összefüggéssel közelíthető.

Az egyenlet iteratív megoldása szolgáltatja a hűtőközeg kilépő hőmérsékletét.
Ennek ismeretében meghatározható, hogy a hűtőközeg milyen hőt von el magától a hűtőközeg csővezetéktől.

$$Q_{H_TO_HV} = M_H \cdot c_H \cdot (T_{HKI} - T_{HBE})$$

A hűtőközeg vezeték hőmérsékletének változása a korábban említett összefüggéssel:

$$T_{HV}^{i+1} = T_{HV}^{i} - \frac{Q_{H_TO_HV}}{c_{HV} \cdot m_{HV}} \cdot d\tau$$

ahol m_{HV} a hűtőközeg vezeték tömege, $d\tau$ a választott időlépték.
A hűtőközeg vezeték és a légtér között kialakuló hőáram a Newtoni hőátadási törvénnyel számolható, figyelembe véve, hogy nyugvó levegő veszi körül:

$$Q_{HV_TO_L} = \alpha_{HV} \cdot A_{HV} \cdot (T_{HV} - T_L)$$

A légtér és a környezet között is kialakul egy hőáram, mely a csöveket körülvevő szigetelésen keresztül valósul meg. A külső hőátadási tényezőt 20 W/(m^{2}K)-nek feltételezve, valamint 19 mm-es hőszigeteléssel a szigetelés és a környezete közötti hőátviteli tényező értéke 1,3 W/(m^{2}K)-re adódik. A környezetet 20°C-nak tekintve:

$$Q_{veszt} = \alpha_{ki} \cdot A_{szig} \cdot (20 - T_L)$$

Így a vezetékek közötti légtér energiamérlegéből meghatározható a légtér hőmérsékletváltozása:

$$T_L^{i+1} = T_L^{i} + \frac{Q_{H_TO_HV}}{c_L \cdot m_L} \cdot d\tau + \frac{Q_{veszt}}{c_L \cdot m_L} \cdot d\tau$$

A légtér és a technológiai vezeték között hőátvitel szintén nem kényszerített hőátadással számolható. A légtér és a technológiai vezeték között kialakuló hőáram:

$$Q_{L_TO_TV} = \alpha_{TV} \cdot A_{TV} \cdot (T_L - T_{TVL})$$

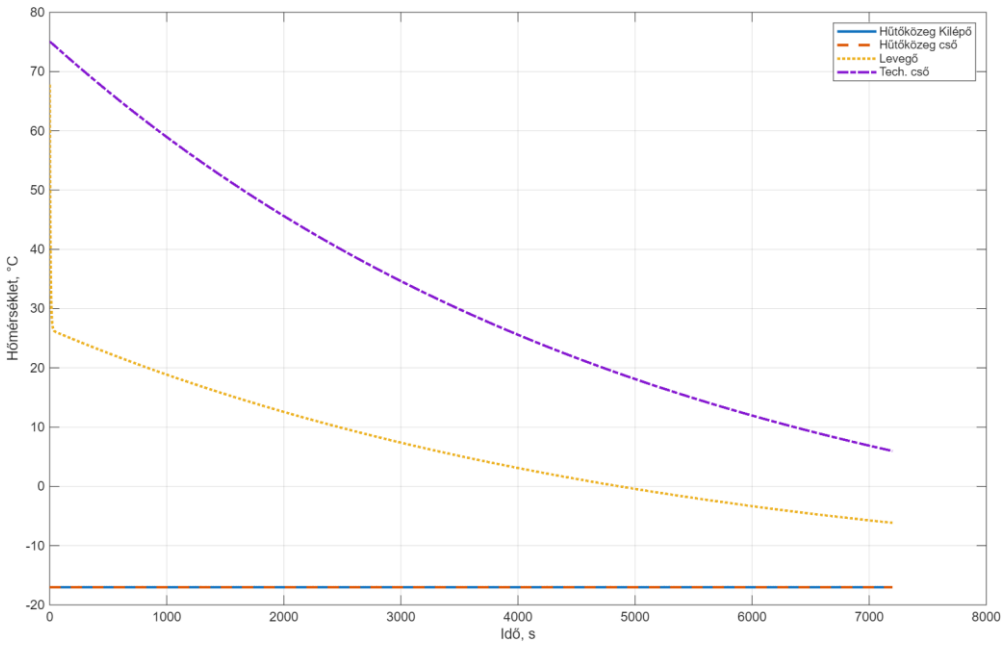
A technológiai vezeték hőmérlege:

$$T_{TV}^{i+1} = T_{TV}^{i} + \frac{Q_{L_TO_TV}}{c_{TV} \cdot m_{TV}} \cdot d\tau$$

A légtér hőállapotváltozása a leadott hő miatt korrekcióra szorul:

$$T_{L}^{i+1} = T_{L}^{i} - \frac{Q_{L_TO_TV}}{c_{L} \cdot m_{L}} \cdot d\tau$$

Ezen összefüggések birtokában minden egyes időléptékben meghatározható a folyamatban szereplő hőmérsékletérték. Mivel az eljárás a véges differenciák módszerén alapul, így annak stabilitása nagy mértékben függ a választott időlépték nagyságától [3]. A kidolgozott eljárás által szolgáltatott példaszámítás eredménye látható a 2. ábrán.



2. ábra: *Számítási eredmények*

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott matematikai módszer segítségével időben változó hőátviteli folyamatként lehet modellezni a kapcsólódás nélküli csövek hűlési és melegedési folyamatait abban az esetben, ha a közvetítő közeg légnemű. Természetesen ettől eltérő műszaki megoldások is létezhetnek a csövek előhűtésére/melegítésére, azonban a bemutatott konstrukció költség szempontjából lényegesen kedvezőbb, mint az eltérő lehetőségek.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] LEE, J. H., SON, Y. W., & CHANG, S.-M. (2020). *Numerical Analysis on Natural Convection Heat Transfer in a Single Circular Fin-Tube Heat Exchanger (Part 2): Correlations for Limiting Cases.* Entropy, 22(3), 358. https://doi.org/10.3390/e22030358

[2] R. H. S. WINTERTON: *"Where did the Dittus and Boelter equation come from?"* – International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 41, Nos 45, pp. 808–810 (1998

[3] J. W. THOMAS: *Numerical Partial Differential Equations: Finite Difference Methods.* Springer, 1995

ÁLLÓHENGERES TÁROLÓTARTÁLYOK BERUHÁZÁSI KÖLTSÉGÉNEK ÖSSZEHASONLÍTÓ ELEMZÉSE, KÜLÖNBÖZŐ SZABVÁNYOK SZERINT

COMPERATIVE ANALYSIS OF INVESTMENT COSTS OF STORAGE TANKS, ACCORDING TO DIFFERENT STANDARDS

PETRIK Máté

PhD, egyetemi docens, mate.petrik@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

Kivonat: *A nagyméretű föld feletti tárolótartályok kulcsfontosságú szerepet töltenek be a vegyipari, kőolaj- és gázipari, valamint a vízellátási infrastruktúrákban. E tartályok biztonságos üzemeltetése nemcsak gazdasági, hanem környezetvédelmi és közbiztonsági szempontból is alapvető követelmény. A tartályok szerkezeti méretezését világszerte jól bevált szabványok, például az API 650 és az EN 14015 szabályozzák, amelyek részletes előírásokat tartalmaznak a tartályköpeny, a tetőszerkezet és alapozás tervezésére. Ezek a szabványok elsődlegesen a hidrosztatikus nyomásra, szél- és hóterhelésekre koncentrálnak, azonban a földrengés hatásainak figyelembevétele esetenként csak kiegészítő jelleggel történik. E kutatás célja olyan módszertani keret bemutatása, amely lehetővé teszi az acéltárolótartályok szilárdsági méretezését földrengésre való tekintettel, szabványos és numerikus megközelítések integrálásával.*

Kulcsszavak: *tárolótartály, szilárdsági méretezés, szabvány összehasonlítás*

Abstract: *Large above-ground storage tanks are a critical component of the chemical, oil and gas, and water supply infrastructure. Secure operation of these tanks is not only an economic necessity, but an environmental and public safety necessity. The tank structural design is controlled by universally established standards like API 650 and EN 14015, which have precise requirements for the tank body design, roof structure design, and foundation design. The mentioned standards mainly address hydrostatic pressure, wind loads, and snow loads, but in some cases, the earthquake effects are treated only as an extra aspect. In seismically active regions, stresses due to an earthquake, below however, dominate the design conditions. The purpose of this research is to provide a methodological framework that promotes the strength design of steel storage tanks in seismic conditions, by integrating standard and numerical approaches.*

Keywords: *storage tank, strength design, standard comparison*

1. BEVEZETÉS

A tárolótartályok olyan alapvető berendezések, amelyeket számos folyadék halmazállapotú közeg, például víz, kőolajszármazékok és vegyipari alap- és segédanyagok tárolására használnak. Ezek a szerkezetek számos iparág és közműhálózat meghatározó részét képezik, ami kiemeli szerkezeti integritásuk fontosságát, különösen fokozott igénybevételt jelentő események, például földrengések során is. Kiterjedt kutatások és elemzések foglalkoznak a tartályok szeizmikus viselkedésének vizsgálatával és a tartályokkal kapcsolatos lehetséges kimenetelek értékelésével [1-5].

A szeizmikus terhelésnek kitett tartály viselkedése bonyolult, és főként a tartály szerkezete és a benne lévő folyadék közötti dinamikus kölcsönhatással függ össze. Ez a kölcsönhatás számos jelenséget eredményez, mint impulzív és konvektív folyadékmozgást, valamint hidrodinamikai nyomást. Ezek mindegyike fontos a tartály általános reakciójának kialakításához. E komplex viselkedés teljes felszámolása szükséges a megbízható tervezési módszerek kidolgozásához, valamint a tartály megbízhatóságának és biztonságának biztosításához szeizmikusan aktív területeken.

Daryavarsari et al. [6] elsőként vizsgálja felül a nápolyi (Olaszország) tartályok API 650 irányelvein alapuló tervezési eljárását. Kiválasztottak egy földrengések célspektrumot, és a tar-

tályok kezdeti vastagságát manuálisan számították ki. Ezeket a tartályokat SAP2000-ben modellezték, és lineáris spektrális analízist és nemlineáris időbeli lefolyású elemzést is végeztek. Megállapították, hogy az API 650-ből származó vastagságok nem voltak megfelelőek, és próbálkozás-hiba módszert alkalmaztak az optimális vastagságok meghatározására. A kisebb H/R arányú tartályok „elefántláb - elephant-foot" alakú kihajlást mutattak. A hosszirányú feszültség volt a fő probléma, egyes tartályok az API 650 becsléseihez képest nagy igénybevételt mutattak. Az optimális vastagságok 0,74 és 1 közötti maximális igénybevétel-kihasználtságot eredményeztek. Az elemzés azt mutatja, hogy a kizárólag az ASCE 7-en alapuló tervezés nem biztos, hogy elegendő a valós földrengések esetén. Ezért a nemlineáris időbeli lefolyású elemzés beépítése ajánlott a tartályszerkezetek jobb teljesítménye érdekében szeizmikus események során.

Zhou és munkatársai [7], numerikus és kísérleti vizsgálatokat végeztek a lemeztáblák rezgésein. A tanulmány két fő következtetésre jutott. Először is, a rázóasztal-teszt kimutatta, hogy a hosszú periódusú talajmozgás és a törésvonal közeli talajmozgás nagyobb hullámmagasságot eredményezett. Lineáris összefüggés volt a hullámmagasság és a talajmozgás csúcsgyorsulása között. Egy modell tartály végeselemes szimulációja megerősítette az összefüggést, mivel a szimulációs és a teszt hullámmagasságok jól egyeztek. Másodszor, a tanulmány bemutatta, hogyan lehet szimulálni egy nagy, 10 000 m^3-es függőleges tárolótartály rázkódását egy törésvonal közeli földrengés során. Megállapította, hogy a különböző országok hullámmagasság-képleteit frissíteni kell, hogy pontosan tükrözzék a törésvonal közeli talajmozgást, ami a meglévő kínai szabványok javasolt kiigazításához vezetett.

Ormeno et al. [8] szintén foglalkoztak a tartályok rezgéseivel, de a ragasztott alapozás szeizmikus válaszának hatását vizsgálták. Kísérletsorozatot végeztek egy három oldalarányú PVC folyadéktároló tartály modellen, hogy tanulmányozzák a rugalmas talaj-szerkezet kölcsönhatás (SFSI) hatását a tartály szeizmikus válaszára, beleértve a felső elmozdulást, a falgyorsulást és az axiális nyomófeszültségeket. Összesen 156 kísérletet végeztek 28 méretarányos földrengésmozgás felhasználásával két helyszíni osztályban. Az eredmények azt mutatták, hogy az esetek 95%-ában a homokon fekvő tartályok felső elmozdulása nagyobb volt, és 77%-uk nagyobb falgyorsulást mutatott a merev alapokon fekvő tartályokhoz képest, ami növeli a csőcsatlakozások károsodásának kockázatát. Az alacsonyabb axiális nyomófeszültségek ellenére (38%-kal csökkent a C helyszíni osztályban és 44%-kal a D helyszíni osztályban) fontos, hogy a tervek figyelembe vegyék az elmozdulások és gyorsulások hatását más szerkezetekkel való csatlakozásokra. Numerikus elemzés is alátámasztotta ezeket az eredményeket.

A tervezési folyamat során figyelembe kell venni az ország vagy az azon belüli régió geológiai adottságait is, legyen szó akár a klasszikus értelemben vett vegyiparban, akár az élelmiszeriparban vagy a feldolgozóiparban használt tartályokról. Pantuševa [9] a közepes vagy nagy szeizmikus kockázatú régiókban, például Bulgáriában használt acéltartályok szeizmikus tervezésének fontosságát tárgyalja. Kiemeli, hogy mind az Európai Unióban mind az EN 1998-4, mind az EN 14015 szabvány használatban van, de eltérő megközelítéseket alkalmaznak (határállapotok vs. ASD megengedett tervezési módszerek), ami bonyolítja a tervezési folyamatot az Eurocode rendszerhez szokott mérnökök számára. Az egységes eredmények elérése érdekében ajánlott ezen szabványok egységesítése. Az Eurocode-okból hiányoznak a szigorú irányelvek az acéltartályok szeizmikus tervezésére vonatkozóan, mivel az EN 1998-4 A. melléklete csak tájékoztató jellegű. A tervezési szabványok további fejlesztésére van szükség, beépítve az API gyakorlatait, például a részletes szabályozásokat és a gyakorlati intézkedéseket. A tervezési szabványokban szereplő jelenlegi módszertanok csak alapvető számításokhoz alkalmasak, és nem kezelik megfelelően a szeizmikus hullámok tartálytetőkre gyakorolt hatását. Tekintettel a mérgező folyadékok szivárgásából eredő potenciális veszélyekre, a szerző azt javasolja, hogy a jövőbeli kutatásoknak az acél tárolótartályok merev tetejének szeizmikus viselkedésére kellene összpontosítaniuk. Yazdanian et al. [10] egy síkfedél alapú bortároló tartályok káradatbá-

zisát hozta létre a 2013-as és 2016-os új-zélandi földrengések adatainak felhasználásával, amelyek 1348 tartályt érintettek. A 2016-os földrengés valamivel kevesebb kárt okozott (69%) ezekben a tartályokban a 2013-as földrengésekhez képest (73%), a nagyobb talajremegés ellenére, ami a borászatok által a földrengés után végrehajtott, a szeizmikus ellenálló képesség növelésére irányuló jobb intézkedéseknek köszönhető. A borászatok tulajdonosai a nagy tartályok megerősítésére összpontosítottak, miközben feláldozták a kisebb, nem jól lehorgonyzott tartályokat, és a kis tartályok 83%-a, míg a nagy tartályok 67%-a sérült meg 2016-ban. Az alapozási károk több mint 70%-át horgonykárosodás okozta, ami a tartályokban lévő folyadék szintjétől függött. 2013-ban a tartály alapja és a horgonyok sérültek jobban, míg 2016-ban a tartály csöve és kúpja. A fel nem töltött tartályokban kevesebb sérülés volt (52%), mint a feltöltött tartályokban (87%).

Hamarosan új problémák merülhetnek fel, legyen szó akár az új generációs atomerőművekről, akár az energiatárolás céljából telepített tartályokról. Ilyen feladat lehet az olvadt só tárolására szolgáló tartályok. Klasing et al. [11] ezt a lehetőséget vizsgálták. A tanulmány olyan kulcsfontosságú tervezési tényezőket azonosított, mint a tartály átmérője és a termoklin vastagsága, és ezen paraméterek alapján műszaki határértéket állapított meg az egytartályos koncepció számára. Dinamikus módot alkalmaztak a feszültség elemzésére 560 °C és 620 °C maximális hőmérsékleten történő működés közben. Megállapították, hogy a kritikus átmérő lineárisan növekszik a termoklin vastagsággal. Az érzékenységelemzés kimutatta, hogy a hőmérsékletkülönbségek és a hidrosztatikai nyomás mérsékelten befolyásolják a kritikus tartály átmérőjét. A kutatók öt utat javasolnak az egytartályos tárolási koncepció méretnövelésére, beleértve a különböző szerkezeti anyagokat és a több kisebb tartályegységet. A tanulmány hangsúlyozza az egytartályos kialakításokban rejlő lehetőségeket a költségek csökkentése, a hőveszteségek csökkentése és az olvadt só tárolására szolgáló nagyméretű rendszerek optimalizálása szempontjából. A cikk célja a két leggyakrabban használt tartályszabvány, az API 650 [12] és az EN 14015 [13] gyártási költségeinek összehasonlítása, amelyek figyelembe veszik a töltés sűrűségét, a belső nyomást és a szeizmikus terhelést.

2. MÓDSZERTAN

A tanulmány célja a hengeres köpeny gyártási költségének meghatározása különböző terhelési esetek és eltérő karcsúsági feltételek mellett, amely a lemezpanelek anyagköltségéből és az azokat összekötő varratok költségéből tevődik össze. A tervezési paraméterek két csoportban kerültek felhasználásra számítások közben állandó és változó értékekként, csakúgy, mint egy optimálási folyamat során. Ez az összehasonlítás azonban nem nevezhető klasszikus optimálási folyamatnak, mivel adott eredményhalmaz eredményeinek összehasonlítása történik, azonban a tervezők számára kiindulási lehetőséget biztosíthat.

2.1. Az összehasonlítást biztosító bázisok

Az összehasonlítást biztosítandó, a peremfeltételek értékei lekötésre kerültek, melyek az alábbiakban felsoroltak voltak.

- Külső nyomásterhelés nem volt figyelembe véve.
- A tartály szerkezeti anyaga S235J2G3 szénacél alapanyag volt, 20°C-on vett felső folyáshatár értéke R_{eH}=235 MPa, szakítószilárdság értéke R_m=360 MPa, rugalmassági modulusza E=198,508 GPa.
- A varratszilárdsági tényező értéke 0,85.
- A köpenyen szigetelés nem volt figyelembe véve.
- Tervezési állapotban a töltet sűrűsége 1150 kg/m^3, tesztállapotban pedig 1000 kg/m^3 értékkel lett figyelembe véve.

– A vizsgált tartály 2000 m^3 térfogatú legyen.

2.2. A változó paraméterek

Az összehasonlítás során a változók az alábbiak voltak:

– A belső nyomás értékei 10 mbar, 20 mbar, 50 mbar, 100 mbar és 200 mbar. A 10 mbar egy viszonylag kicsi, a 200 mbar pedig egy viszonylag nagy tervezési nyomást jelent tárolótartályok esetén, a 20 mbar, az 50 mbar és a 100 mbar értékek nagyobb hányadot képviselnek.
– A lemeztáblák tekintetében 1500 mm és 2000 mm szélesség került vizsgálatra. A szélesebb lemeztáblák alkalmazása kevesebb hegesztési varratot jelent, azonban a kisebb szélességgel a tartály öntömege csökkenthető (amennyiben a hidrosztatikai terhelés lehetővé teszi, alulról nézve hamarabb csökkenthető a lemezvastagság értéke).
– Vizsgálat alá került a korróziós pótlék értéke is. Az egyik esetben 0 mm, a másik esetben 1 mm korróziós és eróziós pótlék lett figyelembe véve. Ez a korróziós pótlék a készülektervezési folyamat egyik leginkább elhanyagolt paramétere. Nagyon komplex folyamatokat kell tükröznie, a készülék élettartamát ezzel a tényezővel lehet kontrollálni, viszont sok esetben pusztán mérnöki következtetések eredménye. Jelen tanulmány ennek a korróziós és eróziós pótléknak a költségoptimumra gyakorolt hatását is vizsgálja.
– A gyártási költségeket csökkentendő a tartály átmérője egész méterre kerekítve lett vizsgálva, a térfogat biztosításához a magasság értéke lett változtatva. Az átmérőket 8 m és 25 m között változtattam.

Természetesen az összehasonlítás célja a két szabványi előírás rendszer eredményeinek az összevetése voltak. A fent vázolt változókon túl a számítások során a fixen lekötött értékek is más módon kerültek felhasználásra. Az egyik ilyen különbség a megengedett feszültségek értékéből származik. Alapvetően elmondható, hogy az API és ASME szabványok nagyobb biztonsági tényezővel dolgoznak, mint az EN szabványok, ami jelen esetben is igaz. Az 1. táblázat tartalmazza a megengedett feszültségek értékeit.

1. táblázat: *Az összehasonlítás során alkalmazott megengedett feszültségek*

	***E*N 14015**	**API 650**
tervezési állapotban (f_d)	156,67 MPa	137 MPa
tesztállapotban (f_{test})	176,25 MPa	154 MPa

Az értékekből látható, hogy a tervezési állapotban vett értékek között 12,56%, míg a tesztállapotban vett értékek között 12,62% az eltérés az EN szabvány javára. A kisebb megengedett feszültségek nagyobb falvastagságokat eredményeznek, de költségoptimalizálás miatt szabványos lemezvastagságokkal történt az összehasonlítás, ami csökkenti a két előírásrendszer közötti különbségeket.

A másik jelentős alapadatbeli különbség a szeizmikus terhelés számításának alapértékeiben voltak. Ezeket a jellemzőket a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: *A szeizmikus terhelés számításhoz szükséges paraméterek*

	EN 14015	**API 650**
konvektív tervezési válaszspektrum gyorsulási tényezője (A_c)	0,0138	0,0204
impulzív tervezési válaszspektrum gyorsulási tényezője (A_i)	0,0305	0,0305
gyorsulási válaszspektrum függőleges összetevője (A_v)	0,05	0,05

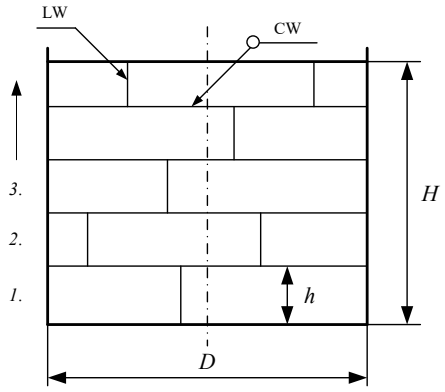
Természetesen ezek a jellemzők számos egyéb tényezőtől függenek, mint például a földrajzi elhelyezkedés, a talaj és alapozás típusa és viselkedése, van-e a közelben nagy teljesítményű forgógép, mennyire messzire vannak telepítve forgalmas útszakasztól, de az összehasonlíthatóság miatt itt azonos helyszín lett feltételezve.

3. KÖLTSÉGEK

A tanulmány alapját jelentő tartályok vonatkozásában két költségtényező lett figyelembe véve. Az első költségtag a beépített acél mennyiségével áll arányban. Mindkét jelzett szabvány esetén a vizsgált köpenyöv vonatkozásában négy falvastagságot szükséges meghatározni, melyek négy különböző tervezési állapothoz tartozó szilárdságilag szükséges értéket definiálnak:

- emeléshez tartozó falvastagság (e_{erec}),
- tervezési állapothoz tartozó falvastagság (e_d),
- tesztállapothoz tartozó falvastagság (e_t), és
- szeizmikus terheléshez szükséges falvastagság (e_s).

Az adott köpenyövhöz tartozó falvastagság értékek mindegyike függvénye az átmérőnek és a magassági pozíciónak is, így van létjogosultsága a különböző magasság és átmérő értékek vizsgálatának. A számítások során annyi köpenyöv lett meghatározva, hogy az előírt térfogatot biztosítsuk. A tartály anyagköltsége ezeknek a lemezeknek a tömegével arányos. A tanulmány 0,875 $/kg világpiaci átlagárral számolt.



1. ábra: A számításhoz készített vázlat

Az összköltség másik része a lemezek összehegesztésének költsége volt. Ennél a költségelemnél a fenéklemez és a tetőszerkezet szintén nem került beleszámításba, csak a köpenyt alkotó lemezek hossz- és körvarratainak költsége lett feltételezve. Tartályoknál teljes átolvadású tompavarratokkal szükséges elkészíteni, és mindkét varratnál ugyanez a kötés lett feltételezve, 53,76 $/m fajlagos költséggel.

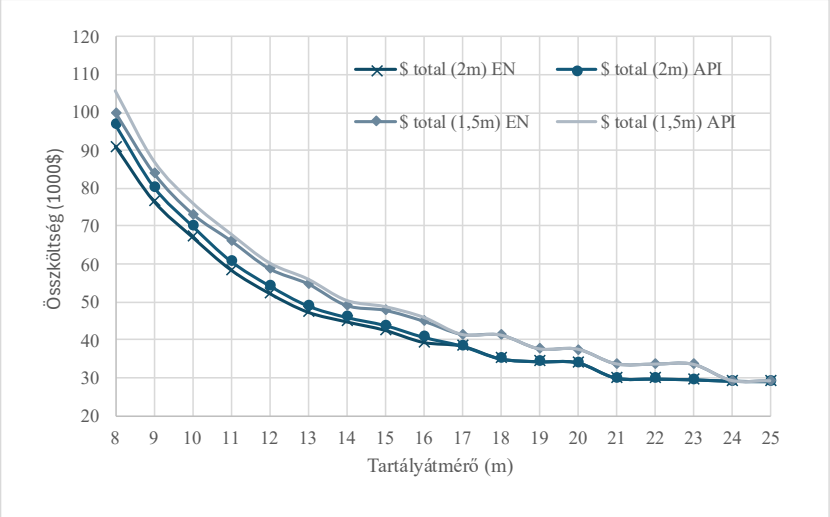
A számítások alapján, a fent jelzett fajlagos értékekkel számítva átlagosan 55-45% arányban oszlott meg a költség az anyagköltség és a hegesztési költség között. Az 1. ábra a számítás vázlatát mutatja. A köpenyövek számozása lentről felfelé történt, a körvarratok CW-vel, a

hosszvarratok LW-vel kerültek jelölésre.

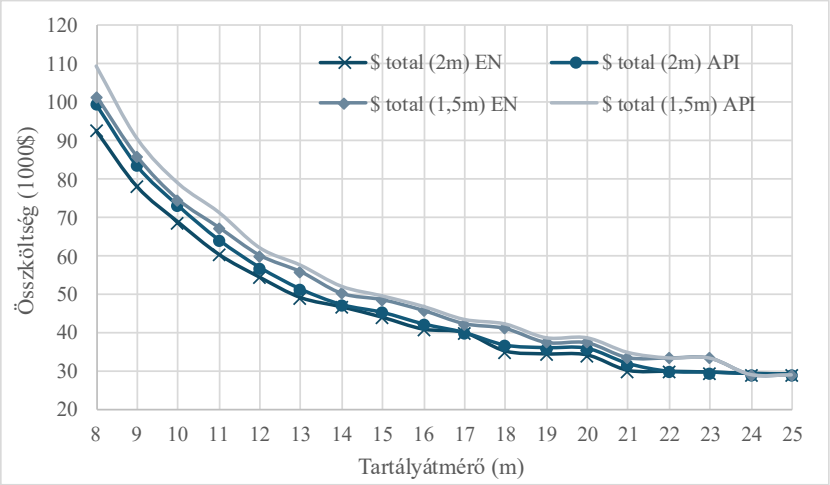
4. EREDMÉNYEK

4.1. Korróziós pótlék nélküli eredmények

A 2. és 3. ábra a 2 m szélességű lemezekkel készült tartályköpenyek összköltségét mutatja.



2. ábra: *Összköltségek* 10 *mbar tervezési nyomás és különböző lemezszélességek esetén*



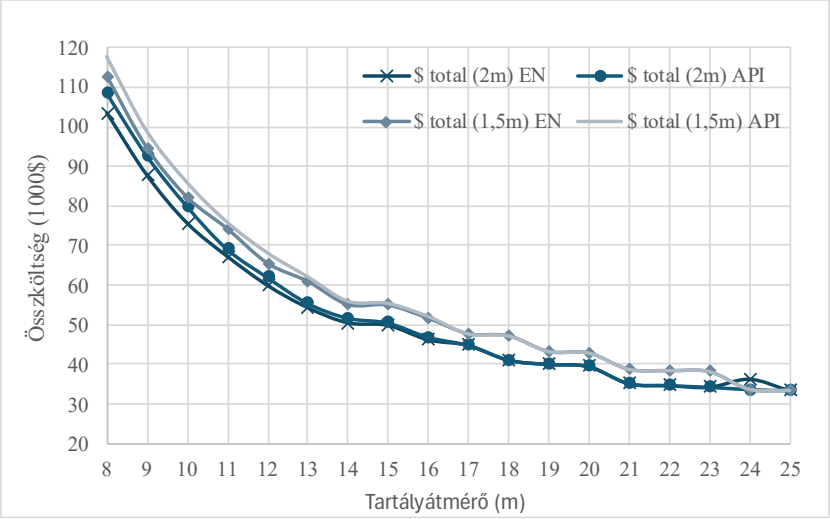
3. ábra: *Összköltségek* 200 *mbar tervezési nyomás és különböző lemezszélességek esetén*

Az ábrák jól mutatják, hogy ilyen típusú peremfeltétel-rendszer mellett optimumpont nehezen értelmezhető, a kapott eredmények monoton csökkennek. Gyakorlatilag kimondható, hogy a feltételfüggvénnyel korlátozott legnagyobb átmérőhöz fog tartozni a költség optimuma. A helyzetet árnyalja, hogy az összehasonlítás csupán a tartályköpenyekre vonatkozik, amelyen tetőszerkezet nem szerepel, valamint üzemviteli és telepítési szempontokból sem megoldható a nagy átmérőjű, de kis magasságú szerkezet. Látható az is, hogy nagyobb átmérőknél, a kerekítések hatására teljesen eltűnik a két szabványi előírás közötti különbség, továbbá az is, hogy a hidrosztatikai nyomáson felül értelmezett, gáztéri tervezési nyomás alig van hatással az összköltségekre.

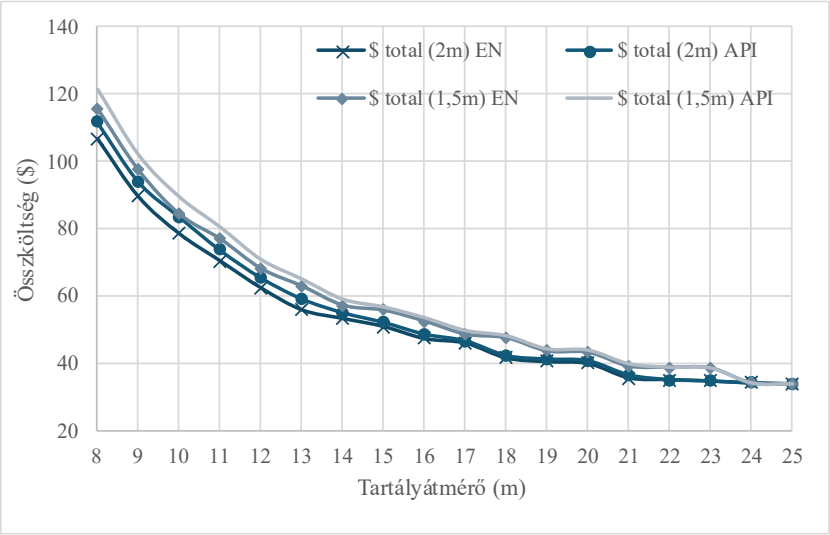
Az ábrán látható az alkalmazott lemezszélesség hatása is a költségekre. Annak ellenére, hogy

hamarabb reagál ez a típusú felépítés a hidrosztatikai nyomás csökkenésére, a megnövekedett hegesztési költségek miatt nagyobb összköltség értékek adódnak.

A 4. és 5. ábra ugyanezen elvek alapján mutatja az eredményeket, de *c*=1 mm korróziós és eróziós pótlék mellett.



4. ábra: *Összköltségek* 10 *mbar tervezési nyomás és különböző lemezszélességek esetén, pótlékkal*



5. ábra: *Összköltségek* 200 *mbar tervezési nyomás és különböző lemezszélességek esetén, pótlékkal*

Összességében kijelenthető, hogy a pótlékkal korrigált diagramok lefutása analóg a pótlék nélkül kapott eredményekkel. Ami számottevő különbség, az az 1 mm plusz okozta rendre 11,32% és 11,00%-os költségnövekmények.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Állóhengeres tárolótartályok tervezése során a hagyományos terheléseken - mint a belső és külső nyomás, valamint a tárolt közeg sűrűségéből származó hidrosztatikai nyomás - túlmenően a környezeti hatások, így a szél- és földrengés terhelések figyelembevétele is elengedhetetlen.

A tárolt közeg jelentős mennyisége miatt a szerkezeti meghibásodások potenciálisan súlyos baleseteket idézhetnek elő. Jelen tanulmány célja a klasszikus és szeizmikus terhelésekből származó peremfeltételek költségvonzatainak vizsgálata, különös tekintettel a köpenyt alkotó lemeztáblák és hegesztési műveletek költségarányaira. A tervezés a két tartályméretezésre alkalmazható szabvánnyal, az EN 14015 és az API 650 szabványokkal történt. Az eredmények azt mutatják, hogy költséghatékonysági szempontból a medenceszerű, nagy átmérőjű, de kis magasságú tartályok jelentősen kisebb költséggel rendelkeznek, mint a magasabb és karcsúbb társai. A szabványi előírásokban való eltérések költség szempontjából elhanyagolhatók. Továbbá megállapítható, hogy a kisebb szélességű lemeztáblák alkalmazása - ami körvarratok számának növekedésével jár - gazdaságilag nem kedvező, mivel aránytalanul növeli a gyártási költségeket.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] E. AZZUNI and S. GUZEY: *Comparison of the shell design methods for cylindrical liquid storage tanks*, Eng Struct, vol. 101, pp. 621–630, 2015

[2] M. MANGA, T. NGOBI, L. OKENY, P. ACHENG, H. NAMAKULA, E. KYATEREKERA, I. NANSUBUGA and N. KIBWAMI: *The effect of household storage tanks/vessels and user practices on the quality of water: a systematic review of literature*, Environmental Systems Research, vol. 10, no. 1, 2021,

[3] M. IDRIS: *Comparison of Water Storage Tank Design using API 650 and AWWA D100 Standard*. AIP Conf. Proc. 3 May 2023; 2592 (1): 050004.

[4] K. VOLIKOS, F. KONSTANDAKOPOULOU, P. ASTERIS, and G. HATZIGEORGIOU: *Recent advancements in seismic analysis and design of liquid storage tanks*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 198, no. February, p. 109309, 2025

[5] M. VERSLUIS and F. BESSELING: *Generic Approach Liquid Storage Tanks*, 23. April, 2018, Rotterdam, The Netherlands

[6] S. FALLAH DARYAVARSARI and R. NASCIMBENE: Assessment of Steel Storage Tank Thickness Obtained from the API 650 Design Procedure Through Nonlinear Dynamic Analysis, Accounting for Large Deformation Effects, Materials, vol. 18, no. 1, 2025,

[7] L. ZHOU, T. XU, Z. LU, and D. ZHANG: *A Study on the Sloshing Problem of Vertical Storage Tanks under the Action of Near-Fault Earthquakes*, Advances in Civil Engineering, vol. 2020, 2020

[8] M. ORMEÑO, T. LARKIN, and N. CHOUW: *Experimental study of the effect of a flexible base on the seismic response of a liquid storage tank*, Thin-Walled Structures, vol. 139, no. March, pp. 334–346, 2019,

[9] M. PANTUSHEVA: *Seismic Analysis of Steel Storage Tanks: Overview of Design Codes Used in Practice* no. November, 2017

[10] M. YAZDANIAN, J. M. INGHAM, C. KAHANEK, and D. DIZHUR: *Damage to flat-based wine storage tanks in the 2013 and 2016 New Zealand earthquakes*, J Constr Steel Res, vol. 168, p. 105983, 2020

[11] F. KLASING, M. SCHMITZ, C. GERDES, C. ODENTHAL, and T. BAUER: *Critical diameter for a single-tank molten salt storage – Parametric study on structural tank design*, J Energy Storage, vol. 101, no. September, 2024

[12] API Standard 650, Thirteenth Edition. *Welded Tanks for Oil Storage* Washington, D.C.: American Petroleum Institute, 2020

[13] MSZ EN 14015:2005. *Folyadékot környezeti és magasabb hőmérsékleten tároló, a helyszínen telepíthető, föld feletti, álló, hengeres, lapos fenekű, hegesztett, acél tárolótartályok kialakítási és gyártási előírásai.* 2004

MAGANYAG VIZSGÁLATA TERMÁLIS FRG MÓDSZERREL

NUCLEAR MATTER EXAMINATION USING THERMAL FRG METHOD

NAGY Ádám[1], PSZOTA Gábor[2], NYERGESY Eszter Napsugár[3], MÁRIÁN István Gábor[4], NÁNDORI István[5]

[1]PhD, egyetemi adjunktus, adam.nagy@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Fizikai Tanszék

[2]PhD, egyetemi docens, gabor.pszota@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Fizikai Tanszék

[3]fizikus mester szakos hallgató, enyergesy@gmail.com
Debreceni Egyetem, Természettudományi és Technológiai Kar, Fizikai Intézet

[4]PhD, tudományos munkatárs, marian.istvan.gabor@atomki.hu
HUN-REN, Atomki, Fizikai Elméleti Magfizikai Kutatócsoport

[5]PhD, habilitált egyetemi docens, istvan.nandori@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Fizikai Tanszék

Kivonat: *Ebben a munkában a Funkcionális Renormálási Csoportot (FRG) véges hőmérsékletű magfizikai rendszerekre való alkalmazásával foglalkozunk. Röviden ismertetjük a fenomenologikus atommag modelleket, majd javaslatot teszünk a véges hőmérsékletű maganyag vizsgálatára FRG módszer keretein belül.*

Kulcsszavak: *maganyag, atommag modellek, Funkcionális Renormálási Csoport, véges hőmérsékletű RG módszer*

Abstract: *In the present work, we apply the Functional Renormalization Group (FRG) to finite-temperature nuclear physics systems. We briefly describe phenomenological nuclear models and then propose a method for studying finite-temperature nuclear matter using the FRG method.*

Keywords: *nuclear matter, nuclear models, Functional Renormalization Group, finite temperature RG method*

1. BEVEZETÉS

A jelen cikk a véges hőmérsékletű funkcionális renormálási csoport (angolul Functional Renormalization Group, FRG) olyan magfizikai rendszerekre történő alkalmazására összepontosít, amelyekben mind a hőmérséklet, mind a sűrűség véges. Az FRG egy sokoldalú nem-perturbatív módszer, amelybe konzisztens módon beépíthetőek tetszőleges energiaskálájú kvantum- és termikus fluktuációk, így az FRG jól alkalmazható erősen kölcsönható soktest rendszerek elméleti vizsgálatára. Atommagfizikai rendszerek tanulmányozásakor, a termikus hatások kulcsfontosságú szerepet játszanak az extrém környezeteben levő maganyag viselkedésének leírásában, amely megtalálható a nehézion-ütközésekben, a neutron csillagokban és a korai Univerzumban. A hagyományosabb vizsgálati módszerek számára gyakran nehézséget jelent ezen magfizikai rendszerek összetettségének, komplexitásának a kezelése, különösen akkor, ha egy fázisátmenet közelében levő rendszerről van szó. Az FRG egy alternatív és egyben hatékony, skálafüggetlenséget biztosító elméleti módszer, amelynek a segítségével a rendszer mikroszkopikus szabadsági fokszámai és a felbukkanó makroszkopikus jelenségek együttesen kezelhetőek. A projekt célja a hőmérséklet függő maganyag korrelációjának és fázis struktúrájának az elméleti vizsgálata módosított FRG módszer [1,2] segítségével. A kutatási projekt tartalmazza a magfizikai rendszerben történő folyadék-gáz fázisátmenet-, a kiralitási szimmetria és annak helyreállásának a szerepének -, illetve változó hőmérséklet és sűrűség melletti állapot egyenletnek a tanulmányozását. A kutatási munka során effektív térelméleti módszerekkel kívánunk

dolgozni, mint például a királis nukleon-mezon modellek vagy az alacsony energiájú kvantumszíndinamikán (angolul Quantum Chromodynamics, QCD) alapuló modellek. Az elvégzendő kutatómunka egyik kulcsfontosságú eleme olyan numerikus módszerek kifejlesztése és implementációja, amelyek segítségével a hőmérséklet függést figyelembe vevő RG folyási egyenletek közelítő megoldását állíthatjuk elő. Ezek a megoldások információt szolgáltatnak a kvantum- és a termikus effektusok egymáshoz való viszonyáról, és összehasonlíthatóak a rácstérelméleti számítások eredményeivel, illetve a kísérleti adatokkal. A fentieket összegezve, a kutatásaink konkrét célja a nagy sűrűségű és magas hőmérsékletű környezetben levő maganyag viselkedésének a megértése, és tágabb értelemben vett kutatási célunk részt venni olyan konzisztens, nem-perturbatív elméleti módszerek kidolgozásában, amelyek az atommag- és a hadronfizika területén jól alkalmazhatóak

2. AZ ATOMMAG MODELLEK

Az atommagokban koncentrálódik az atomok tömegének majd egésze és közvetve meghatározzák az elemek kémiai sajátságait, így az atommagok tulajdonságainak a megismerése alapvető jelentőségű. Az atommagokban levő nukleonok száma általában túl sok, hogy az egyes nukleonok közötti kölcsönhatáson alapuló kvantummechanikai leírással éljünk, másrészint ahhoz túl kevés, hogy statisztikusfizikai eszközöket alkalmazzunk. További nehézséget jelent, hogy a protonokat és a neutronokat összetartó nukleáris kölcsönhatást pontosan nem ismerjük. így az atommagok leírásához külön féle "mag modellek" alkalmazásra van szükség. A modell alkotás során az atommagok komplexitásának a megragadása helyett, azok bizonyos tulajdonságait kiemelve egyfajta "egyszerűsített képpel" élünk. Nyilvánvaló, hogy az így elő állított modellek alkalmazhatósága korlátokhoz vannak kötve, de sok esetben a segítségükkel értékes információkat nyerhetünk. Az elkövetkezendő bekezdésekben az atommagok csepp-, héj-, és fürtmodelljét mutatjuk be röviden.

2.1. Az atommagok cseppmodellje

Az α-sugárzó magok élettartamának és a kibocsájtott α-részecskék energiájának a mérésén keresztül következtetni lehetett az atommagok méretére. Az eredmények azt mutatták, hogy a magsugár a tömegszám köbgyökével arányos, ami a maganyag összenyomhatatlanságára [3, 4], folyadék szerű viselkedésére utal. Ez a tapasztalt afelé visz, hogy az atommagot egy töltött folyadékcsepp segítségével modellezzük. Ezt az elgondolást meggyőzően alátámasztja az, hogy egy makroszkopikus folyadékcsepp molekulái között fellépő Van der Waals erők és egy atommag nukleonjait összetartó megérők egymáshoz sokban hasonlítanak [4]. A cseppmodell segítségével megadott félempirikus kötési energia formula figyelembe vesz térfogati-, felületi-, Coulomb-, pár-, és aszimmetriai energiatagokat; ezáltal helyesen megadva a legtöbb atommag teljes-, és az egy nukleonra jutó kötési energiáját [3, 4]. Az utóbbi mennyiség azt jellemzi, hogy egy nukleon átlagosan milyen erősen van kötve az atommagban. Ha az egy nukleonra jutó kötési energiát ábrázoljuk a mag nukleon- és protonszámának függvényeként, akkor eljutunk az atommagok energiafelületéhez, amelynek a tanulmányozásával észrevehetjük, hogy valamenynyi radioaktív bomlás okozója, hogy az atommag az egyre kisebb energiájú állapotok irányába halad ezen a felületen [3, 4]. A cseppmodell nagy előnye, hogy szemléletes és az egyszerűsége ellenére óriási sikereket könyvelhet el a kötési energiák és ezáltal a bomlások tendenciájának az előrejelzésében, de egyes atommagok (például: ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$, ${}^{16}_{8}\mathrm{O}$, ${}^{40}_{20}\mathrm{Ca}$, ${}^{56}_{28}\mathrm{Ni}$, ${}^{208}_{82}\mathrm{Pb}$, ...) kivételt képezve, figyelemre méltóan stabilak, azaz az egy nukleonra jutó kötési energiájuk jóval magasabb, mint a cseppmodell által jósolt érték. Ennek magyarázatát az atommagok héjmodellje adja meg.

2.2. A héjmodell

A cseppmodell nem volt képes értelmezni azt, hogy egyes atommagok stabilitása kiemelkedő. Ezeknek a magoknak a proton-, vagy a neutron-, vagy mindkét alkotójának a száma 2, 4, 8, 16, 20, 40, ... stb. Ezeket a számokat mágikus számoknak, azokat a magokat, amelyek rendelkeznek ilyen számmal mágikus atommagoknak nevezzük. Kémiából ismert, hogy a nemesgáz elemek (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn) különösen stabilak, és ennek oka, hogy ezek az elemek elektronhéjai zártak. Kézenfekvő az atommagokat az atomok elektronhéjához hasonlítani. Az atomok tulajdonságainak a megértésében a kvantummechanikai alapokon nyugvó elektron héjmodell sikeresnek bizonyult, így az atommagok esetén is célszerű egy "független részecske" héjmodellt felállítani. Az elektronburkot és az atommagot összehasonlítva számos eltérést látunk, és a modellalkotás szempontjából talán a leglényegesebb különbség, hogy a nukleonok esetén nincs egy központi objektum, ami meghatározza a nukleonok mozgását. Másrészint a protonoknak és a neutronoknak ez a folytonos mozgása egy rendkívül komplikált potenciálteret hoz létre, amely első látásra szinte lehetetlenné teszi bármely ilyen elven működő atommagmodell megkonstruálást. A kivezetést a következő alapötlet kínálja: az atommagban az inert magtörzs nukleonjai egy időben átlagolt potenciálteret létesítenek és ebben az átlagtérben mozog a valencianukleon. Ez az alapötlet egyúttal a feladatot is meghatározza: A $V(r)$ centrális potenciáltérben mozgó m tömegű részecskére vonatkozó Schrödinger-egyenletet megoldva kaphatjuk meg a helyes energiaértékeket [3,4]. A Schrödinger-egyenlet megoldása során felmerülő kérdés, hogy milyen alakú potenciált kell figyelembe venni. A könnyebb atommagok esetén a harmonikus oszcillátor-, vagy a derékszögű potenciál használata mutatkozott eredményesnek, de ezek közül egyik sem magyarázta helyesen a 40 feletti mágikus számú stabil magokat. A nehezebb atommagok esetén a Woods-Saxon potenciál használata és a spin-pálya kölcsönhatás figyelembevétele vezetett helyes eredményekre [3]. Az atommag héjmodelljének segítségével jelentős sikereket lehetett elérni a mágikus számok reprodukálásának a terén, de ezek ellenére nem kezelhető univerzális magmodellként. A modell segítségével meg lehet magyarázni a gömbszimmetrikus atommagok egyes tulajdonságaihoz köthető jelenségeket az alap és kis energiájú gerjesztett állapotok esetén.

2.3. A fürtmodell

Ahogyan azt korábban említettük, léteznek a többinél jóval stabilabb nukleonkonfigurációk. A magas kötési energiájuk következtében könnyen elképzelhető, hogy a tőlük jóval nagyobb nukleonszámú magok felépítésében építőkövekként vesznek részt. Más szavakkal, ezek az atommagok kisebb magok lazábban kötött klaszterekénti épülnek fel. Ezt a magmodellt nevezik klasztermodellnek [5, 6]. Szemléletes képpel élve, ekkor az atommagot egy fürt szőlőhöz tudjuk hasonlítani, ahol a szőlőszemek az egyes klasztereket jelenítik meg, ezért ezt a magmodellt szokták fürtmodellnek is nevezni. A ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$, atommag, vagy más néven az α-részecske egy kétszer mágikus nukleon konfiguráció, mivel mind a protonjainak, mind a neutronjainak a száma mágikus szám. Azt klasztermodellt, ahol az egyes klaszterek szerepét az α-részek töltik be α-modellnek nevezzük. Konkrét példaként megemlíthető, hogy a ${}^{8}_{4}\mathrm{Be}$, magot két darab α-rész-, a ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$, magot pedig három darab α-rész klaszterekénti képzelhetjük el. Az α-klaszterizáció leginkább a könnyű magok esetén jellemző. Az α-modell helyesen adja meg az egyes magasabb energiájú állapotokat és az egyes bomlási csatornákat a könnyű atommagokra nézve.

3. A MAGANYAG VIZSGÁLATA VÉGES HŐMÉRSÉKLETŰ RG MÓDSZERREL

Az áttekintett fenomenologikus magmodellek érvényessége korlátozott, amennyiben kvantumos és relativisztikus effektusokat is figyelembe kívánunk venni kvantumtérelméleti (Quantum Field Theory, QFT) tárgyalásmódra lesz szükségünk. Nagy hőmérsékleten azt várjuk, hogy a hadronokból kvark-gluon plazma (Quark-Gluon Plasma, QGP) keletkezik, így ezen fázisátalakulásra olyan QFT leírást kell alkalmaznunk mely véges hőmérsékleten is értelmezett. A vizsgálódást a Funkcionális RG módszerrel végezzük, melynek keretében a klasszikus térelméleti modell kvantálása egy pályaintegrál segítségével történik, aminek megoldásához k futó energiaskálát vezetjük be. A kvantumos effektusokat tartalmazó modellt a $k \to 0$ határértékben kapjuk. Ahhoz, hogy termikus effektusokat is figyelembe vegyük, ki kell terjesztenünk az RG módszert véges hőmérsékletre. A szakirodalomban ismert eljárás szerint a QFT véges T-re való kiterjesztésekor az időszerű dimenziót kompaktifikáljuk, a kvantumtérelméletet pedig az így kapott henger felszínén végezzük, melynek sugara $R=1/T$. Az ismert eljárás szerint ezt állandóan tartják RG transzformációk során, azonban amellett érvelünk, hogy érdemes megvizsgálni azt az esetet is, melyben a henger sugara skálázódik. Más szóval, $T=\tau k$ hőmérsékleti parametrizációval élünk, ahol τ dimenziótlan hőmérsékletet állandóan tartjuk az RG transzformációk során. Ennek előnye, hogy ezen módszer megtartja azon nem-triviális fixpontokat, melyek szükségesek a véges hőmérsékletű QFT modellek elemzéséhez. Az ismertetett eljárást tervezzük alkalmazni magfizikában ismert QFT modellekre, többek között four-fermion és Nambu-Jona-Lasinio (NJL) típusú modellekre. Az előzetes eredmények alapján elmondható, hogy megfelelő kezdő feltételt választva a magas hőmérsékleten vett four-fermion modellben visszaáll az axiális szimmetria, ami éppen a rács QCD számítások alapján vett elvárás.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen publikációban extrém kondícióknál vett maganyag leírására alkalmas modellek áttekintésével foglalkoztunk. A szokásos fenomenologikus magmodellek rövid jellemzése után jutottunk el a relativisztikus effektusokat és a részecskeszám változást is kezelni képes kvantumtérelmeleti leíráshoz. Végül ismertetésre került az általunk kidolgozott (szakirodalomban nem ismert) véges hőmérsékletű FRG módszer, aminek az alkalmazása távlati célunk.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] MÁRIÁN, I., G., TROMBETTONI, A., NÁNDORI, I.: *Time evolution and thermal renormalization group flow in cosmology.* Phys. Lett. B 858, 139051, 2024.

[2] NYERGESY, E., MÁRIÁN, I., G., MESKHI, E., TUROVTSI-SHIUTEV, Y., NÁNDORI, I.: *Thermal RG flow of AS quantum gravity.* Phys. Lett. B 864, 139440, 2025.

[3] FÉNYES, T.: (szerk.).: *Atommagfizika I., (2. korszerűsített kiadás),* Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen, 2009.

[4] SÜKÖSD, CS.: *Kísérleti atommagfizika,* 2013. web: https://mek.oszk.hu/16000/16052/

[5] DARAI, J., CSEH, J.: *Erősen deformált magállapotok és fürtösödésük.* Fizikai Szemle, 64(1), pp. 5–8, 2014.

[6] CSEH, J.: *Atommagok rezgése és forgása: Fázisátmenetek hideg kvantumrendszerekben,* Fizikai Szemle, 62(1), pp. 1-7, 2012.

NEUTRONCSILLAGOK MAXIMÁLIS TÖMEGE ÉS AZ EXTRÉM MAGANYAG FÁZISAI

MAXIMUM MASS OF NEUTRON STARS AND PHASES OF THE EXTREME NUCLEAR MATTER

PSZOTA Gábor[1], NAGY Ádám[2], NYERGESY Eszter Napsugár[3], MÁRIÁN István Gábor[4], NÁNDORI István[5]

[1]PhD, egyetemi docens, gabor.pszota@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Fizikai Intézeti Tanszék

[2]PhD, egyetemi adjunktus, adam.nagy@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Fizikai Intézeti Tanszék

[3]fizikus mester szakos hallgató, enyergesy@gmail.com
Debreceni Egyetem, Természettudományi és Technológiai Kar, Fizikai Intézet

[4]PhD, tudományos munkatárs, marian.istvan.gabor@atomki.hu
HUN-REN, ATOMKI, Elméleti Magfizikai Kutatócsoport

[5]PhD, habilitált egyetemi docens, istvan.nandori@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Fizikai Intézeti Tanszék

Kivonat: *Ebben a munkában neutroncsillagok fázisaival és maximális tömegével foglalkozunk. Röviden ismertetjük az extrém maganyag fázisait, a hadron-kvark fázisátmenetet szemléltető diagramot, illetve a maximális tömeg meghatározására tett javaslatunk fontosabb elemeit.*

Kulcsszavak: *neutroncsillag, hadron-kvark fázisátmenet, maximális tömeg, véges hőmérsékletű FRG*

Abstract: *In this work we deal with the phases and maximum mass of neutron stars. We briefly elaborate on the phases of the extreme nuclear matter, the diagram illustrating the hadron-quark transition, and the main elements of our proposal to determine the maximum mass.*

Keywords: *neutron star, hadron-quark phase transition, maximum mass, finite temperature FRG*

1. BEVEZETÉS

A neutroncsillagok az Univerzum legsűrűbb objektumai közé tartoznak. Ezek olyan nagy tömegű csillagok maradványai, amelyek elhasználták nukleáris fűtőanyagukat, szupernóvarobbanáson mentek keresztül, majd visszamaradt magjuk kb. 1,2-2,6 naptömegnyi anyagot tartalmaz egy 10-25 km átmérőjű térfogatban. Belsejükben a sűrűség messze meghaladja a maganyag telítési sűrűségét (amely kb. 0,16 nukleon/fm^3 vagy $2{,}3\cdot10^{17}$ kg/m^3), és az anyag olyan extrém állapotba kerül, amely messze túlmutat a földi laboratóriumok lehetőségein. Ilyen extrém körülmények között az atommagokat alkotó protonok és neutronok (közösen nukleonok), valamint a köztük ható mezonok többé nem feltétlenül írják le megfelelően az anyagot. Lehetséges, hogy a nukleonok térben átfedik egymást, az őket alkotó kvarkok kiszabadulnak, és ezáltal az anyag különböző fázisai alakulnak ki, például szabad kvarkanyag vagy kvark-glüon plazma. Az ilyen sűrű anyag állapotegyenlete (EOS) kulcsfontosságú a neutroncsillagok szerkezetének (tömeg-sugár viszony), stabilitásának, valamint olyan jelenségeknek a megértésében,

mint a pulzárok periódusugrásai, a hűlésük, vagy a neutroncsillagok összeolvadás közbeni viselkedése. Az egyik érdekes lehetőség, hogy kellően nagy sűrűségnél az anyag fázisátmenetet szenved, a hadronikus (nukleonokból álló) anyag kvark-glüon plazmává (QGP) alakul, majd vissza, tehát ismét hadronizáció jön létre. Az alábbiakban áttekintjük ennek a hadron–kvark átmenetnek a fizikáját, a lehetséges csillagászati jeleket, valamint más csillagfajtákat is, ahol ez a folyamat szerepet játszhat.

2. HADRON-KVARK FÁZISÁTMENET A NEUTRONCSILLAGOKBAN

A neutroncsillag magjában a sűrűség elérheti a nukleáris telítési sűrűség többszörösét. Ilyen értékeknél a hagyományos magfizikai modellek bizonytalanná válnak, és felmerül a lehetőség, hogy az erősen kölcsönható anyag szabad kvarkanyagba megy át, vagyis egy sűrű, hideg kvark-glüon plazma állapotba. Ezt a folyamatot hadron–kvark fázisátmenetnek nevezik.
A hadronikus esetben az állapotegyenletet általában soktest-elméletekkel vagy relativisztikus térelméleti modellekkel írják le, míg a kvarkok esetében egyszerűbb (pl. az MIT zsák modell) vagy bonyolultabb (Nambu–Jona–Lasinio, perturbatív kvantumszíndinamika) megközelítésekkel kezelik [1]. Burgio és munkatársai például az MIT zsák modellt alkalmazták a kvarkanyag leírására, és azt találták, hogy a kvarkmaggal rendelkező neutroncsillagok maximális tömege 1,4–1,7 naptömeg között lehet. Ezzel szemben az utóbbi évekbeli megfigyelések, különösen a 2 naptömeg körüli pulzárok felfedezése, arra utalnak, hogy a neutroncsillagok anyagának állapotegyenlete sokkal keményebb, mint korábban gondolták, és ez lehetővé teheti, hogy a csillagok magjában stabil kvarkmag alakuljon ki [2].

A hadron–kvark fázisátalakulás lehet elsőrendű, amikor a sűrűség és a nyomás ugrásszerűen változik, vagy lehet keresztülmeneti (crossover) jellegű. Ha a fázisátalakulás elsőrendű, akkor a csillag belsejében egy kevert fázis is létrejöhet, amelyben hadronikus és kvarkanyag egyaránt jelen van. A hadronizáció akkor játszódik le, vagyis a kvarkanyag akkor alakul vissza hadronokká, amikor a neutroncsillag lehűl vagy a sűrűség csökken. E folyamatok során jelentős mennyiségű energia szabadulhat fel, ami befolyásolhatja a csillag neutrínókibocsátását, hőmérsékletét és stabilitását. Tehát a neutroncsillagok belső szerkezete rétegzett lehet. Az elképzelés szerint a külső rétegben hadronikus anyag található, alatta egy keverék zóna, végül a magban tiszta kvarkanyag. A keverék tartományban a hadronikus és kvarkanyag összetevők mikroszkopikus szerkezete bonyolult lehet, például úgynevezett tészta
alakzatok alakulhatnak ki, amelyek rudakra, lapkákra, cseppekre és csövecskékre hasonlítanak

3. KVARK-GLÜON PLAZMA, HADRONIZÁCIÓ ÉS ASZTROFIZIKAI JELEK

A kvark-glüon plazma és a hadronizáció jelensége nemcsak a neutroncsillagokban, hanem más asztrofizikai környezetekben is megjelenhet. A kvark-glüon plazma olyan anyagállapot, amelyben a kvarkok és glüonok szabadon mozognak, és a színtöltés már nem záródik be a hadronokba. A Világegyetem legelső pillanataiban, az Ősrobbanás utáni néhány mikroszekundumban, az egész Univerzum kvark-glüon plazma állapotban volt, és a későbbi tágulás során ez a plazma ment át a hadronizáció folyamatán, létrehozva a ma ismert anyagot. A neutroncsillagokban ezzel szemben a hőmérséklet viszonylag alacsony, a sűrűség azonban rendkívül magas. Ezért itt hideg, sűrű kvarkanyagról beszélünk, amely a kvantum-színdinamika (QCD) fázisdiagramjának másik szélsőséges tartományába esik. Ha a csillag belsejében kvarkanyag jön létre, annak többféle megfigyelhető következménye is lehet. A csillag tömeg-sugár viszonya például érzékenyen függ az állapotegyenlettől: ha kvarkmag alakul ki, akkor az EOS megváltozik, ami "ikercsillag" jelenséghez vezethet, vagyis létezhet két azonos tömegű, de eltérő sugarú neutroncsillag. A kvarkok kiszabadulása és a hadronizáció gravitációs hullámjelekben is megmutatkozhat. Neutroncsillagok összeolvadásakor a két csillag belsejében a sűrűség és a hőmérséklet

drámaian megnő, így a fázisátmenet közvetlenül befolyásolhatja az összeolvadás utáni maradvány szerkezetét és a gravitációs hullámok frekvenciaspektrumát. Ezeket a különbségeket a modern gravitációshullám-detektorok – például a LIGO és a Virgo – potenciálisan érzékelni tudják [4]. A kvarkanyag jelenléte a neutrínókibocsátásra és a csillag hűlési sebességére is hatással van, mivel a kvarkanyag neutrínó emissziója hatékonyabb, mint a hadronikus anyagé. A neutroncsillagokban megfigyelhető periódusugrások, vagyis a forgási sebesség hirtelen megnövekedései szintén összefüggethetnek a fázisátmenetekkel. Amikor a csillag belsejében egy elsőrendű átmenet zajlik le, akkor az anyag újbóli kiegyensúlyozása hirtelen energiafelszabadulással járhat, ami a forgási sebesség kismértékű, de mérhető változását idézheti elő. Az olyan neutroncsillagokban, amelyek társcsillaguktól anyagot nyelnek el, a központi sűrűség növekedése akár újabb felszabadulási átmenetet is kiválthat, ami szintén megfigyelhető lehet az általa kibocsátott elektromágneses sugárzásban vagy a csillag forgási dinamikájában [3].

4. EGYÉB CSILLAGOK ÉS KOMPAKT OBJEKTUMOK

A kvark-glüon plazma és a hadronizáció azonban nem kizárólag neutroncsillagokban fordulhat elő. Elméletileg létezhetnek ügynevezett hibrid csillagok, amelyek részben hadronikus, részben kvarkanyagból állnak, illetve teljes kvarkcsillagok, amelyek anyagát kizárólag a nukleonokból kiszabadult kvarkok alkotják. Ha a kvarkanyag stabilabb, mint a hadronikus anyag, akkor egy neutroncsillag átalakulhat kvarkcsillaggá, ami robbanásszerű eseményt, ügynevezett "kvark-nóvát" idézhet elő. Egy másik lehetőség a "furcsa anyag" hipotézis, amely szerint a fel (up), le (down) és furcsa (strange) kvarkokból álló anyag az Univerzum legalacsonyabb energiaszintű állapota, és a teljes mértékben ilyen anyagból felépülő "furcsa csillagok" is létezhetnek.

5. NEUTRONCSILLAGOK MAXIMÁLIS TÖMEGE

A hőmérséklet-bariokémiai potenciál (T-μ) diagram a kvarkanyag és a hadronikus anyag közötti fázisátmenet leírásának egyik legfontosabb eszköze, és közvetve lehetőséget nyújt a neutroncsillagok tömegének meghatározására is. A kvantumszíndinamika (QCD) fázisdiagramon az alacsony hőmérsékletű, de nagy μ értékekkel rendelkező tartomány felel meg a neutroncsillagok belső körülményeinek. A QCD fázisdiagram különböző régiói – a hadronikus fázis, a kvark-glüon plazma és az esetleges keverék zóna – mind eltérő állapotegyenleteket definiálnak. Ezek az állapotegyenletek adják meg, hogy adott μ és T mellett mekkora a nyomás és az energiasűrűség, amelyek viszont a Tolman–Oppenheimer–Volkoff egyenletekbe beillesztve meghatározzák a neutroncsillag stabil szerkezetét és tömegét. Így a T-μ diagram nem közvetlenül, hanem az állapotegyenleten (EOS) keresztül kapcsolódik a megfigyelhető tömeghez: a diagramon kijelölt pont, amely a neutroncsillag magjának állapotát jelképezi, meghatározza az anyag mikroszkopikus tulajdonságait, s ezzel együtt a csillag makroszkopikus jellemzőit is. Ha például a mag állapota a hadron-kvark fázishatáron helyezkedik el, akkor a csillag belsejében vegyes fázis alakulhat ki, amely lágyabb állapotegyenlethez vezet, így a maximális stabil tömeg alacsonyabb lesz. Ezzel szemben, ha a mag mélyen a QGP tartomány belsejében található, akkor az EOS keményebbé válhat, ami nagyobb maximális tömeget eredményez. A T-μ diagram tehát kulcsszerepet játszik abban, hogy megértsük, milyen sűrűségek és energiaszintek mellett válik egy neutroncsillag kvarkmaggal rendelkező hibridcsillaggá, és hogy az efféle fázisátmenetek miként korlátozzák a csillag megfigyelhető tömegét.

6. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS TÁVLATI CÉLKITŰZÉSEK

Jelen publikációban röviden áttekintettük a neutroncsillagok fázisainak kapcsolatát azok maximális tömegével. Továbbá bemutattuk az extrém maganyag fázisait, illetve a maximális tömeg meghatározására tett javaslatunk fontosabb elemeit. A kutatás távlati célja, hogy elkészítsük a QGP és hadronikus fázisokat elkülönítő görbét véges hőmérsékletű Funkcionális Renormálási Csoport (FRG) módszer keretein belül is. Erre már egyéb területeken voltak próbálkozások (pl. rács QCD számítások), illetve FRG tanulmányok is születtek, azonban a véges hőmérsékletű formalizmusban található dimenziós T hőmérséklet parametrizációja további vizsgálatot igényelhet. A kutatásunk során amellett érvelünk, hogy a T dimenziós hőmérséklet helyett dimenziótlan hőmérsékletet kell állandóan tartani a Renormálási Csoport (RG) transzformációk során, így ezen módszer megtartja azon nem-triviális fixpontokat, melyek szükségesek a véges hőmérsékletű kvantumtérelméleti (QFT) modellek elemzéséhez. A fixpontok megléte kulcsfontosságú szerepet játszik a korábbiakban ismertetett fázisdiagramok ábrázolásában, és előzetes számítások alapján azt látjuk, hogy az általunk használt módszerrel megkaphatóak.

7. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] BURGIO, G. F., BALDO, M., SAHU, P. K., & SCHULZE, H.-J. Hadron-quark phase transition in dense matter and neutron stars. Phys. Rev. C 66, 025802, 2002.

[2] ANNALA, E., GORDA, T., KURKELA, A., NÄTTILÄ, J., & VUORINEN, A. Evidence for quark-matter cores in massive neutron stars. Nature Physics 16, 907–910, 2020.

[3] LARGANI, N. K. et al. Neutron stars in accreting systems – Signatures of the QCD phase transition. Astronomy & Astrophysics, 687, A245, 2024.

[4] MOST, E. R. et al. Signatures of quark-hadron phase transitions in general relativistic neutron-star mergers. arXiv:1807.03684, 2018.

A KOZMOLÓGIAI KONSTANS ELŐJELE A KORAI UNIVERZUMBAN

THE SIGN OF THE COSMOLOGICAL CONSTANT IN THE EARLY UNIVERSE

NYERGESY Eszter Napsugár[1], MÁRIÁN István Gábor[2], NÁNDORI István[3]

[1]fizikus mester szakos hallgató, enyergesy@gmail.com
Debreceni Egyetem, Természettudományi és Technológiai Kar, Fizikai Intézet

[2]PhD, tudományos munkatárs, marian.istvan.gabor@atomki.hu
HUN-REN Atomki, Elméleti Magfizikai Kutatócsoport

[3]PhD, habilitált egyetemi docens, istvan.nandori@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Fizikai Intézeti Tanszék

Kivonat: *Ebben a munkában az úgynevezett kozmológiai konstans problémával foglalkozunk. Röviden ismertetjük, hogy miért jelent problémát a kozmológiai konstans előjele, ha össze akarjuk egyeztetni az asztrofizikai megfigyeléseket a korai Univerzum leírására használt modellekkel. Majd ismertetjük a probléma megoldására tett javaslatunk fontosabb elemeit.*

Kulcsszavak: *kozmológia konstans, Univerzum, termális RG módszer, gravitációs modellek*

Abstract: *In the present paper, we deal with the so-called cosmological constant problem. We briefly explain why the sign of the cosmological constant is a problem when we try to reconcile astrophysical observations with models used to describe the early Universe. Then, we present the main elements of our proposal to solve the problem.*

Keywords: *cosmological constant, thermal RG method, gravity models*

1. BEVEZETÉS

Az Univerzumunk történetét különböző szakaszokra oszthatjuk. Az Ősrobbanást követte a Planck-korszak, melyben a négy alapvető kölcsönhatás azonos erősséggel nyilvánult meg, és különböző kvantumgravitációs elméletek (pl. húrelméletek) szolgálhatnak megfelelő leírásként. Az általunk tanulmányozott Aszimptotikusan Biztonságos (AS) kvantumgravitációs modellek egyes vélekedések szerint nem alkalmazhatóak minden fejlődési szakaszra, lehetséges, hogy magas hőmérsékleten húrelméleti modellekre kell áttérni. Bizonyos húrelméletek $\Lambda<0$ kozmológiai állandót jósolnak, viszont a jelenkori Univerzum $\Lambda>0$ értékkel bír, így azt a kérdést vizsgáltuk, hogy miként valósulhat meg ezen fázisátalakulás.

A szakirodalomban számos eljárás ismert a kozmológiai konstans előjelváltására, többek között a Λ_sCDM kozmológia tárgyalásmódjában, de a jelváltást mesterségesen vezetik be a modellekbe [1, 2]. Húrelméleti kereteken belül természetes módon negatív előjel adódik, a pozitívvá tételéhez szükséges megoldás pedig instabil világokhoz vezethet [3, 4]. További tanulmányok AS kvantumgravitációt vizsgálnak Funkcionális Renormálási Csoport (FRG) módszerrel, azonban hátrányuk, hogy kihagyják a hőmérsékletet, mely nélkülözhetetlen a korai Univerzum leírásához [5]. Kutatásunkban az előbbi problémák feloldásaként egy olyan kvantumtérelméleti (QFT) megközelítést mutatok be, melyben a különböző AS kvantumgravitációs modellek véges hőmérsékleten is értelmezve vannak, és mindegyik modellben az Univerzum hűlése természetes módon előidézi Λ előjelváltását. Az általunk módosított termális Renormálási Csoport (RG) módszer lényege, hogy a T hőmérsékleti paramétert a kompaktifikált időszerű dimenzió sugarának inverzével adjuk meg, a szakirodalomban tárgyalt téridő foliáció formalizmusához hasonlóan. Módszerünkben nem a dimenziós T paramétert tartjuk állandóan RG transzformációk során, hanem $\tau=T/k$ dimenziótlan hőmérsékletet, melynek értéke– megfelelő

kezdőfeltételnél– megszabja Λ előjelét.

2. TERMÁLIS RG MÓDSZER

A QFT formalizmusa nulla hőmérsékleten van megfogalmazva, így változtatásokat kell eszközölni, ha kvantumos és véges hőmérsékletű effektusokat is figyelembe kívánunk venni. A gyorsítókban lezajló folyamatok során korlátozott számú részecskét veszünk figyelembe, a $T=0$ kvantumtérelmélet ad rájuk megfelelő leírást, viszont a korai Univerzum, mint forró, sűrű plazma, már véges hőmérsékletű QFT-t igényel.

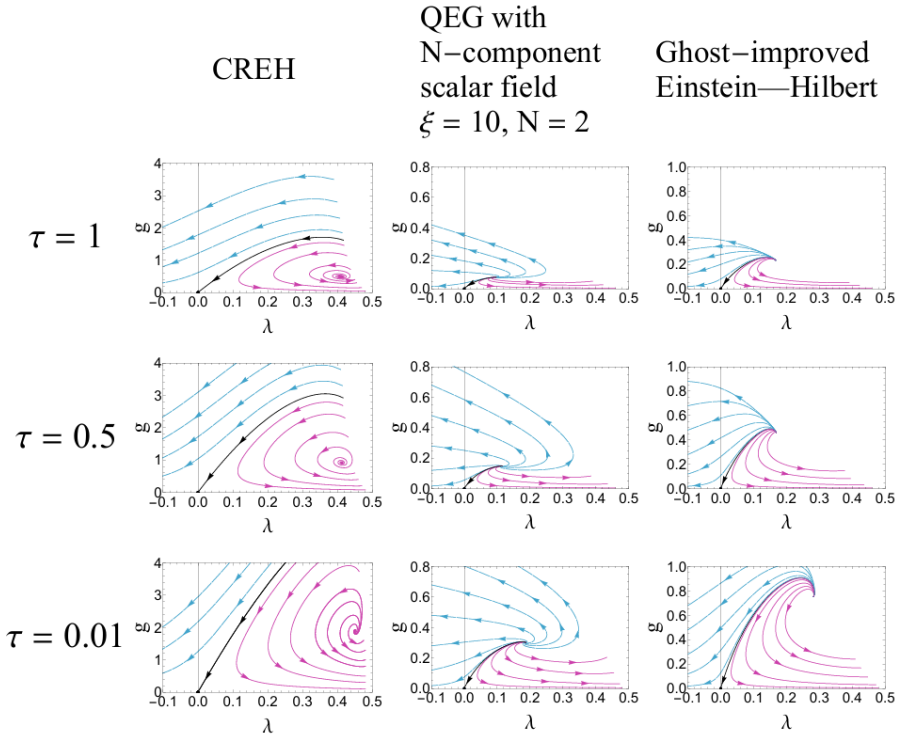
A kvantumtérelmélet véges T-re való kiterjesztésekor a szakirodalomban ismert eljárás szerint az időszerű dimenziót kompaktifikáljuk, a kapott téridő-henger sugarát pedig $R=1/T$ adja [6–8]. Ezen T parametrizációja perturbatív RG tárgyalásmódban $T=\mu/(2\pi)$ módon történik, ahol μ a perturbatív futó RG skála. Azonban ezt a formulát funkcionális RG módszerben nem alkalmazhatjuk, mert a k futó RG skálának $k\to 0$ határértékét kell vennünk, hogy az elmélet kvantálását elvégezzük. Ennélfogva indokolt lehet T-t rögzített $\boldsymbol{\Lambda}$ impulzusskálához kapcsolni $T\sim\boldsymbol{\Lambda}$ módon, viszont így az RG egyenletekben explicit k skálától való függés lép fel, emiatt ezen módszer nem reprodukálja azon nem-triviális fixpontokat, melyek szükségesek a véges hőmérsékletű QFT modellek elemzéséhez. Ezen problémákat megszűnteti, ha $T=\tau k$ megfeleltetést alkalmazzuk [9–11], ahol τ dimenziótlan hőmérsékletet állandóan tartjuk az RG transzformációk alatt. Így már csak implicit k függés marad az egyenletekben, lehetséges nem-triviális fixpontokat találni. Ezen szemléletmódban T elveszti fizikai jelentését, hiszen csak $k\to 0$ esetben társíthatunk hozzá azt, véges T-nél nem vizsgálhatjuk a rendszert. Így egyedül $\tau= T/k$ dimenziótlan hőmérséklethez kapcsolható fizikai értelmezés, τ megadásával elemezhetőek a különböző modellek véges hőmérsékleten.

3. GRAVITÁCIÓS MODELLEK VÉGES HŐMÉRSÉKLETEN

A kisméretű objektumok gravitációs kölcsönhatásának perturbatív leírásakor a G Newton-"állandó" (skála függőcsatolás) UV energiákat megközelítve divergál, ennél fogva a modell nem képes predikciókra. Funkcionális RG keretein belül azonban található olyan nem-gaussi fixpont (NGFP) – más néven Reuter-fixpont [12] –, mellyel ezen probléma megszűnik, ekkor beszélünk AS gravitációs modellről.

Korábbi kutatás során megvizsgáltuk a módosított termális Renormálási Csoportot az Einstein-Hilbert csonkolt gravitáció esetében [10,13], viszont nem volt egyértelmű, hogy a megállapítások minden gravitációs modellre érvényesek vagy csonkolás specifikusak. Ezen kutatás folytatásaként a Konform Redukált Einstein Hilbert (CREH) csonkolt gravitációt [14], a Ghost-improved Einstein-Hilbert gravitációt [15], illetve a gravitáció N-komponensű skalármezőhöz csatolt verzióját [16] is vizsgáljuk véges hőmérsékletű esetben.

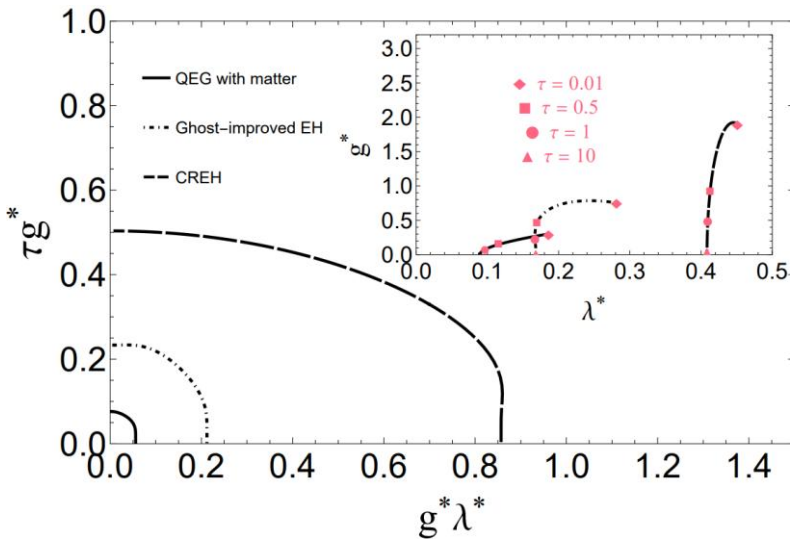
Mind három modellnek jól ismertek a $T=0$ β-függvényei – melyek küszöb függvényekkel vannak megadva – és ezeket megoldva a skála függő csatolások flow diagramjai feltérképezhetőek. A küszöb függvények véges hőmérsékletre általánosított alakját $\int d^d p/(2\pi)^d \to T\sum_m \int d^{d-1}p/(2\pi)^{d-1}$ módosítással kaptuk, ahol az egyik impulzus integrált az $m \in \mathbb{Z}$ feletti Matsubara szumma cseréli le. Ennek következtében az impulzus nulladik komponensét $\omega_m = 2\pi m T$ Matsubara frekvenciák váltják fel $p^2 \to p^2 + \omega_m^2$ módon. Az általunk bevezetett $T=\tau k$ hőmérsékleti relációt behelyettesítve már mind három modell elemezhető véges hőmérsékleten is. A dimenziótlan csatolások ($g_k = k^2 G_k$ Newton-állandó, $\lambda_k = k^{-2}\Lambda_k$ kozmológiai konstans) véges hőmérsékletű flow diagramjai az 1. ábrán láthatóak.



1. ábra: *Vizsgált modellek flow diagramjai véges hőmérsékleteken. A kék trajektóriák jelzik a $\lambda<0$ fázishoz tartozó régiókat, míg a rózsaszínűek a $\lambda>0$ fázishoz tartozó régiókat.*

Mindhárom gravitációs modellben azt találtuk, hogy a Reuter-fixpont g komponense (g^*) a hőmérséklet emelkedésével – azaz $\tau\to 0$ esetén – eltűnik. Továbbá a szeparátrix (fázisokat elválasztó fekete trajektória) meredeksége minden esetben a τ növekedésével csökken, és a $\tau\to\infty$ határértéknél csak a $\lambda<0$ fázis marad fenn. Ez az eredmény azt mutatja, hogy az AS kvantumgravitáció természetes módon negatív kozmológiai állandót jósol magas hőmérsékletek esetén.

A korai (magas hőmérsékletű) Univerzumban $\lambda<0$ fázisból (g, λ) kezdőpontot kiválasztva az Univerzum hűlése a rendszert $\lambda>0$ fázisba hajtja, mely összhangban van a jelenlegi megfigyelésekkel. Ezen fázisátalakulást legjobban a kvantumos (QPT), illetve a klasszi- kus/hőmérsékleti (CPT) fázisátalakulásokat összevető QPT-CPT diagramon lehet szemléltetni. A rendszer egy QPT-n eshet át rögzített hőmérsékleten, vagy CPT jöhet létre fix kvantumos paraméteren. Kvantumos paraméternek mindhárom modellnél a Reuter fixpont koordinátáinak szorzatát választottuk (g^*, λ^*), hőmérsékleti paraméternek pedig τg^* bizonyult megfelelő opciónak, ugyanis $\tau\to\infty$ esetén $g^*\to 0$ teljesül, szorzatunk pedig véges értékhez tart eltűnő kvantum paraméternél. Mindhárom vizsgált modellre az elvárt alakú QPT-CPT diagramot kaptuk, melyek a 2. ábrán láthatóak.



2. ábra: *A három különböző AS gravitációs modell QPT–CPT diagramja a dimenzió nélküli hőmérséklet τ, és a Reuter-féle fixpont g-koordinátája szerint. Minden modell esetén a fekete kritikus vonalak alatti régiók jelzik a λ >0, felettük pedig a λ <0 fázisokat. A betétábra azt mutatja, hogyan változik a Reuter-féle fixpont helye (g*, λ*), ha τ hőmérsékletet növeljük.*

4. KAPCSOLAT RÉTEGES TÉRIDŐKKEL

Az általunk alkalmazott termális RG módszer számos formális hasonlóságot mutat a szakirodalomban Arnowitt-Deser-Misner (ADM) formalizmusban [17,18] tárgyalt réteges téridőket megvalósító RG módszerekkel. Az RG-egyenletek azon megfogalmazását, amelyben a gravitációs szabadsági fokokat az ADM-mezők hordozzák, [19,20] munkákban dolgozták ki. Megmutatták, hogy a β-függvények paraméteresen függenek a dimenzió nélküli m Matsubara (vagy Kaluza-Klein) tömegtől, amely az időirány R méretével arányos $m= 2\pi/(Rk)$ módon. Ha a Matsubara formalizmust alkalmazzuk, akkor $m=2\pi T/k$ adódik, tehát a dimenziós hőmérséklet alakja $T=mk/(2\pi)$. Ezt összevetve $T=\tau k$ relációnkkal, látható, hogy dimenziótlan hőmérséklet ugyanazt a szerepet tölti be, mint az m Matsubara tömeg. A [20] munka 2. ábrája szintén összhangban van ezzel a megfigyeléssel, hiszen az NGFP helyzete hasonlóan függ m-től, mint ahogy azt a 2. ábrán szemléltettük. Továbbá, az említett cikkben $\beta_m(g, \lambda, m) = 0$ közelítésként van értelmezve, illetve [21] hivatkozásban mind az állandó, mind a futó m-et vizsgálták Hořava-Lifshitz-gravitáció tekintetében. Ez a megközelítés megfelelő lehet réteges téridők esetében, azonban a véges hőmérsékletű formalizmusnál amellett érvelünk, hogy m-nek, azaz τ-nak állandónak kell maradnia RG transzformációk során. Ily módon a hőmérsékleti fluktuációk a kvantumfluktuációkhoz hasonló módon integrálódnak ki, ami lehetővé teszi a QFT-modellek QPT-CPT diagramjainak ábrázolását, hiszen így véges hőmérsékleten is megmaradnak a valódi nem-triviális fixpontok.

5. EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A jelen dolgozat legfontosabb eredménye, hogy ha a véges hőmérsékletű AS gravitációs modellek megfelelő elméleti keretet adnak a korai és a késői Univerzum kozmológiáinak összekapcsolásához, akkor kozmológiai konstansnak negatívnak kell lennie a korai Univerzumban, és pozitívnak a jelenlegiben. Ez utóbbi összhangban van azon megfigyeléssel, miszerint az Univerzum gyorsulva tágul, előbbi állítás pedig kísérleti megerősítésre vár. Függetlenül attól, hogy a jövőbeli vizsgálatok a korai Univerzum negatív kozmológiai állandóját igazolják-e,

vagy sem, eredményünk fontos alkalmazást nyer olyan húrelméletekben, amelyek természetes módon negatív értékű kozmológiai állandót eredményeznek.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A Kulturális és Innovációs Minisztérium EKÖP-25-2 kódszámú egyetemi kutatói ösztöndíj programjának a nemzeti kutatási, fejlesztési és innovációs alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

7. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] AKARSU O., KUMAR S., OZULKER E., VAZQUEZ J. A.: *Relaxing cosmological tensions with a sign switching cosmological constant*, Phys. Rev. D 104, 123512, 2021.

[2] AKARSU O., KUMAR S., OZULKER E., VAZQUEZ J. A., YADAV A.: *Relaxing cosmological tensions with a sign switching cosmological constant: Improved results with Planck, BAO, and Pantheon data*, Phys. Rev. D 108, 023513, 2023.

[3] KACHRU S., KALLOSH R., LINDE A., TRIVEDI S. P.: *de Sitter Vacua in String Theory,* Phys. Rev. D 68, 046005, 2003.

[4] HERTOG, T., HOROWITZ, G. T., MAEDA, K.: *Negative Energy Density in Calabi-Yau Compactifications,* JHEP 0305, 060, 2003.

[5] DE ALWIS, S., EICHHORN, A., HELD, A., PAWLOWSKI, J. M., SCHIFFER, M., VERSTEEGEN, F.: *Asymptotic safety, string theory and the weak gravity conjecture*, Phys. Lett. B 798, 134991, 2019.

[6] NEGELE, J. W., ORLAND, H.: *Quantum many-particle systems*, Perseus Books, Reading, 1998.

[7] SACHDEV, S.: *Quantum phase transitions*, Cambridge University Press, Cambridge, 2011.

[8] KAPUSTA, J. I.: *Finite-temperature field theory: principles and applications*, Cambridge University Press, Cambridge, 2023.

[9] MÁRIÁN, I. G., TROMBETTONI, A., NÁNDORI, I.: *Time Evolution and Thermal Renormalization Group Flow in Cosmology*, Phys. Lett. B 858, 139051, 2024.

[10] NYERGESY, E., MÁRIÁN, I. G., MESKHI, E., TUROVTSI-SHIUTEV, Y., NÁNDORI, I.: *Thermal RG Flow of AS Quantum Gravity*, Phys. Lett. B 864, 139440, 2025.

[11] MÁRIÁN, I. G., TROMBETTONI, A., NÁNDORI, I.: *Thermal and Quantum Phase Transitions of the ϕ^4 Model*, Phys. Rev. D 112, 085011, 2025.

[12] [REUTER, M.: *Nonperturbative evolution equation for quantum gravity*, Phys. Rev. D 57, 971, 1998.

[13] REUTER, M., SAUERESSIG, F.: *Renormalization group flow of quantum gravity in the Einstein-Hilbert truncation,* Phys. Rev. D 65, 065016, 2002.

[14] REUTER, M., WEYER, H.: *Background independence and asymptotic safety in conformally reduced gravity,* Phys. Rev. D 79, 105005, 2009.

[15] GROH, K., SAUERESSIG, F.: *Ghost wavefunction renormalization in asymptotically safe quantum gravity,* J. Phys. A 43, 365403, 2010.

[16] GRANDA, L. N.: *Nonperturbative renormalization group for Einstein gravity with matter,* Europhys. Lett. 42, 487–492, 1998.

[17] ARNOWITT, R. L., DESER, S., MISNER, C. W.: *Dynamical Structure and Definition of Energy in General Relativity,* Phys. Rev. 116, 1322, 1959.

[18] ARNOWITT, R. L., DESER, S., MISNER, C. W.*: Republication of: The dynamics of general relativity*, Gen. Rel. Grav. 40, 1997, 2008.

[19] MANRIQUE, E., RECHENBERGER, S., SAUERESSIG, F.: *Asymptotically Safe Lorentzian Gravity,* Phys. Rev. Lett. 106, 251302, 2011.
[20] RECHENBERGER, S., SAUERESSIG, F.: *A functional renormalization group equation for foliated spacetimes,* JHEP 03, 10, 2013.
[21] CONTILLO, A., RECHENBERGER, S., SAUERESSIG, F.: *Renormalization group flow of Hořava-Lifshitz gravity at low energies,* JHEP 12, 017, 2013.

TÁVOLI FÖLDRENGÉSEK HATÁSA A MISKOLCI EGYETEM A2 ÉPÜLETÉNEK REZGÉSEIRE

THE EFFECT OF DISTANT EARTHQUAKES ON THE VIBRATIONS OF BUILDING A2 AT THE UNIVERSITY OF MISKOLC

BÉRES Miklós[1], JENYÓ Tamás[2], PARIPÁS Béla[3]

[1]PhD, adjunktus, miklos.beres@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Fizikai Intézeti Tanszék

[2]tanszéki mérnök, tamas.jenyo@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Fizikai Intézeti Tanszék

[3]PhD, professzor emeritus, bela.paripas@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Fizikai Intézeti Tanszék

Kivonat: *A mennyezethez rögzített LDV (Laser Doppler Vibrometer) interferométerrel mértük a Miskolci Egyetem A/2 épületének keresztirányú rezgéseit. Az épület 2,8Hz körüli rezgéseit jól le tudtuk választani a mérőeszközt tartó inga 1Hz alatti saját rezgéseiről. Az épület emberi tevékenységgel szoros kapcsolatban lévő rezgései között kiugró értékek is előfordulnak, amelyeket távoli földrengések okoztak. A detektált ilyen események közül kettőt (Csongrád, 2025.10.22. és Kamcsatka 2025.07.30.) részletesen is bemutatunk a cikkben.*

Kulcsszavak: *interferencia, lézer Doppler rezgésmérés, LDV, épület rezgések, földrengés*

Abstract: *The transversal vibrations of building A2 at the University of Miskolc were measured by the LDV (Laser Doppler Vibrometer) device suspended from the ceiling. We could separate well the vibrations of the building at about 2.8Hz and the vibrations of the pendulum holding the device below 1Hz. Among the building vibrations caused by human activity occur higher spikes caused by distant earthquakes. In the paper, we show two of these detected events in detail (Csongrád, 2025.10.22. and Kamcsatka 2025.07.30.)*

Keywords: *interference, laser Doppler vibrometry, LDV, building vibrations, earthquake*

1. BEVEZETÉS

A lézerinterferometrikus módszereket már közel fél évszázada használjuk precíz, igen nagy pontosságú érintkezésmentes rezgésmérésre. Ezek közül is kiemelkedik az LDV módszer (Laser Doppler Vibrometer), amely a Doppler-elv segítségével igen nagy pontossággal és gyakorisággal végez sebességmérést. Ezt a módszert az élet igen sok területén sikerrel alkalmazzák [1], [2]. Mi az utóbbi időben ezzel a módszerrel a Miskolci Egyetem tanulmányi épületeinek rezgését tanulmányoztuk, legtöbb alkalommal a Fizikai Tanszék lézer laboratóriuma falának a keresztirányú rezgéseit [3], [4]. Az épületek szubmikronos rezgései jól illeszkednek az LDV mérési tartományához. A kutatás során a laboratóriumon belüli LDV műszerrel a lézerfényt visszaverő falfelület relatív sebességét mértük. Korábbi kísérleteinkben az LDV eszközt rezgésmentes asztalokra helyeztük és a mért relatív mozgást a falak talajhoz képesti mozgásának tekintettük. Később azonban beigazolódott [5], [6], hogy ezek az asztalok csak nagyobb frekvenciákon (f>20Hz) tekinthetők rezgésmentesnek. Kis frekvenciákon (f<4Hz) nagyjából követik a helyiség (tehát az egész épület) rezgéseit, így a mért relatív mozgás kisebb a falak tényleges mozgásánál. A rezonancia frekvenciájuk környezetében (5-8Hz) viszont még erősítik is a környezetük rezgéseit, tehát itt az LDV eszköz a tényleges falrezgésnél nagyobb értéket mér. A tényleges falrezgési spektrumok származtatásához így mindkét esetben nagyobb korrekciók

szükségesek, amelyek a mérési hibák jelentős megnövekedését okozhatják. Ugyanakkor a nagyfrekvenciás oldalon, eltávolodva a rezonancia görbétől ezek a korrekciók csak minimálisak, hibát alig okoznak.

A korábbi méréseink azt mutatták, hogy az épületelemek rezgési frekvenciái az asztalok rezonancia frekvenciái közelében vagy afölött vannak, de az épületnek, mint egésznek, ennél kisebbek (f<4Hz). Ez utóbbi tartományt a rezgésmentes asztalokra helyezett LDV eszköz nagyon „aláméri", ami a mérési érzékenység csökkenését, a mérési hibák növekedését okozza. Az épületrezgések mérésére ezért más LDV rögzítést kellett keresnünk. Olyat, amelynek rezonancia csúcsa mélyen a domináns épületrezgési frekvenciák alatt van, lehetőleg 1Hz alatt. Ez legegyszerűbben az LDV eszköz felfüggesztésével oldható meg (1. ábra). A felfüggesztéshez legalább két huzalt kell használni, hogy a lézerfény a mérés során végig ugyanarra a pontra essen.

2. MÉRÉS A FELFÜGGESZTETT LDV ESZKÖZZEL

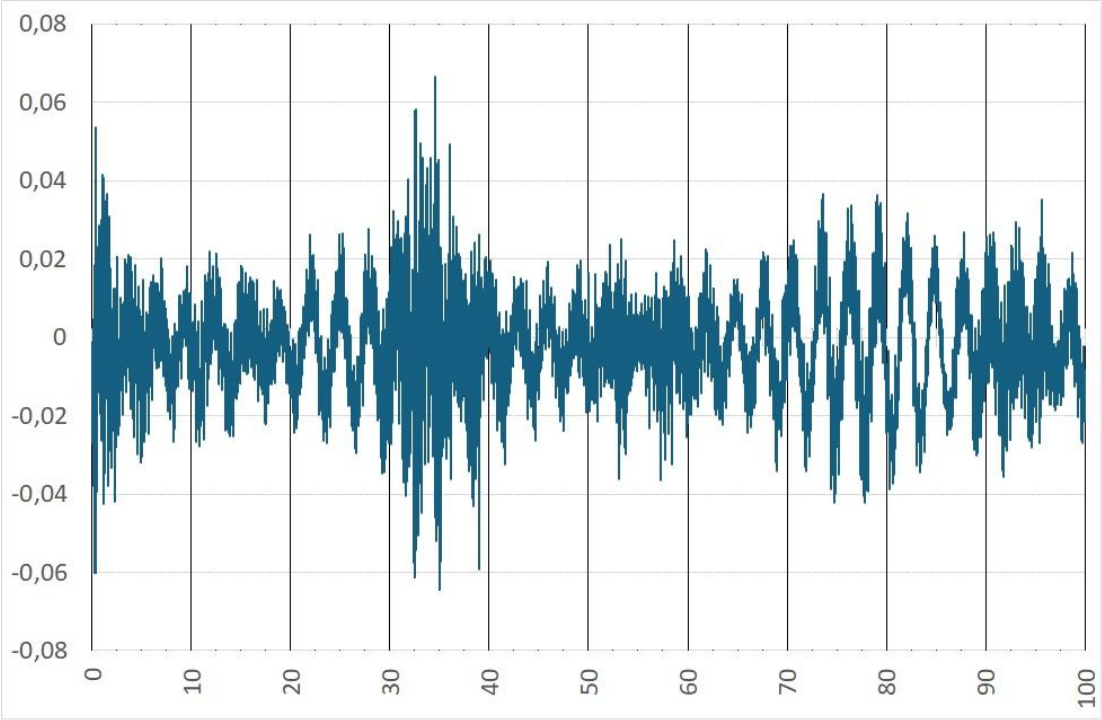
1. ábra: *A mennyezetre függesztett LDV eszköz mérés közben*

Ismert, hogy a matematikai inga frekvenciája

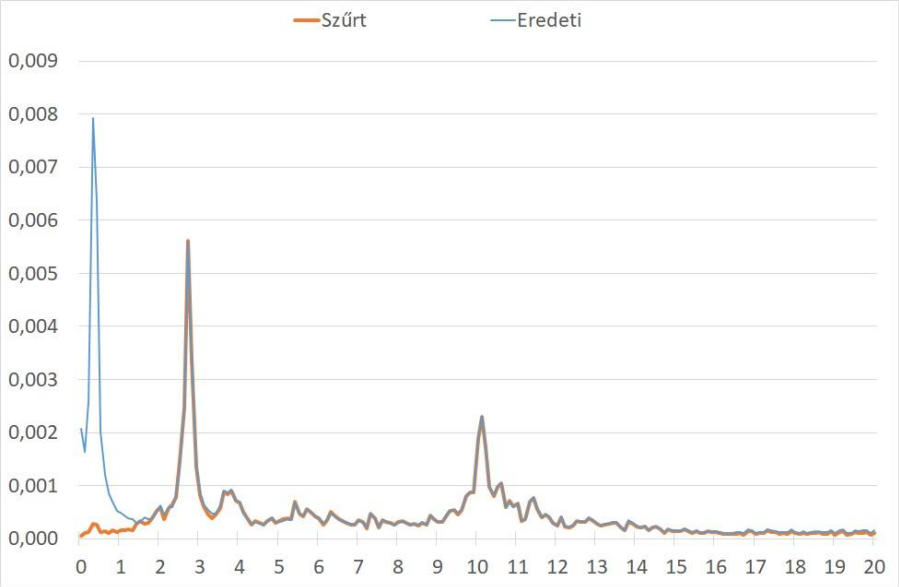
$$f = \sqrt{\frac{g}{l}}/2\pi$$

ami *l*=2m esetében csak *f*=0,35Hz lengési frekvenciát ad. Ez egy tökéletes érték, viszont a felfüggesztés igen kis csillapítást jelent, ami (az épület rezgéséhez képest) igen nagy lengési

amplitúdóra vezethet. Az eddigi mérési eredményeink azt mutatják (2. ábra), hogy az inga valóban szinte mindig lengésben van - még lezárt, emberi aktivitástól mentes szobában is. Ez a lengés a kéthuzalos felfüggesztés miatt elég bonyolult lehet, a mérés ennek a lézersugár irányú komponensét mutatja. Ennek az amplitúdója általában néhány µm, ami szabad szemmel még láthatatlan. Viszont az erre szuperponálódó épületrezgések amplitúdóját általában meghaladja.



2. ábra: *Egy véletlenszerűen kiválasztott 100s-os időspektrum. A függőleges tengelyen a sebességet mm/s egységben mértük*

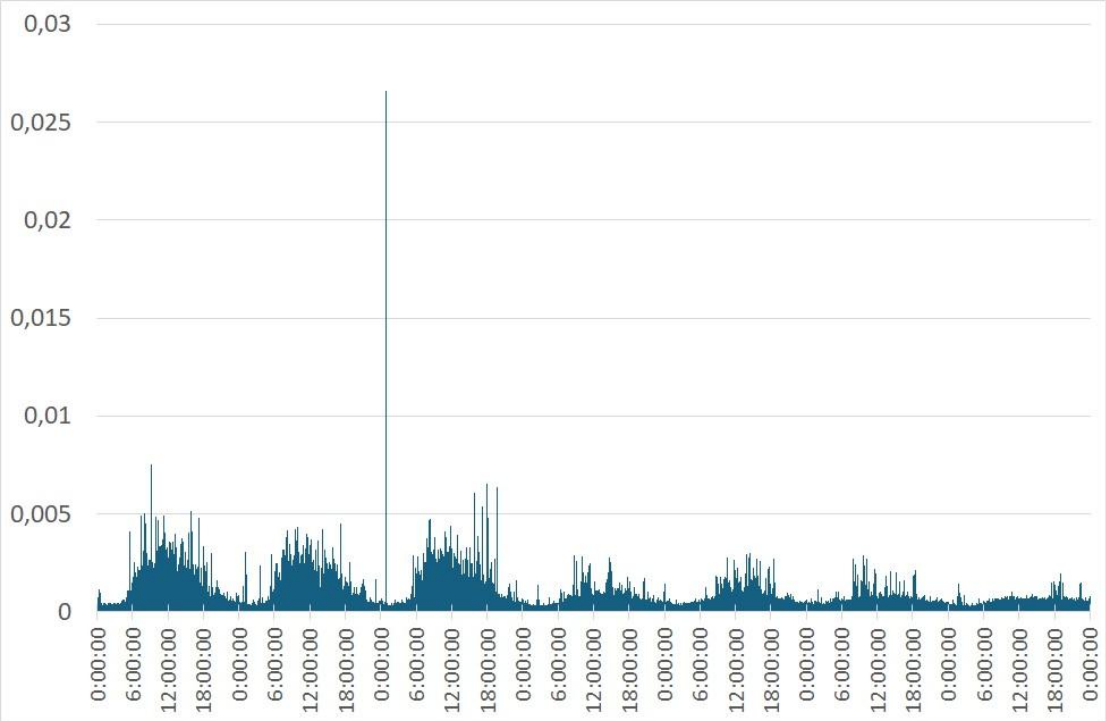


3. ábra: *A fenti időspektrumból származtatott FFT spektrumok eredeti (szűretlen) és szűrt adatokból.*

Szerencsére ezek az 1Hz alatti rezgések a szokásos módon szoftveresen szinte teljesen kiszűrhetők a spektrumokból (3. ábra), így a felfüggesztett LDV eszköz lengése nem okoz kezelhetetlen problémát [6]. A 3. ábrán szereplő frekvencia spektrumokat (sebességamplitúdó a frekvencia függvényében) gyors Fourier-analízissel (FFT) hoztuk létre, a szűrt adatok esetében a 0-1Hz tartományt szűrtük ki. Megjegyezzük, hogy az itt nem ábrázolt 20Hz fölötti tartományban is voltak csúcsok, amelyek távoli laboratóriumokban bekapcsolt műszerektől, gépezetektől származtak. A szűrt FFT spektrumban látható csúcsokat már korábbi cikkeinkben [4,5] is azonosítottuk: az épület fő rezgési módusa (2,7Hz), mellékmódusa (3,6Hz), egy épületelem (folyosó, lépcső) rezgése (10Hz). A szűretlen FFT spektrumban ezeken kívül jól látható (sőt domináns) az inga lengéséhez tartozó csúcs (0,35Hz).

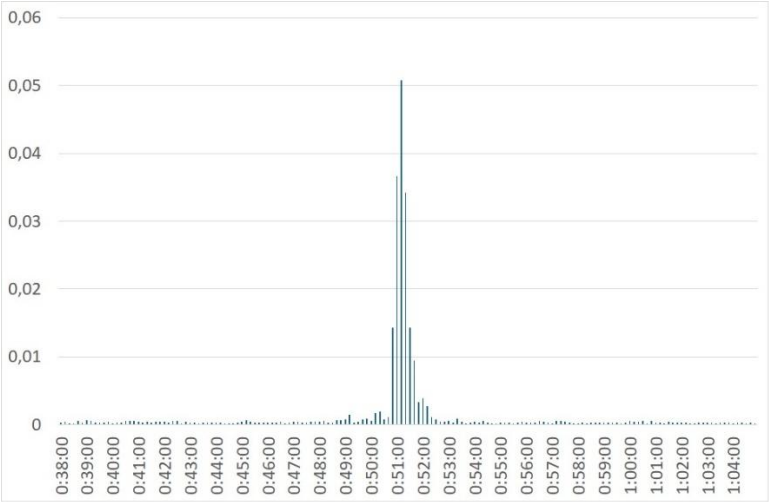
3. FÖLDRENGÉSEK DETEKTÁLÁSA AZ LDV ESZKÖZZEL

3.1. A 2025. október 22-i csongrádi földrengés



4. ábra: *Az egyperces mérésekből kapott szűrt frekvencia spektrumok maximális amplitúdói a folyó év 43. hetében (2025. október 20-26.)*

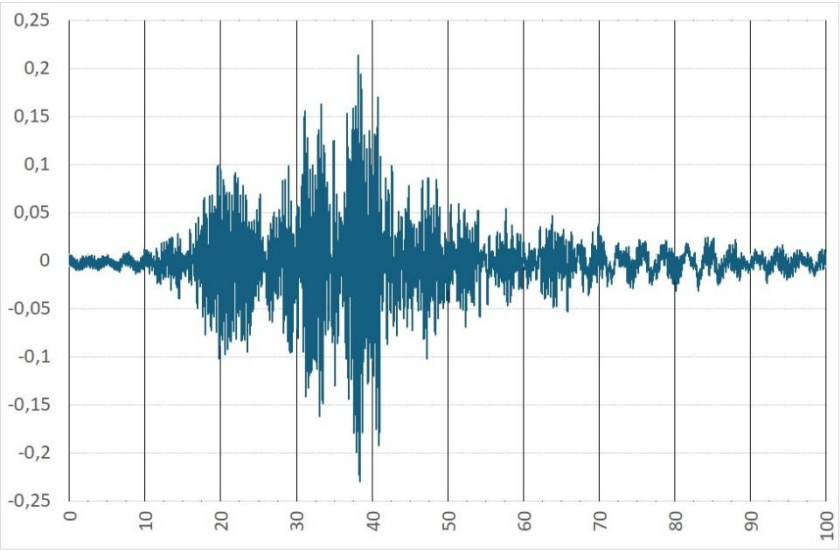
A 4. ábrán a folyó év 43. hetében (2025. október 20-26.) mért egyperces sebesség-idő grafikonokból nyert (FFT) szűrt frekvencia spektrumok maximális amplitúdóit ábrázoltuk. Az ezekhez tartozó frekvencia érték az esetek 90%-ában 2,7-2,9Hz volt (az egész épület rezgése), a többi esetben 7-8Hz (egyes épületelemek rezgése). A maximális amplitúdóknak a napi menete jól egyezett a korábban rezgésmentes asztalon mérttel [4]. Nappal most is sokkal nagyobbak voltak az amplitúdók, mint éjszaka. Csütörtök-péntek már tanítási szünet volt, akkor és a hétvégén kevésbé rezgett az épület. A tanítási napi maximális amplitúdók 5-6μm/s körül voltak, a tanításmentes napokon ennek kb. a felét mértük. Az adatok megerősítik azt a korábbi állításunkat, hogy ezeket a rezgéseket főleg az épületben lévők fizikai aktivitása okozza. Nagyobb embertömeg mozgása nagyobb rezgési amplitúdóra vezet.



5. ábra: *Az éjszakai csúcs 10s-os mérésekből kapott szűrt frekvencia spektrumainak maximális amplitúdói*

A 4. ábrán azonban mást is látunk. Van egy nagyon kiugró adat a szerdára virradó éjszakán, aminek az oka nyilvánvalóan nem az emberi aktivitásban keresendő. Ezt a csúcsot finomabb időosztással (10s) széthúzva az 5. ábrán tanulmányozhatjuk. Az ábrán jól látható, hogy nem egyetlen kiugró pontról van szó, hanem egy néhány perces jelenségről. Ennek során a sebesség amplitúdó az éjszakai nyugalmat jelentő 1µm/s értékről fokozatosan 50µm/s fölé emelkedik, majd visszatér az eredeti értékre. Mindeközben a domináns frekvencia végig 2,7Hz maradt. Megjegyezzük, hogy a 4. ábrán ennél kisebb sebesség amplitúdó látható (27µm/s), mert az egy egyperces átlag.

A rezgést kiváltó okot nem kellett sokáig keresni, hisz a média is beszámolt róla. Csongrád és Kiskunfélegyháza között 2025. október 22-én 0 óra 50 perc 16 s-kor (magyar idő szerint) egy földrengés pattant ki, amely erősségét utólag 4,1 magnitúdóra becsülték [7]. Ez a földrengéshullám először kb. 30s múlva érkezett meg Miskolcra és okozott gyenge rezgéseket, majd újabb 20s múlva erősebb rezgéseket. Figyelembe véve a hullámok által megtett kb. 170km távolságot, ez az első hullámokra (p hullámok) 5,6km/s, az erősebb

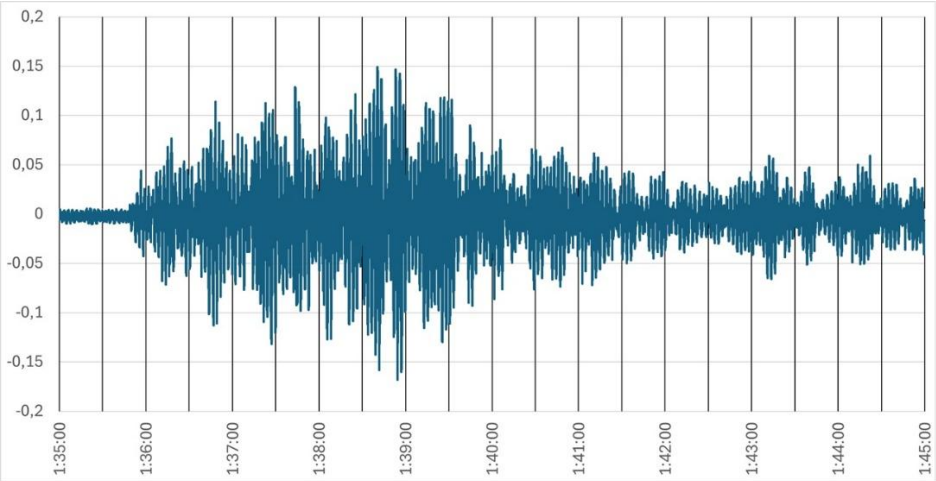


6. ábra: *A csongrádi földrengés hatására bekövetkezett épületrezgés 100s-os időspektruma. Az időtengely 0 értéke 2025. október 22-én 0 óra 50 perc 20s.*

hullámokra (s hullámok) 3,4km/s terjedési sebességet jelent, ami teljesen reális [8]. A földrengés hatására bekövetkezett épületrezgés időspektruma (6. ábra) is megerősíti a fenti állításokat. Ennek FFT spektruma sem mutat semmi izgalmasat (9. ábra), szűrés nélkül is végig dominál a 2,7-2,8Hz-es csúcs. Azaz a fölrengés hatására az inga alig jött lengésbe.

3.2. A 2025. július 30-i kamcsatkai földrengés

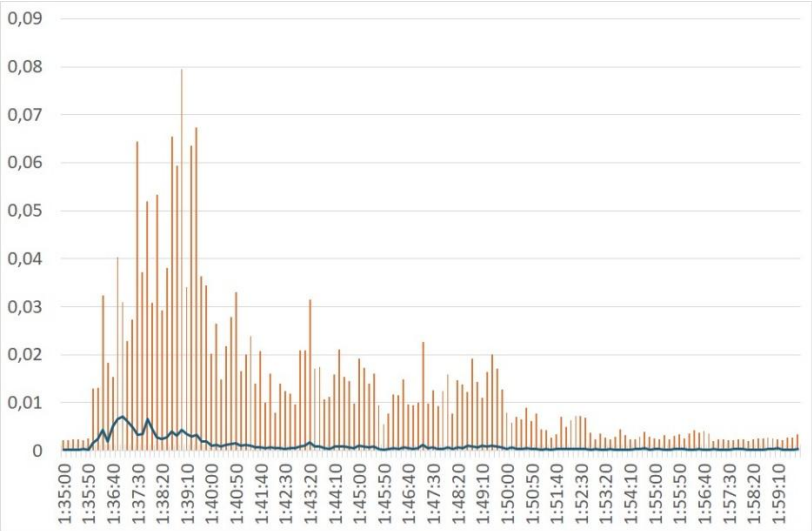
Egészen más képet mutat egy nagyon távoli földrengés épületrezgésre gyakorolt hatása. Pár hónappal korábban zajlott le a Kamcsatka-i földrengés, ami magyar idő szerint 2025.07.30-án 1óra 24perc 51.4s időpontban indult [9]. Ez az elhíresült 2011-es Japán földrengés óta a legerősebb földrengés volt a világon, erősségét 8,8 magnitúdóra becsülték. A nagyon nagy távolság ellenére is volt esélyünk a megfigyelésére, mert ez a földrengés is éjszaka volt (magyar idő szerint), így az épületünkre gyakorolt hatása nem keveredett a nappali emberi tevékenységek hatásaival. Az adataink között meg is találtuk ennek a földrengésnek a hatását is, a 0. ábra mutatja ennek időspektrumát. Látható, hogy az első épületrezgések kb. 11 perccel a földrengés kipattanása után kezdődtek. A két pont közötti kb. 8200 km-es távolságot (a Föld felületén mérve) ennyi idő alatt nem tehetik meg még a p hullámok sem, ezért az első hullámok mindenképpen a Föld belsején át érkeztek. A Föld belsejében haladó hullámok sokkal gyorsabbak (>10km/s) [8], kisebb a megteendő távolság is (7600km), így a 11 perces utazási idejük teljesen reális.



7. ábra: *A kamcsatkai földrengés hatására bekövetkezett épületrezgés 10 perces időspektruma.*

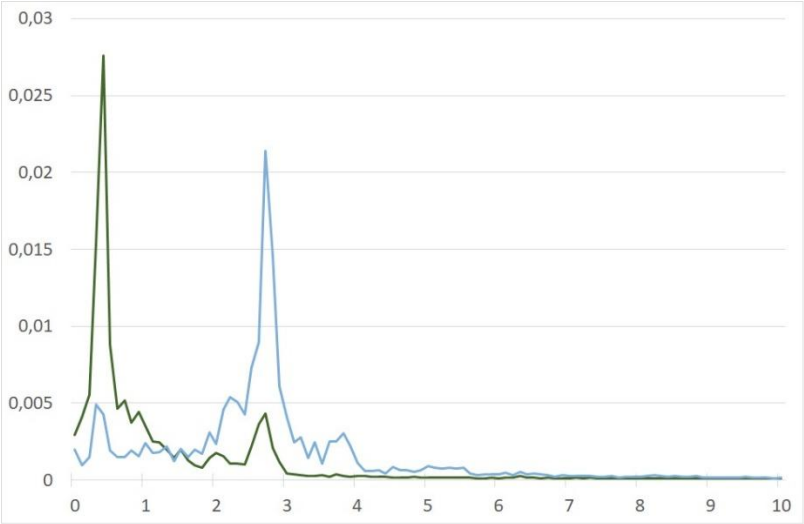
Ezen földrengés esetében az épületrezgés (egészen pontosan az LDV jel) sokkal lassabban csillapodott, mint a csongrádi rezgés esetében. A 0. ábrán az első 10 percet ábrázoltuk, de a rezgések ezután is folytatódtak. Az ábrán komolyabb analízis nélkül is jól látható, hogy – különösen a 2. felében – domináns a kb. 3s-os ingalengés. Tehát valójában nem az épületrezgés csillapodott lassan, hanem a kialakult ingalengés. Ezt a 0. ábra egzakt módon is mutatja. Ezen a 10 másodperces időspektrumokból nyert FFT spektrumok domináns csúcsainak amplitúdóit ábrázoltuk valamivel hosszabb ideig. Az eredeti spektrumot mindig a 0,3Hz-es ingalengés, a szűrt spektrumot pedig a 2,7Hz-es épületrezgés dominálja. Látható, hogy az ingalengés amplitúdója a vizsgált szakaszban végig sokkal nagyobb volt, és csak kb. 20 perc után tért vissza az éjszaka szokásos értékekre. Az épület rezgés amplitúdója azonban csak a hullámok megérkezése utáni néhány percben ugrott ki az éjszakai adatok közül. Ennek maximuma, a 8μm/s nappal

is magasnak számít, de nem kiugróan magasnak. Ekkora rezgést emberi tevékenységek is kiváltanak néha. A csongrádi földrengés által kiváltott épületrezgés maximuma (52µm/s) viszont nappal is nagyon kiugró érték lenne, ekkora épületrezgést emberi tevékenység a méréseink alatt még nem váltott ki.



8. ábra: *A kamcsatkai földrengés időspektrumaiból nyert FFT spektrumok domináns csúcsainak amplitúdóira vett időfüggés: az eredeti spektrumot domináló 0,3Hz-es ingalengés (sárga) és a szűrt spektrumot domináló 2,7Hz-es (kék) épületrezgés.*

4. A KÉT FÖLDRENGÉS HATÁSÁNAK ÖSSZEHASONLÍTÁSA, KÖVETKEZTETÉSEK



9. ábra: *A csongrádi (kék) és a kamcsatkai (zöld) földrengés által okozott épületrezgések időspektrumaiból nyert szűretlen FFT spektrumok.*

A két földrengés által kiváltott épületrezgések legjellemzőbb különbségét jól mutatja a 0. ábra. Az ábrán a rezgések első 110 másodpercének (a csongrádi esetében ebbe a teljes rezgés belefér) szűretlen FFT spektrumait hasonlítjuk össze. Látható, hogy a csongrádi inkább valódi épületrezgést, a kamcsatkai inkább csak ingalengést okozott. Ennek az oka lehet az eltérő irány is: a csongrádi rengés hullámai dél felől érkeztek, az épületet éppen keresztirányban érték el.

Kamcsatka viszont keletre, az épület tengelyének az irányában van. Az ebből az irányból érkező hullámok talán kevéssé tudták az épületet keresztirányban megrezgetni, viszont az épület hosszirányú rezgéseire az LDV műszerünk érzéketlen. A kéthuzalos ingánk talán így is lengésbe hozható, és ennek a lengésnek lesznek keresztirányú komponensei is. Másrészt az is igaz, hogy a kamcsatkai földrengés hullámai igen távolról jöttek és nem a felületen, hanem a Föld belsején keresztül érkeztek. Hogy az iránynak vagy a távolságnak van nagyobb jelentősége, azt még nem tudjuk. Ennek tisztázásában irodalmi adatok [10] és további mérések is segíthetnek. Ezek a mérések folyamatosan zajlanak és máris több földrengés adatai várnak feldolgozásra.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] BIRCHENOUGH, A., WYATT, S. J. F.: *Vibration measurement using a frequency biased laser velocity meter,* OPTICS AND LASER TECHNOLOGY, 11(3), p. 152-155. 1979.

[2] TOMASINI, E. P., CASTELLINI, P.: *Laser Doppler Vibrometry A Multimedia Guide to Its Features and Usage*, Springer, Belin, Germany 2020.

[3] BÉRES, M., JENYÓ, T., PARIPÁS, B.: *Épületrezgések lézerinterferometrikus mérése rezgésmentes asztalról.* MULTIDISZCIPLINÁRIS TUDOMÁNYOK: A MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYE, 12(2), 287–294. 2022.

[4] BÉRES, M., JENYÓ, T., PARIPÁS, B.: *A Miskolci Egyetem A/2 épülete LDV módszerrel mért rezgéseinek időbeli változásai,* MULTIDISZCIPLINÁRIS TUDOMÁNYOK: A MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYE 13(1), 197-205. 2023.

[5] BÉRES, M., JENYÓ, T., PARIPÁS, B.: *[4] A Miskolci Egyetemi hosszú tanulmányi épület (A/2-A/1-A/3) rezgési frekvenciáinak mérése LDV módszerrel.* MULTIDISZCIPLINÁRIS TUDOMÁNYOK: A MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYE, 14(1), 11-19. 2024.

[6] BÉRES, M., PSZOTA, G., JENYÓ, T., PARIPÁS, B.: *Laser Interferometric Measurement of Building Vibrations from Indoor Anti-vibration Tables*, POLLACK PERIODICA, *közlés alatt,* 2025

[7] https://www.emsc-csem.org/Earthquake_information/earthquake.php?id=1884575

[8] https://hu.wikipedia.org/wiki/F%C3%B6ldreng%C3%A9s

[9] https://www.emsc-csem.org/Earthquake_information/earthquake.php?id=1838723

[10] RICCIO, G., COGLIANO, R., DI GUILIO, G., *etal: A study of building vibrations induced by weak motions: effect of earthquake excitations, ambient noise and wind speed,* ANNALS OF GEOPHYSICS, 60(4), S0446, 2017.

A MÁGNESES NANORÉSZECSKE-HIPERTERMIA TÉRBELI LOKALIZÁCIÓJÁNAK MÉRÉSE MERŐLEGES AC ÉS DC TEREK KOMBINÁCIÓJÁVAL

MEASURING THE SPATIAL LOCALIZATION OF MAGNETIC NANOPARTICLE HYPERTHERMIA USING A COMBINATION OF PERPENDICULAR AC AND DC FIELDS

BÉRES Miklós[1], KORÓZS József[2], ISZÁLY Zsófia[3], MÁRIÁN István Gábor[4], NÁNDORI István[5]

[1]PhD, mérnöktanár, miklos.beres@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Fizikai Intézeti Tanszék

[2]egyetemi tanársegéd, jozsef.korozs@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Fizikai Intézeti Tanszék

[3]PhD, tudományos munkatárs, iszaly.zsofia@atomki.hu
HUN-REN Atomki, Kísérleti Magfizikai Kutatócsoport

[4]PhD, tudományos munkatárs, marian.istvan.gabor@atomki.hu
HUN-REN Atomki, Elméleti Magfizikai Kutatócsoport

[5]PhD, habilitált egyetemi docens, istvan.nandori@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Fizikai Intézeti Tanszék

Kivonat: *Ebben a munkában javaslatot teszünk olyan mérőrendszerre és kísérleti módszertanra, melynek célja, hogy új irányt nyisson a mágneses nanorészecske- hipertermiában azáltal, hogy közvetlenül vizsgálja a térbeli lokalizációs hatásokat, amelyek merőleges AC és DC mágneses mezők kölcsönhatásából erednek. A pontos mezőkontroll, a nagyfelbontású hőtérképezés és az elméleti modellezés kombinációja lehetővé teszi a lokális energiadisszipáció térbeli szabályozásának megértését. A megszerzett ismeretek hozzájárulhatnak a célzott, nem invazív hipertermia fejlesztéséhez, amely milliméter alatti térbeli pontossággal alkalmazható daganatterápiás célokra.*

Kulcsszavak: *mágneses nanorészecskés lázterápia, térbeli kolalizáció*

Abstract: *In this work, we propose a measurement system and experimental methodology that aims to open up a new direction in magnetic nanoparticle hyperthermia by directly investigating the spatial localization effects arising from the interaction of perpendicular AC and DC magnetic fields. The combination of precise field control, high-resolution thermal mapping, and theoretical modeling enables the understanding of the spatial regulation of local energy dissipation. The knowledge gained may contribute to the development of targeted, non-invasive hyperthermia that can be applied for tumor therapy with submillimeter spatial accuracy.*

Keywords: *magnetic nanoparticle hzperthermia, spatial localisation*

1. BEVEZETÉS

A mágneses nanorészecske-hipertermia (MNH) egy gyorsan fejlődő terápiás módszer, amely a mágneses nanorészecskék (MNP-k) azon képességét használja ki, hogy váltakozó mágneses tér (AC) hatására hőt termelnek. Amikor az MNP-k időben változó mágneses térbe kerülnek, a Néel- és Brown-féle relaxációs folyamatok révén energiát disszipálnak, ami lokálisan megemeli a hőmérsékletet a szövetekben, és hipertermiás hatást vált ki, amely szelektíven ká-

rosítja a rákos sejteket. Ez a nem invazív és térben szabályozható fűtési módszer jelentős előnyöket kínál a hagyományos hőterápiákkal szemben, különösen akkor, ha mágneses rezonancia képalkotással (MRI) és célzott nanorészecske-szállítással kombinálják. Noha számos kutatás foglalkozott a teljesítményelnyelés és a fajlagos abszorpciós ráta (SAR) optimalizálásával, a fűtés térbeli lokalizációja továbbra is nyitott kérdés. A biológiai környezetben a hő diffúziója és a nanorészecskék heterogén eloszlása megnehezíti a hőmérséklet- profil precíz szabályozását. Egy ígéretes új megközelítés a statikus (DC) mágneses tér kombinálása egy merőleges váltakozó (AC) térrel. Ez a konfiguráció megtöri a nanorészecske dinamikus válaszának szimmetriáját, és lehetővé teszi, hogy az energia-disszipáció csak bizonyos térbeli régiókra koncentrálódjon. Elméleti munkák kimutatták, hogy a DC előfeszítő mező és a merőleges AC gerjesztés kölcsönhatása megváltoztatja az MNP-k energiatáját, és olyan lokalizált "forró pontokat" hozhat létre, ahol a mágneses szuszceptibilitás és a relaxációs dinamika optimalizálódik. Azonban az ilyen térbeli lokalizációs hatások kísérleti igazolása még hiányzik, mivel eddig nem állt rendelkezésre megfelelő mérőberendezés, amely képes lenne a kombinált AC–DC mező hatásának térbeli felbontású vizsgálatára. A jelen javaslat célja egy mérőrendszer koncepciójának kidolgozása, amely lehetővé teszi a mágneses hipertermia térbeli lokalizációjának vizsgálatát merőleges AC és DC mágneses mezők együttes alkalmazásával. A cél a mágneses és hőmérsékleti válasz térbeli felbontású mérése, valamint a helyi mezőkonfigurációk, a nanorészecske-orientáció és a hőfejlődés közötti kapcsolat feltárása.

2. TUDOMÁNYOS CÉLKITŰZÉSEK

Célunk egy mérőberendezés megtervezése és megépítése, amely homogén AC mágneses mezőt és térben szabályozható, merőleges DC mezőt képes létrehozni. Fontos a helyi fűtési teljesítmény (SAR) és a mágneses dinamika térbeli változásainak kísérleti jellemzése kombinált mezők hatására. Szintén végrehajtandó a térbeli lokalizációs hatás függésének elemzése a mező amplitúdójától, frekvenciájától és a DC előfeszítés erősségétől.

Jelen munkában csak említés szintjén beszélünk az elméleti háttérről (Fokker-Planck vagy sztochasztikus Landau-Lifshitz-Gilbert formalizmus). Az elsődleges célkitűzésünk a kísérleti berendezés felépítésének felvázolása.

3. ELMÉLETI ALAPOK

A javasolt mérés a egydoménes (single-domain) mágneses nanorészecskék nemlineáris dinamikáját használja ki. Ha a részecskék egyszerre vannak kitéve egy

$$\boldsymbol{H}_{AC}(t) = H_{AC} sin(\omega t)\hat{x}, \tag{1.}$$

váltakozó, és egy

$$\boldsymbol{H}_{DC} = H_{DC}\hat{z}, \tag{2.}$$

statikus, merőleges mágneses térnek, akkor az effektív mágneses potenciál:

$$U(\theta, \phi, t) = -\mu H_{DC} cos(\theta) - \mu H_{AC} sin(\theta) cos(\phi) sin(\omega t), \tag{3.}$$

ahol μ a mágneses momentum nagysága, θ és φ pedig a térbeli irányszögek.

A DC mező aszimmetriát visz a rendsyerbe, ezáltal a relaxáció irányfüggővé válik. Ennek

eredményeként bizonyos térbeli régiókban fokozott hőtermelés jön létre – ez a lokalizációs hatás.

A jelenség lényege, hogy a DC mező egy stabil tengelyt definiál, míg az AC mező a mágneses momentumot ezen tengely körül rezgeti. Csak azokban a térbeli pontokban, ahol az AC és DC komponensek megfelelő arányban és irányban kombinálódnak, lesz jelentős a hiszterézis-energia és így a hőtermelés.

4. A MÉRŐBERENDEZÉS KONCEPCIÓJA

A kísérleti elrendezés tervezete három fő egységből áll:
- AC mágneses tér generátor (homogén váltakozó tér az x irányban),
- DC mágneses tér forrás (statikus tér a z irányban),
- Mérőkamra, amelyben a hőmérséklet és a mágneses válasz térben is mérhető.

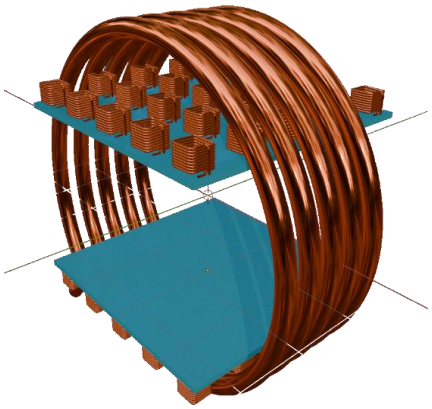
4.1. AC mágneses tér alrendszer

Elképzeléseink szerint a váltakozó mágneses teret egy vízhűtéses Helmholtz-tekercspár hozná létre, amelyet nagyfrekvenciás erősítő hajt. A célfrekvencia: 100 kHz - 1 MHz, a térerősség: akár 15mT. Fő elemek
- Litz huzal a veszteségek csökkentésére,
- Rezonáns LC kör a hatékony energiatranszferhez,
- áram- és feszültségmérők a valós idejű ellenőrzéshez,
- Hall-szonda hálózat a tér homogenitásának (±5%) ellenőrzésére,

4.2. DC mágneses tér alrendszer

A statikus mezőt állandó mágnesek vagy elektromágneses tekercspár generálná, z irányban elhelyezve. A rendszer felé támasztott fontosabb elvarások:
- 0–100 mT közötti térerősséget előállítása,
- a mező (mágnese tér) pozíciója motorikusan állítható legyen,
- fontos kalibrálhatóság és a kontrol megfelelő biztosítása.

A DC mező térbeli gradiense lehetővé teszi, hogy a kísérletben a lokalizációs hatás térbeli függése is tanulmányozható legyen. A vázolt kísérleti elrendezés továbbfejlesztése elvezethet egy gyógyászatban közvetlenül alkalmazható berendezéshez, aminek egy koncepcióját a következő sematikus ábra mutatja.



1. ábra: *Gyógyászatban közvetlenül alkalmazható berendezés koncepciójának sematikus ábrája*

4.3. Mintatartó és hőmérsékletmérés

A minta lehet egy 1–2 mL-es kvarc vagy PTFE küvetta, amely homogén Fe3O4 vagy CoFe2O4 nanorészecske-szuszpenziót tartalmazna (10–30 nm átmérőjű részecskékkel). Elméleti számolásainkat ilyen átmérőjű részecskékre végeztük.

A hőmérsékletet mérését optikai szálas hőmérők vagy fluoreszcens hőérzékeny szondák végeznék, melyek nem érzékenyek az elektromágneses hatásokra. A térbeli hőmérséklet-eloszlás többcsatornás szenzorrács (pl. 5 × 5 hőmérő) vagy infravörös kamera segítségével határozható meg.

4.4. Mágneses jellemzés

A mágneses válasz dinamikáját párhuzamosan mérnénk:

- Pickup tekercs a hiszterézisgörbe és a veszteségteljesítmény meghatározására,
- opcionálisan MOKE (magneto-optikai Kerr-effektus) vagy AC szuszceptibilitás mérés modul a frekvenciafüggő válaszhoz.

E kétféle mérés kombinálása lehetővé teszi a hőtermelés és a mágneses energiadisszipáció közvetlen összekapcsolását.

5. MÉRÉSI STRATÉGIA

A kísérlet elején mindkét mezőt külön kalibráljuk. A térbeli homogénséget 3D Hallszondával ellenőrizzük. A DC mező térbeli eloszlását felmérjük, így meghatározható a teljes H(x,z) vektormező. A kísérleti protokoll lépései: DC mező beállítása egy adott értékre, AC mező alkalmazása és a minta hőmérsékletének mérése több ponton, kísérlet ismétlése különböző DC térerősségek és pozíciók mellett, mágneses jelek egyidejű rögzítése a hiszterézisgörbe alapján, végül 2D fajlagos abszorpciós ráta (SAR) térképek készítése.

6. ÖSSZEFOGLALÁS, ELMÉLETI EREDMÉNYEK

Ebben a publikációban javaslatot tettünk olyan mérőrendszerre és kísérleti módszertanra, melynek célja, hogy új irányt nyisson a mágneses nanorészecske-hipertermiában azáltal, hogy közvetlenül vizsgálja a térbeli lokalizációs hatásokat, amelyek merőleges AC és DC mágneses mezők kölcsönhatásából erednek

A projekt várhatóan az első szisztematikus kísérleti vizsgálatot nyújtja a térbeli lokalizációról mágneses hipertermiában, merőleges AC és DC mezők együttes alkalmazásával. Várható eredmények:

- AC mágneses tér generátor (homogén váltakozó tér az x irányban),
- DC mágneses tér forrás (statikus tér a z irányban),
- Mérőkamra, amelyben a hőmérséklet és a mágneses válasz térben is mérhető.

A kutatás eredményei nemcsak az orvosi célú hipertermiát, hanem a mágneses folyadékok, reológiai rendszerek és nanoméretű energiaátalakítók területét is előmozdíthatják

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] PANKHURST, Q. A., CONNOLLY, J., JONES, S. K., DOBSON, J.: *Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine*, J. Phys. D: Appl. Phys. 36, R167. 2003. https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/13/201

[2] MEHMETI, B.: *Comparison of the LLG and MRSh Equations Used in Magnetic Nanoparticle Hyperthermia*, BSc Thesis, University of Debrecen, 2023. https://dea.lib.unideb.hu/items/e7f6157e-442f-496c-959a-f24d6f308dce

[3] TAY, Z. W., CHANDRASEKHARAN, P., CHIU-LAM, A., HENSLEY, D. W., DHAVALIKAR, R., ZHOU, X. Y., Yu, E. Y., GOODWILL, P. W., ZHENG, B., RINALDI, C., and CONOLLY, S. M.: *Magnetic Particle Imaging-Guided Heating in Vivo Using Gradient Fields for Arbitrary Localization of Magnetic Hyperthermia Therapy*, ACS Nano 12, 3699. 2018. https://doi.org/10.1021/acsnano.8b00893

[4] ISZALY, Zs., GRESITS, I., MARIAN, I. G., THUROCZY, Gy., SAGI, O., MARKUS, B. G., SIMON F., and NANDORI I.: *Polarised superlocalization in magnetic nanoparticle hyperthermia*, Journal of Physics D: Appl. Phys. 55, 205001. 2022. https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac526d

A CSŐTEKERCS SZIVATTYÚ MODELL KÉSZÍTÉSE ÉS MÉRŐREND-SZER ÖSSZEÁLLÍTÁSA ANNAK ÁRAMLÁSTECHNIKAI VIZSGÁLATAI-HOZ

ASSEMBLY OF A COIL PUMP AND ITS MEASUREMENT SYSTEM FOR PUMP CHARACTERISTICS INVESTIGATIONS

SZASZÁK Norbert

PhD, egy. docens, norbert.szaszak@uni-miskolc.hu
[1]Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

Kivonat: *Jelen dolgozatban egy kísérleti célú csőtekercs szivattyú és a hozzá tartozó mérőrendszer felépítését és összeállítását mutatjuk be. A csőtekercs szivattyú vízszintes tengelyű, hengeres dobra feltekert rugalmas csőköteget tartalmaz, amelynek egyik, szabad csővége a dob kerületén található (szívócsonk), a másik vége pedig a forgástengelyen csatlakozik egy csúszógyűrűhöz (ennek állórésze a nyomócsonk). A forgó dob úgy helyezkedik el a szívótartályban, hogy annak tengelye a szabad folyadékfelszín közelében van. A dobot egy frekvenciaváltós villanymotor forgatja ékszíjtárcsás áttételen keresztül. Lassú forgás közben a szabad csővégen keresztül folyadék és levegő felváltva jut a csőbe, s a gravitációs erő és a forgás hatására ezek a nyomócsonk felé haladnak. Az összeállított mérőrendszer segítségével különböző szivattyú-üzemállapotokat tudunk beállítani, s így lehetőség adódik a folyadékszállítás-szállítómagasság görbék meghatározására különböző fordulatszámok és tengely-bemerítés értékek mellett.*

Kulcsszavak: *Wirtz-szivattyú, csőtekercs-szivattyú, folyadékoszlop, folyadékszállítás, kétfázisú áramlás*

Abstract: *In this paper the assembly of a coil pump and the dedicated measurement system is presented. The coil pump made of flexible plastic pipe threads rolled up on a cylinder with horizontal axis. One, free end of the pipe is fixed on the perimeter of the cylinder (suction port), another end is connected to a sliding seal in the axis of the cylinder (discharge port). The cylinder is placed in the suction tank in such a way that its horizontal axis is near the free surface of the liquid. The cylinder is rotated by using a V-belt and an electric motor driven by a frequency converter. During slow rotation, water and air get into the pipe through its free end which are then transported towards the discharge port due to the rotation and the gravitational force. Thanks to the measurement system, different operating points can be set and thus pump characteristic curves for different parameter setups (rotational speed, axis immersion rate etc.) can be drawn.*

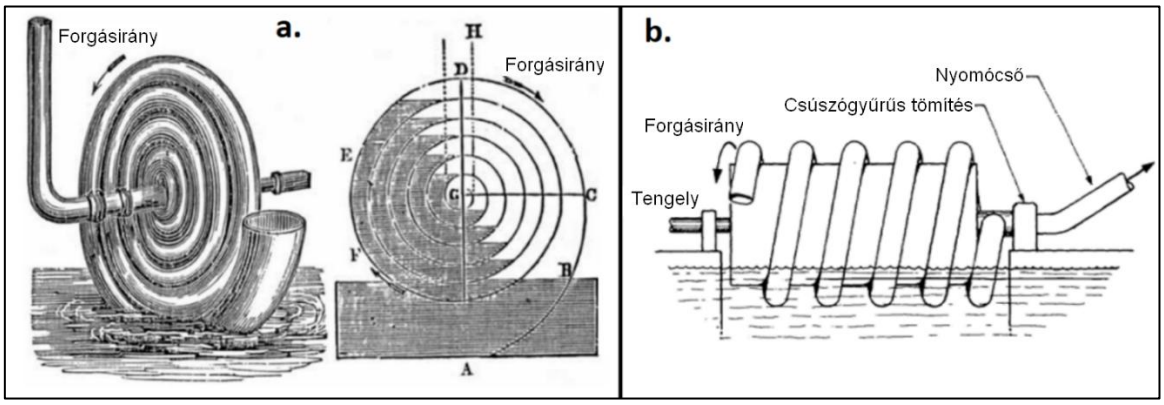
Keywords: *Wirtz-pump, coil pump, liquid column, fluid transport, two-phase flow*

1. BEVEZETÉS

A folyadékszállításhoz használt szivattyúk jellemzően centrifugális, vagy térfogatkiszorításos elven üzemelő berendezések, azonban léteznek olyan szivattyúk is, amelyek a folyadék szállítását a gravitációs erő segítségével végzik (bár bizonyos értelemben ezek is térfogatkiszorításos gépek). Ezek közül az egyik jól ismert, több, mint 2000 éves típus az arkhimédészi-csavarszivattyú, amely csavarmeneteiben az atmoszférikus nyomású folyadék „csomagok” a gravitációs erő, a csavarorsó forgása és az azt körülvevő ház együttes hatására haladnak felfelé, a vízszintessel szöget bezáró tengely mentén [1]. Hasonló elven működik a Wirtz-szivattyú is, amely azonban a külső légtértől elszigetelten szállítja a folyadékdugókat, amelyekre így a relatív helyzetüktől függő túlnyomás is hat, ami az adott folyadékdugó előtti légtérben (légdugó) az azt megelőző folyadékoszlopok által létrehozott hidrosztatikai nyomások összege [2, 3]. A Wirtz-szivattyú szoros értelemben véve egy forgó, spirálalakban feltekert cső, amely spirál külső kerületén (menetén) található a szívócsonk, s a forgástengelyén egy (jellemzően) csúszógyűrűs csatlakozással történik a nyomócsonk kivezetése a folyadékszállító rendszer irányába.

A Wirtz-szivattyú túlnyomásos működési elvéhez hasonló, de felépítésében egyszerűbb a

csőtekercs szivattyú, amelynek összeállítása és mérőrendszerének bemutatása e cikk témája. Ezen szivattyú esetén a flexibilis csövet egy hengeres dobra tekerik fel, s a cső szabad vége (szívócsonk) a henger palástján, míg a nyomócsonk itt is a forgástengelybe helyezett csúszógyűrűs csatlakozásnál található. A henger vízszintes tengelyét a szívott oldali folyadék szabad felszínének közelében úgy helyezik el, hogy a hengerpaláston elhelyezett csőmenetek egy része a folyadékba merüljön. Az 1. ábra bal oldalán a Wirtz-szivattyú, jobb oldalán pedig a csőtekercs-szivattyú sematikus képe látható.

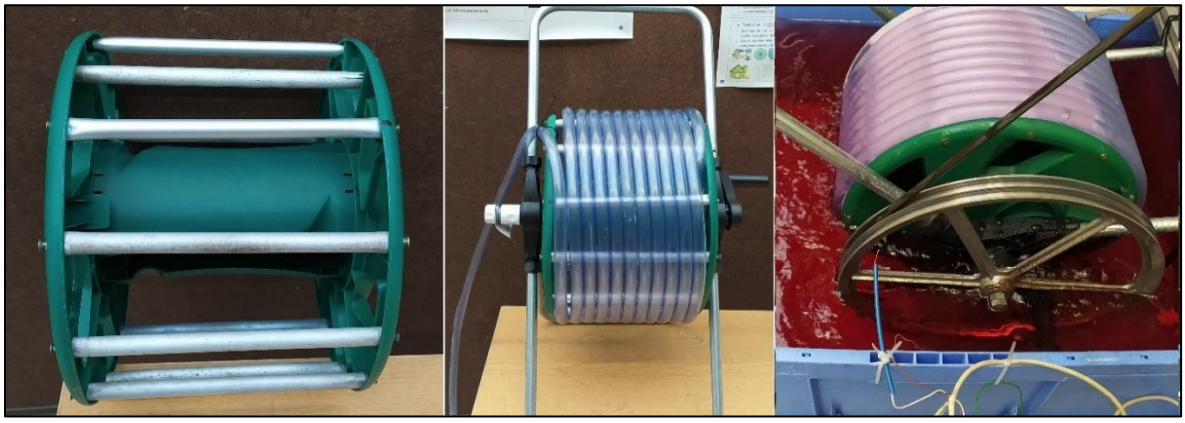


1. ábra: *a. A Wirtz-szivattyú és metszete [4], b. csőtekercs-szivattyú [5].*

A laboratóriumban az 1/b. ábrán látható szivattyúhoz hasonló modellt állítottunk össze a kísérleteinkhez.

2. A SZIVATTYÚ ÖSSZEÁLLÍTÁSA

A szivattyú központi része egy forgatható dob, amihez a megfelelő mérete és egyszerű beszerezhetősége miatt egy kerti locsolótömlő-kocsit használtunk fel. Ez nem csak forgó dobként szolgál, hanem beépített O-gyűrűs csatlakozóval is fel van szerelve, amely esetünkben a nyomócsonk szerepét tölti be. A dob külső átmérőjét (amelyre a csőtekercs került) alumínium csövekkel növeltük meg: a csöveket a tengellyel párhuzamosan, a dob szélein gyárilag elhelyezett gyűrűk külső részén rögzítettük (lásd: 2. ábra bal oldali része). A dob forgatásához eredetileg elhelyezett kézi hajtókart egy szíjtárcsára cseréltük, így lehetőség adódott szíjhajtással forgatni a szerkezetet. Az átalakítás menete, továbbá a folyadékba merített kész szivattyú a 2. ábrán latható.



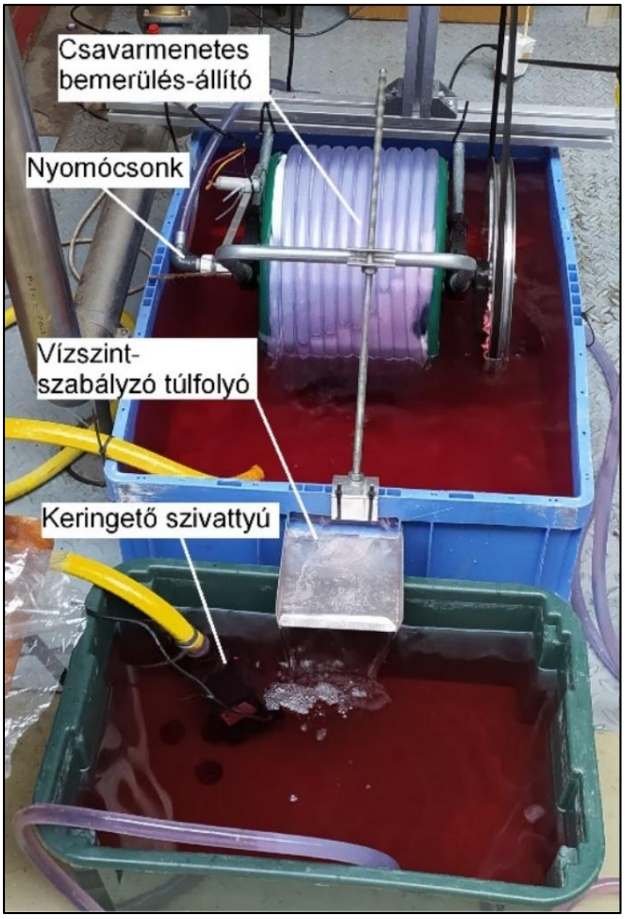
2. ábra: *A laboratóriumi mérésekhez készített csőtekercs szivattyú összeállításának menete.*

A tekercshez átlátszó PVC csövet használtunk, amelynek belső átmérője 14 mm, külső pedig 18 mm volt. A dobon összesen 11 menetet helyeztünk el, továbbá a szívócsonk keresztmetszetének konstans értéken tartásához abba egy 0,5 mm falvastagságú, 14 mm belső átmérőjű, 10 mm hosszú rozsdamentes acélcsövet helyeztünk. A dobra tekert csőmenetek méréseink alapján 360 mm-es közepes átmérővel rendelkeztek.

3. A MÉRŐRENDSZER KIALAKÍTÁSA, ÖSSZEÁLLÍTÁSA

Ahhoz, hogy a vizsgálatokat állandó, általunk beállított fordulatszámok mellett végezhessük el, ékszíjhajtáson keresztül egy háromfázisú villanymotorral hajtottuk meg a szivattyút. A szükséges fordulatszám beállításához a motort pedig egy *NORDAC 500E* típusú frekvenciaváltóval építettük össze. A fordulatszám beállításához egy induktív jeladóval mértük a dob forgási frekvenciáját, amelynek értékét egy digitális oszcilloszkópról olvastuk le. A motorra kapcsolt feszültség frekvenciáját addig változtattuk, amíg a kívánt fordulatszámot be nem állítottuk, majd ezt követően kezdtük meg a szivattyú áramlástechnikai vizsgálatát.

A vizsgálataink során egy fontos vizsgálati paraméter volt a szivattyú tengelyének a szívótartályban lévő víz felszínéhez képest mért bemerülési mélysége. Ennek precíz beállításához egy menetes szárat használtunk, amelynek egyik végét a szívótartályhoz rögzítettük, míg egy rajta elhelyezett csavaranya segítségével támasztottuk meg a szivattyú keretét. Ilyen módon a csavaranya helyzetének változtatásával állíthattuk a szivattyú keretének szögállását, ezzel együtt pedig a tengely bemerülési mélységét. Ez a megoldás látható a 3. ábrán.



3. ábra: *A folyadékba helyezett szivattyú a tengely-bemerülés állítóval és a túlfolyóval.*

A szivattyú működése során az a folyadékot folyamatosan szivattyúzza a szívótartályból, így viszont az előre beállított tengely-bemerülési mélység változna a mérés során. Ennek kiküszöbölésére egy második tartályt (puffertartályt) építettünk a rendszerbe, amelyből egy keringtető szivattyú a folyadékot folyamatosan a szívótartályba szállította, ahonnan az a rajta kialakított túlfolyón keresztül visszaáramlott a puffertartályba. Ezzel a megoldással a vizsgálatok alatt állandó vízszintet tudtunk tartani a szívótartályban. Ennek a megvalósítása látható a 3. ábra alsó részén.

A szivattyú különböző paraméterbeállítások melletti (fordulatszám, tengely-bemerülési mélység) folyadékszállítási karakterisztikáinak felvételéhez szükség volt számos szivattyúmunkapont beállítására, ami pedig a szivattyú szállítómagasságának (H) beállítását jelenti, ami adott értéke mellett kimérhető a folyadékszállítás volumene, azaz a térfogatáram (Q). Mivel a szállítómagasság a szivattyúhoz tartozó csővezetékrendszer paramétereitől függ, amit a csővezeték-jelleggörbe ($H_{cs}(Q)$) ír le, így ezt kellett változtatni más-más munkapont eléréséhez. Mivel adott munkapontban ($_M$) a csővezeték-jelleggörbe és a szivattyú szállítómagasság-görbéje metszi egymást, így fennáll, hogy $H_{cs}(Q_M) = H(Q_M)$, ahol Q_M az adott munkapontban kialakuló térfogatáram. A csővezeték-jelleggörbe az 1. összefüggéssel definiálható.

$$H_{cs}(Q) = \frac{p_N - p_S}{\rho g} + H_g + KQ^2, \qquad (1.)$$

ahol a jelen mérési összeállításnál:

- p_N-p_S a nyomócső végén (a tölcsér felett) és a szívótartály vízfelszínén mérhető nyomások különbsége. Mivel mindkét pontban légköri nyomás mérhető, ezért ez a különbség zérus, tehát ez a tag kiesik az összefüggésből.
- H_g a nyomócső vége és a szívótartály vízszintje közötti magasságkülönbség (ez a geodetikus szállítómagasság);
- KQ^2 pedig a csőrendszerre vonatkozó K veszteségtényezővel számított veszteségmagasság, amit jelen vizsgálatban elhanyagoltunk a szívóvezeték, a csőszerelvények és az iránytörések hiánya, továbbá a sima belső felületű nyomócsőben kialakuló kis áramlási sebességek (max.≈1,2 m/s) miatt.

Így az összefüggés a $H_{cs}(Q) \approx H_g$, azaz $H_{cs} \approx H_g$ geodetikus szintkülönbségre egyszerűsödött, ezért a mérésnél csupán ennek értékét volt szükséges változtatni. Ehhez egy mérőszalaggal kiegészített függőleges sínpályát készítettünk alumínium profilokból, amelyen fel-le tudtuk mozgatni a nyomócsonkhoz csatlakozó rugalmas cső másik, szabad végét, így beállítva a geodetikus szállítómagasságot.

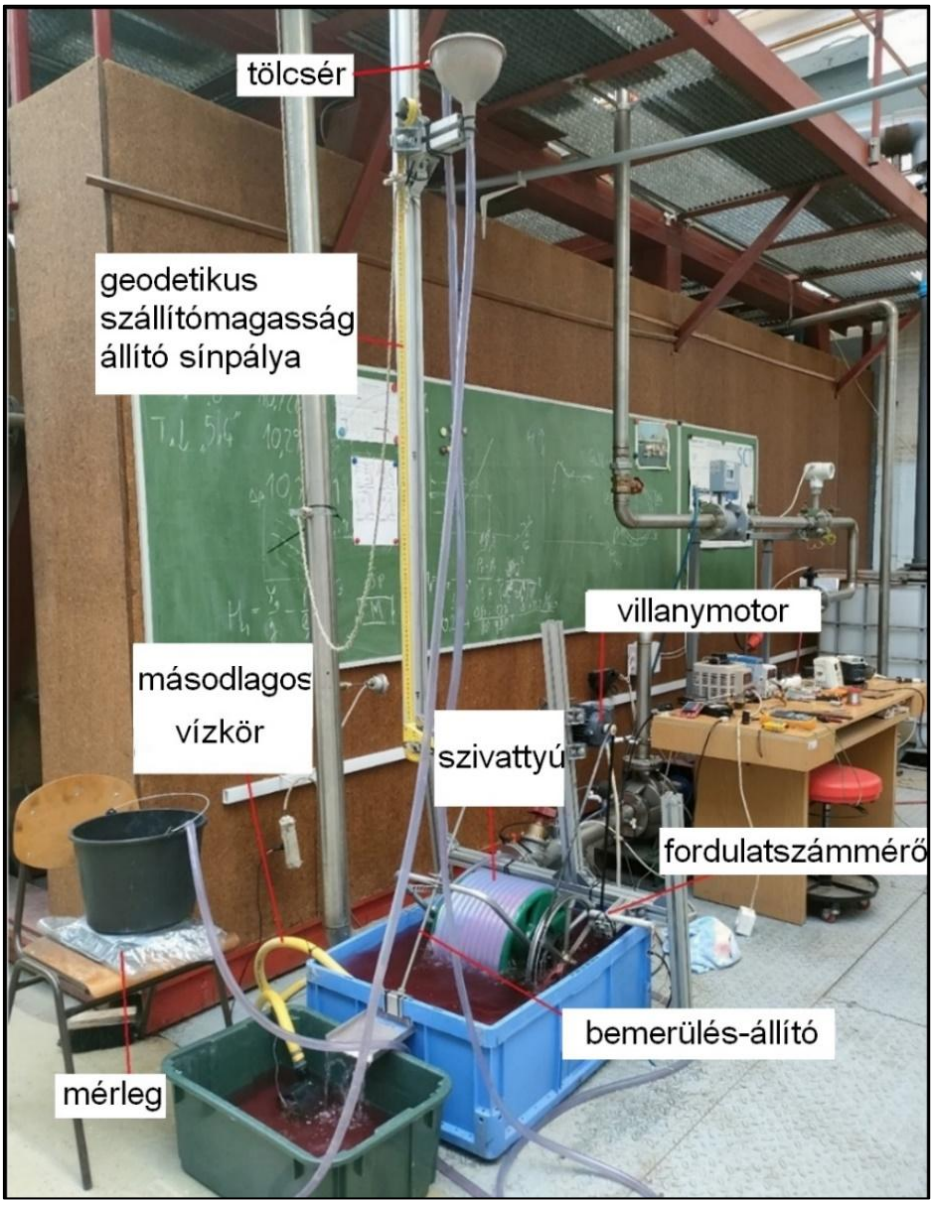
A szabad kifolyáshoz egy tölcsért illesztettünk, amelyhez szintén egy rugalmas csövet csatlakoztattunk. Ennek a csőnek a másik vége egy vödörbe vezette a vizet azért, hogy annak tömegét (helyesebben az adott időtáv alatti tömegváltozását) megmérhessük. Mivel a szivattyú munkapontja egy szállítómagasság (H) – térfogatáram (Q) értékpár, így a térfogatáramot is mérni kellett. Ezt tömegmérésre vezettük vissza: a szállított folyadék a tölcsérhez csatlakozó csövön keresztül egy vödörbe jutott, amely vödörnek az adott idő (Δt) alatti tömegváltozását (Δm) egy digitális mérleggel mértük. Ebből a folyadékszállítás tömegárama, $\dot{m}$ számíthatóvá vált. A tartályban lévő víz hőmérsékletét egy digitális hőmérővel mértük, így annak hőfoka továbbá a víz sűrűség-hőmérséklet függvényének ismeretében meghatározhattuk az aktuális vízsűrűséget (ρ). A sűrűség ismeretében tehát kalkulálhatóvá vált a térfogatáram is, ami a 2. összefüggéssel adható meg.

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{\Delta m}{\rho \Delta t}. \qquad (2.)$$

Ezzel a térfogatáram-mérési megoldással lehetőség volt az aktuális térfogatáramnak megfelelő

időintervallumot beállítani azért, hogy a mérés a lehető legpontosabb legyen. Ez azt jelenti, hogy kisebb térfogatáram esetén hosszabb ideig mértük a tömeg növekedését a lehető legkisebb mérési hiba eléréséhez.

Az előzetesen elvégzett vizsgálataink során kiderült az, hogy a szivattyú geodetikus szállítómagassága akár az 5 m-t is elérheti, ezért összesen 4 m hosszú sínpályát alakítottunk ki úgy, hogy annak alsó vége 1 m-rel volt magasabban a szívott víz felszínétől (a pálya felső része már nem látható a 4. ábrán). Egy mérőszalagot a sínpályán mozgatható nyomócső-vég és tölcsér egységhez rögzítettünk, magát a mérőszalag-dobot pedig fixen a sínpálya aljához úgy, hogy a kijelzett hosszérték éppen a nyomócső végének geodetikus magasságát mutassa a könnyű és gyors beállíthatóság érdekében. A sínpályát is tartalmazó összeállított szivattyú-mérőrendszer a 4. ábrán látható.



4. ábra: *A csőtekercs-szivattyú, összeépítve a vizsgálatokhoz összeállított mérőrendszerrel.*

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen dolgozatban bemutatásra került egy laboratóriumi vizsgálatokhoz összeállított csőtekercs-szivattyú, továbbá a hozzá készített mérőrendszer. A csőtekercs szivattyúhoz átlátszó csövet használtunk, amely segítségével a jövőben megvizsgálhatjuk majd az egyes csőmenetekben kialakuló folyadékoszlopok elhelyezkedését az aktuális szivattyú paraméter-beállítások mellett. Így lehetőség adódik majd összevetni a működést leíró elméleti modell eredményeit a mért értékekkel. Emellett a mérőrendszer alkalmas a szivattyú szállítási jelleggörbéjének kimérésére is különböző, konstans fordulatszámok és tengely-bemerülési értékek mellett. A szivatytyú működéséből adódóan meghatározható a szállított kétfázisú közeg folyadék-levegő aránya, ami alapján megkapjuk a folyadékdugók hosszát. Ezek felhasználhatók az elméleti modellel történő számításokhoz, így validálható, továbbfejleszthető lehet az elméleti modell is.

A jövőben a laboratóriumi mérések mellett tehát célunk lesz a szivattyú működését leíró elméleti modellt megalkotni, feltárni a működésének fizikai hátterét is. Fontos sajátossága a vizsgált szivattyúnak, hogy mivel az egyes csőmeneteken keresztül a nyomás a nyomócsonk felé haladva folyamatosan nő, így a szállított légdugók térfogata ezzel együtt csökken, ami a nyomásnövekedésért felelős folyadékdugók egymáshoz képesti relatív eltolódását eredményezi. Így belátható, hogy ennek matematikai leírása jóval összetettebb, mint azt első ránézésre gondolhatnánk a folyadékoszlopok hidrosztatikája alapján.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] LYONS, M., SIMMONS, S., FISHER, M., WILLIAMS, J. S., & LUBITZ, W. D.: *Experimental investigation of Archimedes screw pump,* Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 146 No. 8., 04020057. 2020.

[2] MILLS, A. A.: *The "Coiled-Tube" Pump*, Industrial Archaeology Review, *7*(1), pp. 94-96. 1984. https://doi.org/10.1179/iar.1984.7.1.94.

[3] DEANE, J. H., & BEVAN, J. J.: *A hydrostatic model of the Wirtz pump*, Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, *474* (2211), 20170533. 2018.

[4] MESERET, M., WAMI, D. & NALLAMOTHU, R.B.: *Experimental study on the parameters affecting the performance of spiral tube pump*, Sci. Rep. 14, 22425. 2024. https://doi.org/10.1038/s41598-024-73234-w

[5] BELCHER, ALAN E.: *Recovery of Revenues Lost to Fish Passage, Proc. of the International Conference on Hydropower, WATERPOWER'95, ASCE, 1995.*

MEGFELELŐ DISZPERZ RENDSZER MEGTALÁLÁSA ÉS STABILIZÁLÁSÁNAK LEHETŐSÉGEI A MÁGNESES HIPERTERMIÁHOZ ORVOSI ALKALMAZÁSOK SORÁN

FINDING A SUITABLE DISPERSED SYSTEM AND ITS STABILIZATION POSSIBILITIES FOR MAGNETIC HYPERTHERMIA IN MEDICAL APPLICATIONS

KORÓZS József[1], BÉRES Miklós[2], ISZÁLY Zsófia[3], MÁRIÁN István Gábor[4,5], NÁNDORI István[6,7]

[1]egyetemi tanársegéd, korozsjozsef092@freemail.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Fizika Tanszék

[2]PhD, mérnöktanár, miklos.beres@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Fizika Tanszék

[3]PhD, tudományos munkatárs, iszalyzsofi@gmail.com
HUN-REN, Atommagkutató Intézet, Kísérleti Magfizikai kutatócsoport

[4]PhD, tudományos munkatárs, marianistvangabor@gmail.com
HUN-REN, Atommagkutató Intézet, Elméleti Magfizikai kutatócsoport

[5]PhD, egyetemi adjunktus, marianistvangabor@gmail.com
Debreceni Egyetem, Természettudományi és Technológiai Kar, Fizikai Intézet, Szilárdtest Fizikai Tanszék

[6]PhD, tudományos főmunkatárs, istvan.nandori@uni-miskolc.hu
HUN-REN, Atommagkutató Intézet, Elméleti Magfizikai kutatócsoport

[7]PhD, habilitált egyetemi docens, istvan.nandori@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Fizika Tanszék

Kivonat: *A mágneses hipertermia orvosi felhasználásához állapítjuk meg a legfontosabb kritériumokat az alkalmazott anyag tekintetében. Ilyen fontos kritérium a megfelelő diszperz rendszer megtalálása, amely mágneses részecskéket tartalmaz és biokompatibilis, vagy azzá tehető. Továbbá a rendszer mágnesességének modellezésre alkalmazható számítási metódusok lehetőségeit is ismertetjük.*

Kulcsszavak: *mágneses hipertermia, lázterápia, diszperz rendszerek, nanoszol, ferrofluid, kolloidstabilitás*

Abstract: *For the medical use of magnetic hyperthermia, we identify the most important criteria for the material used. One such important criterion is finding a suitable disperse system that contains magnetic particles and is biocompatible or can be made biocompatible. Furthermore, we describe the possibilities of computational methods that can be used to model the magnetism of the system.*

Keywords: *magnetic hyperthermia, fever therapy, disperse systems, nanosol, ferrofluid, colloid stability*

1. BEVEZETÉS

A diszperz rendszerek sokféleségében való kiigazodás elengedhetetlen a megfelelő és a megfelelően tervezhető rendszer megtalálásához, amely a mágneses hipertermiában sikerrel alkalmazható. Ezért szeretnénk végigvenni a legfontosabb kritériumokat, amelyek ezen rendszer sikeres orvosi felhasználásának kulcsát jelentik.

2. DISZPERZ RENDSZER SZÜKSÉGES PARAMÉTEREINEK MEGHATÁROZÁSA

A mágneses hipertermiához, vagy más néven lázterápiához felhasznált anyagot legtöbbször ferrofluidnak nevezzük, hiszen a vastartalmú mágneses részecskékkel előállított mágneses szol az elsők között volt az ilyen típusú anyagok körében és ez is vált a legismertebbé. Természetesen a mágneses részecske összetétele sokféle lehet. A célunk orvosi felhasználás esetén megtalálni egy olyan stabil diszperz rendszert, amely teljesen biokompatibilis, és megfelelő módon reagál a mágneses térre.

A diszperz rendszerek esetén megkülönböztetünk halmazállapot szerint több típust:

1. táblázat: *Diszperz rendszerek csoportosítása halmazállapot szerint*

diszperziós közeg	diszpergált fázis		
	szilárd	folyadék	gőz
szilárd	szilárd oldat	gél	szilárd hab
folyadék	szol	emulzió	hab
gőz	aeroszol	köd	-

A megfelelő diszperz rendszer kiválasztásánál figyelembe kell vennünk a végfelhasználás sajátosságait. Mivel az orvosi felhasználás során a véráramba jutatott anyagok esetén a gőz halmazállapotú anyagok alapvetően kerülendők, ezért az ilyen fázist tartalmazó diszperz rendszerek eleve kizárásra kerülnek. Ugyanis bármilyen, a véráramba bekerülő gőz fázisú anyag az erekben érelzáródáshoz, és ezáltal trombózishoz vezetne. Továbbá alapvető tulajdonságnak kell lennie, hogy a bejuttatott diszperz rendszer fluidizálható legyen. Tehát a szilárd diszperziós közeggel rendelkező rendszerek alkalmazása nem megoldható. Ez azt jelenti, hogy vagy szolt vagy emulziót kell használnunk. A mágnesezhető fázis viszont szilárd szemcseként van jelen a rendszerben, ezért csak a szol használata jelenthet megoldást. Fontos továbbá a diszperz rendszer stabilizálása, hiszen ha nem stabil diszperz rendszert hozunk létre, akkor a rendszer szétválhat a véráramban, a diszpergált fázis agglomerálódhat. Az agglomerátumok létrejötte a szol esetén is ugyanúgy érelzáródáshoz, trombózishoz vezethet, mint a gőz fázis jelenléte. Felmerülhet az a kérdés, hogy ha a szol szilárd agglomerátuma érelzáródáshoz vezethet, akkor mivel jobb, mint egy stabil hab? Az előző kritériumokat figyelembe véve a szilárd fázis lesz, ami reagál a mágneses térre, ami által hő fejleszthető, ezért a gőz, mint diszpergált fázis nem jöhet szóba.

A szolon kívül, ami még felmerülhet, mint összetett diszperz rendszer az alkalmazás során, az az emulzió, amelyben a diszpergált fázis önmagában is egy szol. Feltehetően egy ilyen rendszerben sokkal könnyebb megoldani a biokompatibilitás kérdését, hiszen a külső diszperziós közeg lehet egy inert biokompatibilis közeg, míg a belső közeg minimális kapcsolatba kerülne csak a vérrel és az érfalakkal. Természetesen egy ilyen rendszer használata esetén erősen kérdéses a hipertermia hatásossága. Mint lehetőség viszont érdemes fenntartani, hiszen az emulziók stabilizálása sok tekintetben egyszerűbben kivitelezhető, ezért tágabb teret enged az összetételnek a megfelelő szol létrehozására.

A szolok létrehozása során a liofil (szilárd fázist nedvesítő) rendszerek akár spontán is diszpergálódhatnak. Ebben az esetben a rendszer energiájának szempontjából a szilárd-folyadék határfelületi energia kisebb, mint a szilárd-szilárd határfelületi energia, más néven szemcsehatár energia. A spontán diszpergálódó rendszerek ezen tulajdonsága sajnos nem túl gyakori és a biokompatibilitás, valamint a mágnesesség összehangolását nehezíti. Ezért általában a mágneses fluidum szilárd fázisának kialakításakor valamilyen felületi réteget kell alkalmaznunk, amely már rendelkezik a szükséges liofil tulajdonsággal.

A megfelelő rendszer tulajdonságai szempontjából a diszpergált fázis méretének csökkentése jótékony hatással van egy határig. Minél nagyobb a diszpergált fázisunk mérete, annál kevésbé elhanyagolható a gravitáció hatása a határfelületi erőkhöz képest, ezért a diszpergátum sűrűség szerinti szétválása prognosztizálható. Számunkra ez nem előnyös, hiszen a mágnesezhető szilárd szemcsék sűrűsége jellemzően legalább 2-3-szor akkora, mint a folyadék fázisé. Ahhoz, hogy a gravitáció hatását csökkentsük, a szilárd szemcsék méretét kell csökkentenünk. Ha nagyságrendi közelítő számítást végzünk (2. táblázat), akkor azt látjuk, hogy a milliméteres nagyságrendben a gravitációs erő és a határfelületi erők hasonló nagyságrendben vannak. Gyakorlati szempontból az 1% alatti hatásokat szokás elhanyagolni, ezért ha még egy nagyságrendet lejjebb megyünk a százalékban, akkor a gravitáció 0,1% nagyságrendje a határfelületi erőkhöz képest a mikrométeres nagyságrendben található.

2. táblázat: *Nagyságrendi számítás a gravitációs erőre és a határfelületi erőkre és ezek egymáshoz viszonyított arányára* $\left(\rho_s = 3000\frac{kg}{m^3}, g = 10\frac{m}{s^2}, \sigma_{s/l} = 1\frac{J}{m^2}\right)$

$r\ [m]$	$F_g\ [N]$	$F_{surf}\ [N]$	$\frac{F_{surf}}{F_g}$	$F_{surf}:F_g$
$1\ m$	$1{,}26 \cdot 10^5$	$5{,}44 \cdot 10^2$	$5{,}44 \cdot 10^{-3}$	
$0{,}1\ m$	$1{,}26 \cdot 10^2$	$5{,}44 \cdot 10^0$	$5{,}44 \cdot 10^{-2}$	
$10\ mm$	$1{,}26 \cdot 10^{-1}$	$5{,}44 \cdot 10^{-2}$	$5{,}44 \cdot 10^{-1}$	
$\mathbf{4{,}33\ mm}$	$\mathbf{1{,}02 \cdot 10^{-2}}$	$\mathbf{1{,}02 \cdot 10^{-2}}$	$\mathbf{1}$	$\mathbf{50\%:50\%}$
$1\ mm$	$1{,}26 \cdot 10^{-4}$	$5{,}44 \cdot 10^{-4}$	$5{,}44 \cdot 10^0$	
$0{,}1\ mm$	$1{,}26 \cdot 10^{-7}$	$5{,}44 \cdot 10^{-6}$	$5{,}44 \cdot 10^1$	
$\mathbf{43{,}3\ \mu m}$	$\mathbf{1{,}02 \cdot 10^{-8}}$	$\mathbf{1{,}02 \cdot 10^{-6}}$	$\mathbf{100}$	$\mathbf{99\%:1\%}$
$10\ \mu m$	$1{,}26 \cdot 10^{-10}$	$5{,}44 \cdot 10^{-8}$	$5{,}44 \cdot 10^2$	
$1\ \mu m$	$1{,}26 \cdot 10^{-13}$	$5{,}44 \cdot 10^{-10}$	$5{,}44 \cdot 10^3$	
$0{,}1\ \mu m$	$1{,}26 \cdot 10^{-16}$	$5{,}44 \cdot 10^{-12}$	$5{,}44 \cdot 10^4$	
$10\ nm$	$1{,}26 \cdot 10^{-19}$	$5{,}44 \cdot 10^{-14}$	$5{,}44 \cdot 10^5$	
$1\ nm$	$1{,}26 \cdot 10^{-22}$	$5{,}44 \cdot 10^{-16}$	$5{,}44 \cdot 10^6$	
$0{,}1\ nm$	$1{,}26 \cdot 10^{-25}$	$5{,}44 \cdot 10^{-18}$	$5{,}44 \cdot 10^7$	

Nagyságrend tartományokról beszélve nanométeres nagyságrendnek nevezzük a 0,1nm-100nm-es tartományt. Így a kritériumok alapján az 1µm-es nagyságrend már a nano tartomány felső határához igen közel van. Tehát a szükséges mérettartományunk maximuma már majdnem a nano mérettartományba esik, ezért beszélhetünk nanoszolról, vagy nanodiszpergátumról is akár.

$$F_g = mg = V\rho_s g \approx \frac{4}{3}r^3\pi\rho_s g, \tag{1.}$$

ahol:
F_g a gravitációs erő $[N]$;
m a szemcse tömege $[kg]$;
g a gravitációs gyorsulás $[\frac{m}{s^2}]$;
V a szemcse térfogata $[m^3]$;
ρ_s a szemcse sűrűsége $[\frac{kg}{m^3}]$;
r a szemcse sugara $[m]$.

$$F_{surf} \approx \frac{\sigma_{s/l}A}{\kappa} = \frac{\sigma_{s/l}r^2\pi}{\sqrt{\frac{\sigma_{s/l}}{\rho_s g}}}, \quad (2.)$$

ahol:
F_{surf} a határfelületi erő $[N]$;
$\sigma_{s/l}$ a szemcse és a diszperziós közeg közötti szilárd-folyadék határfelületi energia $[\frac{J}{m^2}]$;
A a szemcse felülete $[m^2]$;
κ a „kapilláris hossz”, amely egy jellemző hosszparaméter a határfelületi jelenségeknél $[m]$.

Ne feledkezzünk el az alsó határ meghatározásáról sem beszélni. Általánosan elmondható, hogy minél kisebb egy fázis mérete, annál nagyobb a fajlagos határfelületi energiája. A mérettel fordított arányban nő, vagy úgy is kifejezhető, hogy a fajlagos felülettel egyenesen arányos. Ezért a túl kis méretű szilárd szemcsék esetén veszélybe kerülhet a liofilitás és az agglomerátum képződés esélye is a fajlagos határfelületi energia növekedésének arányában nő. Ez a kritérium a szemcsék méretének az alsó határát nagyjából a 10 atom vagy 10 molekula sugarú szemcse fölé helyezi. Ez atom- vagy molekulamérettől függően 1nm-10nm.

Most már ismerjük a megfelelő diszperz rendszer kialakítására vonatkozó legfontosabb kritériumokat. Nézzük meg milyen lehetőségeink vannak a megfelelő szilárd fázis kialakítására.

Alapvetően a nanoszemcse létrehozását kivitelezhetjük úgy, hogy aprítógépben létrehozunk nanoport (top-down technológia), amelyet később megpróbálunk diszpergálni a megfelelő fázisban. Ez a megoldás több szempontból sem előnyös, hiszen nehéz megoldani a szemcsék részéről az inert közeget és elkerülni az agglomerátumok képződését. Alkalmazható nanopor szintézishez a gőzfázisú leválasztás is (bottom-up technológia), ekkor az inert közeg és az agglomerátum képződés elkerülése is biztosítva van, de a szemcse diszpergálása továbbra is probléma. Ehelyett érdemes az oldatból történő precipitátum képzéssel előállítani a részecskéket (macro for nano technológia). A képződött nanoszemcse mérete és alakja befolyásolható a pH-val és az oldatösszetevők koncentrációjával. A folyadék fázisú nanoszemcse előállítás csökkenti az agglomerátumok kialakulásának esélyét és a szemcsék oxidációja is elkerülhető.

A nanoszemcséket továbbá általában be kell vonnunk egy olyan anyaggal, ami biztosítja számunkra a szemcsék liofilitását. Erre egyik lehetőség a polimerek alkalmazása. Ezek kötődhetnek a felülethez kémiai kötések által, amelyeket lehorganyzott polimereknek nevezzük. Míg a polimerek csupán adszobeálódhatnak is a felületen, amelyek egy gyengébb kötést, így egy gyengébb kolloidstabilitást eredményeznek. Továbbá lehetőség van a szemcsék agglomerádósát elkerülendő sztérikusan gátló polimerréteg kialakítása is. Ez azt jelenti, hogy a viszonylag hosszú, több elágazást tartalmazó polimer kötődik a felületen és fizikailag megakadályozza, hogy a szilárd részecskék egymáshoz közel kerüljenek, így stabil agglomerátum nem tud létrejönni.

3. MÁGNESES HŐTERMELÉS MODELLEZÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI

Az elkészített mágneses nanorészecskék tulajdonságai tehát befolyásolják a hőtermelés hatékonyságát. A szakirodalomban több modell is használatos a mágnesezettség vektor mozgásának leírására, amiből hőtermelés számolható. Ezekben a modellekben is nagyon fontos figyelembe venni például a részecskeméretet, az alakjának vagy kristályszerkezetének anizotrópiáját, biokompatibilis burkának nagyságát vagy akár a sűrűségét. Ezen paraméterek függvényében kétféle relaxációs típust különböztethetünk meg; a Brown relaxációt, melynek során az egész részecske elfordul, valamint a Neél relaxációt, amikor a részecske forgása nélkül csak a mágnesezettség iránya változik. A két különböző relaxációt eltérő modellekkel szokták vizsgálni, a Brown relaxációra az egyik legelterjedtebb modell az úgynevezett MRSh egyenlet, míg

a Neél relaxációra az sLLG egyenlet használatos. További célunk a két modell összehasonlítása. Ennek jelentősége, hogy korábbi kutatás eredménye azt mutatja, hogy sLLG-ben a merőleges AC+DC terek kombinációjával jobb lokalizáció érhető el, mint párhuzamos esetben, így felmerül a kérdés, hogy vajon ez teljesül-e Brown relaxáció esetén is.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Az elméleti kritériumokat figyelembe véve orvosi alkalmazásra mágneses hipertermiához a megfelelő diszperz rendszer egy olyan stabil szol létrehozása, amelyben a diszpergált szemcsék mérete jellemzően a 10μm-es vagy annál kisebb nagyságrendben van, de nem kisebb 10nm-nél. Összetétel tekintetében a mágnesezhető szemcse kevésbé releváns biokompatibilitás szempontjából, hiszen ezt mindenképpen be kell vonni egy liofil burokkal, amely a kolloidstabilitást biztosítja. A liofil burok jellemzően polimer, amely már szükséges, hogy biokompatibilis legyen.

A megfelelő diszpergált szemcse létrehozására a legmegfelelőbb módszer a folyadék fázisú precipitátum képzés, amely később bevonható a szükséges polimerrel. Ezzel a precipitátum képzéssel állítjuk elő a mágneses szemcsét.

A mágnesezettség relaxációjának két típusa a Brown relaxáció és a Neél relaxáció két különböző modellel írható le, amelyeknek összehasonlítását a jövőben szeretnénk elvégezni.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] GENNES, PG., BROCHART-WYART, F., QUÉRÉ, D.: *Capillarity and Wetting Phenomena.* Springer, 2004.

[2] BÁRÁNY, S.: *A kolloidkémia alapjai.* II. Rákóczi Ferenc Kárpátaljai Magyar Főiskola, Beregszász, 2014.

[3] SZÁNTÓ, F.: *A kolloidkémia alapjai.* Gondolat, Budapest, 1987.

[4] PATZKÓ, Á.: *A kolloidika alapjai.* JATEPress, Szeged, 2013.

[5] LÁSZLÓ, K.: *Felületek fizikai kémiája.* BME Fizikai Kémiai és Anyagtudományi Tanszék, Tipotex, 2011.

[6] BARNES, G.T., GENTLE, I.R.: *Interfacial Science.* Oxford University Press, 2005.

[7] HÓRVÖLGYI, Z.: *A nanotechnológia kolloidkémiai alapjai.* BME Fizikai Kémiai és Anyagtudományi Tanszék, Tipotex, 2011.

[8] ROSENSWEIG, R.E.: *Heating magnetic fluid with alternating magnetic field.* Journal of Magnetism and Magnetic Materials 252. pp. 370–374, 2002.

[9] SUTO, M., HIROTA, Y., MAMIYA, H., FUJITA, A., KASUYA, R., TOHJI, K., JEYADEVAN, B.: *Heat dissipation mechanism of magnetite nanoparticles in magnetic fluid hyperthermia.* Journal of Magnetism and Magnetic Materials 321. pp. 1493–1496, 2009.

[10] DENNIS, C.L., IVKOV, R.: Physics of heat generation using magnetic nanoparticles for hyperthermia. International Journal of Hyperthermia 29. pp. 715–729, 2013.

[11] LANDAU, L., LIFSHITS, E.: On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies. Phys. Z. Sowjetunion 8 pp. 153-169, 1935.

PERFORÁLT LEMEZ FURATA UTÁN KIALAKULÓ HIDRODINAMIKAI KAVITÁCIÓ NUMERIKUS SZIMULÁCIÓJA

NUMERICAL INVESTIGATION OF HYDRODYNAMIC CAVITATION IN THE ORIFICE FLOW

BOLLÓ Betti

PhD, egyetemi docens, betti.bollo@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

Kivonat: *A szennyvíz kezelésére számos módszert dolgoztak ki, az egyik környezetbarát módszer a hidrodinamikai kavitáció alkalmazása. A kavitáció előállítására speciális Venturi csövet vagy különböző geometriájú perforált lemezeket használnak. Jelen cikkben numerikus szimuláció segítségével vizsgáljuk meg egy furatolt lemezen történő átáramlás során keletkező hidrodinamikai kavitáció jelenségét. A kutatás során hat különböző kialakítású furatban elemezzük a létrejövő gőzfázist. Az eredmények azt mutatják, hogy akkor keletkezik nagyobb mennyiségű kavitációs buborék a vizsgált nyomásviszonynál, ha a furat hossza és az átmérője közötti arány (L/d) 1 és 2 közé esik.*

Kulcsszavak: *hidrodinamikai kavitáció, furatlemez, numerikus szimuláció*

Abstract: *Several methods have been developed for wastewater treatment, one of which is the environmentally friendly method of hydrodynamic cavitation. A special Venturi tube or a perforated plate with different geometries is used to generate cavitaties. In this article the phenomenon of hydrodynamic cavitation is investigated during flow through an orifice using numerical simulation. During the research the resulting vapor phases are analysed in six different orifice designs. The results show that a higher number of cavitation bubbles are generated at the test pressure ratio when the orifice length to diameter ratio (L/d) is between 1 and 2.*

Keywords: *hydrodynamic cavitation, orifice, numerical simulation*

1. BEVEZETÉS

Napjainkban az egyre növekvő mennyiségű szennyvíziszap kezelése és hasznosítása alapvető környezeti probléma. A legfontosabb, hogy a szennyvíziszapot nem hulladéknak kell tekinteni, amelyet ártalmatlanítani kell, hanem hasznosítható másodlagos nyersanyagnak, illetve megújuló energiaforrásnak. A világban számos megoldás létezik az szennyvíziszapok kezelésére, hasznosítására, pl. mezőgazdasági felhasználás, rekultiváció, deponálás, komposztálóba történő átadás, erőművi hasznosítás stb. A szennyvizek és szennyvíziszapok lebomlásuk során a növények számára könnyen felvehető mikro- és makroelemekké alakulnak át, ezenkívül szervesanyag-tartalmuk javítja a talaj számos tulajdonságát. A szennyvíziszapok azonban tartalmazhatnak toxikus nehézfémeket, gyógyszermaradványokat, amelyek ún. perzisztens, azaz nem lebomló anyagok, amelyek növényi felvétellel vagy erózióval bekerülhetnek a táplálékláncba, ott feldúsulva veszélyeztetik a környezetet és az emberi egészséget. Számos új kémiai és biológiai módszert dolgoztak ki a kutatók, az egyik ilyen új, ígéretes fertőtlenítési technológia a hidrodinamikai kavitáció alkalmazása, amelynek nagy előnye, hogy nem juttat további vegyszereket a vízbe.[1]

A kavitáció egy fizikai jelenség, amikor a folyadék nyomása lecsökken a telített vízgőz nyomására, és a folyadékban gőzfázis jelenik meg, ez az úgynevezett kavitációs buborék. A kavitációs buborék összeomlásakor, ahol a kondenzáció és a gőzkompresszió előfordul nagyon magas, több ezer kelvin hőmérséklet lép fel (elméletileg), de ezek nagyon rövid ideig tartanak (~1 μs), és ez idő alatt a hőmérséklet a környező folyadék hőmérsékletére esik vissza [2]. Ezek a körülmények megfelelőek a szerves anyag sejtfalának felszakadásához. Az iszapkezelés révén

ezek növelik a biológiai lebonthatóságot, és növelik az anaerob emésztést, ami magasabb biogáztermelést eredményez, valamint kevesebb lesz a retenciós idő, és csökken az iszap mennyisége is. A kavitáción alapuló eljárások esetében melléktermék nem keletkezik, vegyszeres kezelés vagy egyáltalán nincs, vagy elhanyagolható mennyiségben van jelen.

A hidrodinamikai kavitáció létrehozására a kutatók többnyire többszörös, furatolt lemezeket vagy egyszerű Venturi-kialakításokat használnak [3, 4, 5]. A furatlemezeknél számos tanulmány viszonylag rövidebb nyílásokat használ, amelyek L/d (furat hossza/furat átmérő) aránya jellemzően kisebb, mint 2. A nyílások élessége mellett a furat és a középvonal által bezárt szög is az egyik kulcsfontosságú paraméter, amely befolyásolja a kavitáció kialakulását és mértékét. Ezeknek a tényezőknek fontos szerepük van a nyílások tervezésében és optimalizálásában. Ezért a kutatásunk során megpróbálunk kitölteni néhány hiányosságot és részletesen megvizsgáljuk a felsorolt paramétereket.

Jelen tanulmány egy kutatás kezdeti fázisát mutatja be, ahol numerikus szimuláció segítségével elemezzük, hogy egy darab furatban hogyan jön létre a kavitáció, és hogyan terjed a nyílásban különböző L/d arányok esetén.

2. MATEMATIKAI MODELL

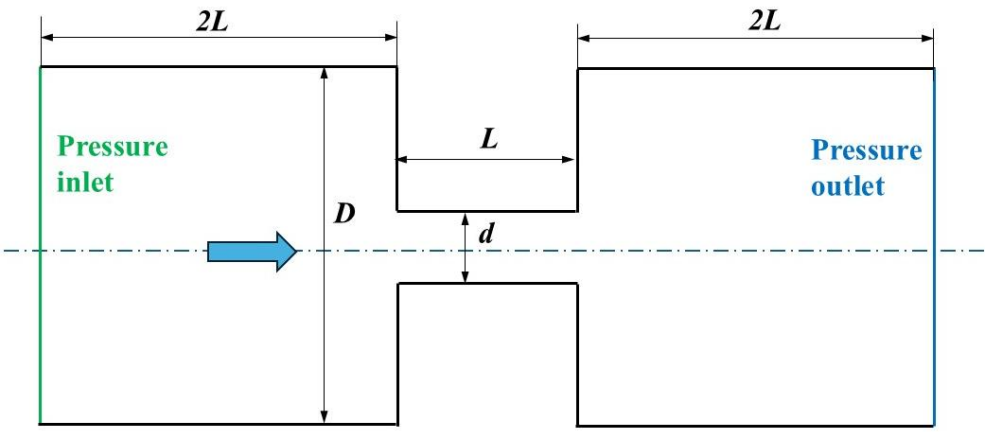
A hidrodinamikai kavitáció kialakulásának vizsgálatához egyetlen furaton keresztül, adott be- és kilépő nyomások esetén létrejövő áramlást vizsgáltuk meg. A numerikus szimulációhoz kétdimenziós, tengelyszimmetrikus kialakítást készítettünk. Ez a megközelítés jelentősen lerövidíti a numerikus számítások idejét. A numerikus modellezést a kereskedelmi forgalomban kapható Ansys Fluent programcsomaggal végeztük el, ami a véges térfogatok módszerét alkalmazza. A kétdimenziós turbulens áramlásra időfüggő számítást végeztünk másodrendű implicit formulával. A mozgásegyenletek számításához másodrendű eljárást alkalmaztunk. A nyomás-sebesség csatolást SIMPLE algoritmussal oldottuk meg, a nyomásra a PRESTO diszkretizációs sémát alkalmazva.

A kavitációs áramlás során víz mellett vízgőz jön létre, azaz kétfázisú az áramlás, amihez az úgynevezett VOF (Volume of Fluid) modellt használtuk, amelyet a keletkező buborékok növekedésének és összeomlásának előrejelzésére használnak. A legtöbb kutató a VOF modell mellett a k-ω SST modellt ajánlja [3, 4, 6] a turbulens, kavitációs áramlás modellezésére, ezért ezt a turbulencia modellt használtuk. A folyadék és a vízgőz sűrűségét és viszkozitását állandónak tekintettük.

2.1. Geometriai kialakítás

A hidrodinamikai kavitáció jelenségét különböző átmérőjű furaton keresztül elemeztük, ugyanazon bemeneti peremfeltételek mellett (lásd 1. ábra). A furat hossza minden esetben L, valamint a furat előtti és utáni csőszakasz hossza $2L$. A csőszakasz átmérőjét pedig szintén $D=2L$ nagyságúnak választottuk. A különböző eseteket az 1. táblázatban foglaltuk össze, ahol a furat hossza és a furat átmérőjének aránya (L/d) alapján különböztetjük meg egymástól az egyes vizsgálati eseteket.

A bemeneten „pressure inlet” peremfeltételt írtunk elő, azaz 700 kPa túlnyomás értéket adtunk meg minden esetben, valamint a kimeneten (perssure outlet) 100 kPa túlnyomást. A telített vízgőz nyomása adott hőmérsékleten $p_v = 3540$ Pa, a hőmérsékletváltozástól eltekintünk. A nyomáskülönbség hatására a csőszakaszban elindul az áramlás és a furat méretétől függően különböző mennyiségű kavitációs buborék jelenik meg, ha a nyomás a telített gőznyomás értékét eléri.



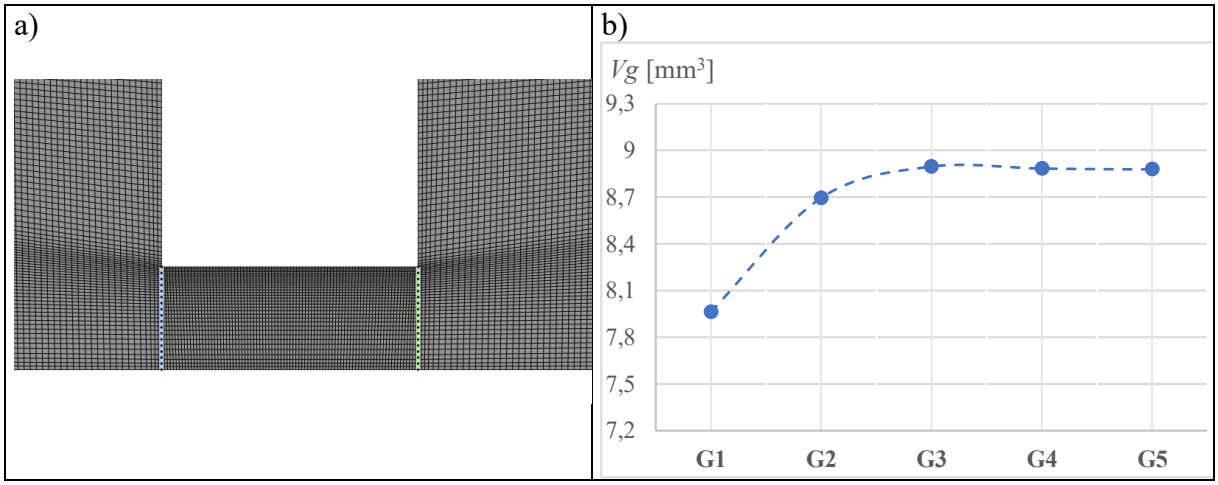
1. ábra: *Geometriai kialakítás.*

1. táblázat: *A különböző geometriai esetek*

	A	B	C	D	E	F
L*/*d	5	5/2	5/3	5/4	1	5/6

2.2. Hálófüggetlenségi vizsgálat

A peremfeltételek implementációja és a numerikus megoldások minősége mellett a tartományban lévő rácsfelbontás is fontos paraméter a numerikus eredmények megbízhatósága szempontjából. A probléma megoldását különböző rácsfelbontásokon kell tesztelni, és ennek a folyamatnak a segítségével kell meghatározni a számításokhoz az optimális hálókialakítást. A számításokat a **D** esetben öt különböző rácsméret esetén végeztük el, a következő elemszámokkal: G1=11.466; G2=19.859; G3=31.706; G4=39.780 és G5=49.199. A ***2. ábra*** a G2 esetben mutatja a furatban a hálókialakítást. A hálóvizsgálatot azonos peremfeltételek mellett modelleztük, és a keletkezett vízgőz mennyiségét vizsgáltuk a számítási tartományban, ami a 2. b) ábrán látható.

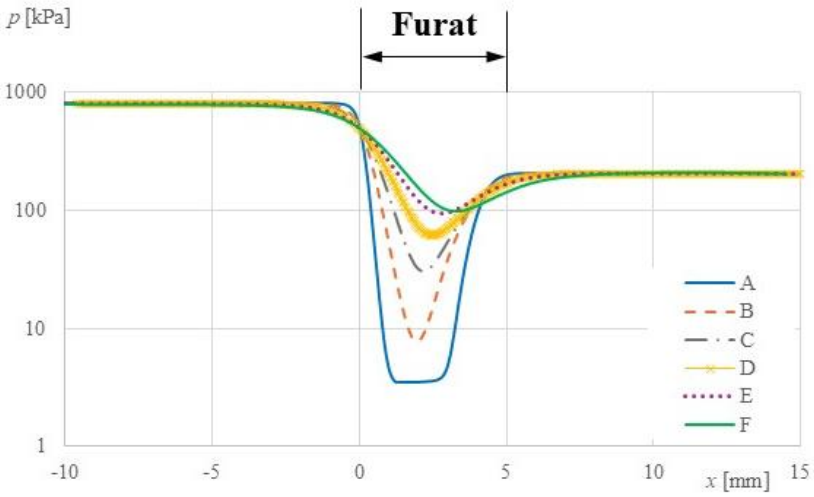


2. ábra: *(a)Hálókialakítás a furatban és (b) kavitációs buborékok mennyisége különböző hálófelbontásnál*

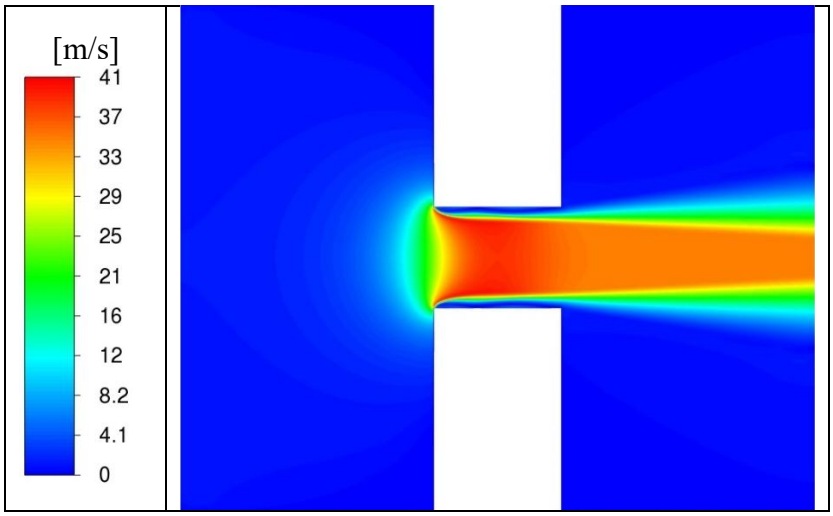
Megállapítottuk, hogy a megoldás a G3 típusú hálótól már rácsfüggetlennek tekinthető, viszont nagyobb furat esetén is végzünk elemzéseket, ezért a G4 rácsnál alkalmazott cellaméreteket használtuk az összes további modell kialakításához.

3. EREDMÉNYEK

A vizsgált csőszakasz áramlására vonatkozó számításokat azonos nyomásviszony mellett vizsgáltuk: $P_r = p_{in}/p_{out} = 4$. A furaton áthaladó áramlás kezdetben oszcillált, majd egy idő után stabilizálódott. A szimulációt akkor tekintettük befejezettnek, amikor a bemeneti és a kimeneti áramlások stabilizálódtak, és a vizsgált mennyiségekben nem figyeltünk meg ingadozást.
A furaton átáramló folyadék lokális nyomásváltozását a középvonal mentén a ***3. ábra*** szemlélteti az áramlási irány függvényében. Amint az áramló folyadék belép a szűkített szakaszba, az átlagos áramlási sebesség megnő, a nyomás pedig lecsökken. Az ún. vena contracta miatt a sebesség nem a furat bemeneténél lesz a legnagyobb, hanem később fogja elérni a maximumát (
4. ábra), ahol a nyomás lecsökken a minimális értékére, azaz a telített vízgőz értékére.



3. ábra: *Nyomáseloszlás a középvonal mentén.*

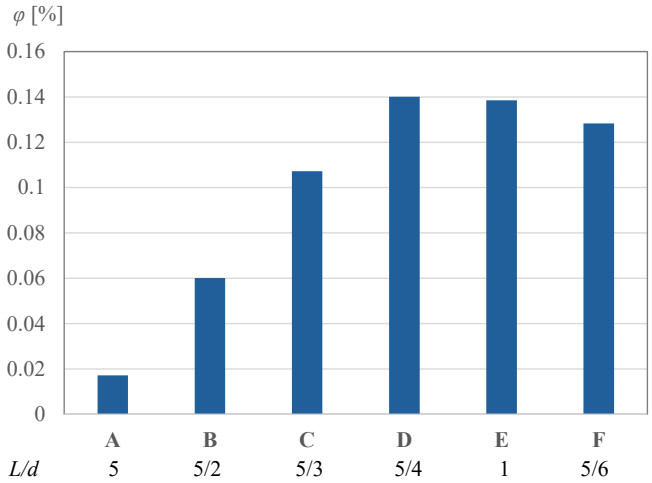


4. ábra: *Sebességeloszlás D esetben.*

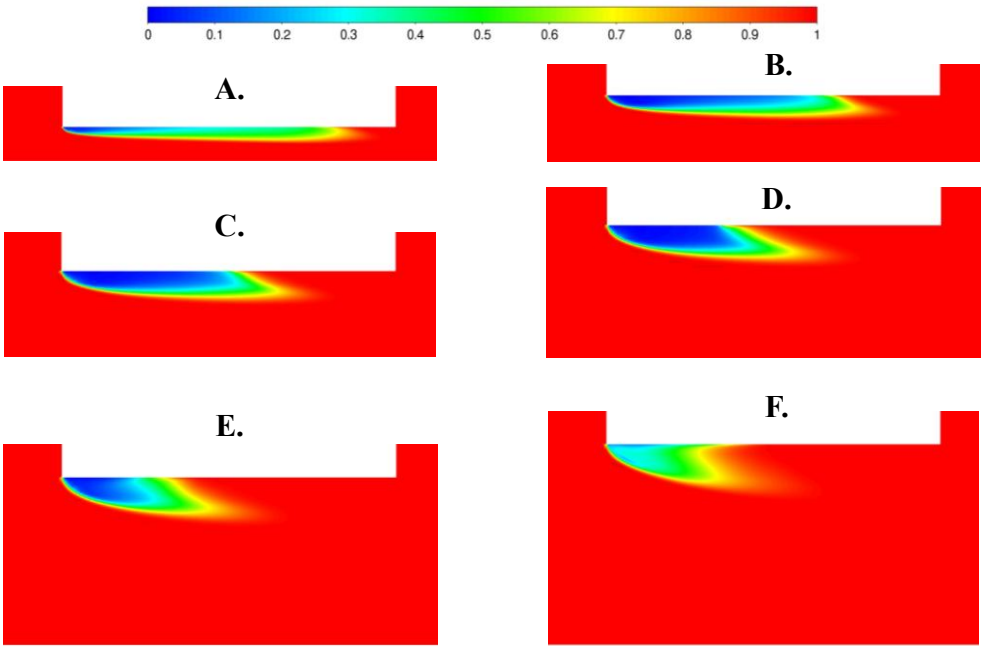
A ***3. ábra*** ez a jelenség jól megfigyelhető, a furat kezdete 0-tól kezdődik és a legkisebb nyomás értéke ettől távolabb van. Ha a nyomás a telített vízgőz nyomása felett marad, akkor az áramlás egyfázisú folyadék marad. Ha azonban a telített vízgőz nyomása alá csökken a nyomás, akkor folyadék-gőz fázisváltás történik és a folyadék egy része gőzzé alakul, azaz megjelennek a kavitációs buborékok.

Megvizsgáltuk a folyadékban keletkező gőzbuborékok mennyiségét, azaz, hogy az egész térfogatban hány százalékban jelenik meg a gőzfázis. A gőzfázis arányának számításához a $\varphi = V_g/V \cdot 100\%$ képletet alkalmaztuk, ahol a V a teljes térnek a térfogata, V_g a gőzfázis térfogata. Mindegyik esetben kiszámoltuk a térfogatszázalékokat, amit az 5. ábra hasonlítottunk össze. Az ábrán jól látható, hogy a D és az E esetben jön létre a legtöbb kavitációs buborék.

A ábra szemlélteti a gőzfázis kialakulásának helyét a furatban (gőz fázis 0; folyadék fázis 1). Az A, B és C esetben a falhoz közel jön létre és hosszan elnyúlik a fal mentén, míg a többi esetben jobban kiterjed a furatban.



5. ábra: *A vízgőz térfogatszázaléka a különböző esetekben.*



6. ábra: *Időátlagolt fáziseloszlás a furatban.*

Pietrykowski és Karpiński [4] az A és B esetnek megfelelő *L/d* aránynál vizsgálta a létrejövő kavitációs buborékok mennyiségét, és ők is azt tapasztalták, hogy *L/d*=2,5 esetén nagyobb mennyiségű gőzfázis állítható elő.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás kezdeti szakaszában egy furatban kialakuló kavitációs jelenséget vizsgáltunk meg numerikus szimuláció segítségével. A modellezés során a furat *L* hossza állandó volt, míg a furat átmérőjét változtattuk, így összesen hat esetet vizsgáltunk meg. Azt tapasztaltuk, hogy az *L*/*d* méretarány csökkenésével a gőzfázis aránya növekszik, amíg el nem éri az *L*/*d*=1 értéket, ezután a gőzfázis részaránya csökkeni fog. A kutatás következő lépéseként más nyomásviszonyra is kiterjesztjük a vizsgálatainkat, főként a C, D és E eseteket vizsgálva.

Ezután megvizsgáljuk, hogy ha a furat nem egyenletes hosszúságú, hanem adott hossztól megváltoztatjuk a nyílás átmérőjét, vagy a falának a szögét (hasonlóan, mint a Venturi-csőnél), az milyen hatással lesz a kavitációs buborékok mennyiségére. További lehetőség még a belépő furat élének különböző nagyságú lekerekítése, annak vizsgálatára, hogy az miképp befolyásolja az áramlási jellemzőket.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] DARANDALE, G. R., JADHAV, M. V., WARADE, A. R., HAKKE, V. S. *Hydrodynamic cavitation a novel approach in wastewater treatment: A review*, Materials Today: Proceedings, Vol. 77, pp. 960-968, 2023.

[2] BLAGOJEVIČ, M., RAK, G., BIZJAN, B., KOLBL REPINC, S.: *A review on rotary generators of hydrodynamic cavitation for wastewater treatment and enhancement of anaerobic digestion process*. Processes, Vol. 11 No. 2. pp. 514. 2023.

[3] SIMPSON, A., RANADE, V.V.: *Modelling of hydrodynamic cavitation with orifice: Influence of different orifice designs.* Chemical Engineering Research and Design, Vol. 136. pp. 698-711. 2018.

[4] PIETRYKOWSKI, K., KARPIŃSKI, P.: *Simulation study of hydrodynamic cavitation in the orifice flow*. Applied Computer Science, Vol. 18 No. 3. pp. 31-41. 2022.

[5] EBRAHIMI, B., HE, G., TANG, Y., FRANCHEK, M., LIU, D., PICKETT, J., SPRINGETT, F., FRANKLIN, D.: *Characterization of high-pressure cavitating flow through a thick orifice plate in a pipe of constant cross section.* International Journal of Thermal Sciences, Vol. 114 pp. 229-240. 2017.

[6] FARD, M. B., & NIKSERESHT, A. H.: *Numerical simulation of unsteady 3D cavitating flows over axisymmetric cavitators*. Scientia Iranica, Vol. 19 No. 5. pp. 1258-1264. 2012.

ÁRAMLÁSTANI JELLEMZŐK NUMERIKUS VIZSGÁLATA TRANSZVERZÁLIS TESLA SZELEPBEN

NUMERICAL INVESTIGATION OF FLOW CHARACTERISTICS IN TRANSVERSAL TESLA VALVE

PETERCSÁK Dominik[1], MOLNÁR Sándor[2], BOLLÓ Betti[3]

[1]MSc, hallgató, dominik.petercsak@gmail.com
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

[2]MSc, hallgató, molnars700@gmail.com
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

[3]Egyetemi docens, betti.bollo@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

Kivonat: *A tanulmányban egy új, háromdimenziós, transzverzális geometriájú Tesla-szelep numerikus vizsgálatát mutatjuk be, amelyben a folyadékcsatornákat határoló fülek 90°-os térbeli elrendezést alkotnak. A kialakítás célja az irányfüggő hidraulikai ellenállás növelése a komplex térbeli áramlási pályák kihasználásával. A geometriát ANSYS Fluent környezetben szimuláltuk, turbulens áramlásra jellemző Reynolds-szám-tartomány alkalmazásával. Az értékelés során a nyomásesés, az áramlási aszimmetria és a visszafolyás-gátlás hatékonysága került vizsgálatra. Eredményeink azt mutatják, hogy a bemutatott 3D-s konfiguráció nem javítja a szelep egyirányú karakterisztikáját a hagyományos 2D-s kialakításhoz képest, viszont az elképzelés ígéretes alapot nyújt új generációs passzív mikrofluidikai és áramlásszabályozó eszközök fejlesztéséhez.*

Kulcsszavak: *CFD, Tesla-szelep, mikrofluidika,*

Abstract: In this study, we present a numerical investigation of a novel three-dimensional Tesla valve with a transversal geometry, in which the tabs delimiting the fluid channels are arranged in a 90° spatial configuration. The design aims to increase direction-dependent hydraulic resistance by exploiting complex spatial flow paths. The geometry was simulated in ANSYS Fluent using a Reynolds number range characteristic of turbulent flow. The evaluation focused on pressure drop, flow asymmetry, and backflow-prevention efficiency. Our results show that the proposed 3D configuration does not improve the valve's unidirectional characteristics compared to conventional 2D designs; however, the concept provides a promising foundation for the development of next-generation passive microfluidic and flow-control devices.

Keywords: *CFD*, *Tesla-valve*, *microfluidics*

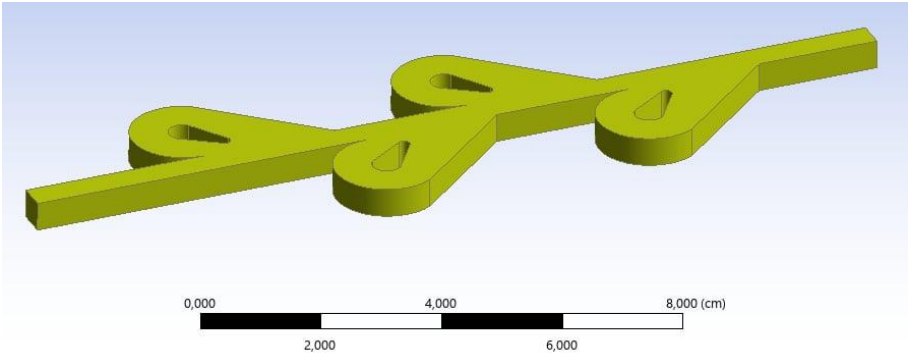
1. BEVEZETÉS

A mérnöki gyakorlatban minden hidraulikus és pneumatikus rendszert úgy terveznek, hogy azok meghatározott nyomásviszonyok mellett üzemeljenek. Az ilyen rendszerek nyomásszabályozására mozgó alkatrészekkel működő szelepeket alkalmaznak, melyek egy idő után elkopnak, meghibásodnak, szivároghatnak. Ezen problémák kiküszöbölésére született a Tesla-szelep ötlete, ami mozgó alkatrészek nélkül, passzív módon befolyásolja az áramló kontinuumok nyomását és sebességét, és bizonyos szintű diodicitást biztosít a rendszernek. [1-5] Ezáltal a Tesla-szelep egyik irányban nagyobb nyomásesést eredményez, leggyakrabban ezen viselkedés optimalizálása áll a kutatások középpontjában.

2. A GEOMETRIAI KIALAKÍTÁS

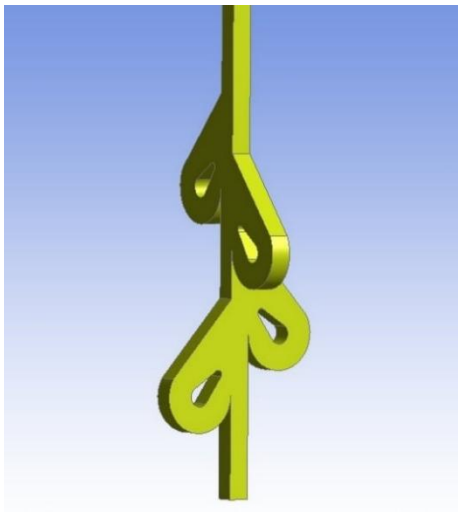
A mi általunk vizsgált, speciális 3D geometria kialakításánál a fő cél az volt, hogy a szelep térbeli jellegét minél hatékonyabban tudjuk kihasználni és vizsgálni. Ennek érdekében a geometriai elemeket úgy rendeztük el, hogy a háromdimenziós áramlási jelenségek minél inkább érvényesüljenek. A 90°-ban elhelyezett csatornaelemek olyan térbeli elrendezést hoznak létre, amely természetes módon generál bonyolultabb áramlási mintázatokat, és segíti a szelep irányfüggő működésének elemzését.

Összehasonlítási alapként megvizsgáltuk egy hagyományos Tesla-szelep viselkedését is azonos áramlástani jellemzők mellett (1. ábra), amit 2D Tesla-szelepnek neveztünk, mivel a csatorna egyik párhuzamos oldalfalain találhatóak a mellékágak.



1. ábra: *A 2D Tesla-szelep kialakítása az összehasonlításhoz*

A 2. ábrán pedig az általunk vizsgált kialakítás figyelhető meg, ezt 3D Tesla-szelepnek nevezzük, mivel a csatorna minden oldalán található mellékág. A létrehozott 3 dimenziós, transzverzális geometria összességében olyan alapot ad, amely jól szemlélteti a térbeliségből fakadó esetleges előnyöket biztosító különbségeket, és alkalmas az áramlástani sajátosságok kvalitatív vizsgálatára. A numerikus számítások során három különböző sebességnél vizsgáltuk meg: 5 m/s, 10 m/s és 15 m/s. A számítások során k-ω turbulencia modellt használtuk [5]. A nyomás és a sebesség összekapcsolására SIMPLE módszert alkalmaztuk. A térbeli diszkretizációval kapcsolatban a gradienshez a legkisebb négyzetek cella alapú diszkrét módszerét, a nyomáshoz pedig a PRESTO módszert használtuk.



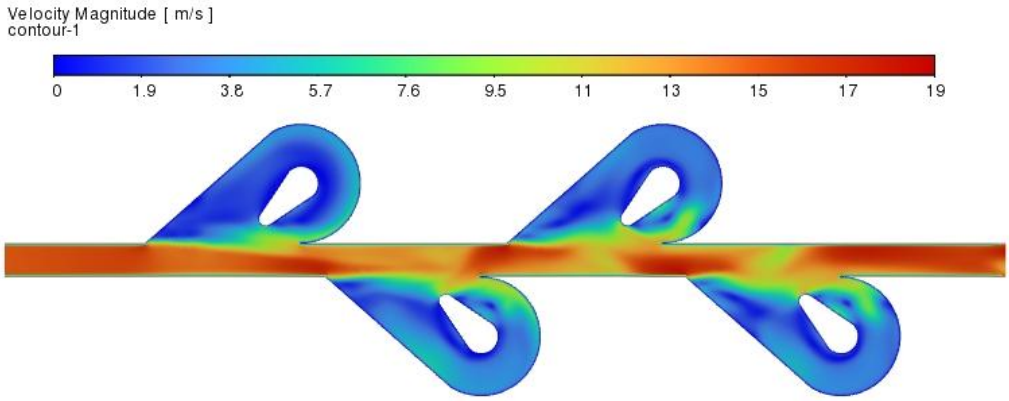
2. ábra: *A 3D Tesla-szelep kialakítása az összehasonlításhoz*

3. A SZIMULÁCIÓ EREDMÉNYEI

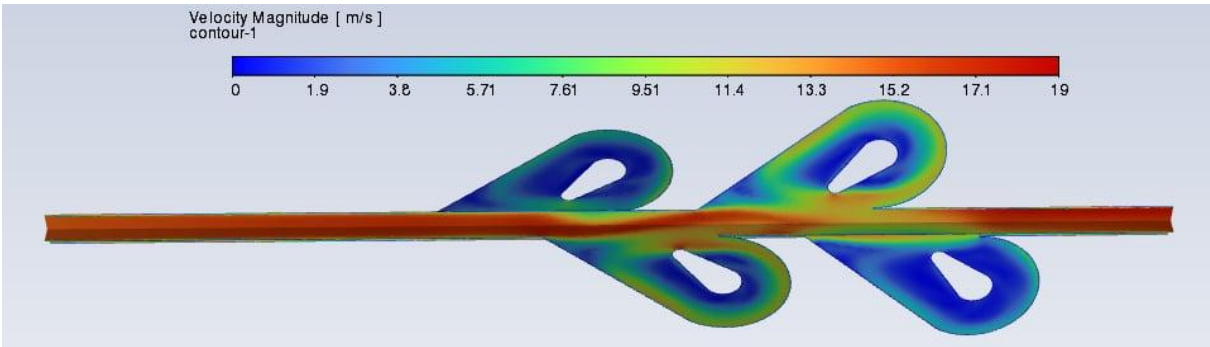
A szimulációk alapján a 3D-s, transzverzális elrendezésű Tesla-szelep jól érzékelhetően eltérő áramlási viselkedést mutatott a be- és kiáramlási irány között. A turbulens tartományban végzett vizsgálatok során egyértelműen kirajzolódtak azok a jellegzetes áramlási mintázatok (például lokális örvényzónák és energiaveszteségi területek), amelyek a szelep egyirányúságának kialakulásához hozzájárulnak. A 90°-os térbeli elforgatásból adódó csatornaelrendezés áramlási torzulásokat hozott létre a nem preferált irányban, míg a preferált irányban a fluidum viszonylag egyenletesebb és kevésbé akadályozott áramlást mutatott.

3.1. A 2D és 3D Tesla-szelepek áramlástani viselkedése

A 3. és 4. ábrák az ellenirányú működés során bekövetkező torzulásokat szemlélteti a sebesség paraméter felhasználásával.



3. ábra: *A 2D Tesla-szelep sebességviszonyai állandó térfogatáram mellett*

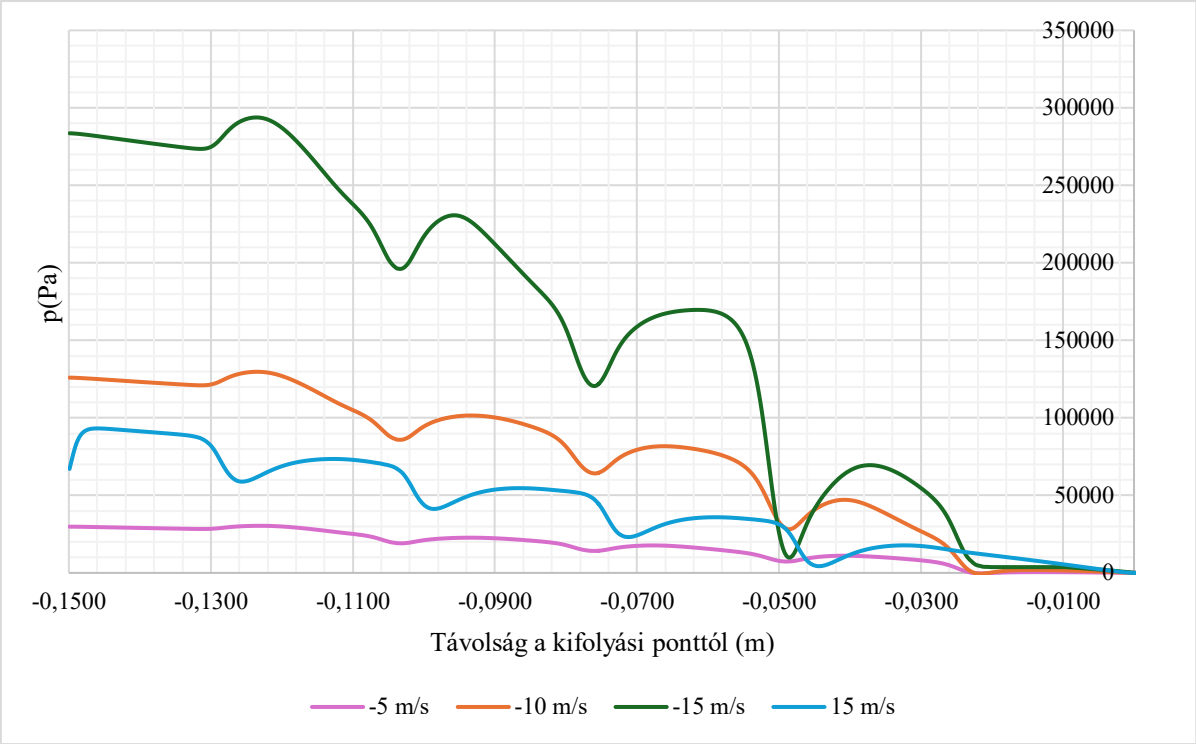


4. ábra: *A 3D Tesla-szelep sebességviszonyai állandó térfogatáram mellett*

A két képen jól megfigyelhető a 2D és 3D Tesla-szelepek áramlási sajátosságainak különbsége. A sebességmező alapján mind a 2D-s, mind pedig a 3D-s geometria jellegzetes örvényképződést mutat, amely egyértelműen kirajzolja a szelep kétirányúságot korlátozó visszaforgó zónáit. A sebességmezők vizuálisan is szemléltetik, hogyan terelődik a folyadék a különböző geometriákban, illetve hol alakulnak ki nagyobb sebességű vagy stagnáló tartományok.

3.2. A 2D és 3D Tesla-szelepek összehasonlítása diodicitás szempontjából

A vizsgálatok során megfigyelhető volt a nyomásesés különbsége a két irány között, ami jól szemlélteti a térbeli geometria egyenirányító hatását. A csatornán belül kialakuló térbeli örvényszerkezetek a visszafolyás irányában jelentős energiaveszteséget okoztak, míg az előre irányuló áramlás esetén ezek hatása lényegesen kisebb volt. A következőkben azt szemléltetjük, hogyan alakult a nyomás a 2D és 3D geometriák középvonala mentén (5. és 6. ábra).



5. ábra: *A nyomás alakulása a 2D geometria hossza mentén*

A kapott adatok és időszerű vizsgálatok jól illeszkednek a hagyományos, 2 dimenziós Tesla-szelepek elvárt viselkedéséhez. Megfigyelhető, hogy a kisebb ellenállású irányban lényegesen kisebb a nyomásesés, mint az ellenirányban.

Az ábrán a negatív sebességek az ellenirányú áramlást képviselik, a pozitív sebesség pedig a kisebb áramlási ellenállást képviselő irányt.

Az egyik leggyakrabban használt mérőszám a Tesla-szelepek jóságának jellemzéséhez az úgynevezett diodicitás, mely úgy számítható, hogy vesszük azonos szakaszon, azonos térfogatáram mellett a nyomásesés mértékét nyitó-, illetve záróirányban, majd ezek aránya adja meg, hogy hányszor nagyobb a szelep ellenállása a nem kívánt áramlási irányban. [2]

Felírható tehát az alábbi összefüggés:

$$D = \frac{\Delta p_z}{\Delta p_{ny}} \qquad (1.)$$

ahol:

D a diodicitás mértéke;

Δp_z a záróirányú áramlás során kialakult nyomásesés;

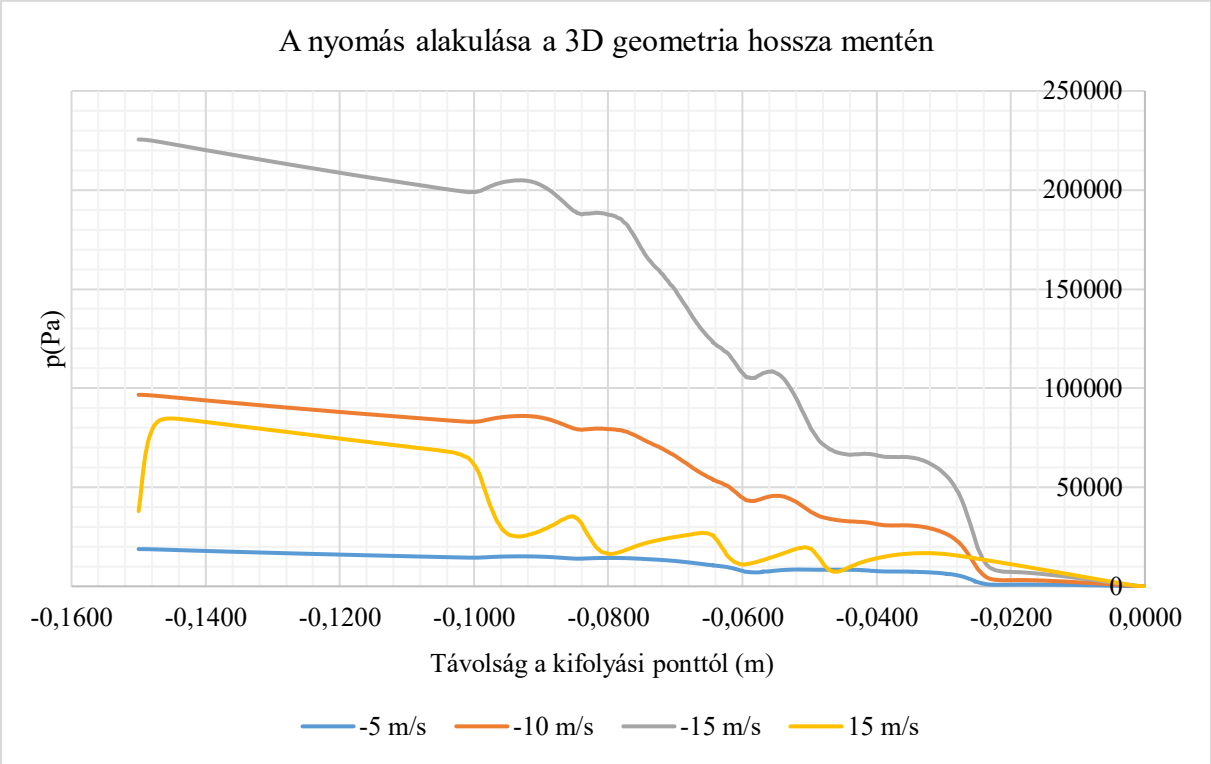
Δp_{ny} a nyitóirányú áramlás során kialakuló nyomásesés.

A 2D Tesla-szelep diodicitása a következőképpen adódott, a kiáramlási ponttól számított 2.

és 13. centiméter között (a legelső áramlásterelő mellékcsatorna hatásától a legutolsó mellékcsatorna hatásáig értelmezett tartomány):

$$D = \frac{274819\ Pa - 3737\ Pa}{82140\ Pa - 11368\ Pa} = \frac{271082\ Pa}{70772\ Pa} = 3{,}83. \qquad (2.)$$

Az általunk vizsgált 3D Tesla-szelep nyomás értékei a középvonal mentén (6. ábra) és diodicitása pedig a következőképpen alakulnak.



6. ábra: *A nyomás alakulása a 3D Tesla szelep középvonala mentén*

A 3D Tesla-szelep diodicitása a kiáramlási ponttól vett 2. és 10. centiméter között:

$$D = \frac{199021\ Pa - 7254\ Pa}{62047\ Pa - 11169\ Pa} = \frac{191767\ Pa}{60878\ Pa} = 3{,}15. \qquad (3.)$$

Mindkét esetben számított értékből levonható a következtetés, hogy a szelepek megbízhatóan működnek a részleges egyenirányítás során, legalább 3-szoros ellenállást képviselnek a nem kívánt áramlási irányba.

A szoftverből kinyert szimulációs adatok segítségével meghatároztuk mind a három vizsgált sebességre vonatkozóan a diodicitásokat mindkét geometria esetében. Ezt az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat: *A számított diodicitások különböző sebességeknél*

	5 m/s	**10 m/s**	**15 m/s**
2D szelep diodicitása	3,25	3,96	3,83
3D szelep diodicitása	1,83	3,26	3,15

A táblázatból az látszik, hogy a 3 sebesség közül a 10 m/s sebesség mellett a legoptimálisabb az általunk vizsgált Tesla-szelepek működése.

4. ÖSSZEGZÉS

A vizsgálatok rámutatnak, hogy a bemutatott 3D transzverzális Tesla-szelep jelen formájában a szimulációk alapján nem mutat jobb hidrodinamikai teljesítményt a hagyományos kialakításokhoz képest. Az 5 m/s-nál nagyobb bemeneti sebesség esetén jó közelítéssel azonos áramlástani ellenállás és diodicitás mellett kompaktabb formában is megvalósítható. A rövidebb geometria előnyt jelent a beépíthetőség szempontjából, különösen olyan alkalmazásokban, ahol a rendelkezésre álló hely korlátozott. Ez a tulajdonság a szelep integrálhatóságát és potenciális alkalmazási körét is növeli. A 3D elrendezésből adódó keresztirányú áramlások, örvényképződések és lokális turbulenciajelenségek még rengeteg lehetőséget hordoznak magukban. A geometria továbbfejleszthető, módosítható csatornaszögekkel, terelőelemekkel, eltérő profilú mellékágakkal vagy akár adaptív, skálázható struktúrákkal.

Összességében a vizsgált konfiguráció nem a legoptimálisabb választás, de jó kiindulási alapot jelent további kutatásokhoz. A 3D-s térbeli hatások mélyebb feltárása – például részletesebb áramlási mezőelemzéssel, különböző Reynolds-tartományokkal vagy tranziens vizsgálatokkal új irányokat nyithat a passzív áramlástechnikai eszközök fejlesztésében.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] QIAN, J. Y., CHEN, M. R., LIU, X. L., JIN, Z. J.: *A numerical investigation of the flow of nanofluids through a micro Tesla valve*. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, Vol. 20. No. 1. pp. 50–60. 2019. https://doi.org/10.1631/jzus.A1800431

[2] ZHAO, Y.J, TONG, J.B, ZHANG, Y-L, XU, X.W, TONG, L.H.: *Hydraulic loss experiment of straight-through Tesla valve in forward and reverse directions*. Science Progress Vol. 107. No. 3. 2024. doi:10.1177/00368504241269433

[3] NIKOLA, T., & INDIVIDUAL. (1916, February 21). *US1329559A - Valvular conduit - Google Patents*. https://patents.google.com/patent/US1329559A/en

[4] ZHANG, YL., TONG, JB., ZHU, ZC.: *Numerical calculation of forward and reverse flow in Tesla valves with different longitudinal width-to-narrow ratios*. Scientific Reports Vol. 13. pp. 12496. 2023. https://doi.org/10.1038/s41598-023-39758-3

[5] LIU, Z., SHAO, W. Q., SUN, Y., & SUN, B. H.: *Scaling law of the one-direction flow characteristics of symmetric Tesla valve*. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, Vol. 16. No. 1. pp. 441-452. 2022.

A HIDROGÉNHAJTÁS SZEREPE A KÖZLEKEDÉS DEKARBONIZÁCIÓJÁBAN

THE ROLE OF HYDROGEN PROPULSION IN THE DECARBONIZATION OF TRANSPORTATION

HEGEDÜS Botond László[1], BENCS Péter[2]

[1]Műszaki menedzser hallgató, hegedus.botond.laszlo99@gmail.com
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

[2]PhD., egyetemi docens, peter.bencs@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

Kivonat: *A közlekedési szektor a globális üvegházhatású gázkibocsátás egyik legjelentősebb forrása, ezért a fenntartható mobilitás megteremtése kulcsfontosságú a klímavédelmi célok elérésében. A hagyományos belsőégésű motorok alacsony hatásfoka és magas szén-dioxid-kibocsátása hosszú távon nem tartható fenn, így új hajtástechnológiákra van szükség. A hidrogén üzemanyagcellás járművek az akkumulátoros elektromos autók mellett a közlekedés dekarbonizációjának egyik legígéretesebb megoldását kínálják. A tanulmány áttekinti a hidrogénhajtású járművek teljesítményét, környezeti hatásait és gazdasági megvalósíthatóságát. A működésük során lokális szén-dioxid- és légszennyezőanyag-kibocsátás nem keletkezik, és energiahatékonyságuk meghaladja a belsőégésű motorokét. A belsőégésű motorok fokozatosan háttérbe szorulnak, az akkumulátoros elektromos járművek a városi és rövid távú közlekedésben válnak dominánssá, míg a hidrogénhajtás a hosszabb távú és nagy teljesítményű járművek szegmensében kínálhat fenntartható alternatívát.*

Kulcsszavak: *hidrogén üzemanyagcella, közlekedés dekarbonizációja, alternatív hajtástechnológia*

Abstract: *The transport sector is one of the most significant sources of global greenhouse gas emissions, which is why creating sustainable mobility is key to achieving climate protection goals. The low efficiency and high carbon dioxide emissions of traditional internal combustion engines are unsustainable in the long term, so new propulsion technologies are needed. Alongside battery electric cars, hydrogen fuel cell vehicles offer one of the most promising solutions for decarbonizing transport. The study reviews the performance, environmental impact, and economic feasibility of hydrogen-powered vehicles. They produce no local carbon dioxide or air pollutant emissions during operation, and their energy efficiency exceeds that of internal combustion engines. Internal combustion engines are gradually being phased out, battery electric vehicles are becoming dominant in urban and short-distance transport, while hydrogen propulsion offers a sustainable alternative in the longer-distance and high-performance vehicle segment.*

Keywords: *hydrogen fuel cell, decarbonization of transport, alternative powertrain technology*

1. BEVEZETÉS

A közlekedési ágazat napjaink egyik legfontosabb energiafogyasztó és környezetszennyező területe. A globális energiafelhasználás és szén-dioxid-kibocsátás jelentős hányada a közlekedéshez köthető, amely döntően fosszilis energiahordozókra támaszkodik. Az elmúlt évtizedekben a gyors urbanizáció, a járműállomány növekedése, valamint a globalizált kereskedelmi hálózat együttesen fokozta az ágazatból származó üvegházhatású gázok mennyiségét. A közlekedéshez kapcsolódó környezeti problémák nem csupán a klímaváltozást erősítik, hanem közvetlenül befolyásolják a városi levegőminőséget, az emberek egészségét és az energiaellátás biztonságát is. E tényezők együttesen indokolják, hogy a közlekedés dekarbonizációja kulcskérdés a fenntarthatósági stratégiákban.

Az alternatív hajtástechnológiák közül az akkumulátoros elektromos járművek (BEV) és a hidrogén üzemanyagcellás járművek (FCEV) állnak a figyelem középpontjában. Az elektromos

járművek gyors terjedése jól érzékelhető a személygépjármű-piacon, ugyanakkor a hidrogén üzemanyagcellás hajtás is egyre nagyobb hangsúlyt kap, különösen olyan alkalmazási területeken, ahol a hosszú hatótáv és a gyors tankolás elsődleges szempont. A hidrogénhajtás vizsgálata ezért alapvető fontosságú a fenntartható közlekedés jövője szempontjából.

A hidrogén, mint energiahordozó, különleges tulajdonságokkal rendelkezik. Magas az energiasűrűsége tömeg alapon, ami előnyös a közlekedési alkalmazásokban, ugyanakkor alacsony térfogatsűrűsége miatt tárolása és szállítása komoly technikai kihívásokat vet fel. Az üzemanyagcellás technológia alapja a protoncserélő membrános cella (PEMFC), amelyben a hidrogén és az oxigén elektrokémiai reakció során villamos energiát és vízgőzt termel. A folyamat során közvetlen szennyezőanyag kibocsátás nem keletkezik, ezért a jármű lokálisan zéró emisszziósnak tekinthető. A valós környezeti hatások azonban csak a teljes életciklus vizsgálatával érthetők meg, hiszen a hidrogén előállítása, tárolása és szállítása is energiaigényes folyamat.

A hidrogén üzemanyagcellás járművek energiafelhasználása a hagyományos belső égésű motorokhoz képest számottevően alacsonyabb lehet. Egyes elemzések szerint az ilyen járművek 29–66%-kal kevesebb energiát igényelhetnek, mint a fosszilis üzemű alternatívák. Ez az előny azonban nem automatikus, hiszen a teljes energialánc hatásfoka, az üzemanyag előállításának módszere és az infrastruktúra fejlettsége egyaránt befolyásolja a végeredményt.

A szén-dioxid-kibocsátás tekintetében is jelentős potenciál mutatkozik. A „well-to-wheel" (WTW) elemzések azt mutatják, hogy a hidrogén üzemanyagcellás járművek 31–80%-kal kevesebb üvegházhatású gázt bocsáthatnak ki, mint a belső égésű járművek. A különbség mértéke döntően attól függ, hogy a hidrogént milyen forrásból állítják elő. Ha fosszilis energiahordozókból, például földgáz reformálásával készül, akkor az emissziócsökkentés mérsékelt, sőt, bizonyos esetekben csak kis előny mutatható ki. Amennyiben viszont megújuló energiaforrások felhasználásával, elektrolízis útján történik az előállítás, akkor az emisszió drasztikusan csökken, és a technológia valóban karbonsemleges közlekedést tehet lehetővé.

A gazdasági elemzések jóval árnyaltabb képet festenek. A hidrogén üzemanyagcellás járművek gyártása jelenleg drágább, mint a hagyományos járműveké, mivel az üzemanyagcellák előállítása költséges alapanyagokat, például platinát igényel. Emellett a nagynyomású tárolótartályok és a hidrogénelosztó infrastruktúra kiépítése is jelentős beruházásokat követel. A teljes életciklus költség akár 1,2 és 12,1-szer között mozoghat a fosszilis üzemanyaggal működő járművekhez képest. Ez a széles tartomány jól mutatja, hogy a költségek nagymértékben függenek az alkalmazott technológiáktól, a helyi energiaáraktól és a politikai-támogatási környezettől.

Az infrastruktúra kérdése további kritikus tényező. A hidrogén töltőállomások száma világszerte csekély, kiépítésük pedig költséges és időigényes. A technológia terjedése ezért szoros összefüggésben áll azzal, hogy mennyire sikerül kialakítani egy sűrű, megbízható és biztonságos ellátóhálózatot. A járművek és az infrastruktúra fejlődésének párhuzamosan kell haladnia, különben a hidrogénmobilitás nem tud széles körben elterjedni.

A hidrogén üzemanyagcellás járművek technológiája komoly ígéretet hordoz a közlekedés fenntarthatóbbá tételében, ugyanakkor számos feltétel teljesülése szükséges ahhoz, hogy a gyakorlatban is versenyképessé váljon. Energiahatékonyság és emisszió szempontjából kedvező képet mutat, gazdasági és infrastrukturális oldalon viszont még jelentős kihívásokkal küzd. A következő évtizedekben a kutatás fejlesztési erőfeszítések, a megújuló energiaforrásokra épülő hidrogéntermelés, valamint a politikai és piaci ösztönzők együttesen határozzák meg, hogy a hidrogén üzemanyagcellás járművek valóban kulcsszereplővé válhatnak-e a közlekedés dekarbonizációjában [1-4].

2. TELJESÍTMÉNY ÉS EMISSZIÓS HATÁSOK

A hidrogén üzemanyagcellás járművek egyik legfontosabb előnye a hagyományos belső égésű motorokkal szemben az energiahatékonyság. Míg a belső égésű motorok tipikus hatásfoka mindössze 20–30% között mozog, addig az üzemanyagcella rendszerek 40–60%-os hatásfokot is elérhetnek. Ez a különbség közvetlenül befolyásolja a járművek energiafelhasználását, amely a teljes közlekedési ágazat szempontjából meghatározó tényező. A vizsgálatok szerint a hidrogén üzemanyagcellás járművek akár 29–66%-kal kevesebb energiát fogyaszthatnak, mint a fosszilis üzemanyaggal működő járművek. Ez azt jelenti, hogy ugyanakkora távolság megtételéhez lényegesen kevesebb primer energiaforrásra van szükség, ami globális szinten is érezhető hatást gyakorolhat az energiafelhasználás mérséklésére.

A teljesítmény másik dimenziója a hatótáv és a tankolási idő. A hidrogén járművek egyik legnagyobb előnye az akkumulátoros elektromos járművekkel szemben a gyors tankolhatóság. A nagynyomású hidrogéntároló rendszerek lehetővé teszik, hogy a jármű 3–5 perc alatt teljesen feltölthető legyen, ami közel azonos a hagyományos benzines vagy dízel járművek tankolási idejével. A hatótáv szintén kiemelkedő: egy modern üzemanyagcellás jármű 500–700 kilométer megtételére is képes egyetlen tankolással. Ez különösen fontos a hosszú távú közlekedésben, a teherszállításban és a tömegközlekedésben, ahol a hatótáv és a rendelkezésre állás kritikus szempont.

A teljesítményhez kapcsolódóan meg kell említeni az üzemanyagcella rendszerek rugalmasságát is. Az elektromos energia előállítása a cellában lineárisan követi a hidrogénfelhasználást, így a jármű energiaellátása folyamatos és stabil. Ez a tulajdonság hozzájárul a vezetési élményhez, amely csendes, rezgésmentes és folyamatos teljesítményt nyújt. Ugyanakkor technikai kihívást jelent a rendszerek tartóssága: az üzemanyagcellák élettartama jelenleg alacsonyabb, mint a belsőégésű motoroké, és az alkatrészek, különösen a katalizátorok, fokozatos degradációja befolyásolja a hosszú távú teljesítményt.

Az emissziós hatások vizsgálata során két fő szempontot különítenek el: a jármű lokális kibocsátását és a teljes energialánc emisszióját. A jármű működése során közvetlen szén-dioxid- vagy más szennyezőanyag-kibocsátás nem történik, hiszen a folyamat melléktermére kizárólag vízgőz. Ezért az üzemanyagcellás járművek lokális szinten zéró emissziós megoldást jelentenek, ami különösen fontos a városokban, ahol a légszennyezés súlyos egészségügyi problémákat okoz.

A valós környezeti előnyök megítélése azonban csak a teljes életciklus, más néven „well-to-wheel" szemléletben lehetséges. Ez magában foglalja a hidrogén előállítását, tárolását, szállítását és a jármű működését is. Az eredmények szerint, ha a hidrogént fosszilis energiahordozókból, például földgáz reformálásával állítják elő, a kibocsátás csak mérsékelten alacsonyabb a dízel- vagy benzinüzemű járművekhez képest. Ebben az esetben a teljes emissziócsökkentés 10–30% körül mozoghat, amely nem elegendő a közlekedés globális szénlábnyomának jelentős mérsékléséhez. Ha azonban a hidrogén megújuló energiaforrások segítségével, elektrolízis útján készül, a kibocsátás drasztikusan csökkenthető. A vizsgálatok alapján az emissziócsökkenés mértéke ilyen esetben 70–90% is lehet, ami valóban karbonsemleges alternatívává teheti a technológiát.

A környezeti hatások közé nemcsak a szén-dioxid, hanem más szennyezőanyagok is beletartoznak. A belső égésű motorok jelentős mennyiségű nitrogén-oxidot (NOx), szén-monoxidot (CO) és szilárd részecskét bocsátanak ki, amelyek közvetlenül rontják a levegőminőséget és egészségkárosító hatásúak. Az üzemanyagcellás járművek esetében ezek a kibocsátások gyakorlatilag megszűnnek, ami jelentős előrelépést jelenthet a városi környezetben tapasztalható légszennyezés csökkentésében. Ezen túlmenően a zajterhelés is jóval alacsonyabb, mivel az üzemanyagcellás hajtás hangtalan működést biztosít.

1. táblázat: *Különböző hajtástechnológiák előnyei és hátrányai [1]*

Technológia	Előnyök	Hátrányok
Dízel belsőégésű motor (Diesel ICE)	• Kiforrott technológia • Kényelmes tankolás • Magas tartósság	• Ingadozó üzemanyagárak • Magas károsanyag-kibocsátás • Zajosabb lehet • Alacsony energiahatékonyság
Akkumulátoros elektromos jármű (BEV)	• Viszonylag kiforrott technológia • Nincs kipufogógáz-kibocsátás • Kényelmes töltés • Zajmentes, sima haladás	• Hosszabb töltési idő • Kisebb hatótávolság • Nagy környezeti terhelésű gyártás
Hidrogén üzemanyagcellás elektromos jármű (HFCEV)	• Nincs kipufogógáz-kibocsátás • Gyors újratöltés • Rugalmas hatótáv • Magas energiasűrűség • A hidrogén megújuló forrásból is előállítható	• Magas költség • Korlátozott hidrogén infrastruktúra • Hatékony tárolási és szállítási technológiák hiánya • Üzemanyagcella elhasználódás / degradáció
Hidrogén üzemanyagcellás hibrid elektromos jármű (HFCHEV)	• Magas üzemanyag-hatékonyság • Zajmentes, sima haladás • Rugalmas hatótáv • Hosszabb élettartamú üzemelés	• Kevésbé kiforrott technológia • Korlátozott infrastruktúra és kapcsolódó technológiái • Magas költség • Üzemanyagcella elhasználódás / degradáció

Fontos hangsúlyozni, hogy az emissziós előnyök elérése nagymértékben függ a hidrogén előállításának módjától és a teljes ellátási lánc energiahatékonyságától. A zöld hidrogén jelenleg drágább, és előállítása jelentős mennyiségű megújuló energiát igényel. Amíg a hidrogén előállításának nagy része fosszilis alapú marad, addig a technológia valódi klímavédelmi potenciálja korlátozott. Ezért a jövő egyik kulcskérdése, hogy a megújuló energiák mennyire tudják kiváltani a fosszilis forrásokat a hidrogéntermelésben.

A hidrogén üzemanyagcellás járművek teljesítmény szempontjából versenyképesek a hagyományos és akkumulátoros elektromos járművekkel, különösen a hatótáv és a tankolási idő tekintetében (1. táblázat). Emissziós hatásaik a lokális zéró kibocsátás miatt kedvezőek, globális szinten pedig a hidrogén előállításától függően jelenthetnek mérsékelt vagy radikális előrelépést a fenntarthatóság felé. A következő évek kutatásai és fejlesztései, valamint a hidrogéntermelés zöldítése határozzák meg, hogy a technológia valóban képes lesz-e betölteni azt a szerepet, amelyet a közlekedés dekarbonizációjában szánnak neki [5-7].

3. GAZDASÁGI ELEMZÉS

A hidrogén üzemanyagcellás járművek technológiája jelenleg még a fejlesztés és korlátozott piaci bevezetés fázisában van, ami nagymértékben tükröződik a költségekben is. A gazdasági megvalósíthatóság kérdése kulcsfontosságú, hiszen a technológia akkor válhat tömegesen elérhetővé, ha az ár versenyben képes felvenni a harcot a belső égésű motorokkal és az akkumulátoros elektromos járművekkel. A gazdasági elemzések több tényezőből állnak: a járművek előállítási költsége, az üzemanyag előállítása és szállítása, a töltőinfrastruktúra kiépítése, valamint az életciklus-költségek mind jelentős szerepet játszanak.

Az egyik legfontosabb költségtényező az üzemanyagcella előállítása. A jelenleg alkalmazott protoncserélő membrános üzemanyagcellák katalizátorként platinát használnak, amely ritka és drága nemesfém. A platina mennyisége ugyan folyamatosan csökken a fejlesztéseknek köszönhetően, de továbbra is a költségek jelentős hányadát teszi ki. A jövő egyik kihívása a platinát helyettesítő, olcsóbb és bőségesebb anyagok megtalálása, illetve az olyan új cellakialakítások kifejlesztése, amelyek kisebb mennyiségben igénylik a nemesfémeket.

A második nagy költségcsoport a hidrogéntárolás. A járművekben alkalmazott nagynyomású tartályok 700 bar nyomáson képesek a hidrogént biztonságosan tárolni, ami magas műszaki követelményeket támaszt az anyagokkal és a gyártási folyamatokkal szemben. Ezeknek a tartályoknak a gyártása költséges, és jelenleg még nem állnak rendelkezésre széles körben elérhető, olcsóbb alternatívák. Az üzemanyagcellás járművek árát ezért jelentősen meghatározza a tárolórendszer előállításának költsége.

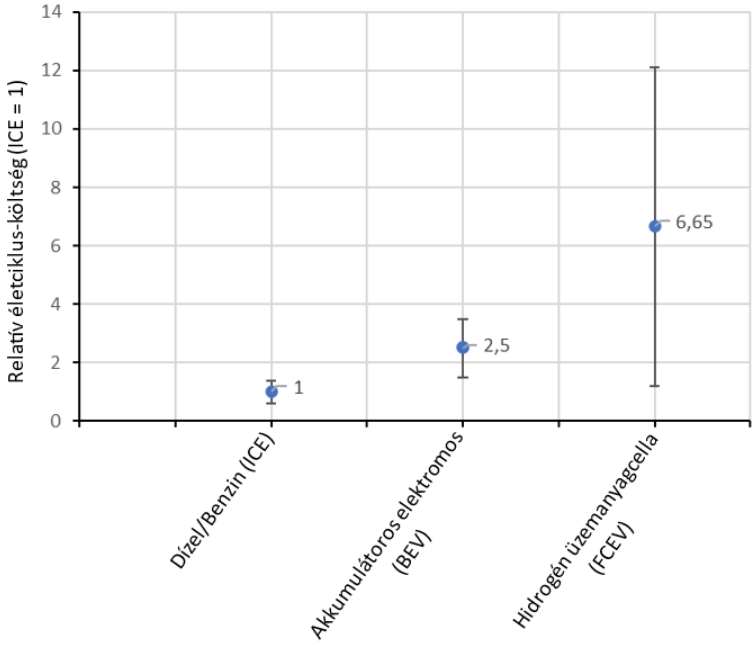
Az üzemanyag, vagyis a hidrogén előállítása szintén meghatározó tényező. A legelterjedtebb technológia a földgáz reformálása, amely viszonylag olcsó, de magas szén-dioxid-kibocsátással jár. Ezzel szemben az elektrolízis, amely megújuló energiából is táplálható, környezetbarát megoldást kínál, de jelenleg jóval drágább. A zöld hidrogén költsége ma átlagosan 2–6 euró kilogrammonként, míg a földgáz alapú, úgynevezett szürke hidrogén olcsóbban előállítható. A hosszú távú cél az, hogy a zöld hidrogén ára 1–2 euró kilogrammonkénti szintre csökkenjen, ami már versenyképessé tenné a technológiát a fosszilis energiahordozókkal szemben.

A hidrogén szállítása és elosztása szintén gazdasági kihívásokat rejt. A nagy nyomású vagy cseppfolyósított hidrogén szállítása energiaigényes és költséges folyamat. Infrastruktúra hiányában sok esetben tartálykocsik vagy speciális szállítóeszközök szükségesek, amelyek növelik az üzemeltetési költségeket. A legkedvezőbb megoldás a helyben előállított hidrogén használata lenne, ami csökkentené a szállítási költségeket, de ehhez elengedhetetlen a decentralizált, megújuló energiára épülő elektrolízis rendszerek elterjedése.

Az infrastruktúra kiépítése önmagában is hatalmas beruházást igényel. Egy hidrogén töltőállomás létesítése többszörösébe kerül egy hagyományos benzinkútnak, és a működtetése is költségesebb (hidrogén töltőállomás ~4x drágább, mint egy hagyományos benzinkút vagy elektromos töltőállomás létesítése (1 DC töltő)). Jelenleg világszerte csak néhány ezer hidrogén töltőállomás működik, amelyek elsősorban Japánban, Dél-Koreában, Németországban és az Egyesült Államokban találhatók. A töltőhálózat hiánya visszatartja a keresletet, míg a kereslet hiánya visszatartja az infrastruktúra bővítését – ez az úgynevezett „tyúk és tojás” probléma. Ezt a dilemmát csak kormányzati támogatásokkal és iparági összefogással lehet megoldani.

Az életciklus-költségek vizsgálata szerint a hidrogén üzemanyagcellás járművek jelenleg 1,2–12,1-szer drágábbak lehetnek a belső égésű motoros járműveknél (CAPEX árra vonatkoztatva). Ez a jelentős szórás annak köszönhető, hogy a költségek nagymértékben függenek az alkalmazott technológiáktól, az energiahordozók árától és az adott ország politikai-támogatási rendszerétől. Ahol erőteljes állami támogatás segíti a zöld hidrogén előállítását és a töltőinfrastruktúra kiépítését, ott a költségek mérséklődnek, és a technológia versenyképessé válhat. Ahol viszont ilyen támogatások hiányoznak, a hidrogénmobilitás nehezen éri el a gazdasági életképességet.

A költségek mellett ugyanakkor vannak olyan tényezők, amelyek hosszabb távon a hidrogén javára billenthetik a mérleget. Ilyen a nagyobb méretgazdaságosság, vagyis az, hogy a tömegtermelés csökkenti az előállítási költségeket. Ugyancsak fontos a technológiai fejlődés, amely új anyagok, hatékonyabb cellák és olcsóbb gyártási folyamatok bevezetését teszi lehetővé. Az energiaárak változása szintén befolyásolja a gazdaságosságot: a fosszilis üzemanyagok árának növekedése versenyképesebbé teheti a hidrogént.



1. ábra: *Járművek életciklus-költségének összehasonlítása [1]*

Összességében a gazdasági elemzések azt mutatják, hogy a hidrogén üzemanyagcellás járművek jelenleg drágábbak, mint alternatív társaik, de hosszabb távon kedvező feltételek mellett versenyképessé válhatnak (1. ábra). A költségek csökkentése szorosan összefügg az iparági fejlesztésekkel, a politikai támogatásokkal és a megújuló energiák térnyerésével. A hidrogén gazdasági életképessége tehát nem statikus, hanem dinamikusan változó tényező, amelyet a technológiai, gazdasági és politikai környezet egyaránt alakít [8-10].

4. ÖSSZEGZÉS ÉS KÖVETKEZTETÉS

A közlekedés dekarbonizációja a 21. század egyik legfontosabb kihívása. A globális energiafelhasználás és a szén-dioxid-kibocsátás jelentős részéért felelős ágazat átalakítása elengedhetetlen a klímavédelmi célok eléréséhez. A lehetséges technológiai utak közül három fő hajtáslánc került a figyelem középpontjába: a belső égésű motor, az akkumulátoros elektromos hajtás és a hidrogén üzemanyagcella. Mindháromnak vannak előnyei és hátrányai, amelyek meghatározzák a jövő közlekedésében betöltött szerepüket.

A belső égésű motorok a 20. század meghatározó technológiáját jelentették, és napjainkban is a járművek döntő többsége ezzel működik. Előnyeik közé tartozik a kiforrott technológia, az olcsó és tömeges gyártás, valamint a globálisan kiépített üzemanyag-ellátó hálózat. Emellett a belső égésű motorok rugalmasak, könnyen tankolhatók, és a járművek ára viszonylag alacsony. Ugyanakkor jelentős hátrányokkal járnak. A hatásfokuk viszonylag alacsony, általában 20–30%, miközben a felhasznált energia nagy része hő formájában vész el. A fosszilis üzemanyagok elégetése nagy mennyiségű szén-dioxidot és egyéb szennyező anyagokat – például

nitrogén-oxidokat, kén-oxidokat és szilárd részecskéket – bocsát a légkörbe, amelyek hozzájárulnak a klímaváltozáshoz és a városi levegőminőség romlásához. További probléma, hogy az olajkészletek végesek, és geopolitikai feszültségek forrását képezik. Mindezek miatt a belső égésű motorok hosszú távon nem fenntarthatóak, és szerepük várhatóan fokozatosan csökken.

Az akkumulátoros elektromos járművek az elmúlt évtizedben hatalmas fejlődésen mentek keresztül, és egyre szélesebb körben terjednek el. Előnyeik közül kiemelkedik a lokális zéró emisszió: működés közben nem bocsátanak ki szén-dioxidot vagy más szennyező anyagot, így különösen a városokban jelentős javulást hozhatnak a levegőminőségben. Magas energiahatékonyságuk, amely a teljes láncot tekintve is kedvezőbb lehet, mint más hajtásoké szintén fontos tényező. Az elektromos hajtás egyszerűbb felépítése kevesebb mozgó alkatrészt igényel, így a karbantartási költségek alacsonyabbak lehetnek. Hátrányaik között említhető az akkumulátorok gyártásának magas környezeti terhe, különösen a lítium, kobalt és más ritkafémek kitermelésével kapcsolatban. Az akkumulátorok újrahasznosítása szintén megoldatlan probléma maradt sok helyen. Az elektromos autók hatótávja javulóban van, de továbbra is alacsonyabb, mint a belső égésű motoroké, és a töltés hosszabb időt vesz igénybe. A töltőhálózat bővül, de még nem mindenhol kielégítő, és az energiaigény növekedése új kihívásokat jelent az elektromos hálózat számára.

A hidrogén üzemanyagcellás járművek a két másik technológia közötti kompromisszumként jelennek meg. Előnyeik közé tartozik a hosszú hatótáv, amely akár 500–700 kilométer is lehet, valamint a gyors tankolás, amely 3–5 perc alatt elvégezhető. Működésük során csak vízgőz keletkezik, így lokálisan zéró emissziót biztosítanak, és teljes életciklusukat tekintve, ha a hidrogént megújuló energiaforrásból állítják elő drasztikus mértékben csökkenthetik a szén-dioxid-kibocsátást. Hátrányaik között kiemelendő a magas gyártási költség, amely elsősorban az üzemanyagcellákban használt platinából és a nagynyomású tárolórendszerekből adódik. A hidrogén előállítása, szállítása és tárolása jelenleg energiaigényes és költséges folyamat, különösen, ha a zöld hidrogén termelését tekintjük. Az infrastruktúra kiépítése világszerte még kezdeti fázisban van, így a felhasználhatóság korlátozott.

Az összehasonlításból kitűnik, hogy nincs egyetlen tökéletes megoldás. A belső égésű motorok olcsósága és elérhetősége továbbra is fontos szerepet biztosít számukra a jelenben, de környezeti terheik miatt hosszú távon visszaszorulásuk elkerülhetetlen. Az akkumulátoros elektromos járművek rövid és középtávon a személygépjárművek piacán meghatározóvá válhatnak, különösen a városi közlekedésben, ahol az alacsony emisszió és a rövidebb hatótáv nem jelent problémát. A hidrogén üzemanyagcellás technológia ugyanakkor ott nyújthat alternatívát, ahol a nagyobb hatótáv, a gyors újratöltés és a nagy teljesítményű járművek például teherautók, buszok vagy távolsági autók igényei dominálnak.

A jövő közlekedése valószínűleg nem egyetlen hajtásmódra épül majd, hanem ezek kombinációjára. A belső égésű motorok fokozatosan háttérbe szorulnak, de bizonyos régiókban még évtizedekig jelen lesznek. Az akkumulátoros elektromos hajtás széles körben elterjed, különösen a személyautók szegmensében, míg a hidrogén üzemanyagcella főként a nehézgépjárművek és a hosszabb távú közlekedés területén találhatja meg a helyét. Az energiaátmenet tehát több technológia együttműködésével fog megvalósulni, ahol mindegyik hajtásmód a maga erősségei alapján járul hozzá a fenntartható közlekedés kialakításához.

Összességében elmondható, hogy a hidrogén üzemanyagcellás járművek fontos kiegészítő szerepet játszhatnak az elektromos és belső égésű technológiák mellett. Bár gazdasági és infrastrukturális kihívásaik jelentősek, környezeti előnyeik és teljesítményük miatt nélkülözhetetlenek lehetnek a közlekedés teljes dekarbonizációjának megvalósításában. Fontos megemlíteni, hogy a nehéz tehergépjárművek (HDV) szegmensében a hidrogén versenyelőnye sokkal erősebb, mint a személyautóknál, ahol a BEV dominancia már látható A jövő közlekedési rendszere tehát sokszínű lesz, és a hidrogén ebben a sokszínűségben egyre fontosabb szerepet kaphat [1].

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] HALDER, P., BABAIE, M., SALEK, F., SHAH, K., STEVANOVIC, S., BODISCO, T. A., & ZARE, A.: *Performance, emissions and economic analyses of hydrogen fuel cell vehicles*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 199, 114543, 2024. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114543

[2] NAVAS-ANGUITA, Z., GARCÍA-GUSANO, D., & IRIBARREN, D.: *A review of techno-economic data for road transportation fuels*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 112, 11–26, 2019. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.041

[3] AJANOVIC, A., & HAAS, R.: *Renewable energy systems implementation in road transport: prospects and impediments*. Renewable Energy and Environmental Sustainability, 6, 39, 2021. https://doi.org/10.1051/rees/2021042

[4] AZAD, A. K., ADHIKARI, J., HALDER, P., RASUL, M. G., HASSAN, N. M. S., KHAN, M. M. K., NAQVI, S. R., & VISWANATHAN, K.: *Performance, emission and combustion characteristics of a diesel engine powered by macadamia and grapeseed biodiesels*. Energies, 13(11), 2748, 2020. https://doi.org/10.3390/en13112748

[5] BODISCO, T. A., RAHMAN, S. A., HOSSAIN, F. M., & BROWN, R. J.: *On-road NOx emissions of a modern commercial light-duty diesel vehicle using a blend of tyre oil and diesel*. Energy Reports, 5, 349–356, 2019. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.03.002

[6] HALDER, P., AZAD, K., SHAH, S., & SARKER, E.: *Prospects and technological advancement of cellulosic bioethanol ecofuel production*. In Elsevier eBooks (pp. 211–236), 2019. https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102728-8.00008-5

[7] AZAD, A., RASUL, M., KHAN, M., SHARMA, S. C., MOFIJUR, M., & BHUIYA, M.: *Prospects, feedstocks and challenges of biodiesel production from beauty leaf oil and castor oil: A nonedible oil sources in Australia*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 61, 302–318, 2016. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.013

[8] SHAFIQUE, M., AZAM, A., RAFIQ, M., & LUO, X.: *Life cycle assessment of electric vehicles and internal combustion engine vehicles: A case study of Hong Kong*. Research in Transportation Economics, 91, 101112, 2021. https://doi.org/10.1016/j.retrec.2021.101112

[9] DAS, H., RAHMAN, M., LI, S., & TAN, C.: *Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 120, 109618, 2019. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109618

[10] ALAVI, F., LEE, E. P., VAN DE WOUW, N., DE SCHUTTER, B., & LUKSZO, Z.: *Fuel cell cars in a microgrid for synergies between hydrogen and electricity networks*. Applied Energy, 192, 296–304, 2016. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.084

MÁGNESES LÁZTERÁPIA: AZ MRSH ÉS SLLG MODELLEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

MAGNETIC HYPERTHERMIA: COMPARISON OF THE MRSH AND SLLG MODELS

HUSZTEK Anna[1], ISZÁLY Zsófia[2], MÁRIÁN István Gábor[3], NÁNDORI István[4]

[1]fizikus mester szakos hallgató, husztekanna@gmail.com
Debreceni Egyetem, Természettudományi és Technológiai Kar, Fizikai Intézet

[2]PhD, tudományos munkatárs, iszaly.zsofia@atomki.hu
HUN-REN, Atommagkutató Intézet, Kísérleti Magfizikai kutatócsoport

[3]PhD, tudományos munkatárs, marian.istvan.gabor@atomki.hu
HUN-REN Atomki, Elméleti Magfizikai Kutatócsoport

[4]PhD, habilitált egyetemi docens, istvan.nandori@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Fizikai Intézeti Tanszék

Kivonat: *A mágneses lázterápia egy rákterápiás módszer, amelyet kiegészítő kezelésként alkalmaznak daganatos betegeknél. Ebben a munkában erre a terápiás módszerre kidolgozott két elméleti modellt, a Martsenyuk-Raikher-Shliomis (MRSh), valamint a sztochasztikus Landau-Lifshitz-Gilbert (sLLG) módszert hasonlítjuk össze a mágneses és hagyományos viszkozitás fogalmán keresztül. Az összehasonlítás eredménye alapján javasoljuk a merőleges AC és DC mágneses terek alkalmazását mágneses részecskealapú képvezérelt hőterápiához.*

Kulcsszavak: *Mágneses hipertermia, MRSh modell, sLLG módszer, mágneses tér*

Abstract: *Magnetic fever therapy is a cancer treatment method used as a complementary therapy for tumor patients. In this work, we compare two theoretical models developed for this therapeutic method—the Martsenyuk–Raikher–Shliomis (MRSh) model and the stochastic Landau–Lifshitz–Gilbert (sLLG) method—through the concepts of magnetic and conventional viscosity. Based on the results of the comparison, we propose the use of perpendicular AC and DC magnetic fields for magnetic-particle-based image-guided hyperthermia.*

Keywords: *Magnetic hyperthermia, MRSh model, sLLG method, magnetic field*

1. BEVEZETÉS

A mágneses lázterápia egy innovatív rákterápiás módszer, amelyet kiegészítő kezelésként alkalmaznak daganatos betegeknél. A kezelés során mágneses nanorészecskéket fecskendeznek a beteg testébe, amelyek a rákos szövetekben felgyülemlenek, ahol külső változó mágneses tér hatására disszipatív mozgást végeznek, amely során hő szabadul fel [1]. A nanorészecske daganatban való felgyülemlése a daganat fokozott permeabilitásának és retenciójának (EPR-hatás) köszönhető, amely lehetővé teszi, hogy a nanorészecskék behatoljanak és felhalmozódjanak a daganat helyén [2]. Statikus és időben változó mágneses tér kombinációjával a hőtermelés térben fókuszálható úgy, hogy a kezelés kizárólag a célzott területen történjen. Ezzel nem csak a kezelés hatékonyságát, de a biztonságát is jelentősen növelni lehet.

A hőtermelés vagy a nanorészecskék, vagy a mágneses momentumuk elfordulásának eredménye. Előbbit a Martsenyuk-Raikher-Shliomis (MRSh) egyenlettel szokás leírni, utóbbit pedig a sztochasztikus Landau-Lifshitz-Gilbert (sLLG) egyenlettel. Kutatómunkánk célja ezen két különböző elméleti modell összehasonlítása.

2. MOTIVÁCIÓ

A mágneses hipertermiás terápiának számos nehézsége és korlátja van. Az egyik legösszetettebb feladat a nanorészecskék tulajdonságai (méret, alak, bevonat, és koncentráció), valamint a külső energiaforrás optimalizálása a lehető leghatásosabb kezelés elérése érdekében.

További kihívás a megfelelő biztonság megteremtése a kezelés során, hiszen a magas hőmérséklet az egészséges szöveteket is roncsolja, és kellemetlenséget, gyulladást, vagy akár a szövetek elhalását okozhatja. Ezért fontos a megfelelő térbeli lokalizálás. Ez megvalósítható gradienssel rendelkező statikus (DC) és időben váltakozó (AC) mágneses tér kombinációjával. Ezek alkalmazásával a hőtermelés csak ott figyelhető meg, ahol a statikus tér nagysága nulla [3].

Az alacsony frekvenciatartomány kiemelt szerepet kap az ún. képvezérelt lázterápiában, amelyet a mágneses nanorészecskés képalkotással (MPI) valósítanak meg [4]. Az MPI egy tomográfiás képalkotási módszer, amely a mágneses nanorészecskék mágnesezési válaszán alapul az adott kép létrehozásához. Ez a technika kiváló térbeli és időbeli felbontást biztosít, valamint rendkívül jó kontrasztot. Másik előnye, hogy kombinálható a mágneses hipertermiával, így valós idejű visszajelzést tesz lehetővé. Alapvetően ugyanaz az állandó mágneses tér használható mind az MPI, mind a mágneses hipertermia során, azonban az MPI esetében elengedhetetlen az alacsony frekvenciás váltakozó mágneses tér használata.

3. BROWN- ÉS NEÉL RELAXÁCIÓ

A szakirodalomból ismert, hogy mágneses hipertermia során termelt energia a statikus tér nagyságának függvényében haranggörbe alakú [4]. Ha az örvényáramok által keltett hőt elhanyagoljuk, akkor változó tér egy ciklusa alatt átadott energia megegyezik a dinamikus hiszterézisgörbe területével, és a frekvenciafüggő szuszceptibilitás képzetes részével van összefüggésben. Egy egydoménes nanorészecske az alkalmazott váltakozó mágneses tér hatására a fellépő relaxációs veszteségek következtében disszipál hőt. Ennek oka lehet a részecske egészének fizikai elfordulása (Brown-féle relaxáció), vagy a mágneses dipólus elfordulása (Néel-féle relaxáció), miközben a részecske egésze rögzítettnek tekinthető [5]. Előbbihez a szokásos elméleti leírást az MRSh egyenlet, míg utóbbihoz a sztochasztikus LLG egyenlet adja. A kutatócsoportunk az sLLG egyenlet alkalmazásával nemrégiben jelentős polarizációs hatást mutatott ki a térbeli fókuszálási képességben kis frekvenciák és nagy külső tér alkalmazása esetén [6]. Eszerint a DC és AC mágneses terek egymásra merőleges alkalmazása esetén erősebb térbeli lokalizáció érhető el, mint párhuzamos kombináció alkalmazásával. Ez az eredmény azonban csak Néel-relaxáció esetén érvényes, ezért az elméletet Brown-féle relaxációra is szükséges kiterjeszteni, hogy a gyakorlati jelentősége kihasználható legyen.

A kiterjesztéshez az egyik lehetséges megközelítés az MRSh-egyenlet alkalmazása, és annak összehasonlítása a korábbi sLLG-egyenletes eredményekkel. Bizonyos feltételek mellett a két relaxációs mechanizmus jól elkülönül egymástól, mivel a τ relaxációs időben vagy a Brown-féle (τ_B), vagy a Néel-féle (τ_N) relaxációs idő dominál. A mágneses és a szokásos viszkozitás fogalmának bevezetésével ugyanakkor az sLLG-egyenlet eredményei nemcsak a mágneses dipólus mozgását, hanem magának a részecskének a viselkedését is leírhatják. Természetesen ehhez a paramétereket (pl.: csillapítási tényező, frekvencia, mágneses tér amplitudója) úgy kell megválasztani, hogy ugyanazokat az eredményeket kapjuk mindkét egyenlettel.

Munkánk további célja megmutatni, hogy az MRSh-egyenlettel kapható jól ismert dinamikus hiszterézisgörbéket és a haranggörbe alakú, térben fókuszált energiaveszteségi

eredményeket az sLLG-egyenlettel is lehetséges reprodukálni.

4. MRSH ÉS SLLG EGYENLET

Amennyiben a paramétereink olyanok, hogy nanorészecske Brown-féle relaxációja dominál (ez függ az alkalmazott terek amplitudójától, a változó tér frekvenciájától és a nanorészecske méretétől is), akkor a mechanizmust a Martsenyuk-Raikher- Shliomis-féle fenomenológiai egyenlet írja le. Az egy ciklus alatti energiaveszteség kiszámításához szükség van az időfüggő mágnesezettség meghatározására, ami az egyenlet megoldásával történik. Ez egydimenziós esetben, ha nincs tömegáramlás, és az alkalmazott mágneses tér egyirányú, a következő alakban írható:

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{1}{\tau_B}\left(1 - \frac{H}{H_{eff}}\right)M \tag{1}$$

ahol:
M: dimenziótlan mágnesezettség
H: az alkalmazott mágneses térerősség
H_{eff} (t): az effektív mágneses tér
τ_B: Brown-féle relaxációs idő

A mágneses momentum időfüggésének meghatározására alkalmazható az sLLG egyenlet is, amely egy izotróp mágneses nanorészecske Néel relaxációját írja le:

$$\frac{dM}{dt} = -\gamma'\left[M \times \left(H_{eff} + H\right)\right] + \alpha'\left[\left[M \times \left(H_{eff} + H\right)\right] \times M\right] \tag{2}$$

ahol:
H: a random mágneses tér, amely a termikus fluktuációkat reprezentálja
$M=\frac{m}{m_s}$ egységvektor, ami az m_s szaturációs mágneses momentummal lett renormálva
$\alpha' = \gamma'\alpha, \alpha = \mu_0\gamma_0\eta_N, \gamma_0 = 1{,}76 \cdot 10^{11}\frac{Am^2}{Js}, \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\frac{Tm}{A}$

5. ENERGIAVESZTESÉG (SAR)

Ha az sLLG vagy MRSh egyenlet megoldása (M_{sol}) adott, akkor az egy ciklusra jutó térfogati energiaveszteség:

$$E = \mu_0 m_s \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} H_{eff} \cdot \frac{dM_{sol}}{dt} dt \tag{3}$$

ahol:
M: egy részecske átlagolt mágneses momentuma
H_{eff}: az AC és DC mágneses tereket is tartalmazza

Ha f az alkalmazott frekvencia, és az egy ciklusra jutó térfogati energiaveszteség E, akkor az $E{\cdot}f$ térfogati fűtési teljesítmény arányos a specifikus abszorpciós rátával (SAR):

$$\frac{E \cdot f}{\varphi\rho} = SAR = \frac{\Delta T \cdot c}{t} \tag{4}$$

ahol:
φ: a részecskék térfogati aránya
ρ: a mágneses részecskék sűrűsége
ΔT: a hőmérsékletváltozás
c: a fajhő
t :a fűtési idő.

5.1. Az MRSH megközelítés

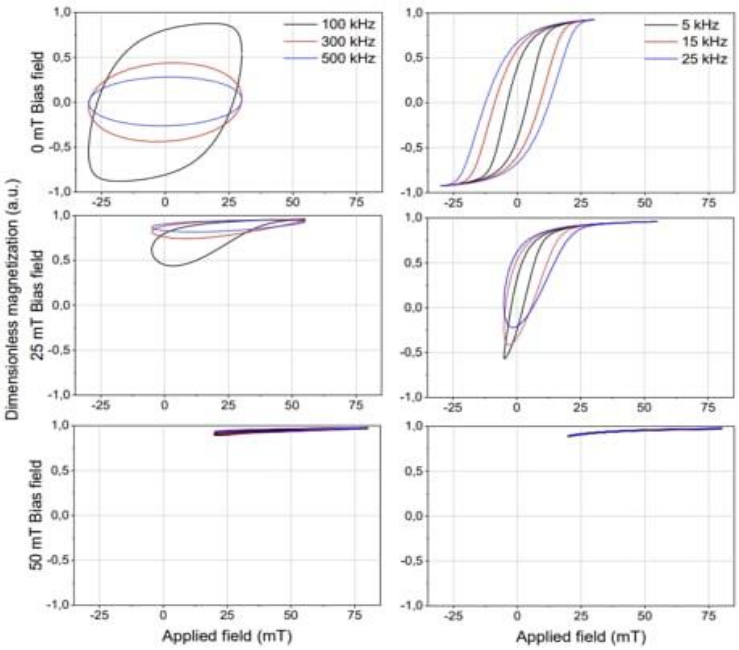
Az MRSh modell alkalmazásával a térbeli fókuszálás képességét párhuzamos AC és DC mágneses tér mellet vizsgáltuk. Az alkalmazott effektív mágneses tér:

$$H_{eff} = (Hcos(\omega t) + b_0, 0{,}0) \tag{5}$$

ahol:
H: az AC tér amplitúdója
b_0: a DC térerősség

Az MRSh egyenlet numerikus megoldásával számítható a SAR, amely rögzített AC tér mellet a DC tér függvényében haranggörbe alakú, és maximuma a DC tér eltűnésénél van. A SAR értéke magas, a hipertemiánál alkalmazott frekvenciatartományban (100500kHz) jelentősen nagyobb, mint alacsonyabb, MPI-re jellemző frekvenciáknál(1-25kHz), ahol a SAR csúcs szélesebb.

A térbeli fókuszálás dinamikus hiszterézis görbékkel érthető meg, amelyek az 1. ábrán láthatóak (bővebben : [7]). A görbe területe csökken a DC tér növekedésével, és nullára esik, ha a DC tér meghaladja az AC tér amplitúdóját. Ez magyarázza a SAR csökkenését a DC tér erősödésével.

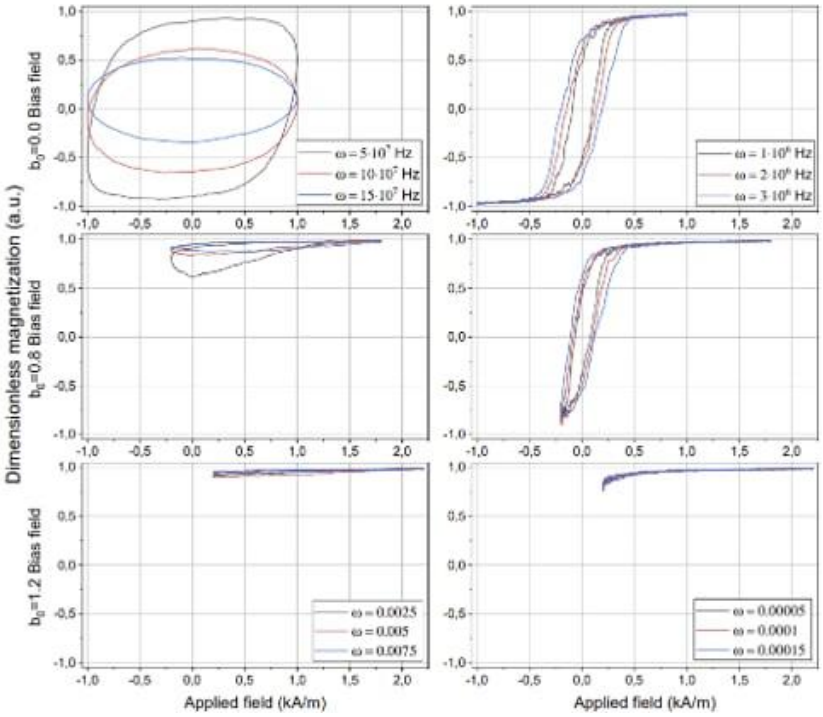


1. ábra: *Dinamikus hiszterézis görbék különböző AC frekvenciákra MRSh egyenletből. Bal oldalon a mágneses hipertermiához, jobb oldalon pedig az MPI-hez szükséges frekvenciákkal számolva.*

Nagy frekvenciák esetén a hiszterézis hurok "megnyílik", mivel a nanorészecskék nem tudják követni az AC gyors változását, ami késleltetett mágneses válaszhoz vezet.

5.2. Sztochasztikus LLG megközelítés

Kutatómunkánk egyik célja az MRSh egyenlettel kapott SAR csúcsok és hiszterézis görbék (1. ábra) reprodukálása a sztochasztikus LLG egyenlettel, szintén párhuzamos AC és DC tér esetén. Ez a megközelítés a mágneses és közönséges viszkozitás fogalmán alapul. Mivel a csillapítási paraméter eltérő a két határesetben, az sLLG modellben más AC amplitúdókat és frekvenciákat kell alkalmazni, mint az MRSh modell esetében. A frekvenciakülönbség a relaxációs idő eltérését tükrözi, míg az effektív tér amplitúdójának módosítása a részecskeméret különbségét kompenzálja. Ezzel a megközelítéssel – az sLLG egyenlet numerikus megoldásával, lásd [7] - sikerült közel azonos SAR csúcsokat kapni, mint az MRSh egyenlettel.



2. ábra: *az sLLG-ből számolt dinamikus hiszterézisgörbék.*

A 2. ábra az SLLG-ből számolt dinamikus hiszterézisgörbéket mutatja különböző frekvenciák mellett, rögzített DC térnél. Ez az MRSh módszerrel kapott 1. ábra megfelelője. Az eredmények alapján az MRSh modell jól reprodukálható az sLLG megközelítéssel.

6. TÉRBELI LOKALIZÁCIÓ

Eredményeink alapján az sLLG egyenlet megfelelő paraméterválasztással képes reprodukálni az MRSh eredményeket. Ezért, függetlenül a relaxációs mechanizmustól, használhattuk az sLLG modellt annak bemutatására, hogy képvezérelt lázterápiában jobb térbeli fókuszálás érhető el, ha az AC és DC mágneses tér egymásra merőleges, nem pedig párhuzamos:

$$H_{eff=}(Hcos(\omega t), b_0, 0)$$

Nagy frekvenciákra, vagyis hipertermia tartományban hasonló térbeli fókuszt és dinamikus hiszterézis görbéket kapunk, mint merőleges AC és DC terek alkalmazásával. MPI tartományban azonban a merőleges elrendezés jelentősen pontosabb térbeli lokalizációt eredményez. A két egyenlet egyenértékűsége miatt a képvezérelt lázterápiában hasonlóan jó fókuszálás várható az MRSh modell Brown-féle relaxációs tartományában is.

A merőleges elrendezés jobb fókuszálási képessége azzal magyarázható, hogy nagy frekvenciákon és kis térnél a lineáris válasz jól alkalmazható, míg kis frekvenciákon ez már nem érvényes. Ilyenkor a mágneses momentum szinte fáziseltolás nélkül követi a külső teret, így energiaveszteség csak akkor lép fel, ha az AC és DC terek vektori összege nulla. Párhuzamos esetben ez csak akkor valósulhat meg, ha DC tér kisebb az AC tér amplitúdójától. Merőleges esetben viszont már kis DC tér is elegendő a nem- nulla vektori összeghez, így hatékonyabb energiaátadás és jobb térbeli fókusz érhető el. Nagy frekvencián és kis térnél viszont mindkét elrendezés hasonló eredményt ad.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatómunkánk keretében összehasonlítottuk az MRSh és az sLLG egyenleteket a mágneses és közönséges viszkozitás fogalmán keresztül, különös tekintettel a térbeli lokalizációs képességükre. Kimutattuk, hogy az MRSh megközelítésből ismert dinamikus hiszterézisgörbék és térben fókuszált energiaveszteségi profilok az sLLG egyenlettel is reprodukálhatók megfelelő paraméterválasztással. Így valószínűsíthető, hogy az sLLG-vel kapott eredmények a relaxációs mechanizmustól függetlenül igazak.

Numerikus számolásaink alapján megállapítottuk, hogy alacsony frekvenciák és nagy amplitudójú mágneses tér esetén az AC és DC tér merőleges kombinációja jelentősen jobb térbeli fókuszálást biztosít, mint a párhuzamos elrendezés. Ez különösen hasznos az MPI-alapú képvezérelt lázterápiában, amelynél egy alacsony frekvenciájú AC térre szuperponált nagy gradiensű statikus mágneses tér segítségével egy kis tartomány fűthető.

Eredményeink alapján javasoljuk a merőleges AC és DC mágneses terek alkalmazását MPI-alapú képvezérelt lázterápiában, amely alacsony frekvenciát és nagy térerősséget igényel.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A Kulturális és Innovációs Minisztérium EKÖP-25-2 kódszámú Egyetemi Kutatói ösztöndíj Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

9. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Q. A. PANKHURST, J. CONNOLLY, S. K. JONES, J. DOBSON, *Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine*, J. Phys. D: Appl. Phys. **36**, R167 (2003). https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/13/201

[2] B. MEHMETI, *Comparison of the LLG and MRSh Equations Used in Magnetic Nanoparticle Hyperthermia*, BSc Thesis, University of Debrecen, (2023). https://dea.lib.unideb.hu/items/e7f6157e-442f-496c-959a-f24d6f308dce

[3] Z. W. TAY, P. CHANDRASEKHARAN, A. CHIU-LAM, D. W. HENSLEY, R. DHAVALIKAR, X.Y. ZHOU, E. Y. YU, P. W. GOODWILL, B. ZHENG, C. RINALDI, AND S. M. CONOLLY, *Magnetic Particle Imaging-Guided Heating*

in Vivo Using Gradient Fields for Arbitrary Localization of Magnetic Hyperthermia Therapy, ACS Nano **12**, 3699 (2018). https://doi.org/10.1021/acsnano.8b00893

[4] R. DHAVALIKAR, A. C. BOHORQUEZ, C. RINALDI, *Chapter 10 - Image-Guided Thermal Therapy Using Magnetic Particle Imaging and Magnetic Fluid Hyperthermia, Micro and Nano Technologies*, Pages 265-286 (2019). https://doi.org/10.1016/ B978-0-12-813928-8.00010-7

[5] C.L. DENNIS, R. IVKOV*, Physics of heat generation using magnetic nanoparticles for hyperthermia*, Int J Hyperthermia, **29**, 715 (2013). https://doi.org/10.3109/02656736.2013.836758

[6] ZS. ISZALY, I. GRESITS, I. G. MARIAN, GY. THUROCZY, O. SAGI, B. G. MARKUS, F. SIMON, AND I. NANDORI, *Polarised superlocalization in magnetic nanoparticle hyperthermia*, Journal of Physics D: Appl. Phys. **55**, 205001 (2022). https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac526d

[7] ZS. ISZÁLY, A. HUSZTEK, B. MEHMETI, Z. ERDÉLYI, Á. SZÖŐR, M. BÉRES, J. KORÓZS, V. BACSÓ, I. NÁNDORI AND I. G. MÁRIÁN, *Spatially focused magnetic hyperthermia: comparison of MRSh and sLLG equations*, (2025). arXiv: 2510.04361

CSŐTEKERCS SZIVATTYÚ MODELL ÁRAMLÁSI JELLEMZŐINEK LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATA

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE PUMP CHARACTERISTIC OF A COIL PUMP MODEL

SZASZÁK Norbert

[1]PhD, egy. docens, norbert.szaszak@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

Kivonat: *Jelen dolgozatban egy kísérleti célú csőtekercs szivattyú főbb áramlástechnikai jellemzőit, szivattyú-karakterisztikáit mutatjuk be. A vizsgált szivattyú legfőbb egysége egy vízszintes tengellyel rendelkező, hengeres dobra tekert rugalmas csőtekercs, amelynek egyik, szabad vége a dob kerületén helyezkedik el (ez a szívócsonk), a másik vége pedig a dob forgástengelyén egy csúszógyűrűhöz csatlakozik (ez a nyomócsonk). A szivattyú úgy helyezkedik el egy nyitott víztartályban, hogy a dob egy része a vízbe merül. A dobot egy frekvenciaváltóval szerelt motor kis fordulatszámmal forgatja ékszíjas áttételen keresztül, eközben a dobon lévő csővégen keresztül víz és levegő felváltva áramlik a csőbe, s a gravitáció és a lassú forgás együttes hatására ezek a nyomócsonk felé mozognak. A vizsgálatokhoz összeállított mérőrendszer segítségével számos munkapontot tudtunk beállítani, így lehetőség adódott a vízszállítás-szállítómagasság és elméleti folyadékteljesítmény-görbék meghatározására, miközben a fordulatszámot és a dob-bemerítést, mint vizsgálati paramétereket konstans, előre beállított értéken tartottuk.*

Kulcsszavak: *Wirtz-szivattyú, csőtekercs-szivattyú, szivattyú-karakterisztika, teljesítmény, kétfázisú áramlás*

Abstract: *In this paper the main flow parameters and pump characteristics of a coil pump is presented. The main part of the coil pump is a flexible plastic pipe, rolled up on a horizontal axis cylindrical body. The inlet of the pump is the one, free end of the pipe which is fixed on the perimeter of the cylinder. The discharge port is another end of the pipe connected to a sliding seal in the axis. The partially submerged cylinder is placed in an atmospheric suction tank filled with water. The pipe coil is slowly rotated by using a V-belt and an electric motor driven by a frequency converter. During slow rotation, water and air periodically moves through the pipe from the inlet to the discharge port thanks to the rotation and the gravitational force. Using the measurement system, by setting different operating parameters such as immersion rate and rotational speed (which were kept constant during a measurement series), the pump characteristic curves (e.g. volumetric flow rate-head, useful fluid power) could be drawn.*

Keywords: *Wirtz-pump, coil pump, pump-characteristics, useful power, two-phase flow*

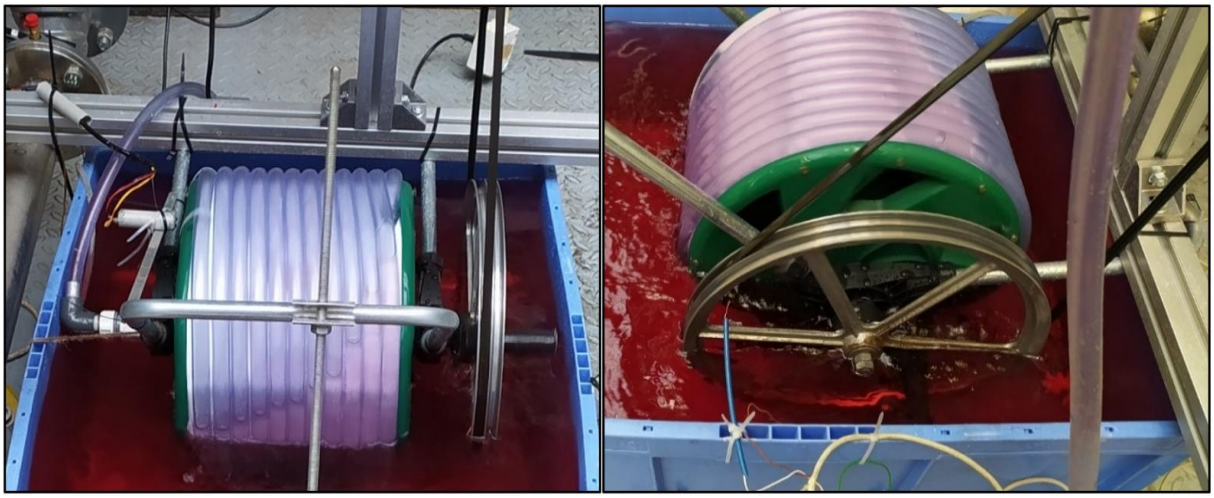
1. BEVEZETÉS

Napjainkban az iparban és a mezőgazdaságban található folyadékszállítási rendszerek jellemzően centrifugális szivattyúkat (radiális, axiális, félaxiális) vagy esetleg térfogatkiszorításos gépeket tartalmaznak, amelyekkel a különböző folyadékszállítási feladatok jelentős része megoldható.

Ezek mellett, jellemzően kisebb teljesítményű, főként lakossági, mezőgazdasági alkalmazásokban azonban léteznek olyan folyadékszállító gépek is, amelyek a folyadék továbbítását a gravitációs erő segítségével végzik (bár bizonyos értelemben ezek is térfogatkiszorításos gépek). Ezek közül az egyik sokak által ismert, több, mint 2000 éves gép az arkhimédészi-csavarszivattyú, amelyben a csavarmenet forgása során a légköri nyomású folyadékcsomagok a gravitációs erő és a csavarorsót körülvevő ház tömítő hatásának köszönhetően haladnak felfelé a kis szögben emelkedő csavartengely mentén [1]. Hasonló működési elvű a Wirtz-szivattyú is, amely azonban a külső légtértől folyadékdugókkal elszigetelve, más- és más, a nyomócsonk felé haladva egyre nagyobb értékű nyomások mellett szállítja az egyes folyadékcsomagokat.

[2, 3]. A Wirtz-szivattyú egy lassú forgású, síkbeli spirálban feltekert csőköteg, amely csőtekercs külső kerületén található a szívócsonk, s a forgástengelyén a legtöbb esetben csúszógyűrűs csatlakozással történik az álló nyomócsonkhoz a folyadék kivezetése [4].

A Wirtz-szivattyú túlnyomással történő működéséhez hasonló, azonban felépítésében és matematikai leírásában egyszerűbb a csőtekercs szivattyú, amelynek áramlástani vizsgálata e cikk témája. Ennél a gépnél a flexibilis csövet egy dobra tekerik fel, s a cső szabad vége (szívócsonk) az első menet elején, a henger palástján; míg a nyomócsonk ez esetben is a forgástengelyen elhelyezett csúszógyűrűs csatlakozáshoz köthető [5]. A vízszintes tengelyű dobot a szívott oldali víztartály (vagy patakok, folyók esetén szabad vízáram) felszínének közelében úgy helyezik el, hogy a palástón elhelyezett csőmenetek egy része a folyadékba merüljön. Az 1. ábrán a laboratóriumban összeállított csőtekercs-szivattyú látható különböző nézetekből. A 11 menetes csőtekercs közepes sugara $R = 180$ mm, a cső belső átmérője pedig $d = 14$ mm.



1. ábra: *a szívótartályba helyezett csőtekercs-szivattyú a bemerülés-állítóval és az ékszíjas hajtással.*

2. A SZÁLLÍTÁSI JELLEMZŐK VIZSGÁLATA

A szivattyú vizsgálatához egy mérőrendszert állítottunk össze, amelyben a szivattyú nyomócsonkja egy olyan csőszakaszhoz csatlakozott, amely szabad végének magassága beállítható volt (1÷5 m között). Így a geodetikus szállítómagasság állításával tudtuk a szivattyú munkapontját beállítani. A szállított folyadék tömegáramát egy digitális mérleggel mértük: adott idő alatt egy, a mérlegre helyezett tartályba érkező víz tömegét mértük, s ebből számítottuk a víz tömeg- továbbá a térfogatáramát ($\dot{m}_v, Q_v$). A szivattyú fordulatszámát egy mágneses elvű fordulatszámmérővel mértük, így az – egy-egy mérési sorozat alatt – pontosan beállítható volt a kívánt, konstans értékre a motort hajtó feszültség frekvenciájának beállításával.

További vizsgálati paraméter volt a dob bemerítési mélysége is. Ehhez egy csavarmenetes állítószerkezetet készítettünk, így egy csavaranya elforgatásával tudtuk a szabad vízfelszínhez képest mélyebbre vagy magasabbra beállítani a dob tengelyét. Ez az állító szerkezet látszik az 1. ábra bal oldali képén. Három különböző bemerülés mellett vizsgáltuk a szivattyú működését: a): a tengely éppen a vízfelszínnel egy vonalban van; b): a tengely a vízfelszín alatt található, attól 0,2R távolságra; c): a tengely a vízfelszín felett, attól 0,2R távolságban kerül beállításra. Jelen tanulmányban csupán az a) esethez tartozó jelleggörbék bemutatására szorítkoztunk.

A mérőrendszerbe beépített szivattyú különböző karakterisztikáit így különböző paraméterek állandósága mellett tudtuk megvizsgálni. Vizsgálatainkat 8 különböző fordulatszámon végeztük el: $n = \{20, 30, 40, 50, 55, 60, 65, 70\}\, min^{-1}$.

A szivattyú működési elve alapján az általa szállított legelső folyadékdugó csőtekercshez viszonyított haladási sebessége éppen megegyezik a forgó csőtekercs kerületi sebességével, azaz $c = R\omega = 2R\pi n$. Ennek, továbbá a cső belső keresztmetszetének ismeretében pedig számítható a szállított kétfázisú közeg kezdeti térfogatárama is: $Q_{2f,be} = cd^2\pi/4$. Az előző összefüggésekben $R = 180$ mm a dobon lévő csőtekercs közepes sugara, $d = 14$ mm pedig a cső belső átmérője.

A kétfázisú áramlásból a víz tömegárama az $\dot{m}_v = \Delta m/\Delta t$ mért értékek alapján számítható, s mivel mértük a szállított víz hőfokát is, annak sűrűség-hőmérséklet függvénye ($\rho_v(t)$) alapján a szállított vízrész térfogatáramát a $Q_v = \dot{m}/\rho$ összefüggéssel határoztuk meg. Ezek ismeretében a belépésnél meghatároztuk a levegő térfogatáramát is: $Q_{l,be} = Q_{2f,be} - Q_v$. A levegő sűrűségének ismeretében ($\rho_{l,be} = 1{,}2\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$ értékkel számoltunk) meghatároztuk a belépő teljes tömegáramot, ami állandó a szivattyún keresztül: $\dot{m}_{2f} = \rho_v Q_v + \rho_{l,be} Q_{l,be}$. A tömegáram és a belépő két fázis együttes térfogatárama ismeretében a belépő kétfázisú közeg átlagsűrűsége meghatározhatóvá vált: $\rho_{2f,be} = \dot{m}_{2f}/Q_{2f,be}$.

A szivattyú nyomócsonkján az ottani nagyobb, p_2 nyomás miatt a szállított levegő odaérkezéséig összenyomódik, így annak térfogatárama lecsökken. A p_2/p_1 nyomásviszony ismeretében, továbbá izotermikus állapotváltozást feltételezve, a szállított levegő kilépő térfogatárama: $Q_{l,ki} = Q_{l,be}\frac{p_1}{p_2}$. Mivel a víz fázis térfogatárama konstans, így a kilépő térfogatáram: $Q_{2f,ki} = Q_{l,ki} + Q_v$. Így már számítható volt a kilépő kétfázisú közeg átlagsűrűsége, mivel a tömegáram konstans a rendszeren keresztül: $\rho_{2f,ki} = \dot{m}_{2f}/Q_{2f,ki}$.

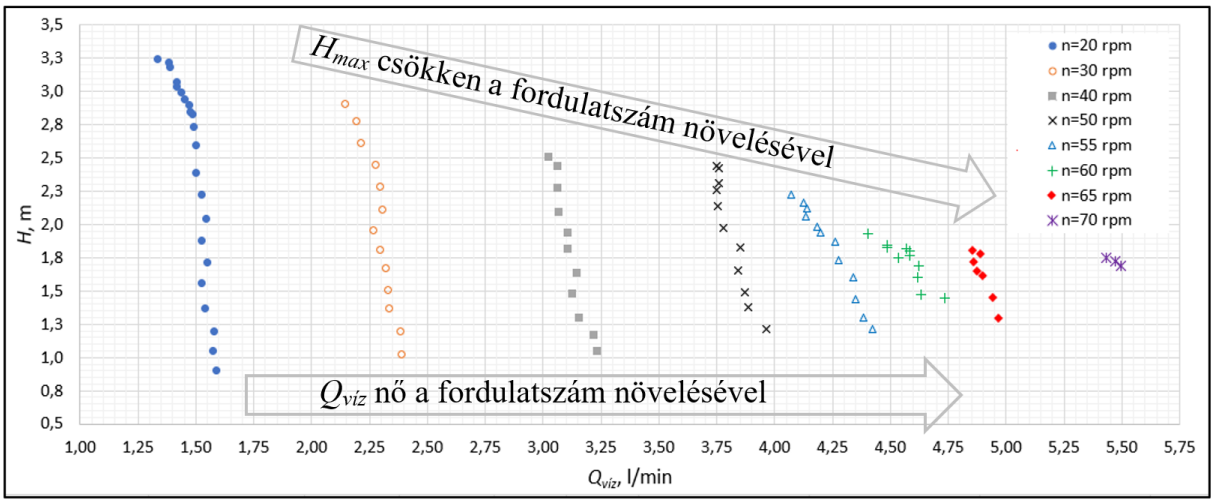
Mindezek mellett a térfogatáramok és a csőkeresztmetszet ismeretében a be- és a kilépő közeg áramlási sebességét is meghatároztuk.

A különböző paraméter-beállítások során változtattuk a geodetikus szállítómagasságot, azaz a nyomócső szabad végének kifolyási magasságát, így különböző munkapontokat tudtunk beállítani. Az egyes munkapontokhoz tartozó manometrikus szállítómagasság az 1. összefüggéssel adható meg:

$$H(Q) = e_{ki}^* - e_{be}^* \approx \left(\frac{p_{ki}}{\rho_{2f,ki}g} + \frac{c_{ki}^2}{2g} + z_{ki}\right) - \left(\frac{p_{be}}{\rho_{2f,be}g} + \frac{c_{be}^2}{2g} + z_{be}\right), \qquad (1.)$$

amely összefüggésben *be* és *ki* indexek a szivattyú szívó- és nyomócsonkjait jelölik, továbbá $z_{be}=z_{ki}$.

A szivattyú a) bemerítéséhez tartozó vizsgálatok adatai alapján elkészített térfogatáram-szállítómagasság diagram a 2. ábrán látható. A diagram alapján megállapítható, hogy a térfogatáram egy-egy fordulatszám esetén csak kismértékben függ a szállítómagaságtól, azonban monoton csökken a nagyobb szállítómagasságok irányában. Ennek oka az, hogy adott fordulatszám esetén a folyadékdugók hossza annál rövidebb, minél nagyobb a nyomócsonk nyomása. Így egy-egy fordulat alatt kisebb mennyiségű víz jut a gépbe, tehát a szállítás csökken. A másik fontos sajátosság, hogy a maximális szállítómagasság jelentősen függ a fordulatszámtól: annak értéke csökken a nagyobb fordulatszámok irányában. Ennek oka többrétű lehet, azonban az egyik feltevésünk az, hogy a nagyobb fordulatszám magasabb áramlási veszteséget okoz a csőmenetekben, így a folyadékdugók nagyobb eséllyel veszik fel a csőfal kerületi sebességét (nem csúsznak le a falról), s emiatt már kisebb maximális szállítómagasságoknál (tehát kisebb p_{ki} nyomások esetén) megtörténik a szállítás megszakadása, amikor is a folyadékdugók visszafelé átfordulnak a menetekben.



2. ábra: *A szivattyú H-Q jelleggörbéi különböző fordulatszámok esetén, amikor a forgástengelye éppen a szívott folyadék felszínével esik egybe.*

3. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen dolgozatban bemutatásra kerültek egy saját összeállítású csőtekercs-szivattyú áramlástechnikai paramétereinek vizsgálatához szükséges főbb összefüggések, továbbá azok felhasználásával a szivattyú bizonyos vizsgálati paraméterek mellett felvett H-Q diagramja. A diagram alapján látható, hogy a szivattyú jelleggörbéje jelentősen eltér a turbószivattyúkétól, a konstans fordulatszám mellett közel állandó térfogatáram a térfogatkiszorításos gépekhez hasonlít. A jövőben megvizsgáljuk a tengely-bemerülés hatását is, amely a folyadék- és légdugók arányának megváltoztatásával jelentősen befolyásolhatja a jelleggörbéket.

4. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] LYONS, M., SIMMONS, S., FISHER, M., WILLIAMS, J. S., & LUBITZ, W. D.: *Experimental investigation of Archimedes screw pump,* Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 146 No. 8., 04020057. 2020.

[2] MILLS, A. A.: *The "Coiled-Tube" Pump*, Industrial Archaeology Review, *7*(1), pp. 94-96. 1984. https://doi.org/10.1179/iar.1984.7.1.94.

[3] DEANE, J. H., & BEVAN, J. J.: *A hydrostatic model of the Wirtz pump*, Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, *474* (2211), 20170533. 2018.

[4] MESERET, M., WAMI, D. & NALLAMOTHU, R.B.: *Experimental study on the parameters affecting the performance of spiral tube pump*, Sci. Rep. 14, 22425. 2024. https://doi.org/10.1038/s41598-024-73234-w

[5] BELCHER, ALAN E.: *Recovery of Revenues Lost to Fish Passage, Proc. of the International Conference on Hydropower, WATERPOWER'95, ASCE, 1995.*

HIDROGÉN A JÖVŐ ÜZEMANYAGA KOCKÁZATOK, BIZTONSÁG ÉS A TÖLTŐÁLLOMÁSOK SZABÁLYOZÁSA

HYDROGEN: THE FUEL OF THE FUTURE RISKS, SAFETY, AND THE REGULATION OF REFUELING STATIONS

BALOGH Noémi Enikő[1], BENCS-NAGY Nóra[2], BENCS Péter[3]

[1]Műszaki menedzser hallgató, noemi.eniko.balogh@student.uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

[2]egyetemi tanársegéd, nora.nagy@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Anyagszerkezettani és Anyagtechnológiai Intézet, Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék

[3]PhD., egyetemi docens, peter.bencs@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

Kivonat: *A hidrogén ígéretes alternatív energiahordozó a közlekedés dekarbonizációjában, de töltőállomásai jelentős biztonsági kihívásokat hordoznak. A dolgozat bemutatja a hidrogéntöltő állomások felépítését, fő veszélyforrásait, a kockázatelemzés módszereit, valamint a vonatkozó nemzetközi szabványokat. Elemzi a múltbeli balesetek tanulságait és kitér a hidrogén–földgáz keverékek csővezetékes ellátásának új kockázataira is. A jövő fejlesztései az intelligens biztonsági rendszerekre, valós idejű felügyeletre és a szabályozás globális összehangolására irányulnak.*

Kulcsszavak: *hidrogén, hidrogéntöltő állomás, kockázatelemzés, biztonság, földgázkeverék, szabványok*

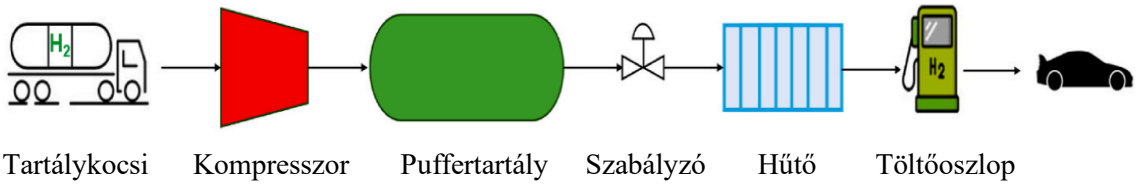
Abstract: *Hydrogen is a promising energy carrier for transport decarbonization, but its refueling stations pose major safety challenges. This paper reviews the design and hazards of hydrogen refueling stations, risk assessment methods, and key international safety standards. It also highlights lessons from past accidents and addresses new risks from supplying stations via hydrogen–natural gas blends. Future developments focus on smart safety systems, real-time monitoring, and globally harmonized regulations.*

Keywords: *hydrogen, hydrogen refueling station, risk assessment, safety, natural gas blend, standards*

1. BEVEZETÉS

A globális energiarendszer jelenleg jelentős átalakuláson megy keresztül: a fosszilis tüzelőanyagoktól való eltávolodás és a karbonsemleges megoldások felé történő elmozdulás kulcsfontosságú a klímaváltozás elleni küzdelemben. Ebben a környezetben a hidrogén, különösen, ha megújuló energiával állítják elő, ígéretes energiahordozóként jelenik meg, mivel felhasználása során kizárólag víz képződik melléktermékként, nem bocsát ki szén-dioxidot [1].

A személy- és teherszállításban alkalmazott üzemanyagcellás járművek (Fuel Cell Electric Vehicles, FCEV) terjedése azonban nemcsak a járműtechnológiát igényli, hanem a megfelelő infrastruktúra, nevezetesen a hidrogéntöltő állomások (Hydrogen Refuelling Stations, HRS) kiépítését is [2]. Ezek az állomások olyan rendszereket integrálnak, amelyek tartalmazzák a hidrogén beszállítását, például tartálykocsival vagy csővezetéken, előkezelését, komprimálását vagy cseppfolyósítását, tárolását, valamint a töltőoszlopot, azaz a járművekbe történő betöltést.



1. ábra: *Egyszerűsített ábra a hidrogéntöltő állomás fő elemeiről [4]*

Az utóbbi években egyre elterjedtebb megoldás, hogy a hidrogént nem külön csőhálózatban, hanem a meglévő földgázvezetékekbe keverve juttatják el a fogyasztási pontokhoz. Ez a módszer csökkenti az új infrastruktúra kiépítésének költségét, ugyanakkor biztonsági szempontból új kihívásokat jelent. A hidrogén eltérő fizikai tulajdonságai, például kisebb sűrűsége, nagyobb áteresztőképessége és szélesebb gyulladási tartománya miatt a kevert gázvezetékekben történő szállítása során a szivárgási, gyújtási és robbanási kockázatok jelentősen megváltozhatnak. Friss kutatások rámutattak arra, hogy a hidrogéntartalom növekedése hatással van a biztonsági távolságokra és a csővezetékek környezetében kialakuló veszélyzónák méretére, ami közvetlenül érintheti a hidrogéntöltő állomások tervezését és elhelyezését is [5].

A HRS infrastruktúra működése ugyanakkor számos biztonsági kihívással jár. A hidrogén rendkívül kis molekulatömegű, ezért könnyen szivároghat; széles gyulladási tartományban éghető, ami azt jelenti, hogy viszonylag kis koncentrációban is képes robbanásveszélyes elegyet alkotni; lángja pedig szabad szemmel gyakran alig látható. Emellett a nagy nyomás, 350-700 bar között és a kriogén hőmérsékletű folyékony hidrogén további kockázati tényezőket jelentenek [3].

Ezért a kockázatértékelés, különösen a kvantitatív kockázatelemzés (Quantitative Risk Assessment, QRA), kulcsfontosságú eszköz annak biztosításához, hogy a HRS-ek tervezése és üzemeltetése megfeleljen a biztonsági elvárásoknak [2]. A QRA általában három fő lépést foglal magában: veszélyazonosítás, következmény-elemzés és valószínűségi elemzés [3]. E módszerek segítségével felmérhetők különböző baleseti forgatókönyvek, például szivárgás → gyújtás → robbanás, és meghatározhatók a szükséges védelmi intézkedések például érzékelők, automatikus elzárók, vészleállítási rendszerek [2].

A hidrogéntechnológia fejlődésével párhuzamosan egyre hangsúlyosabbá válik a szabványosítás és az egységes biztonsági előírások kidolgozása. Az ISO 19880 szabványsorozat és más nemzetközi ajánlások részletes előírásokat tartalmaznak a hidrogéntöltés biztonságára, anyagválasztásra, nyomás- és hőmérsékletkezelésre, valamint a töltési protokollokra [1].

E dolgozat célja, hogy átfogó képet adjon a hidrogéntöltő állomásokkal kapcsolatos kockázatokról és azok értékeléséről. A további fejezetek bemutatják a HRS felépítését, a fő veszélyforrásokat, a kockázatelemzési módszereket, a vonatkozó szabványokat és biztonsági intézkedéseket, valamint néhány gyakorlati példát és esettanulmányt.

2. A HIDROGÉN SZEREPE A FENNTARTHATÓ KÖZLEKEDÉSBEN

A közlekedési szektor a globális szén-dioxid-kibocsátás egyik legnagyobb forrása. Az üvegházhatású gázok csökkentése érdekében világszerte keresik az alternatív, alacsony vagy zéró emissziójú hajtásláncokat. A hidrogén kulcsszereplővé vált ebben az átmenetben, mivel üzemanyagcellás járművekben (Fuel Cell Electric Vehicles, FCEV) alkalmazva használatakor csak vízgőz keletkezik, és nincs helyi károsanyag-kibocsátás [1].

A hidrogén előnyei közé tartozik a magas energiasűrűség tömeg alapon (120-142 MJ/kg), amely jóval nagyobb, mint a legtöbb hagyományos akkumulátoré, így alkalmas nagy hatótávú

járművek (pl. buszok, teherautók) számára [2]. A FCEV-k ráadásul rövidebb tankolási időt kínálnak, mint az akkumulátoros elektromos járművek (BEV), mivel egy hidrogén tankolás általában 3-5 perc alatt elvégezhető [1].

A hidrogén alkalmazása ugyanakkor komplex infrastruktúrát igényel. A HRS-eknek képesnek kell lenniük különböző nyomású és halmazállapotú -350-700 bar nyomású sűrített gáz vagy akár cseppfolyósított LH_2- hidrogén biztonságos fogadására és tárolására. Ezen állomások terjedése kulcsfontosságú ahhoz, hogy a hidrogén üzemanyag versenyképes alternatívává válhasson a hagyományos fosszilis üzemanyagokkal és az akkumulátoros elektromos rendszerekkel szemben [3].

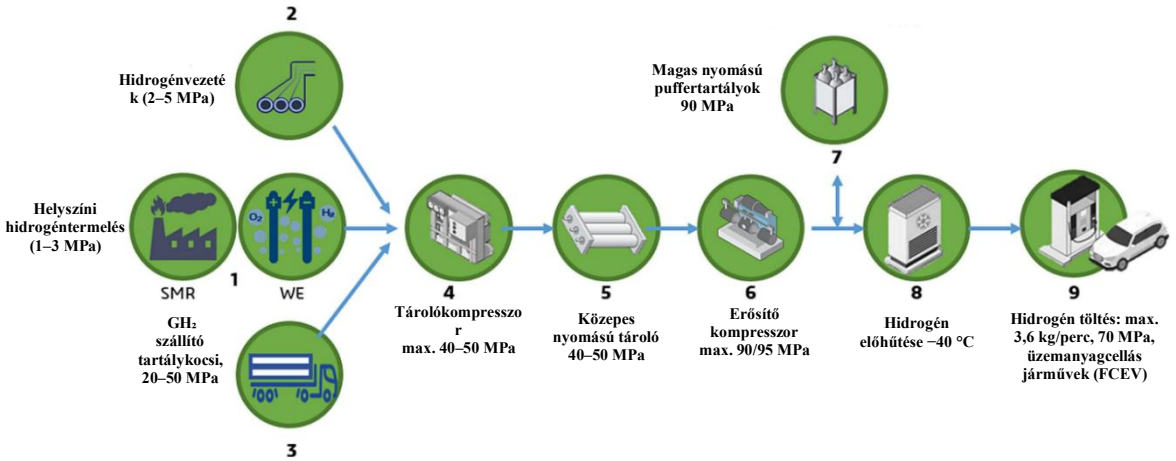
Az európai és nemzetközi energiapolitika is kiemelten kezeli a hidrogén szerepét. Az EU 2050-re klímasemlegességet tűzött ki célul, és több ország (pl. Németország, Franciaország, Japán) már nemzeti hidrogénstratégiát fogadott el. Ezek célja a zöld hidrogéntermelés növelése, valamint a HRS hálózat fejlesztése, hogy a FCEV-k használata széles körben elterjedhessen [2].

A hidrogén alapú közlekedés előnyei ellenére fontos megérteni azokat a biztonsági és gazdasági kihívásokat, amelyek akadályozhatják a gyors elterjedést. A hidrogén előállításának jelenlegi költsége még magasabb, mint a fosszilis üzemanyagoké, a tárolás és a szállítás energiaigényes folyamat, és a biztonsági kockázatok, például a nagy nyomású rendszerek, a szivárgás, a gyulladásveszély, különösen szigorú szabványokat követelnek meg [3].

Az egyik költségcsökkentő megoldás a meglévő földgázhálózat részleges átalakítása és a hidrogén fokozatos bekeverése. Bár ezzel elkerülhető új vezetékek építése, a keverés mértékét szigorú szabályozás korlátozza, mivel a csővezetékek anyaga, tömítései és biztonsági szerelvényei eredetileg földgázhoz lettek tervezve. A hidrogén fokozott diffúziós képessége és anyagkárosító hatása, például az acélok hidrogén okozta ridegedése miatt a megengedhető hidrogéntartalom gyakran korlátozott. Ez új anyagminőségek, fejlettebb tömítési megoldások és korszerű biztonsági szabványok bevezetését teszi szükségessé, hogy a kevert gáz biztonságosan eljuttatható legyen a töltőállomásokhoz [5].

3. HIDROGÉNTÖLTŐ ÁLLOMÁSOK FELÉPÍTÉSE ÉS MŰKÖDÉSE

A hidrogéntöltő állomások olyan összetett létesítmények, amelyek célja a hidrogén biztonságos fogadása, tárolása, előkészítése és az üzemanyagcellás járművekbe történő betöltése. A technológia alapvető feladata, hogy a hidrogént az ellátási lánc különböző pontjairól átvegye, majd a járművek számára megfelelő nyomás- és hőmérsékleti feltételeket biztosítson [1].



2. ábra: *Gáznemű hidrogén tárolása és töltőállomás elrendezése erősítő kompresszorral [1] (SMR: Gőzreformálás földgázból; WE: Vízbontás elektrolízissel)*

3.1. Hidrogénellátás

A hidrogéntöltő állomások többféleképpen juthatnak üzemanyaghoz. Az egyik lehetőség a helyszíni termelés, ahol a hidrogént közvetlenül az állomáson állítják elő. Ez általában két módszerrel történik: földgázból gőzreformálással, vagy vízbontással, amelyet elektrolízis segítségével végeznek. A helyszíni termeléskor a hidrogén tipikusan alacsony, körülbelül 1-3 MPa nyomáson áll rendelkezésre.

Másik megoldás a csővezetékes ellátás, amikor a hidrogént közvetlenül egy nagyobb hálózatból kapja az állomás, általában 2-5 MPa nyomáson. Biztonsági szempontból azonban figyelembe kell venni, ha a vezeték nem tiszta hidrogént, hanem földgázzal kevert gázt szállít. Ilyen esetben a gáz összetételének változása befolyásolja a gyulladási és szivárgási kockázatokat, valamint az állomásba érkező üzemanyag kezelési és biztonsági követelményeit is [5].

Harmadik lehetőségként a hidrogént előre sűrített formában szállító tartálykocsik érkezhetnek, amelyek 20-50 MPa nyomású gázt juttatnak az állomásra [1].

3.2. Tárolás és nyomásfokozás

A beérkező hidrogént a töltéshez szükséges nyomás elérése érdekében több lépésben kezelik:

- először egy tárolókompresszor sűríti a gázt körülbelül 40-50 MPa értékre,
- ezután közepes nyomású tartályokban helyezik el,
- majd egy erősítő kompresszor tovább növeli a nyomást akár 90-95 MPa szintig, hogy megfeleljen az autókban használt 70 MPa töltési nyomásnak,
- a nyomásingadozások kiegyenlítésére és a folyamatos ellátás biztosítására magas nyomású puffertartályokat használnak.

Ez a rendszer lehetővé teszi, hogy az állomás egyenletesen, biztonságosan és nagy nyomáson szolgálja ki a járműveket [1].

3.3. Hőmérséklet-szabályozás és töltés

A hidrogén járművekbe történő betöltése előtt hűtést alkalmaznak. A gázt körülbelül mínusz 40°C-fokra hűtik le, hogy a töltés során keletkező hő ne okozzon biztonsági problémát, és ne lassítsa a folyamatot. A tankolás ennek köszönhetően rövid idő alatt lezajlik, általában háromöt perc elegendő egy személyautó teljes feltöltéséhez [2].

3.4. Biztonsági rendszerek

A hidrogéntöltő állomások tervezésének egyik legfontosabb szempontja a biztonság. A biztonsági rendszer több rétegből épül fel:

- szivárgásérzékelő szenzorok, amelyek azonnal jelzik, ha hidrogén kerül a levegőbe,
- automatikus elzárószelepek és vészleállító rendszerek, amelyek szükség esetén gyorsan megszüntetik a gázáramlást,
- hatékony szellőztetés, amely megakadályozza a hidrogén felhalmozódását zárt vagy félig zárt terekben,
- tűzálló elválasztások és biztonsági távolságok a berendezések között, hogy egy esetleges baleset következményei korlátozottak legyenek,
- rendszeres karbantartás és anyagvizsgálat, amelyek megelőzik a hidrogén okozta ridegedésből fakadó meghibásodásokat.

A biztonsági és működési követelményeket nemzetközi szabványok határozzák meg. Ilyenek például az ISO 19880 szabványsorozat és az SAE J2601 előírásai, amelyek meghatározzák a hidrogéntöltés során betartandó műszaki és biztonsági feltételeket [1].

4. VESZÉLYEK ÉS KOCKÁZATI ESEMÉNYEK HIDROGÉNTÖLTŐ ÁLLOMÁSOKON

A hidrogén biztonságos kezelése alapvető fontosságú a töltőállomások tervezése és üzemeltetése során. A hidrogén fizikai és kémiai tulajdonságai, kis molekulaméret, alacsony gyulladási energia, széles éghetőségi tartomány, miatt az üzemeltetés során különös figyelmet kell fordítani a lehetséges baleseti eseményekre és azok következményeire [2].

4.1. Főbb veszélyforrások

A hidrogéntöltő állomásokon a biztonsági kockázatok több forrásból származhatnak. A legjellemzőbbek a következők:

- Szivárgás: A hidrogén rendkívül kis méretű molekulái miatt könnyen átjut tömítéseken, csatlakozásokon és hajszálrepedéseken.
- Gyulladás és robbanás: A hidrogén már 4 térfogatszázaléktól éghető a levegőben, és gyulladási energiája rendkívül alacsony, így akár apró szikra is elegendő lehet a begyújtásához.
- Lángsugár (jet fire): Nagynyomású szivárgáskor a kilépő gáz azonnal meggyulladhat, heves, irányított lángsugarat hozva létre.
- Anyagridegedés és fáradás: A hidrogén egyes fémek szerkezetét károsíthatja, törékennyé téve a csöveket és tartályokat.
- Kriogén veszélyek: A nagyon alacsony hőmérsékletű hidrogén fagyási sérülést okozhat a berendezéseken vagy a kezelőszemélyzeten.

4.2. Tipikus baleseti eseményláncok

A baleseti eseményláncok elemzése kulcsfontosságú a megelőzés szempontjából. A leggyakrabban vizsgált eseménysorok a következők:

- Szivárgás → azonnali gyújtás → lángsugár
- Szivárgás → zárt térben felgyülemlő gáz → késleltetett gyújtás → robbanás
- Folyékony hidrogén kiömlése → gyors párolgás → gázfelhő képződése → gyújtás és robbanás

Ezek a forgatókönyvek jól mutatják, hogy a hidrogén kezelése során nemcsak a szivárgást, hanem a potenciális gyújtóforrásokat és a zárt terek kialakítását is kontrollálni kell [3].

4.3. Kockázatértékelési módszerek

A biztonsági kockázatok felmérésére több, egymást kiegészítő módszert alkalmaznak:

- HAZID: strukturált veszélyazonosítás a tervezés korai szakaszában.
- HAZOP: részletes operációs elemzés, amely a folyamatban előforduló nem kívánt eltéréseket keresi.
- Kvantitatív kockázatelemzés (QRA): számszerűsíti a balesetek valószínűségét és azok következményeit.

- Esemény- és hibafák: grafikus módszerek az ok-okozati láncok feltérképezésére és a kritikus pontok meghatározására.

Ezek a módszerek lehetővé teszik a tervezők és üzemeltetők számára, hogy előre felmérjék a lehetséges veszélyhelyzeteket, majd megfelelő védelmi rendszereket építsenek be.

4.4 Biztonsági intézkedések

A kockázatok mérséklése érdekében a hidrogéntöltő állomásokon több védelmi réteg működik:

- szivárgásérzékelő szenzorok, amelyek azonnal jelzik a hidrogén jelenlétét,
- automatikus elzárószelepek és vészleállító rendszerek, amelyek megszüntetik a gázáramlást veszély esetén,
- megfelelő szellőztetés és nyitott telepítés, hogy megakadályozzák a gázfelhalmozódást,
- tűzálló elválasztások és biztonsági távolságok, amelyek minimalizálják egy esetleges tűz vagy robbanás következményeit,
- rendszeres karbantartás és anyagvizsgálat, hogy a hidrogén ne okozzon ridegedést és váratlan meghibásodásokat [3].

A biztonsági előírásokat nemzetközi szabványok határozzák meg. Az ISO 19880 szabványsorozat részletesen leírja a hidrogéntöltő állomások tervezésére és üzemeltetésére vonatkozó követelményeket, míg az SAE J2601 meghatározza a töltési protokollokat és az üzemeltetési feltételeket [1].

5. SZABÁLYOZÁS ÉS BIZTONSÁGI KÖVETELMÉNYEK

A hidrogéntöltő állomások biztonságos működését átfogó jogszabályok és nemzetközi szabványok biztosítják. Ezek az előírások egységes keretet adnak a tervezéshez, építéshez, üzemeltetéshez és karbantartáshoz, miközben a hidrogén sajátos fizikai és kémiai tulajdonságaira építve minimalizálják a baleseti kockázatokat [1].

5.1. Nemzetközi szabványok

A hidrogéninfrastruktúra rohamos fejlődése szükségessé tette, hogy a különböző országokban egységes és részletes szabályok határozzák meg a töltőállomások biztonsági feltételeit. A legfontosabb előírások közé tartozik az ISO 19880 szabványsorozat, amely részletes útmutatást ad a hidrogéntöltő állomások tervezésére és üzemeltetésére, beleértve a biztonsági távolságok meghatározását, a berendezések elhelyezését és a nyomástartó rendszerek ellenőrzését.

A SAE J2601 a járművek töltési protokollját szabályozza, meghatározva a töltéshez szükséges nyomás- és hőmérsékletparamétereket, hogy az üzemanyagcellás autók gyorsan és biztonságosan tankolhassanak.

Az európai szabályozást az EN 17127 támogatja, amely nemcsak a biztonsági előírásokat tartalmazza, hanem a kezelőszemélyzet képzésére és az üzemeltetés során követendő eljárásokra is kitér.

Az Egyesült Államokban a NFPA 2 tűzvédelmi szabályzat fekteti le a hidrogén tárolására és kezelésére vonatkozó követelményeket, különös figyelemmel a robbanásveszély és a tűzvédelem területére [2].

5.2. Tervezési biztonsági követelmények

A töltőállomások tervezése során elsődleges szempont, hogy egy esetleges hidrogénszivárgás vagy tűzeset következményeit minimalizálják. A berendezések elhelyezésénél szigorúan

meg kell határozni a biztonsági távolságokat, hogy egy robbanás vagy tűz hatásai ne terjedjenek át más építményekre vagy az állomás más részeire. A nyílt térben történő telepítés és a folyamatos szellőzés kulcsszerepet játszik abban, hogy a hidrogén ne gyűlhessen össze veszélyes koncentrációban.

A felhasznált anyagoknak ellenállónak kell lenniük a hidrogén okozta ridegedéssel szemben, mivel a fémek szerkezeti gyengülése szivárgásokhoz vagy törésekhez vezethet. Az elektromos rendszereket robbanásbiztos kivitelben kell kialakítani, hogy szivárgás esetén ne váljanak gyújtóforrássá. A tervezés során minden állomásnak rendelkeznie kell vészleállító rendszerrel, amely szivárgás vagy tűz esetén azonnal megszakítja a gázáramlást [1].

5.3. Üzemeltetési és karbantartási előírások

A biztonság nem ér véget a tervezéssel; az üzemeltetés és a karbantartás során is folyamatosan be kell tartani az előírásokat. Az állomás működése során rendszeres szivárgásvizsgálatot végeznek a csővezetékeken és a csatlakozásoknál, ellenőrzik a biztonsági szelepek, érzékelők és vészleállítók állapotát. A kompresszorok és a nagy nyomású tárolók karbantartása szintén kulcsfontosságú, hogy elkerüljék a váratlan meghibásodásokat.

A személyzet folyamatos képzése is alapvető: a kezelőknek tudniuk kell, hogyan reagáljanak szivárgás, tűz vagy robbanásveszély esetén. Az üzemeltetők minden eseményt dokumentálnak, hogy a tapasztalatokból tanulva fejleszthessék a biztonsági rendszereket [2].

5.4. Jövőbeli szabályozási irányok

Ahogy a hidrogéntechnológia terjed, várhatóan még részletesebbé és egységesebbé válnak a biztonsági előírások. A jövő szabályozása egyre inkább a kockázatértékelésre épül, ahol adat- és modellalapú megközelítéssel határozzák meg a szükséges védelmi szinteket. Az intelligens felügyeleti rendszerek (szenzorhálózatok, IoT alapú monitorozás) alkalmazása elősegíti a gyors reagálást és a hibák megelőzését. Emellett egyre nagyobb hangsúlyt kapnak a fenntarthatósági szempontok, például az energiahatékony töltőrendszerek és az alacsony kibocsátású üzemeltetés előírásai. Várhatóan a szabályozások globálisan is jobban összehangolódnak, hogy támogassák a nemzetközi hidrogénellátási láncok fejlődését [4].

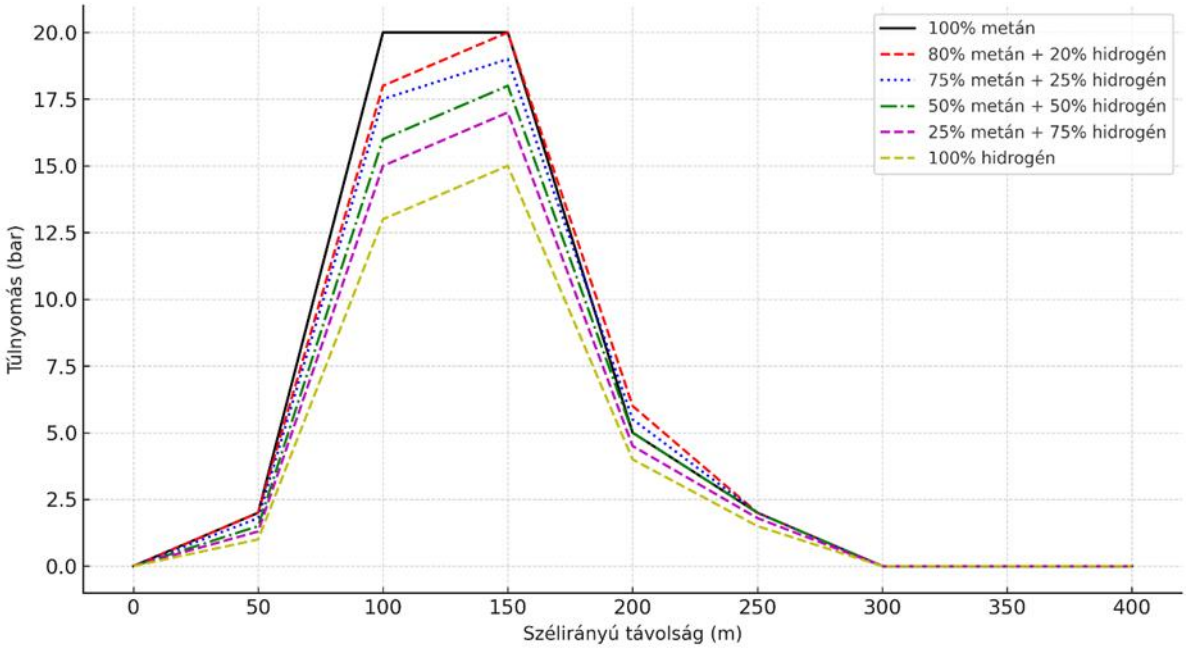
A szabályozási fejlődés egyik fontos iránya a hidrogén és földgáz keverékek biztonságos szállításának kezelése. A meglévő földgázvezetékek hidrogénnel való részleges feltöltése gazdasági előnyökkel járhat, de a vezetékek anyagtulajdonságai és a gázkeverékek eltérő égési viselkedése miatt új kockázati tényezőket vet fel. A jövőbeli előírások várhatóan pontosabban meghatározzák a megengedett hidrogénarányokat, az anyagvizsgálati követelményeket, valamint a csővezetékekből táplált hidrogéntöltő állomásokra vonatkozó biztonsági távolságokat. Friss kutatások [5] azt is jelzik, hogy a kevert gáz robbanásveszélyes zónáinak mérete jelentősen eltérhet a tiszta földgázétól, ezért a szabványos távolságokat és a kockázati modelleket a jövőben ennek figyelembevételével kell módosítani.

6. A HIDROGÉNTÖLTŐ ÁLLOMÁSOK ELLÁTÁSA CSŐVEZETÉKEN; KOCKÁZATOK A HIDROGÉN ÉS FÖLDGÁZ KEVERÉSEKOR

A hidrogéntöltő állomások biztonsága nem csupán az állomás területén elhelyezett tárolókból, kompresszorokból és kiszolgáló egységekből áll. Legalább ilyen fontos az a szállítóhálózat, amelyen keresztül a hidrogén az állomáshoz jut (ilyen esetekben a töltőállomás rendelkezik PSA – Pressure Swing Adsorption egységgel, mely lehetővé teszi a tiszta hidrogén kiválasztását a hidrogénnel kevert földgázból). Sok országban jelenleg a hidrogén eljuttatását úgy képzelik el, hogy a már meglévő földgázvezetékeket részben hidrogénnel töltik fel, így kevert gáz érkezik a fogyasztási pontokhoz. Ez a megoldás gazdaságilag kedvező lehet, de új típusú biztonsági kockázatokat hordoz [5].

Egy friss, 2024-ben publikált kutatás a földgáz-átviteli vezetékek hidrogénnel való keverésének kockázatait vizsgálta [5]. A tanulmány 20, 26 és 30 hüvelyk átmérőjű, nagy nyomású vezetékeket modellezett, amelyek tipikusan ipari és közlekedési célú hidrogénellátásra is használhatók. A vizsgálat során modern kvantitatív kockázatelemzési módszert alkalmaztak a DNV SAFETI szoftverrel, hogy felmérjék a lehetséges szivárgások, gyújtások és robbanások kockázatát a különböző hidrogéntartalmú keverékeknél; 0%, 20%, 25%, 50%, 75% és 100% hidrogén.

A modellezés során kis, közepes és nagy méretű szivárgásokat, valamint teljes csőrepedéseket vizsgáltak. Elemezték a kiszabaduló gáz mennyiségét és sebességét, a gázfelhő terjedését és gyújtási valószínűségét, valamint a gyulladás utáni lehetséges következményeket, mint a jet fire és a VCE-felhőrobbanás. A kockázati mutatókat két fő szempont alapján értékelték: az egyéni kockázat térbeli eloszlása és a társadalmi kockázat, amely az F-N görbékkel jellemezhető.



3. ábra: *Túlnyomás alakulása csőrepedés esetén különböző hidrogén–földgáz keverékeknél, 30 hüvelykes csőben, 5 m/s szélsebességnél [5]*

Az eredmények szerint a hidrogén kisebb sűrűsége miatt a szivárgáskor kiszabaduló gáz tömegárama csökken, ha nő a hidrogén aránya. Ugyanakkor a gyúlékonysági tartomány szélesebb, és a gyújtáshoz szükséges energia alacsonyabb, ezért a gyújtás és a robbanás valószínűsége nő.

Lakott területek közelében az egyéni kockázat emelkedhet, míg a távolabbi területeken nagyon alacsony marad. A társadalmi kockázat legtöbb esetben még elfogadható, az úgynevezett ALARP zónán belül marad, de 100% hidrogénnél már meghaladhatja a biztonsági határértékeket.

Ezek a megállapítások közvetlenül érintik a hidrogéntöltő állomások tervezését és üzemeltetését. Ha egy állomást olyan vezetékről látnak el, amelyben földgáz és hidrogén keveredik, számolni kell azzal, hogy egy szivárgás vagy csőrepedés esetén nagy kiterjedésű gyúlékony gázfelhő képződhet, amely akár az állomás területéig is elérhet. A robbanási kockázat a hidrogéntartalom növekedésével emelkedik, ezért az állomás körüli védőtávolságokat és tűzvédelmi zónákat újra kell tervezni. Az üzemeltetőknek és a karbantartó személyzetnek fel kell készülniük a csővezeték felől érkező veszélyhelyzetekre, például a nyomáscsökkenésre, a gázfelhő megjelenésére vagy a szivárgás érzékelésére. Magas hidrogénarányú keverékeknél célszerű lehet korszerű, valós idejű szivárgásérzékelő rendszereket telepíteni, valamint olyan automatikus elzáró szelepeket alkalmazni, amelyek gyorsan megállítják az áramlást egy esetleges sérülésnél.

A kutatás tehát arra hívja fel a figyelmet, hogy a töltőállomások biztonsági kockázatértékelésénél nem szabad kizárólag az állomás telephelyére koncentrálni. A hidrogén útja már a csővezetékben megkezdődik, és a szállítóhálózat bármely pontján fellépő meghibásodás hatással lehet az állomás biztonságára és a környező területekre is. Az integrált kockázatelemzés, amely egyaránt vizsgálja a csőhálózatot és az állomás helyszíni rendszereit, elengedhetetlen a biztonságos működéshez.

7. ESETTANULMÁNYOK ÉS BALESETI TAPASZTALATOK

A hidrogéntöltő állomások gyors terjedése mellett elengedhetetlen tanulmányozni a már bekövetkezett baleseteket és eseményeket. Ezek az esetek rámutatnak a technológia sérülékeny pontjaira, segítenek fejleszteni a biztonsági rendszereket, és hozzájárulnak ahhoz, hogy a jövőben csökkenjen a kockázat [3].

7.1. Jellemző baleseti okok

A korábbi események elemzése alapján a leggyakrabban előforduló kiváltó tényezők a következők:

- Szivárgás a csővezetékekben vagy csatlakozásoknál, amelyet gyakran anyagfáradás, nem megfelelő tömítés vagy szerelési hiba okozott.
- Kompresszor meghibásodás, amely nagy nyomású hidrogén hirtelen kiáramlásához vezetett.
- Nem megfelelő karbantartás vagy ellenőrzés, ami miatt a biztonsági berendezések (pl. szelepek, szivárgásérzékelők) nem működtek időben.
- Elektromos szikrák és gyújtóforrások jelenléte szivárgás esetén, amelyek beindították a gyulladást.
- Emberi tényező, például a kezelők hibás eljárásai vagy nem megfelelő reagálása vészhelyzetben.

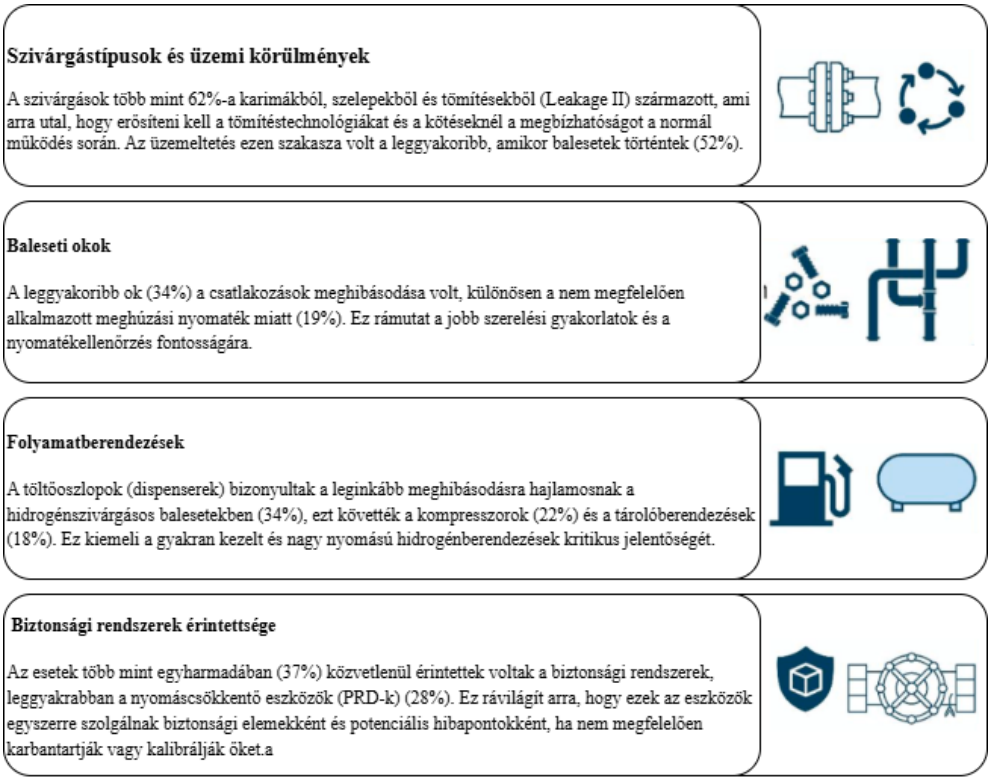
Ezek az okok rámutatnak arra, hogy a műszaki hibák mellett a rendszeres ellenőrzés, a megfelelő karbantartás és a személyzet képzése is kulcsfontosságú.

7.2. Jelentős baleseti események

Az elmúlt években több, nemzetközi figyelmet kapott baleset történt hidrogéntöltő állomásokon. Közülük kiemelkedik:

- Sandvika, Norvégia (2019): egy hidrogéntöltő állomáson bekövetkezett robbanás, amelyet egy hibásan működő biztonsági szelep és a hidrogén szivárgása idézett elő (szerelési hiba okozta a problémát). Az esemény után több európai állomást ideiglenesen leállítottak, hogy ellenőrizzék a hasonló berendezéseket [2].
- Gangneung, Dél-Korea (2019): egy kutatóközpont hidrogéntöltő állomásán történt robbanás, amely során két ember életét vesztette, több pedig megsérült. A vizsgálatok hibás biztonsági szelepeket és elégtelen nyomáskezelést azonosítottak.
- Santa Clara, USA (2020): egy kompresszor meghibásodása következtében hidrogén szivárgott, majd meggyulladt. Bár nem történt haláleset, az eset hangsúlyozta a karbantartás és a valós idejű nyomásfelügyelet fontosságát [3].

Ezek az esetek jól példázzák, hogy a biztonsági rendszerek hiányosságai vagy a nem megfelelő ellenőrzés milyen gyorsan vezethet súlyos következményekhez.



4. ábra: *Megfigyelt baleseti minták és gyakori hibaforrások hidrogéntöltő állomásokon [2]*

7.3. Tanulságok és fejlesztési irányok

A baleseti tapasztalatok több területen indítottak el fejlesztéseket a hidrogéntöltő állomásoknál:

- Fejlettebb szivárgásérzékelő rendszerek alkalmazása, amelyek gyorsabban észlelik a hidrogén jelenlétét.

- Redundáns biztonsági szelepek és nyomáscsökkentő rendszerek beépítése, hogy egyetlen hiba ne vezethessen katasztrófához.
- Valós idejű adatgyűjtés és digitális felügyelet, amely folyamatosan monitorozza a nyomást, a hőmérsékletet és az esetleges szivárgásokat.
- Szabályozások és előírások szigorítása, különösen az engedélyeztetés és a karbantartási követelmények területén.
- Személyzeti képzések fejlesztése, hogy a kezelők felkészülten reagáljanak vészhelyzetben.

Ezek az intézkedések jelentősen hozzájárulnak ahhoz, hogy a jövő hidrogéninfrastruktúrája biztonságosabb és megbízhatóbb legyen [4].

8. JÖVŐBELI KILÁTÁSOK ÉS FEJLESZTÉSI IRÁNYOK

A hidrogén, mint energiahordozó, egyre fontosabb szerepet kap a közlekedés és az ipar dekarbonizációjában. A hidrogéntöltő állomások fejlődése elengedhetetlen ahhoz, hogy az üzemanyagcellás járművek széles körben elterjedhessenek. A biztonsági kihívások, a szabályozási környezet és a technológiai korlátok azonban folyamatosan új megoldásokat igényelnek [3].

8.1. Műszaki fejlesztési irányok

A hidrogéntöltő állomások jövője nagymértékben függ a berendezések megbízhatóságának és energiahatékonyságának növelésétől.

A fő fejlesztési irányok közé tartozik:

- Új anyagok alkalmazása, amelyek ellenállnak a hidrogén okozta ridegedésnek, így hosszabb élettartamot biztosítanak a csővezetékeknek és a tartályoknak.
- Fejlettebb kompresszor- és tárolórendszerek, amelyek kevesebb karbantartást igényelnek, és hatékonyabban kezelik a magas nyomású hidrogént.
- Valós idejű monitoring rendszerek integrálása, amelyek azonnal jelzik a szivárgást vagy rendellenes nyomásváltozásokat.
- Automatizált biztonsági rendszerek, amelyek emberi beavatkozás nélkül képesek lezárni a gázáramlást és megakadályozni a balesetek súlyosbodását.
- Gyorsabb töltési technológiák, amelyek csökkentik az állomásoknál eltöltött időt anélkül, hogy veszélyt jelentenének.
- A digitális iker (digital twin) technológia forradalmasítja a prediktív karbantartást azáltal, hogy dinamikus, valós idejű virtuális másolatot készít a fizikai eszközökről, lehetővé téve a proaktív, adatalapú karbantartási stratégiák alkalmazását.

A hidrogén-infrastruktúra fejlődésével várhatóan egyre nagyobb hangsúlyt kap a hidrogén–földgáz keverékek biztonságos kezelése is. A meglévő vezetékekből érkező, eltérő összetételű gáz miatt a töltőállomások tervezésénél rugalmasabb nyomás- és keverékkezelő rendszerekre lesz szükség, valamint olyan biztonsági szenzorokra, amelyek képesek pontosan detektálni a hidrogéntartalom változását. Új mérési és modellezési módszerek [5] is fejlődnek, amelyek előre jelezhetik a különböző keverékek esetén kialakuló veszélyzónák méretét, így a jövő állomásai már tervezéskor alkalmazkodhatnak a változó ellátási feltételekhez.

8.2. Szabályozás és globális harmonizáció

Ahhoz, hogy a hidrogén-infrastruktúra világszerte egységesen fejlődhessen, elengedhetetlen a szabványok összehangolása. A jövőben a nemzetközi szervezetek célja, hogy:

- közös biztonsági szabványokat alakítsanak ki, melyek világszerte elfogadottak,
- elősegítsék a tanúsítási folyamatok egységesítését, így egyszerűbbé váljon a hidrogéntöltő állomások engedélyeztetése,
- meghatározzák a digitális biztonsági rendszerek követelményeit, hogy a valós idejű adatok megbízható alapot nyújtsanak a hatósági felügyelethez [2].

8.3. Gazdasági és piaci szempontok

A hidrogénpiac növekedését a technológiai fejlődés mellett gazdasági tényezők is alakítják. A jövő kulcsa a költségek csökkentése, hogy a hidrogén versenyképessé váljon a fosszilis üzemanyagokkal szemben. Ennek része:

- a hidrogén előállításának zöldebb és olcsóbbá tétele (pl. megújuló energiával hajtott elektrolízis),
- az állomások telepítésének és üzemeltetésének költséghatékonyabbá tétele,
- az ellátási lánc fejlesztése, hogy a hidrogén szállítása és tárolása biztonságosabb és olcsóbb legyen.

A szabályozói támogatás, az állami ösztönzők és a kutatási programok kulcsszerepet játszanak ebben a folyamatban.

9. ÖSSZEGZÉS ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

A hidrogén, mint alternatív energiahordozó egyre fontosabb szerepet kap a fenntartható közlekedés és az ipari dekarbonizáció területén. A hidrogéntöltő állomások azonban nemcsak technológiai, hanem biztonsági és szabályozási kihívások elé is állítják az iparágat. A dolgozat áttekintette a hidrogén fizikai és kémiai sajátosságait, amelyek a kockázatértékelés szempontjából kulcsfontosságúak. Ezek közül kiemelkedik a hidrogén rendkívül alacsony gyulladási energiája, nagy diffúziós sebessége és széles robbanási tartománya, amelyek különösen érzékennyé teszik a töltőállomásokat a szivárgásra és a gyújtásra [1].

A kockázatértékelés módszerei, például a veszélyazonosítás, a valószínűség és a súlyosság értékelése, valamint a kockázatcsökkentő intézkedések meghatározása, elengedhetetlenek a biztonságos üzemeltetéshez. A múltbeli baleseti események, mint a norvégiai Sandvika és a délkoreai Gangneung állomások robbanásai, egyértelműen rámutattak arra, hogy a megfelelő anyagválasztás, a szakszerű szerelés, a karbantartás és a valós idejű monitoring rendszerek kulcsszerepet játszanak a súlyos következmények megelőzésében [2].

Az ellátási lánc biztonsága szintén kulcsfontosságú tényező. A hidrogén egyre gyakrabban keveredik földgázzal a meglévő vezetékes infrastruktúrában, hogy csökkentsék a szállítás költségeit és felgyorsítsák a hidrogénpiac fejlődését. Ugyanakkor ez új kockázatokat jelent a töltőállomások számára: a változó hidrogéntartalom befolyásolja a nyomáskezelést, a detektálást és a biztonsági zónák méretezését. A legújabb kutatások [5] szerint a jövő biztonsági értékeléseinek már figyelembe kell venniük ezeket a kevert gázáramokat, hogy az állomások tervezése és üzemeltetése valóban alkalmazkodni tudjon az új ellátási feltételekhez.

Összességében a hidrogéntöltő állomások biztonságos üzemeltetése több szakterület együttműködését igényli: a mérnöki tervezéstől kezdve a szabályozáson és üzemeltetésen át a kockázatértékelésig. A jelenlegi tapasztalatok és kutatási irányok alapján világosan látható, hogy a

megfelelő szabványok, a fejlett biztonsági rendszerek és a folyamatos tudásmegosztás kulcsfontosságú ahhoz, hogy a hidrogén biztonságosan és fenntartható módon váljon a jövő energiahordozójává.

10. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] GENOVESE, M., & FRAGIACOMO, P.: *Hydrogen refueling station: Overview of the technological status and research enhancement*. Journal of Energy Storage, 61, 106758, 2023. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106758

[2] JIANG, K., TIAN, Z., CULLIS, I., PROUD, W. G., & HILLMANSEN, S.: *Towards sustainable mobility: A systematic review of hydrogen refueling station security assessment and risk prevention*. International Journal of Hydrogen Energy, 105, 1266–1280, 2025. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.348

[3] BAGAKI, D. A., & TSOUTSOS, T.: *Risk assessment of refuelling Fuel Cell Electric Vehicles*. Process Safety and Environmental Protection, 199, 107092, 2025. https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107092

[4] HOSEYNI, S. M., MOSTAFA, M. O. M., & CORDINER, J.: *Mitigating risks in hydrogen-powered transportation: A comprehensive risk assessment for hydrogen refuelling stations, vehicles, and garages*. International Journal of Hydrogen Energy, 91, 1025–1044, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.10.074

[5] KIM, W. J., PARK, Y., & PARK, D. J.: *Quantitative risk assessments of hydrogen blending into transmission pipeline of natural gas*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 91, 105412, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105412

H1 KONTRA H2, AVAGY MIT TUDHAT EGY KÁLYHA

H1 VERSUS H2, OR WHAT A HEATER CAN DO

OLAJOS Péter

PhD, egyetemi docens, peter.olajos@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

Kivonat: *Régóta használnak a belső égésű járművekben olyan kiegészítő fűtési berendezéseket, amelyek segítik a motor ill. a jármű belső terének felfűtését a hideg időszakokban. A több mint 10 éves szervizelési tapasztalataim alapján hasonlítottam össze a jelenleg is forgalomban levő két Eberspächer gyártású alaptípus, azaz a Hydronic 1 és 2 (röviden H1 és H2) fűtésekben használatos vezérlő egységeket. A leírtak alapján adom meg az okokat arra, hogy milyen módon magyarázható a H2 elektronikájának hőmérséklet-érzékenysége, amely meghibásodásokhoz vezet.*

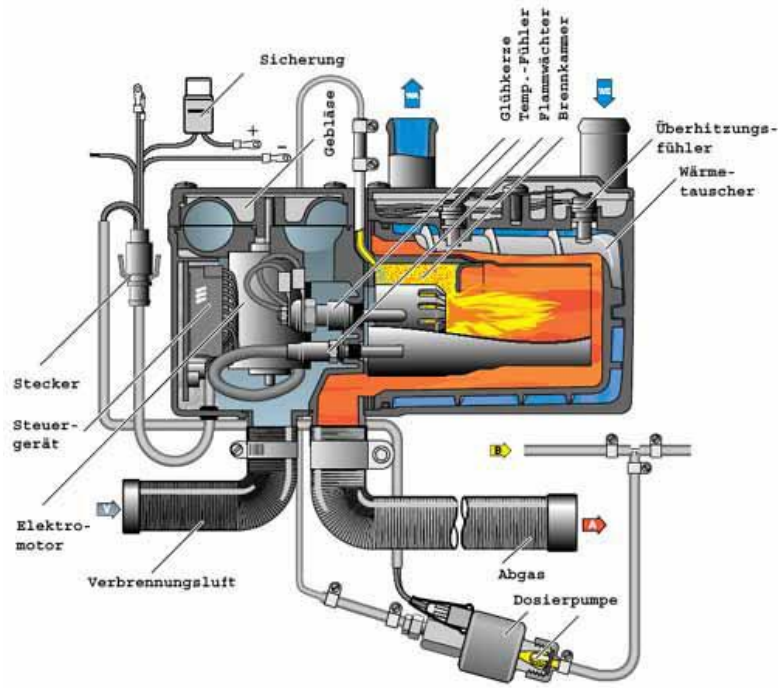
Kulcsszavak: *Eberspächer, Hydronic 1, Hydronic 2, kályha vezérlő elektronika, teljesítményelektronika*

Abstract: *For a long time, auxiliary heating devices have been used in internal combustion vehicles to help in the heating method of the engine and the interior of the vehicle in cold weather. Based on my more than 10 years of service experience, I compared the control units used in two basic types of Eberspächer heaters currently on the market, namely the Hydronic 1 and 2 (shortly H1 and H2). Based on the above, I will give the reasons for the temperature sensitivity of the H2 electronics, which leads to malfunctions.*

Keywords: *Eberspächer, Hydronic 1, Hydronic 2, heater control electronics, power electronics*

1. KÁLYHA MŰKÖDÉSE

Az alábbi kép (1. ábra) mutatja be általában egy kályha működését a gépjárművekben.



1. ábra: *A kályha működése (forrás: [9]).*

A legfontosabb perifériák általában egy kályha esetén (lásd [1]): izzítógyertya (Glühkerte), lángőr vagy lángérzékelő (Flammwächter), szellőztető ventilátor (Gebläse és Elektromotor), üzemanyagpumpa (Dosierpumpe), hőmérséklet szenzorok (Temp-fühler és Überhitzungs-fühler) és a működést vezérlő elektronika (Steuergerät). A működés folyamata a következő alapvető lépésekből áll (nem a teljes részletességgel megadva):

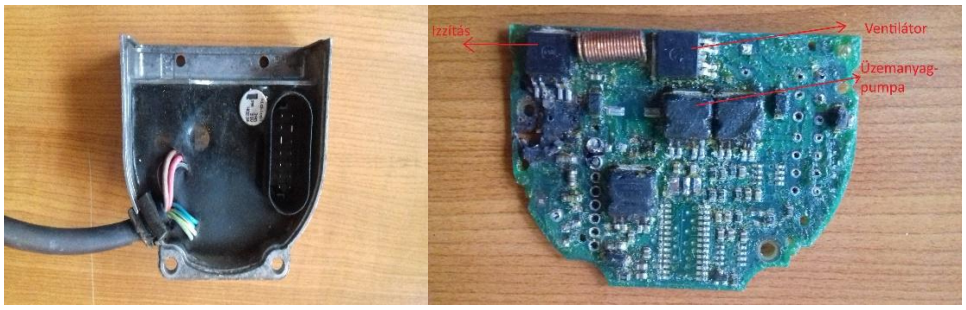
1. Amennyiben az indulási feltételek (a külső hőmérséklet -5 °C vagy kevesebb, motor jár – gyújtásjel, a hűtővíz hőmérséklete kevesebb mint 75 °C) rendelkezésre állnak, a vezérlő elektronika a program szerint ellenőrzi a perifériákat és elkezdi az izzítást (PWM).
2. Megfelelő idő múlva a szellőztető ventilátor elindul (PWM): először kb. 3 V-os feszültség mellett, majd megfelelő ütemben elérve a 8-8,6 V-os értéket (H1-nél 8-8,3 V – típusfüggő, H2-nél 8,6 V).
3. A ventilátor feszültség kb. 5 V-os értékénél megfelelő (0,5 Hz-től 5 Hz-ig változva) frekvenciával a vezérlő elindítja az üzemanyagpumpát (PFM).
4. A befecskendezett üzemanyag (benzin vagy diesel) begyullad és önfenntartó égést hoz létre.
5. A lángérzékelővel (PTC) mérhető az ideális esetben kialakuló 400 °C-os égési hőmérséklet. Kb. 150 °C-nál a vezérlő lekapcsolja az izzítást.
6. A jármű motorjának keringető szivattyúja segítségével a teljes vízkör melegítésre kerül mindaddig, amíg el nem éri a 75 °C-os hőmérsékletet. Ekkor félteljesítményre kapcsol át, azaz kb. felannyi üzemanyagot fecskendez be az üzemanyagpumpa. Ha hőmérséklet visszaesne 75 °C alá, akkor ismét teljes teljesítményre kapcsol a vezérlő.
7. Amikor a víz hőmérséklete eléri a 85 °C, a vezérlő leállítja az üzemanyagpumpát (az un. láng megszűnik), elindítja ismét az izzítást, hogy a maradék üzemanyagot kiégesse a kályha belsejéből.
8. Az izzítás után még kb. 1-2 percig szellőztetés folyik, melynek során a kályhatest további hűtése és a maradék égéstermék kijuttatása történik meg.
9. Amennyiben a víz hőmérséklete 75 °C alá esik, akkor ismét az 1. pontról indul a kályha elindulása (, amennyiben az indulási feltételek továbbra is teljesülnek).

2. A HYDRONIC 1-ES KÁLYHA ÉS VEZÉRLŐJE

Az alább 2. ábrán jól látható egy tipikus Hydronic 1-es (röviden H1-es) vezérlő egység kibontott panelje is. Az összehasonlítás érdekében 5 kW-os, azaz 5000 W-os (a 4000 W-os és a 3000 W-os panelek eltérnek a teljesítményfélvezetőkben) fűtési teljesítménnyel rendelkező panelt hasonlítunk össze az ugyancsak 5 kW-os H2-sel. A vezérlők most már szinte minden esetben egy sötétbarna szilikonos anyaggal vannak kiöntve, melynek eltávolítása, azaz a NYÁK letisztítása komoly feladatot jelent, amennyiben szeretnénk feltárni a tényleges működést is. A szilikonszerű, valószínűleg kétkomponensű anyagnak két feladata van.

Elsősorban védeni kell a konkrét elektronikát (NYÁK-ot és az azon levő elektronikai alkatrészeket) a víztől és a páralecsapódástól, de az esetleges befolyó üzemanyagtól is. Nem tud védeni a fagyállóval kevert hűtővíztől, ugyanis a fagyálló (lassan ugyan, de) oldja ezt a sötétbarna anyagot.

A másik fontos védelmi szempont a nagy hőmérséklettől való védelem, hiszen az égéstérben kialakuló akár több mint 400 °C-os érték nagy hősokkot idézhetne elő a kiöntés hiányában. A szilikon hőtűrő képessége jól ismert, minimum 300 °C-ot bármelyik típusnak el kell viselnie tartósan is.



2. ábra: *A H1-es kályha vezérlő elektronikája (saját készítésű képek).*

A jobb oldali képen jól láthatóak az egyes perifériákat vezérlő teljesítményelektronikai félvezetők. Az alábbi táblázat foglalja össze ezek típusait és legfontosabb tulajdonságait. A 3 legfontosabb mérhető paraméterként a maximális feszültség, a maximális áramerősség és a maximális diszipálódó hő, mint teljesítmény adódik.

1. táblázat: *A H1-es félvezetők tulajdonságai (katalógusadatok [3,4])*

Periféria	***Félvezető típusa***	***U, I, P***
Izzító	BTS432E2, N csatornás FET	63 V, 35 A, 125 W
Ventilátor	BTS247Z, N csatornás FET	55 V, 12 A, 120 W
Üzemanyagpumpa	BTS432E2, N csatornás FET	63 V, 11 A, 125 W

A további összehasonlításhoz nagyon fontos tulajdonság a **HELYE, azaz a POZÍCIÓJA** a vezérlő elektronikának. Az alábbi képen jól látható, hogy a vezérlő alumínium íves háza lezárja a kályha végét, azaz a hőcserélőtől távol, a ventilátorhoz közel helyezkedik el (lásd a 3. ábrát).

3. ábra: *A H1-es kályha (forrás: [6]).*

A H1-es kályhák nagyon stabil és megbízható működését a táblázatban szereplő nagy teljesítményű FET-ek adják. Ez is az oka annak, hogy ebben a kályhában és vezérlő típusban a mai napig töretlenül megbíznak a szervizek és én is ezért választottam etalonként a H2-sel való összehasonlításban.

A problémafeltáró (4.) fejezetben olvashatunk majd a különbségekről, melyek okait az utolsó fejezetben adom meg.

3. A HYDRONIC 2-ES KÁLYHA ÉS VEZÉRLŐJE

Az alábbi (4. ábra) képeken látható egy H2-es vezérlő egység gyári állapota és a kibontott NYÁK mindkét oldala.

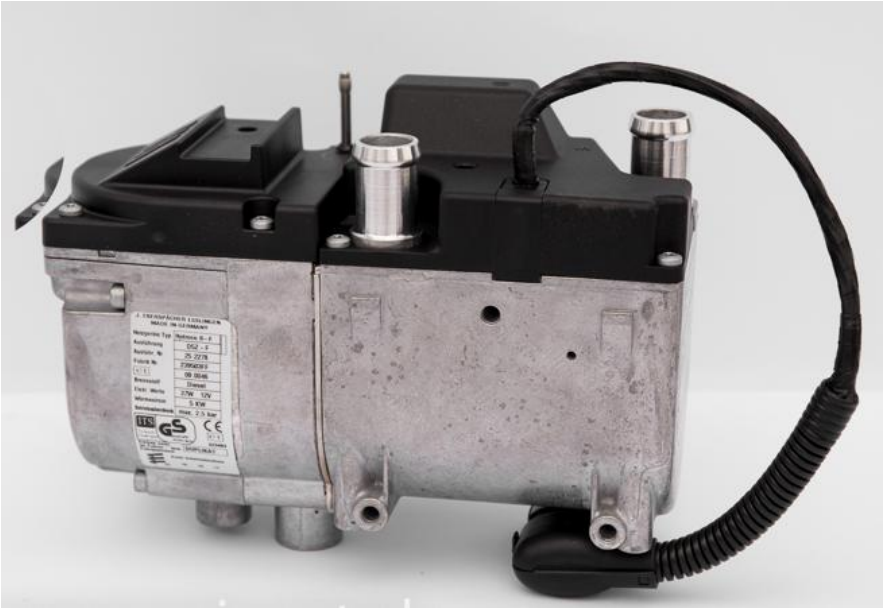
4. ábra: *A H2-es kályha vezérlő elektronikája (saját készítésű képek).*

A két alsó képen hasonlóan a H1-hez láthatóak az egyes perifériákat vezérlő teljesítmény-elektronikai félvezetők. Az következő 2. táblázat foglalja össze ezek típusait és legfontosabb tulajdonságait. Megfigyelhető, hogy a korábbi (1. táblázat alapján) H1-es teljesítmény félvezetők összességében nagyobb terhet képesek elviselni, miközben a kályha perifériák azonosak.

2. táblázat: *A H2-es félvezetők tulajdonságai (katalógusadatok [5,7,8])*

Periféria	***Félvezető típusa***	***U, A, P***
Izzító	BTS443P, N-csatornás FET	36 V, 25 A, 42 W
Ventilátor	VND14NV04, MOSFET	55 V, 12 A, 74 W
Üzemanyagpumpa	VN750, CMOS Driver	36 V, 6 A, 4,2 W

A képen (azaz az 5. ábrán) jól látható, hogy a H2-es vezérlő elektronikája a kályha, még pontosabban a hőcserélő tetején van elhelyezve. Ezt a tényt kulcskérdésnek találtam a megoldás során.



5. ábra: *A H2-es kályha (forrás: [2]).*

4. VIZSGÁLAT, PROBLÉMAFELTÁRÁS ÉS MEGOLDÁS

Az előző fejezetekben látható paraméterek alapján vizsgáljuk meg az egyes perifériákat/folyamatokat működtető teljesítmény félvezetőket.

4.1. A kielemelt folyamatok leírása

Az izzítás folyamata: a folyamat során PWM szabályzással történik a kis értékű ellenállás, azaz izzítógyertya felmelegítése. Amennyiben a vezérlő elektronika nem megfelelő ellenállást érzékel a folyamata során, akkor hibát ad és leállítja a teljes folyamatot. A mérés ellenállás osztóval történik a mikrovezérlő felé. A korlátok miatt sok esetben előfordulhat, hogy bár nincs hiba, mégsem indul el az önfenntartó égés, mert az izzító nem képes begyújtani a befecskendezett üzemanyagot. Kétféle hiba általános: szakadás vagy zárlat.

A szellőztetés folyamata: A szellőztető motor működtetése is PWM-mel történik, mert a 12V-os beérkező tápból szükséges a 3-8,6 V értékek folyamatos (nem szaggatott) szabályzása, melynek segítségével a fordulatszám változtatható. Sok esetben a motor csapágyazásának elöregedése vagy a szénkefék kopása miatt már nem képes a megfelelő fordulatszámra, azaz pl. nagyobb áramot vesz fel a teljesítményfélvezetőtől. Ezt ismét ellenállásokkal mérve érzékeli az elektronika és állhat ki hibára, ha szükséges. Kétféle hiba általános: szakadás vagy zárlat.

Az üzemanyag ellátás folyamata: a megfelelő teljesítményfélvezetővel szaggatva a 12 V-os

tápfeszültséget történik meg a pumpa működtetése. Ennek során a frekvenciát (azaz a periódusidőt) változtatva, a bekapcsolási időn pedig nem változtatva történik meg a befecskendezés az égéstérbe. Azaz PFM-mel történik a pumpa működtetése. A CMOS Driver „jelent" a mikrovezérlő felé, így általában kétféle hiba jelenik meg: túlterhelés vagy rövidzárlat.

4.2. Hibajelenségek bemutatása és vizsgálata

A működés során a beégetett program szerint a H2-s rövidebb idő alatt gyújt be, mint a H1-es. Viszont a több éves használat során az alábbi *diagnosztizált problémák fordulnak elő a H2-es vezérlő egységekben* a leggyakrabban. Összehasonlítom ezeket a H1-esekkel.

- ***A kályha nem gyújt be, csak szellőztet: magas lángőr (PTC) érték induláskor.***
  A hiba oka elég egyszerű. Mint minden mérendő érték esetén a mérés egy ellenállásfeszültség osztóval (soros kapcsolás) történik, hiszen a mikrovezérlő 5 V felett „nem szeret" dolgozni. Az 5 V alatti feszültséget ellenőrizve dönti el, hogy az induláskor megfelelő-e a kívánt hőmérséklet. Az SMD ellenállások forrasztásai (és sokszor ők maguk is) az őket érő hő és remegés hatására megrepednek, így nagyobb ellenállást mér a mikrovezérlő. A mikrovezérlő számára úgy tűnik, hogy elég meleg a kályha vagy túlmelegedett (azaz szellőztetés feltétlen szükséges). A H1-nél is előfordul, de nagyon ritkán. Általában a 10 évnél öregebb és a több ezer üzemórát „végigdolgozott" egységeknél jelenik meg ez a probléma a H1-es kályhák esetén (H2-nél ez kb. 5 év).
- ***Az elektronika hibás: rövidzárlat az izzító körben.***
  A meghibásodás leggyakoribb oka, hogy az izzításért felelős FET zárlatba futott, amelyet érzékelt a mikrovezérlő. Egyértelműen termikus stressz felelős a meghibásodásért. A H1-es esetén ez a hiba nagyon ritka, általában 15-20 éves vezérlőknél fordul csak elő.
- ***Az elektronika hibás: rövidzárlat a szellőztető ventilátor körben.***
  A meghibásodás leggyakoribb oka itt is az, hogy a ventilátor fordulatszámszabályzásért felelős FET zárlatba futott, amelyet érzékelt a mikrovezérlő. Egyértelműen hősokk vagy hőtrauma felelős ismét a meghibásodásért. A H1-es esetén ez a hiba nagyon ritka, általában a szellőztető motor csapágyainak szorulása (nagy áramot vesz fel) vagy teljes beállása okozza.
- ***Az elektronika hibás: rövidzárlat az üzemanyag pumpa körben.***
  A hiba oka eléggé összetett tud lenni. Ugyanis itt már nem egy FET felel az üzemanyagpumpa „rángatásért" (mint a H1-ben), hanem egy VN750 CMOS Driver látja el ezt a feladatot. A lábkiosztás szerint ennek van egy „STATUS" lába (lásd [7]), azaz ezzel tud kommunikálni a mikrovezérlővel. Sok esetben a STATUS lábbal való összeköttetés megszüntetésével a kályha működik, azaz a Driver hibásan pl. zárlatot jelez a mikrovezérlőnek a kimeneten, miközben a kimenet rendben működik. Ennek a hibajelenségnek pontosan a fordítottja is előfordul: a Driver nem vezérli az üzemanyagpumpát, de hibát sem ad a mikrovezérlőnek. A kályha ekkor nem tud beindulni (begyújtani), hiszen nincs üzemanyag befecskendezve az égéstérbe. A H1-esben használt FET még sohasem ment tönkre az általam javított vagy vizsgált (több mint 1000 db) elektronikában. A nagyon kis üzemanyagpumpa teljesítmény (20 W) és kis frekvencia (maximum 5 Hz) a „hosszú élet titka" a FET és természetesen a többi teljesítményfélvezetőben is, ahol a kapcsoló üzemmód a működés alapja.

4.3. Megoldási lehetőségek

A korábban megadott problémák okait és megoldásukat a következő pontokban foglaltam össze:

- A paraméterek vizsgálatakor jól láthatóan kiderült, hogy a H1-es elektronikában használt teljesítmény félvezetők jobb tűréssel, azaz teljesítmény adatokkal rendelkeznek minden esetben a H2-esben használtakhoz képest. Különösen kirívó eset az üzemanyagpumpa körben fellépő hibák sorozata a H2-nél, melyben az DRIVER kontra FET párharc eredménye „kiütéssel" a FET javára dől el.
- A H1-nél nem szükséges beépíteni a vízkörbe külön vízszivattyút (csak állófűtésnél), a H2-nél kiegészítő/pót- és állófűtésnél is szükség van erre. Az állófűtésnél a leállás folyamata során az elektronika fenntartja a vízszivattyú tápellátását a program végéig. *A pótfűtésnél az utánkeringetést megvalósító kiegészítő elektronika feltétlenül szükséges*, hogy minimum még egy percig (ez általában állítható rajtuk, az elfogadott érték 3 perc) a víz keringetését fenntartva a kályhatest ne melegedjen 100 Celsius fok érték fölé. A meghibásodás is ebből adódik: ha tönkremegy a vízszivattyú vagy bármilyen okból kifolyólag nem megfelelő a víz keringése a jármű hűtési rendszerében, akkor sajnos a kályha „megfő", azaz túlmelegedik akár 150-200 °C is kialakulhat. Ebből a hősokkból a vezérlő is jócskán részesül, hiszen a vezérlő alumínium háza szorosan csatlakozik a kályha ugyancsak alumínium testéhez ill. a hőcserélőhöz.
- Ugyancsak a hibák fő forrásának tartom a H2-es elektronikák nem megfelelő fizikai elhelyezése a kályhatesten, miközben ugyanez a H1-nél előnyt jelent. A H2-esben fellépő hibák legfőbb okának a hőtraumát tartom – ez a normál működés során is kritikus módon jelenik meg –, amely a H2-es kirívó közelsége okoz az égéstérhez. A H1 esetén ez jóval nagyobb távolságot (minimum 8 cm-rel) jelent, ráadásul a NYÁK a szellőztető ventilátorral egy „légtérben" van, amely további jobb hűtést biztosít az egész elektronikai résznek.

Összefoglalva: a három problémából csak egyre adtam megoldást, de az a többire is hatással van. A tapasztalatokból is jól tudjuk, hogy a H2-es teljesítményfélvezetői képesek ellátni a feladatukat hosszú távon, ha a feltételek közel ideálisak. Több esetben is találkozhattam olyan H2-es vezérlő elektronikával, amelyek 10 évnél régebben gyártottak és csupán a „kritikus" VN750 üzemanyag pumpa Driver miatt kellett őket javítani, egyéb probléma nem állt fenn.

5. KONKLÚZIÓ

Röviden összefoglalva a két típus és NYÁK összehasonlítását: a H1-es elektronikai része nagyobb tűrést képes elviselni a H2-eshez képest. *Minden esetben javasolt a kiegészítő vízkeringetés kiépítése (és ha van ellenőrzése) a H2-es típusú kályhák esetén*, ha azt szeretnénk elérni, hogy ezt a gyorsan (H1-eshez képest feleannyi idő alatt) felfűtő megoldást hosszú távon és gazdaságosan használjuk a járműveinkben.

Fontos megjegyezni, hogy a bemutatott két típus alapvetően személygépkocsikba kerül beépítésre, ritkábban haszongépjárművekbe. A nagyobb teljesítményű vizes (van ugyanis levegős is) kályhákat rendszerint kamionokba vagy munkagépekbe építenek be, ahol *a fűtési teljesítmény* értéke gyakran a 8,5-20 kW között változik. Az ezekben használt, általában 24 V-os tápfeszültségről működő vezérlő egységek a H1-es hasonló vagy „erősebb" teljesítményfélvezetőkkel rendelkeznek.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] AUSTROPANNON KFT.: *Vizes fűtőkészülékek*, 27.11.2014, https://austropannon.hu/vizes-keszulekek

[2] CAR STOCK: *Hydronic II D5Z-F Eberspaecher*, https://ogrzewania.net.pl/en/shop/product/hydronic-ii-d5z-f-eberspaecher-252278050000

[3] INFINEON TECHNOLOGIES AG: *BTS247Z*, München, 17.05.2000, *https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/79444/INFINEON/BTS247Z.html*

[4] INFINEON TECHNOLOGIES AG: *BTS432E2*, München, 01.10.2003, https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/79455/INFI-NEON/BTS432E2.html

[5] INFINEON TECHNOLOGIES AG: *BTS443P*, Munich, Rev. 1.0 02.2007, https://hu.mouser.com/datasheet/3/70/1/Infineon-BTS443P-DS-v01_00-EN.pdf

[6] PROKES-AUTO: *Eberspacher Hydronic D5WS*, https://www.prokes-auto.com/eberspacher-hydronic-d5ws-12v-agregat-252217050000-252217/

[7] ST MICROELECTRONICS: *VND14NV04*, Rev. 9 09.2013, https://www.st.com/resource/en/datasheet/vnb14nv04.pdf

[8] ST MICROELECTRONICS: *VN750 High side driver*, Rev. 4 05.2012, https://www.mouser.com/catalog/specsheets/stmicroelectro-nics_cd00001991.pdf?_gl=1*1ohvm4j*_gcl_au*MTc5MDQ0NDQ3OC4xNzU4NjkzMjU2LjQ4NTM1NDU0My4xNzYxNTY3ODk0LjE3NjE1NjgwMjc.*_ga*NzAy-NTIxNjg0LjE3Mjc4NzYzNjU.*_ga_15W4STQT4T*czE3NjI5NTc5OTUk-bzkkZzEkdDE3NjI5NTgwMDQkajUxJGwwJGgw

[9] T4-WIKI: *Wasserstandheizung*, 19.06.2022, https://www.t4-wiki.de/wiki/Wasserstandheizung

ÁRAMFEJLESZTŐK FESZÜLTSÉGSZABÁLYZÓINAK JAVÍTÁSI ÉS FEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEI

REPAIRMENT AND IMPROVEMENT OPPORTUNITIES FOR VOLTAGE REGULATORS OF POWER GENERATORS

Olajos Péter

PhD, egyetemi docens, peter.olajos@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

Kivonat: *Napjainkban továbbra is használnak benzin- vagy diesel motoros áramfejlesztőket olyan helyeken, ahol a hálózati energia nem vagy nem teljesen elérhető. Ezeknél a gépeknél többféle generátor kialakítás, azaz villamos gép található. Ezek közül a csúszógyűrűs szinkron generátort választva, annak feszültségszabályzóját elemezzük. A vizsgálat során nemcsak a működését, hanem annak javítási és fejlesztési megoldásait is megvizsgáljuk.*

Kulcsszavak: *áramfejlesztő, feszültségszabályzó, tekercselés, belső égésű motor fordulatszámszabályzása.*

Abstract: *Nowadays, gasoline or diesel engine generators are still used in places where the network energy is not or not fully available. These machines have several generator designs, i.e. electric machines. Choosing the synchronous generator with slip rings from among them, we will analyze its voltage regulator. During the examination, we will present not only its operation, but also its repairment and development solutions.*

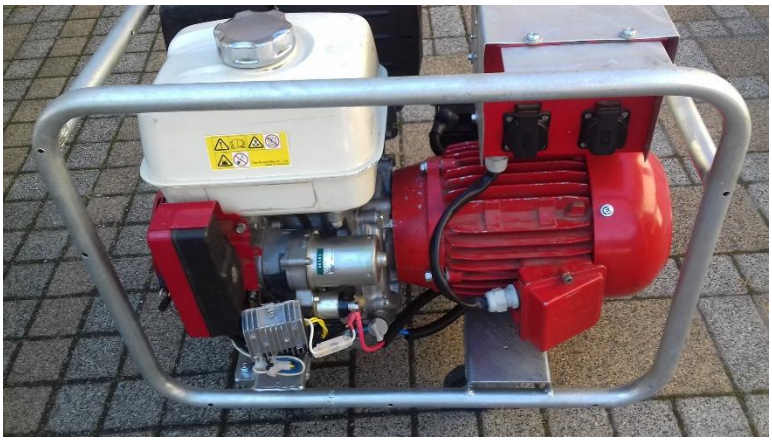
Keywords: *power generator, voltage regulator, winding, speed control of internal combustion engine.*

1. BEVEZETÉS

1.1. Az áramfejlesztők használatáról általában

Napjainkban, amikor a „zöld energia” egyre nagyobb térhódítást végez nemcsak Magyarországon, hanem az egész bolygónkon, továbbra is használatban maradtak a belső égésű (benzines vagy diesel) motorokkal szerelt áramfejlesztők. Az okok nyilvánvalóan lényegesek, alább néhányat megadtam:

- alapvetően egyszerű működés-működtetés, energiakimaradás esetén vészmegoldásként indíthatóak,
- általában nem igényelnek speciális anyagokat vagy alkatrészeket a működésükhöz,
- nem igényelnek speciális hőmérsékleti viszonyokat (-40 – 50 °C),
- egyaránt megtalálhatóak a lég- és a vízhűtéses változatok,
- ha szükséges átalakíthatóak PB gázpalackos, használt napraforgó vagy motorolaj működtetésekre is,
- a régi „gerjesztési” módszerek és eszközök (kb. 30-50 kg tömegben) az áramfejlesztőkben kiválthatóak az új, teljesítményelektronikai félvezetőkkel ellátott elektronikai szabályzókkal (kb. 20 dkg), melyek segítségével pontosabb feszültségszabályzás érhető el az akár 50 éves gépeknél,
- a tekercselési módszerek fejlődésével stabilabb és kisebb tömegű generátorok állíthatóak elő – bevett módszer a zománcozott alumínium huzal használata réz helyett kisebb teljesítményű (5 kW alatt) gépeknél.



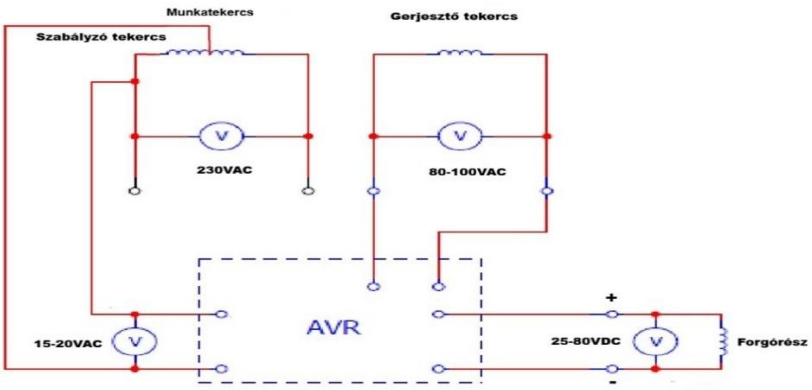
1. ábra: Egy benzines *4,2 kW-os egyfázisú áramfejlesztő (saját kép).*

Az általában használatos gépek többségében léghűtéses megoldású a meghajtás, a nagyobb teljesítményeknél (<10 kW) viszont kizárólag vízhűtéses motorokat alkalmaznak. Minden esetben meg kell oldani a motorok fordulatszám tartását, mivel az alkalmazott generátor típus szinte minden esetben egy szinkron gép. Így a póluspárok száma eldönti a szükséges szinkron fordulatszámot, amelyet mindenféle körülmény mellett tartania kell a belső égésű motornak. Ezek 2 pólusnál 3000 1/perc, 4 pólusnál 1500 1/perc. 6 vagy több pólussal rendelkező generátor is létezik természetesen, de azok már nem belső égésű motorokkal, hanem más pl. víz- vagy szélturbinával vannak meghajtva. Az ok egyszerű: az 1500 1/perc-nél kisebb szinkron fordulat már nem kedvező a belső égésű motoroknak a leadott nyomaték szempontjából.

1.2. Az egyfázisú szinkron generátor működése

A továbbiakban a csúszógyűrűs forgóresszel ellátott egyfázisú generátor feszültség szabályzóját fogjuk vizsgálni. Vajon milyen feltételek mellett tud teljesülni, hogy a terhelés során továbbra is fenntartható legyen a szükséges 230 V effektív feszültség és az 50 Hz-es frekvencia? Megjegyzem, hogy a háromfázisú eset hasonló megoldást igényel, de nagyobb teljesítményű félvezetőkkel.

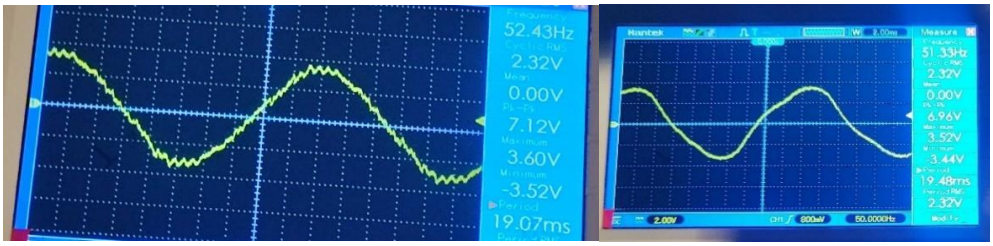
Ehhez a vizsgálathoz elengedhetetlen azt is bemutatni, hogy az egyfázisú generátor milyen részekkel rendelkezik és a feszültség szabályzó –, amelynél az angol rövidítést használom, azaz AVR-ként (**A**utomatic **V**oltage **R**egulator) is használom – hol helyezkedik el ebben a rendszerben. Alább egy ábra (2. ábra) mutatja be a legfontosabb részeket.



2. ábra: Az egyfázisú szinkron generátor részeinek bemutatása *(saját ábra).*

Az egyes részek feladatainak rövid bemutatása:

– **Munkatekercs**: ebben indukáljuk a szinuszos (vagy kvázi szinuszos) alakú, 230 V effektív értékű váltakozó feszültséget 50 Hz frekvencia mellett. Az állórészben helyezkedik el. Az alábbi 3. ábra mutatja be a jelalakot üresjárati (bal oldali kép) és terhelt állapotban (1100 W, jobb oldali kép).



3. ábra: A munkatekercs feszültségek jelalakjai *(saját képek)*.

– **Gerjesztő** vagy **gerjesztő tekercs**: az állórészben egy segédtekercs, sokszor segédfázisnak is nevezik. Ez lesz a független „tápellátása" az AVR-nek, melynek közvetett segítségével (egyébként pulzáló) egyenfeszültség jut a forgórészre. Általában (az elektronikai beállító elemek módosításai miatt is) az ebben indukálódó váltakozó feszültség effektív értéke 80-100 V.
– **Szabályzó** vagy **szabályzó tekercs**: a munkatekercs része, megadott menetszám kivezetésével alakítható ki úgy, hogy arányos legyen a munkatekercs feszültségének változásával. Általában az értéke 15-20 V effektív értékű váltakozó feszültség.
– **AVR** vagy (automatikus) **feszültség szabályzó**: ez látja el megfelelő egyenfeszültséggel a forgórészt, hogy a munkatekercsben előálljon a 230 V-os effektív érték.
– **Forgórész**: a feladata a *beleépített állandó mágnessel* és a tekercselésével az, hogy indukálja a szükséges feszültségeket az állórészben, miközben a motor a megfelelő, általában (kétpólusú esetben) 3000 1/perc-es fordulaton forgatja. A kétpólusú eset a leggyakoribb megoldás a 10 kW-nál kisebb áramfejlesztők esetén. Az alábbi 4. ábra mutatja be a forgórészre jutó feszültség jelalakot üresjárati (bal oldali kép) és terhelt állapotban (1100 W, jobb oldali kép). Jól kivehető, hogy a kitöltési tényező szélesebb lett és így a forgórész ismét a 230 V-ot indukálja az állórészben terhelés alatt is.

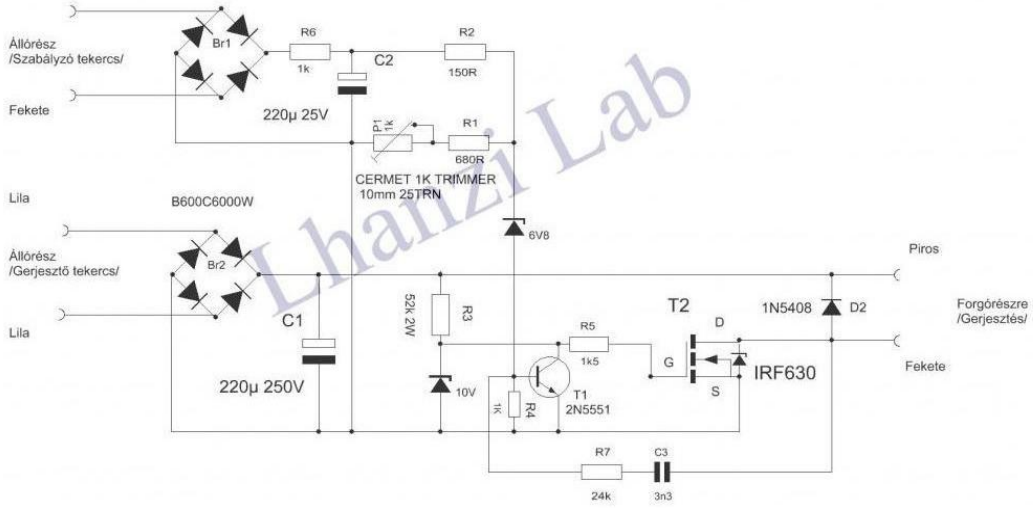
4. ábra: A forgórészre jutó feszültségek jelalakjai *(saját képek)*.

2. A FESZÜLTSÉGSZABÁLYZÓ

Sokféle megoldás kering az interneten a feszültségszabályzókra vonatkozólag, nem is beszélve az egyéb fejlesztő cégek esetén kiadott változatokat. Az alábbi egy alapkapcsolás, amely egyszerű működést valósít meg, melyből érdemes volt továbblépni.

2.1. Leiszt János megoldása, azaz az „Lhanzi Lab”-féle kapcsolási rajz

A különböző elektronikai fórumokon is megtalálható a Leiszt János (RIP, 2013.09.05) által bemutatott feszültségszabályzó működése, melynek a kapcsolási rajza az alábbi (5. ábra).



5. ábra: Az „Lhanzi Lab”-féle kapcsolási megoldás *(lásd: [1]).*

A kapcsolás működésének leírása többféle fórumon is megjelent, amely az alábbi (lásd [2]):
„Tehát, ha beindítod az aggregátort a forgórészben elhelyezett állandó mágnesek áramot indukálnak az állórészben, és a C1 kondi elkezd töltődni. A 10 V-os zéneren kialakuló feszültség nyitja a fetet és áram kerül a forgórészre, ami szépen teljes feszültségre állítja az állórészt, eközben az érzékelő tekercsben is feszültség keletkezik ami tölti a C2 elko-t amire kötött R2-R1-P1 osztó kimenete a 6V8-as zéner diódára megy és amikor eléri annak a nyitó feszültségét akkor nyitja a T1 tranzisztort, ami zárja a T2 FET-et és a szabályzás létrejön! Ha magas a feszültség, akkor a zénert célszerű kisebbre cserélni! Pl. 4V3 és próbálni!”

A működés leírását az alábbiak szerint részletezem ill. egészítem ki, hogy megértsük a korábban látható (lásd: 4. ábra) pl. forgórész jelalakot is.

1. A belső égésű motor megforgatja – egyre növekvő fordulatszámmal – a forgórészt elérve a pl. 3000 1/perc-es fordulatszámot (kétpólus esetén).
2. A forgórészbe beépített állandó mágnes kinyitja a gerjesztő tekercs segítségével a Graetz-hidat, azaz a C1 kondi töltődik és elegendő feszültség jut a T2-re, hogy az kinyisson és ezzel gerjessze a forgórészt. Ennek hatására még nagyobb feszültség indukálódik a gerjesztő tekercsben, amely ismét növeli a forgórészre jutó feszültséget.
3. Arányosan a munkatekercsben és a szabályzó tekercsben is növekszik az indukálódó feszültség, amíg a szabályzó tekercs elő nem állítja azt az osztott feszültséget (R2-R1-P1 soros-feszültségosztó kapcsolás), melynek hatására a 6,8 V-os zéner dióda vezetni kezd. Ez a T1 tranzisztor segítségével lezárja a T2-t, azaz létrejött a szabályzás.

4. Mivel a lezárás miatt csökken a feszültség a forgórészen, így csökken minden tekercsben, azaz a szabályzó részre is kevesebb jut: végeredményben a 6,8 V-os zéner ismét lezár és a T2 kinyit. Ez okozza, hogy a forgórészre pulzáló (közel négyszögjel alakú, lásd 4. ábra — bal oldali kép) egyenfeszültség jut, ahol a csúcsérték az egyenirányított értékből adódik.
5. Nyilvánvalóan terheléskor a kitöltési tényező növekszik (lásd 4. ábra — jobb oldali kép), hiszen növelni kell a forgórészre jutó feszültséget, kompenzálva az állórész terhelését. A jelalak szélességének növekedését a szabályzó feszültség csökkenése eredményezi, hiszen „később" kapcsolja le a T2-t, amely így tovább van nyitva növelve ezzel a mért átlagolt egyenfeszültséget a forgórészen.

További észrevételek, melyek lényegesek a kapcsolás értelmezéséhez:

6. A beépített 10 V-os zéner dióda védi a Gate (kapu) részét a T2-nek, mivel ezeknél a teljesítmény félvezetőknél erre katalógus adat is elérhető (lásd [3]).
7. A C1 és a C2 kondenzátorok „-" (minusz) ágai össze vannak kötve.
   Fontos: az ilyen módon előállított feszültségek *<u>földfüggetlenek</u>*, ráadásul az AVR-be belépő szabályzó és gerjesztő feszültségek egymástól is független módon vannak előállítva. Emiatt az egyenirányítás utáni C1 és C2 kondenzátorok feszültségeit közös pontra kell hozni, hogy a korábban leírt szabályzás működhessen, azaz ne legyen „libegés".
8. A Graetz-hidak kialakításának (azaz a bennük levő diódáknak) olyannak kell lennie, amely nem okoz problémát a működés közben. A gerjesztő tekercs esetén minimum 5 A átfolyó áram és 300V ellenfeszültség, a szabályzó tekercs esetén elegendő az 1 A átfolyó áram és a 100 V ellenfeszültség elviselése.

2.2. Félvezető problémák

Az előző alfejezetben bemutatott feszültség szabályzó kapcsolás sajnos több szempontból már nem kivitelezhető, azaz megépítése esetén előbb-utóbb hibás működést kaphatunk. A hibajelenségek az alábbiak szoktak lenni:

1. A kapcsolás ismertetésekor megadtuk, hogy a forgórészre jutó feszültséget egy IRF630 típusú teljesítményfélvezető (N-MOSFET) „szolgáltatja". Ennek a katalógusadatok alapján a maximális D(rain)-S(ource) feszültsége 200 V, a maximális D(rain) áram pedig 5,7 A. Mivel a forgórészben folyó áramot általában 2 A alatt érdemes tartani (a gyakorlatban ez akár 3 A is lehet), továbbá a gerjesztő feszültség egyenirányításával létrejövő D-S feszültség kb. 140 V, így a választás jónak tűnhet. Sajnos az utóbbi 10 évben a félvezetők gyártásában bevezetett „rétegvéknyítás" miatt ez a félvezető kb. 10-20 indítás után zárlatba fut (azaz a D-S között állandó kapcsolat lesz, amely már nem szabályozható), mert nem képes elviselni a 200 V közeli (pl. 170 V-os) D-S feszültséget. A működésből is adódik egy másik ok, amelyet a következő pontban részleteztem.
2. A kapcsolás működéséből adódik, hogy a C2 kondenzátor és az utána levő R1-R2-P1 feszültségosztón némi késleltetéssel alakul az a feszültség, amely végül az IRF630 lezárását adja. Ez azt is jelenti, hogy kifejezetten induláskor (, de pl. 1000 W-os terhelésből üresjárati/terheletlen állapotba való visszatéréskor is) a D-S feszültség nagyobb lesz a szabályozott 140 V-nál (nyilvánvalóan a 230 V-os érték a munkatekercsen is nagyobb, akár 260 V-ot elérheti), elérheti a 170-180 V-ot. Ez a túllövés nyilvánvalóan elég közel van az IRF630-as maximális D-S feszültségéhez.
3. A harmadik probléma a zéneres védelemből ill. szabályzásból adódik. Nyilvánvalóan előfordulhat, hogy a nyitás-zárásban kiemelt szerepet játszó 6,8 V-os zéner meghibásodása

esetén a kimenő feszültség akár 330 V is lehet a munkatekercsen. Ebben az esetben nyilvánvalóan túlterhelődik az IRF630 és más alkatrészek is, melyek így tönkremennek.

4. Az előzőhöz hasonló módon a T1 tranzisztor hibája, pl. zárlata esetén is működésbeli probléma lép fel. Bár ekkor a T2 lezárásra kerül, azaz azt tapasztaljuk, hogy munkatekercsen lényegében nem jelenik meg váltakozó feszültség (csak az állandó mágnesek által gerjesztett kb. 9 VAC).
5. További szabályzási problémaként adódik, hogy amennyiben a tekercseléskor a szabályzó rész menetszámát rosszul alakítják ki, akkor akár 25-30 VAC is megjelenhet a Graetz-híd előtt. Emiatt a C2-es kondenzátorra eső feszültség (figyelembe véve az R6 előtét ellenállást is) induláskor közel lehet a 25 VDC-hez és a tönkremenetelét okozza. Ismét a szabályzás fog sérülni és okozza a korábban már ismertetett hibák valamelyikét.

3. PROBLÉMÁK KEZELÉSE

3.1. Megoldási lehetőségek

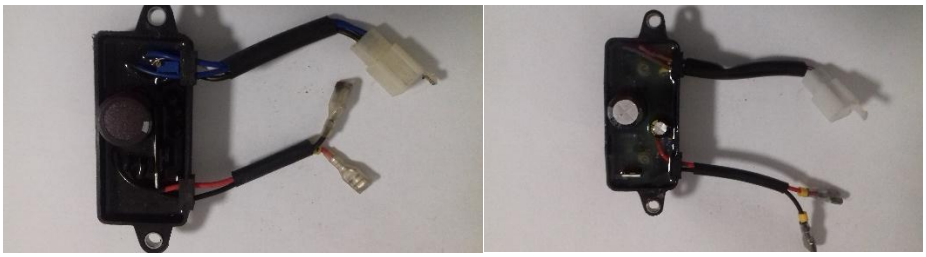
Az előző alfejezetben felsorolt problémák megoldási lehetőségei:

- Az 1-2. pontokban megadott problémákat egyaránt az IRF630 cseréje oldja meg. Vannak olyan nagyobb teljesítményű (pl. IRF644, lásd [4]) N-MOSFET-ek, melyek 250 VAC-s maximális D-S feszültség és 10-20 A-es maximális D(rain) áram adatokkal rendelkeznek.
- A 3. probléma megoldása a nagyobb teljesítményű, pl. 2 W-os teljesítményű zéner alkalmazása. Az eredeti Leiszt János-féle kapcsolásban szereplő zénerek általában (bár nincs feltüntetve) 0,5 W-osak. Az előny abból is adódik, hogy nagyobb zéner áramot visel el a nagyobb teljesítményű zéner, azaz megfutáskor sem lesz pl. zárlatos. A 0,5 W és a 2 W-os zénerek esetén a maximális zéner áram általában 5 mA és 30 mA értékűek rendre, így valóban nagyobb tűrést kapunk.
- A 4. probléma alapvetően csak egy cserét jelent a NYÁK-on, hiszen nem okoz a többihez képest súlyos károkat az alkatrészekben.
- Az 5. esetben a megoldás (saját tapasztalataim alapján is) kézenfekvő: olyan C2 kondenzátort kell választani, amelynek a maximális egyenfeszültsége 35VDC, így elkerülhető a kondenzátor meghibásodása.

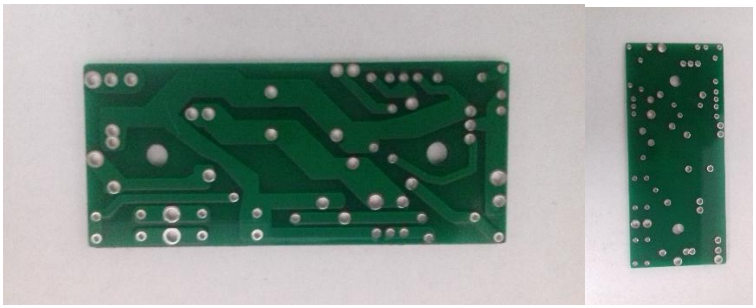
3.2. Javítási és fejlesztési lehetőségek

Az előző alfejezetekben megadott problémák és megoldások a „gyári” (általában kínainak csúfolt) feszültség szabályzók esetén kivitelezhetetlen. Az ok egyszerű (lásd 6. ábra, bal oldali kép): az egész műanyag ház belseje a teljes elektronikával együtt egy nagyon kemény, fekete színű anyaggal van kiöntve (a műgyantára hasonlít). Ebből az egyes alkatrészeket és a NYÁK-ot csak roncsolással (+ hőlégfúvó) lehetne kiszabadítani.

Már a Leiszt János is gyártatott olyan NYÁK-ot, amelyben cserélhetőek az alkatrészek. Nyilvánvalóan egy ilyen esetben a korábban felsorolt hibák könnyen javíthatóak egy-egy alkatrész cseréjével. A saját vállalkozásomban is készültek el ilyen vezérlők (lásd 6. ábra, jobb oldali kép), melyek átlátszó szilikon beágyazást kaptak. Ezen vezérlők NYÁK-járól láthatunk képeket a 7. ábrán.



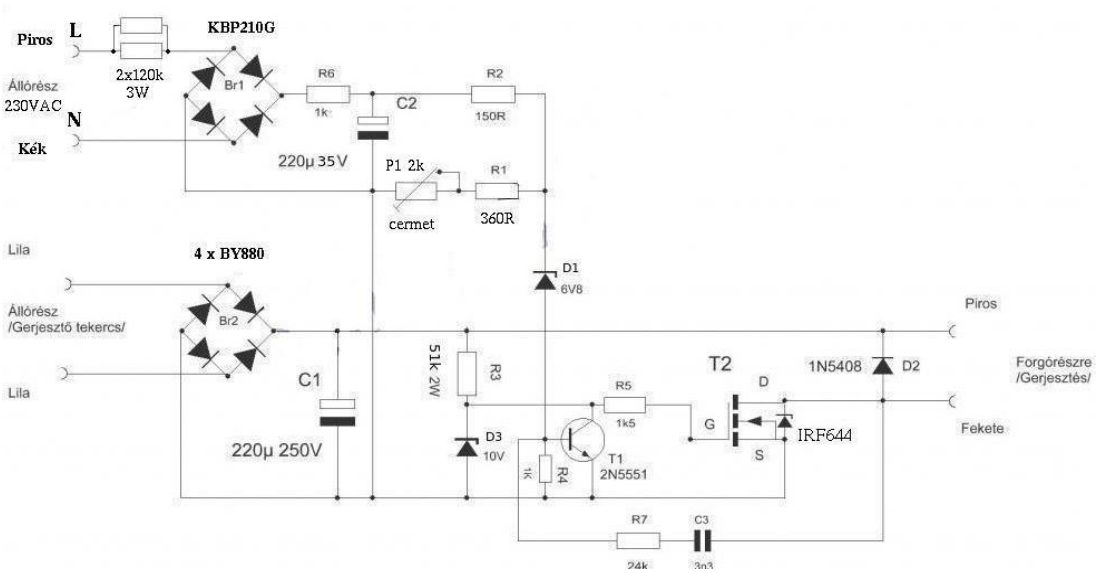
6. ábra: A „gyári” kiöntésű és az „utángyártott” feszültségszabályzó *(saját képek).*



7. ábra: A saját NYÁK-ok két oldala *(saját képek).*

A (tovább)fejlesztési lehetőségek az alábbiak lehetnek, melyek könnyen megvalósíthatóak:

1. A tekercselési munkadíjat és a tekercseléshez szükséges anyagköltséget is csökkenthetjük, ha az alábbi (8. ábra) kapcsolást használjuk inkább.



8. ábra: A saját, módosított kapcsolás *(saját ábra).*

A korábbi kapcsolási rajzhoz képest lényeges változás, hogy nincs szükség szabályzó tekercsre, mert közvetlenül a 230 V-ot figyeli a szabályzó. Így nem szükséges a tekercseléskor kialakítani (és persze előre kiszámolni) a szükséges menetszámot.

2. Számos olyan „kínai” univerzális szabályzó van a piacon, melyek a forgórész mágneses remanenciáját kihasználva (nem feltétlenül van beépítve állandó mágnes) indítják el a

gerjesztést. NINCS szükség külön gerjesztésre sem, azaz NINCS gerjesztő tekercs és a szükséges tápfeszültséget a forgórész táplálásához a végül 230 V-ot elérő munkatekercsből veszik fel. Ezek a vezérlők sajnos általában a kefe (azaz csúszógyűrűk) nélküli áramfejlesztők esetén biztos megoldások. A forgórész megfelelő (pl. nagy fluxusűrűség) paraméterei esetén csúszógyűrűs esetben is alkalmazhatóak, de ritkán. Ilyen esetekben sokszor ki kell segíteni az elektronikát a fázis(ok)ra kötött üzemi kondenzátor(ok)kal, mert különben terheléskor rosszul (pl. nagy lesz a feszültségesés, akár 210 V-ra is lecsökkenhet) reagál a vezérlő. A következő képen (9. ábra) egy ilyen látható:

9. ábra: Egy univerzális elektronika – GAVR 8a *(saját kép).*

A képeken jól látható, hogy van lehetőség fázis- és vonali feszültség bekötésre/figyelésre is (R-N-H), továbbá egy 5 A-es olvadó (narancssárga színű, késes) biztosíték védi a forgórészt (F+ és F-) a nagy áramoktól. Mind a szabályzás, mind a tápellátás a munkatekercs segítségével történik.

3. További fejlesztési kérdésként adódik a 2. pont alapján, hogy lehet-e olyan módon megváltoztatni a korábbi kapcsolások valamelyikét, hogy ebben az esetben is elhagyható legyen a gerjesztő tekercs?
   A válasz: NEM! A szerző saját tapasztalatai és a kapcsolás tulajdonsága alapján túl nagy értékű lenne a D-S feszültség, mert ragaszkodnunk kell az egyenirányításhoz. Ugyan kaphatóak olyan MOSFET vagy IGBT teljesítmény félvezetők, melyek maximális D-S feszültsége megfelelő lenne, de a hirtelen feszültség (és kevésbé áramerősség) változásokat nem viselik el. Ezek kiküszöbölése olyan mértékű helyigénnyel járna a NYÁK-on, amely révén az nem férne el a kijelölt helyén az előre gyártott műanyag házban (lásd pl. 6. ábrát).
   Mi lehet a megoldás? A válasz egyértelmű: tirisztoros szabályzás szükséges, mely a szerző a következő kutatási feladata és célja.

4. ÖSSZEGZÉS

A korábbi részekben bemutatott vizsgálat alapján nyilvánvaló, hogy az áramfejlesztők működésénél használatos feszültségszabályzók körében többféle megoldás is lehetséges. Ha ehhez hozzávesszük a különböző pólusszámú és forgórész kialakítású generátorokat, akkor a feladat (és így a szabályzók köre) még nagyobbra növekszik. A tekercselési megoldások és az alkalmazott csapolások további, az alkalmazott géptípusra legoptimálisabban alkalmazható feszültségszabályzókat igényelnek. Bár a piacon fellelhetőek azok a programozható modulok, melyek segítségével nagyon precíz feszültség szabályzást lehetne elérni, mégsem alkalmasak erre a célra, ugyanis a por, a pára, a remegés és egyéb külső (be)hatásokra ezek az eszközök még túlságosan érzékenyek.

Ha szeretnénk végül megfogalmazni a feszültségszabályzók egyik törvényét, akkor ez a következő lenne:

„Stabilan, biztosan mindenféle körülmények között!”

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] LEISZT, J.: *Feszültségszabályzó kapcsolási rajz és leírás,* 2011, https://www.hobbielektronika.hu/forum/aggregator-feszultseg-szabalyzo?pg=1

[2] LEISZT, J.: *Majdnem Honda aggregátor, 2011,* https://lhanzi-elektro.5mp.eu/web.php?a=lhanzi-elektro&o=i5PO8EMtnc

[3] ST MICROELECTRONICS: *IRF630,* Rev 10 12.2018, https://www.tme.eu/Document/f3005d5bd1c4230362cf427f099ac6d7/irf630.pdf

[4] VISHAY SILICONIX: *IRF644, SiHF644*, 19.01.2015, https://www.tme.eu/Document/8ab1f9dc1c0d39108c757457ea83e579/IRF644PBF.pdf

BIZTONSÁGI ÖV DETEKTÁLÁSA TITÁN-DIOXID ALAPÚ INFRAVÖRÖS JELÖLÉSSEL DMS RENDSZEREKBEN

SEAT BELT DETECTION USING TITANIUM-DIOXIDE-BASED INFRARED MARKERS IN DRIVER MONITORING SYSTEMS

MÓRÉ Ádám[1], Papp Mátyás[2]

[1] Egyetemi tanársegéd, adam.more@uni-miskolc.hu
[1]Nyíregyházi Egyetem, Műszaki és Agrártudományi Intézet, 4400 Nyíregyháza, Sóstói út 31/b
Miskolci Egyetem, Automatizálási és Infokommunikációs Intézet, 3515 Miskolc, Egyetemváros

[2] BSc hallgató, nem40330@gmail.com
[2]Nyíregyházi Egyetem, Műszaki és Agrártudományi Intézet, 4400 Nyíregyháza, Sóstói út 31/b

Kivonat: *A tanulmány célja a biztonsági öv használatának megbízható detektálása Driver Monitoring System (DMS) alapú infravörös kamerarendszerrel, kiegészítve egy új, Titán-dioxid (TiO_2) adalékanyaggal ellátott textilmegoldással. A kutatás során különböző alternatív érzékelési módszereket értékeltem — köztük hőmérséklet-alapú érzékelést, alumíniumszálak alkalmazását és IR-markereket — azonban ezek gyártástechnológiai, tartóssági vagy költségbeli korlátai miatt nem bizonyultak megfelelőnek. A TiO_2-alapú adalékanyag a PET szálak extrudálási folyamatába alacsony százalékban integrálható, miközben jelentősen növeli az öv infravörös tartományban mért reflektivitását. A DMS rendszerrel végzett gyakorlati tesztek azt mutatják, hogy a kezelt öv IR-képe nagy kontrasztal elkülönül a ruházattól, és a detektálás pontossága számottevően javult a hagyományos szövetekhez képest. A bemutatott megoldás gyártás- és költségoldalról is skálázható, és alkalmas a jövőbeli járműipari DMS rendszerekbe történő integrációra.*

Kulcsszavak: *Biztonsági öv; Infravörös detektálás; Driver Monitoring System; Titán-dioxid; PET szál; IR-reflektivitás; Járműbiztonság*

Abstract: *The aim of this study is to develop a reliable method for detecting seat belt usage using a Driver Monitoring System (DMS) equipped with infrared (IR) imaging, enhanced by a titanium-dioxide (TiO_2) modified textile structure. Several detection concepts — such as temperature-based sensing, woven aluminium fibers, and IR-reflective markers — were investigated, but limitations in manufacturability, durability, or cost rendered them unsuitable for large-scale automotive integration. The proposed approach introduces a TiO_2 additive blended into PET fibers during extrusion, enabling enhanced IR reflectivity without altering the mechanical or ergonomic properties of the belt. Practical tests conducted with an industrial DMS camera system confirm that the TiO_2-treated belt produces a clearly distinguishable IR pattern, substantially improving recognition accuracy under various lighting conditions. The results demonstrate that this low-cost, durable material-level enhancement can be effectively incorporated into future automotive safety and monitoring systems.*

Keywords: *Seat belt; Infrared detection; Driver Monitoring System; Titanium dioxide; PET fiber; IR reflectivity; Automotive safety*

1. BEVEZETÉS

A közúti balesetek jelentős részében a sérülések súlyosságát a nem megfelelően használt vagy egyáltalán nem használt biztonsági öv okozza, ezért a biztonsági öv viselésének megbízható észlelése kiemelt jelentőségű a modern járműbiztonsági rendszerekben. A korszerű Driver Monitoring System (DMS) infravörös kamerák segítségével figyeli a vezető éberségét és viselkedését, azonban a jelenlegi megoldások csak korlátozott pontossággal képesek felismerni a biztonsági öv helyzetét, különösen akkor, ha az öv színe és textúrája nem különül el megfelelően a ruházattól [1], [2] .

A kutatás célja egy olyan anyagalapú fejlesztés bemutatása, amely javítja az öv infravörös láthatóságát anélkül, hogy új szenzorokat vagy összetett mechanikai elemeket kellene alkal-

mazni. A vizsgált alternatívák – hőmérséklet-alapú detektálás, alumíniumszálas vagy alumíniumbevonatos PET megoldások, illetve külső IR-markerek használata – gyártástechnológiai és tartóssági szempontból nem bizonyultak megfelelőnek [3], [4] .

A végső megoldás a titán-dioxid (TiO_2) adalékolásával előállított PET szálak alkalmazása lett, amelyek kis mennyiségben is jelentősen növelik a szövet infravörös reflektivitását. A gyakorlati tesztek igazolták, hogy a TiO_2-kezelt biztonsági öv a DMS kamera képein jól elkülönül a vezető ruházatától, ezáltal a detektálás pontossága számottevően javul. A módszer gyártástechnológiai szempontból egyszerűen integrálható, költséghatékony és alkalmas jövőbeli járműipari alkalmazásra [5], [6] .

2. MODELLEZÉSI ÉS OPTIMALIZÁLÁSI MÓDSZERTAN

A kutatás egy olyan anyagalapú megközelítést vizsgált, amely a biztonsági öv infravörös tartományban való láthatóságát növeli a Driver Monitoring System (DMS) kamerái számára. A módszertani folyamat első lépéseként több technológiai alternatíva értékelése történt meg, köztük a hőmérséklet-alapú felismerés, alumíniumszálak befonása, alumíniumbevonatos PET szálak alkalmazása, valamint lokális IR-reflektív markerek használata. Ezek a megoldások elméletileg alkalmasak lehettek volna a detektálás javítására, azonban mindegyik jelentős gyártástechnológiai módosítást, költségnövekedést vagy a szövet mechanikai tulajdonságainak romlását eredményezte volna, így hosszú távon egyik sem bizonyult megfelelőnek [7] .

A módszertan második lépése a titán-dioxiddal (TiO_2) módosított PET szálak infravörös viselkedésének vizsgálatára irányult. A kísérleti eljárás során TiO_2 került felvitelre a biztonsági öv felületére annak érdekében, hogy meghatározható legyen, milyen mértékben növeli az anyag az öv kontrasztját a DMS rendszer infrakameráján.

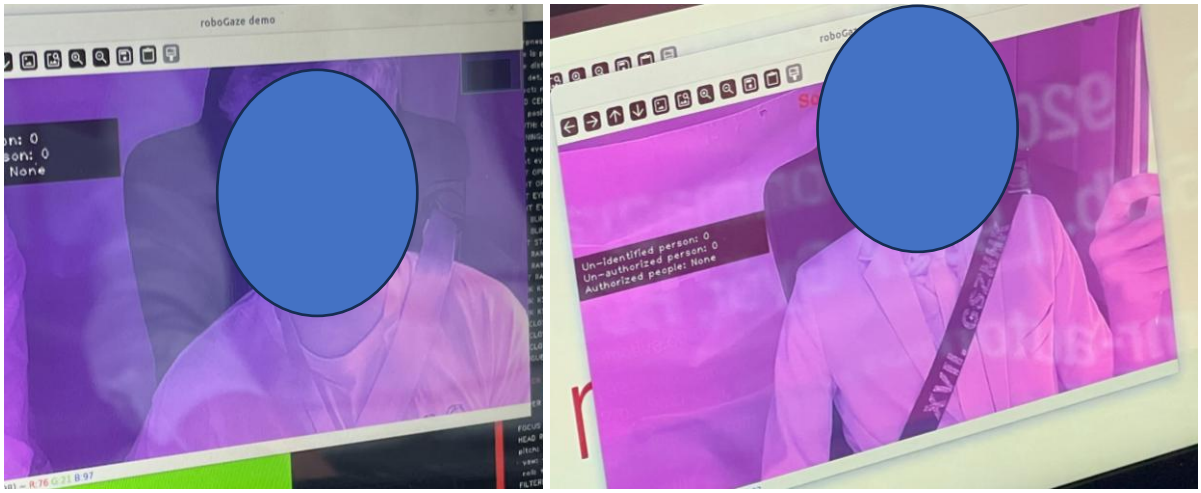
1. ábra: *Biztonsági övre felvitt TiO2 porréteg*

A teszt során a jármű vezetőjéről készült alapállapotú felvétel került összehasonlításra a TiO_2-kezelt változattal, a különbséget pedig az 1. ábra szemlélteti. A vizsgálat célja annak meghatározása volt, hogy már kis mennyiségű TiO_2 alkalmazása is elegendő-e ahhoz, hogy a biztonsági öv jól elkülöníthető legyen a ruházat textúrájától és fényvisszaverési tulajdonságaitól.

A módszertan fontos eleme volt továbbá a TiO_2 járműipari gyártástechnológiába történő integrálhatóságának értékelése. A kísérleti vizsgálat során figyelembe került, hogy az adalékanyag kis százalékban közvetlenül a PET granulátumhoz keverhető, így az extrudálási folyamat minimális módosításával beilleszthető, miközben nem befolyásolja hátrányosan a biztonsági öv rugalmasságát vagy szakítószilárdságát. A gyakorlati tesztek és az anyagjellemzők alapján a TiO_2-alapú megoldás egyidejűleg felelt meg a detektálhatósági, tartóssági és gyártástechnológiai követelményeknek [8], [9], [10] .

3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS

A vizsgálatok eredményei azt mutatták, hogy a titán-dioxiddal módosított biztonsági öv jelentős mértékben növelte a szövet infravörös tartományban megjelenő kontrasztját, amely közvetlen hatással volt a DMS kamera felismerési pontosságára. Az alapállapotú felvételeken a biztonsági öv textúrája és árnyalata több esetben szinte teljesen egybeolvadt a vezető ruházatával, ami a rendszer számára megnehezítette az öv pontos azonosítását. A TiO_2-vel kezelt felület ezzel szemben jól elkülönülő, erős visszaverődést mutatott, amely különböző testhelyzetek és fényviszonyok mellett is stabilan felismerhető maradt. A kontrasztkülönbség a 2. ábrán látható.



2. ábra: *Az infravörös kamera képe bevonatolás nélkül és TiO_2-bevonattal*

A felvételek részletes elemzése alapján megállapítható volt, hogy a TiO_2 alkalmazása már alacsony koncentrációban is jelentős növekedést eredményezett az IR-tartományban visszaverődő intenzitásban. Ez a megnövekedett reflektivitás élesebben kirajzolta a biztonsági öv széleit, valamint a szövet jellegzetes mintázatát, ami nagyobb megbízhatóságot biztosított a DMS felismerő algoritmus számára. A módszer csökkentette a hibás pozitív és hibás negatív detektálások arányát is, amely különösen fontos a valós közúti környezetben, ahol a vezető mozgása és ruházata jelentős változatosságot mutathat.

Az eredmények arra is rámutattak, hogy a TiO_2-vel kezelt biztonsági öv infravörös kontrasztja a kamera nézőpontjának változása esetén is jól megőrizte stabilitását. Ez kiemelt jelentőségű, mivel a járművekben alkalmazott DMS kamerák fix pozíciója mellett is számolni kell különböző testtartásokkal, a ruházat eltérő fényvisszaverési tulajdonságaival és változó megvilágítási körülményekkel. A vizsgálatok során az is beigazolódott, hogy a kezelés nem okozott látható vagy mérhető változást a szövet mechanikai tulajdonságaiban, így a módosított öv megfelel a járműipari tartóssági követelményeknek.

Összességében a vizsgálati eredmények alátámasztották, hogy a TiO_2-alapú felületmódosítás jelentős IR-kontrasztjavulást eredményez, amely nagymértékben növeli a DMS alapú biztonsági övdetektálás megbízhatóságát, és hosszú távon is alkalmas ipari alkalmazásra.

4. KONKLÚZIÓ

A vizsgálatok azt mutatták, hogy a titán-dioxiddal módosított PET alapú biztonsági öv jelentős mértékben javítja az anyag infravörös tartományban történő felismerhetőségét, ezáltal növelve a Driver Monitoring System (DMS) alapú övdetektálás megbízhatóságát. A bevonat

alkalmazása már kis koncentráció mellett is jól érzékelhető kontrasztnövekedést eredményezett, amely lehetővé tette a biztonsági öv egyértelmű elkülönítését a ruházat textúrájától és fényvisszaverési tulajdonságaitól.

A gyakorlati tesztek igazolták, hogy a megoldás nem igényel további szenzorokat vagy mechanikai módosításokat, és a szövet eredeti mechanikai jellemzőit sem befolyásolja hátrányosan. A módszer egyik legnagyobb előnye, hogy a TiO_2-adalékanyag a járműiparban széles körben alkalmazott PET gyártási folyamatába minimális változtatással integrálható, így sorozatgyártásra alkalmas. A kapott eredmények alapján a felületmódosítás skálázható, tartós, költséghatékony és iparilag releváns megoldást jelenthet a jövőbeli DMS rendszerekben történő biztonsági övdetektálás támogatására.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] M. MOHAMMADZADEH, M. PARAVAR, A. S. MIRZADEH, J. MOHAMMADZADEH, and S. MAHDIAN, "Seat Belt Usage in Injured Car Occupants: Injury Patterns, Severity and Outcome After Two Main Car Accident Mechanisms in Kashan, Iran, 2012," Arch Trauma Res, vol. 4, no. 1, p. e22203, Jan. 2015, doi: 10.5812/ATR.22203.

[2] J. D. FEBRES, S. GARCÍA-HERRERO, S. HERRERA, J. M. GUTIÉRREZ, J. R. LÓPEZ-GARCÍA, and M. A. MARISCAL, "Influence of seat-belt use on the severity of injury in traffic accidents," European Transport Research Review 2020 12:1, vol. 12, no. 1, pp. 9-, Feb. 2020, doi: 10.1186/S12544-020-0401-5.

[3] H. LU, H. PAN, AND Z. SUN, "Comparative review of advanced seatbelt detection: Infrared sensors vs. image-based systems," Applied and Computational Engineering, vol. 53, no. 1, pp. 136–141, Mar. 2024, doi: 10.54254/2755-2721/53/20241311.

[4] F. HU, "Robust Seatbelt Detection and Usage Recognition for Driver Monitoring Systems," Mar. 2022, Accessed: Nov. 27, 2025. [Online]. Available: https://arxiv.org/pdf/2203.00810

[5] N. PIRI, A. SHAMS-NATERI, and J. MOKHTARI, "The effect of TiO2 nanopigment on the optical properties of polyester fabric in UV–VIS–NIR regions," Color Res Appl, vol. 44, no. 2, pp. 257–263, Jan. 2018, doi: 10.1002/COL.22334.

[6] I. YUCE ET AL., "Titanium and Silicon Dioxide-Coated Fabrics for Management and Tuning of Infrared Radiation," Sensors (Basel), vol. 22, no. 10, p. 3918, May 2022, doi: 10.3390/S22103918.

[7] M. ZHONG, W. HUANG, C. WEN, B. HUANG, and J. HUANG, "Detection on Proper Wearing of Seat Belt Based on Infrared Mark Vision," Qiche Gongcheng/Automotive Engineering, vol. 39, no. 7, pp. 760–766, Jul. 2017, doi: 10.19562/J.CHINASAE.QCGC.2017.07.006.

[8] E. MATXINANDIARENA ET AL., "The effect of titanium dioxide surface modification on the dispersion, morphology, and mechanical properties of recycled PP/PET/TiO2 PBNANOs," Polymers (Basel), vol. 11, no. 10, Oct. 2019, doi: 10.3390/POLYM11101692.

[9] G. GUO ET AL., "Preparation and ageing-resistant properties of polyester composites modified with functional nanoscale additives," Nanoscale Res Lett, vol. 9, no. 1, p. 215, 2014, doi: 10.1186/1556-276X-9-215.

[10] N. PIRI, A. SHAMS-NATERI, and J. MOKHTARI, "The effect of TiO2 nanopigment on the optical properties of polyester fabric in UV–VIS–NIR regions," Color Res Appl, vol. 44, no. 2, pp. 257–263, Jan. 2018, doi: 10.1002/COL.22334.

AUTOMATIZÁLT NÖVÉNYTERMESZTÉS OPTIMALIZÁLÁSA GENETIKUS ALGORITMUSOKKAL ÉS SZENZOR VEZÉRELT PROTOTÍPUS SEGÍTSÉGÉVEL

OPTIMIZATION OF AUTOMATED PLANT CULTIVATION USING GENETIC ALGORITHMS AND A SENSOR-CONTROLLED PROTOTYPE

MAJOROS Ákos[1], MÓRÉ Ádám[2]

[1] MSc hallgató, majoros.akos@student.uni-miskolc.hu
[1] Miskolci Egyetem, Automatizálási és Infokommunikációs Intézet, 3515 Miskolc, Egyetemváros

[2] Egyetemi tanársegéd, adam.more@uni-miskolc.hu
[2] Miskolci Egyetem, Automatizálási és Infokommunikációs Intézet, 3515 Miskolc, Egyetemváros
Nyíregyházi Egyetem, Műszaki és Agrártudományi Intézet, 4400 Nyíregyháza, Sóstói út 31/b

Kivonat: *A tanulmány célja egy automatizált növénytermesztési rendszer bemutatása és értékelése, amely genetikus algoritmusokkal optimalizált optimumfüggvényt alkalmaz szenzor vezérelt prototípuson. A dolgozatban bemutatott módszer öt környezeti paraméter (talajnedvesség, relatív páratartalom, talajhőmérséklet, talaj pH és fény hullámhossza) hatását modellezi egy Gauss-alapú, exponenciális komponensekből felépülő fitness függvény segítségével. A modell implementációja Raspberry Pi 4 alapú prototípuson történt, ahol a szenzoradatok valós időben táplálják a fitness függvényt, valamint az optimumfüggvényre épülő genetikus algoritmus javasolja az aktuátor-beavatkozásokat. A kísérleti eredmények azt mutatják, hogy a GA-vezérelt beavatkozások jelentősen növelik az optimumfüggvény kimenetét, javítva a növény (Ocimum basilicum) növekedési feltételeit és csökkentve a kritikus stresszhelyzetek előfordulását. A cikk összegzi a módszertant, bemutatja a prototípus hardver- és szoftverfelépítését, valamint értékeli a kapott eredményeket.*

Kulcsszavak: *Optimumfüggvény, Genetikus algoritmus, Precíziós mezőgazdaság, Szenzor vezérelt prototípus*

Abstract: *The aim of this study is to present and evaluate an automated plant cultivation system that employs a genetic-algorithm-optimized objective (fitness) function within a sensor-controlled prototype. The proposed method models the combined effects of five environmental variables—soil moisture, relative humidity, soil temperature, soil pH and light wavelength—using a Gaussian-based formulation composed of exponential components. The model was implemented on a Raspberry Pi 4-based prototype in which real-time sensor measurements feed the fitness function and the genetic algorithm proposes actuator interventions. Experimental results indicate that GA-driven control substantially increases the fitness function output, thereby improving growth conditions for basil (Ocimum basilicum) and reducing the incidence of critical stress events. The paper summarizes the methodology, describes the prototype's hardware and software architecture and evaluates the empirical findings.*

Keywords: *Optimum Function, Genetic Algorithm, Precision Agriculture, Sensor-Controlled Prototype*

1. BEVEZETÉS

A precíziós mezőgazdaság és az automatizált növénytermesztés iránti igény növekedése egyre nagyobb teret ad a mesterséges intelligencia alkalmazásainak. A környezeti paraméterek finomhangolása és az erőforrások hatékony felhasználása különösen fontos beltéri és fedett termesztési rendszerekben, ahol a mikroklíma szabályozása közvetlen hatással van a terméshozamra és a minőségre. Jelen kutatás célja egy olyan, gyakorlati megvalósítást is tartalmazó vizsgálat bemutatása, amely matematikai fitness függvényre épülő értékelést és genetikus algoritmus alapú optimalizációt kombinál szenzor vezérelt prototípussal. A dolgozatban a korábbi elméleti munkámra építve a bazsalikom (Ocimum basilicum) termesztését választottam vizsgálati növénynek, mivel gyors fejlődése és fényérzékenysége jól alkalmas a rendszer érzékenységének és hatékonyságának demonstrálására [1] [2] [3].

2. MODELLEZÉSI ÉS OPTIMALIZÁLÁSI MÓDSZERTAN

2.1 Gauss-alapú optimumfüggvény matematikai leírása

A vizsgálat központi eleme egy optimumfüggvény, amely öt, a növény fejlődését befolyásoló környezeti paraméter együttes hatását kvantifikálja. Minden paraméter hozzájárulását Gauss-formájú komponenssel modelleztem, így a teljes optimum függvény a komponensek szorzataként adódik. Az 1. egyenletben a függvény általános alakja, a 2. egyenletben a kifejtett alakja látható.

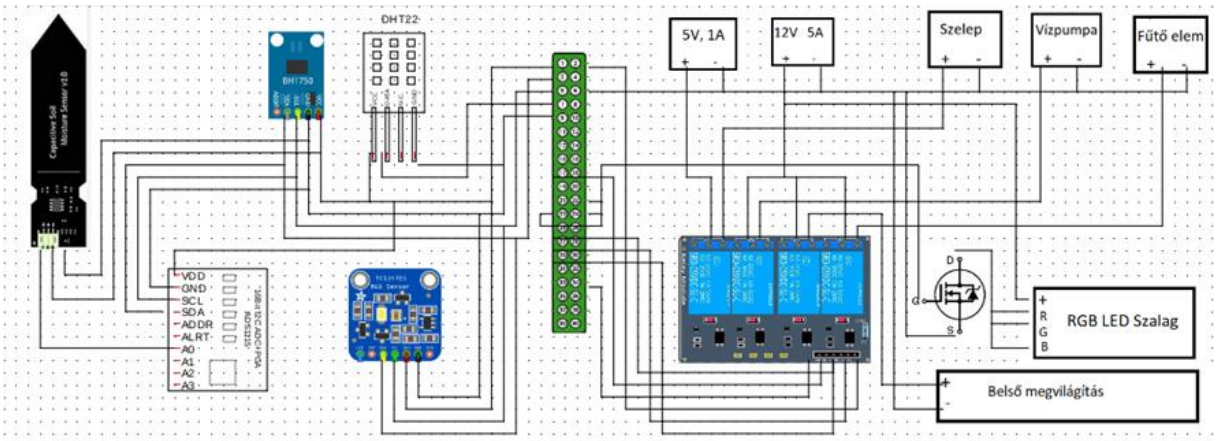
$$Y = 100 \cdot [f(p) \cdot f(t) \cdot f(h) \cdot f(ph) \cdot f(\lambda)] \; =. \tag{1.}$$

$$= 100 \cdot \left[e^{-\frac{(x(p)-x_{op})^2}{2\cdot\sigma_p{}^2}} \cdot e^{-\frac{(x(t)-x_{ot})^2}{2\cdot\sigma_t{}^2}} \cdot e^{-\frac{(x(h)-x_{oh})^2}{2\cdot\sigma_h{}^2}} \cdot e^{-\frac{(x(ph)-x_{oph})^2}{2\cdot\sigma_{ph}{}^2}} \cdot e^{-\frac{(x(\lambda)-x_{o\lambda})^2}{2\cdot\sigma_\lambda{}^2}} \right] \tag{2.}$$

Ahol az öt tag az öt környezeti paraméter (sorban páratartalom, talajnedvesség, hőmérséklet, pH érték, valamint fény hullámhossz) 0-1-ig terjedő eredményét adja vissza. Minden tag három változót tartalmaz, az aktuális értéket, melyet a szenzorok adnak vissza (x(p), x(t)…), az optimális értéket, amely a szakirodalom által meghatározott (x_{op}, x_{ot}…), illetve egy σ tényezőt, amely azt határozza meg, melyik paraméter mennyire fontos a növény életciklusának bizonyos szakaszában. Ez szintén szakirodalom által meghatározott érték [4] [5] [6], amely szabályozható terméshozam visszacsatolás által. A függvény kimenete 0 és 100 közötti skálán értelmezett, ahol 100 jelenti a növény számára ideális körülményeket.

2.2 A kísérleti prototípus hardveres és szoftveres felépítése

A prototípus hardveres felépítése Raspberry Pi 4 alapú vezérlőre épült. A méréseket DHT22 (hőmérséklet és páratartalom), SOILCAP-V20 (talajnedvesség), BH1750 (fényintenzitás) és TCS34725 (hullámhossz közelítése RGB értékekből) szenzorok biztosították. Az aktuátorok elemei egy RGB LED szalag spektrum és intenzitásszabályozással, egy vízpumpa és mágnesszelep az öntözéshez, valamint egy fűtőelem és ventilátor a hő és légkezeléshez. A rendszer kapcsolási rajzát az 1. ábra tartalmazza [7].



1. ábra: *A rendszer összeállítása szenzorokkal és aktuátorokkal*

A szoftveres megvalósítás Python nyelven történt. A korábban MATLAB-ban kidolgozott optimumfüggvényt átültettem Pythonba, a genetikus algoritmus implementációját a DEAP könyvtár biztosította. A genetikus algoritmus egyedek három komponensű vektorokként reprezentálták a beavatkozási javaslatokat: locsolási hatás, hőmérséklet és spektrális módosítás. A fitness függvény a prototípus aktuális szenzorértékeiből számított *Y* érték maximalizálására törekedett. A rendszer meghatározott időnként futtatta az algoritmust, a legjobb egyed által javasolt beavatkozásokat a vezérlő végrehajtotta, és az eredményeket log fájlban rögzítette [8].

2.3 Vizsgálati időszak és kísérleti környezet leírása

A kutatáshoz a bazsalikomot választottam, mint kísérleti növény, a gyors fejlődése, valamint az érzékenysége miatt. Az elvetés időpontja 2025.09.15 volt, a kutatásban szereplő utolsó információt 2025.10.30-ig jegyeztem fel, tehát a teljes ciklus 46 napig tartott. Bár a kutatást zárt légtérben végeztem, az őszi idő meghatározta az időjárást, különösen a napfény mennyisége volt kevesebb az ideálistól. Azonban a rendszert úgy terveztem meg, hogy az év minden időszakában közel maximális terméshozamot érjen el, ezáltal a kísérleti időszak ennek validálására is alkalmas. Összehasonlítási alapként párhuzamosan elvetettem egy természetesen nevelt növényt is, amelyet a szakirodalom által ideálisnak vélt körülmények mellett gondoztam. A két bazsalikom fejlődése során fellépő különbségek alapján következtettem a módszer eredményére [9] [10].

3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS

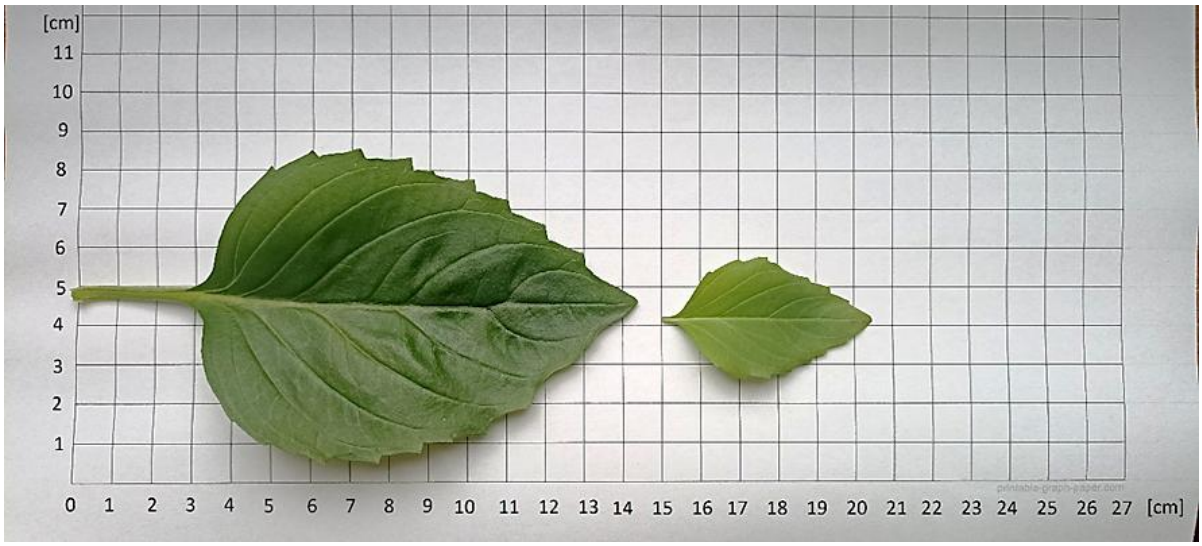
3.1 Optimumfüggvény kimeneti értékei

A genetikus algoritmusokkal vezérelt rendszer jelentős javulást eredményezett az optimumfüggvény kimenetében a referencia üzemmódhoz képest. A kezdeti, optimalizálás nélküli Y értékek gyakran alacsonyan voltak, különösen a fény és talajnedvesség ingadozásai miatt. A genetikus algoritmus futtatása után a rendszer által javasolt paraméterkombinációk következtében a napi átlagos Y értékek szignifikáns emelkedést mutattak, és a kritikus stresszhelyzetek (például aszályszerű talajnedvesség csökkenés, magas páratartalom) előfordulása csökkent.

3.2 Két kísérleti növény között fellépő méretbeli különbségek

A 2. ábrán a genetikus algoritmusokkal (bal oldali) és a természetesen nevelt növény (jobb oldali) levelei láthatóak a kutatás befejeztével, amelyek a különbségek feltárását segítik.

Az ábrán jól kirajzolódnak azok a morfológiai különbségek, amelyek túlmutatnak a puszta méretbeli eltéréseken. A bal oldalon látható, genetikus algoritmussal optimalizált környezetben nevelt bazsalikom egyede egyértelműen nagyobb levéltömeggel és kiterjedtebb felülettel rendelkezik, amit az 1×1 cm-es beosztású háttérrács lehetővé tesz pontosan számszerűsíteni. A levélhossz megközelítőleg 11 cm, a szélesség 8 cm, ami 1,375-ös hossz–szélesség arányt eredményez. A természetes körülmények között nevelt kontrollnövény levele ezzel szemben körülbelül 5 cm hosszú és 3,2 cm széles, aránya 1,5625. Bár a két arány értéke hibahatáron belül közel azonosnak tekinthető, a két levélalak mégis eltér egymástól. Az optimalizált környezetben fejlődött levél teltebb, kerekdedebb formát mutat, míg a kontrollnövény levele keskenyebb, nyújtottabb jellegű.



2. ábra: *A két növény levelei a kutatás végén*

A morfológiai különbségek mellett a levélszín is markáns eltérést mutat. A mesterséges intelligencia által szabályozott környezetben nevelt növény levelei sötétebb, mélyebb zöld árnyalatot vettek fel, ami a szakirodalom szerint a magasabb klorofilltartalommal és a kedvezőbb tápanyag- és fényviszonyokkal hozható összefüggésbe. A természetes körülmények között fejlődött növény levelei ezzel szemben világosabb tónusúak, ami a kevésbé optimális fényintenzitásra és a környezeti ingadozásokra utalhat. Összességében a vizuális és mérhető paraméterek egyaránt azt jelzik, hogy az optimalizált rendszerben nevelt bazsalikom kedvezőbb fiziológiai állapotot ért el, amely a genetikus algoritmus által biztosított stabil és célzott környezeti szabályozás eredménye.

3.3 Két kísérleti növény között fellépő illóanyag különbségek

A kutatás végén megkérdeztem 10 vizsgálandó személyt, hogy hasonlítsa össze a két növény minta illatát, és állítson közöttük egy egyértelmű rangsort. A 10 személy közül mindannyian a optimalizált környezetben nevelt növényt tartották erősebb, jobb illatúnak a természetesen nevelt mintával szemben.

4. KONKLÚZIÓ

A bemutatott munka egy gyakorlati megvalósítást és értékelést nyújt egy optimumfüggvényre épülő, genetikus algoritmusokkal vezérelt növénytermesztési rendszerről. A Gauss-alapú komponensekből felépített fitness függvény lehetővé teszi az öt kulcsparaméter együttes hatásának kvantitatív értékelését, míg a genetikus algoritmus, szenzor vezérelt optimalizációt biztosít. A prototípus kísérleti eredményei jelentős javulást mutattak a rendszer által számított Y kimeneti optimum értékekben és a növény növekedési mutatóiban, amely megerősíti a megközelítés gyakorlati hasznosságát. A további fejlesztések irányai közé tartozik a pH mérés integrálása, spektrálisan pontosabb világítás alkalmazása, valamint a modell finomhangolása több növényfaj és terméshozam alapú visszacsatolás bevonásával. Ezek a lépések hozzájárulhatnak ahhoz, hogy a módszer a precíziós mezőgazdaságban is alkalmazható, skálázható megoldássá váljon.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] KEZDŐ KERTÉSZ. „Bazsalikom (Ocimum basilicum) gondozása, ültetése, teleltetése és szaporítása.” (2023)

[2] SPENCER, K. (2024). *Basil Growth Stages & Timelines*

[3] BOZHURIN, K. (2024). *Basil Life Cycle: A Detailed Guide for Gardeners.*

[4] KEMÉNY G., LÁMFALUSI I. (2017). *A precíziós szántóföldi növénytermesztés összehasonlító vizsgálata.* Agrárgazdasági Kutató Intézet, Budapest.

[5] YADAV, A. ET AL. (2023). *Applications of AI and IoT Technology in Protected Cultivation for Enhancing Agricultural Productivity.* In: *Studies in Big Data*, Springer.

[6] SUGIMOTO, Y. (2016). *Cultivation Control System, Cultivation Control Program, and Cultivation Control Method.* US Patent US20160000021A1.

[7] CSAJBÓK J. (2019). *Az integrált növénytermesztési technológiák fejlesztési lehetőségei.* Debreceni Egyetem.

[8] TUBA L. (2014). „Genetikus algoritmusok alkalmazása optimalizálási problémákban.” *Alkalmazott Matematikai Lapok*, 31(1).

[9] DUAN, L. et al. (2022). *CropPainter: An Effective and Precise Tool for Trait-to-Image Crop Visualization Based on GANs. Plant Methods*, 18:138.

[10] Eiben, A. E., & Smith, J. E. (2015). Introduction to Evolutionary Computing. Springer.

INTELLIGENS MÉRŐBOT FEJLESZTÉSE TENGERI TEKNŐS FÉSZKEK NEM-INVAZÍV DETEKTÁLÁSÁRA

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT MEASURING ROD FOR NON-INVASIVE DETECTION OF SEA TURTLE NESTS

MÓRÉ Ádám[1], Kovács Gábor[2]

[1]Egyetemi tanársegéd, adam.more@uni-miskolc.hu
Nyíregyházi Egyetem, Műszaki és Agrártudományi Intézet, 4400 Nyíregyháza, Sóstói út 31/b
Miskolci Egyetem, Automatizálási és Infokommunikációs Intézet, 3515 Miskolc, Egyetemváros

[2]BSc hallgató, nem40330@gmail.com
Nyíregyházi Egyetem, Műszaki és Agrártudományi Intézet, 4400 Nyíregyháza, Sóstói út 31/b

Kivonat: *A dolgozat célja egy olyan hordozható, szenzorvezérelt intelligens mérőbot fejlesztése és értékelése, amely képes a tengeri teknősök fészkének nem-invazív, gyors és pontos detektálására. A módszer alapja a homok hőmérsékleti anomáliáinak és a homokréteg vizuális mintázatainak együttes vizsgálata, amelyet digitális hőmérő, nagy látószögű kamera és GPS alapú pozíciórögzítés támogat. A rendszer ESP32 alapú mikroszámítógépen fut, valós idejű adatmegjelenítést és mobilkommunikációt biztosítva. A terepi tesztek öt part menti helyszínen, összesen 40 ismert fészek vizsgálatával zajlottak. Az intelligens mérőbot 85%-os detektálási pontosságot ért el, jelentősen meghaladva a hagyományos, manuális szúrópróba-alapú módszerek hatékonyságát, miközben minimális környezetbolygatást igényelt. A vizsgálati eredmények igazolják, hogy a rendszer alkalmas terepi természetvédelmi alkalmazásokra, és alapot képez egy komplexebb, mesterséges intelligenciával támogatott detektálási platform kialakításához.*

Kulcsszavak: *tengeri teknős, fészekdetektálás, szenzoros mérőrendszer, hőprofil, természetvédelem*

Abstract: *The aim of this study is to develop and evaluate a portable, sensor-controlled intelligent measuring stick capable of non-invasive, fast, and accurate detection of sea turtle nests. The method relies on simultaneously analysing thermal anomalies within the sand and the visual texture of subsurface layers using a digital temperature sensor, a wide-angle camera, and GPS-based data logging. The system runs on an ESP32 microcontroller, providing real-time data visualisation and wireless communication. Field tests were conducted across five coastal locations using 40 previously identified nests as reference points. The prototype achieved an 85% detection accuracy, significantly outperforming traditional manual probing techniques. The results demonstrate that the system is suitable for conservation fieldwork and forms a technological basis for developing an AI-assisted, fully automated nest detection platform in the future.*

Keywords: *sea turtle, nest detection, thermal profile, sensor-controlled prototype, wildlife conservation*

1. BEVEZETÉS

A tengeri teknősök megőrzése világszerte kiemelt természetvédelmi feladat, mivel számos faj – köztük az álcserepesteknős (Caretta caretta) és a közönséges levesteknős (Chelonia mydas) – veszélyeztetett kategóriába tartozik. Fészkelőhelyeik érzékenységét az urbanizáció, a ragadozók jelenléte és a klímaváltozás tovább növeli, miközben a nőstények 20–25 év elteltével ugyanarra a partszakaszra térnek vissza, így minden egyes fészek védelme kritikus jelentőségű. A hagyományos fészekkeresési módszerek manuálisak és erősen tapasztalatfüggők: a kutatók vizuális nyomokat, felszíni elváltozásokat és a homok ellenállását vizsgálják, azonban a nyomok időjárási okokból gyorsan eltűnhetnek, a szondázás pedig sérülést okozhat a tojásokban [1].

A kutatás célja egy olyan eszköz fejlesztése volt, amely gyorsabban és megbízhatóbban képes azonosítani a fészkelőhelyeket, miközben minimális mértékben bolygatja a környezetet. A tengeri teknős fészkek hőmérsékleti sajátosságai – az embriók fejlődése során jelentkező 1-

3°C-os többlethő – megfelelő érzékeléssel a felszín közelében is detektálhatók. Ezt egészíti ki a homokréteg vizuális vizsgálata, amely kamerával és megvilágítással non-invazív módon elemezhető. A fejlesztés eredményeként egy ESP32-alapú intelligens mérőbot készült, amely digitális hőmérőt, széles látószögű kamerát és GPS-alapú adatgyűjtést kombinál valós idejű megjelenítéssel [2], [3].

A prototípus tesztelése Ciprus partvidékén, a Cyprus Marine Life Centre programjában zajlott, ahol különböző homokösszetételű partokon vizsgálták a működést. A terepi eredmények alapján a rendszer alkalmas a hagyományos detektálási módszerek kiváltására vagy kiegészítésére, gyorsabb és pontosabb fészekazonosítást biztosítva.

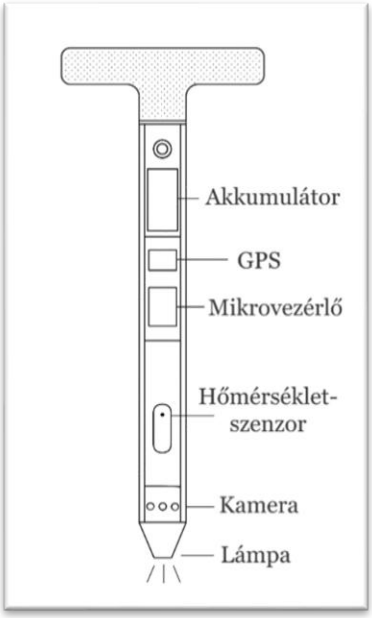
2. MÓDSZERTAN

A fejlesztett mérőbot felépítése négy fő egységre osztható: a mechanikai szerkezetre, az elektronikára, a szenzoros alrendszerre és az adatgyűjtő–megjelenítő szoftverre. A rendszer működése során a homok hőmérsékletéből, a felszín vizuális mintázataiból és a GPS-koordinátákból állít elő olyan kombinált eredményt, amely alkalmas fészkelési aktivitás detektálására. A következőkben részletesen ismertetjük az eszköz felépítését és a tesztelési folyamatot.

2.1 A mérőbot mechanikai felépítése

A mérőbot PVC alapú csőrendszerre épül, amely egyszerre biztosítja a szenzorok stabil rögzítését, a kábelek vezetését és a mechanikai ellenállást. A konstrukció fő szempontjai a kis tömeg, magas hőtűrés és a homokszemcsék okozta kopással szembeni ellenállás voltak [4] .

A markolat ergonomikus kialakítású, csúszásmentes bevonattal, hogy a használó hosszabb ideig is kényelmesen tarthassa. A végén elhelyezett kamera és hőmérséklet-érzékelő 45°-os döntést kapott, hogy a homokfelszín textúráját és a felszíni réteg hőprofilját egyszerre lehessen vizsgálni [5] .



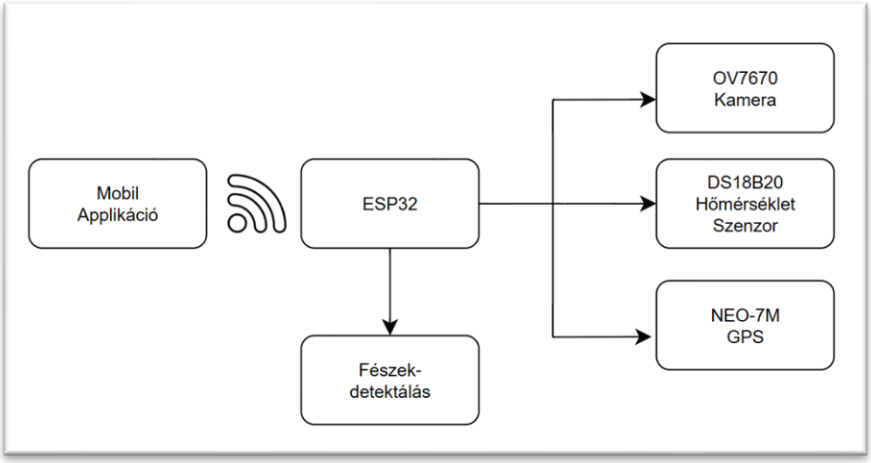
1. ábra: *A mérőbot prototípusának teljes szerkezeti képe*

2.2 Elektronikai felépítés és szenzorintegráció

A rendszer központi eleme az ESP32 mikrokontroller, amely beépített Wi-Fi és Bluetooth támogatásával lehetővé teszi a valós idejű kommunikációt és adatküldést. A hőmérsékletméréshez digitális DS18B20 szenzor került alkalmazásra, amely megfelelő pontossággal detektálja a homok hőmérsékleti változásait. A vizuális információt egy széles látószögű, ESP32-kompatibilis kamera (ESP32-CAM modul) biztosítja, amely képes a felszíni mintázatok felbontott rögzítésére.

A GPS-adatokat NEO-6M modul szolgáltatja, amely a mérési pontok pontos pozicionálását teszi lehetővé, és térbeli összevethetőséget biztosít a különböző fészkelőhelyek között. A tápellátást 3,7 V-os lítium-ion akkumulátor biztosítja, töltésvezérlő modullal és feszültségstabilizátorral kiegészítve.

Az alrendszerek közötti kommunikáció soros protokollon alapul, a kamera és a hőmérő közvetlenül az ESP32 buszára csatlakozik, míg a GPS UART interfészen keresztül működik [6].



2. ábra: *A mérőbot működési folyamat ábrája*

2.3 A szoftveres vezérlés és adatgyűjtés folyamata

A szoftveres környezet MicroPython alapokon nyugszik, a mérési ciklus három fő lépésből áll:

1. **Hőmérséklet-adat rögzítése** (DS18B20) – a szoftver a homokfelszín közvetlen hőmérsékletét olvassa ki.
2. **Kamerakép készítése** – a felszíni mintázatok digitális értékeléséhez.
3. **GPS-koordináták mentése** – minden mérés pontos térbeli pozícióval társítva kerül tárolásra.

Az adatok egy lokális SD-kártyára kerülnek mentésre CSV formátumban, valamint szükség esetén Wi-Fi kapcsolat esetén szerverre továbbíthatók. A mérőbot egy egyszerű mobilalkalmazással is képes kommunikálni, amely megjeleníti a hőmérsékletet és az elkészült képeket, így a terepi felhasználó azonnali visszajelzést kap.

2.4 Terepi tesztelés és adatfelvétel

A terepi vizsgálatok öt különböző strandszakaszon zajlottak, ahol a homok összetétele és a felszíni nyomok mennyisége jelentős eltéréseket mutatott. A mérési program összesen 40 olyan

fészket foglalt magában, amelyek helyét a természetvédelmi szervezet korábban manuális módszerekkel már azonosította; ezek referenciapontként szolgáltak az intelligens mérőbot teljesítményének értékeléséhez. A tesztelés során minden helyszínen minimum három adatfelvétel készült: egy közvetlenül a fészek felett, valamint két további mérés oldalirányban, körülbelül 1–1,5 méteres távolságban. Ez a kialakítás lehetővé tette a hőmérsékleti anomáliák nagyságának számszerű összevetését, továbbá a felszíni homoktextúra eltéréseinek vizuális elemzését a környező, nem fészkelési területekhez viszonyítva. A rögzített adatok azt mutatták, hogy a fészek fölött jellemzően 1–2,5 °C-os hőtöbblet detektálható, amelyet a prototípus hőmérséklet-érzékelője stabilan és jól ismételhetően érzékelt.

3. ábra: *A mérőbot terepi tesztelése*

3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS

A terepi mérések eredményei igazolták, hogy az ESP32-alapú mérőbot képes a tengeri teknős fészkek fölött jelentkező hőmérsékleti anomáliák biztos detektálására. A 40 vizsgált fészek mindegyikénél a közvetlenül a fészek felett mért érték 1–2,5 °C-kal magasabb volt a környező kontrollpontokénál, ami megfelel az embriófejlődés során keletkező többlethő elméleti értékeinek. A hőtöbblet oldalirányú csökkenése konzisztens mintázatot mutatott, ami megerősítette, hogy a szenzor stabilan képes felismerni a fészek lokális hőprofilját még heterogén homokstruktúrák mellett is.

A kameraképek elemzése szintén alátámasztotta, hogy a fészek feletti felszíni homoktextúra sok esetben finoman eltért a kontrollterületektől: a felszíni réteg tömörebbnek bizonyult, és a szemcsemintázat gyakran rendezettebb volt, mint a környező részeken. Ezek a különbségek a terepen sokszor alig, vagy egyáltalán nem voltak felismerhetők, de a rögzített képeken következetesen megjelentek, ezzel jelentősen növelve a vizuális azonosítás pontosságát.

A mérőbot teljesítménye a hagyományos manuális módszerekkel összevetve lényeges előnyt mutatott: míg a szúrópróba-szerű fészekkeresés általában 15–40 percet vett igénybe, addig a prototípussal ugyanaz a terület 3–5 perc alatt vizsgálható volt, és a detektálás nem igényelt mély fizikai behatást a homokrétegbe. A rendszer összesített detektálási pontossága 85% volt, ami meghaladta az önkéntesek 60–70%-os átlagos manuális eredményét, különösen olyan helyszíneken, ahol a felszíni nyomokat a szél vagy a hullámzás már elsimította. A mérőbot így nem csak gyorsabb, hanem objektívebb és biztonságosabb módszert biztosított a fészekazonosításhoz, csökkentve a tojások sérülésének kockázatát.

4. KONKLÚZIÓ

A fejlesztett ESP32-alapú intelligens mérőbot terepi vizsgálatai igazolták, hogy a rendszer megbízhatóan alkalmazható a tengeri teknős fészkek nem-invazív, gyors és pontos detektálására. A hőmérsékleti anomáliák következetes azonosítása, valamint a kameraképek alapján felismerhető felszíni textúrakülönbségek együttesen lehetővé tették, hogy a mérőbot a hagyományos, manuális módszerekhez képest lényegesen nagyobb pontosságot és rövidebb vizsgálati időt érjen el. A rendszer működése a terepi önkéntesek számára egyértelmű és objektív visszajelzést biztosított, csökkentve a hibázási arányt és a tojások esetleges sérülésének kockázatát.

A mérések összegzése alapján megállapítható, hogy az eszköz alkalmas a természetvédelmi gyakorlatba történő beillesztésre, különösen olyan helyszíneken, ahol a vizuális nyomok gyorsan eltűnnek, vagy a terepi személyzet tapasztalata korlátozott. A további fejlesztések iránya magában foglalhatja a hőtérkép-alapú vizualizáció integrálását, az adatgyűjtés automatizálását, valamint egy mesterséges intelligenciával támogatott mintázatfelismerő modul kiépítését, amely a kamera által rögzített képekből képes lenne önállóan javaslatot tenni a fészek helyére. Ezek a fejlesztések lehetővé tennék, hogy a mérőbot egy komplexebb, skálázható és még nagyobb hatékonysággal működő természetvédelmi diagnosztikai rendszer alapjául szolgáljon.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] R. J. LINDBORG, P. PERUYERO, and B. E. Witherington, “Use of a scent-detection dog for sea turtle nest monitoring of three sea turtle species in Florida,” PLoS One, vol. 18, no. 9, p. e0290740, Sep. 2023, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0290740.

[2] M. GAMMON, S. FOSSETTE, G. MCGRATH, and N. MITCHELL, “A Systematic Review of Metabolic Heat in Sea Turtle Nests and Methods to Model Its Impact on Hatching Success,” Front Ecol Evol, vol. 8, p. 556379, Sep. 2020, doi: 10.3389/FEVO.2020.556379/XML.

[3] D. T. BOOTH, “Influence of incubation temperature on sea turtle hatchling quality,” Integr Zool, vol. 12, no. 5, pp. 352–360, Sep. 2017, doi: 10.1111/1749-4877.12255.

[4] E. B. D. CLABOUGH, E. KAPLAN, D. HERMEYER, T. ZIMMERMAN, J. CHAMBERLIN, and S. WANTMAN, “The secret life of baby turtles: A novel system to predict hatchling emergence, detect infertile nests, and remotely monitor sea turtle nest events,” PLoS One, vol. 17, no. 10, p. e0275088, Oct. 2022, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0275088.

[5] B. SELLÉS-RÍOS, E. FLATT, J. ORTIZ-GARCÍA, J. GARCÍA-COLOMÉ, O. LATOUR, and A. WHITWORTH, “Warm beach, warmer turtles: Using drone-mounted thermal infrared sensors to monitor sea turtle nesting activity,” Frontiers in Conservation Science, vol. 3, p. 954791, Jul. 2022, doi: 10.3389/FCOSC.2022.954791/BIBTEX.

[6] A. A. ADEAGBO, “IOT Based Environment Monitoring System Using,” arXiv preprint, May 2024, Accessed: Nov. 28, 2025. [Online]. Available: https://arxiv.org/pdf/2405.14047

CSAPÁGYVIZSGÁLATOK SPM ELJÁRÁSSAL

INVESTIGATION OF BEARINGS USING SPM PROCEDURE

TÓTH Dániel

egyetemi tanársegéd, daniel.toth1@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet, Szerszámgépek Intézeti Tanszéke

Kivonat: *Gépek állapotának vizsgálatához gyakran alkalmazzák a lökéshullám-impulzus (SPM) vizsgálatokat. Különösen alkalmas ez a módszer olyan gépek állapotfelügyeletére, ahol a gép optimális üzemelése elsősorban a csapágyak működésétől függ. Az SPM módszer ipari gépek, szivattyúk, ventilátorok, elektromos motorok és hajtóművek megelőző karbantartásában is elterjedt. Jelen cikk a csapágyak SPM eljárással való vizsgálatával foglalkozik.*

Kulcsszavak: *SPM, csapágy, hibafeltárás*

Abstract: *Shock Pulse Method, abbreviated as SPM, is frequently used for probing or continuous monitoring of machine conditions. This test is particularly suitable for condition monitoring of machines where proper operation depends primarily on the condition of the bearings. The SPM used in the preventive maintenance of industrial machinery, pumps, fans, electric motors, and drives. This article deals with the testing of bearings using SPM procedure.*

Keywords: *SPM, bearing, fault detection*

1. BEVEZETÉS

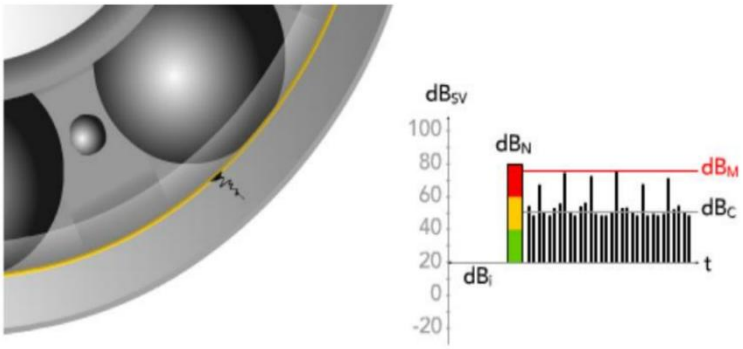
Az ütésimpulzus szint a csapágy fordulatszámától, geometriai méreteitől, üzemi feltételeitől és magától a csapágyállapottól függ. Amennyiben a csapágyállapot kiértékelési eredmények túlzott mértékben változnak a csapágy fordulatszámának változásával, akkor az a legnagyobb valószínűség szerint azt bizonyítja, hogy nem állapot kiértékelési hibáról van szó, hanem arról, hogy csapágy kenőanyaga nem megfelelő ahhoz, hogy teljes kenőanyagréteget biztosítson a csapágy gördülési érintkező felületein a csapágyfordulatszám üzemszerű változásai esetén. Általában véve, a csapágyfordulatszám csökkenése a hidrodinamikai kenési állapot leromlását eredményezi, ami még a gördülési érintkező felületeken lévő kenőanyagréteg megszakadását is előidézheti [1].

2. SPM JELADÓ TELEPÍTÉSE

Az állapotparaméterek csakis akkor adják vissza helyesen a csapágyállapotot, ha a méréspont kiválasztása szigorúan az SPM (Shoch Pulse Method) előírásai szerint történt. Ilyenkor ütésimpulzus jel halad a csapágytól az SPM jeladóhoz, és azt nem befolyásolja zavaróhatás és/vagy jelmegszűnés. Amennyiben valamely méréspont az SPM előírásoktól eltérő módon került kiválasztásra, illetve az SPM ütésimpulzus jel túl nagymértékben csillapodik a csapágytól az SPM jeladóhoz való haladása során, akkor kompenzációt kell alkalmazni. Amennyiben az SPM ütésimpulzus jel zavaróhatásoknak van kitéve, akkor ajánlatos eggyel több mérési módszert használni, vagy pedig megpróbálni kiküszöbölni a zavaróhatásokat például a gép üresjáratában, vagy speciális üzemmódban való működtetésével. SPM szonda mellett, egyazon csapágyegységen a méréseket mindenkor úgy kell végezni, hogy az SPM szonda jeladóját szigorúan pontosan azonos helyre kell rögzíteni [2].

3. SPM ELJÁRÁS

A gép anyagában tovább terjednek, illetve lökéshullámokat produkálnak a csapágyon belül létrejövő ütések. E hullámok energiaszintjének érzékelésén és gyakoriságának alapszik az SPM eljárás. A mérés alapja különbözik a szokványos értelemben vett rezgésdiagnosztikától, ezért annak jellemző értékei nem alkalmazhatóak az elemzés során. A csapágyak esetében mérhető sokk-impulzusok a kerületi sebességtől és a csapágy állapotától függenek. A kerületi sebesség figyelembevétele érdekében a mérőberendezés számára a tengelyátmérőt és a fordulatszámot mindig meg kell adni. A mérőberendezés ezt követően megad egy, az új csapágyra vonatkozó kezdeti értéket (dB_i), a maximális értéket (dB_M) és az úgynevezett szőnyegértéket (dB_C). A dB_M/dB_C mérés esetén rögzítik azt a legnagyobb amplitúdószintet, mely alatt 200 impulzus/másodperc érkezik. Ahogy az 1. ábrán látható a csapágyállapot jellemzésére a dB_C szint és a dB_M-dB_C szintkülönbség is használható [3].



1. ábra: *SPM elemzés [4].*

A végleges csapágykárosodást közvetlenül megelőző rövid időszakban az SPM ütésimpulzus szint megnövekszik, és az SPM kiértékelési paraméterei szerint is megfigyelhető a csapágyállapot romlása. A sérült felület ”bejáródása” következtében az SPM ütésimpulzus szint ideiglenesen csökkenése is megfigyelhető. Köszönhető ez sokszor annak is, hogy a kopástermékek kimosódnak a csapágyból. Ez a csapágyállapot átmeneti javulását eredményezi, ami igen rövid idejű. Rendszerint, röviddel az ilyen ideiglenes jelcsökkenést követően, az SPM ütésimpulzusok ugrásszerű emelkedése jelentkezik. Elegendően alacsony fordulatszámok esetén a csapágygyűrű megcsúszását kísérheti az SPM ütésimpulzusok jelentős mértékű csökkenése. Ez annak a következménye, hogy a csapágy ilyenkor nem gördülőelemként működik, ezért az ütésimpulzusok képződése is megszűnik. Ilyenkor a csapágy megcsúszik a tengelyen vagy a csapágyház felületén. Amennyiben a csapágy kenése megfelelő, akkor az említett csúszás nagyon sima és zajtalan lehet egészen addig a pillanatig, amikor a csapágy túlmelegszik, és ennek következtében ragad be. A magas csapágyhőmérséklet utalhat erre a csúszásra. Magasabb fordulatszámokon a csapágygyűrű játéka – amely a gyűrű megcsúszásának is az oka – ezzel egyidejűleg a csapágygyűrű helyi rezgését eredményezi, ami viszont a csapágy helyi túlterhelődését és a gördülő érintkező felületek közötti kenőanyagréteg leromlását idézi elő. Ezt szintén az SPM ütésimpulzus szint emelkedése követi. Emiatt a csapágygyűrű "néma" csúszása, melyet az SPM ütésimpulzus szint csökkenése követ, kevésbé valószínű magasabb fordulatszámokon. Az SPM ütésimpulzus szint drasztikus csökkenését okozhatja az üzemi terhelés hirtelen csökkenése is, például tengelytörés vagy a tengelykapcsoló meghibásodása következtében. A terheletlen csapágy különleges esetet képvisel. Ilyen például egy függőlegesen szerelt és megfelelően kiegyensúlyozott gép felső csapágya. Ilyenkor előfordul, hogy a csapágy szinte teljesen terheletlen. Ez előfordul abban az esetben is, amikor – a helytelen szerelés következtében – egy

csapágypár egyik csapágya viseli a teljes üzemi terhelést. Terheletlen csapágyban a gördülőelemek terhelőerő híján nyomódnak a csapágygyűrűkhöz, és ennek következtében fordul elő a gördülőelemek gyűrűkkel szembeni megcsúszása. A megcsúszást a hidrodinamikai kenési állapot leromlása követi, ami a gördülő érintkező felületeken lévő kenőanyagréteg megszakadását okozza. A folyamat előrehaladása azt eredményezi, hogy a gördülőelemek a gyűrűkhöz súrlódnak, és végül a csapágy beragad. Mivel az ilyen csapágy terhelés nélkül üzemel, sem SPM ütésimpulzusokat, sem rezgést nem kelt. Ezen kívül, ha két csapágy párban dolgozik, akkor a megfelelően működő szomszédos csapágytól származó normál SPM ütésimpulzusok és normál rezgések elfedik a megcsúszó csapágytól érkező gyengébb jeleket. A terheletlen csapágy csúszásának szokványos bizonyítéka a csapágy magas hőmérséklete. Olaj vagy zsírkenés esetén a csúszásból származó termékek átkerülnek a szomszédos csapágyra a csapágykárosodás későbbi fázisában, és a szomszédos csapágy megnövekedett SPM ütésimpulzus szintjét idézik elő. Központi kenőrendszer esetén a leeresztett kenőanyagban észlelt kopási termékek is ilyen rendellenességre utalnak [5, 6].

A csapágykárosodás kifejlődésének ideje, amelyet az SPM ütésimpulzus szint növekedésének megindulásától a súlyos csapágykárosodás létrejöttének pillanatáig számítunk, rendszerint több órától több hónapig terjedhet a csapágy működési körülményeitől függően. Ismeretes, hogy a műanyag és szegecselt acél kosarakból készült csapágy esetén a kosarak a csapágykárosodás rendkívül gyors kifejlődését okozhatják (teljes mértékű csapágykárosodás órák, sőt akár percek alatt is kialakulhat). A csapágy működése veszélyes, ha a csapágyállapot súlyos károsodásként került kiértékelésre. Különösen akkor, ha az SPM ütésimpulzus szint folyamatosan emelkedik, vagy csúcsokkal és szünetekkel párosul, nagymértékben felülmúlva az SPM jel normál egyenetlenségét. Az SPM ütésimpulzus szintek növekedését rendszerint az alábbiak okozhatják [7, 8].

- A csapágy kenőanyagának a csapágy szerelése során, vagy még azt megelőzően fellépő szennyeződése. Ezt például a műhelyben történő szerelés során a csapágyba bevitt finom fémpor és dörzshatású por részecskék okozzák. Arról sem szabad megfeledkezni, hogy a remanens mágnesezettséggel rendelkező fémrészű csapágy egyszerűen "összegyűjti" a környezetből a legnagyobb finomságú fémrészecskéket;
- A csapágy kenőanyagának a működés során fellépő bármely szennyeződése. Ilyen például a környezetből a csapágyba bejutó, legnagyobb finomságú fémpor és dörzshatású por részecskék, a csapágy, illetve a csapágyszerkezet korróziójának termékei. Ilyenek továbbá a központi kenőrendszerből, zsírzó csatornából, illetve zsírzó zsebből származó szennyező részecskék és korróziós termékek, a zsírzó csatornákban és zsírzó zsebekben kiszáradó és megkeményedő kenőzsír termékei, valamint a csapágy és a csapágyszerkezet kopásából származó termékek is;
- A csapágy túlterhelődése. Amennyiben az SPM ütésimpulzus szint túl nagymértékben változik a terhelésváltozásokkal, amelyek azonban az adott gép esetén még üzemszerűek maradnak, akkor ez utalhat arra, hogy a csapágy alapterhelhetősége túl alacsony ahhoz, hogy az üzemszerű terhelésváltozásokat elviselje;
- Csapágy túlterhelődést okozó géprezgés. Az SPM ütésimpulzusok nem magára a rezgésre reagálnak és nem is tükrözik a rezgés súlyosságát. Az SPM ütésimpulzusok csak a rezgések következményére, vagyis a rezgés által a csapágy üzemállapotában előidézett leromlásra (amennyiben az említett leromlás egyáltalán megtörténik) érzékenyek. Ha az SPM ütésimpulzus szint változik a rezgés súlyosságának változásaival – amelyek azonban az adott gép esetén még üzemszerűek maradnak –, akkor ez azt jelezheti, hogy vagy a csapágy kenőanyaga nem megfelelő vastagságú, vagy a csapágy alapterhelhetősége túl alacsony ahhoz, hogy elviselje a rezgés súlyosságának üzemszerű változásait. Ritkább esetben mindkettő együttesen fennáll;

– Elektromágneses jellegű hiba normál villamos gépek, valamint frekvencia-átalakítóról hajtott gépek esetén (beleértve a frekvencia-átalakítóról hajtott gépek normál üzemi körülményeit is), amely a csapágy túlterhelődését és az érintkező gördülő felületeken lévő kenőanyag leromlását idézi elő. Ez okozhat továbbá villamos kisüléseket a csapágyban vagy pedig közvetlen villamos zavaróhatást az SPM mérőeszközökben.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Az SPM módszer korai hibadetektálást tesz lehetővé, így kiválóan alkalmas állapotfelügyeleti rendszerek részeként. A modern SPM technológia digitális jelfeldolgozást alkalmaz, nagy felbontású időjeleket rögzít és automatikus trendanalízist végez. Lassú fordulatszámú gépeken is megbízhatóan működik, valamint pontos hibameghatározást tesz lehetővé.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] KARACAY, T., AKTURK, N.: *Experimental diagnostics of ball bearings using statistical and spectral methods*. Tribology International, 2009.

[2] HEGEDŰS, G., BARAK, A., BARNA, B., DEMETER, P., SIMON, G., SZILÁGYI, A., TAKÁCS, G.: *Development of analysing equipment of the remanent lifetime on roller bearings*. MicroCAD 2010: XXIV, Miskolc, Hungary: University of Miskolc, pp. 47-52, 2010.

[3] KOCSIS, I.: *Zöld energia felhasználását biztosító gépészeti rendszerek diagnosztikája*. Debrecen, 2014.

[4] OROSZ, P.: *Csapágyak elemzése SPM rezgésdiagnosztikával.* Multidiszciplináris tudományok, 8(1), pp. 34-40, 2018.

[5] TÓTH, D., SZILÁGYI, A., TAKÁCS, G.: *Vibration analysis techniques for rolling element bearing fault detection*. Design of machines and structures 4(2), 2014.

[6] TÓTH, D., SZILÁGYI, A., TAKÁCS, G.: *Overview of analysis methods of rolling element bearings*. Design of machines and structures 5(1), 2015.

[7] MISRA, A., GUPTA, A., UPADHYAY, S. H., HARSHA, S. P.: *Fault Diagnosis in a Low-Speed Rotating Shaft Using Vibration Signal Analysis*. MIT International Journal of Mechanical Engineering 2(2), 2012.

[8] PATIDAR, S., SONI, P. K.: *An Overview on Vibration Analysis Techniques for the Diagnosis of Rolling Element Bearing Faults*. IJETT, 2013.

GÖRDÜLŐCSAPÁGYAK SPEKTRUMANALÍZISE

SPECTRUM ANALYSIS OF ROLLING ELEMENT BEARINGS

TÓTH Dániel

egyetemi tanársegéd, daniel.toth1@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet, Szerszámgépek Intézeti Tanszéke

Kivonat: *A forgógépek állapotfelmérése és követése révén hatékonyan végezhető el a karbantartás, csökkenthetők a karbantartási költségek és ritkábbá válnak a váratlan üzemzavar miatti gépleállások. A csapágyak mindenütt kiemelt szerepet játszanak a diagnosztikai vizsgálatok során. Ennek oka, hogy olyan meghibásodási sorozatot indíthat el a csapágyazás hibája a berendezésekben, amelyek akár több nagyságrenddel meghaladhatják a csapágycsere, illetve a diagnosztikai vizsgálat költségeit. Jelen cikk többek között a gördülőcsapágyak frekvenciatartománybeli vizsgálatával foglalkozik.*

Kulcsszavak: *rezgésdiagnosztika, csapágy, spektrumanalízis*

Abstract: *Condition assessment and monitoring of rotating machines enable efficient maintenance, reduces maintenance costs, and reduces machine downtime due to unexpected malfunctions. Rolling element bearings play a key role in diagnostic testing everywhere. This is because bearing failure in equipment can trigger a series of failures that can exceed the cost of bearing replacement and diagnostic testing by several orders of magnitude. This article deals with methods based on frequency range tests of rolling bearings.*

Keywords: *vibration diagnostics, bearing, spectrum analysis*

1. BEVEZETÉS

A gördülőcsapágyak aktuális állapota rezgésdiagnosztikai eszközökkel is elemezhető. A csapágyak diagnosztikai vizsgálataira különféle idő- és frekvenciatartományon elvégezhető jelanalizálási technikák léteznek. A spektrumanalízis az egyik leghatékonyabb módszer ezek közül. A gördülőcsapágyak azzal az alapvető mechanikai tulajdonsággal rendelkeznek, hogy leginkább egy-egy bizonyos frekvencián képesek adott irányokban rezgést végezni. Ezek a jellegzetes frekvenciák a felvett rezgésjel spektrumanalízisével beazonosíthatók, és az aktuális csapágyfordulatszám figyelembevételével hozzárendelhetők csapágyalkatrészekhez. E jellegzetes frekvenciákon kibocsájtott rezgési energia a defektus megjelenése és tovább fejlődése esetén megváltozik és ez a spektrumban is megjelenik [1].

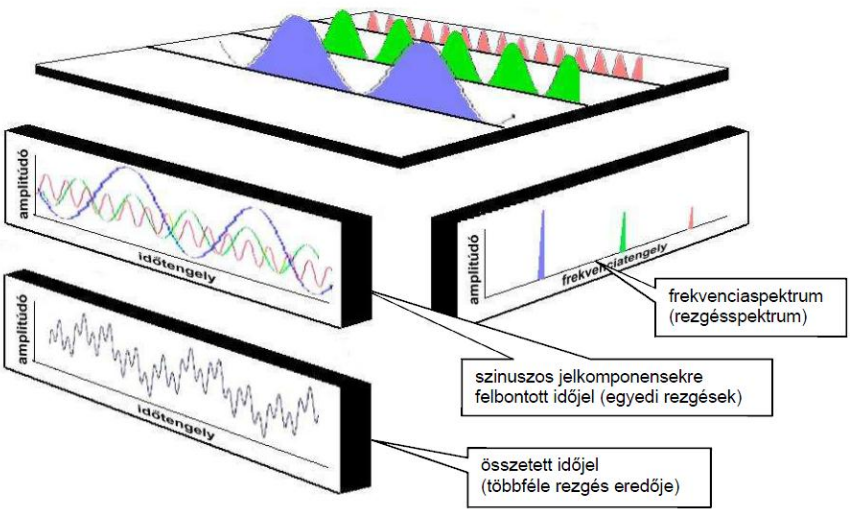
2. REZGÉSEK SZUPERPOZÍCIÓJA

Ha egy rendszer valamely pontja egyszerre két vagy több független rezgést végez, akkor a rezgések összeadódása – szuperpozíciója – áll elő. Két rezgés esetén az összetevők lehetnek egyirányúak, egymásra merőlegesek, esetleg egymáshoz képest tetszőleges szögben hajló rezgések. Egyirányú rezgések esetén, amikor a két rezgés frekvenciája azonos, akkor az eredő rezgés iránya és frekvenciája is megegyezik az összetevők hasonló jellemzőivel. Azonos fázis esetén az összetevők erősítik egymást. Eltérő frekvenciájú összetevők esetén, általános esetben az eredő rezgés nem periodikus. Csak akkor kapunk periodikus eredő rezgést, ha az összetevők rezgésszámainak aránya racionális szám. Közel azonos frekvenciájú összetevők esetén a rezgéslebegés jelensége fordul elő, vagyis a két összetevő hol erősíti, hol pedig kioltja egymást, az eredő amplitúdója harmonikus burkolóval rendelkezik [2, 8].

3. SPEKTRUMANALÍZIS

A gyakorlatban alkalmazott csapágy rezgésvizsgálatokhoz az idő-, a frekvencia- és az idő-frekvencia tartománybeli vizsgálatokon alapuló módszereket használnak. A vizsgálati módszerek közül talán a leggyorsabb adatkezelést teszi lehetővé az időtartománybeli analízis. A csapágyhibák felderítésére a rezgés adatok spektrális vagy frekvencia tartománybeli vizsgálata rendkívül széles körben alkalmazott. Jelentősen meggyorsította a hibafeltárási folyamatot a modern gyors Fourier-transzformáción (Fast Fourier Transform –FFT) alapuló műszerek megjelenése. A kvadratikus vagy lineáris eloszlások csoportjába sorolható az idő-frekvencia felbontások (Time-frequency Distribution - TFD). Az ablakozott Fourier-transzformáció (STFT) és a wavelet-transzformáció (WT) a lineáris idő-frekvencia eloszlások osztályába sorolható. Mindkét eljárás a vizsgálandó jelet, időben és frekvenciában jól koncentrált elemi függvényekre bontja fel [3].

A spektrumanalízis alapja az a gondolatmenet, hogy minden gép, illetve gépalkatrész (tengely, csapágy, tárcsa stb.) azzal az alapvető mechanikai tulajdonsággal rendelkezik, hogy leginkább egy bizonyos "saját" frekvencián képes adott irányokban rezgéseket végezni. A felvett rezgésjel spektrumanalízisével beazonosítható, hogy milyen frekvenciájú rezgések vannak jelen. Bizonyos gépalkatrészekhez és tipikus géphibákhoz hozzárendelhetők ezek a rezgésfrekvenciák, az aktuális gépfordulatszám figyelembevételével. Az egyes gépelemek hibái pontosan felderíthetők a rezgések spektrumanalízise révén, valamint eldönthető az is, hogy beállítási vagy kiegyensúlyozási hiba van-e jelen. A csapágyhibák elemzése esetén ez a módszer képes arra is, hogy külön kimutassa a kosár, a gördülőtest vagy a belső és a külső gyűrű sérülését. A géprezgések spektrumanalízisének köszönhetően, már a javítások előtt tudni lehet, hogy mi a teendő. Ezzel jelentős megtakarítás érhető el a munkaidő és az alkatrészek vonatkozásában, ráadásul a javítás során a nem annyira feltűnő hibák kijavítása is egyértelmű. Nagyon pontosan és gyorsan ellenőrizhető a javítások sikeressége is, a javítás előtti és az újbóli beüzemeléskor végzett mérések spektrumainak összehasonlításával. Csökkenő karbantartási költségek mellett, az így javított és ellenőrzött gépek megbízhatósága nagymértékben növekszik. A gépészmérnöki gyakorlatban mérhető géprezgések összetett jellegűek, mivel a mérőhelyen (például egy csapágyházon) egyszerre vannak jelen a tengelybeállításból, a kiegyensúlyozatlanságból, a csapágyhibából és más gépelemek egyéb problémáiból származó - eltérő amplitúdójú és frekvenciájú - rezgések. Ha a mért jelben előforduló frekvenciákra vagyunk kíváncsiak, akkor a jelet elemi szinuszos alkotóelemeire (alaprezgéseire) kell felbontani, vagyis frekvenciaanalízist (más néven spektrumanalízist) kell végezni. A gyors Fourier-transzformáció eljáráson alapul szinte minden spektrumanalizáló, illetve gép vagy rezgésanalizáló műszer, amely képes a digitálisan rögzített időjelek spektrum formájú ábrázolására és kiértékelésére. Az 1. ábrán három szinuszos komponensből áll a spektrummá transzformált időjel, amelyek mindegyike más-más frekvenciával és amplitúdóval jellemezhető. A gyors Fourier-transzformáció alkalmazásával ezek a szinusz jelek egy-egy függőleges vonal formájában külön-külön láthatóvá válnak a spektrumban, amelynek a hossza az amplitúdót, a frekvenciatengelyen elfoglalt helye pedig a szinuszos összetevő frekvenciáját képviseli [4, 6].



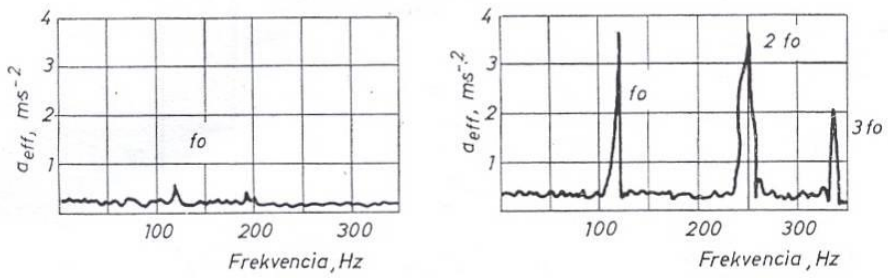
1. ábra: *Spektrummá transzformált időjel [2].*

A tönkremeneteli szint becslésére számos, sztochasztikus jellegű, úgynevezett tönkremeneteli index használata terjedt el. Ezek az indexek a gördülőcsapágyak remanens élettartamának statisztikai módszerekkel történő megítélése kapcsán alakultak ki. Olyan véletlenszerű rezgéseknél alkalmazhatóak a statisztikai módszerek, ahol determinisztikus jelek esetén alkalmazott jelanalizáló módszerek egyébként alkalmatlanok. A statisztikai módszerek ráadásul egyszerűek és gyors adatkezelést és számítást tesznek lehetővé. Egyetlenegy mérőszámmal – tönkremeneteli index – jellemezhető a sztochasztikus jellegű rezgésminta. Gördülőcsapágyak remanens élettartamának megítélése során mindig felmerül a statisztikai tönkremeneteli index típusának megválasztásával kapcsolatos probléma [2, 7].

Amíg szélessávú rezgésszint mérés esetén a szabványokból kiindulva tudjuk, hogy a gépállapotra jellemző rezgésszintet rezgéssebességben kell meghatároznunk, addig a gördülőcsapágy nagyfrekvenciájú zaját rezgésgyorsulásban szokás mérni. Spektrumanalízis során tehát nekünk kell eldöntenünk, hogy milyen fizikai egységben jelenítsük meg a rezgéseket. Döntésünk attól függ, hogy ugyanannak a rezgésnek a kis- vagy a nagyfrekvenciájú komponenseit kívánjuk-e szemügyre venni. A frekvenciákra érvényes összefüggés miatt ugyanis nem jeleníthető meg a teljes frekvenciatartomány úgy, hogy az összes frekvenciájú komponens ugyanabban az egységben skálázva jól látható legyen. Az összefüggés ugyanakkor egyértelmű iránymutatást ad: a kisfrekvenciás rezgéskomponenseket elmozdulásban, a közepes frekvenciatartományt képviselőket rezgéssebességben, a nagyfrekvenciás rezgéseket pedig rezgésgyorsulásban célszerű ábrázolni [4].

Az ütközés tranziens lökéshulláma igen rövid idő alatt alakul ki és ez a csapágy testében igen magas frekvenciájú rezgéseket kelt. A keletkező lökéshullámok frekvenciája és a hullámok csillapodása a csapágy anyagi minőségtől, méretétől, kialakításától és egyéb tényezőktől is függ. A csapágy rezgésvizsgálata során az egymásra szuperponálódott rezgéseket szétbontják. A tapasztalatok szerint a csapágyhiba – a kisebb frekvenciájú rezgéseket vizsgálva – a kezdeti stádiumban csak nehezen ismerhető fel az egyéb eredetű rezgések zavaró jellege miatt. A nagyfrekvenciák vizsgálatával azonban egészen jelentéktelen csapágyhibák is észlelhetők. A csapágy kezdeti meghibásodása a hibátlan csapágyhoz képest 10-szeres, a tönkrement csapágy pedig 1000-szeres ütéshullám növekedést is okozhat. Az észlelhető hiba nagyságának meghatározására kétsoros görgőcsapággyal kísérleteket végeztek. Ennek során először a külsőgyűrű gördülőpályáján mesterséges karcokat készítettek, majd a hibátlan és hibás csapágyak által keltett rezgésspektrumokat összehasonlították. A vizsgálatokat egyrészt kisfrekvenciás testhangok elemzésével, más-részt az ütéshullámok nagyfrekvenciás rezgéselemzésével is elvégezték. A

hagyományos módon végzett kísérlet során a hibás és a hibátlan csapágy spektruma között alig mutatkozott különbség. A kísérletek során ejtett kis karc okozta rezgések hatását elnyomták a csapágy egyéb hibáiból, mozgásából, rugalmas alakváltozásiból eredő rezgések. Ahogy az a 2. ábrán is látható, amikor az ütéshullámokra hangolt érzékelőkkel felvett nagyfrekvenciás rezgéseket vizsgálták a hibás és hibátlan csapágyak rezgésspektrumai lényeges eltértek [5].



2. ábra: *Hibátlan és hibás csapágyak rezgésspektrumai [5].*

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A gördülőcsapágyak spektrumanalízise a rezgésdiagnosztika egyik legfontosabb módszere, amelyet a csapágyhibák korai felismerésére használnak. Az eljárás lényege, hogy a gép rezgésjeleit frekvenciatartományban (spektrumban) vizsgáljuk, és a jellegzetes hibafrekvenciákat keressük. A frekvenciatartomány segítségével elkülöníthetők a csapágyhibák a többi géphibától, felismerhetők a korai kopási jelek, valamint meghatározható, hogy melyik csapágyelem hibás.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] KARACAY, T., AKTURK, N.: *Experimental diagnostics of ball bearings using statistical and spectral methods.* Tribology International, 2009.

[2] PATKÓ, G., TAKÁCS, G., DEMETER, P., BARNA, B., HEGEDŰS, G., BARAK, A., SIMON, G., SZILÁGYI, A.: *A process for establishing the remanent lifetime of rolling element bearings.* XXIV. microCAD international scientific conference, Miskolc – Egyetemváros, 2010.

[3] TÓTH, L.T.: *Tranziens és kváziperiodikus folyamatok analízise az idő-frekvencia tartományban*. PhD értekezés, Miskolci Egyetem, 2011.

[4] TÓTH, D.: *Investigation of Bearing Failures Using Vibration Analysis*. Design of machines and structures 12(2), pp. 126-132, 2022.

[5] PATIDAR, S., SONI, P.K.: *An Overview on Vibration Analysis Techniques for the Diagnosis of Rolling Element Bearing Faults*. IJETT, 2013.

[6] TÓTH, D., TAKÁCS, G., SZILÁGYI, A.: *Analysis of methods to detect bearing failures*. 7th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering, ISCAME, 2019.

[7] DYER, D, STEWART, R.M.: *Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis*. Trans ASME, J Mech Design 100(2), 1978.

[8] DÖMÖTÖR, F.: *Rezgésdiagnosztika II*. Dunaújvárosi Főiskolai Kiadó, 2010.

MEGMUNKÁLÓGÉPEK SAJÁTFREKVENCIÁI

NATURAL FREQUENCIES OF MACHINING CENTERS

TÓTH Dániel[1], FEKETE Tamás[2]

[1]egyetemi tanársegéd, daniel.toth1@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet, Szerszámgépek Intézeti Tanszéke

[2]Ph.D., egyetemi tanársegéd, fekete@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet, Szerszámgépek Intézeti Tanszéke

Kivonat: *A megmunkálógépek vizsgálata során előforduló rezonancia jelenség egy olyan állapotot takar, ahol a gerjesztési frekvencia egybeesik, vagy közel van a rendszer sajátfrekvenciájához. A megmunkálógépek sajátfrekvenciáinak meghatározása sok szempontból fontos, mert így a kialakuló hiba időben felismerhető és segítséget adhat a vizsgált gép áttervezéséhez, javításához, valamint pontosíthatja a rezgésvizsgálat során felállított diagnózist.*

Kulcsszavak: *rezgés, sajátfrekvencia, szerszámgépek*

Abstract: *The resonance phenomenon that occurs during the testing of machine tools refers to a condition where the excitation frequency coincides with or is close to the natural frequency of the system. Determining the natural frequencies of machine tools is important in many respects, as it allows faults to be detected in good time and can assist in the redesign and repair of the machine under examination, as well as refining the diagnosis made during the vibration analysis.*

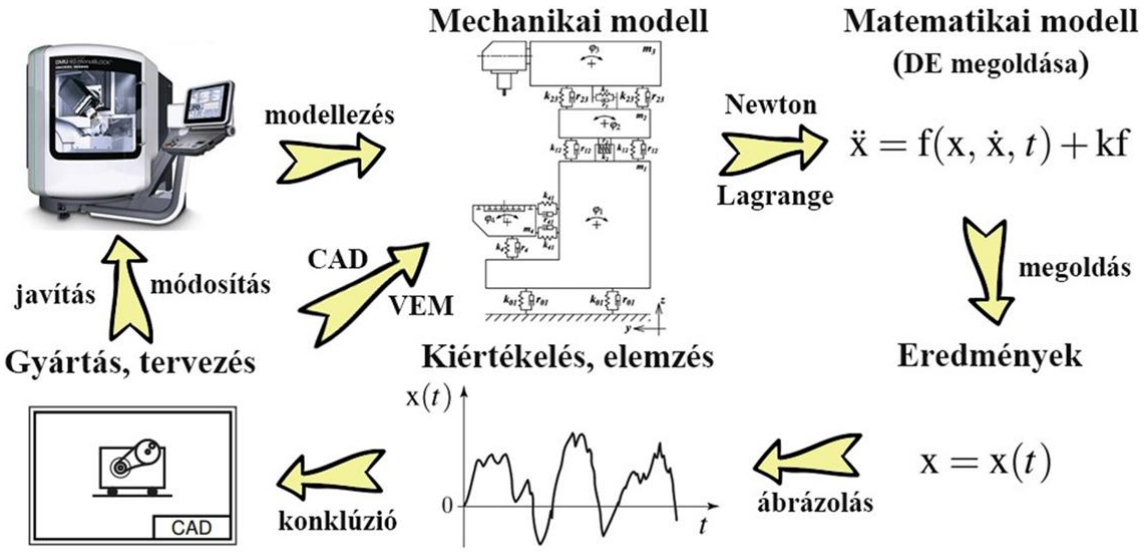
Keywords: *vibration, natural frequency, machine tools*

1. BEVEZETÉS

A megmunkálógépek tervezése során rendkívül nagy hangsúly helyeződik a gép tartóelemének, vázának, magának a gépállványnak vagy gépágynak a megtervezésére. Nagyon fontos követelményeket kell kielégítenie, sok szempontnak meg kell felelnie az igazán jó konstrukció elérése érdekében. A tervezés során szem előtt kell tartani a gyárthatóságot, a hőszimmetria elvét, a rezgéscsillapítás lehetőségét, a nagy hőstabilitást, a tartóelemek súlyának lehetőség szerinti minimalizálását, valamint a nagy statikus-, és dinamikus merevség biztosítását is. A helyhez kötött megmunkáló berendezéseket a legtöbbször nem a talajra helyezik, hanem általában rugalmas alátámasztást, ritkábban merevebb gépalapot készítenek számukra. A gépalap megfelelő méretezésével, vagy a megfelelő támasztás kiválasztásával elérhetjük, hogy vagy nem jön rezgésbe a gép és egyúttal a környezet felé sem kelt rezgéseket, vagy pedig a környezetből nem vesz fel rezgéseket. A gépalapozás dinamikájának témaköre olyan rezgéscsökkentési módszerekkel foglalkozik, amelyek a gépalapnak, mint lengőrendszernek a megfelelő kialakítását célozzák. E módszerek alkalmazása két alapvető gépalapozási terület, a passzív és az aktív rezgésmentesítés kapcsán merül fel. Aktív rezgésmentesítéskor a gép rezgéseinek tovább terjedését és a rezgések nagyságát kívánják korlátozni. Passzív rezgésmentesítéskor a környezetből származó rezgéseket szeretnék távol tartani valamely berendezéstől. Utóbbi probléma merül fel például nagypontosságú mérőgépek vagy ultraprecíziós megmunkálóberendezések telepítésekor. Tökéletes rezgésmentességet sajnos sohasem lehet elérni, hanem csak tetszőleges kis rezgési amplitúdókat lehet megvalósítani [1, 6].

2. MODELLALKOTÁS

Az egyes jelenségek leírásához modellek felállítása szükséges, amelyek a vizsgálatok szempontjából fontos tulajdonságokat testesítenek meg. Fontosabb modellek közé sorolható a mechanikában ismert és használatos rúd-, tömegpont-, lemez-, és merevtest modellek. A rezgéstanban absztraktabb modellek állíthatók fel, mint a mechanika más területein, ezért a feladatok megoldása során a mozgásegyenlet felírása, azaz a modell főbb paramétereinek meghatározása az elsődleges cél. A rezgéstani feladatok mérnöki megoldásához az 1. ábrán látható néhány lépés segítségével juthatunk el [2].



1. ábra: *Megmunkálógép modellalkotásának folyamata [2].*

Az ábrán látható folyamat fő lépései az alábbiak szerint foglalhatóak össze.

1. A vizsgált gép mechanikai modelljének felállítása.
2. A mechanikai modell alapján a matematikai modell felírása.
3. A kapott mozgásegyenlet megoldása valamilyen matematikai módszerrel.
4. Az eredmények ábrázolása diagramok segítségével, majd elemzés, értékelés.
5. Következtetések, a vizsgált gép módosítása, a modell finomítása a vizsgálat eredményeire alapozva.

Egy megmunkálógép konstrukciós folyamatának kezdeti szakaszában helyet kapnak különféle modellezési vizsgálatok, melyeket javarészt a dinamikai és kinematikai viszonyok feltárására használnak. Az elemzés során méréssel ellenőrizhetőek a kapott eredmények és a mechanikai modell helyessége. Már egyszerű modellek esetén is bonyolultak a rendszer mozgásegyenletei. Felírása és megoldása klasszikus módszerekkel (Newton-Euler módszer és Lagrange-egyenletek) nagyobb bonyolultságú rendszereknél szinte lehetetlen. Ezért az elmúlt évtizedekben többtest-rendszerű eljárások terjedtek el az ilyen esetek kezelésére, mivel ezek alkalmasak olyan számítógépes kód létrehozására, amely automatikusan felírja és megoldja az adott gép rendszerére vonatkozó mozgásegyenleteket [3].

3. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

A rezgésdiagnosztika segítségével a gépállapotról, és ebből adódóan az egyes géprészek aktuális állapotáról is komplex képet kaphatunk. A rezonancia vizsgálatnak két fajtája található meg a gyakorlatban az alkalmazhatósági eljárás alapján. Az egyik típusa a leállás-felfutás vizsgálat, amely forgógépek esetén alkalmazott rezonancia-frekvencia meghatározási mód, míg a másik a külső gerjesztéses vizsgálatok csoportja, amely szerszámgépeknél, tartályoknál, és számos más területen alkalmazható eljárás. Ez utóbbiak közül a legkönnyebben elvégezhető módszer az ütésimpulzus vizsgálat, amely segítségével elvégezhető a dinamikai merevség teszt. Előnye, hogy mobilis, rövid intervallumú, tehát ennek megfelelően igen gyors műszerezettséget igényel. A rezonancia mérés során a szerszámgépet gerjesztik, amely hatására a rendszer válaszát mérik különféle szenzorok segítségével. Az ütésimpulzus vizsgálat a szerkezet valamennyi frekvenciáját gerjeszti, amely eredménye a rendszer frekvencia átviteli függvénye. Ezt a kapott függvényt lehet az FFT (Fast Fourier Transform) analizátor alkalmazásával frekvenciákra bontani. Elve az, hogy az idő alapú jelet a frekvencia síkra transzformálja, ami által kiemelődnek a meghatározó frekvencia komponensek a mért válaszjelben. Az összes többi komponens frekvenciája az alapharmonikus frekvenciájának egész számú többszöröséből adódik. A periodikus jelet pedig véges számú összetevővel közelítik meg általában. Az összetett periodikus rezgés tehát megadható az összetevőivel, amely a frekvenciaspektrum segítségével ábrázolható. A gyakorlatban általában összetett rezgések fordulnak elő, amelyeket tisztán szinuszos, harmonikus rezgésekre lehet felbontani. Ha keressük az összetett rezgésben előforduló frekvenciák nagyságát, akkor frekvencia analízist, azaz más néven spektrum analízist kell végezni. Periodikus rezgések esetén vonalas spektrumot kapunk, míg véletlenszerűen változó rezgések esetén folytonos lesz a spektrum képe. Mivel egy szerszámgép összetett rendszernek tekinthető, ezért több sajátfrekvenciával rendelkezik. Ha ez a gép rezonanciaállapotba kerül, akkor nagyon magas rezgésszintek alakulhatnak, ami a gyors tönkremenetelhez vezet. A szerszámgépek működés közben szélessávú gerjesztést hoznak létre, és a rezonancia miatt a sajátfrekvenciákon megnő a spektrumcsúcsok nagysága [4, 5].

A mechatronikai feladatok egyik leggyakrabban alkalmazott végeselem-módszere (VEM) a szerkezeti analízis. A gépészetben a mechanikus elemek vizsgálatát értjük szerkezeti analízis alatt, amely lehet például valamely gép bizonyos alkatrésze, például egy eszterga gépágya. A számításoknál elsődlegesen kiszámolt ismeretlen az elmozdulás, és ebből származtathatók a további mennyiségek, azaz a megnyúlás, a feszültség és a reakcióerő [7]. A főbb típusok, amelyek vizsgálhatók valamely végeselem szoftver segítségével:

- Statikai analízis,
- Modál analízis,
- Harmonikus válasz analízis,
- Tranziens dinamikai analízis,
- Spektrum analízis,
- Explicit dinamikai analízis,
- Többtest dinamikai szimuláció.

A Modál analízis a vizsgált berendezés egyes sajátfrekvenciák kiszámítására, valamint rezgési karakterisztikájának és lengésképeik ábrázolását teszi lehetővé. Előfeszített szerkezetek analízisét is lehetővé teszi, alkalmazható rezgésre hajlamos, nagy sebességgel forgó alkatrészek vizsgálatánál is. A tranziens dinamikai analízis tetszőleges, időben változó terhelés hatására a vizsgált gép által adott válasz elemzésére használható. Az analízis időbeli lefolyását tekintve hatása van a szerkezet csillapításának és tehetetlenségének. Ha ezek elhanyagolható mértékűek, statikai analízisre egyszerűsödik le a vizsgálat [2, 8].

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A különféle megmunkáló gépeken fellépő mechanikai rezgések káros hatással vannak a berendezések működésére, ezért fontos ezeknek a rezgéseknek a lokalizálása mérések segítségével, majd ezt követően minél előbbi megszüntetése. Mivel egy megmunkálógép összetett rendszernek tekinthető, ezért több sajátfrekvenciával rendelkezik. Ha ez a gép rezonanciaállapotba kerül, akkor nagyon magas rezgésszintek alakulhatnak ki, ami a gyors tönkremenetelhez vezet. A megmunkálógépek működés közben széles sávú gerjesztést hoznak létre és a rezonancia miatt a sajátfrekvenciákon megnő a spektrumcsúcsok nagysága.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] PATKÓ, G., CSÁKI, T., ZSIGA, Z., SZABÓNÉ, M. I., SIMON, G.: *Szerszámgépek elmélete*. Nemzeti Tankönyvkiadó, 2011.

[2] KISS, R.: *CNC megmunkáló központ dinamikai viselkedésének vizsgálata végeselem-módszerrel*. Diplomaterv, Miskolc, 2019.

[3] BARÁTI, A.: *Szerszámgép vizsgálatok*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1988.

[4] SZILÁGYI, A., TAKÁCS, G., KISS, D., TÓTH, D.: *Vibration analysis of a manufacturing device*. Design of machines and structures 6(2), 2016.

[5] BRECHER, C., WECK, M.: *Machine Tools Production Systems 1: Machine Types and Application Fields*. Lecture Notes in Production Engineering, Springer. 2024.

[6] DÖMÖTÖR, F.: *Rezgésdiagnosztika I*. Dunaújvárosi Főiskolai Kiadó, 2008.

[7] SZILÁGYI, A., TAKÁCS, G., KISS, D., TÓTH, D.: *Theoretical vibration analysis of a manufacturing device*. Design of machines and structures 6(1), 2016.

[8] TAKÁCS, G., ZSIGA, Z., MAKÓ, I., BARAK, A.: *Forgácsoló szerszámgépek.* Nemzeti Tankönyvkiadó, 2009.

A ROBBANÁSBIZTOS NEM-VILLAMOS GYÁRTMÁNYOK FELÜLVIZSGÁLATÁNAK GYAKORLATA

PRACTICE OF INSPECTION OF EXPLOSION-PROOF NON-ELECTRICAL EQUIPMENT

TUGYI Levente

tanársegéd, levente.tugyi@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék

Kivonat: *A robbanásveszélyes terekben alkalmazott nem-villamos gyártmányok számos esetben jelentenek gyújtóforrást, mégis kevesebb figyelmet kapnak, mint villamos társaik. Bár az ATEX keretrendszer a gyártói és üzemeltetői kötelezettségeket egységesen meghatározza, Magyarországon nem létezik olyan végrehajtó jogszabály, amely konkrét és kötelező időszakos felülvizsgálati előírást határozna meg a nem-villamos robbanásbiztos gyártmányokre. Ennek következtében a vizsgálatok gyakorisága és módszertana elsősorban a kockázatértékelésen, a gyártói dokumentáción és az üzemeltető saját robbanásvédelmi rendszerén alapul. A tanulmány áttekinti a hazai szabályozási környezetet, bemutatja a gyakorlatban alkalmazott megoldásokat, továbbá rávilágít azokra a kihívásokra, amelyek az egységes, kötelező ellenőrzési követelmények hiányosságaiból adódnak.*

Kulcsszavak: *robbanásvédelem, ATEX, nem-villamos gyártmányok, gyújtóforrás, robbanásvédelmi felülvizsgálat*

Abstract: *Non-electrical equipment used in explosive atmospheres often acts as a potential source of ignition, yet it receives significantly less attention than its electrical counterparts. Although the ATEX framework clearly defines the obligations of manufacturers and operators, Hungary has no execution-level regulation that specifies concrete, mandatory periodic inspection requirements for non-electrical explosion-protected equipment. Consequently, the frequency and methodology of such inspections rely primarily on risk assessment, manufacturer documentation, and the operator's own explosion protection system. This study reviews the Hungarian regulatory environment, presents the solutions commonly applied in practice, and highlights the challenges arising from the lack of uniform, legally binding inspection requirements.*

Keywords: *explosion protection, ATEX, non-electrical equipment, ignition source, explosion protection inspection*

1. GYÁRTMÁNYOK LEHETSÉGES GYÚJTÓFORRÁSAI ROBBANSVESZÉLYES TÉRSÉGBEN

A robbanásveszélyes környezetben használt villamos gyártmányok (berendezés) többféle módon válhatnak gyújtóforrássá. Az egyik leggyakoribb jelenség az elektromos ívképződés, amely kapcsolók, relék, kontaktorok vagy más árammegszakító elemek működése közben jelenik meg [1]. A mindennapi üzem során előforduló kisebb hibák – például a meglazult csatlakozások, az elöregedett szigetelések vagy a vibráció miatt kialakuló érintkezési bizonytalanság – szintén előidézhetnek magas hőmérsékletű mikroíveket. Ezek sokszor nem látványos meghibásodások, mégis elegendő energiát hordozhatnak egy gyúlékony gáz-, gőz- vagy porkeverék begyújtásához. A témával foglalkozó szabványok és szakmai kiadványok rendszeresen hangsúlyozzák [2], hogy az elektromos ív és az érintkezési hibák a villamos eredetű gyújtások egyik legtipikusabb forrásai.

Hasonlóan jelentős kockázatot jelent a villamos gyártmányok felületi hőmérsékletének növekedése. A motorok, transzformátorok vagy teljesítményelektronikai eszközök túlterhelés, rossz szellőzés vagy mechanikai meghibásodás következtében olyan hőmérsékleti szinteket érhetnek el, amelyek már elégségesek lehetnek egy robbanásveszélyes közeg gyulladásához. Gyakori problémát jelentenek a por- vagy olajlerakódások is, amelyek csökkentik a gyártmány hőleadását, és lokális túlmelegedési pontokat hozhatnak létre. A szabályozási környezet szerint

a felületi hőmérséklet megfelelő korlátozása és ellenőrzése alapvető feltétele annak, hogy a gyártmány biztonságosan üzemelhessen a robbanásveszélyes zónában.

A robbanásveszélyes környezetben működő nem-villamos gyártmányokban (berendezésekben) gyakran éppen azok a folyamatok hordozzák a legnagyobb gyújtási kockázatot, amelyek a működés hétköznapi velejárói. Egy csapágy, amely eleinte csak enyhén zörög, majd észrevétlenül egyre jobban melegszik; egy tengely, amelyet a legkisebb kopás már kimozdít az ideális futásból; vagy két fémfelület, amely nagy fordulaton súrlódik — mind olyan helyzetek, amelyeknél a keletkező hő könnyen elérheti egy gyúlékony közeg gyulladási hőmérsékletét. Ugyanez igaz az apró, mechanikai ütésekre is: egy laza alkatrész vagy egy vibráló burkolat néha olyan szikrát képes létrehozni, amely szabad szemmel alig észrevehető, mégis veszélyes. A kutatások rendre azt mutatják, hogy ezek a rövid életű, kis felületre koncentrált hőmérséklet-csúcsok sokkal könnyebben kialakulnak, mint azt a napi gyakorlat során sejtenénk.

A másik, gyakran alábecsült tényező a sztatikus feltöltődés. Ez nem hangos, nem látványos, és éppen emiatt sokszor figyelmen kívül hagyják. Egy műanyag cső, amelyen keresztül anyag áramlik; egy keverőlapát, amely nagy sebességgel mozgatja a poros vagy szemcsés anyagot; vagy akár egy gumiszíj, amely hosszú ideig fut a görgőkön — mind képesek olyan töltést felhalmozni, amely egyetlen kisülésben már elegendő energiát bocsát ki a környezet begyújtásához. A nem-villamos gyártmányok gyújtóforrásai tehát nem rendkívüli meghibásodások eredményei, hanem a gépek természetes működéséhez kötődő folyamatoké [3] — éppen ezért nehezebb előre látni és megelőzni őket. Nem-villamos gyártmány, mint például szivattyú és aktuátor az 1. ábrán láthatóak. Egy szivattyúnál várható meghibásodás lehet egy csapágy meghibásodása vagy az olajvesztés egy sebességváltóban.

1. ábra: *Robbanásbiztos kialakítású szivattyú és aktuátor*

A mechanikus gyártmányok egy része – különösen az úgynevezett *egyszerű gyártmányok* – nem tartoznak az ATEX 2014/34/EU irányelv [4] hatálya alá (magyarországi harmonizált jogszabály, a 35/2016. (IX. 27.) NGM rendelet [5]). A robbanásbiztos követelmények ugyanis csak azokra a gyártmányokra vonatkoznak, amelyek normál működési körülmények között potenciális gyújtóforrással rendelkeznek, vagyis életszerűen képesek lehetnek egy robbanásveszélyes közeg meggyújtására.

A mai ipari gyakorlatban sok gyártó olyan mechanikus elemekre is nyilatkozatot ad, amelyek konstrukciójuknál fogva nem tartalmaznak gyújtóforrást, és ezért nem tartoznak a 2014/34/EU irányelv szerinti „robbanásbiztos gyártmány” kategóriába. A gyártói dokumentációban mégis gyakran szerepel, hogy az adott termék „alkalmas robbanásveszélyes térben való használatra”,

amely lehet Zóna-2/22 vagy éppen Zóna-1/21. Ilyen gyártmány a 2. ábrán látható szalagcsőbilincs.

2. ábra: *Szalagcsőbilincs Zóna-1/21 és Zóna-2/22 robbanásveszélyes térségekben [6]*

2. HAZAI JOGSZABÁLYI KÖRNYEZET ROBBANÁSBIZTOS GYÁRTMÁNYOK LÉTESÍTÉSÉRE ÉS FELÜLVIZSGÁLATÁRA VONATKOZÓAN

A robbanásveszélyes térségekben alkalmazott villamos és nem-villamos gyártmányok robbanásbiztos követelményeit az említett 2014/34/EU irányelv határozza meg, míg a vonatkozó szabványok — többek között az MSZ EN IEC 60079 szabványsorozat a villamos védelmi módok és elveik, valamint az MSZ EN ISO 80079-36 és MSZ EN ISO 80079-37 szabványok a nem-villamos védelmi módokat és elveket rögzítik — részletesen szabályozzák a gyártmányok kialakításának és megfelelőségének műszaki specifikációit. Fontos megjegyezni, hogy a nem-villamos védelmi módok vonatkozó szabványai gyakorlatilag villamos védelmi módokon alapulva jelentek meg és kerülnek aktualizálásra.

Az 54/2014. (XII. 5.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról 99. § (6) bekezdése [7] szerint „Robbanásveszélyes térben csak olyan villamos és nem-villamos gyártmányok alkalmazhatóak, amelyek a robbanásveszélyes zónának megfelelő robbanásbiztos védelmi móddal rendelkeznek.” Ezen követelmény megfogalmazása pontatlan mert nem védelmi móddal, hanem védelmi jellel rendelkező gyártmány lenne a helyes kifejezés, de előírást ad a létesítési és kiválasztási szempontokra, hasonló képen, mint a Tűzvédelmi Műszaki Irányelv – Robbanás elleni védelem (TvMI 13.5:2025.02.01.) 4.1.5. pontja [8], amely szerint „Az egyes zónákon belül az adott zóna besorolásának megfelelően tervezett, telepített, beüzemelt és üzemeltetett robbanásbiztos kivitelű villamos és nem villamos gyártmányok alkalmazhatók.” (A tanulmányban meghivatkozott összes jogszabály a 2025.11.17. állapotuk szerint vizsgáltam.)

A jogszabályi környezet egyes rendeletei is tartalmaznak a robbanásbiztos gyártmányokra vonatkozó követelményeket, de ezek a legtöbb esetben csak is kizárólag a villamos gyártmányokra vonatkoznak. Ezek a rendeletek a következők lehetnek például:

3/2020. (I. 13.) ITM rendelet [9]

23.1. Gáznyomás-szabályozó állomás területén belül csak olyan villamos berendezés helyezhető el, amely legalább a 2-es zónának megfelelő védelemmel rendelkezik.

7/2022. (I. 25.) SZTFH rendelet [10]

20. § (1) A villamos gyártmányok telepítése esetén gondoskodni kell a megfelelő érintésvédelmi, robbanás elleni védelmi, villámvédelmi, másodlagos túlfeszültség és sztatikus feltöltődés elleni védelmi megoldásról.

17/2022. (I. 28.) SZTFH rendelet [11]

3.2.2.12. A tartály robbanásveszélyes térségében alkalmazott villamos gyártmányok robbanásbiztos kivitelűek legyenek.

26/2022. (I. 31.) SZTFH rendelet [12]

7.3. Potenciálisan robbanásveszélyes környezetben a villamos berendezést csak a robbanás elleni védelem maradéktalan biztosítása esetén szabad alkalmazni.

3/2009. (II. 4.) ÖM rendelet [13]

4. § (8) A nem villamos gyártmányokat – a robbanásveszélyes zónákban – a vonatkozó szabványban meghatározott gyújtási kockázatértékelésben foglaltak szerint vagy azzal egyenértékű műszaki megoldásnak megfelelően lehet alkalmazni.

18/2022. (I. 28.) SZTFH rendelet [14]

3.3. A villamos tervnek tartalmaznia kell az érintés elleni védelem, az érintésvédelem, a tűz és a robbanás elleni védelem, a villámvédelem és a sztatikus feltöltődés elleni védelem megoldásait. (V. fejezet)

5.1. Az üzemeltető által meghatározott pontokon a gázelosztó rendszert olyan jelző-, mérő- és regisztráló gyártmányokkel kell ellátni, amelyekkel megállapíthatóak a biztonsági szempontból fontos jellemzők, így különösen a nyomás és a hőmérséklet, továbbá a beállított határértékek elérése. (V. fejezet)

5.2. Az 5.1. pontban felsorolt gyártmányok feleljenek meg a tűz és a robbanás elleni védelem követelményeinek. (V. fejezet)

3.3. A robbanásveszélyes zónák figyelembevételével kell a gáznyomás-szabályozó állomást telepíteni, illetve a tűz és a robbanás elleni védelmet kialakítani. (IX. fejezet)

27/2022. (I. 31.) SZTFH rendelet [15]

32a. robbanásbiztos kivitel: az a villamos vagy gépészeti berendezés-kialakítás, amely működése során nem válthat ki robbanást, és nem válhat gyújtóforrássá még rendellenes működés esetén sem;

22. § (7) Az „RV-besorolású" helyiség szellőző- és klimatizáló berendezésének létesítési követelményei a következők: i) az elszívó berendezés robbanásbiztos kivitelű legyen.

24. § (1) Az „RV-1" besorolású helyiségben olyan villamos gyártmányt kell alkalmazni, amely a technológiától függően 0, 1 vagy 2 zónába tartozik és megfelelőségét tanúsították. (3) Az „RV-2" és „RV-3" besorolású helyiségben olyan villamos gyártmányt kell alkalmazni, amely az ott alkalmazott technológiától függően 20, 21 vagy 22 zónába tartozik és megfelelőségét tanúsították.

Az utóbbi három rendelet már tartalmaz utalásokat a robbanásbiztos kivitelű nem-villamos gyártmányok tekintetében, de olyan szintű külön feltüntetést, mint a többi rendelet esetében, amelyek konkrétan a villamos gyártmányokra hivatkoznak egy robbanásveszélyes térségben nincsen. A 40/2017. (XII. 4.) NGM rendelet [16] egyértelműen meghatározza a robbanásbiztos villamos gyártmányok üzembe helyezés előtti és időszakos felülvizsgálati követelményeit, rögzítve a vizsgálatok tartalmát, gyakoriságát és a felülvizsgálatot végző személyek kompetenciáját. A rendelet hatálya ugyanakkor kifejezetten a villamos gyártmányokra korlátozódik, és nem terjed ki a nem-villamos gyártmányok robbanásvédelmi felülvizsgálatára, amelye rendelkezhetnek gyújtóforrása, és saját védelmi módjuk is van.

Magyarországon a nem-villamos – például mechanikus – gyártmányok esetében nincs önálló, jogszabályban rögzített végrehajtó rendelet a felülvizsgálati kötelezettség vagy eljárásrendre. A 3/2003. (III. 11.) FMM–ESZCSM együttes rendelet 4. § (4) és (5) bekezdéseiben [17] találhatóak olyan értelmezések, hogy robbanásveszélyes térben bármilyen berendezés – így a

nem-villamos gyártmányok is – csak akkor helyezhetőek üzembe – továbbá úgy szükséges karbantartani és üzemeltetni, hogy a robbanás kockázata a lehető legalacsonyabb legyen. A robbanásvédelmi dokumentációnak tartalmaznia kell a biztonságos működtetés módját és feltételrendszerét. A követelmény minden olyan munkaeszközre és csatlakozó berendezésre kiterjed, amely önmagában nem feltétlenül jelent gyújtóforrást, de más berendezéssel együtt használva potenciális gyújtási kockázatot hordozhat. Mivel egy robbanásvédelmi dokumentációban, a rendelet 9. § (2) a) pontja szerint a kockázatok felmérését és értékelését el kell végezni, valamint például robbanásbiztos villamos gyártmányok időszakos felülvizsgálatát legalább három évente el kell végezni (az elektrosztatikus feltöltődés és kisülés elleni védelem és villámvédelem felülvizsgálatát is beleértve), a nem-villamos gyártmányokat is ilyen formán ellenőrizni szükséges a használatukból eredő, ismertetett gyújtási kockázatuk révén (a 27/2022. (I. 31.) SZTFH rendelet is tartalmaz felülvizsgálati kötelezettségeket).

Németországban a Működésbiztonsági rendelet [18] (BetrSichV) 2. melléklet – Különleges előírások robbanásveszélyes területekre vonatkozóan kimondja, hogy a robbanásveszélyes területeken használt gyártmányok, berendezések, munkaeszközöket, stb. az első üzembe helyezés előtt és rendszeresen ellenőrizni szükséges, amely hatással lehet a robbanás bekövetkezésére. A rendelet 3. szakasza: Vizsgálatok rész alapján, az ilyen robbanásbiztos gyártmányokat (villamos és nem-villamos), három évente ellenőrizni szükséges.

3. IPARÁGI GYAKORLAT

Az egyik gyakorlat szerint – bár a nem-villamos gyártmányokra nem létezik külön végrehajtó rendelet – az üzemeltetők mégis elvégzik a gyártmányok robbanásbiztonsági ellenőrzését. Ennek indoka, hogy a mechanikus gyártmányok normál üzemben is hordozhatnak gyújtóforráspotenciált (például súrlódás, túlmelegedés, statikus feltöltődés), így a robbanásvédelmi dokumentáció, a kockázatértékelés és a gyártói információk alapján szükségesnek ítélik a rendszeres felülvizsgálatot. Ez a megközelítés a robbanás elleni védelem szempontjából üzemeltetés felelősségteljesebb, megelőzésközpontú értelmezésén alapul.

A másik iparági gyakorlat ezzel szemben kizárólag a 40/2017. (XII. 4.) NGM rendeletet veszi figyelembe, amely viszont csak a villamos gyártmányok robbanásvédelmi felülvizsgálatát szabályozza. Ebben a megközelítésben a nem-villamos gyártmányokat egyáltalán nem ellenőrzik, még akkor sem, ha rendelkeznek meghatározott védelmi móddal, védelmi jellel.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Robbanásveszélyes térségekben a villamos és nem-villamos gyártmányok (berendezések) egyaránt jelentős gyújtóforrássá válhatnak, utóbbiak gyakran a normál üzem velejárói, mint a súrlódás vagy a sztatikus feltöltődés révén.

A hazai szabályozási keret precíz és részletes követelményeket fogalmaz meg a villamos robbanásbiztos gyártmányok felülvizsgálatára (40/2017. NGM rendelet). Ezzel szemben, bár a jogszabályok megkövetelik a kockázatértékelést és a robbanásvédelmi dokumentációt a nem-villamos berendezésekre is, hiányzik az a specifikus végrehajtó rendelet, amely kötelezővé és módszertanilag meghatározottá tenné ezen gyártmányok időszakos biztonsági felülvizsgálatát. Az egységes szabályozás hiánya a nem-villamos berendezések időszakos felülvizsgálatára tehát olyan hiányosság, amely a robbanás elleni védelem maradéktalan biztosítását veszélyezteti.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] K. Ramamurthi, *Ignition Sources, Fire, Explosion and Detonation*, 1st ed., vol. XVIII, 201. Springer International Publishing, 2023. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-20687-0.

[2] Ptak, Szymon, "A New Concept of Electrical-Equipment Explosion Protection Utilising Pressurised Enclosures and Stationary Nitrogen Installations," *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, no. 49, pp. 94–100, 2018, doi: 10.12845/bitp.49.1.2018.9.

[3] Hawksworth, S., Rogers, R., Beyer, M., Proust, C., Lakic, D., Gummer, J., & Raveau, D. (2006). *Assessing the potential for ignition from mechanical equipment.* In IChemE Symposium Series No. 151: Hazards XIX, Manchester, Paper 67 (pp. 963–972). IChemE. Retrieved from https://www.icheme.org/media/9854/xix-paper-67.pdf

[4] ATEX 2014/34/EU Guidelines 5th Edition - April 2024.

[5] 35/2016. (IX. 27.) NGM rendelet a potenciálisan robbanásveszélyes környezetben történő alkalmazásra szánt gyártmányok és védelmi rendszerek vizsgálatáról és tanúsításáról.

[6] Szalagcsőbilincsek robbanásveszélyes terekhez 1/21, 2/22 zóna, https://www.dehn.hu/store/p/hu-DE/F5906/szalagcs-bilincsek-robban-svesz-lyes-terekhez-1-21-2-22-z-na.

[7] 54/2014. (XII. 5.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról.

[8] TvMI 13.5:2025.02.01., „Tűzvédelmi Műszaki Irányelv (TvMI 13.5:2025.02.01.)", *BM OKF*, Budapest, 2025.

[9] 3/2020. (I. 13.) ITM rendelet a csatlakozóvezetékekre, a felhasználói gyártmányokre, a telephelyi vezetékekre, az olajfogyasztó technológiai rendszerekre és a gáztárolókra vonatkozó műszaki biztonsági előírásokról és a műszaki-biztonsági szempontból jelentős munkakörök betöltéséhez szükséges szakmai képesítésről és gyakorlatról, valamint az ilyen munkakörben foglalkoztatottak időszakos továbbképzésével kapcsolatos szabályokról szóló 16/2018. (IX. 11.) ITM rendelet módosításáról.

[10] 7/2022. (I. 25.) SZTFH rendelet a propán-bután töltő- és tároló üzemek Biztonsági Szabályzatáról

[11] 17/2022. (I. 28.) SZTFH rendelet a fogyasztóknál elhelyezett cseppfolyós propán-butángáz tartályok biztonsági követelményeiről és a Cseppfolyós Propán-butángáz Tartályok Biztonsági Szabályzatáról

[12] 26/2022. (I. 31.) SZTFH rendelet a szénhidrogén szállítóvezetékek biztonsági követelményeiről és a Szénhidrogén Szállítóvezetékek Biztonsági Szabályzatáról

[13] 3/2009. (II. 4.) ÖM rendelet a megújuló energiaforrásokat – biogázt, bioetanolt, biodízelt – hasznosító létesítmények tűzvédelmének műszaki követelményeiről

[14] 18/2022. (I. 28.) SZTFH rendelet a gázelosztó vezetékek biztonsági követelményeiről és a Gázelosztó Vezetékek Biztonsági Szabályzatáról

[15] 27/2022. (I. 31.) SZTFH rendelet az Általános Robbantási Biztonsági Szabályzatról

[16] 40/2017. (XII. 4.) NGM rendelet az összekötő és felhasználói gyártmányokról, valamint a potenciálisan robbanásveszélyes közegben működő villamos gyártmányokról és védelmi rendszerekről

[17] 3/2003. (III. 11.) FMM-ESzCsM együttes rendelet a potenciálisan robbanásveszélyes környezetben levő munkahelyek minimális munkavédelmi követelményeiről.

[18] Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (Betriebssicherheitsverordnung - BetrSichV) Anhang 2 (zu den §§ 15 und 16) Prüfvorschriften für überwachungsbedürftige Anlagen

AZ EURÓPAI VILLAMOSENERGIA PIAC EGYSÉGESÍTÉSE ÉS A SZABVÁNYOS KIEGYENLÍTŐ SZABÁLYOZÁSI SZOLGÁLTATÁSOK KIALAKULÁSA

UNIFYING EUROPEAN ELECTRICITY MARKET AND THE DEVELOPMENT OF STANDARD BALANCING SERVICES

HEGYI Ádám[1], BODNÁR István[2]

[1]PhD hallgató, hegyi.adam@student.uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola

[2]Ph.D., dr. habil., intézetigazgató egyetemi docens, istvan.bodnar@uni-miskolc.hu Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék; H-3515 Magyarország, Miskolc- Egyetemváros, Tel/Fax: +36 46 565-142

Kivonat: Az európai villamosenergia-rendszer átalakulása, a megújuló energiaforrások gyors térnyerése és a forgógépes erőművi kapacitások visszaszorulása alapvetően változtatásokat követel a villamosenergia rendszer vezérlésében. Az időjárás függő termelés növekedése és a csökkenő rendszerinercia nagy hatással van a rendszer stabilitására és felértékeli a kiegyenlítő kapacitások szerepét. A cikk áttekinti a frekvenciaszabályozás műszaki alapjait, bemutatja az egységes európai villamosenergia-piac kialakulásának főbb lépéseit, ezek magyarországi implementációját, valamint bemutatja a mérlegkör-felelősök (BRP) és kiegyenlítő szolgáltatók (BSP) gazdasági szerepét a kiegyenlítő kapacitások piacán. Részletezi a frekvenciatartási (FCR), automatikus frekvenciahelyreállítási (aFFR) és a kézi frekvenciahelyreállítási (mFRR) tartalékok funkcióját, aktiválását és piaci sajátosságait.

***Kulcsszavak**: frekvenciaszabályozás, kiegyenlítő kapacitás, FCR, aFRR, mFRR, villamosenergia-rendszer stabilitás*

Abstract: The transformation of the European power system, the rapid expansion of renewable energy sources and the decline of conventional synchronous generation capacity fundamentally require changes in power system control. The increase of weather-dependent generation and the reduction of system inertia have a major impact on system stability and enhance the importance of balancing capacities. This paper reviews the technical fundamentals of frequency control, presents the main steps in the development of the integrated European electricity market and its implementation in Hungary, and describes the economic role of Balance Responsible Parties (BRPs) and Balancing Service Providers (BSPs) in the balancing capacity market. It provides a detailed analysis of the functions, activation mechanisms and market characteristics of Frequency Containment Reserves (FCR), automatic Frequency Restoration Reserves (aFRR) and manual Frequency Restoration Reserves (mFRR).

***Keywords:** frequency control, balancing services, FCR, aFRR, mFRR, power system stability*

1. BEVEZETÉS

A közcélú villamosenergia-hálózat minőségét számos, egymással összefüggő tényező határozza meg. Ide tartozik az energiaellátás megbízhatósága, vagyis annak biztosítása, hogy a fogyasztó a felhasználási helyén folyamatosan és megszakítás nélkül hozzájusson a szükséges villamos energiához. Továbbá a feszültségminőség, amely magában foglalja a feszültség effektív értékének, a hálózati frekvenciának, a hullámalak torzulásának, valamint a fázisok közötti szimmetriának a megengedett tűréshatárokon belül tartását. Ezen túl a villamosenergia-rendszer frekvenciája, amely a teljes hálózat egyik legkézenfekvőbb állapotjelzője, mivel közvetlenül tükrözi a termelés és a fogyasztás pillanatnyi egyensúlyát, és ezáltal mutatja a hálózat stabil működését.[1] A villamosenergia-rendszer frekvenciájának szabályozása tehát kulcsfontosságú feladat, különösen a növekvő megújuló energiaforrás-arány mellett, ahol a hagyományos szinkrongenerátorok által biztosított természetes inercia csökken. Míg a szinkrongenerátorok mecha-

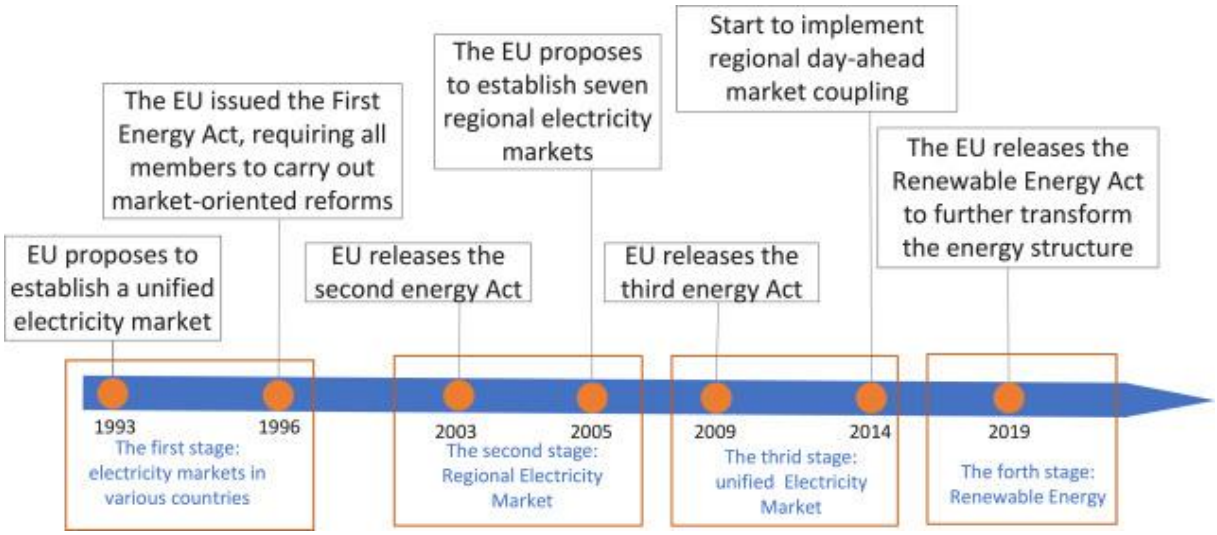
nikai tehetetlensége csillapította a frekvenciaváltozásokat, a teljesítményelektronikai átalakítókon keresztül csatlakozó megújulók nem képesek ilyen stabilizáló hatást kifejteni. A naperőművek, akkumulátoros energiatárolók és egyéb inverteres termelőrendszerek gyors ütemű terjedése, valamint a hagyományos forgóművi erőművi kapacitások visszaszorulása jelentősen csökkenti a hálózat inerciáját. Ennek eredményeként a frekvenciazavarok gyorsabban és nagyobb mértékben alakulnak ki. A megújuló erőművek időjárásfüggősége és az előrejelezhetőség korlátai tovább növelik az instabilitás kockázatát. [2]

A cikk a villamosenergia-rendszer frekvenciaszabályozásának különböző lehetőségeit mutatja be, bemutatja a frekvencia stabilizálását biztosító szabályozási tartalékok (FCR, aFRR, mFRR) szerepét és működését. A villamosenergia-hálózat átviteli, valamint a termelés és fogyasztás közötti egyensúly fenntartásának feladatait a TSO (Transmission system operator), azaz az átviteli rendszerirányító látja el. Magyarországon ez a szerepkör a MAVIR Zrt. feladata, amely a villamosenergia-rendszer valós idejű üzemeltetéséért, terhelés-elosztásáért és a hálózat stabilitásának biztosításáért felel. Tevékenységének hatósági felügyeletét pedig a MEKH (Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal) látja el.[3] Nagyobb országokban, ahol nagyobb hálózatokat kell ellátni, mint például Németország, több regionális TSO működik, amelyek összehangolt módon látják el a frekvenciaszabályozás és rendszerbiztonság feladatait az ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) alatt.[4] A frekvencia szabályozását a TSO szabályozási tartalékok igénybevételével biztosítja. Az FCR (Frequency Containment Reserve) vagy primer tartalék, gyors reakció idejű, de kis kapacitású, feladata a frekvencia az eltérések gyors kiegyenlítése. Ezt követi az aFRR (automatic Frequency Restoration Reserve), vagyis a szekunder tartalék, amely akkor aktiválódik, ha az eltérés hosszabb ideig áll fenn és az FCR tartalék elfogyott. Végül, ha már sem primer, sem a szekunder tartalék nem tudja fenntartani az egyensúlyt aktiválódik az mFRR (manual Frequency Restoration Reserve), vagyis a tercier tartalék. Az mFRR általában egy lassan aktiválható tartalék, de kapacitása lényegesen nagyobb társainál, nevéből fakadóan hagyományosan manuálisan aktiválják, ám manapság már ezek is képesek lehetnek az automatikus indulásra. Ez a struktúrált rendszer teszi lehetővé, hogy a villamosenergia rendszer akkor is stabil maradjon, amikor hirtelen termelés kiesés, vagy fogyasztásváltozás lép fel.[5]

2. AZ EGYÉGES EURÓPAI VILLAMOSENERGIA PIAC KIALAKULÁSA

Európát öt szinkron villamosenergia-hálózat alkotja, nevezetesen Kontinentális Európa, Észak-Európa, az Egyesült Királyság, a balti államok és Írország. A szinkron villamosenergia-hálózatokat egyenáramú távvezetékek kötik össze. Az országok energiafogyasztási karakterisztikái és struktúrái kiegészítik egymást, a határokon átnyúló energiacserék igen gyakoriak. [6] Az Európai Unió felismerte az igényt és 1996-ban elfogadta a 96/92/EK irányelvet, amely felvetette az egyeséges európai energiapiac létrehozásának szükségességét. Az irányelv kivonja a villamosenergia-piacot az állami monopóliumból és megnyitja a verseny előtt, szétválasztja az erőművek, a hálózat és az értékesítés szerepét, valamint bevezeti a verseny alapú villamosenergia kereskedelmet. Ezzel elindult az európai energiapiac-orientált tranzakciók és piaci integráció fejlődési folyamata.[7]

A villamosenergia-piac fejlődése négy fő szakaszban ment végbe, amelyek során fokozatosan egységes piac és a határokon átnyúló együttműködés alakult ki. Első lépésként a korábban említett villamosenergia-verseny fejlesztését célozták meg, ezt követően az észak-európai, az Egyesült Királyságbéli és német villamosenergia-piacok összekapcsolása és integrációja indult meg. A második energia csomag 2003-ban jelent meg és a kiskereskedelmi piac fejlesztésére összpontosított, elindult a megbízható diszpécserszolgálatok és felügyeleti rendszerek építése, a villamosenergia-piac hatékony és versenyképes működésének érdekében.[8]



1. ábra *Az európai villamosenergia-piac fejlődésének lépései az Európai Unió által kiadott irányelvek szerint[9]*

A harmadik energiacsomag 2009-es elfogadását követően megkezdődött a villamosenergia-hálózatra vonatkozó részletes üzemviteli előírások és hálózati kódexek kidolgozása, amelyek kulcsszerepet játszottak az egységes villamosenergia-piac gyakorlati megvalósításának elő-mozdításában. A piac tényleges integrációja azonban jelentős kihívásokba ütközött, mivel az egyes országok energiarendszereinek műszaki, szabályozási és piaci feltételei eltérőek voltak, így az integráció folyamata csak fokozatosan haladhatott előre. Mindeközben a villamosenergia-kereskedelem alapvető elemei lépésről lépésre egységesedtek, ami elősegítette az európai piacok operatív összekapcsolását. Ennek eredményeként jelentős előrelépés történt a napi piacok (day-ahead) és a napon belüli piacok (intraday) összehangolt európai platformokon történő összekapcsolásában, ami számottevően növelte a határokon átnyúló kereskedelem volumenét és hatékonyságát.[10] [9] A 2019-ben elfogadott negyedik energiacsomag célja az volt, hogy az Európai Unió energiarendszerét felkészítse a megújuló energiaforrások nagy arányú integrációjára és a klímasemlegesség irányába történő átmenetre. A csomag központi eleme a villamosenergia-piac szabályozásának korszerűsítése, amely elősegíti, hogy a fogyasztók aktív szereplőkké, úgynevezett proszumerekké válhassanak, vagyis saját áramot termeljenek és értékesítsenek. A jogszabályok elismerik az energiaközösségek létjogosultságát, így például lakóközösségek és helyi közösségek közösen létesíthetnek és üzemeltethetnek megújuló energiaforrásokat. Továbbá a csomag ösztönzi a rugalmas kapacitások, például energiatárolók és fogyasztói terhelés-szabályozás elterjedését, amelyek stabilizálják a hálózatot az időjárásfüggő termelés mellett. A villamosenergia-piac napi és napon belüli kereskedési mechanizmusai még jobban kidolgozásra kerültek, ami hatékonyabb és átláthatóbb határokon átnyúló kereskedelmet eredményez. Összességében a negyedik energiacsomag a versenyképes, rugalmas és alacsony szén-dioxid-kibocsátású európai villamosenergia-rendszer kialakítását szolgálja.[11], [12], [13], [14]

2.2 Irányelvek implementációja a magyar villamosenergia piacon

Magyarországon 2001 decemberében az Országgyűlés elfogadta a 2001. évi CX. Villamosenergia-törvényt[15]. A törvény és a kapcsolódó új szabályozások végrehajttatták az Európai Unió villamosenergia irányelvét és fokozatosan Magyarországon is megnyílt a villamosenergiapiac a verseny előtt. Ez azt jelentette, hogy a 2003 január 1.-i kötelező átallásig az országban két rendszert kellett létrehozni, a közüzemi ellátást és a versenyképes villamosenergia-ellátást. Az MVM (Magyar Villamos Művek) az egyetlen vásárló modellje szerint szerepelt a piacon,

ez azt jelenti, hogy a vállalat az ország egyetlen villamosenergia nagykereskedője és importőrje. Minden vásárlónak az MVM-től kellett beszereznie az általa lekötött energiát. 2002-ben megszűnt az egyetlen vásárló modellje, ezután az MVM közüzemi szolgáltatóként működött tovább. Az irányelvek implementálása érdekében megalakult a MAVIR rendszerirányítóként. A magyar piac egyik fő problémája ekkoriban a nagy mennyiségű hosszú távú szerződés volt, ezeket a szerződéseket is fokozatosan kivezették és megkezdték az árverések szervezését a szabad kapacitásokra.[16]

A második villamosenergia irányelv bevezetésekor már látszott, hogy a kettős piaci rendszer hosszú távon nem lesz fenntartható, mert a valóságban a versenypiac inkább csak alternatívaként volt jelen, és az a feljogosított fogyasztók a közüzemi szolgáltató és a versenypiac között váltogattak az ár függvényében. A második irányelv bevezetését követően elfogadják a ma is használt és frissített 2007. évi LXXXVI. törvény a villamos energiáról (VET)[17] törvényt, amely többek között egy hatékonyan működő versenyképes villamosenergia-piac megteremtését célozza, miközben támogatja a fenntartható fejlődést, előmozdítja a megújuló energiaforrások használatát és garantálja az ellátásbiztonságot. A verseny torzulását csak a domináns pozíció kihasználása elleni küzdelem és a kiszolgáltatott fogyasztók esetében tolerálják. Bevezetik az egyetemes szolgáltatók fogalmát, amely a közüzemi szolgáltatás helyét veszi át a lakossági és kisfeszültségű fogyasztók számára. Az egyetemes szolgáltatóknak az ország minden pontján bizonyos mennyiségű villamosenergiát kell biztosítani méltányos áron az arra jogosultaknak, célja a kisfogyasztók elleni visszaélések elleni védelem és az ellátásbiztonság garantálása. A harmadik csomag elfogadása jelentős változást hozott a magyar villamosenergia-szektorban. Megalakul a MAVIR leányvállalata a Magyar Villamosenergia-tőzsde (HUPX). [18]

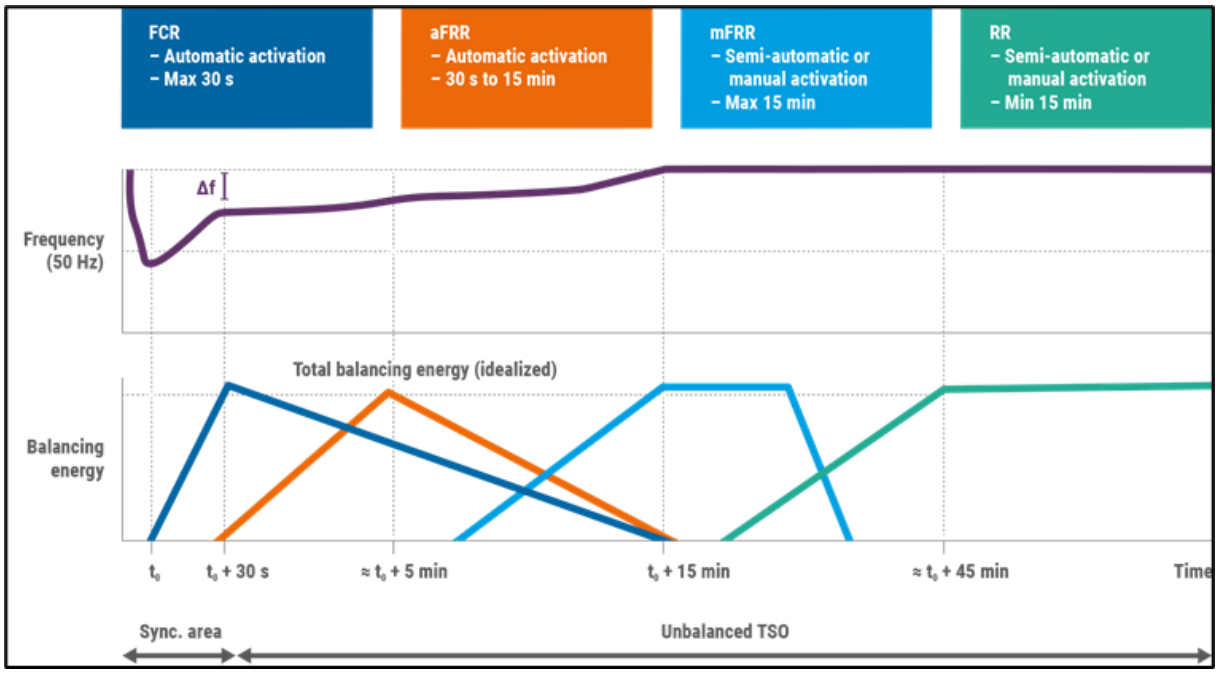
3. KIEGYENLÍTŐ SZABÁLYOZÁSOK

A rendszerszintű szolgáltatások célja a villamosenergia rendszer biztonságos, stabil és megbízható működéséhez szükséges. A rendszerszintű szolgáltatásokat a MAVIR rendeli meg és aktiválja. ezek a szolgáltatások:

- Feszültség és meddőteljesítmény szolgáltatás: biztosítja a villamosenergia-ellátás üzembiztonságát, a szolgáltatást nyújtó köteles az átviteli rendszerirányító utasításának megfelelően meddőteljesítményt elnyelni vagy betáplálni.
- Üzembiztonsági szolgáltatások
    - Black start szolgáltatás: Külső feszültség, azaz a közcélú hálózatról történő vételezés nélkül a közcélú hálózatra feszültség és teljesítmény kiadására képes termelőberendezés szerződésszerű rendelkezésre tartása és az átviteli rendszerirányító ezirányú utasítása alapján a termelőberendezés termelésének indítása.
    - RIR szolgáltatás: Az átviteli rendszerirányító üzembiztonsági intézkedése, amellyel az átviteli rendszerirányító a fizikai szállítást megelőzően a visszaigazolt másnapi menetrendtől eltérő RIR menetrendet ír elő az alegység részére RIR utasítás formájában kiegyenlített vagy nem kiegyenlített módon. Kiegyenlített módon valósul meg a rendszerirányítóimenetrend-módosítás, ha a menetrendmódosító pozitív és negatív irányú utasítások összességükben kiegyenlítik egymást rendszerszinten. [19]
- Kiegyenlítő szabályozás
    - FCR kiegyenlítő szabályozás
    - aFRR kiegyenlítő szabályozás
    - mFRR és RR kiegyenlítő szabályozás

A kiegyenlítő szabályozás a rendszerszintű szolgáltatások egyike, a villamosenergia-rendszer olyan alapvető üzemviteli folyamata, amely biztosítja, hogy a hálózat frekvenciája és teljesítményegyensúlya minden pillanatban a megengedett határokon belül maradjon. Az egyes

szolgáltatások részletezését a cikk későbbi fejezeti tartalmazzák. Mivel az energiatárolás nagy mennyiségben nem gazdaságos, a rendszerirányítónak folyamatosan gondoskodnia kell arról, hogy az aktuális fogyasztás és termelés összhangban legyen. Kezeli a fogyasztás és termelést érintő váratlan menetrendhez képest fellépő eltéréseket és az időjárás függő erőművek termelési bizonytalanságait, továbbá az erőművi kieséseket. A rendszerirányító szabályozási tartalékokat készenlétben, amelyekkel be tud avatkozni, ha hálózat frekvenciája eltér az előírt határértékektől vagy ha a tényleges energiaáramlások eltérnek a meghirdetett menetrendektől.

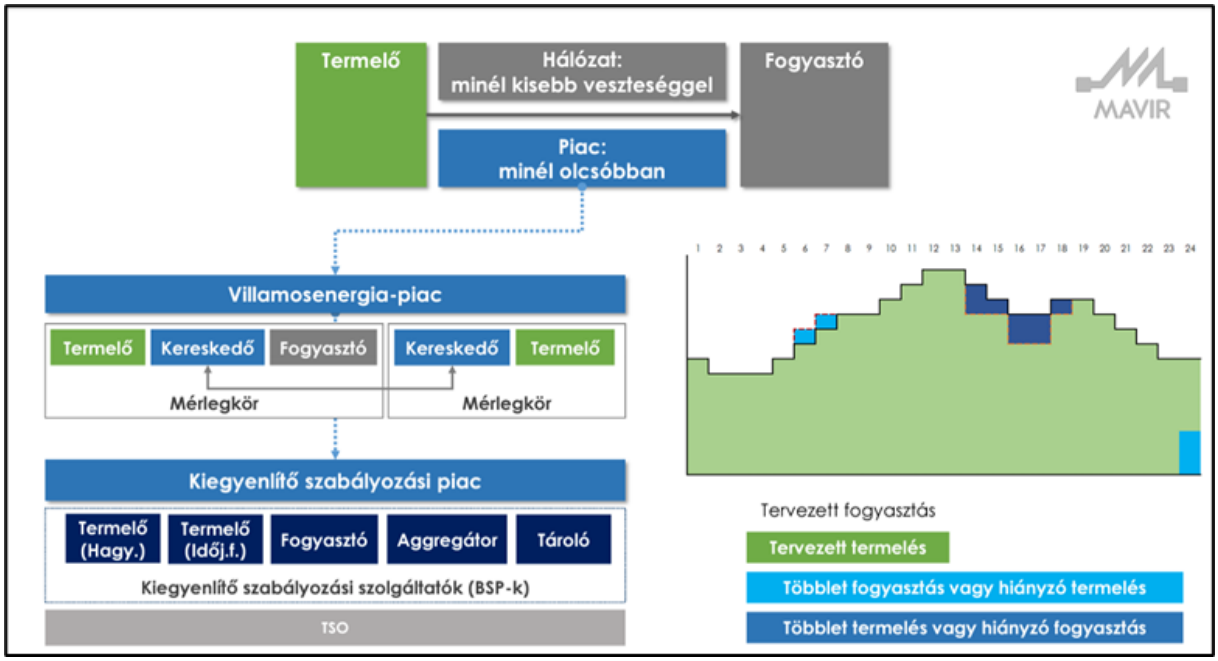


2. ábra *A kiegyenlítő szabályozási szolgáltatások időbeni lépcsői aktiválás szerint [20]*

A rendszerirányító különböző irányú és időléptékű műszaki és szabályozási lépcsőkkel biztosítja a tartalékmennyiségek folyamatos rendelkezésre állását és időben történő aktiválását, ahogy azt a 2. ábra mutatja. A kiegyenlítő szabályozási termékek ezáltal támogatják a rendszer stabil és megbízható módon működjön és megfeleljen a műszaki követelményeknek és a felhasználók ellátásbiztonsági elvárásainak. [21]

A mérlegkör-felelős (BRP – Balance Responsible Party) és a kiegyenlítő energia szolgáltatók (BSP – Balance Service Provider) egymáshoz szorosan kapcsolódó feladatokat látnak el, előfordul, hogy egy személyben. A BRP feladata, hogy az alá tartozó termelői, kereskedői és fogyasztói portfólió minden időpillanatban kiegyensúlyozott legyen. Amennyiben ez nem teljesül a rendszerirányító kiegyenlítő tartalékokat aktivál, amellyel utólag számolnak el. A BSP feladata a végrehajtás, képes szabályozási kapacitást és kiegyenlítő energiát biztosítani a TSO számára, ilynek lehetnek erőművek, ipari fogyasztók, energiatárolók vagy aggregátorok. Az aggregátor ebben a kontextusban olyan piaci szereplőt jelent, aki több kisebb önmagában nem piacképes fogyasztót, termelőt vagy energiatárolót szervez egy portfólióba és így kínálja fel a BSP számára. Önmagában nem piacképes az a piaci szereplő, aminek teljesítménye nem haladja meg az 1MW-ot, így nem vehet részt tenderen. Magyarországon jelenleg kiegyenlítő tartalékok esetében a legkisebb pályázható egység 1 MW, amelyet pozitív és negatív irányban is folyamatosan biztosítani kell. A termékek jellemzően 1 MW-os lépcsőkben növelhetők, de a nemzetközi harmonizáció már több országban lehetővé teszi az akár 0,1 MW-os felbontást is aggregátori

szolgáltatóknál. Gazdasági szempontból a kiegyenlítő kapacitások piacra lépése tenderek alapján történik, ahol a BSP vállalja, hogy tartalékot biztosít rendelkezésre állási díjért cserébe és további aktiválási díjban részesül, amikor a TSO igénybe is veszi a szolgáltatást.[21], [22]

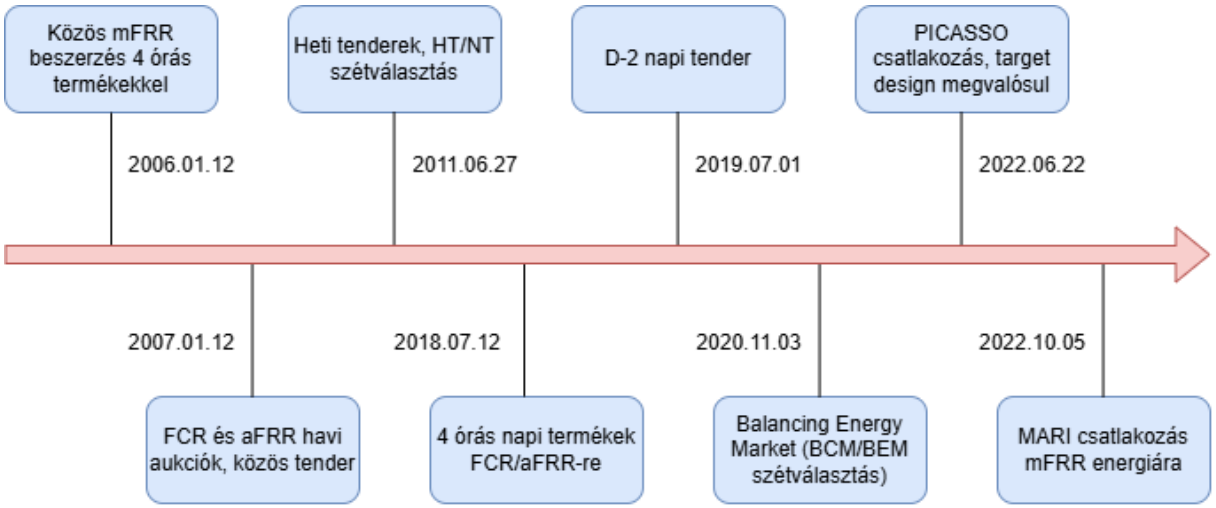


3. ábra *Villamosenergia-rendszer és a kiegyenlítő szabályozási piac kapcsolata*

3.1 Kiegyenlítő szabályozás szolgáltatások kialakulása

A frekvencia szabályozási tartalékok létrehozásának igénye már az egységes európai villamosenergia-piac megszületésével együtt felmerült. Nemzetközi viszonylatban jó példa a német villamosenergia-piac vizsgálata az európai nemzetközi kiegyenlítő szabályozási szolgáltatások kifejlődésére és integrációjára. A folyamat 2006-ban kezdődött, a német átviteli rendszerirányítók (50Hertz, Amprion, TenneT, TransnetBW) a regelleinstung platformon kezdtek el 4 órás tendereket kiírni a tercier tartalék (mFRR) beszerzésére. Ez jelenti az első lépést az összehangolt, rendszerbe szervezett nemzeti beszerzési platform kialakítása felé. Egy évvel később, 2007 decemberében a platform már a primer (FCR) és szekunder (aFRR) tartalékokra is kiterjedt, ekkor még havi aukciók formájában. A technológia fejlődésével 2011-ben áttértek a heti aukciókra, ahol bevezették a nappali (HT) és éjszakai (NT) időszakokat, reagálva a fogyasztási profilok változására. 2018-ban a növekvő megújuló részarányból bekövetkező gyorsabb rendszerállapot változások miatt bevezetik a 4 órás aukciókat az FCR és aFRR termékek esetében is. 2019-ben bevezetik a D-2, azaz a két nappal korábban meghirdetett napi tendereket. A német rendszer 2022-ben érte el a teljes európai villamosenergia-piaci integrációt. [23]

Az egységes európai kiegyenlítő piac fejlődésében a következő lépcsőt az Európai Bizottság 2017/2195 rendelete jelentette, amely 2017-ben először teremtett kötelező érvényű keretrendszert a kiegyenlítő termékek beszerzésére, aktiválására és elszámolására. Az elkülönítetten működő nemzeti piacok fejlődésével megjelent az igény egy egységes, határokon átívelő nemzetközi piac kialakítására. A rendelet értelmében meghatározásra kerültek a szabványos termékek, amelyek lehetővé teszik az átlátható piaci működést. Ezek a termékek már alkalmasak voltak arra, hogy közös felületen lehessen pályázni rájuk, így létrejött a TERRE platform, amely a helyettesítő tartalék (RR) csereplatformja, valamint a MARI és a PICASSO platform, amelyek az mFRR és aFRR termékeket kezelik. [21]



4. ábra *A német kiegyenlítő tartalékok közös beszerzésének fejlődése* [23]

Magyarországon már a 2000-es években szintén megjelentek a kiegyenlítő kapacitások, bár ezeket a rendszereket akkor még nem tenderek alapján üzemeltették, hanem kölcsönös szerződések alapján, a fő célja az energiaellátás biztosítása volt.[24] A 2017-ben elfogadott EB rendelet elfogadása után a magyar piacon is kötelezővé vált a szabványos termékek bevezetése. A 2017-et követő években Magyarország is folyamatosan az uniós követelményekhez igazította a Kereskedelmi szabályzatot és korszerűsítette a beszerzési folyamatokat. Megkezdődött a csatlakozás a MARI és PICASSO platformokhoz. A teljes akkreditált csatlakozást jelenleg a MAVIR 2026 szeptember 30-ára tervezi, ami lehetővé teszi majd a határokon átívelő kereskedést is.[19]

3.2 Frekvenciatartási tartalék – FCR

A frekvenciatartási tartalék a kiegyenlítő szabályozásit termékek leggyorsabb szintje, másnéven primer tartaléknak is nevezik. Feladata, hogy a termelés és fogyasztás közötti hirtelen egyensúlyváltozásokból eredő frekvenciaváltozásokat megállítsa és megakadályozza, hogy a villamosenergia rendszer kritikus állapotba kerüljön. A hálózati frekvenciának minden körülmények között 49,8-50,2 Hz között kell maradnia. [25]

Az FCR teljes mértékben automatikus üzemű, az aktiválása nem a rendszerirányító feladata, ezt helyi frekvencia méréssel lehet elérni. Ha a helyi mérés szerint a hálózati frekvencia eltér az 50 Hz-től a szabályozás aktiválódik és pozitív vagy negatív irányban változtatja a teljesítményét, ezzel elérve egy ideiglenes egyensúlyi állapotot, amely rendszerint még nem esik bele a ± 20mHz-es határértékbe, továbbá megakadályozza az eltérés növekedését. A teljes FCR kapacitás eléréséhez maximum 30 másodperc áll rendelkezésre és legfeljebb 15 percig kell üzemelnie. [25]

Ebből következik, hogy az FCR célja nem a frekvencia végleges helyreállítása, azt már a szekunder és tercier tartalékok végzik, hanem az instabilitás azonnali megfékezése, míg a nagyobb kapacitású tartalékokat aktiválni lehet. A tartalék teljesítményét szimmetrikusan kell biztosítani tehát negatív és pozitív irányban is képesnek kell lennie a szabályozásra, ehhez olyan műszaki megoldásra van szükség, ami lehetővé teszi, hogy a szabályozás gyorsan és pontosan menjen végbe. Piaci szempontból vizsgálva a szolgáltató általában csak a rendelkezésre állási díjat kap, aktiválási díjat nem, a tényleges energiaforgalom másodlagos.[25]

3.3 Automatikus frekvenciahelyreállítási tartalék – aFRR

Az automatikus frekvenciahelyreállítási tartalék a második leggyorsabb kiegyenlítő mechanizmusa a kiegyenlítő szabályozásnak. A FCR szabályozás szerepét veszi át, célja, az FCR tehermentesítése és az ideiglenes kvázi egyensúlyi állapot visszatérítése a valós egyensúlyi állapotba 49,98-50,02 Hz közé. Az FCR ilyenkor visszatér tartalékolt állapotba. Ebben a szabályozás automatikus, de nem helyi mérésen alapul, a rendszerirányító központi automatikus tehermelosztó rendszere (AGC) aktiválja. A TSO folyamatosan számolja a zónaszintű szabályozási eltérést (ACE – Area Control Error), ez a zóna frekvenciaeltéréséből és a szomszédokkal való terv-tény teljesítmények különbségéből adódik. A zóna a TSO által lefedett területet jelenti, tehát Magyarországon ez egy zóna, nagyobb országokban elképzelhető több is. Az aFRR nem csak a frekvenciát, de a szomszédos zónák közötti menetrend eltéréseket is hivatott korrigálni. Ennek a szabályozási szintnek 5 perc áll rendelkezésére a teljes teljesítmény elérésére, ez a gyorsaság lehetővé teszi, hogy hatékonyan váltsa le a primer szabályozást.[25]

Az aFRR kapacitást előre le kell kötni, mind pozitív és negatív irányban. Különlegessége, hogy nem csak a rendelkezésre állásért számít fel díjat a szerződő fél, hanem az aktivált energiamennyiségért is. Ennek a szabályozási módnak folyamatos és dinamikus szabályozási szolgáltatást kell biztosítania, annak érdekében, hogy az AGC jelét folyamatosan követni tudja.[19]

3.4 Kézi frekvenciahelyreállítási tartalék- mFRR

A tercier tartalék egy időben lassabban aktiválható, de nagy kapacitású tartalék. Feladata a hosszabb ideig fennálló eltérések helyreállítása, az aFRR szolgáltatás tehermentesítése és szükség esetén a nagyobb mértékű zavarok vagy tartós menetrendeltérések korrekciója. Az mFRR már nem automatikusan aktiválódik, a rendszerirányító operátori szolgálatától manuális jóváhagyásra van szükség vagy modernebb rendszerek esetében automatizált operátori jóváhagyásra. Hagyományosan telefonon kell értesíteni a szerződött mFRR partnert, manapság már az informatikai hálózat segítségével egyszerűbb a kommunikáció. Az aktiválást követően a tercier tartaléknak 15 perce van elérni a szerződött teljesítményt. Piaci szempontból az mFRR kapacitás és aktivált energiadíjakat kap a szolgáltatásért.[25]

4 KÖVETKEZTETÉSEK

A villamosenergia rendszer stabil működésének fenntartása összetett feladat elé állítja nem csak a nemzeti, de az Európai Unió energiaellátási szektort. A hagyományos nagy tehetetlenségű szinkrongenerátorok visszaszorulásával és az időjárásfüggő, nehezen előre jelezhető inverteres erőművek elterjedésével a rendszer stabilitása lecsökkent. Ez a folyamat felértékelte a kiegyenlítő kapacitások szerepét. A cikkben bemutatásra került, hogy a teljesítmény és frekvenciaszabályozás nem csupán műszaki feladat, hanem az európai energiapiac fontos eleme. A 2000-es években még elszigetelten működő nemzeti rendszerek mára egységes, mára összehangolt európai keretrendszerré váltak. A tartalékok kiírása, beszerzése, aktiválása és elszámolás szabványosított egységes keretek között zajlik. Ennek segítésére jöttek létre a nemzetközi platformok, mint a TERRE, a MARI és a PICASSO, amelyek a határokon átnyúló kiegyenlítő energia és kapacitáspiacok megszületését jelentik. Magyarország egyre erősebben kapcsolódik ehhez az európai rendszerhez a MAVIR technikai fejlesztései, valamint a Kereskedelmi szabályzatok módosításai révén. A teljes csatlakozás még várat magára és számos feladat áll a magyar piac előtt mielőtt ez megtörténne. A jövőben a csatlakozás műszaki és piaci stabilitást fog eredményezni, ehhez azonban meg kell oldani az energiarendszerek egyre alacsonyabb tehetetlensége mellett a fenntartható és gazdaságos működését. Ezt lehetővé teszik részben új technológiák, mint akkumulátoros energiatárolók és fejlettebb vezérlések, részben további integráció az európai villamosenergia piacba, a nagyobb tartalékkínálat és kiegyenlítőpiac érdekében.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] *Üzemi Szabályzat M43. kiadása*. Budapest, 2025.

[2] GONG, YAO, CHEN, YANG és WANG: *Analysis of sub-synchronous interaction and damping characteristics of weak grid-connected high inertia energy storage synchronous condenser system*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 169, pp. 110801, 2025.

[3] *2007. évi LXXXVI. törvény a villamos energiáról*. 2007.

[4] HIRTH, MÜHLENPFORDT és BULKELEY: *The ENTSO-E Transparency Platform – A review of Europe's most ambitious electricity data platform*. Applied Energy, Vol. 225, pp. 1054–1067, 2018.

[5] BLAT BELMONTE, MOURATIDIS, FRANKE és RINDERKNECHT: *Developments in the cost of grid balancing services and the design of the European balancing market*. Energy Reports, Vol. 10, pp. 910–931, 2023.

[6] EUROPEAN COMMISSION: *Commission Regulation (EU) 2017/1485 of 2 August 2017 establishing a guideline on electricity transmission system operation*. 2017.

[7] EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL: *Directive 96/92/EC of the European Parliament and of the Council of 19 December 1996 concerning common rules for the internal market in electricity*. 1996.

[8] EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL: *Directive 2003/54/EC of the European Parliament and of the Council of 26 June 2003 concerning common rules for the internal market in electricity and repealing Directive 96/92/EC*. 2003.

[9] HUANG, ZHOU, JIA, CHEN, JING, RONG és RUAN: *Research on European cross-region balancing market settlement method under high proportion of renewable energy*. Energy Reports, Vol. 8, pp. 1125–1136, 2022.

[10] EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL: *Directive 2009/72/EC of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 concerning common rules for the internal market in electricity*. 2009.

[11] EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL: *Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity*. 2019.

[12] EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL: *Regulation (EU) 2019/943 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the internal market for electricity*. 2019.

[13] EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL: *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources*. 2018.

[14] EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL: *Directive (EU) 2018/2002 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 amending Directive 2012/27/EU on energy efficiency*. 2018.

[15] *2001. évi CX. törvény a villamos energiáról*. 2001.

[16] *Competition Issues in the Electricity Sector*. Budapest, Hungary, 2002.

[17] MAGYAR KÖZTÁRSASÁG: *2007. évi LXXXVI. törvény a villamos energiáról*. 2007.

[18] MÁDL: *The EU's Energy Policy From the Perspective of a Central-Eastern European Country: Hungary*. Studies Of The Central European Professors' Network, 2025.

[19] MAGYAR ENERGETIKAI ÉS KÖZMŰ-SZABÁLYOZÁSI HIVATAL (MEKH): *A magyar villamosenergia-rendszer Kereskedelmi Szabályzata*. Budapest, Hungary, 2025.

[20] *Annual Report 2019 – Market*. Brussels, 2020.
[21] *(EU) 2017/2195 bizottsági rendelet – villamosenergia-kiegyenlítésre vonatkozó irány-mutatás (Electricity Balancing Guideline)*. 2017.
[22] ENTSO-E (EUROPEAN NETWORK OF TRANSMISSION SYSTEM OPERATORS FOR ELECTRICITY): *Electricity Balancing in Europe*. Brussels, 2018.
[23] *History of Joint Procurement of Balancing Services by German TSOs*. 2023.
[24] PAIZS: *Incentive problems in the Hungarian energy-balancing mechanism*.
[25] UCTE (UNION FOR THE COORDINATION OF TRANSMISSION OF ELECTRICITY): *Operation Handbook – Policy 1: Load-Frequency Control*. 2009.

PRIMER ELEMEK TERHELÉSES ÉS RELAXÁCIÓS FESZÜLTSÉGTRANZIENS KÍSÉRLETEK EREDMÉNYE ÉS ELMÉLETI MAGYARÁZATA

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL ANALYSIS OF LOAD-INDUCED AND RELAXATION VOLTAGE TRANSIENTS IN PRIMARY BATTERIES

KOZSELY Gábor[1], MEDGYESI Gyula[2]

[1] Ph.D, egyetemi docens, gabor.kozsely2@uni-miskolc.hu
[2] tanszéki mérnök, gyula.medgyesi@uni-miskolc.hu
[1,2]Miskolci Egyetem, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

Kivonat: *A primer elemek tranziens feszültségválasza olyan gyors, másodperces időskálán lejátszódó folyamatokat tükröz, amelyek közvetlen információt hordoznak a cellák belső ellenállásáról, töltésátadási kinetikájáról és diffúziós korlátairól. Mindezek ellenére a szakirodalomban kevés figyelem jut ezeknek a részfolyamatoknak a részletes vizsgálatára, noha a terhelés hirtelen megváltoztatására adott válasz értékes diagnosztikai eszköz lehet. Munkánk célja egy olyan egységes kiértékelési módszer kidolgozása volt, amely a teljes feszültségidő-görbét képes szétválasztani diffúziós és kinetikai tartományokra, és a két folyamat külön elemzésével következtetni az elem belső állapotára. A diffúziós viselkedést az idő négyzetgyökének függvényében vizsgáltuk, míg a gyors átmeneti szakaszt két kinetikai komponenssel írtuk le. A terhelés megszüntetése utáni relaxáció külön elemzése tovább árnyalta a cellák belső folyamatainak értelmezését. Az eljárást eltérő minőségű elemekre alkalmazva jól láthatóvá váltak a normál és az anomális viselkedés közötti különbségek. Eredményeink azt mutatják, hogy a tranziens feszültségválasz részletes vizsgálata hatékony és gyors módszer lehet a primer elemek állapotának, minőségének és belső szerkezeti sajátosságainak feltárására.*

Kulcsszavak: *tranziens feszültségválasz, diffúziós folyamatok elemzése, primer elemek*

Abstract: *The transient voltage response of primary cells reflects fast electrochemical processes occurring on a timescale of seconds, providing direct insight into internal resistance, charge-transfer kinetics and diffusion-related limitations. Despite their diagnostic value, these short-timescale phenomena have received little attention in pap, where the focus typically remains on open-circuit voltage, discharge curves or long-term capacity measurements. In this work, we present a unified evaluation method capable of decomposing the full voltage–time response into its kinetic and diffusion-controlled components. The diffusive behavior is identified through the characteristic square-root-of-time dependence, whereas the rapid transient region is captured by two distinct kinetic contributions. Additional information is obtained from the relaxation process following current interruption, allowing a more complete assessment of the cell's internal state. Applying the method to both normal and anomalous cells reveal clear and systematic differences: well-behaving cells show consistent kinetic parameters and a stable diffusive regime, while anomalous samples exhibit irregularities in both domains. The results demonstrate that transient voltage analysis is a sensitive and efficient tool for evaluating the condition, quality and internal processes of primary batteries.*

Keywords: *transient voltage response, analysis of diffusion-controlled process, primary batteries*

1. BEVEZETÉS

Az elektrokémiai energiaátalakítás egyik legkorábbi és legfontosabb megnyilvánulása a galvánelem, amely egy olyan önműködő elektrokémiai rendszer, amelyben egy redoxireakció spontán lezajlása elektromos munkát végez. A galvánelem működésének megértéséhez három alapfogalmat kell tisztázni: oxidáció, redukció, és elektródpotenciál.

Az oxidáció során egy anyag elektronokat ad le, a redukció során elektronokat vesz fel. A két folyamat mindig párban jelenik meg: ami oxidálódik, az elektronokat szolgáltat, ami redukálódik, az elektronokat vesz fel. A két folyamat térben és időben való szétválasztása teszi lehetővé, hogy az elektronok ne közvetlenül, hanem egy külső vezetőn keresztül vándoroljanak. Ez adja a galvánelem elektromos kimenetét.

Az elektródpotenciál tulajdonképpen egy félcella az oxidációra vagy redukcióra való képességet jelenti. Standard körülmények között ezt a standard hidrogénelektródához viszonyítjuk. Az így kapott potenciálértékek alapján felírható, hogy két különböző anyagból készült elektródpár milyen feszültséget hoz létre. A cella elektromotoros erejét a két félcella standard potenciálkülönbsége adja, amelyt a felső indexben egy ⊖ jel jelöl; (1) egyenlet: [1; 2; 3]

$$\varepsilon^{\ominus} = \varepsilon^{\ominus}_{katód} - \varepsilon^{\ominus}_{anód} \tag{1}$$

Ha két különböző fém megfelelő elektrolitba merül, mindegyiknek egy sajátos elektródpotenciálja alakul ki, a kettő különbsége pedig meghatározza, hogy a cella milyen elektromotoros erővel képes elektronokat áthajtani a külső körön. A potenciálok koncentrációfüggését a (2) egyenlettel megadott Nernst-egyenlet írja le, amely megmutatja, hogy a cellafeszültség hogyan változik a reakciótermékek és kiinduló anyagok arányával. Ez különösen fontos primer elemeknél, ahol a rendszer zárt, nem visszatölthető, és a reakció előrehaladásával fokozatosan nő a belső ellenállás és a koncentrációgradiens. [1; 2; 3]

$$\varepsilon_{cella} = \varepsilon^{\ominus} + \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \frac{a_{ox}}{a_{red}} \tag{2}$$

A cellafeszültség értelmezésekor a cella üresjárási feszültségét (elektromotoros erejét) az ε jelöli, amely a katód és az anód közötti elektromos potenciálkülönbséget jelenti. A koncentráció- és aktivitásfüggés leírásakor az a Nernst-egyenletben szereplő a az aktivitást jelöli, amely híg oldatokban jól közelíthető koncentrációval. A félreakciókban szereplő z az elektronátadás számát, az F a Faraday-állandót, az R az egyetemes gázállandót, a T pedig a termodinamikai hőmérsékletet jelöli.

A primer elemek történeti fejlődése jól mutatja, hogyan változtak az energiatárolási igények és a technológiai lehetőségek. A legelső működő galvánelem, az 1800-ban feltalált Volta-oszlop volt. Ez réz és cink lemezek sorozata, amelyeket savas oldatba mártott papírlapokkal elválasztva biztosított egy folyamatos, de nem stabil feszültségforrást. A rétegek gyors polarizációja és hidrogénbuborékok kialakulása miatt azonban nem volt tartós és nem volt alkalmas gyakorlatias felhasználásra.

A Daniell-cella megjelenése 1836-ban hozta el az első valóban stabil galvánelemet. A cink és réz félcellák külön elektrolitokba merítve, sóhíddal összekötve működtek. A cink oxidációja és a rézionok redukciója jól elválasztva zajlik, a két térfél között nincsenek egymást zavaró mellékreakciók. A Daniell-elem ezért kis belső ellenállású, stabil és viszonylag állandó feszültségű rendszer. Standard körülmények között a cella nyitott körüli feszültsége körülbelül 1,10 V. A reakciókat a 3.(a-c) egyenlet adja meg: [1; 2; 3]

Anódreakció (oxidációs folyamat):	$\mathrm{Zn} \rightarrow \mathrm{Zn}^{2+} + 2\,\mathrm{e}^{-}$	(1.a)
Katódreakció (redukciós folyamat):	$\mathrm{Cu}^{2+} + 2\,\mathrm{e}^{-} \rightarrow \mathrm{Cu}$	(1.b)
Bruttó reakció (redoxi reakció):	$\mathrm{Zn} + \mathrm{Cu}^{2+} \rightarrow \mathrm{Zn}^{2+} + \mathrm{Cu}$	(1.c)

A Daniell-cella az elektrokémiai oktatás egyik legfontosabb referenciája maradt, mert egyszerű felépítése ellenére tisztán mutatja azokat a folyamatokat, amelyek a mai primer elemekben is meghatározók: az elektronátmenetet, az ionáramlást, a koncentrációváltozásokat és a diffúziós polarizációt. Jelen cikkben azért kerül később külön elemzésre, mert jól rávilágít arra, hogy az időtartományú tranziens módszer nemcsak modern, porózus elektródájú elemekre alkalmazható, hanem a klasszikus galvanikus rendszerekre is.

A 19. század második felében, pontosabban 1869-ben jelent meg a Leclanché-elem, amely a modern szárazcellák őse. A cink anód, a porózus mangándioxid katód és az ammónium-klorid

alapú elektrolit olyan kombinációt alkotott, amely egyszerű, olcsó és eléggé stabil volt ahhoz, hogy a háztartási felhasználásban elterjedjen. A modern Zn–MnO_2 elemek elektrokémiája a Leclanché-rendszer továbbfejlesztett változatán alapul. A cella anódja elemi cink, amely oxidáció során cinkionokat képez, miközben elektronokat ad le a külső áramkörnek. A katódpor mangán-dioxidja redukciós folyamatban vesz részt, amely a MnO_2 kristályszerkezet részleges átalakulásával jár együtt. A félreakciók az alábbi formában írhatók fel: [1; 2; 3]

Anódreakció (oxidáció):	$\mathrm{Zn} \rightarrow \mathrm{Zn}^{2+} + 2\,\mathrm{e}^{-}$	(2.a)
Katódreakció (redukció savas/Cl^- tartalmú környezetben):	$2\,\mathrm{MnO_2} + 2\,\mathrm{NH_4^+} + 2\,\mathrm{e}^{-} \rightarrow \mathrm{Mn_2O_3} + \mathrm{H_2O}$	(2.b)
Bruttó reakció (redoxireakció):	$\mathrm{Zn} + 2\,\mathrm{MnO_2} + 2\,\mathrm{NH_4^+} \rightarrow +\mathrm{Mn_2O_3} + \mathrm{H_2O} + \mathrm{Zn(NH_3)_2^{2+}}$	(2.c)

Ez a forma jól tükrözi, hogy a cink oldódása elektronokat szolgáltat a külső körnek, míg a mangán-dioxid redukciója a katódporban játszódik le. A cellafeszültség nagysága a két félcella standard potenciálkülönbségéből adódik, amely gyakorlati körülmények között 1,5 V körüli nyitott köri feszültséget eredményez. A modern 9 V-os elemek hat ilyen kis Zn–MnO_2 cellát tartalmaznak sorba kötve, így a teljes feszültségük közel 9 V.

A félreakciók ilyen formában való leírása jól illeszkedik a Daniell-cella korábban bemutatott elektrokémiájához, és egységes keretet ad a különböző primer cellák összehasonlításához. A két rendszer közötti analógia – oxidációs folyamat a fémes anódon és redukció a katódon – megkönnyíti a későbbi időtartományú tranziens válaszok értelmezését is.

A Zn–MnO_2 cellák működését befolyásoló fő folyamatok a cink oldódása, a MnO_2 redukciója, az ammóniumionok részvétele a töltésszállításban, valamint az elektrolit helyi koncentrációváltozásai. Ezek együttesen határozzák meg a belső ellenállást, a tölthető ionok rendelkezésre állását és a diffúziós polarizáció nagyságát, amelyek a terhelés alatti és terheléslevétel utáni feszültségtranziensekben markánsan megjelennek.

A primer elemek működésének alapja tehát az oxidációs és redukciós folyamatok potenciálkülönbsége, amelyet a koncentrációviszonyok, a belső ellenállás és a diffúziós folyamatok módosítanak. Ezek a jelenségek határozzák meg a cellák terhelés alatti és terheléslevétel utáni feszültségváltozását is. A jelen munka célja e tranziens időtartományú viselkedésének részletes elemzése, amelyhez először az alkalmazott elektrokémiai modelleket tekintjük át. A bevezetést követő fejezetekben bemutatjuk azokat a fizikai folyamatokat, amelyek a mérési eredmények értelmezésének alapjául szolgálnak.

2. A PRIMER ELEMEK TRANZIENS FESZÜLTSÉGVÁLASZÁNAK ELMÉLETI MODELLJE

A primer galvánelemek kapocsfeszültsége a terhelés hirtelen megváltozására sajátos időbeli lefutást mutat. A tranziens viselkedés több, fizikailag különálló folyamat eredője, amelyek eltérő időskálán érvényesülnek. A terhelés kapcsolását követően fennálló jelenségek közül az ohmos belső ellenállás hatása jelenik meg elsőként. Ezt követi a töltésátadási kinetika gyors, exponenciális relaxációja, majd a félvégtelen diffúziós tartomány lassú, idő négyzetgyökével arányos polarizációja. A következőkben ezeknek a jelenségeknek a matematikai levezetését adjuk meg, külön hangsúlyozva az érvényességi feltételeket.

2.1. Ohmos feszültségesés

A terhelés ráadásakor a cella kapocsfeszültsége azonnal megváltozik. Ennek nagysága a (3) egyenlettel adható meg

$$U_0 - U_T = R_{b0} \cdot I \tag{3}$$

Az U_0 jelöli az üresjárási feszültséget, U_T a terhelés alatti kapocsfeszültséget, az R_{b0} pedig a belső ellenállás pillanatnyi értékét a terhelés ráadásának pillanatában. Ez az ellenállás az elektród anyagának vezetési ellenállásából, az elektrolit ohmos ellenállásából és az elektród–elektrolit érintkezési ellenállásból tevődik össze [4; 5]. Az elektromos időállandó mikroszekundumos nagyságrendű, így ez a feszültségcsökkenés a mérési időskálán ugrásszerű.

2.2. Töltésátadási kinetika és kettősréteg relaxáció

A terhelés beindulásakor az elektród–elektrolit határfelületen kialakuló töltéssűrűség-változást a kettősréteg kapacitása (C_{dl}) határozza meg. A folyamat a töltésátadási ellenállással (R_{ct}) együtt elsőrendű relaxációt eredményez. A túlfeszültség időfüggését $\eta(t)$ jelöli, a folyamat differenciálegyenletét a (4) egyenlet adja meg:

$$C_{dl}\frac{d\eta}{dt} + \frac{\eta}{R_{ct}} = 0. \tag{4}$$

Ennek a megoldása exponenciális jellegű; (5) egyenlet:

$$\eta(t) = \eta_0 \cdot e^{\frac{t}{\tau}} \tag{5}$$

A τ időállandó a kettősréteg átrendeződésének és a töltésátadási folyamatok sebességének jellemzője, és (6) egyenlet alapján számítható [4; 5; 6; 7].

$$\tau = R_{ct} \cdot C_{dl} \tag{6}$$

Heterogén vagy porózus elektródokon – például a Zn–MnO_2 cellák mangán-dioxid katódján több, egymástól független kinetikai tartomány lehet jelen. Ilyenkor a relaxáció két exponenciális tag összegeként írható fel [7]:

$$\eta(t) = \eta_1 \cdot e^{\frac{t}{\tau_1}} + \eta_2 \cdot e^{\frac{t}{\tau_2}} \tag{7}$$

2.3. Félvégtelen térben végbemenő diffúzió által irányított folyamat időfüggése

A terhelés hatására megváltozik az elektródfelület közelében a reaktáns koncentrációja. A tömbbeli (bulk) koncentráció értékét C_0, a terhelés hatására kialakuló felületi koncentrációt C_s, az ion diffúziós együtthatóját pedig D jelöli. Az ioneloszlás időbeli alakulását a félvégtelen tartományra felírt Fick második törvénye írja le, (8) egyenlet formájában: [8; 9]

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \tag{8}$$

A terhelés pillanatában a felületi koncentráció C_0-ról C_s értékre ugrik. A kezdeti és peremfeltételeket a (9.a) és (9.b) egyenletek adják meg [8; 9]:

Kezdeti feltétel: $C(x;\ 0) = C_0$ (9.a)

Peremfeltétel: $C(0;\ t) = C_S$ (9.b)

Ennek a problémának a megoldás hibafüggvényes alakban írható fel; (10) egyenlet [8; 9]

$$C(x;\ t) = C_0 + (C_0 - C_S) \cdot erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}\right) \tag{10}$$

A felületi koncentrációgradienst a (10) egyenlet távolság szerinti deriválásával az x = 0 helyen, (11) egyenlet:

$$\left.\frac{\partial C(x;\ t)}{\partial x}\right|_{x=0} = \frac{C_0 - C_S}{\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \tag{11}$$

A felület felé irányuló moláris fluxus értékét pedig a (12) egyenlet adja:

$$N(t) = -D \cdot \left.\frac{\partial C(x;\ t)}{\partial x}\right|_{x=0} = (C_S - C_0) \cdot \sqrt{\frac{D}{\pi}} \cdot t^{-\frac{1}{2}} \tag{12}$$

A fluxus az anyagáramlás sűrűségét fejezi ki. Az áramsűrűség j(t) a Faraday-törvény alapján számítható ki. A reakcióban z elektron vesz részt, az egy molnyi töltés pedig F = 96 485 A·s értékű. A töltésáram sűrűsége ezért a (13) egyenlettel számolható:

$$j(t) = z \cdot F \cdot N(t) = z \cdot F \cdot (C_S - C_0) \cdot \sqrt{\frac{D}{\pi}} \cdot t^{-\frac{1}{2}} \tag{13}$$

Az idő gyökétől való arányos összefüggés a félvégtelen diffúzió egyik legfontosabb jellemzője. A felület koncentrációja a diffúziós fluxus integrálásával adható meg, amelyből adódik egy úgynevezett Warburg-típusú fluxus amplitúdója (j_0). és ez alapján kiszámítható a felületi koncentrációváltozás; (14) egyenlet:

$$\Delta C = C_S(t) - C_0 = \frac{2 \cdot j_0}{z \cdot F \cdot \sqrt{\pi \cdot D}} \cdot \sqrt{t} \tag{14}$$

A félcellapotenciál időfüggése a Nernst-egyenlet elsőrendű közelítésével adódik; (15) egyenlet:

$$E(t) = E_0 - \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \frac{\Delta C}{C_0} \tag{15}$$

A (14) egyenletet behelyettesítve a (15) egyenletbe, megkapjuk a (16) egyenlet által megadott kapocsfeszültség időfüggését:

$$U(t) = U_0 - \underbrace{2 \cdot \frac{R \cdot T}{(z \cdot F)^2 \cdot \sqrt{\pi \cdot D}} \cdot \frac{j_0}{C_0}}_{=B} \cdot \sqrt{t} \tag{16}$$

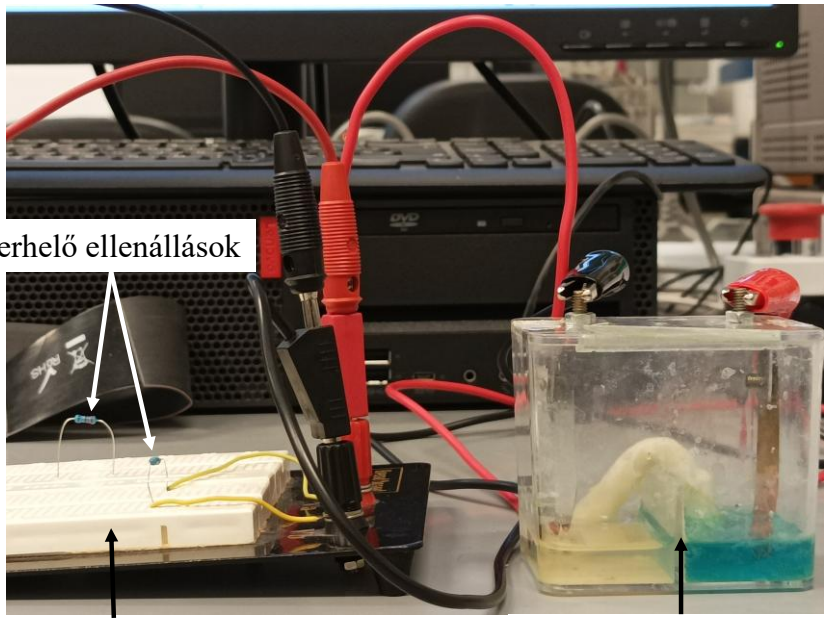
Ez az összefüggés mutatja meg, hogy elméleti alapon mérési adatokra az idő négyzetgyökének értéket kell illeszteni. Természetes ennek az összefüggésnek is vannak korlátjai, amely a matematikai modell készítése során alkalmazott közelítésekből és elhanyagolásokból adódnak. Más szavakkal, az időfüggés csak korlátozott időtartományban használható. A modell alkalmazhatóságának feltétele, hogy

- a diffúziós réteg vastagsága lényegesen kisebb legyen a cella geometriai méreténél,
- a koncentrációváltozás kicsi legyen (a Nernst-egyenlet lineralizálható maradjon),
- az elektrolit ne tartalmazzon konvenciós vagy keveredési jelenségeket,
- a felületi koncentrációlépcső kialakulása gyorsabb legyen, mint a diffúziós időállandó.

Nagyon kis időkben a kettősréteg-folyamat hatása dominál, nagy időkben pedig a félvvégtelen tartomány feltétele sérül, ezért a diffúziós-modell ezekben a tartományokban nem érvényes.

3. MÉRÉSEK KIÉRTÉKELÉSE

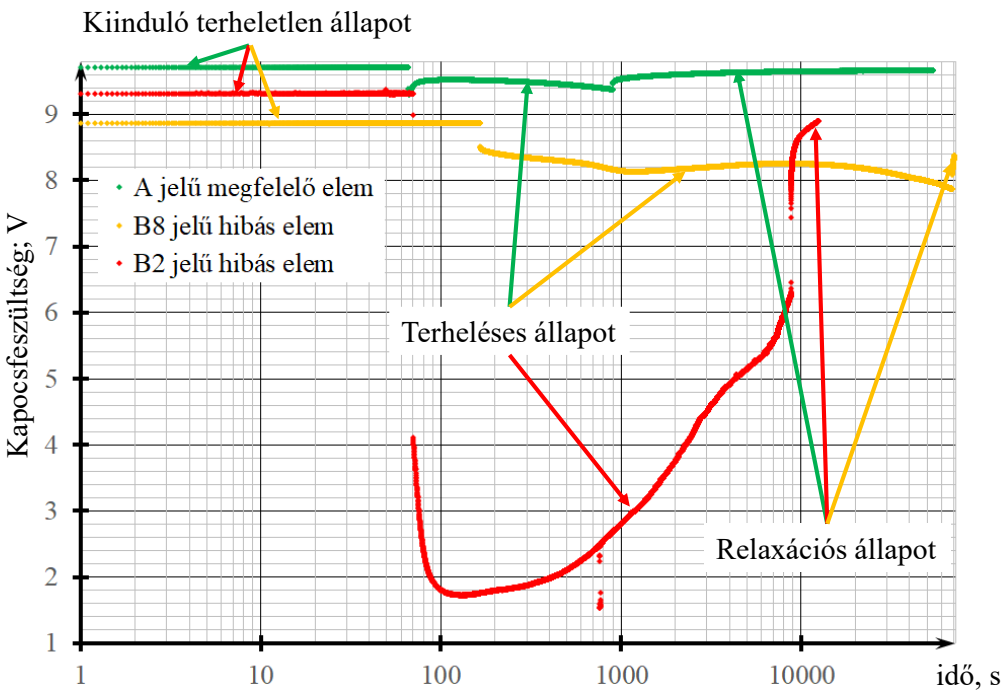
A mérés összeállítását az 1. ábrán mutatjuk be, amelynek. központi része a vizsgált elektrokémiai cella. Az ábrán egy Daniell elem látható, amely szintén a vizsgálataink tárgyát képezte. Az ebben lejátszódó elektrokémiai folyamatok képezik a vizsgálataink tárgyát. A cellát különböző ellenállásokkal (470Ω, 2,2kΩ, 4,7kΩ) terhelve, mérjük az azokon lévő feszültségesést, illetve a terhelés után az üresjárási feszültséget, az idő függvényében. A mérőrendszer és a mérőprogram részletes leírását az előző cikkükben ismertettük.



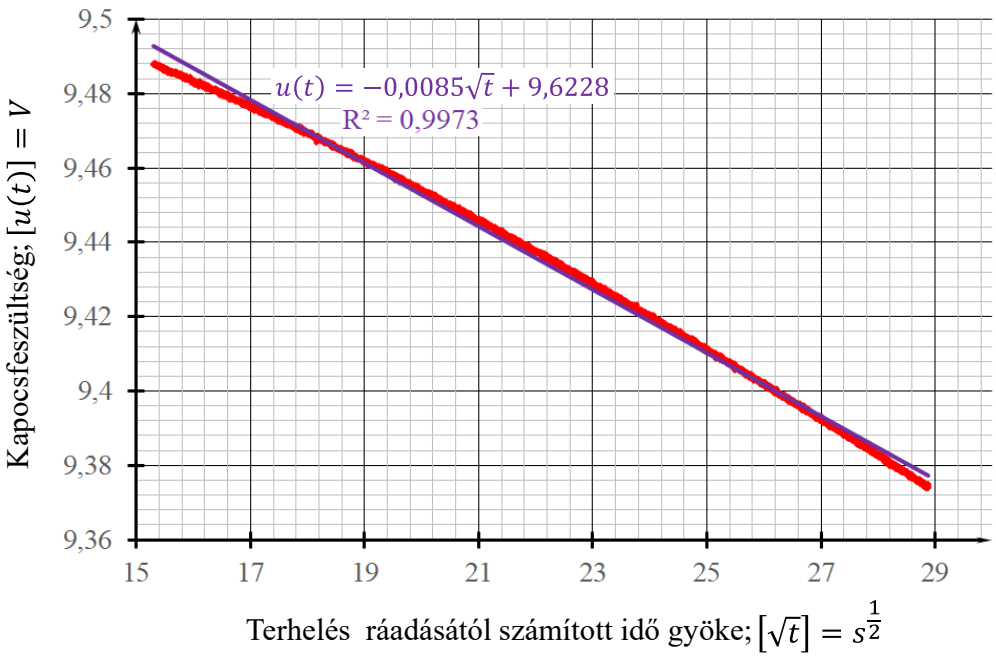
1. ábra: *A mérési összeállítás*
[saját felvétel]

A mért feszültség-idő görbéket minden vizsgált elemnél egységes eljárással értékeltük ki, amelynek lényegét ebben a fejezetben mutatjuk be. Egy megfelelő és két hibás elem felvett diagramját az 2. ábra szemlélteti.

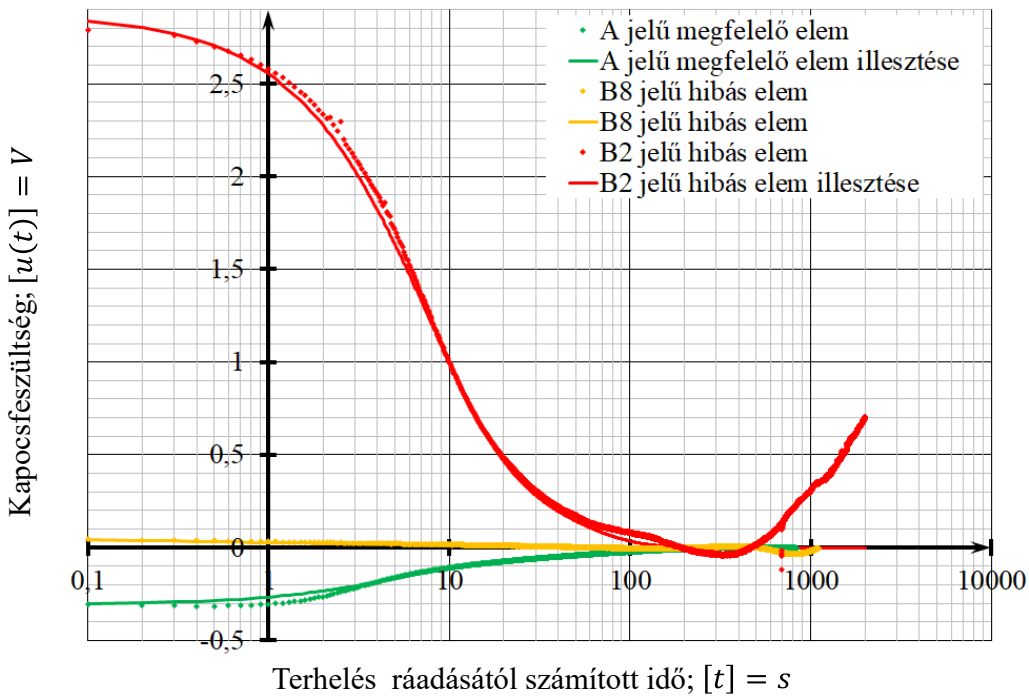
A feldolgozás első lépése a mérési időskála egységesítése volt: minden görbén kijelöltük azt az időpontot, amikor a terhelést ráadtuk az elemre. Ezt a pontot tekintettük a továbbiakban a relatív időskála kezdőértékének, így a különböző mérések összehasonlíthatóvá váltak.



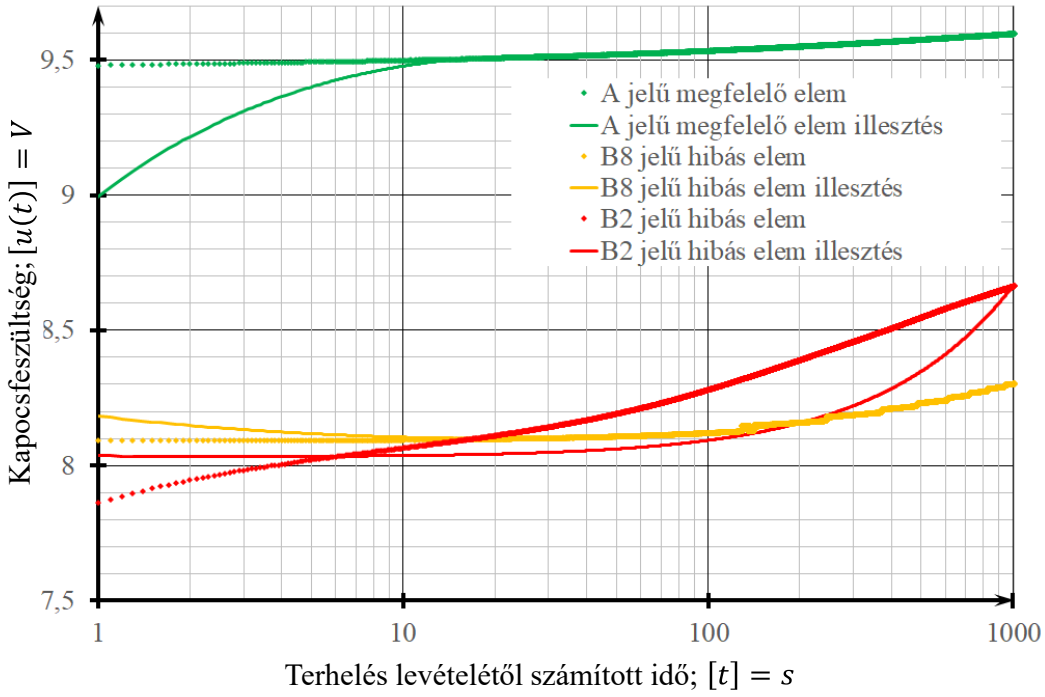
2. ábra: *A megfelelően működő és a hibás elemek feszültség-idő görbéje [saját kutatás]*



3. ábra: *A diffúziós szakaszra illesztett feszültség-négyzetgyök idő egyenese [saját kutatás]*



4. ábra: *A maradék görbék időfüggése*
[saját kutatás]



5. ábra: *A relaxációs görbék*
[saját kutatás]

A terhelés ráadását követő időtartományon először a diffúziós jellegű tartományt azonosítottuk. Ehhez a feszültségidő-görbét az idő négyzetgyökének függvényében ábrázoltuk, és kiválasztottuk azt a szakaszt, ahol a pontok közel lineáris viselkedést mutattak. Ez mutatja be a

3. ábra. Ez a tartomány egyértelműen megfelelt a hosszabb időskálán érvényesülő, diffúzió által meghatározott folyamatnak. A lineáris trend alapján meghatároztuk a diffúziós modell paramétereit, majd ezt a modellt kivontuk a teljes feszültség-idő görbéből. Az így kapott maradékgörbe kizárólag a gyorsabb, nem-diffúziós folyamatokat tartalmazta.

Az illesztett diffúziós görbét kivonva a mérési adatokból, a maradékgörbe kezdeti szakasza tisztán exponenciális jellegűnek tűnik. Ezt a tartományt két exponenciális összetevővel írtuk le, és a modell paramétereit közvetlenül erre a maradékjelre illesztettük. Az illesztés minden elemnél ugyanazzal az eljárással történt, így az egyes cellák kinetikai viselkedése közvetlenül összehasonlíthatóvá vált. Az exponenciális tartomány elkülönítését és a diffúziós rész levonásának helyességét az 4. ábra áttekinthetően mutatja.

A feldolgozást a terhelés megszüntetését követően rögzített relaxációs görbékre is kiterjesztettük. A relaxáció a diffúziós visszarendeződés jellegzetes időfüggését mutatta, amelyet az idő reciprok négyzetgyökének függvényében ábrázolva vizsgáltunk. A lineáris szakasz alapján meghatározhatóvá vált az a paraméter, amely a diffúziós visszarendeződés ütemét jellemzi. A relaxációs szakaszra vonatkozó görbéket az 5. ábra mutatja.

A módszer egészét úgy alakítottuk ki, hogy a feszültség-idő görbék három egymástól jól elkülönülő részfolyamatként legyenek értelmezhetők: a gyors exponenciális kinetikai szakaszként, a lassabb diffúziós tartományként, valamint a terhelés megszűnése utáni relaxációként. A feldolgozás egységes kerete biztosította, hogy a különböző elemekből számított paraméterek közvetlenül összevethetők legyenek, és a mért görbék valódi különbségei egyértelműen értelmezhetők maradjanak.

5. EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

A primer elemek terhelésre adott időbeli feszültségválasza olyan fizikai folyamatok eredőjeként jelenik meg, amelyek különböző időskálán játszódnak le. Ezeket a jelenségeket matematikai modellekkel lehet leírni, amelyek egyszerű alakban összefoglalják az ohmos, kinetikai és diffúziós hozzájárulásokat. Az így kapott összefüggések alkalmasak a mérési eredmények kvantitatív értelmezésére és a cellák állapotának összehasonlítására, függetlenül attól, hogy a rendszer klasszikus elektrokémiai felépítésű, mint a Daniell-cella, vagy porózus katódú Zn–MnO_2 elem.

Az elemek terhelésre adott tranziens feszültségválaszát két egymást követő, jól elkülöníthető matematikai modellel írtuk le, amelyek a mérési eredmények alapján együttesen határozzák meg a teljes feszültség-idő görbe alakját.

A hosszabb időskálán jelentkező lassú feszültségesésre a félvvégtelen diffúzió időfüggése adott jó közelítést; (17) egyenlet:

$$U_{\text{diff}}(t) = U_{0T} - B\sqrt{t} \tag{17}$$

Ez a modell a lineáris regresszióval lett meghatározva, amely minden vizsgált elemen stabil, fizikailag értelmezhető paramétereket adott.

A diffúziós komponens levonása után fennmaradó, rövid idejű feszültségváltozásra egy kettős exponenciális függvény adott jó illeszkedést; (18) egyenlet:

$$U_{\text{kin}}(t) = A_1 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} + A_2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}}, \tag{18}$$

A kettős exponenciális modell minden normál működésű elemnél jól illeszkedett a maradékgörbére, míg az anomális elemeknél az illesztés nem volt stabil. Ez a modellérzékenység önmagában is diagnosztikai jelentőségű.

A terhelés alatti teljes feszültségválasz a két részfolyamat szuperpozíciójaként írható le; (19) egyenlet:

$$U(t) = U_0 - B\sqrt{t} + A_1 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} + A_2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \tag{19}$$

Hasonlóképpen írható le a relaxáció folyamata is. Ebben az esetben egy a diffúziós kiegyenlítődés (ion/proton eloszlás a porózus MnO_2-ben és az elektrolitban) mellett lassú üresjárási feszültég változást is belevettünk a modellben, ami a valódi egyensúlyi feszültség kis mértékű változását képviseli a relaxáció során a koncentráció- és fázisállapot-változás miatt. Ezt fejezi ki a (20) egyenlet:

$$U(t) = U_{0R} + a \cdot t + A \cdot e^{-t/\tau} + \frac{K}{\sqrt{t}} \tag{20}$$

5.1 Zn–MnO_2 elem

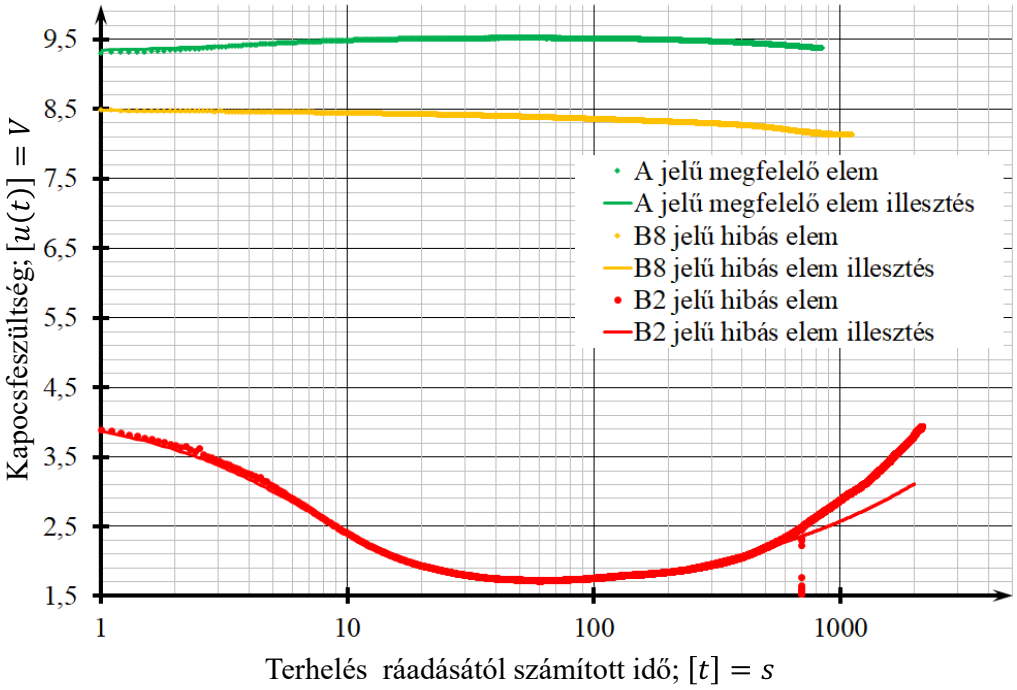
A fenti egyenletek paramétereinek megnevezését, az illesztett értékeket és dimenzióját az 1. táblázat tartalmazza. A mért adatokra történtő illesztett görbéket a 6. és 7. ábra szemlélteti. Az illesztés jóságát jellemző determinációs együttható, (R^2) 0,99-nél nagyobb volt, kivétel a B8 jelű hibás elemnél, ahol gondos kiértékelés esetén is 0,94-0,95 körüli érdekek adódtak.

1. táblázat: *A mérési adatokra illesztett kinetikai görbék paraméterei*

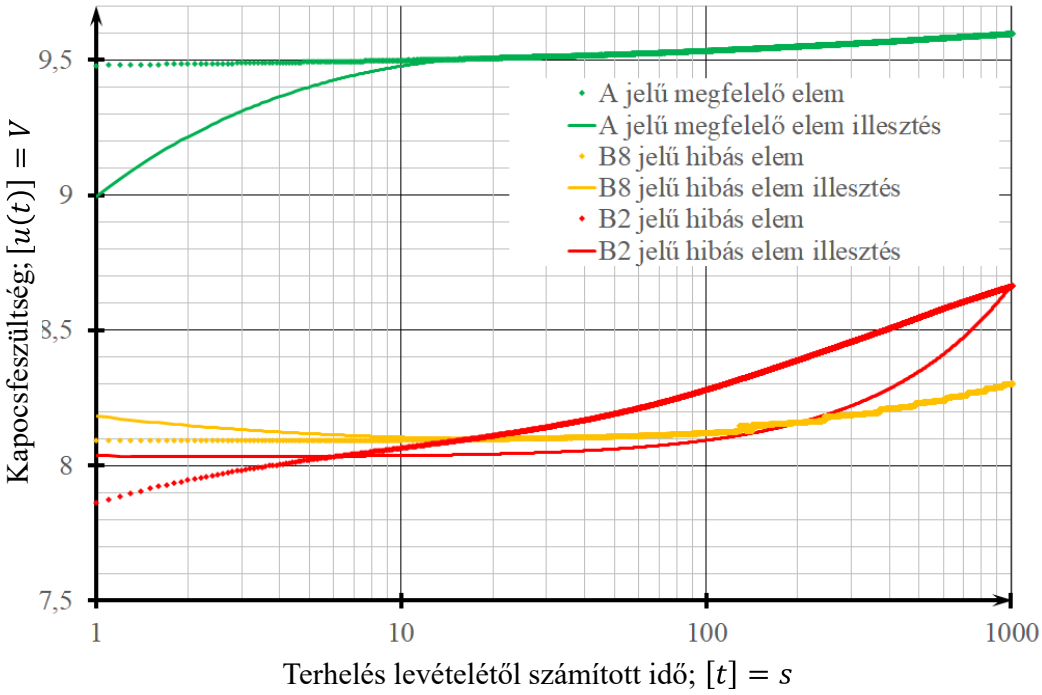
Vizsgálat típusa	Együtthatók:		A jelű megfelelő elem	B8 jelű hibás elem	B2 jelű hibás elem	Mértékegység
TERHELÉSES VIZSGÁLAT	Diffúziós modell kezdőfeszültsége	U_{0T}	9,6228	8,46	1,27	V
	Diffúziós tag együtthatója	B	-0,0085	-0,00978	0,0412	$V \cdot s^{-\frac{1}{2}}$
	Első preexponenciális tényező	A_1	-0,21	0,02	2,29	V
	Első időállandó:	τ_1	5,00	0,57	7,1	s
	Második preexponenciális tényező	A_2	-0,096	0,024	0,58	V
	Második időállandó:	τ_2	64,24	22,4	35,6	s
TERHELETLEN VIZSGÁLAT	Diffúziós modell kezdőfeszültsége	U_{0R}	9,6012	8,209	8,034	V
	Lineáris tag együtthatója:	a	$1{,}73 \cdot 10^{-5}$	$9{,}2 \cdot 10^{-5}$	$6{,}3 \cdot 10^{-4}$	$V \cdot s^{-1}$
	Diffúziós tag együtthatója	K	-0,775	0,123	0,0076	$V \cdot s^{\frac{1}{2}}$
	Preexponenciális tényező	A	0,175	-0,149	-0,0067	
	Időállandó:	τ	26,74	316	316	

A 1.táblázat paramétereiből és az 6. és 7. ábrában látható görbék lefutása alapján jól látható, hogy hibás B8 jelű elemelem egyensúlyi üresjárási feszültsége kisebb gyakorlatilag mélyebben kisütött állapotban van. A diffúziós tagja meredekség (B) nagyobb, vagyis ugyanannyi idő alatt

nagyobb feszültségesést okoz a koncentrációgradiens erősebb a diffúziós polarizáció, „nehéz-kesebb” anyagtranszport. Ez azt jelenti, hogy részben már elhasznált, vagy rosszabb szerkezetű, azaz kevesebb az aktív MnO_2, kisebb az aktív felület, rosszabb a nedvesítés stb. Ennek következménye a később kialakuló, erősebb koncentrációgradiens A paraméterek is alátámasztják a tapasztalatainkat, hogy ez egy rosszabb minőségű elem.



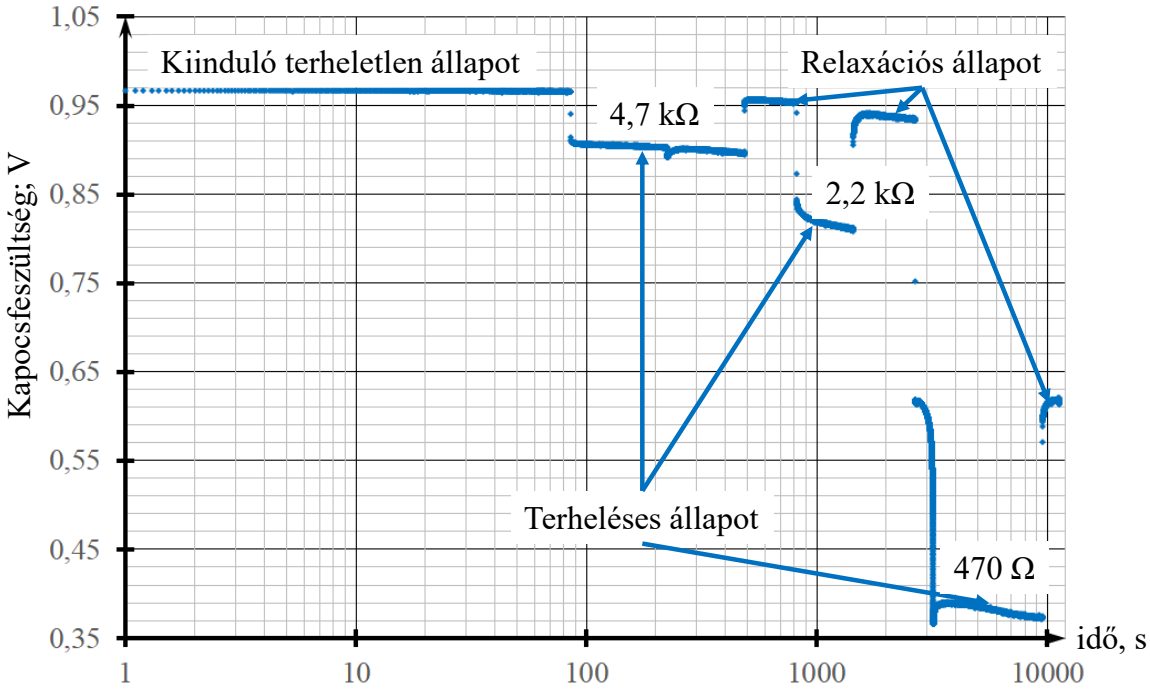
6. ábra: *A kapocsfeszültség tranziensei 2,2 kΩ terhelés esetén [saját kutatás]*



7. ábra: *A kapocsfeszültség tranziensei terhelés levétele után [saját kutatás]*

5.2 Daniell elem

A további kutatások egyik irányát a saját építésű primer és szekunder elemek vizsgálata képezi. Ennek az előkísérlete az 1. ábrán bemutatott saját építésű Daniell elem vizsgálata. Ekkor egymás után különböző ellenállásokkal (4,7 kΩ, 2,2 kΩ, és 470 Ω) terheltük meg az elektrokémiai cellát. Ennek a vizsgálatnak a kapocsfeszültség – idő görbéjét a 8. ábrán mutatjuk be.



8. ábra: *Daniell elem vizsgálata különböző terhelésekkel.*
[saját kutatás]

A terhelés ráadásának időpillanatában a terhelési előtti feszültség (U_0) és terhelés ráadásakor mért feszültség (U_T) valamint az ismert terhelő ellenállás értékéből (R_T) a (21) egyenlet alapján:

$$R_b = \left(\frac{U_0}{U_T} - 1\right) \cdot R_T \tag{21}$$

Hasonlóképpen számolható a terhelés levételének időpillanatában is belső ellenállás. A számítás eredményeit a 2. és 3. táblázatban mutatjuk be. táblázat mutatjuk be.

2. táblázat: *A terhelés ráadásakor számolt elektrokémia cella belső ellenállása*

Terhelő ellenállás	Feszültség; V		Számolt belső ellenállás
	terhelés előtt	terhelés után	
4.7 kΩ	0.96650	0.90544	317 Ω
2.2 kΩ	0.95346	0.83196	321 Ω
470 Ω	0.93448	0.61495	244 Ω

3. táblázat: *A terhelés levételekor számolt elektrokémia cella belső ellenállása*

Terhelő ellenállás	Feszültség; V		Számolt belső ellenállás
	terhelés alatt	terhelés levétele után	
4.7 kΩ	0.89649	0.95353	299 Ω
2.2 kΩ	0.81061	0.91277	277 Ω
470 Ω	0.37308	0.59329	277 Ω

A Daniell-elem belső ellenállása a terhelési feltételektől és a cella töltöttségi állapotától függően 240–320 Ω tartományban változott. A terhelés ráadása és levétele során kapott értékek egymással konzisztensnek bizonyultak, ami egy időben és áramterheléstől függően változó, jelentős ohmos komponens jelenlétére utal.

A kinetikai paraméterek meghatározására vonatkozó számítások nem adtak konzisztens eredményt ebben az esetben. További mérések szükségesek ezek egzakt meghatározásához.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgált primer Zn–MnO_2 elemek tranziens viselkedését egységes módszertannal elméleti alapon értékeltük ki Ez lehetővé tette az egyes részfolyamatok — a gyors kinetikai átmenetek, a diffúzió szabályozta szakasz és a terhelés megszüntetését követő relaxáció — elkülönítését és számszerű jellemzését. A kiértékelés alapját minden elem esetében az a relatív időskála adta, amelyben a terhelés tényleges ráadásának pillanatát tekintettük t = 0-nak; ez biztosította az eltérő mérési sorozatok összevethetőségét.

A terhelés alatti feszültséggörbéken elsőként a diffúziós tartományt azonosítottuk, amely a feszültség és az idő négyzetgyökének összefüggésében jól felismerhető lineáris viselkedést mutatott. E tartományból határoztuk meg a diffúziós paramétert, amely minden elemnél azonos eljárással került kiszámításra. A diffúziós rész levonása után a görbék kezdeti szakasza tisztán kinetikai jellegűvé vált, és ezekre a maradékgörbékre illesztettük a két exponenciális komponensből álló gyors átmeneti modellt. Ez a megközelítés szétválasztotta az azonnali felületi folyamatokat a diffúziótól, és lehetővé tette a különböző elemek kinetikai válaszának összehasonlítását.

A terhelés megszüntetését követő relaxációs görbéket külön értékeltük. Ezek időfüggése a diffúziós visszarendeződés jól ismert mintázatát követte, és a négyzetgyök reciprokának függvényében kapott lineáris összefüggés alapján határoztuk meg a relaxáció karakterisztikus paraméterét (K). A relaxáció és a terhelés alatti diffúziós tartomány közötti összhang jó minőségű elemeknél egyértelműen megjelent, míg az anomális cellák esetében ezek a kapcsolatok nem konzisztensek.

Bár mindkét vizsgált 9 V-os „heavy duty” elem új, szavatossági időn belüli volt és terhelés nélküli feszültsége a névleges tartományba esett, a terhelés alatti viselkedésük jelentősen eltért. A GP Supercell márkájú minta stabil kisütési feszültséget mutatott, míg a Hi-Watt márkájú („piros”) elem ugyanazon, mérsékelten kis terhelésre (2,2 kΩ) olyan feszültségesést produkált, amely egy részben már kimerült cellának felelne meg. Időtartománybeli modellünk szerint ez elsősorban az alacsonyabb egyensúlyi üresjárási feszültségből és a lényegesen nagyobb diffúziós meredekségből (B) adódik, ami fokozott diffúziós polarizációra és megnövekedett belső ellenállásra utal a porózus MnO_2 katód és/vagy az elektrolit oldalán. A terheléslevétel utáni relaxáció szintén jóval laposabb és diffúzió által szabályozott képet mutat, ami összhangban van egy elektrokémiailag gyengébb, de nyitott körben még „látszólag egészséges” cella képével.

A módszer egyértelműen feltárta a normál és az anomális elemek közötti különbségeket. A jó minőségű cellák tranziens válasza jól illeszkedett az alkalmazott modellhez: az exponenciális és diffúziós szakaszok jól elkülönültek, az illesztések paraméterei kis szórást mutattak, és a relaxáció viselkedése is összhangban állt a terhelési tartomány adataival. Az anomális elemek ezzel szemben rendezetlen kinézetű kinetikai szakaszt, torzult vagy beszűkült diffúziós régiót és kevésbé következetes relaxációt mutattak; ezek együttesen jelezték, hogy a modell feltételei csak korlátozottan teljesülnek, és a paraméterek stabil meghatározása nem minden esetben volt lehetséges.

Összességében a tranziens feszültségidő-görbék elemzése hatékony eszköznek bizonyult a primer elemek minőségének megítélésére. A módszer reprodukálható, az eredmények információt hordoznak a belső folyamatok állapotáról, és jól elkülönítik a normál működésű cellákat az anomális viselkedésűektől.

7. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] NEWMAN, J., THOMAS-ALYEA, K.: Electrochemical Systems, Wiley &Sons 2004.

[2] INZELT GY.: Az elektrokémia korszerű elmélete és módszerei I-II. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1999.

[3] BERECZ E.: Fizikai kémia. Tankönyvkiadó, Budapest 1991.

[4] RANDLES, J.E.B.: Kinetics of Rapid Electrode Reactions. Discuss. Faraday Soc. 1947

[5] DE LEVIE, R.: On porous electrodes in electrolyte solutions: I. Capacitance effects Electrochimica Acta, 1963, Vol. 8, pp. 751-780.

[6] Qu D.: The study of the proton diffusion process in the porous MnO2 electrode. Electrochimica Acta 49 (2004) pp 657–665

[7] van Soestbergen M.: Diffuse-charge effects on the transient response of electrochemical cells. Phys. Rev E 81, 021503 2010

[8] SIMONYI K.: Elektronfizika Tankönyvkiadó, Budapest, 1981

[9] GIBER J et al: Diffúzió és implantáció szilárdtestekben (A technológia alapjai I.) Műegyetemi kiadó, Budapest 1997

MÉRÉSTECHNIKAI MÓDSZER PRIMER ELEMEK TERHELÉSI ÉS RELAXÁCIÓS FESZÜLTSÉGTRANZIENSÉNEK VIZSGÁLATÁHOZ

MEASUREMENT METHODOLOGY FOR LOAD AND RELAXATION TRANSIENT ANALYSIS OF PRIMARY ELECTROCHEMICAL CELLS

MEDGYESI Gyula[1], KOZSELY Gábor[2]

[1]tanszéki mérnök, gyula.medgyesi@uni-miskolc.hu
[2]Ph.D, egyetemi docens, gabor.kozsely2@uni-miskolc.hu
[1,2]Miskolci Egyetem, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék,

Kivonat: *Jelen munka célja egy olyan mérési és adatgyűjtési módszertan bemutatása, amely nagy időfelbontással teszi lehetővé különböző primer elemek – többek között kereskedelmi 9 V-os Zn–MnO_2 cellák és egy laboratóriumban készített Daniell-elem – terhelésráadáskor és terheléslevételkor jelentkező feszültségtranziensének vizsgálatát. A mérőrendszer egy National Instruments DAQMx kártyára épül, amely folyamatos mintavételezést, stabil ellenállásterhelést és hosszú idejű adatgyűjtést tesz lehetővé. A cikk ismerteti a mérőprogram felépítését, a mintavételezés időzítését és a hosszú mérési sorozatok során alkalmazott adattárolási megoldásokat. Az így előállított adatsorok alkalmasak a primer elemek diffúziós és kinetikai folyamatainak időtartományú elemzésére, amelyet a kutatás második, külön cikkben bemutatott része tárgyalja.*

Kulcsszavak: *primer galvánelemek, feszültségtranziens, mérőrendszer, DAQMx, LabView, időtartományú diagnosztika*

Abstract*. This paper presents a measurement and data-acquisition methodology designed for high-resolution transient analysis of various primary cells, including commercial 9 V Zn–MnO_2 batteries and a laboratory-made Daniell cell. The measurement setup is based on a National Instruments DAQMx card capable of continuous sampling, stable resistive loading, and long-duration data logging. The paper describes the structure of the measurement program, the timing of the sampling process, and the data-handling techniques applied during extended experiments. The resulting datasets provide a reliable foundation for time-domain analysis of diffusive and kinetic processes in primary electrochemical cells, which will be addressed in detail in the second, separate part of this study.*

Keywords: *primary cells, transient response, DAQMx system, LabView, time-domain diagnostics*

1 BEVEZETÉS

Az elsődleges elemek a mindennapi műszaki gyakorlatban széles körben alkalmazott primer energiaforrások, azonban az irodalom döntő része csak az üresjárási feszültséget, a kapacitást vagy különböző terhelési görbéket vizsgálja. A terhelés hirtelen megváltoztatására adott, másodpercekben mérhető tranziens feszültségválaszok elemzése ezzel szemben nagyrészt hiányzik, jóllehet ezek a jelenségek közvetlen információt hordoznak az elem belső ellenállásáról, töltésátmeneti kinetikájáról és diffúziós korlátairól [1 – 4].

A tranziens mérések elvégzéséhez olyan mérőrendszerre van szükség, amely nagy időfelbontással, stabilan és hosszú időn keresztül képes rögzíteni a kapocsfeszültséget. Az általánosan alkalmazott kézi multiméteres mérés nem alkalmas erre a célra, mivel a Zn–MnO_2 cellák feszültsége a terhelés felvételét követően folyamatosan változik, így a belső ellenállás és a kinetikai folyamatok időfüggése csak folyamatos mintavételezés mellett vizsgálható.

A jelen cikkben bemutatott mérési elrendezés és adatgyűjtési módszertan egy National Instruments PCI-6351 típusú mérőkártyára épül, amely folyamatos mintavételezéssel és dinamikus adatmentéssel támogatja a több órás mérések megbízható végrehajtását. A cikk részletezi a választott hardver paramétereit, a LabView-ban megvalósított mérőprogram felépítését, a különböző adatmentési eljárásokat, valamint azokat a problémákat, amelyek a hosszabb mérések során előfordultak.

Az elemek belső ellenállásának vizsgálatához olyan mérést kellett elvégezni, amely során egy ismert ellenállás értékű terhelést helyezünk az elem kapcsaira. A terhelésen ekkor mérhető feszültség az elem kapocsfeszültsége. Ha az elemet egy ideális feszültséggenerátorral és egy azzal sorosan kapcsolt ellenállással modellezzük, ami az elem belső ellenállását reprezentálja. Ekkor meghatározható az elem belső ellenállása az üresjárási feszültség, kapocsfeszültség, és terhelő ellenállás ismeretében. Ezen értékek közül az általunk meghatározott terhelő ellenállás értéke időben konstans, a kapocsfeszültség pillanatnyi értéke kézi multiméterrel is mérhető. Ez a mérési metódus viszont nem alkalmas a belső ellenállás meghatározására, mivel konstans terhelés hatására is az elem feszültsége folyamatosan változik. Emiatt olyan mérésre lenne szükség, amely során folyamatosan mérjük az elem kapocsfeszültségét és az adatokat el is tudjuk menteni. Az ehhez az ideális méréshez legközelebb álló módszer egy állandó mintavételezési frekvenciával végzett mérés, ahol egyenletes időközönként megmérjük az elemek pillanatnyi kapocsfeszültségét.

A vizsgálat tárgyát képező elemek az 1. ábrán láthatók. Az 1-15-ig sorszámozott elemek a hibások, az A és B-vel jelöltek pedig ugyanolyan típusú, más gyártó által forgalmazott megfelelően működő elemek. az utóbbiak szolgáltak referenciaként a vizsgálathoz.

1. ábra: *A mérés tárgyát képző elemek*

Az itt ismertetett méréstechnika olyan adatsorokat eredményez, amelyek lehetővé teszik a különböző elemek terhelés alatti és terheléslevétel utáni tranziens viselkedésének időtartománybeli modellezését. Az időbeli feszültségváltozások diffúziós és kinetikai eredetű komponenseinek pontos vizsgálatát a kutatás második, különálló cikke végzi el. A jelen tanulmány tehát egyrészt egy reprodukálható és oktatási-kutatási környezetben is könnyen alkalmazható mérési megoldást mutat be, másrészt megalapozza az elektrokémiai folyamatok későbbi, részletes értelmezését.

2. MÉRŐRENDSZER HARDVERE

A tranziens kapocsfeszültségválasz vizsgálatához olyan mérőrendszert kellett kialakítani, amely képes a primer cellák feszültségét nagy időfelbontással és hosszú időtartamon keresztül stabilan rögzíteni. Ilyen a National Instruments PCI-6351 típusú adatkártya, amely 16 bites felbontású. Munkánk során 10 Hz-es mintavételi frekvenciát alkalmaztunk, amely elegendő felbontást biztosít a terhelésváltás utáni gyors feszültségváltozások követéséhez, ugyanakkor stabil és erőforráskímélő adatgyűjtést tesz lehetővé több órás mérési sorozatok esetén.

A rendszer központi eleme egy a National Instruments DAQMx PCI-6351 mérőkártya,

amely többcsatornás analóg bemenetekkel rendelkezik, és folyamatos mintavételezést tesz lehetővé akár több száz kilohertzes frekvenciáig. Ezeknek az analóg bemeneteknek a méréshatárai ±100mV, ±200mV, ±500mV,±1V, ±2V ±5V és ±10V. Jelen esetben a legegyszerűbben használható beállítás a ±10V volt, de egy -4,5V-os külső DC offset-el a kisebb, ±5V-os méréshatár is használható lett volna. Ennek alkalmazásától annak bonyolultsága és a mérésre gyakorolt zavaró hatása miatt eltekintettünk. A kártya bemeneti impedanciája 10GΩ, maximális konverziós frekvenciája egy csatorna esetén 1,25MHz. A bemeneti FIFO maximum 4095 mintát képes eltárolni, de időben, jelentősen kevesebb mintaszám esetén is maximum 10 másodpercnyi adatot tud eltárolni (a valóságban ez ~10,5s), így megszakítások vagy késleltetések közbeiktatása nélkül a legkisebb lehetséges mintavételezési frekvencia 0,1Hz [5].

A mérés során ügyeltünk arra, hogy a cella kivezetéseihez minél közelebb helyezkedjen el a terhelő ellenállás, így rövidebb mérővezetékek használata is elegendő volt, ezzel minimalizálva az ezekből fellépő veszteségi ellenállás és parazita induktivitás nagyságát. A méréseket közös föld-referencia ponttal végeztük, csökkentve egy esetleges földhurok és zajok miatt fellépő hibákat. A kapcsok bekötéséhez tiszta, oxidációtól mentes csatlakozókat használtunk, kiküszöbölve az érintkezési hibákból kialakuló átmeneti ellenállás okozta mérési hibákat.

A pólusokhoz stabil, mechanikailag rögzített csatlakoztatást használtunk, amely kizárja a kontaktushibákból eredő feszültségugrásokat. A mérőrendszer kompakt felépítése, a stabil referencia-terhelések és a nagy felbontású adatgyűjtés együttesen teszik lehetővé, hogy a 9 V-os elemek tranziens viselkedése több órán keresztül megbízhatóan és precízen legyen mérhető.

3. A MÉRŐPROGRAM

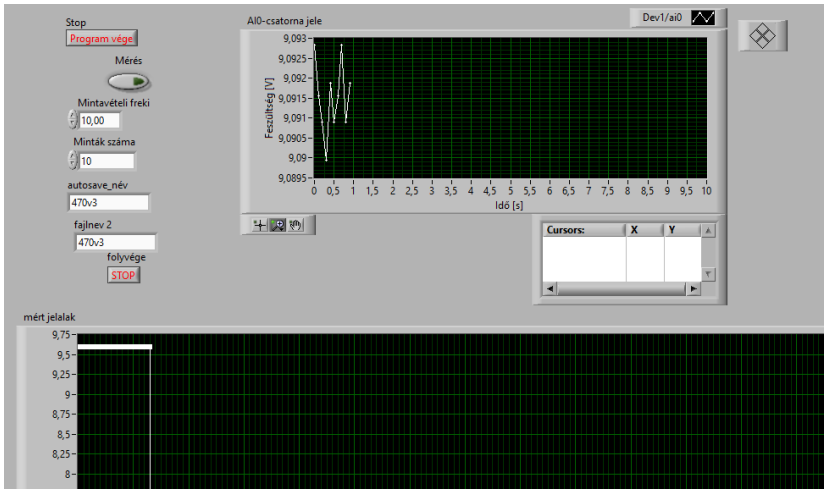
3.1 A mérőprogrammal szemben támasztott elvárások

A mérőprogram megírása előtt össze kellett gyűjtenünk a mérés sikeres lebonyolításának feltételeit. Tekintettel arra, hogy az elemek viselkedését előre nem ismertük egy fix idejű vagy mintaszámú mérés nem jöhetett szóba. Olyan mérőprogram kellett, ami képes előre nem meghatározott ideig végezni a mérést, és az adatokat elmenteni, és az azokat elemzésre a mérőprogramból exportálni. Mivel a mérendő elem névleges feszültsége 9V, minimum 10V-os méréshatárral rendelkező eszköz szükséges. A minél kisebb hibaáram miatt minél nagyobb impedanciájú mérőeszköz használata célszerű a pontos mérés elvégzéséhez Az egyetlen mérendő érték a kapocsfeszültség, így egy analóg bemenet elegendő a méréshez. Erre a célra a rendelkezésünkre álló legalkalmasabb műszer a National Instruments által gyártott DAQMx PCI-6351 mérőkártya volt, amelyre LabView-ban készítettünk mérőprogramot.

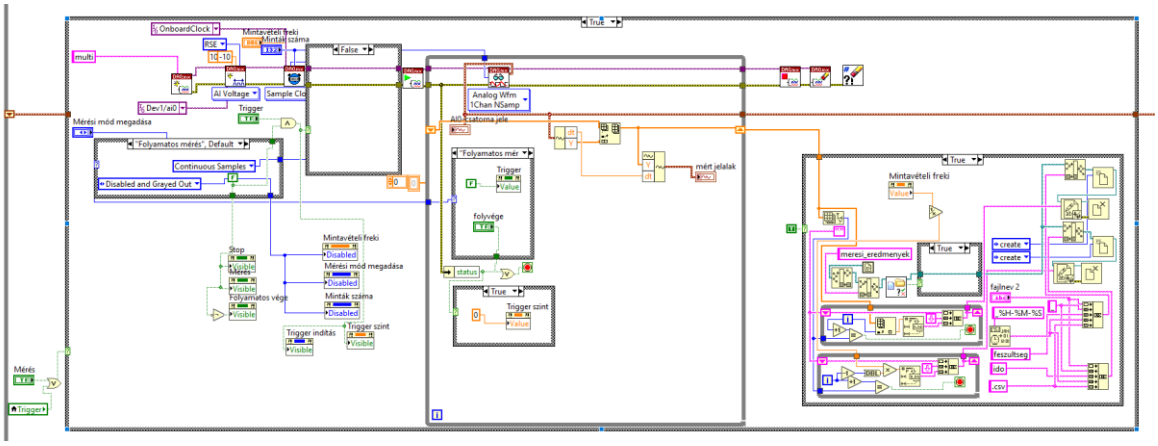
3.2 A méréshez használt hardver specifikációi és beállításai

A méréshez egy analóg bemenetet használtunk, folyamatos mintavételezéssel. Ez a mérőkártya *ai0* csatornája volt, ±10V-os méréshatárral, RSE (Referenced single-ended) módban. Az időzítéshez a számítógép belső óráját használtuk. A mintavételezési frekvenciát és a mintaszámot úgy kellett beállítani, hogy egy mérési ciklus 10 másodpercnél rövidebb ideig tartson és egy ilyen ciklusban maximum 4095 minta volt vételezhető. A program egy mérési ciklus időtartama alatt nem módosítható, csak annak lefutása után, ez azt is jeleni, hogy a folyamatos mérés is csak abban az esetben fog leállni a gomb megnyomása után, ha az előre meghatározott mintaszámot a program az adott ciklusban összegyűjtötte. Ha azt akarjuk, hogy a program minél reszponzívabb legyen célszerű rövid mérési időt beállítani, ami a minták számának és a mintavételezési frekvencia reciprokának szorzatával számolható ki. Esetünkben a mért folyamatok hosszú idő alatt játszódtak le, így egy viszonylag kicsi mintavételezési frekvencia is elegendő volt. Ezt 10Hz-nek választottuk meg, ami egy kompromisszum volt a gyorsabb folyamatok

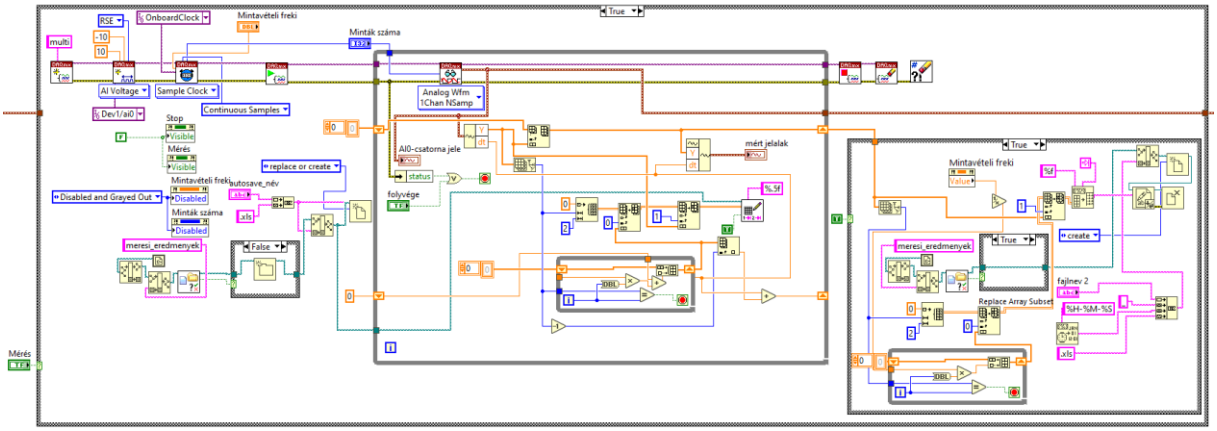
megmérhetősége és a hosszabb mérések alatt a minták számának minimalizálása között. Azzal hogy a mintavételezési frekvencia 10 hatványa a kiértékelés is egyszerűbbé vált. A mérési ciklus abban a két esetben lép ki, ha a felhasználó az erre kialakított *„folyvége”* gombbal leállítja vagy a program valamilyen hibát észlel. A ciklusonként mért értéket egy grafikonon kijelezve tudjuk figyelemmel követni, ahol minden adat az előző ciklusét felülírja. Ezért, hogy a teljes mérés eredménye figyelemmel követhető legyen a Strip waveform funkciót használva a feszültség értékeket tartalmazó tömböt egy sihft regiszterbe mentettük. A későbbi ciklusok eredménye ennek a tömbnek a végére kerül írásra, az így kapott tömbből és a dt időlépésből visszaállítható volt a Build waveform funkció segítségével egy waveform típusú változó, amely egy másik grafikonon már a teljes mérés eredményeit jelenítette meg. A mérési ciklusokba belépő értékekként 0 értékű változókat vagy üres tömböket adtunk meg, hogy a mérés újraindítása esetén az előző mérések eredményei törlődjenek, azokat tovább a program ne vigye. A mérés előlapja a 2. ábrán, az első és a végső mérőprogram pedig a 3-4 ábrákon látható.



2. ábra: *A mérőprogram előlapjának részlete.*



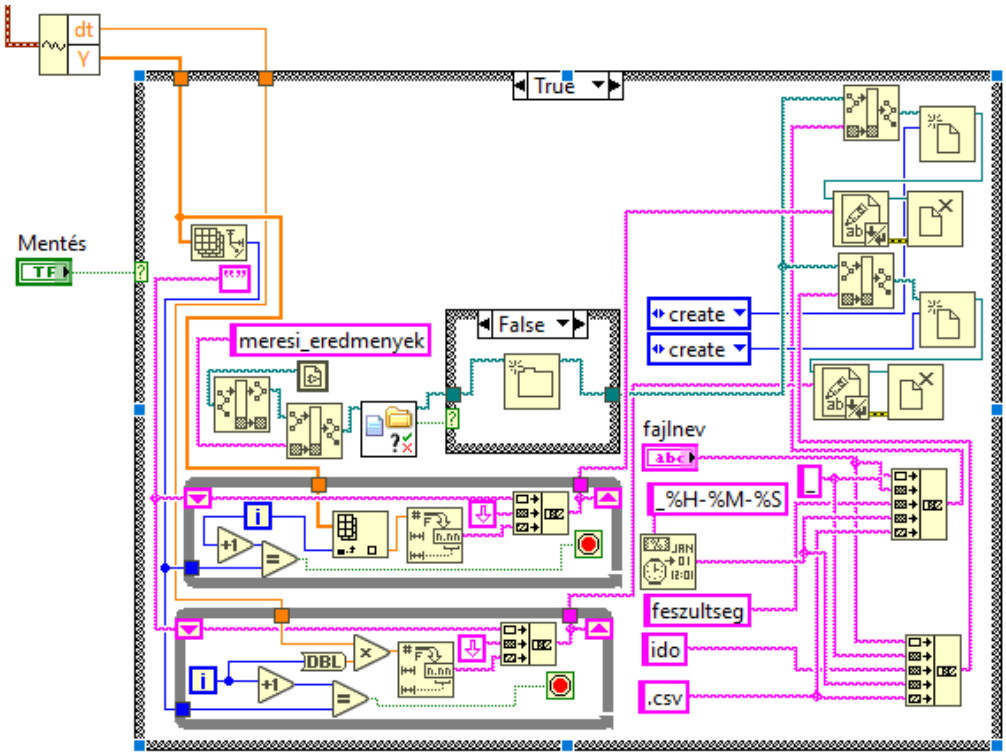
3. ábra: *Az első mérésekhez használt program.*



4. ábra: *A végső mérőprogram.*

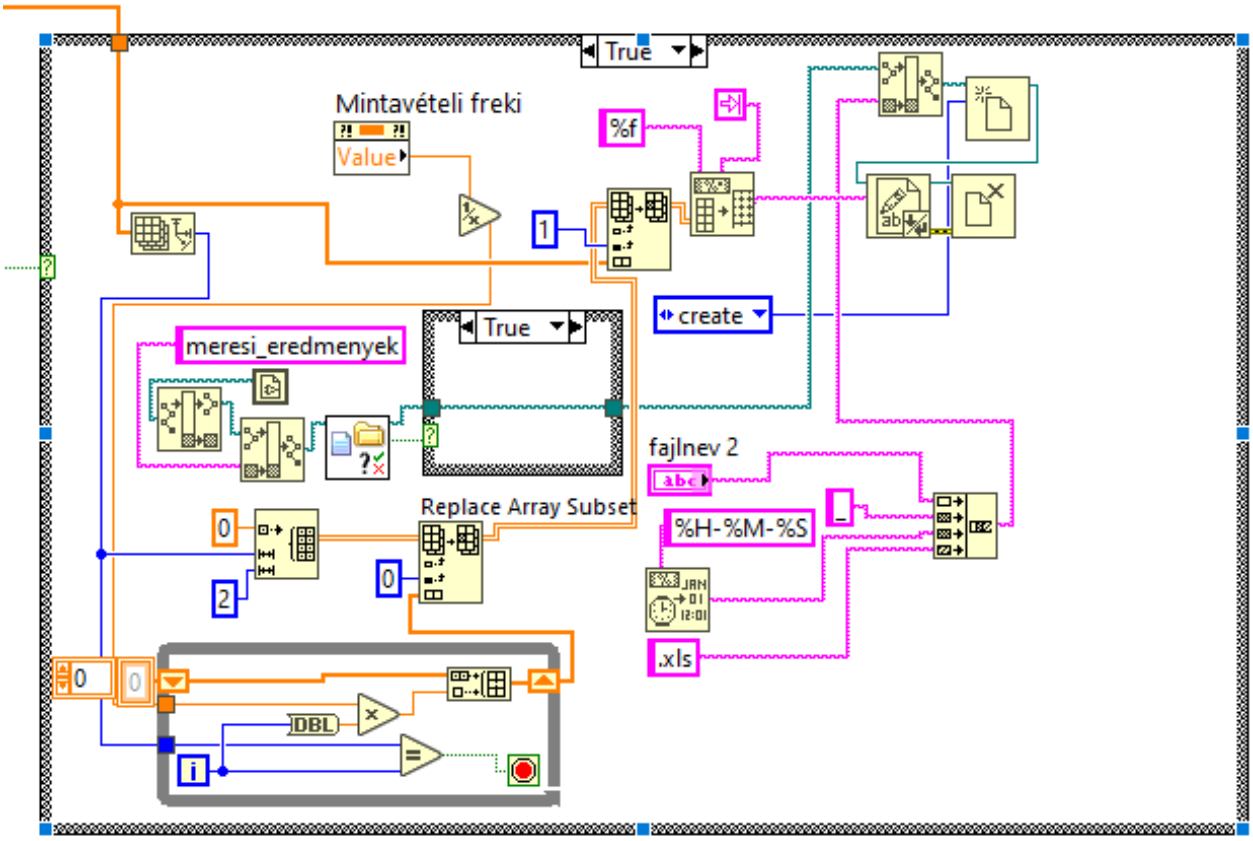
3.3 Az adatok mentése

Az adatok mentéséhez három megoldást alkalmaztunk. Az első megoldásban (5. ábra) a feszültségeket tartalmazó tömböt beírtuk sortörésekkel egy hosszú string változóba. A mintavételezések időpontjait úgy kaptuk meg, hogy a mintavételezési frekvencia reciprokát annyiszor adtuk össze, ahányadik feszültség értékhez tartozott. Ezt annyiszor ismételtük amekkora a feszültségeket tartalmazó tömb mérete volt, majd ezeket az értékeket is sortörésekkel elválasztva egy hosszú srting-be írtuk. A most már string-ként tárolt feszültség és idő adatokat külön-külön egy-egy táblázatba mentettük. A mentés a mérési fájl helyén létrehozott „meresi_eredmenyek” nevű mappába történt minden mentési metódus esetén, ahol a program annak létezését ellenőrizte és szükség esetén létrehozta azt. A fájl nevét a felhasználó adhatta meg, de a fájl nevébe a program beleírta annak tartalmát (idő vagy feszültség), egy időbélyeget (óra, perc, másodperc) és a fájl kiterjesztését is megadta (kezdetben .csv később .xls).



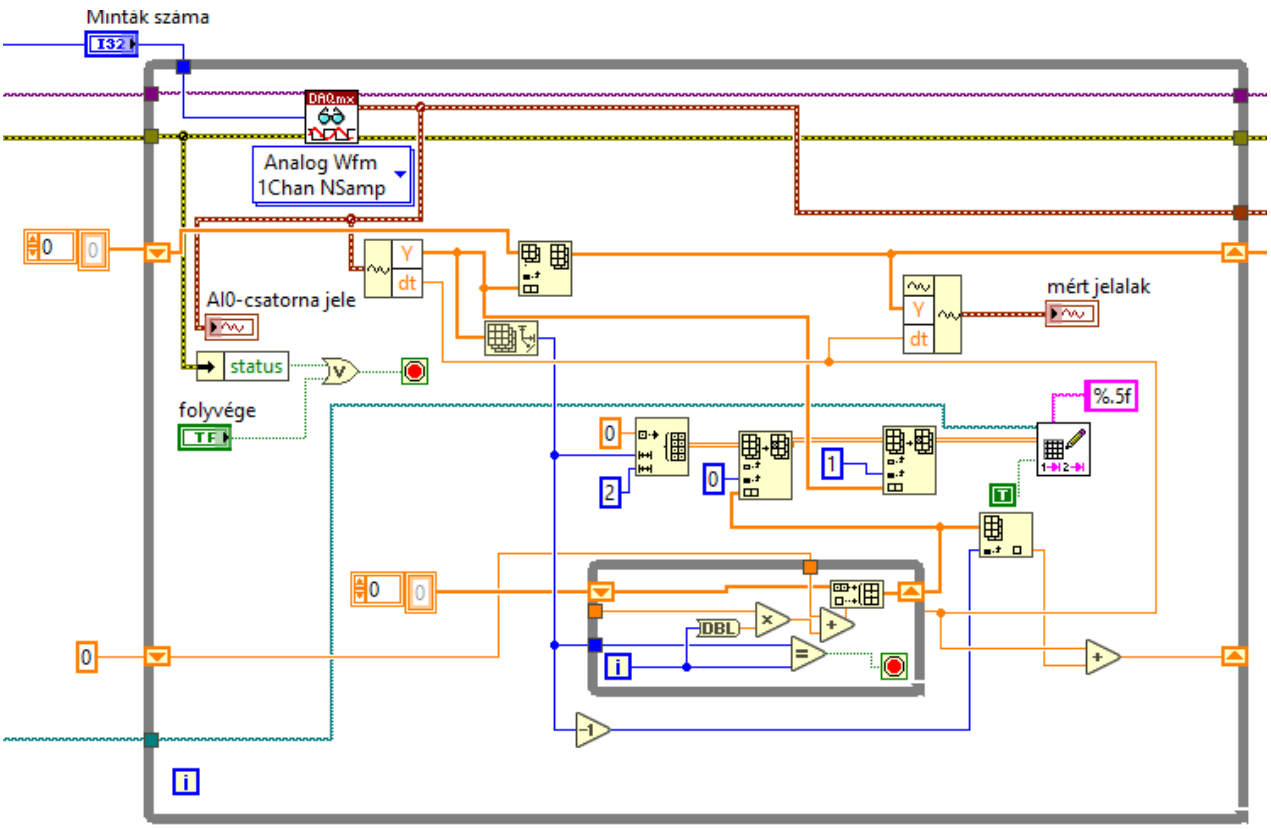
5. ábra: *Az első mentési algoritmus.*

A második eljárásban (6. ábra) már nem hosszú string-ek formájában lettek az adatok elmentve és egy fájlba kerültek az eredmények. A feszültség tömb mellé létrehoztunk egy idő tömböt is, ami itt még double változótípusként tárolta a mintavételezések időpillanatait. A két egy dimenziós tömbből létrehoztunk egy kétdimenziós tömböt, ahol az első oszlop az idő, a második pedig a feszültség volt. Ezt a kétdimenziós double változótípusú tömböt konvertáltuk szintén kétdimenziós string típusú tömbé. A konverzió során a sortöréseket „enterekkel” az oszloptöréseket „tabulátorokkal” oldottuk meg. Ekkor váltottunk a fájltípusok között, mert a .csv kiterjesztés nem tudta a tabulátorokat oszloptörésként értelmezni, az idő és feszültség adatok egy oszlopba kerültek elválasztás nélkül. Mivel a LabView a 2007-ben bevezetett .xlsx formátumot kezelni nem tudta, ezért a régebbi .xls kiterjesztést használtuk. Itt a program már két különböző oszlopba írt az idő és feszültség eredményeket.



6. ábra: *Az egy fájlt használó mentési algoritmus*

A harmadik megoldás (7. ábra) lényege a dinamikus adatmentés volt. Az eddig fentebb felsorolt mentési algoritmusok csak a mérés befejeztével mentették ki az adatokat, így hiba esetén azok könnyen elveszhettek. Ahhoz hogy a kimentett adatok könnyen kezelhetőek legyenek, szükséges volt azokat egy fájlba menteni, nem pedig ciklusonként eltérőbe. Itt a *Write delimited spreadsheet* funkciót alkalmaztuk, mert ez tud egy már meglévő táblázat elemei mögé írni adatokat nem pedig felülírni azokat. Itt a string konverzióra sem volt már szükség, mert elegendő volt a kétdimenziós double típusú tömböt megadni a funkciónak mint bemenetet, ezt a fentebb leírt módon hoztuk létre itt is. Az adatokat öt tizedesjegy pontossággal mentettük. Ez a mentési algoritmus a mérési ciklusban helyezkedik el, így az eredeti fájl létrehozását és az elérési útvonal biztosítását még a ciklusba való belépés előtt el kellet végezni. Ezzel a megoldással a mérőprogram hibája vagy a számítógép lefagyása esetén is maradt kiértékelhető adat.



7. ábra: A dinamikus mentési eljárás a mérőciklusban.

3.4 A mérések során felmerült problémák

A program első verziójának használata során fellépő hiba a FIFO 10 másodperces maximális adattárolása volt, így maximálisan 10 másodperces mérési ciklusokat lehetett beállítani. A folyamatos mérés során a program a mért értékeket egy Waveform változóként adja vissza, ez felbontható egy *Y* tömbre és egy *dt* változóra, ahol *Y* tömb a feszültségeket jelenti (y tengely), *dt* pedig az előző mintavételezés óta eltelt időt (x tengely lépésköze). Ezt a waveform-ot a program minden mérési ciklusban felülírja, így csak a legutolsó ciklus eredményeit lehetett lementeni. A ciklusonként megkapott waveformot komponenseire bontava tudjuk összesítve lementeni. A program első verziójában ez minden mérési ciklus végén egy-egy *Comma-Separated Values* kiterjesztésű (.csv) fájl létrehozásával történt, ahol az egyik a feszültségeket tartalmazta, a másik pedig a mintavételezések időpontjait. Mivel ez maximum 10 másodpercnyi adatot tartalmazott, így egy ily módon mentett mérések kiértékelése nehézkes, hosszabb mérés esetén egyenesen lehetetlen volt. Később ezeket egy-egy String változóban gyűjtöttük mérési ciklusok között, de az optimálisabb erőforrás kihasználás végett későbbi verziókban már egy double integer típusú változó tömbben gyűjtöttük. Itt a mérési ciklus elején inicializálunk egy üres tömböt és a mért *Y* tömb (feszültség) értékeit ennek a végére fűzzük. A tömb, ciklusok közti viszszaforgatását egy Shift-regiszterrel oldottuk meg, így az újonnan mért értékek mindig ennek a végére kerültek. Tekintettel arra, hogy a mintavételezési frekvencia a mérés során állandó volt, így a *dt* utólag könnyen visszafejthető, ezért azt ciklusok között azt nem mentettük. Ezzel a megoldással több órás mérések is könnyen kiértékelhetővé váltak.

A mérés monitorozása szempontjából is probléma volt, hogy a mért waveform változó minden ciklus során felül lett írva. Ahhoz, hogy a teljes mérés eredménye dinamikusan megjeleníthető legyen minden ciklus során az összefűzött y (feszültség) tömbből és állandó értékű *dt*-ből

létre kellett hozni egy másik waveform változót, ami így cikluson belül kijelezve folyamatosan mutatta az eddig lemért összes értéket. Így a mérés felügyelete lehetséges lett, jelentős mérési hibák esetén azt bármikor le lehetett állítani, a hibával nem pedig csak a kiértékelés során szembesültünk. Hosszabb idejű mérések esetén viszont a nagyon nagy elemszámú tömb a program futását jelentősen lassította, esetlegesen a mérési ciklusok közti időt is jelentősen megnyújtva.

Jelentős kihívást jelentettek a mérések során használt számítógépek instabilitásai is. Több esetben is veszett el mérési eredmény a számítógépek lefagyása miatt. Ez hosszú idejű mérések során volt igazán problémás, de gondot jelentett az is, hogy egy elemnek ahhoz, hogy az üresjárási feszültsége stabilizálódjon legalább 24 óra kellett. Így egy rövid idejű mérés hibája esetén is az adott elem aznap már nem volt újra mérhető. A hibák jellemzően lefagyások és kékhalálok formájában jelentkeztek, kezdetben memóriatúlcsordulásra gyanakodtunk, de ezt hamar sikerült megcáfolni, mivel a LabView több 10 órás mérések esetén is 100MB-nál kevesebb memóriát használt. A hibák nem minden gépen jelentkeztek, így később hardverhibára gyanakodtunk, ezt se megerősíteni, se cáfolni nem tudtuk. A problémát azzal küszöböltük ki, hogy olyan gépet, ami legalább egyszer hibát produkált, további mérésekben nem használtunk. Később olyan mentési eljárást alkalmaztunk, ami a mért értékeket nem a mérés leállítása után menti, hanem minden mérési ciklus során kapott értéket beírja egy táblázatba, azokat a program a továbbiakban csak a grafikon kirajzolásához használja.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen cikkben bemutattuk egy PC-alapú méréstechnikai rendszer hardveres kialakítását és szoftveres fejlesztését, amely alkalmas primer elektrokémiai cellák feszültségtranzienseinek nagy felbontású és hosszú távú vizsgálatára. A fejlesztés kritikus eleme a LabView környezetben megvalósított mérőprogram optimalizálása volt. A kezdeti statikus adatmentést alkalmazó megoldások nem bizonyultak üzembiztosnak a több órás mérések során fellépő hardveres instabilitás miatt. A mérések megbízhatóságát végül a dinamikus adatmentés bevezetése garantálta, így egy esetleges rendszerleállás esetén sem vész el a teljes mérési sorozat. Az elkészült mérőrendszer lehetővé teszi a primer elemek (pl.: Zn–MnO_2) diffúziós és kinetikai folyamatainak reprodukálható vizsgálatát, alapot szolgáltatva a kutatás következő fázisában elvégzendő időtartományú modellezéshez.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] ZHANG, N. et al.: Rechargeable Aqueous Zinc–Manganese Dioxide Batteries with High Energy and Power Densities. Nature Communications, 2017, 8, pp 405.

[2] FAEGH, E. et al. Understanding the Dynamics of Primary Zn–MnO_2 Alkaline Battery Gassing with Operando Visualization and Pressure Cells. Journal of The Electrochemical Society, 2018, p 165 (11).

[3] LIM, M. B. et al. Rechargeable Alkaline Zinc–Manganese Oxide Batteries for Energy Storage. Journal of Power Sources, 2021, p 482.

[4] ROSSI, F. et al. What Happens to MnO_2 When It Comes in Contact with Zn? An Electrochemical Study in Aid of Zn/MnO_2-Based Rechargeable Batteries. Energy Technology, 2022, 10(7), 2101114

[5] NATIONAL INSTRUMENTS PCIE-6351 AND USB-6351 SPECIFICATIONS *https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/pcie-usb-6351-specs/page/specs.html (2025.11.15)*

IPAR ÉS FELSŐOKTATÁS KAPCSOLATA AZ ELMÚLT ÉVTIZEDEKBEN. HOGYAN HASZNÁLHATÓAK A MODERN MINŐSÉG ÉS TERMELÉKENYSÉG FEJLESZTŐ TECHNOLÓGIÁK KÖZÜL A LEAN ÉS A TPM A FELSŐOKTATÁSBAN?

THE RELATIONSHIP BETWEEN INDUSTRY AND HIGHER EDUCATION IN RECENT DECADES. HOW CAN MODERN QUALITY AND PRODUCTIVITY IMPROVEMENT TECHNOLOGIES, SUCH AS LEAN AND TPM, BE APPLIED IN HIGHER EDUCATION?

RADÁNYI László Ádám

PhD, egyetemi adjunktus, laszlo.adam.radanyi@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar
Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

Kivonat: *A tanulmány áttekinti a felsőoktatás minőségfejlesztésének történeti alapjait és jelenkori kihívásait, kiemelve az ipar és az egyetemek kapcsolatának fontosságát. Bemutatja, hogyan adaptálhatók a Lean és a Teljes Körű Termelékenységfenntartás (TPM) alapelvei az oktatásban: az értékáram optimalizálása, pazarláscsökkentés, folyamatos fejlesztés, valamint a preventív hibakezelés és az „üzemképesség" fenntartása. A cikk hangsúlyozza, hogy a modern minőségbiztosítási módszerek alkalmazása hozzájárulhat az ipari igényekhez igazodó, hatékony és fenntartható felsőoktatási rendszer kialakításához.*

Kulcsszavak: *felsőoktatás, minőségfejlesztés, Lean, TPM, ipari kapcsolatok*

Abstract: *The paper reviews the historical foundations and current challenges of quality improvement in higher education, emphasizing the long-standing link between academia and industry. It explores how Lean and Total Productive Maintenance (TPM) principles—such as value stream optimization, waste reduction, continuous improvement, and preventive error handling—can be adapted to educational processes. The study argues that applying modern quality assurance methods can create a more efficient and industry-aligned higher education system.*

Keywords: *higher education, quality improvement, Lean, TPM, industry–academia collaboration*

1. BEVEZETÉS

A felsőoktatás minőségfejlesztése napjainkban kiemelt stratégiai cél, ugyanakkor a Miskolci Egyetemen nem új keletű törekvés: gyökerei mélyen a hagyományokban és az elmúlt évtizedek tapasztalataiban rejlenek. A Miskolci Egyetem több mint két és fél évszázados selmeci öröksége nem csupán történelmi érték, hanem olyan tudásbázis, amely a jelen és a jövő oktatási és kutatási kihívásainak megoldásához is új irányt mutat. Az intézmény életében mindig meghatározó volt az elmélet és gyakorlat egységének megőrzése, az ipari igényekhez való alkalmazkodás, valamint a hallgatók szakmai és emberi fejlődésének biztosítása.

Az elmúlt évtizedekben számos rektori beszéd, szakmai állásfoglalás és hallgatói visszajelzés hangsúlyozta azokat az alapelveket, amelyek ma is aktuálisak: a korszerű, alkalmazásorientált tudás átadását, az önálló gondolkodás és alkotókészség fejlesztését, valamint a folyamatos önművelés igényének kialakítását. A globalizáció és a technológiai fejlődés új dimenziókat nyitott, amelyek az idegennyelv-tudás, a digitális kompetenciák és az ipari kapcsolatok erősítését tették elengedhetetlenné.

Ezek az elvek szoros párhuzamot mutatnak a Lean menedzsment és a Teljes Körű Termelékenységfenntartás (TPM) filozófiáival. A Lean szemléletben kiemelt szerepet kap a folyamatok egyszerűsítése, az értékáram optimalizálása és a pazarlás csökkentése – az oktatásban ez leginkább a tananyag relevanciájának biztosítását és a hallgatói élmény javítását jelenti. A TPM

alapelvei, mint a megelőző karbantartás és a hibák gyökerének felszámolása, analóg módon alkalmazhatók az oktatásban: a problémák korai felismerése, a tantervi hiányosságok megelőzése és az oktatási folyamat „üzemképességének" fenntartása kulcsfontosságú. Mindkét megközelítés hangsúlyozza az emberi tényezőt: a Lean a bevonást és csapatmunkát, a TPM pedig az önállóságot és felelősségvállalást – ezek az értékek összhangban állnak a felsőoktatás céljaival, ahol a hallgatók és oktatók együttműködése, az önálló gondolkodás fejlesztése és a folyamatos önművelés biztosítja a hosszú távú minőségi fejlődést.

A tanulmány célja, hogy bemutassa, miként alakult a felsőoktatás minőségfejlesztésének szemlélete a hagyományoktól a modern minőségbiztosítási rendszerekig, és feltárja azokat a visszatérő kihívásokat – az elmélet és gyakorlat arányától kezdve a hallgatói motivációig –, amelyek megoldása ma is kulcsfontosságú.

Fontos tisztázni, hogy kik a „Vevők" a felsőoktatás számára? Természetesen a Hallgatók valamint az ipari, mezőgazdasági, szolgáltató szektorban tevékenykedő vállalkozások, akik képzett munkaerőt, esetlegesen pedig közös kutatásokat szeretnének. Meg kell említeni ezen kívül a tudományos világot is megrendelőként, ha hatékony összehasonlítást szeretnénk a modern minőségirányítási technológiákkal.

2. TÖRTÉNELMI ÁTTEKINTÉS 1960-1990

2.1. Hagyományok, múlt és jövő a Felsőoktatásban a Miskolci Egyetem (NME) perspektívájából

A Miskolci Egyetem többszáz éves tradíciói hatására rengeteg tapasztalat halmozódott fel mind a felsőoktatás, mind pedig a kutatás területén. Erre a vizsgált időszakban több utalást is találunk, hogy mik azok a lehetőségek és előnyök, amiket ezen tradíciók biztosítanak az oktatási felhasználásra és a további fejlesztésekre.

Dr. Simon Sándor Rektor Úr ezzel kapcsolatban így fogalmazott 1972-es Tanévnyitó Beszédében:

„A több mint 200 év oktató, nevelő és tudományos munkája részben alapja és kiindulópontja, néhány esetben meghatározója jelenlegi munkánknak is." A múlt tapasztalatainak ismerete, haladó hagyományaink tisztelete és ápolása tehát szerves része jelenlegi oktató-nevelő munkánknak és egyben hozzásegít minket a jövő feladatainak helyes kitűzéséhez. „ [1]

Kicsivel több, mint 10 évvel később, 1985-ben Dr. Pál Lénárd tanévnyitó beszédében kiemelte, *„Az elmélet és gyakorlat egysége napjainkig fennmaradt s ez a két és fél évszázados selmeci örökségből a legértékesebb."* [2]

Ezzel kapcsolatban, már A Mi Egyetemünk újság korábban kiemelte a nyári termelési gyakorlatokat is, minthogy *„E szakmai gyakorlatok célja tehát elsősorban az elméleti és gyakorlati ismeretek elősegítése"* [3] Egy másik cikkükben részletesebben is kifejtik a nyári szakmai gyakorlatok célját is: *"lassan közeledik a nyári termelési gyakorlatok ideje is. Ezek a gyakorlatok szervesen illeszkednek a mérnökképzés folyamatába. Céljuk kettős: egyrészt a termelési, gyártási folyamatok tanulmányozása valóságos körülmények között, másrészt a termelés struktúrájának, szervezettségének, munkafegyelmének, a termelést végző dolgozók feladatainak a megismerése."* [4]

Több hivatkozás is előkerült, melyben a Felsőoktatáson belül az elméleti szakmai, és a gyakorlati ismeretek helyes egyensúlyának megtalálását tűzték ki célul, ismertetve a módszereket, így mindenképpen kijelenthető, hogy ez a komoly kihívás már a múltban is jelentkezett talán egyidős a Felsőoktatással. Fontos, ha esetleg felborul az egyensúly, azonnal szükséges diagnosztizálni a problémát, hogy végre lehessen hajtani a szükséges fejlesztéseket.

Dr. Terplán Zénó 1989-ben arra a kérdésre, hogy „Mit változtatna Egyetemünkön, többek között megállapította, hogy *„A hazai gépészmérnökképző tantervek sem tökéletesek (túlságosan elméletivé váltak)”* [5]

2.2. Nyelvtudás szerepe a mérnökképzésben és a mérnöki munkában az elmúlt évtizedekben

A globalizálódó világban, a multinacionális vállalatok megjelenésével és a nemzetközi kapcsolatok erősödésével természetesen nem lehet megkérdőjelezni a mérnökképzésben sem az idegen nyelvtudás fontosságát. Érdekesség, hogy 1989-ben Terplán Zénó már ezt felismerve úgy fogalmazott: *„Megoldatlan probléma: a legjobb képességű mérnök is »félkarú óriás« , ha nem tud egy világnyelvet jól, egy másikat pedig közepes szinten”* [5]
Sajnos az 1980-as években a nyelvismeret problémája országos szintű volt: *"Hazánk az idegennyelvtudással rendelkezők számát és az idegennyelvtudás színvonalát tekintve európai összehasonlításban elmarad más országokhoz képest." [6]*

2.3. Időmenedzsmenttel kapcsolatos felmérés az NME-n

Már több évtizeddel ezelőtt is fontos szerepet játszott az időmenedzsment is a hallgatók és az oktatók életében, melyből egy példa is megtalálható volt A Mi Egyetemünk újságban.
Ebben az esetben *"1986. október 12-a és 19-e közé eső héten sok száz miskolci egyetemista naplót, időmérlegnaplót vezetett. Ennek a hétnek öt napjáról számoltak be a hallgatók: mit csináltak reggeltől estig, mennyi időt fordítottak azokra az elfoglaltságokra, amit aznap végeztek, hol és merre jártak, és végül milyen társas keretek között bonyolódtak a napjaik." [7]*
Az eredményekből többek között megállapították: „A vizsgált héten a hétfői napon a hallgatók 97 százaléka ült be valamelyik előadóterembe.” Szerdai nap: „Egészen délig az előadásokon, órákon részt vevők aránya jóval a nyolcvan százalék felett volt, de egyetlen mért időpontban sem érte el a 90 százalékot, a 100 százalékos arányról nem is beszélve. [8]

2.4. A Felsőoktatás céljának meghatározása az elmúlt évtizedekben

Fontos megismerni, hogy a korábbi évtizedekben hogyan fogalmazták meg az egyetemi oktatás küldetését, hogy ezek alapján szilárd alapot lehessen biztosítani a továbbfejlesztésnek.

1990-ben például úgy fogalmaztak: *„Az egyetemi oktatás célja a felhasználó szemével nézve, olyan felsőfokú szakember képzése, aki minden, a szakmájába való feladatot képes megoldani az egyetemen szerzett ismereteket képes önképzéssel (részben szervezett továbbképzéssel) szinten tartani és alkotóan továbbfejleszteni.”* [9]

Az évtizedek során többször visszatérő momentum, hogy a mérnökjelölteket nem csupán szakmailag, hanem emberileg is fontos fejleszteni a felsőoktatási keretek között. A mai megfogalmazás úgy hangozhatna, hogy az egyetemi oktatás ne csupán hard skilleket, hanem soft skilleket is legyen képes átadni. Megjelenik többször ezen felül az elméleti és a gyakorlati oktatás arányának kérdése, illetve az a cél, hogy önálló munkát végezni képes mérnökök kerüljenek ki az Egyetemről.

Dr. Zambó János Rektor Úr már 1963-as tanévnyitó beszédében megjegyzi:

„Mérnöki oklevelet szerezni nem egyszerű dolog. Eredményt elérni csak úgy lehet, ha mindennap következetesen dolgoznak. Hozzá kell szokni, hogy a felnőtt emberekre jellemző munkában részt vegyenek. Aki ezt nem teszi, nem fog mérnöki oklevelet szerezni.”

„Nekünk oktatóknak elsőrangú feladatunk, hogy önöket a szakma ismeretére megtanítsuk, de ennél még fontosabb, hogy önökből egyenes, őszinte, nyíltszívű, szakmájukat, hazájukat forrón szerető mérnököket neveljünk.” „Az oktatási reform azt írja elő, hogy olyan mérnököket

kell képezni, akik közelebb állnak a mindennapi élethez, korszerűen tudnak gondolkodni és a korszerű technikát magas szinten tudják alkalmazni."[10]

Megjegyzendő, hogy a tanulás fáradtságos voltát később is megjegyzi Dr. Czibere Tibor, Rektor tanévnyitó beszédében (1979): *„a tanulás küzdelem a tudásért, s mint ilyen, mindig fáradságos dolog volt és az is marad."*[11]

Dr. Simon Sándor Rektor Úr, 1972-es Tanévnyitó beszédében úgy fogalmazott [1]:

„Az egyetem élete – történelmileg jellemző stabilitása mellett – állandóan alakul, fejlődik, tükrözve ezzel a társadalomban végbemenő változásokat." A folyamatos fejlődés

szintén alapelv a modern minőségbiztosítási rendszerekben, így megállapítható a kijelentés időtállósága. Ezen felül, kifejtette tanári hitvallását a tananyaggal, és a jó mérnökkel kapcsolatban is, *fontosnak tartotta, hogy elkerüljék a felesleges lexikális adatokkal és részletekkel való leterhelését a hallgatóknak,* mint mondta: *„így lehetséges megteremteni a feltételeket ahhoz, hogy megtanítsuk őket logikus gondolkodásra, fejlesszük bennük az alkalmazási készséget és felkészítsük őket az állandó szakmai továbbképzésre."*

Szerinte: *„Nélkülözhetetlen az önálló gondolkodásra, a megfigyelésre, az összefüggések felismerésére, a véleményalkotásra és a felelősségtudatra nevelés"*

Egy évvel később, Dr. Simon Sándor Rektor Úr, az 1973-as Tanévnyitó beszédében már az önművelés és a tudás folyamatos fejlesztésére is inspirált, kiemelve a munkafolyamatok elemzésének fontosságát is:

„Oktatásunk csak úgy felelhet meg a társadalom támasztotta követelményeknek, ha az alapvető ismeretek tanítására törekszik, ha a hallgatók gondolkodását fejlesztve kialakítja a továbbképzés igényét, és képessé teszi őket a folyamatos önművelésre, ha a hangsúlyt a képzés minden fázisában a mérnöki ismeretek elméleti megalapozására, a munkafolyamatok elemző vizsgálatára, az alkotó készség és az önálló szakmai tájékozódás kifejlesztésére helyezi. „

Ezen felül megjegyezte, hogy *„Az oktatás minőségi színvonalának emeléséhez egyik alapvető feltétel a tudományos munka hatékony és ésszerű fejlesztése."* Majd megállapította, hogy: *„Arra törekszünk, hogy az oktató-nevelő munka, az egyetem belső életének fejlesztése érdekében kialakítsuk az oktatók és hallgatók együtt munkálkodó közösségét"* [12] A teljes csapat bevonása a minőségfejlesztésbe szintén az alapja a modern minőségbiztosítási rendszereknek.

Ezekben az években fejtette ki Dr. Verő József is a gondolatait a tananyag felépítéséről [13]:

„Az összes tárgyak anyaga pontosan kapcsolódjék egymáshoz, hogy az elsajátítandó ismeretek egész halmaza logikus egységet alkosson." „A jövő mérnökének a természettudomány alkotta alapra támaszkodva, messzebbről kiindulva kell az új technológiát irányítania, esetleg magának kifejleszteni.

1981-ben A Mi Egyetemünk Újság az alábbi módon fogalmazta meg a mérnökképzés célját és fejlesztési lehetőségeit: „*A mérnöki munka magas színvonalú végzésének előfeltétele, hogy a mérnök – az egyetemen szerzett általános és szakmai ismeretek mellett – jó alkotókészséggel és kellő önállósággal rendelkezzen. A műszaki egyetemek képzési célkitűzéseinek egyik fontos eleme, hogy a hallgatóságban kifejlessze a természettudományos alapokon nyugvó ismeretek magas fokú alkalmazási készségét. E készség kifejlesztésének elengedhetetlen eszköze az önálló munkára nevelés. „A hallgatók önállóságra nevelésének talán leglényegesebb fázisa az előadást követő gyakorlati foglalkozás. » A hallgatók aktivizálásának másik módja az esetenkénti számonkérés, mely során a hallgatók számot adnak az elsajátítás mértékéről. Ezek az önálló foglalkozások (zárthelyik) az oktatási folyamat visszacsatoló szerepét töltik be. Képet adnak az oktatási folyamat hatékonyságáról.*" [14] Az adott folyamat rendszeres és alapos mérése, és az eredményekre adott visszacsatolások szintén alapját képezik a modern minőségirányítási rendszereknek.

A mérnökképzés emberi oldala visszatérő momentum az évtizedek során, 1986-ban Dr. Kovács Ferenc Rektor tanévnyitó beszédében így fogalmaz: *„Ma már nem elegendő, ha az egyetem csupán az ismeretek átadásának, illetve a megszerzésének színtere, ha csupán a szakmai tananyag továbbításával hat. Azt kell elérni, hogy az intézmény légköre, oktató és tudományos munkája, tanárainak személyisége, tudása és emberi magatartásának példája is olyan tényező legyen, ami biztosítja azt, hogy az egyetemek nevelte szakemberek szakmailag és emberként egyaránt képesek legyenek helytállni a jövő társadalmában."* [15]

Nem megkerülhető, hogy megtekintsük a korábbi évtizedek Hallgatói visszajelzéseit is az oktatással kapcsolatban, Hallgatói vélemény és igény a vizsgákról és a tananyagról, 1974 júniusában:

„A lényeg az legyen: érezzük, hogy szükségünk van arra amit tanulunk". [16] Ez a hallgatói igény természetesen folyamatosan felmerül a felsőoktatás történetében.

A tanulmányi eredményekkel kapcsolatban pedig kifejti a folyóirat: *„A tanulmányi sikernek van egy nagyon előrevivő szerepe, mégpedig az, hogy minden magunk kivívta siker megemeli a fogékonysági szintet a jövendő feladatokkal szemben és pozitív visszacsatolást eredményez".* [17]

2.5. A felsőoktatás és az ipar kapcsolata a vizsgált időszakban

Az elmúlt évtizedekben is nélkülözhetetlen volt az ipari igények állandó változására adott reakció a felsőoktatás részéről. Az oktatás célját már az 1980-as években is definiálták, például: *„lassan hozzászokunk az új kifejezésekhez, a minőségi fejlődést és annak szükségszerűségét hangsúlyozó mondatokhoz. » »Ma a szellemi tőke jobb kihasználása intenzifikálása a feladat, a gyárakban, az üzemekben, a mezőgazdaságban, egyszóval az egész gazdaságban."* [18]

Örökös kihívás ezen felül az, hogy a tudományos kutatás és az ipari igények a lehető legnagyobb mértékben átfedésben legyenek. Ezzel, és a kapcsolatok erősítéséhez történt egy felhívás már 1980-ban is:

„Hazánk társadalmi – gazdasági haladásához egyre nagyobb szükség van a tudomány eredményeinek mind szélesebb körű alkalmazására, a meglévő lehetőségek gondos feltárására és maradéktalan hasznosítására. » »Számos tudományos eredmény marad ugyanis felhasználatlan a termelési feltételek, igények ismeretének hiánya, illetve a lehetséges felhasználókkal való gyenge kapcsolat miatt.« - Erdei Ferenc Munkacsoport [19]

Megállapították, hogy *„Mindennapos feladat az ipari kapcsolatok keretében való kutatófejlesztő munka, nemcsak az oktatás színvonal tartása miatt elengedhetetlen, hanem a létezés és fejlesztés anyagi forrásainak megteremtése miatt is."* [20]

Ezen felül több alkalommal is foglalkoztak a jövő kihívásaival is, például a már akkor is látható folyamattal, a számítógépek elterjedésével. Megvizsgálták azt a feltevést, hogy a számítástechnika az egyszerűbb mérnöki munkákat ki fogja váltani a későbbiekben.

„A ma mérnökének nap mint nap új és újabb feladatokat kell megoldania. A technika rohamos fejlődése új követelményeket állít a műszaki élet vezetői elé. Ma már nem lehet a keservesen megszerzett diplomával 5-10 évig még elfogadhatóan sem tevékenykedni az iparban.

Ugyanekkor egy másik érdekes probléma is napirendre kerül. A mérnöki rutinmunka fokozatosan visszaszorul. Jönnek a számítógépek. Gyorsabban, pontosabban dolgoznak, mint az ember. A szükségszerűen felmaradó rutinmunkát elvégzik az üzemmérnökök. „

„Az egyetemi oktatás alatt olyan matematikai oktatásban kell részesülniük a hallgatóknak, hogy később meglegyen az alapjuk arra, hogy lépést tartsanak a tudományuk fejlődésével. A helyes arányok megtalálása nem könnyű feladat, hiszen a mérnököknek végső soron mérnököknek kell maradniuk. [21]

A mikroelektronikai fejlesztéseket is említik a gyártás minőségével összefüggésben is, egy tananyagfejlesztésen belül: *„A magyar termékek piacképessége azonban csak akkor növekedhetnek, ha azok mikroelektronika adta lehetőségek alkalmazásával jelentősen elektronizálódnak, ugyanakkor a gyártás automatizálásával a gyártmányok minősége javul, a termelékenység pedig többszörösen növekszik."* [22]

3. A LEAN ÉS A TPM MINŐSÉG- ÉS TERMELÉKENYSÉGFEJLESZTŐ TECHNOLÓGIÁK ÁTTEKINTÉSE

3.1. Mi az a Lean?

A Lean a cél, a folyamat, valamint az emberek tiszteletének hármas egységén alapszik. Fő kérdése: hogyan lehet a vevő számára a lehető legnagyobb értéket előállítani a lehető legkisebb erőforrás, idő, energia és erőfeszítés felhasználásával. Egy lean szervezet felismeri, hogy mit jelent a vevői számára értéket és a kulcs folyamataiban ennek állandó növelésére törekszik. A legvégső cél tökéletes értéket nyújtani a vevő számára egy tökéletes értékteremtő folyamaton keresztül, melyben a veszteség mértéke nulla. Ennek megvalósítása érdekében a lean szemlélet áthelyezi a menedzsment fókuszát, az elkülönített technológiák, eszközök és részlegek optimalizálásáról, a termékek, szolgáltatások áramlásának optimalizálására, amelyek értékfolyamatai technológiákon, eszközökön, részlegeken keresztül áramlanak egészen a vevőkig. [23]

3.2. Mi a Lean szemlélet lényege?

A Lean szemlélet lényege az ügyfél számára nyújtott érték maximalizálása a pazarlások könyörtelen csökkentésével. Filozófiájának alappillérei a következők:

- **Értékközpontúság:** a Lean középpontjában az áll, amit a vevő valóban értékesnek tart. Minden tevékenységnek, folyamatnak erre kell épülnie; a felesleges, nem értéknövelő munkafolyamatokat pedig minimalizálni kell.
- **Pazarlásmentesség:** a Lean menedzsment folyamatos harcot jelent mindazon tényezők ellen, amelyek pazarlást okoznak (idő, erőforrások, anyagok, felesleges lépések). A pazarlásnak többféle formáját azonosítja a Lean – például a túltermelés, várakozás, felesleges mozdulatok, felesleges szállítás, selejtes termékek, stb.
- **Folyamatos fejlődés:** a Lean nem „egyszer bevezetjük és kész" jellegű megközelítés. Folyamatos önelemzésre ösztönöz, hogy az ügyfélnek nyújtott értéket egyre hatékonyabban tudjuk előállítani. A **„*Kaizen*„** japánul kisebb, folyamatos fejlesztéseket jelent, és a Lean szemlélet fontos része.

3.3 A Lean menedzsment alapelvei

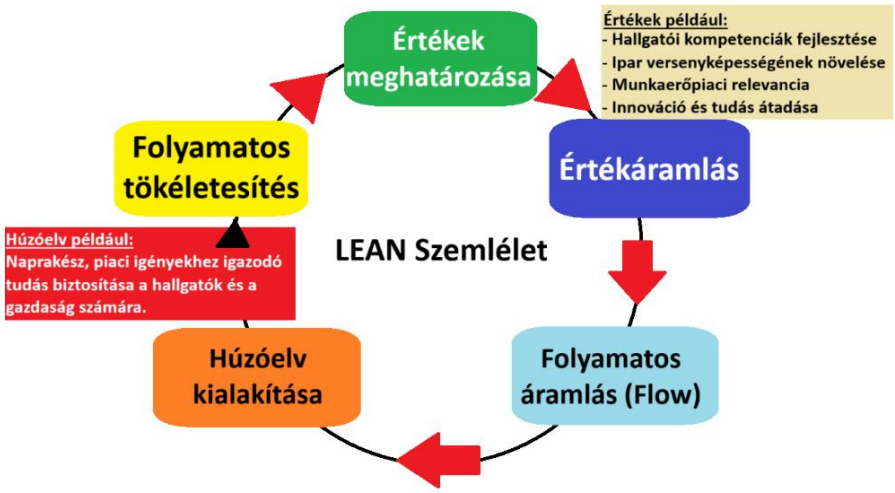
A lean menedzsmentnek **öt alapelve** van [24]. Ezeket együttesen alkalmazva valósítható meg a pazarlásmentes, ügyfélközpontú működés (1. ábra).

1. **Érték meghatározása:** az első lépés, hogy a Lean szemléletmód szerint pontosan meghatározzuk, mi az, ami valóban értéket képvisel az ügyfél számára. Miért hajlandó fizetni, és mi az, ami egy termékben vagy szolgáltatásban számára felesleges.
2. **Az értékáramlás feltérképezése:** a második lépés az összes olyan folyamat és tevékenység azonosítása, amely az ügyfél számára értékes termék vagy szolgáltatás létrehozásához vezet. Ez egy részletes folyamatábra elkészítését, minden egyes lépés feltérképezését jelenti a kezdetektől a végtermékig.
3. **Folyamatos áramlás (flow) létrehozása:** a lean célja, hogy zökkenőmentesen, akadályok és szükségtelen várakozás nélkül haladjon az értékáramlás. Ehhez szükség lehet folyamatok

átszervezésére, a párhuzamosítható feladatok összhangba hozására, vagy szűk keresztmetszetek azonosítására és orvoslására.

4. **Húzóelv kialakítása:** a hagyományos menedzsment „toló” szemlélettel működik, mely szerint előre gyártanak termékeket, feltételezve a jövőbeli igényeket. A lean gondolkodásmód megfordítja ezt a logikát: csak azt és csak akkor gyártjuk, amikor az ügyféltől valóban megrendelés érkezik. Ez csökkenti a készleteket és a feleslegesen előállított termékekből fakadó pazarlást.

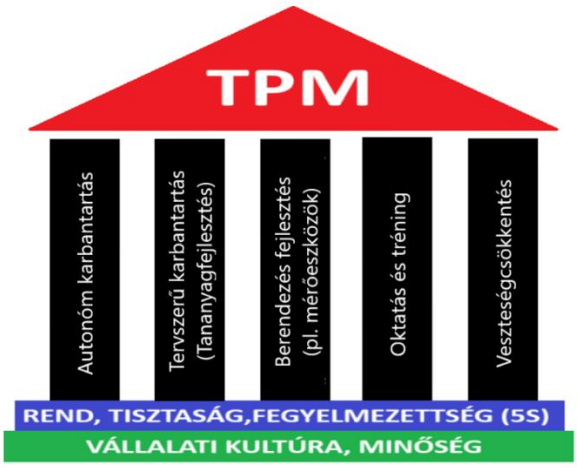
5. **Folyamatos tökéletesítés:** a lean menedzsment soha nem ér véget. A csapat folyamatosan keresi a lehetőségeket, hogy a folyamatokat hatékonyabbá tegye, gyorsítsa, kevesebb erőforrásból oldja meg, vagy újabb értéket teremtsen az ügyfeleknek. Ez a Kaizen gondolkodásmódja, ami a folyamatos, kis lépésekben megvalósított fejlesztést jelenti.



1. ábra: *Lean menedzsment alapjai és folyamatábrája [24 alapján, saját szerkesztés]*

3.4. Mi az a TPM?

A TPM jelentése Total Preventative Maintenance, magyarul Teljes megelőző karbantartás Olyan technikák összese, amelyek biztosítják, hogy a gyártási folyamat minden egyes gépe mindig képes legyen elvégezni a szükséges feladatot. A TPM célja olyan vállalati kultúra kialakítása, amelyben maximalizálják a termelési rendszer hatékonyságát.



2. ábra: A *TPM Rendszer alappillérei [26 alapján, saját szerkesztés]*

A gyakorlatban ez úgy érhető el, hogy a termelési szereplőket felhatalmazzuk, megtanítjuk arra, hogy rendszeresen végezzenek öntevékeny karbantartást és így megosztott felelősséggel tartoznak a berendezésekért, ezáltal felszabadítják a mérnököket, hogy azok speciálisabb feladatokra is rendelkezésre álljanak.

A TPM bevezetésénél teljes körű szemléletet kell alkalmaznunk, azaz minden alkalmazottat be kell vonnunk, vállalati és szakterületi vezetőket, gyártástámogató- és folyamatmérnököket, karbantartó szakembereket, lean mérnököket, lean koordinátorokat, műszakvezetőket, termelési vezetőket, gépbeállítókat, közvetlen termelésben dolgozó munkatársakat. [25]

4. HOGYAN HASZNÁLHATÓAK A LEAN ÉS A TPM ALAPELVEI A FELSŐOKTATÁSBAN?

A felsőoktatás minőségfejlesztése napjainkban kiemelt stratégiai cél, amely több esetben szoros párhuzamot mutat a modern ipari menedzsmentfilozófiákkal, mint a LEAN és a TPM. Mindkét megközelítés olyan alapelveket is képvisel, amelyek adaptálhatók az oktatási folyamatok hatékonyságának növelésére.

4.1. A Lean alapelvek alkalmazási lehetőségei

A Lean szemlélet lényege az érték maximalizálása és a pazarlás csökkentése. A publikációban kiemelhető, hogy „A Lean szemléletben kiemelt szerepet kap a folyamatok egyszerűsítése, az értékáram optimalizálása és a pazarlás csökkentése – az oktatásban ez a tananyag relevanciájának biztosítását és a hallgatói élmény javítását jelenti.”

A felsőoktatás minőségfejlesztéséhez célszerű alkalmazni az „Értékáram elemzést”, amely magában foglalja az oktatási folyamatok feltérképezését (kurzusok, vizsgák, adminisztráció) segít azonosítani a nem értéknövelő elemeket (pl.: redundáns tananyag).

A következő alkalmazható Lean Menedzsment alapelv a Kaizen – vagyis a folyamatos fejlesztés alapelve: A hallgatói és oktatói visszajelzések rendszeres beépítése kis lépésekben történő fejlesztéseket tesz lehetővé.

Nem lehet eléggé hangsúlyozni, és a publikációban több hivatkozás is idézve lett azzal kapcsolatban, hogy mennyire fontos az ipar és a felsőoktatás kapcsolata, annak mindig a fejlesztésére és tökéletesítésére volt szükség már több évtizeddel ezelőtt is. Ennek leírására és definiálására is tökéletesen alkalmazható a Lean szemléletmódból a Húzóelv felsőoktatásra optimalizált változata, vagyis például a tananyag és kurzusok igazítása a munkaerőpiaci igényekhez és a projektalapú oktatás bevezetése.

A rendezettség és a rendszerezettség fokozására bevezethető az 5S az oktatásban, ami rendezett laborokat, strukturált digitális tananyagokat eredményez.

4.2. A TPM alapelvek alkalmazási lehetőségei

A TPM célja úgy definiálható, hogy az „üzemképesség” fenntartása és a hibák megelőzése. A publikációban már említésre került, hogy *„A TPM alapelvei, mint a megelőző karbantartás és a hibák gyökerének felszámolása, analóg módon alkalmazhatók az oktatásban: a problémák korai felismerése, a tantervi hiányosságok megelőzése és az oktatási folyamat »üzemképességének« fenntartása kulcsfontosságú.”*

Négy fő szempont alkalmazhatóságára hívja fel a figyelmet a publikációm a TPM alapján, az első a „Preventív hibakezelés” amelyben lehetőség van többek között a tantervi hiányosságok korai felismerésére, valamint az oktatási folyamatok folyamatos monitorozására.

Ezen felül célszerű megfontolni az Autonóm karbantartás analógiáján belül, hogy bevonunk

Hallgatókat a laborok és eszközök alapvető karbantartásába természetesen ha az nagy biztonsággal és veszélymentesen elvégezhető. Ez az iparban tapasztaltak alapján nagymértékben erősíti a Hallgatók felelősségvállalását. Ezen felül továbbra is folytatni kell az Oktatási hatékonyság mérőszámainak monitorozását, úgymint részvétel, teljesítmény és elégedettség. Ez egybevág a TPM-en belül az OEE (Overall Education Effectiveness, az oktatás általános hatékonysága) alapelvével.

Kiemelten fontos egy olyan szervezettnek, amely az oktatással foglalkozik, hogy az Oktatók és Hallgatók mindig a legmagasabb szinten képzettek legyenek, ezen felül mind az Oktatókat, mind pedig a Hallgatókat, valamint a teljes alkalmazotti létszámot célszerű bevonni a minőségfejlesztési folyamatokba.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmány a felsőoktatás minőségfejlesztésének történeti gyökereit és jelenkori kihívásait vizsgálja, különös tekintettel az ipar és az egyetemek kapcsolatára. Részletes történelmi áttekintést nyújt az 1960–1990 közötti időszakról, bemutatva az elmélet–gyakorlat arányának, a nyelvtudásnak és az ipari igényekhez való alkalmazkodásnak a szerepét a Miskolci Egyetemen (Nehézipari Műszaki Egyetemen). A cikk vizsgálja, hogy a modern ipari menedzsmentfilozófiák – Lean és Teljes Körű Termelékenységfenntartás (TPM) – alapelvei milyen módon adaptálhatóak a felsőoktatásban. A Lean szemlélet az értékáram optimalizálásával, pazarláscsökkentéssel és folyamatos fejlesztéssel egyszerre javíthatja a tananyag relevanciáját, folyamatos fejlesztését az igényeknek megfelelően, valamint a hallgatói élményt. A TPM analógiái, mint a preventív hibakezelés és az autonóm karbantartás, hozzájárulhatnak az oktatási folyamat „üzemképességének” fenntartásához. A tanulmány hangsúlyozza, hogy az ipar és felsőoktatás együttműködése, valamint a modern minőségbiztosítási módszerek alkalmazása kulcsfontosságú a versenyképes, hatékony oktatási rendszer kialakításához.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] A Mi Egyetemünk, A Miskolci Egyetem folyóirata (Nehézipari Műszaki Egyetem) 1972/73. XX. Évf 1. szám, 1972.09. Címlap

[2] A Mi Egyetemünk, A Miskolci Egyetem folyóirata (Nehézipari Műszaki Egyetem) 1985/1986. XXXIII. Évf. 2. szám, 1985.09.16. Címlap,

[3] A Mi Egyetemünk, A Miskolci Egyetem folyóirata (Nehézipari Műszaki Egyetem) 1976/1977. XXIV. Évf. 9. szám, 1977.01.10. A hatásfok javítása – A szakmai gyakorlatokról

[4] A Mi Egyetemünk, A Miskolci Egyetem folyóirata (Nehézipari Műszaki Egyetem) 1975/1976. XXIII. Évf. 20. szám, 1976.06.07. Címlap. A termelési gyakorlatokról c.

[5] A Mi Egyetemünk, A Miskolci Egyetem folyóirata (Nehézipari Műszaki Egyetem) 1988/1989. XXXVI. Évf. 17. szám, 1989.04.24. Mit változtatna egyetemünkön?

[6] A Mi Egyetemünk, A Miskolci Egyetem folyóirata (Nehézipari Műszaki Egyetem) 1980/1981. XXVIII. Évf. 6. szám, 1980.11.24. Címlap: Nyelvtudatlanságunk

[7] A Mi Egyetemünk, A Miskolci Egyetem folyóirata (Nehézipari Műszaki Egyetem) A 1986/1987. XXXIV. Évf. 17. szám, 1987.04.27
Címlap Egyetemisták időmérlegnaplója.

[8] A Mi Egyetemünk, A Miskolci Egyetem folyóirata (Nehézipari Műszaki Egyetem) 1986/1987. XXXIV. Évf. 19. szám, 1987.05.25
Címlap Egyetemisták időmérlegnaplója.

[9] A Mi Egyetemünk, A Miskolci Egyetem folyóirata (Nehézipari Műszaki Egyetem) A 1989/1990 XXXVII. Évf. 15. szám, 1990.04.17. Kell-e ennyi zh, meg jegy, meg vizsga? Gondolatok az egyetemi oktatásról és ellenőrzésről.
[10] A Mi Egyetemünk, A Miskolci Egyetem folyóirata (Nehézipari Műszaki Egyetem) A Mi Egyetemünk, XI. Évf. 1. szám, 1963.09.
[11] A Mi Egyetemünk, A Miskolci Egyetem folyóirata (Nehézipari Műszaki Egyetem) 1978/1979. XXVII. Évf. 1. szám, 1979.09.
[12] A Mi Egyetemünk, A Miskolci Egyetem folyóirata (Nehézipari Műszaki Egyetem) 1973/74. 21. Évf 1. szám, 1973.09. Címlap
[13] A Mi Egyetemünk, A Miskolci Egyetem folyóirata (Nehézipari Műszaki Egyetem) 1973/74. 21. Évf 15. szám
[14] A Mi Egyetemünk, A Miskolci Egyetem folyóirata (Nehézipari Műszaki Egyetem) 1980/1981 XXVIII. Évf. 10. szám, 1981.01.26. Címlap, Alkotó mérnököt nevelni.
[15] A Mi Egyetemünk, A Miskolci Egyetem folyóirata (Nehézipari Műszaki Egyetem) 1986/1987 XXXIV. Évf. 1. szám, 1986.09. Címlap
[16] A Mi Egyetemünk, A Miskolci Egyetem folyóirata (Nehézipari Műszaki Egyetem) 1973/1974 XXI. Évf., 1974.06.
[17] A Mi Egyetemünk, A Miskolci Egyetem folyóirata (Nehézipari Műszaki Egyetem) 1972/1973 XX. évf. 17. szám 5. old 1973. ápr. 30. Jobb mérnök lesz-e valaki, ha job-ban tanul?
[18] A Mi Egyetemünk, A Miskolci Egyetem folyóirata (Nehézipari Műszaki Egyetem) 1980/1981. XXVIII. Évf. 9. szám, 1981.01.12. Címlap A leggyorsabban megtérülő beruházás.
[19] A Mi Egyetemünk, A Miskolci Egyetem folyóirata (Nehézipari Műszaki Egyetem) 1979/1980 XXVII. Évf. 18. szám, 1980.05.12. Címlap. Hasznosítható kutatásokat! -Felhívás-
[20] A Mi Egyetemünk, A Miskolci Egyetem folyóirata (Nehézipari Műszaki Egyetem) 1986/1987. XXXV. Évf. 1. szám, 1987.09.19.
[21] A Mi Egyetemünk, A Miskolci Egyetem folyóirata (Nehézipari Műszaki Egyetem) 1975/1976 XXIII. Évf. 17. szám, 1976.04.26. 3. oldal. A jövő műszaki egyeteme?
[22] A Mi Egyetemünk, A Miskolci Egyetem folyóirata (Nehézipari Műszaki Egyetem)1986/1987 XXXIV. Évf. 18. szám, 1987.05.11 Modul = megújuló mérnökképzés
[23] Lean Enterprise Institute Hungary honlapja. Letöltve: 2025.11.18. A leanről - Mi a lean? Mi a célja? Hogyan segíthet neked?- LEI.
[24] Dávid Ádám: A lean szemlélet és a lean menedzsment működése
A lean szemlélet és a lean menedzsment működése
Kiszervezett Marketing Honlap. Letöltve: 2025.11.18
[25] TPM-Teljes megelőző karbantartás - Lean módszerek - LeanToolBox Lean Toolbox Honlapja. Letöltve: 2025.11.18.
[26] TPM (Total Productive Maintenance) - SRL Advantage SRL Advantage Honlapja. Letöltve: 2025.11.18.

NAPELEMTELEP DRÓNOKKAL TÖRTÉNŐ DIAGNOSZTIKÁJÁNAK FEJLESZTÉSE A GRÁFELMÉLET FELHASZNÁLÁSÁVAL

DEVELOPMENT OF SOLAR FARM DIAGNOSTICS USING DRONES AND GRAPH THEORY

RADÁNYI László Ádám[1], VERES Laura[2]

[1]PhD, Egyetemi adjunktus, laszlo.adam.radanyi@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

[2]PhD, Egyetemi docens, laura.veres@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Matematikai Intézet, Analízis Intézeti Tanszék

Kivonat: *A fotovoltaikus rendszerek rohamos terjedése Magyarországon és világszerte is új kihívásokat hozott a napelemtelepek diagnosztikájában. A hagyományos, manuális vizsgálati módszerek nem képesek lépést tartani a több millió telepített panel által támasztott igényekkel. A cikk egy drónalapú, képalkotáson nyugvó diagnosztikai megoldást mutat be, amely ötvözi az infravörös és elektrolumineszcenciás vizsgálati technológiákat. A képfeldolgozás során élkereső és skeletonizációs algoritmusokat alkalmazunk a napelemsorok pontos azonosítására, majd gráfelméleti módszerekkel optimalizáljuk a drónok repülési útvonalát. Az így kialakított rendszer célja a vizsgálati idő és költség minimalizálása, valamint az automatizált hibadetektálás megbízhatóságának növelése.*

Kulcsszavak: *napelemdiagnosztika, dróntechnológia, képfeldolgozás, skeletonizáció, gráfelmélet*

Abstract: *The rapid expansion of photovoltaic systems worldwide and in Hungary has introduced new challenges in solar farm diagnostics. Traditional manual inspection methods cannot keep pace with the efficient examination of millions of panels. This paper presents a drone-based diagnostic solution that combines infrared and electroluminescence imaging technologies. Image processing techniques, including edge detection and skeletonization, are applied to accurately identify panel rows, while graph theory is utilized to optimize drone flight paths. The proposed system aims to minimize inspection time and costs while improving the reliability of automated fault detection.*

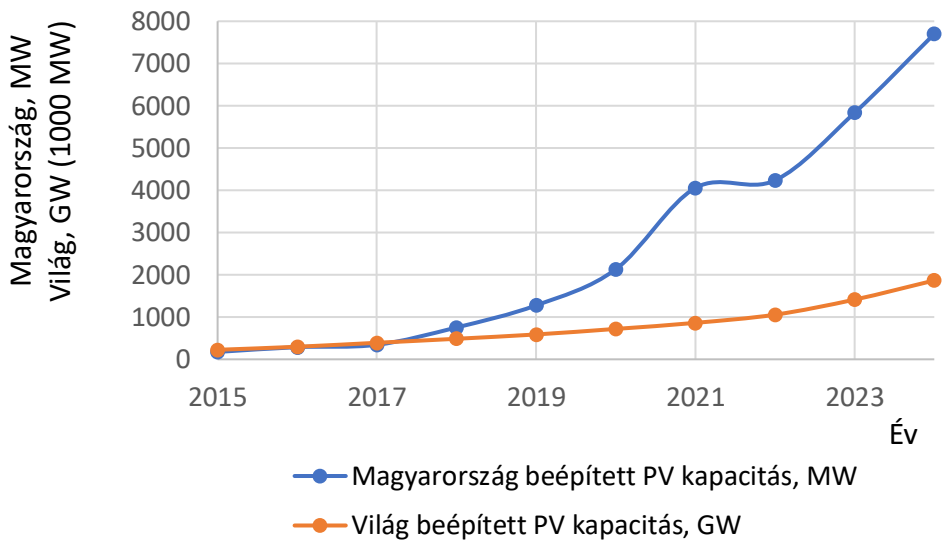
Keywords: *solar panel diagnostics, drone technology, image processing, skeletonization, graph theory*

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt 10 évben robbanásszerűen megnövekedett a telepített fotovoltaikus energiatermelés beépített kapacitása mind Magyarországon, mind pedig globálisan. Az 1. ábrán jól látszik, hogy 2015 és 2021 között Magyarország képes volt jelentősen megerősíteni a napenergia termelési potenciálját világviszonylatban is, míg 2021 és 2024 között a globális napenergia kapacitások robbanásszerű telepítési ütemét tudta követni. Összességében megállapítható, hogy a 2024-es év végére megközelítette, a 2025-ös évben pedig meg is haladta a 8000 MW-ot a magyarországi telepített fotovoltaikus áramtermelő kapacitás.

Ez a hatalmas növekedés és technológiai változás természetesen komoly technikai és technológiai kihívásokat is magába foglal. Jelen publikáció nem vizsgálja ennek a hatását a teljes villamosenergia rendszerre, hanem egy javaslatot tesz a napelemtelepek automatizáltabb diagnosztizálásának, valamint továbbfejlesztésére.

A több mint 8000 MW beépített fotovoltaikus kapacitás egyik oldalról azt jelenti, hogy több mint 30 millió már a beépített napelemek száma, a másik oldalról – ahogy az az 1. ábrán is látszik- a telepítések több mint ¾-e 5 éven belül történt, így várható, hogy a diagnosztizálás igénye az elkövetkező években a jelenlegi szinthez képest sokszoros lesz.



1. ábra: *Magyarország és a Világ beépített fotovoltaikus kapacitásának változása az elmúlt 10 évben [1, 2]*

A napelemek megfelelő diagnosztizálására, az elektromos és elektronikus mérésen kívül két főbb lehetőség van, az egyik a hőkamerás vizsgálata a napelem paneleknek, míg a másik a lumineszcenciás vizsgálat. Az előzőekben már említett telepített napelemszámok esetén könnyen látható, hogy a bejárással történő felvételkészítés a jövőben fejlesztésre szorul, a diagnosztika termelékenységének emelése szükséges. Természetesen a drónokkal végzett napelemdiagnosztikát már számtalan vállalkozás alkalmazza [3-8].

A publikáció a drónokkal történő, képalkotáson alapuló diagnosztikára tesz fejlesztési javaslatot, melyben mind a képelemzési lehetőségeket, mind pedig a gráfelméleti matematikai alapokat figyelembe veszi a drónok útvonalának meghatározásához, ami egyszerűbbé és automatikusabbá teszi a vizsgálati folyamatokat.

2. KÉPELEMZÉSES NAPELEMDIAGNOSZTIKA ALAPLEHETŐSÉGEI

Napjainkban, -ahogy az a bevezető részben már látható volt- nem csupán Magyarországon, hanem az egész világon, az elmúlt körülbelül 5 évben a beépített fotovoltaikus elektromos áramtermelő kapacitás mértéke ugrásszerűen megemelkedett. A drónokkal történő vizsgálati és diagnosztikai módszerek elterjedése több mint valószínű, hogy tovább fog terjedni az elkövetkező években. A két főbb vizsgálati lehetőség a hőkamerás IR vizsgálati lehetőség, valamint az elektrolumineszcenciás vizsgálati lehetőségek.

2.1. Hőkamerás (IR) vizsgálati lehetőség

A hőkamerás vizsgálati lehetőségekkel a következő dolgok vizsgálhatóak meg [9]:

Az első, és egyértelműen azonosítható az ún. „hot spot jelenség”, ami akkor fordul elő, amikor egy vagy több cella a panelen jelentősen melegebbé válik a többinél. Ez az eltérés sokszor csak néhány Celsius-fok, de hőkamerával már jól látható. A háttérben állhat gyártási hiba, mikrorepedés, szennyeződés (pl. madárürülék, por), vagy akár részleges árnyékolás is. Ha egy ilyen hot spot hosszabb ideig fennáll, a panel teljesítménye csökkenhet, extrém esetben pedig a hőhatás miatt maradandó károsodás is bekövetkezhet.

A következő, amit mindenképpen hasznos vizsgálni, a mechanikai sérülések, repedések. A hőképen feltűnő, szabálytalan hőmintázatok repedt vagy törött cellákra is utalhatnak. Ezek a

sérülések nem mindig láthatók a panel felületén, különösen, ha a burkolat nem tört át. Egy ilyen panel már nem működik megfelelően, de csak hőkamerás vizsgálattal lehet biztosan azonosítani.

A harmadik hibalehetőség, ami hőkamerás vizsgálattal is kimutatható a napelem rendszereken az a részben vagy teljesen kiesett sztringek. A nagyobb rendszerek moduljai sztringekbe vannak kötve. Ha egy sztring kiesik, az nemcsak az adott egység, hanem a kapcsolódó paneleken is teljesítménycsökkenést okozhat. A hőkamera megmutatja, ha egy területen azonos hőmérsékletű (de alacsonyabb teljesítményű) panelek sorakoznak – ez tipikusan sztringhiba jele. Ha csak egy-egy panel nem működik megfelelően, akkor is van lehetőség megvizsgálni az ún. hőeloszlási rendellenességeket, hiszen még ha a rendszer működik is, a hőkép megmutathatja, hogy bizonyos panelek nem termelnek olyan hatékonysággal, mint a többiek. Ez lehet az inverter részleges hibája, hibás csatlakozások, vagy egyéb rendszerhiba következménye.

Ezen felül kimutatható laza vagy hibás mechanikai rögzítés is – bár nem mindig látható a hőképen-, ha egy panel szokatlanul gyorsan felmelegszik napfény hatására, az utalhat arra, hogy nincs megfelelően szellőztetve – például laza vagy nem vízszintesen beállított rögzítése miatt.

2.2. Elektrolumineszcenciás vizsgálati lehetőség

Az elektrolumineszcenciás vizsgálat egyéb kiegészítő lehetőségeket ad a napelemek diagnosztikájához. Bizonyos hibák, például leválasztott modulok vagy sztringek, PID (Potential Induced Degradation) által zárlatos cellák, vagy hibás bypass diódák nem láthatók vizuális ellenőrzéssel, és hőkamerás vizsgálattal is csak minimális hőmérséklet-különbséget okoznak az aktív és inaktív részek között. Ez különösen alacsony -napenergia- besugárzás (low irradiance) esetén teszi őket nehezen vagy akár egyáltalán nem észlelhetővé, ami miatt szükség van elektrolumineszcenciás (EL) vizsgálatra, mert az félvezető szinten mutatja meg a hibákat, nem csak hőmérsékleti eltérések alapján von le következtetést [10, 11].

Ezen felül az EL elérhetősége jelentősen magasabb, mint az infravörös technológiáé, tekintve, hogy az időjárási viszonyok nagymértékben változnak a helyszíntől és a szélességi foktól függően [12] Az EL képalkotás korlátai egyik oldalról főleg a kameradetektor érzékenységéből adódnak a vizsgált hullámhosszon, valamint az intenzív szórt fény, -lényegében a napfény- jelenlétéből, aminek hatására a vizsgálatokat csak alacsony fényerősség mellett vagy éjszaka szabad elvégezni [11].

Nagyon fontos egy olyan rendszer kifejlesztése is, amely nappali EL-t tud végezni pilóta nélküli repülőgépek képalkotásával, melyre már történtek is javaslatok [11].

Összefoglalva a legoptimálisabb és a legpontosabb egy olyan diagnosztikai rendszer, amely mind az IR mind pedig az EL technológiát egyesíti, célszerűen nappali távolsági IR méréssel és éjszakai részletes és automatizált EL méréssel kombinálva (amennyiben a drónokkal kapcsolatos szabályozás erre lehetőséget ad), és a két mérési eredményt együttesen kiértékelve.

3. JAVASLAT DIAGNOSZTIZÁLÓ DRÓN ÚTVONALÁNAK MEGTERVEZÉSÉRE INFRAVÖRÖS ÉS ELEKTROLUMINESZCENCIA EGYÜTTES ALKALMAZÁSA ESETÉN

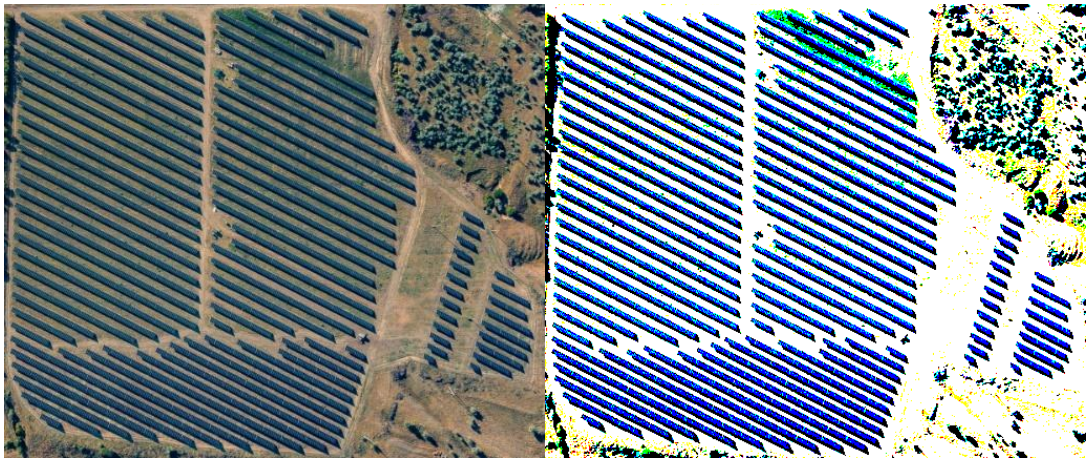
Napjainkban már rengeteg vállalkozás foglalkozik világszerte a drónokkal végzett napelem diagnosztikával. A drónok programozásával és az útvonaltervező algoritmusokkal kapcsolatban a publikációmban egy olyan javaslatot fogok tenni, amely elősegítheti a drón útvonalának automatizálását.

Az első pontban egy felülnézeti felvételt vizsgálok meg, hagyományos RGB kamerával készült. A 2. ábrán látható felvétel természetesen több kérdést is felvet. A legelső látványos dolog, hogy amennyiben napsütésben készül a felvétel, akkor természetesen tapasztalható árnyék is

több esetben, és sajnos ez az árnyék (alakra és nagyságra) nem minden sor esetében egyezik meg, ezért ezt az útvonal meghatározásánál figyelembe kell venni.

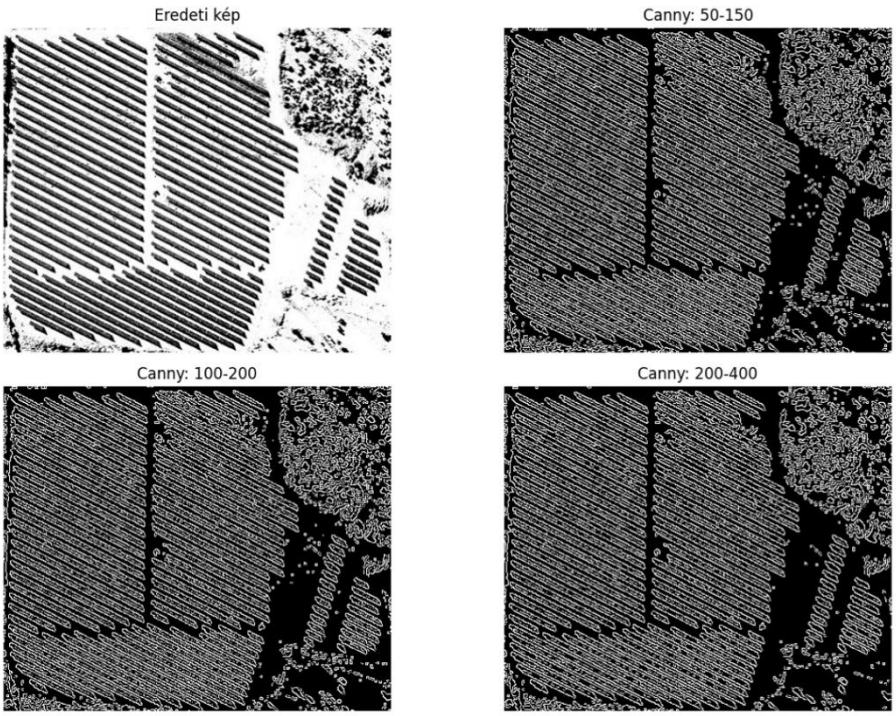
Ezen felül, és egyúttal emiatt, -a biztonság kedvéért- a drón kamera látószögéből meghatározott repülési magasságnál magasabban repüljön, hogy a drón és a felszerelt, lumineszcencia vizsgálatát végző kamera legyen távolabb a kiszámolt távolságnál. (Hogy minden esetben benne legyen a teljes napelem a kamera látószögében).

Első esetben mindenképpen szükséges legalább 4 olyan pont, amelynek stabilak a GPS koordinátái és azt -akár manuálisan kijelölve- be kell vinni a felvételen, hogy a GPS koordinátákat össze lehessen hozni a felvételen található pixelekkel. Ezt a folyamatot georeferálásnak hívják és több lehetőség is adódik a megvalósítására (pl. QGIS és ArcGIS szoftverek, [13, 14])



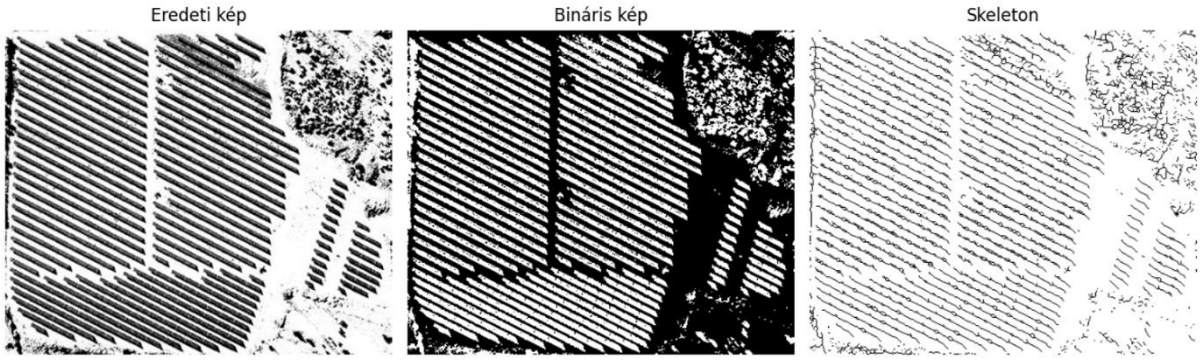
2. ábra: *Napelemes erőmű felülnézeti képe, valamint a felvétel emelt kontraszttal és fényerővel [15 alapján]*

Amennyiben elkészült a drónfelvétel és a hőkamerás felvétel, akkor a részletes útvonal megtervezéséhez először az a javaslatom, hogy egy élkereső algoritmust kell lefuttatni a képen. A Canny-algoritmust választottam [16] mert az már közel 40 éves, így rengeteg tapasztalat gyűlt már össze ezzel a témával kapcsolatban. Több érzékenységre futtattam le, az eredmények a 3. ábrán láthatóak.



3. ábra: *Napelemes erőmű felülnézeti képe és a Canny élképző algoritmus különböző érzékenységekkel lefuttatva.*

Jól látszik, hogy ahol erős árnyék jelenik meg, ott az éldetektálás több esetben 3 vonalat is jelez, ezzel megkönnyítve az árnyékból adódó zavarjelenség kezelését. A drón útvonalát úgy kell megtervezni, hogy az a lehető legrövidebb legyen és a vizsgálat pedig a lehető leggyorsabb. Ezen felül természetesen nem szabad figyelmen kívül hagyni a drón repülési idejét és a repülhető távolságát, ami tovább bonyolítja a vizsgálatot, amennyiben nem elegendő egy repülés egy drónnal a teljes napelemtelep megvizsgálására.



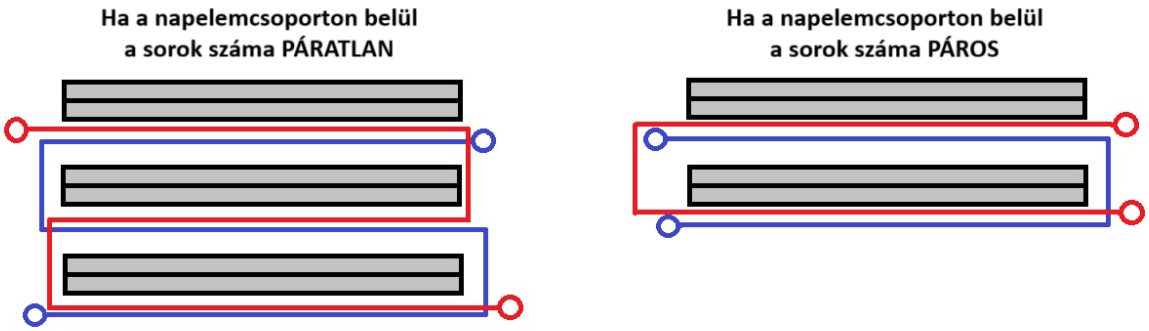
4. ábra: *Napelemes erőmű felülnézeti képe és a Skeleton képelemző algoritmus felhasználásával.*

Természetesen van lehetőség a skeletonizáció képelemző eljárás lefuttatására is (4. ábra). A skeletonizáció az objektum középvonalát határozza meg a bináris képen (csak fekete és fehér pixelekből álló – a szerző) a szélek fokozatos eltávolításával, miközben megőrzi a forma topológiai szerkezetét [17].

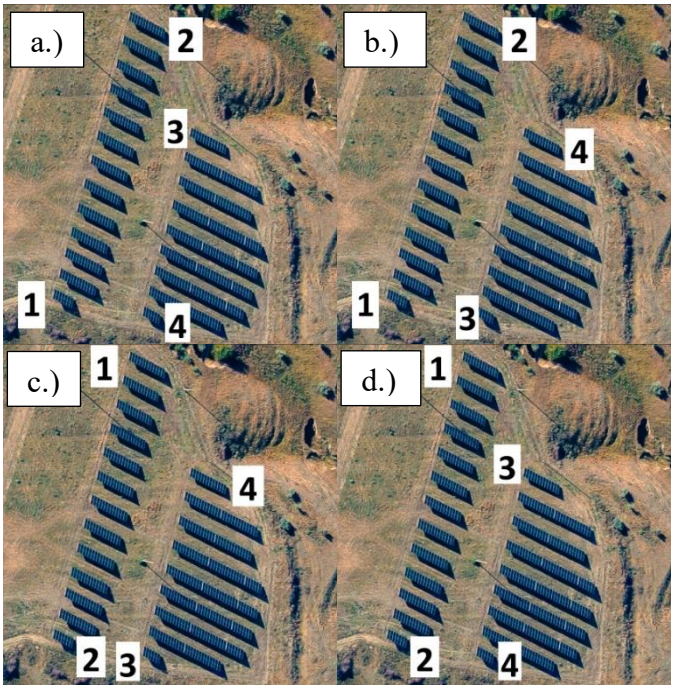
A napelemtelepen a sorok közötti egyenesek egyenletei és GPS kordináták alapján a repülési útvonal szoftveresen meghatározható. Ehhez olyan drónra van szükség, ami képes a nagypontosságú RTK (Real-Time Kinematic) helymeghatározásra.

A Gráfelméletet a repülési útvonal minimalizálására szükséges felhasználni. A 5. ábrán jól látható, hogy amennyiben a napelemcsoporton belül a sorok száma páratlan, akkor olyan gráf fa rajzolható fel, amelyen belül a gráf két végpontja a napelemcsoport két különböző oldalán található. A végpontok minden esetben lehetnek a drónok szempontjából kiinduló és megérkezési pontok is, a gráfok csúcsai pedig a napelemsorok végétől vannak kis távolságra, ahol a drónnal az irányváltást tervezzük.

Ha páros a napelemsorok száma, akkor a gráf fa végpontja és a kezdeti pontja a napelemcsoport azonos oldalán lesz megtalálható. Természetesen ennek a számításnak akkor van komolyabb jelentősége, ha a napelemsorok száma 100-as nagyságrendű.



5. ábra: *A gráfelmélet használhatósága a napelem vizsgáló drón útvonaltervezéséhez*



6. ábra: *A gráfelmélet felhasználásával a drón lehetséges útvonalai.*

Az 6. ábrából azt a következtetést is le kell vonni, hogy minden napelemcsoportba 4 külön-

böző ponton lehetséges a drónvizsgálat elindítása (2-2 gráf fa 2-2 végpontján), így a drón útvonalának minimalizálására ezáltal van lehetőség. Ha a napelemek sorok száma páros, akkor akár lehetőség van arra, hogy a drón útvonalát jelképező gráf egy Hamilton körön belül legyen (minden csúcsot egyszer érint és a kiinduló pontjába tér vissza). A képelemzés során egyszerűen meg kell állapítani a napelem sorok számát, elsősorban azt, hogy páros vagy páratlan számú sorból állnak. Amennyiben ez megvan, akkor lehet elkezdeni tervezni a drón útvonalát, ennek egyszerűsített szemléltetése az 5. ábrán látható. Itt mindössze egy belépési oldalt vizsgáltam meg, és két napelemcsoportot, mégis 4 különböző repülési útvonalra van lehetőség már ezek alapján is. Az optimális drónútvonal meghatározásához ezek alapján egy komplex keresőalgoritmus megalkotására van szükség.

A 6. ábrán mindkét napelemcsoport páratlan számú sorból áll, azért a belépési és a kilépési pontok ellenkező oldalon lesznek. Az ábrán látható útvonalak alapján célszerű vagy az a.) vagy a c.) útvonalat választani, mert mindkét esetben a 2. és a 3. pont közel van egymáshoz.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmány a fotovoltaikus rendszerek rohamos terjedéséből adódó diagnosztikai kihívásokra kínál egy újabb kiegészítő megoldási javaslatot. A hagyományos, manuális ellenőrzési módszerek nem képesek hatékonyan kezelni a több millió napelem vizsgálatát, ezért a publikáció a drónalapú diagnosztikai rendszert továbbfejlesztését és alkalmazását javasolja. A legpontosabb rendszer ötvözi az infravörös és elektrolumineszcenciás képalkotási technológiákat, valamint fejlett képfeldolgozási módszereket például az élkeresést és a skeletonizációt a napelemsorok pontos azonosítására. A drónok repülési útvonalát gráfelméleti algoritmusok segítségével is optimalizálhatjuk, minimalizálva a vizsgálati időt és költségeket. Az ismertetett megközelítés célja az automatizálás növelése, a hibadetektálás megbízhatóságának javítása és a diagnosztikai folyamat hatékonyságának fokozása. A jövőbeni kutatások az RTK-alapú valós idejű navigáció és dinamikus útvonaltervező algoritmusok fejlesztésére irányulnak.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Our World in Data: *Installed Solar PV Capacity.* 2025. [Online]. Elérhető: https://ourworldindata.org/grapher/installed-solar-pv-capacity#sources-and-processing [Megtekintve: 2025.11.30.].

[2] Statista: *Connected and Cumulated Photovoltaic Capacity in Hungary.* 2025. [Online]. Elérhető: https://www.statista.com/statistics/497516/connected-and-cumulated-photovoltaic-capacity-in-hungary/ [Megtekintve: 2025.11.30.].

[3] Sitemark: *About Sitemark.* 2025. [Online]. Elérhető: https://www.sitemark.com/company/about [Megtekintve: 2025.11.30.].

[4] DJI Enterprise: *Photovoltaic Power Plant Inspection.* 2025. [Online]. Elérhető: https://enterprise.dji.com/inspection/photovoltaic-power-plant [Megtekintve: 2025.11.30.].

[5] Aerodetect: *About Aerodetect.* 2025. [Online]. Elérhető: https://aerodetect.lt/en/about [Megtekintve: 2025.11.30.].

[6] SkyVisor: *Drone Solar Panel Inspections – Fast, Safe, Accurate.* 2025. [Online]. Elérhető: https://www.skyvisor.ai/drone-solar-panel-inspections-fast-safe-accurate/ [Megtekintve: 2025.11.30.].

[7] Hepta Insights: *Kaamos PV Solar Panel Inspection by Using Drones – Case Study.* 2025. [Online]. Elérhető: https://heptainsights.com/case-study/kaamos-pv-solar-panel-inspection-by-using-drones/ [Megtekintve: 2025.11.30.].

[8] Applus: *Solar Panel Drone Inspection.* 2025. [Online]. Elérhető: https://www.applus.com/global/en/what-we-do/sub-service-sheet/solar-panel-drone-inspection [Megtekintve: 2025.11.30.].

[9] AIR-DIA MED: *Hőkamerás drónos felmérés napelemeknél – gyors hibakeresés felesleges bontás nélkül.* 2025. [Online]. Elérhető: https://air-dia.hu/hokameras-dronos-felmeres-napelemeknel-gyors-hibakereses [Megtekintve: 2025.11.30.].

[10] KÖNTGES, M. et al.: *Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications – IEAPVPS, Report.* 2017.

[11] BENATTO, G.A.D.R. et al.: *Drone-Based Daylight Electroluminescence Imaging of PV Modules.* IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 10, No. 3, pp. 872–877, 2020. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2020.2978068.

[12] KOCH, S., WEBER, T., SOBOTTKA, T., FLADUNG, A., CLEMENS, P., BERGHOLD, J.: *Outdoor Electroluminescence Imaging of Crystalline Photovoltaic Modules: Comparative Study between Manual Ground-Level Inspections and Drone-Based Aerial Surveys.* In: 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2016, pp. 1736–1740.

[13] QGIS Development Team: *QGIS Geographic Information System, Georeferencer Plugin.* Open Source Geospatial Foundation Project. Licence: GNU GPL. Elérhető: https://www.qgis.org.

[14] Esri: *ArcGIS Pro, Georeference Raster tool documentation.* [Online]. Elérhető: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/imagery/georeferencing-a-raster-automatically-to-another-raster.htm [Megtekintve: 2025.11.30.].

[15] BURAC, V.: *Aerial view of a large solar panel farm.* Unsplash. [Online]. Elérhető: https://unsplash.com/photos/aerial-view-of-a-large-solar-panel-farm-rIVlxt5ROrM [Megtekintve: 2025.11.30.].

[16] CANNY, J.: *A Computational Approach to Edge Detection.* IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 6, pp. 679–698, 1986.

[17] Educative.io: *What is skeletonization in image processing?* [Online]. Elérhető: https://www.educative.io/answers/what-is-skeletonization-in-image-processing [Megtekintve: 2025.11.30.].

KÉPELEMZÉSI LEHETŐSÉGEK A NAPELEMEK DIAGNOSZTIKÁJÁBAN

IMAGE ANALYSIS OPTIONS IN DIAGNOSTICS OF PHOTOVOLTAIC PANELS

RADÁNYI László Ádám

PhD, Egyetemi adjunktus, laszlo.adam.radanyi@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

Kivonat: *Az elmúlt években a fotovoltaikus rendszerek telepített kapacitása jelentősen megnőtt, ami új kihívásokat hozott a diagnosztikai módszerek terén. A tanulmány áttekinti a képalapú vizsgálati lehetőségeket, különös tekintettel az infravörös termográfiára és az elektrolumineszcenciás képalkotásra, valamint ezek alkalmazhatóságára a leggyakoribb hibák – például repedések, delamináció, PID és LeTID – detektálásában. Bemutatásra kerülnek a drónos és nappali fényben alkalmazható EL technológiák, továbbá a képfeldolgozás előkészítő lépései, mint a zajcsökkentés és geometriai korrekció. A mesterséges intelligencia integrációja (CNN, HoG, GAN) ígéretes megoldást kínál az automatikus hibadetektálásra és a képminőség javítására. A tanulmány hangsúlyozza a fejlett képalkotási technikák és az AI-alapú elemzés kombinációjának jelentőségét a nagyléptékű PV rendszerek megbízható üzemeltetéséhez.*

Kulcsszavak: *fotovoltaikus diagnosztika, elektrolumineszcencia, infravörös termográfia, képfeldolgozás, mesterséges intelligencia.*

Abstract: *The rapid expansion of photovoltaic (PV) systems has created new challenges for diagnostic methods. This paper reviews image-based inspection techniques, focusing on infrared thermography and electroluminescence (EL) imaging, and their applicability in detecting common failures such as cracks, delamination, PID, and LeTID. Advanced approaches, including drone-based EL imaging and daylight-compatible methods, are discussed alongside image preprocessing steps such as noise reduction and geometric correction. The integration of artificial intelligence (CNN, HoG, GAN) offers promising solutions for automated fault detection and image quality enhancement. The study highlights the importance of combining advanced imaging techniques with AI-driven analysis to ensure reliable operation and maintenance of large-scale PV systems.*

Keywords: *photovoltaic diagnostics, electroluminescence imaging, infrared thermography, image processing, artificial intelligence.*

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt 10, de különösen az elmúlt 5 évben robbanásszerűen megnövekedett a telepített fotovoltaikus energiatermelés beépített kapacitása mind Magyarországon, mind pedig globálisan. A magyarországi telepített fotovoltaikus áramtermelő kapacitás 2024 végére megközelítette, a 2025-ös évben pedig meg is haladta a 8000 MW-ot (2015-ben 175 MW volt mindössze), a trendek pedig globálisan nézve is hasonlóak [1, 2].

Jelen publikáció áttekinti napelemtelepek automatizáltabb diagnosztizálásának módszereit, valamint az elkészített felvételek utólagos javítási lehetőségeit egyaránt.

A több mint 8000 MW beépített fotovoltaikus kapacitás Magyarországon egyik oldalról azt jelenti, hogy tízmilliós nagyságrendű már a beépített napelemek száma. A másik oldalról a telepítések több mint ¾-e 5 éven belül történt, így várható, hogy a diagnosztizálás igénye az elkövetkező években a jelenlegi szinthez képest sokszoros lesz.

A napelemek megfelelő diagnosztizálására, az elektromos és elektronikus mérésen kívül két főbb lehetőség van, az egyik a hőkamerás vizsgálata a napelem paneleknek, a másik pedig a lumineszcenciás vizsgálat. Az előzőekben már említett telepített napelemszámok esetén könnyen látható, hogy a bejárással történő felvételkészítés a jövőben fejlesztésre szorul, a diagnosztika termelékenységének emelése szükséges pl. a drónok használatának további emelésével.

2. DIAGNOSZTIZÁLÁSI LEHETŐSÉGEK ÉS ALKALMAZHATÓSÁGUK A HIBÁK DETEKTÁLÁSÁBAN NAPELEMES RENDSZEREKNÉL

A napelemeken a különböző hibák, különböző vizsgálati lehetőségekkel deríthetőek fel, amelyeket két főbb csoportra osztottam, kamerás (képalkotással) vizsgálati lehetőségek és nem képalkotáson alapuló vizsgálati lehetőségek.

2.1 Nem kamerás vizsgálaton alapuló diagnosztikai lehetőségek

A vizuális vizsgálattal észlelhetőek többek között a delamináció, a barnulás, és a buborékképződés a modul elülső- és hátoldalán. Ezen felül lehetőség van törött részek, repedések és elszíneződések az antireflexiós bevonaton a modul celláiban. Észlelhetőek a metallizációs rész esetleges beégései vagy oxidációja, a modul kereteknek a hajlítása, törése, vagy karcolódása és természetesen az elmozdulása. A csatlakozók és a vezetékek vizsgálatára is van lehetőség ilyen módon, észlelhető a csatlakozódoboz korróziója, oxidációja és esetleges meglazulása, valamint a csatlakozóknál és/vagy a vezetékekben az elektromos alkatrészek törékenysége, leválása vagy esetleges hiánya [3 alapján].

Az áram – feszültség görbe (IV) tanulmányozása segíthet azonosítani a napelem panel degradációját. Az alacsonyabb zárlati áram utalhat a bevonat hibájára vagy delaminációra, az alacsonyabb üresjárati feszültség pedig utalhat a cellakapcsolatok hibájára, a lépcsős IV-görbe pedig repedések vagy jelentős eltérések miatt alakulhat ki. Azonban ez a diagnosztikai módszer használhatatlan lehet, ha az eltérés kicsi, és nem mindig tudja azonosítani a hibák pontos helyét [3 alapján].

2.2 Kamerás vizsgálaton alapuló diagnosztikai lehetőségek

Az IR (hőkamerás) képalkotás elsősorban nagy léptékű kültéri alkalmazásokra, valamint nagy mennyiségű mérésre alkalmas. Az IR képalkotás segítségével a zárlatos területek azonosítására is van lehetőség, azonban a hibák pontos helyének meghatározása sok esetben nehéz, ezen felül sokszor nem élesek a felvételek a hőmérsékleti határoknál, hanem elmosódnak [3 alapján].

EL (Elektrolumineszcens) képalkotás egy gyors, hatékony és precíz beltéri (ez változóban van a friss kutatások alapján) karakterizálási módszer. Képes lokalizálni mikrorepedéseket, ujjmegszakadásokat és egyéb hibákat, viszont a zárlatos (shunted) régiók elmosódottan jelennek meg az EL felvételen.

A két fenti módszeren felül létezik még több, szintén gyors és hatékony módszer, az első a PL (Fotolumineszcens) képalkotás, ami képes repedések detektálására. A zárlatos régiók szintén erősen elmosódottak a képeken. A következő lehetőség az UV fluoreszcens képalkotás (UV fluorescence imaging), amely képes detektálni az ún. snail tracks-eket, elszíneződéseket és repedéseket. Ennél a módszernél a fluoreszcens hatás csak hosszú kültéri expozíció után alakul ki a modulokban és nem alkalmas PID (Potential Induced Degradation) észlelésére, valamint hibás bypass dióda kimutatására sem [3 alapján].

3. ELEKTROLUMINESZCENCIA SEGÍTSÉGÉVEL MEGHATÁROZHATÓ FŐBB HIBAJELENSÉGEK

Először célszerű áttekinteni azokat a főbb hibajelenségeket, amiket az elektrolumineszcens képalkotással lehet meghatározni. Nagyon sok potenciál van ebben a technológiában, ami részben annak köszönhető, hogy nagyon sok hiba azonosítható a felhasználásával. A hibákat és az EL hibaképeket tartalmazza a következő felsorolás [4]:

Repedések (Cracks): A repedések vonalszerű hibaként jelenhetnek meg a napelemen, vagy megnövekedett ellenállást okozhatnak, ami az EL intenzitás egyenletes csökkenéséhez vezet. Ha a repedés izolálja a területet elektromos értelemben, akkor az teljesen sötétnek látszik az EL képen [5].

A második meghatározható hibajelenség az ún. PID zárlat (PID shunting, Potential Induced Degradation, Potenciál indukált degradáció), ami az elmúlt évtizedben komoly megbízhatósági problémává vált PV rendszereknél. Ez a hiba a modul és a föld között szivárgó áramot okoz a feszültségstressz hatására [6]. Az EL képen a PID sötét foltokként jelenik meg a modul szélein vagy sarkaiban, az érintett cellák csökkent vagy hiányzó lumineszcenciával látszanak.

A napelem degradációja bekövetkezhet fény vagy emelt hőmérséklet hatására egyaránt. A LID (Light-Induced Degradation, Fény-indukált degradáció) a bór-oxigén hibák miatt fokozott rekombinációt okoz, ami az EL intenzitás csökkenéséhez vezet [7]. Másik hibalehetőség a LeTID (Light and Elevated Temperature Induced Degradation, Fény és magas hőmérséklet által indukált degradáció) elsősorban kültéren telepített napelemeken jelentkező degradáció, amely magas hőmérsékleten, erős besugárzás mellett, hosszú fényexpozíció hatására gyorsul fel. Megelőzés nélkül akár 10%-os hatásfokcsökkenést okozhat. EL képen enyhe, egyenletes és kiterjedt lumineszcencia-csökkenés látszik, jellegzetes mintázat nélkül [8, 9].

A következő EL segítségével vizsgálható hibajelenség a delamináció, amely a napelemen egy rés a cella és az üveg között. Ez az EL intenzitás csökkenését okozza az érintett területen. Azonban az EL képen látható sötét foltok nem mindig arányosak a delamináció mértékével [10]. EL vizsgálattal lehetőség van detektálni a BIF (Busbar Interconnect Failure, Busbar csatlakozás hibája) hibajelenséget is. Ebben az esetben a gyűjtősín hibája miatt az áram eloszlása egyenetlenné válik. Az EL képen az aktív busbar közelében a legnagyobb az EL fényesség, amely távolodva fokozatosan csökken [11].

Természetesen nem szabad figyelmen kívül hagyni azt a tényt, hogy a napelem a működése során évről-évre veszít a teljesítményéből. Több szakirodalom is foglalkozik a témával, Neha Bansal és Munkatársai a legkülönbözőbb földrajzi helyszíneken lévő eredményeket vizsgálták meg a degradáció szempontjából. Publikációjukban érdekesség, hogy összehasonlították a tetőre szerelt és a földre telepített napelemrendszereket is. Azt tapasztalták, hogy a földre szerelt napelemrendszerek degradációja alacsonyabb (100 kW alatt kb. 1,45%, 100 kW felett kb. 1,2 % évente) mint a tetőre szerelt napelemrendszereké. (100 kW alatt kb. 2,25%, 100 kW felett kb. 1,8 % évente) [12].

A felsorolt hibajelenségeket, és azok napelemek teljesítményére gyakorolt hatását tartalmazza a következő, 1. táblázat.

1. táblázat: *Teljesítményveszteségek a különböző meghibásodások hatására [13, 14]*

Hiba megnevezése	**Teljesítményveszteségek különböző meghibásodások esetén**	
	Alapérték, %	**Maximum érték, %**
Cella repedés	1	15
Delamináció	1	30
PID	10	70
Bypass dióda vagy csatlakozódoboz hibája	33	70
Hotspot	2	20
LeTID	7	10
Nem megfelelő telepítés	5	20

3.1 Elektrolumineszcenciás vizsgálat alkalmazhatósága nappali fényviszonyok között

Az előző részben felsorolt előnyök mellett az elektrolumineszcenciás vizsgálati megoldás általában csak beltéren sötétített kamrában – vagy kültéren (alkonyattól hajnalig) alkalmazható, mivel a kristályos szilícium lumineszcencia jele egy nagyságrendekkel alacsonyabb, mint a napfényé, ezért a vizsgálat ilyenkor komoly képfeldolgozási folyamatot is igényel.

Benatto és Munkatársai 2020-ban egy hexacopter drónra szerelt elektrolumineszcens (EL) képalkotó rendszert mutattak be, melynek középpontjában egy 640 x 512 pixel felbontású InGaAs kamera volt [15]. A rendszer lényege, hogy a napelemeket 60 Hz frekvenciájú feszültséggel előfeszítik és a drónra szerelt kamera másodpercenként 120 felvételt készít el. Ez lehetővé teszi, hogy másodpercenként 60, úgynevezett EL/BG képpárt hozzanak létre vizsgálati célra (EL: elektrolumineszcencia kisugárzás, BG: Background/Háttér). Természetesen a felvételeket utófeldolgozásnak is alá kell vetni (átlagolás, háttérkivonás stb.) a jel zaj arány javítása és a napfény hatásának kiszűrése céljából. A 120 felvétel per másodperc sebesség azért is fontos egyik oldalról, hogy a napfény változásából eredő hibák minimalizálhatóak legyenek, másik oldalról pedig a drón mozgásának kompenzációja miatt. Ezen felül, ennyi elkészült felvétel már elegendő adatot biztosít az utólagos átlagoláshoz és zajcsökkentéshez.

A következő években fontos volt az EL vizsgálat hatékonyságának és pontosságának a további emelése. A vizsgálat laboratóriumi körülmények között úgy zajlik, hogy a legtöbb esetben egy sötét kamrát kell alkalmazni, amihez a már beépített napelemeket le kell szerelni és el kell szállítani a laboratóriumba. Az 'in situ' vizsgálatokkal kapcsolatban több kutatás készült és ezzel együtt több új módszer is ki lett fejlesztve.

Feng és Munkatársai 2025-ben egy kontaktus nélküli, napfénnyel gerjesztett ún. Suns-EL képalkotási módszert mutattak be, amely lehetővé teszi a PV modulok vizsgálatát normál üzem közben, változó napsütéses körülmények között. A megközelítés részleges árnyékolást alkalmaz, így az erősen megvilágított cellák által termelt fotoindukált feszültség gerjeszti az árnyékos területeket, külső áramforrás nélkül. A képminőség javítása érdekében két stratégia került kidolgozásra: egy kétlépcsős képfeldolgozó keretrendszer a háttérzaj eltávolítására és egy szűrőválasztási módszer, amely a spektrális komponenseket és energiamegoszlást optimalizálja. Kültéri kísérletekkel igazolták, hogy a módszer jelentősen növeli a képek egységességét és a hibák láthatóságát, valamint nagy alkalmazkodóképességet mutat különböző fényviszonyok mellett, így megbízható ellenőrzést biztosít a PV modulok normál működése közben [16].

Hasonló elvet mutattak be Carpintero és Munkatársai 2025-ben. Egy olyan EL vizsgálati módszert alkottak meg, amely nappali fényben is képes dolgozni, sőt, az EL vizsgálathoz szükséges külső áramforrás igényt képes a napelemtelep többi stringje által termelt elektromos energiából biztosítani. A vizsgálat előnyei kézenfekvőek, egyszerű a működésük, valamint nincs szükség külső áramforrásra a vizsgálatok elvégzéséhez. Ezen felül nem kell a hagyományosan, sötét kamrában végzett EL vizsgálathoz hasonlóan szétszerelni a napelemtelepet, in situ vizsgálat is lehetséges. (A szerelés elkerülhetősége csökkenti a napelempanelek sérülésének a kockázatát is. Az eredményeik biztatóak, vizsgálataikat változó besugárzási és hőmérsékleti körülmények között is tesztelték, a laboratóriumi "sötétkamrás" mérésekkel összehasonlítva is jó korrelációt tapasztaltak [17].

3.2 Az elkészült felvételek előkészítése az elemzéshez

A drónos és akár a nem drónos vizsgálati lehetőségekkel kapcsolatban fontos, hogy a különböző perspektívákból rögzített napelemek trapéz korrekciója elvégezhető legyen a felvételen a további képelemzéshez. Ehhez írják le a matematikai modellt a Yahya és Munkatársai [18].

Az automatikus hibadetektálás AI-alapú rendszereiben kulcsfontosságú lépés az elkészült felvételek előfeldolgozása, mert javítja a képminőséget és előkészíti az adatokat a feldolgozó

algoritmusok számára, valamint emeli az AI pontosságát. Ezen felül segít a nyers képek zajcsökkentésében, valamint a releváns információk kiemelésében. A kép-előfeldolgozási technikák közül a legfőbb pontokat az alábbi felsorolás tartalmazza ([19] alapján).

- **Zajcsökkentés:** A nyers képek zaját csökkentik pl. *Gaussian szűrés* (magas frekvenciás zaj csökkentése) és *Median szűrés* („só-bors zaj" eltávolítása).
- **Képjavítás:** Kontraszt- és fényerő-korrekció, hisztogram kiegyenlítés, élesítés a hibák jobb láthatóságáért.
- **Standardizálás:** Méret, szín és intenzitás egységesítése a gépi tanulási modellekhez.
- **ROI (region of interest) izolálása:** Szegmentálás (küszöbölés, élkeresés – pl. Canny, Sobel) a napelemek és hibás területek kiemelésére.
- **Adatbővítés:** Forgatás, tükrözés, vágás a tanítóadatok növelésére.
- **Normalizálás:** Jellemzők (textúra, forma, intenzitás) skálázása (pl. min–max).
- **Annotáció:** Képek címkézése hibák jelenlétével, majd AI modellek tanítása és tesztelése.

4. MESTERSÉGES INTELLIGENCIA HASZNÁLATÁNAK LEHETŐSÉGEI A NAPELEM DIAGNOSZTIKA SORÁN KÉSZÜLT FELVÉTELEK KÉPFELDOLGOZÁSÁBAN

A publikáció előző részében már említésre került, hogy a két legfőbb napelem diagnosztikához használható képrögzítési eljárás az infravörös felvételek (IR) valamint az elektrolumineszcencia alapján készült felvételek (EL). Mind a kettő típus esetén van lehetőség az elkészült felvételek feljavítására.

Az IR hőkamerás felvételek vizsgálatára kitűnő deep learning modellek (például ANN Artificial Neural Networt, mesterséges neurális háló) állnak rendelkezésre. E.A. Ramadan és Munkatársai egy innovatív Vision Transformer (ViT) alapú modellt javasoltak a fotovoltaikus modulok hibáinak detektálására és osztályozására infravörös termográfiás (IR) képek alapján [20]. A módszer előfeldolgozási lépéseket (például éltompítás és adatnövelés) alkalmaz a képminőség és az osztályegyensúly javítására. A modell kiemelkedő teljesítményt ért el: 98,23 % pontosságot két osztály (hibás/nem hibás) esetén, 96,19 %-ot tizenegy hibatípus osztályozásában, és 95,55 %-ot az összes vizsgált (12) osztály figyelembevételével.

Az IR felvételek a másik oldalról képesek jelentős segítséget nyújtani a napelemtelep üzemeltető csapatok számára és egyben képes is lehet javaslatokat is megfogalmazni a karbantartási folyamathoz. Jaffery és Munkatársai egy infravörös termográfián alapuló prediktív hibadiagnosztikai rendszert javasoltak fotovoltaikus modulokhoz [21]. A módszer a hőkamerás képek pixel szintű elemzését végzi, majd fuzzy logikai szabályrendszer segítségével azonosítja és osztályozza a túlmelegedésből eredő hibákat. A megközelítés célja nemcsak a hibák detektálásán felül, a karbantartási döntések támogatása is.

Az EL képek felhasználhatóságával kapcsolatban is folyamatosak a kutatások. Yousif és Al-Milaji a megalkotott egy hibrid modellt, amellyel az elkészített EL képekből képes nagy pontosságú hibadetektálásra [22]. Ez a modell a konvolúciós neurális hálózatok (CNN) és a Histogram of Oriented Gradients (HoG) jellemzők integrációján alapul, célja a képalapú hibadetektálás pontosságának növelése. A CNN automatikusan tanulja meg a komplex mintázatokat és textúrákat, míg a HoG kézi jellemzőket biztosít az élek és irányok statisztikájáról. A két megközelítés kombinációja robusztusabb teljesítményt eredményez, különösen korlátozott adathalmazok esetén, és hatékony megoldást kínál fotovoltaikus rendszerek hibáinak felismerésére.

Az elektrolumineszcencia (EL) képek minőségének javítására Dwivedi és Munkatársai generatív adverszáriális hálózatot (GAN) alkalmaztak, amely képes a felbontás növelésére és a

zaj csökkentésére [23]. A javasolt super-resolution megközelítés (ESRGAN) jelentősen javította a képminőséget, és felülmúlta a hagyományos interpolációs módszereket.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A fotovoltaikus rendszerek rohamos terjedése új kihívásokat hozott a diagnosztikai módszerek terén. A tanulmány bemutatta a képalapú vizsgálati technikák – különösen az infravörös termográfia és az elektrolumineszcenciás képalkotás – szerepét a hibadetektálásban, valamint az ezekhez kapcsolódó képfeldolgozási és mesterséges intelligencia alapú megoldásokat.

Az elemzés rámutatott, hogy a hagyományos vizsgálati módszerek mellett a drónos és nappali fényben alkalmazható EL technológiák, valamint az AI-alapú hibafelismerés jelentős mértékben növelhetik a diagnosztika hatékonyságát és pontosságát. A jövőben a fejlett képalkotási eljárások és az automatizált adatfeldolgozás integrációja kulcsfontosságú lesz a nagyléptékű PV rendszerek megbízható üzemeltetéséhez és karbantartásához.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Our World in Data: *Installed Solar PV Capacity.* 2025. [Online]. Elérhető: https://ourworldindata.org/grapher/installed-solar-pv-capacity#sources-and-processing [Megtekintve: 2025.11.30.].

[2] Statista: *Connected and Cumulated Photovoltaic Capacity in Hungary.* 2025. [Online]. Elérhető: https://www.statista.com/statistics/497516/connected-and-cumulated-photovoltaic-capacity-in-hungary/ [Megtekintve: 2025.11.30.].

[3] AKRAM, M.W., LI, G., JIN, Y., CHEN, X.: *Failures of Photovoltaic modules and their Detection: A Review.* Applied Energy, Vol. 313, 1 May 2022, Article 118822. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.118822.

[4] MAHDAVIPOUR, Z. (2024). *Defect inspection of photovoltaic solar modules using aerial electroluminescence (EL): A review*. *Solar Energy Materials and Solar Cells, 278*, Article 113210. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.113210

[5] K.M. LIN, H.H. LIN, Y.T. LIN, *Development of a CNN-based hierarchical inspection system for detecting defects on electroluminescence images of single-crystal silicon photovoltaic modules*, Mater. Today Commun. 31 (2022) 103796, https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103796.

[6] L. KOESTER, S. LINDIG, A. LOUWEN, A. ASTIGARRAGA, G. MANZOLINI, D. MOSER, *Review of photovoltaic module degradation, field inspection techniques and technoeconomic assessment*, Renew. Sustain. Energy Rev. 165 (2022) 112616, https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112616.

[7] FAHRLAND, C., LUDWIG, Y., KERSTEN, F., PETTER, K. Sponge LID—A new degradation mechanism? In: *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2014, pp. 135–139. https://doi.org/10.1109/PVSC.2014.6925400.

[8] DECEGLIE, M.G., SILVERMAN, T.J., JOHNSTON, S.W., RAND, J.A., REED, M.J., FLOTTEMESCH, R., REPINS, I.L. Light and elevated temperature induced degradation (LeTID) in a utility-scale photovoltaic system, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 10 (2020) 1084–1092. https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.2989168.

[9] KERSTEN, F., ENGELHART, P., PLOIGT, H.C., STEKOLNIKOV, A., LINDNER, T., STENZEL, F., MÜLLER, J.W. Degradation of multicrystalline silicon solar cells and modules after illumination at elevated temperature, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 142 (2015) 83–86.

[10] SHIODA, T. Delamination failures in long-term field-aged PV modules from point of view of encapsulant. *NREL PV Module Reliability Workshop*, 2013.

https://doi.org/10.21832/9781845414122-016.

[11] COLVIN, D.J., SCHNELLER, E.J., DAVIS, K.O. Impact of interconnection failure on photovoltaic module performance, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 29 (2021) 524–532. https://doi.org/10.1002/pip.3401.

[12] N. BANSAL, S. P. JAISWAL, and G. SINGH, "Comparative investigation of performance evaluation, degradation causes, impact and corrective measures for ground mount and rooftop solar PV plants – A review," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 47, Oct. 2021, Art. no. 101526. doi: 10.1016/j.seta.2021.101526.

[13] I. HØIAAS, K. GRUJIC, A. G. IMENES, I. BURUD, E. OLSEN, and N. BELBACHIR, "Inspection and condition monitoring of large-scale photovoltaic power plants: a review of imaging technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 161, 2022, Art. no. 112353. doi: 10.1016/j.rser.2022.112353.

[14] D. MOSER, M. DEL BUONO, W. BRESCIANI, E. VERONESE, U. JAHN, M. HERZ, E. JANKNECHT, E. NDRIO, K. DE BRABANDERE, and M. RICHTER, *Technical Risks in PV Projects*, Solar Bankability Project, 2016. [Online]. Available: https://www.tuv.com/content-media-files/master-content/services/products/p06-solar/solar-downloadpage/solar-bankability_d1.1_d2.1_technical-risks-in-pv-projects.pdf.

[15] BENATTO, G. A. D. R., MANTEL, C., SPATARU, S. V., SANTAMARIA LANCIA, A. A., RIEDEL, N., THORSTEINSSON, S., POULSEN, P., PARIKH, H. R., FORCHHAMMER, S., SÉRA, D.: *Drone-Based Daylight Electroluminescence Imaging of PV Modules.* IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 10, No. 3, pp. 872–877, 2020. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2020.2978068.

[16] FENG, ZIXUAN, YE, NAN, ZHAO, BOWEN, CHAI, DONGYUAN, YANG, JIANGXIN, CAO, YANPENG: *A high-quality Suns-EL imaging method for operating photovoltaic modules under variable sunlight conditions.* Solar Energy, Vol. 288, 1 March 2025, Article 113224. DOI: 10.1016/j.solener.2024.113224.

[17] CARPINTERO, L.A., TERRADOS, C., GONZALEZ-FRANCÉS, D., SULCA, K.P., ALONSO, V., GONZALEZ, M.A., MARTÍNEZ, O.: *Electroluminescence inspections of PV modules and strings by a self-powering configuration in daylight mode.* Solar Energy, Vol. 301, 15 November 2025, Article 113913. DOI: 10.1016/j.solener.2025.113913.

[18] YAHYA, Z., SEBARI, I., HAJJI, H., ANIBA, G., EL BOUCHINI-IDRISSI, S.: *Applied imagery pattern recognition for photovoltaic modules' inspection: A review on methods, challenges and future development.* Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 52, Part A, August 2022, Article 102071. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102071.

[19] BALACHANDRAN, GURUKARTHIK BABU, DEVISRIDHIVYADHARSHINI, MUTHU ESHWARAN RAMACHANDRAN, R. SANTHIYA: *Comparative investigation of imaging techniques, pre-processing and visual fault diagnosis using artificial intelligence models for solar photovoltaic system – A comprehensive review.* Measurement, Vol. 232, 15 June 2024, Article 114683. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114683

[20] RAMADAN, E.A., MOAWAD, N.M., ABOUZALM, B.A., SAKR, A.A., ABOUZAID, W.F., EL-BANBY, G.M.: *An innovative transformer neural network for fault detection and classification for photovoltaic modules.* Energy Conversion and Management, Vol. 314, 15 August 2024, Article 118718. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.118718.

[21] JAFFERY, Z.A., DUBEY, A.K., IRSHAD, HAQUE, A.: *Scheme for predictive fault diagnosis in photo-voltaic modules using thermal imaging.* Infrared Physics & Technology, Vol. 83, June 2017, pp. 182–187. DOI: 10.1016/j.infrared.2017.03.004.

[22] YOUSIF, H., AL-MILAJI, Z.: *Fault detection from PV images using hybrid deep learning model.* Solar Energy, Vol. 267, 1 January 2024, Article 112207. DOI: 10.1016/j.solener.2023.112207.

[23] DWIVEDI, P., WEBER, J.W., CHIN, R.L., TRUPKE, T., HAMEIRI, Z.: *Deep learning method for enhancing luminescence image resolution.* Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 257, 1 August 2023, Article 112357. DOI: 10.1016/j.solmat.2023.112357.

MAGYARORSZÁG VÍZENERGIA-POTENCIÁLJA – VÍZGAZDÁLKODÁSI ÉS ENERGETIKAI MEGFONTOLÁSOK

HUNGARY'S HYDROPOWER POTENTIAL – WATER MANAGEMENT AND ENERGY CONSIDERATIONS

BAIBHAW Kumar[1], SZAMOSI Zoltán[2]

[1]PhD, egyetemi adjunktus, baibhaw.kumar@uni-miskolc.hu
[1]Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

[2]PhD, Intézetigazgató, egyetemi docens, zoltan.szamosi@uni-miskolc.hu
[1]Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

Kivonat: *A tanulmány Magyarország vízenergia-potenciálját vizsgálja történeti, hidrológiai és mérnöki alapokon, különös tekintettel a vízlépcsők vízgazdálkodási szerepére és a szivattyús-tározós erőművek lehetőségeire. Bemutatja, hogy hazánk teljes vízenergia-tartaléka reálisan 1500 MW, ami jelentősen meghaladja a jelenlegi kihasználtságot. A vízlépcsők fő társadalmi haszna azonban nem az energiatermelés, hanem az árvízvédelem, az aszálykockázat csökkentése, a vízvisszatartás és a mezőgazdasági öntözés javítása. A tanulmány külön fejezetben elemzi a Sajó–Hernád csatorna hidrológiai és gazdasági megalapozottságát, amely egyszerre biztosítana árvízcsökkentést, kisvízi vízpótlást, talajvízszint-emelkedést és járulékos energiatermelést. Eredményei alapján a vízenergia hazai szerepe elsősorban integrált vízgazdálkodási eszközként értelmezhető, nem pedig önálló energetikai célként.*

Kulcsszavak: *vízerőhasznosítás, vízvisszatartás, talajvízszint emelkedés*

Abstract: *This study examines Hungary's hydropower potential using historical, hydrological, and engineering evidence, with particular emphasis on the water-management functions of river barrages and the national feasibility of pumped-storage hydropower. The analysis shows that Hungary's realistic hydropower reserve amounts to 1500 MW, significantly exceeding current utilization. The primary societal value of hydraulic structures, however, lies not in electricity production but in flood mitigation, drought reduction, water retention, and enhanced agricultural irrigation security. A dedicated chapter evaluates the hydrological and economic foundations of the proposed Sajó–Hernád interbasin canal, which could provide flood-peak reduction, low-flow support, groundwater recovery, and auxiliary power generation. The results indicate that hydropower in Hungary should be regarded primarily as an integrated water-management tool rather than a standalone energy objective.*

Keywords: *hydropower, water retention, rise in groundwater level*

1. BEVEZETÉS

Magyarország vízgazdálkodása az elmúlt években gyökeresen új kihívásokkal találta szemben magát. A szélsőséges vízjárás — különösen a 2022-es rendkívül aszályos nyár és az utóbbi évtizedek nagy árvizei — egyértelművé tették, hogy a korábbi, elsősorban vízlevezetésre épülő vízügyi szemlélet ma már nem elegendő. A hazai vízháztartás egyensúlya tartósan megbomlott: a talajvízszint több térségben métereket süllyedt, a belvízi területek kiterjedése csökkent, a mezőgazdaság vízigénye pedig évről évre nő. A klímaváltozás következtében mind a nagy árhullámok, mind az extrém kisvizek gyakoribbá válnak, és egyre hosszabb ideig tartanak fenn.

Ebben a helyzetben felértékelődik minden olyan beavatkozás, amely a víz helyben tartását, a vízkészletek térben és időben történő újraelosztását, valamint a vízbiztonság növelését szolgálja. A vízerőművek, illetve az ilyen vízügyi létesítmények elsődleges célja nem az energiatermelés, hanem a vízszintszabályozás, az árvízi biztonság és az aszálykockázatok csökkentése. Azonban az elmúlt évek fejleményei és az időjárásfüggő megújuló energiaforrások villamosenergia-rendszerre gyakorolt hatásai miatt a vízenergia ismét stratégiai tényezővé válhat.

A tanulmány célja, hogy történeti, hidrológiai és mérnöki adatok alapján átfogó képet adjon Magyarország vízenergia-potenciáljáról, bemutassa a szivattyús-tározós erőművek létesítésének lehetőségeit, és részletesen elemezze a Sajó–Hernád integrált vízgazdálkodási rendszer példáját. Összegzésként pedig értékeli, hogy a hazai vízenergia milyen szerepet tölthet be a jövő vízbiztonsági és energetikai stratégiáiban.

2. TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS

2.1. Korai vízenergia-felmérések

A hazai vízenergia-potenciál első átfogó feltárását Czakó Elemér végezte 1927-ben [1]. Munkája máig alapvető referenciapont, mert a számítások — a korszak mérési és műszaki lehetőségei ellenére — meglepően pontosan közelítik a mai értékeket. A Duna esetében 450–600 MW, a Tiszán 180–220 MW, míg a Dráván 150–300 MW közötti hasznosítható teljesítményt becsült. Figyelemre méltó, hogy Czakó a vízlépcsőket nem elsősorban energiatermelési lehetőségként kezelte, hanem a folyószabályozás és az árvízvédelem részeként, vagyis a magyar vízügyi szemlélet már a XX. század elején a komplex funkciókat hangsúlyozta.

2.2. A szocialista korszak vízgazdálkodási tervezése

Az 1960–70-es években a VIZITERV és az Országos Vízügyi Hivatal országos vízlépcsőrendszerek kialakítását vizsgálta [2], [3]. A Duna-völgyre 700–1000 MW, a Tiszára 200–250 MW, a Drávára 200–300 MW potenciált állapítottak meg. Emellett a mellékfolyók — köztük a Sajó, Hernád, Rába és Zala — további 100–150 MW tartalékkal járultak volna hozzá az országos kapacitáshoz. Bár az elképzelések nagy része végül nem valósult meg, a dokumentumok hidrológiai adatai ma is fontos alapjai a vízenergia-sávok becslésének.

3. A VÍZENERGIA-SZÁMÍTÁSOK ELMÉLETI ALAPJAI

A vízfolyások energiatermelési lehetőségeit a potenciális helyzeti energia határozza meg. A teljesítményt a következő összefüggés adja [4]:

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta, \tag{1}$$

ahol $\rho \approx 1000$ kg/m³ a víz sűrűsége, $g = 9{,}81$ m/s² a gravitációs gyorsulás, Q a vízhozam, H az esésmagasság, η pedig a turbina-generátor rendszer hatásfoka. Magyarországon Kaplan-turbinák esetén ez tipikusan 0,86–0,96 közé esik.

A vízerőművek méretezéséhez a Q_{50} vízhozamot használják, vagyis azt a vízmennyiséget, amely az év 50%-ában biztosan rendelkezésre áll. A hazai folyók ingadozó, de alapvetően kiegyenlített vízjárása miatt ez stabil tervezési alapot ad [5].
Az éves energiatermelés:

$$E = P_{\text{átlag}} \cdot T, \tag{2}$$

ahol T az éves üzemóra (8400–8760 h). A képlet jól mutatja, hogy a vízerőművek éves termelése elsősorban a rendelkezésre álló esésfüggvényen és Q_{50} értéken múlik.

4. MAGYARORSZÁG NAGY FOLYÓINAK VÍZENERGIA-POTENCIÁLJA

4.1. A Duna

A Duna magyarországi szakaszán az átlagos vízhozam 2300–2500 m^3/s [4], ami európai viszonylatban kiemelkedően magas. A magyar szakaszon 4–6 méteres duzzasztási lépcsők alakíthatók ki, amelyek egyenként 100–120 MW teljesítményt biztosítanak. A meder lejtése 7 cm/km, ami kilométerenként 1,2–1,3 MW potenciálnak felel meg. A teljes hazai potenciál 700–1000 MW.

4.2. A Tisza

A Tisza vízjárása sokkal szeszélyesebb, de Q_{50} értéke 700–1100 m^3/s. A megfelelően kialakított lépcsőrendszer 200–300 MW energiát biztosítana. A Tisza különlegessége, hogy a duzzasztás vízpótlási előnyei (árvízi csúcs csökkentése, holtágak táplálása, öntözés) nagyobb jelentőségűek, mint a villamosenergia-termelés.

4.3. A Dráva és mellékfolyók

A Dráva 200–300 MW tartalékot hordoz, míg a mellékfolyók (Sajó, Hernád, Rába) további 100–150 MW-ot tehetnének ki megfelelő duzzasztásokkal.

5. A DUZZASZTÁS TÁRSADALMI-GAZDASÁGI HOZADÉKA

A magyarországi vízlépcsők valódi értéke elsősorban a vízvisszatartásban, az árvízi és aszálykockázatok mérséklésében, valamint a mezőgazdasági vízbiztonság javításában jelenik meg. A modern vízgazdálkodási modellek szerint a duzzasztott folyószakaszok mentén a talajvízszint tartós emelkedése figyelhető meg, amely közvetlenül hozzájárul a terméshozamok stabilizálásához és az öntözési igények csökkentéséhez [4], [9]. Egy átlagos méretű duzzasztómű évente 5–10 milliárd forint értékű árvízi és aszálykár-megelőzést eredményezhet, ami nagyságrendekkel meghaladja az energiatermelésből származó vízkészlet-használati járadékot, amely jellemzően 50–80 millió forint közé esik [7].

Nemzetközi tanulmányok is megerősítik, hogy a folyók vízszintjének mérsékelt megemelése hosszú távon csökkenti az ökológiai kiszáradást és javítja a felszíni–felszín alatti vízkapcsolatot. A duzzasztással kialakított állandó víztükör mérsékli a regionális hőstresszt, javítja az élőhelyek vízellátását, és segíti a természetes regenerációs folyamatokat [10]. Az Európai Unió klímaadaptációs irányelvei pedig egyértelműen kiemelik, hogy a vízvisszatartási beavatkozások – különösen az alföldi és közép-európai térségekben – elsődleges eszközei az éghajlatváltozás hatásaihoz való alkalmazkodásnak [11].

Mindezek alapján a vízlépcsők telepítése olyan közjószág jellegű beruházásként értelmezhető, amelynek társadalmi haszna jelentős mértékben meghaladja a közvetlen villamosenergia-termelésből származó gazdasági bevételt. A duzzasztás így elsősorban vízgazdálkodási és éghajlat-adaptációs stratégiai eszköz, és csak másodlagosan energetikai létesítmény.

6. A SZIVATTYÚS-TÁROZÓS ERŐMŰVEK (STE) SZEREPE

A szivattyús-tározós erőművek a modern villamosenergia-rendszerek legfontosabb és legnagyobb kapacitású rugalmas energiatárolói, amelyek képesek kiegyenlíteni a nap- és szélenergia jelentős időbeli ingadozásait. Magyarország adottságai — különösen a Mátra, a Bükk peremterületei, a Börzsöny és a Mecsek — több olyan geológiai és domborzati helyszínt kínálnak,

ahol 200–400 méteres eséslépcsővel zárt felső tározó alakítható ki [6]. Ezek a területek stabil alapkőzeti viszonyokkal, megfelelő vízzáróséggal és olyan magassági különbségekkel rendelkeznek, amelyek akár több száz MW teljesítményű rendszer kialakítását is lehetővé teszik.

Az elmúlt években a hazai STE-projektek előkészítése kézzelfogható szakaszba lépett. A Mátra térségében és Sajóivánka környezetében 2024-ben kezdődtek meg a geotechnikai próbafúrások, amelyek a felső tározók várható rétegsorát, teherbírását és vízzáró tulajdonságait vizsgálják [4]. Ezek az előzetes kutatások meghatározóak, mivel a STE-rendszerek hosszú távú üzembiztonságát döntően a felső tározó geológiai stabilitása határozza meg.

A hazai potenciál alapján egy-egy 600–800 MW névleges teljesítményű szivattyús-tározós erőmű 1,5–2,5 GWh energiatárolási kapacitással rendelkezhetne. Ez azt jelenti, hogy egy ilyen rendszer órákon át képes lenne pótolni a napenergia-kiesést esti órákban, illetve kiegyenlíteni a nagy, akár több száz MW-os termelésingadozásokat. Mindez a magyar naperőművi kapacitások gyors növekedése miatt különösen kritikus, hiszen a rendszer egyensúlyának fenntartása csak jelentős mennyiségű tárolókapacitással lesz lehetséges.

A STE-létesítmények emellett további mellékhatásokkal is bírnak: javíthatják a frekvenciaszabályozást, csökkenthetik a rendszerterhelés csúcsait, tehermentesíthetik a hagyományos erőműveket, és növelhetik a villamosenergia-rendszer üzembiztonságát. Magyarország földrajzi adottságai alapján több helyszín is alkalmas lenne ezen rendszerek kialakítására, így a STE-technológia a következő évtized egyik kiemelt stratégiai energetikai beruházási iránya lehet.

7. A SAJÓ–HERNÁD INTEGRÁLT VÍZGAZDÁLKODÁSI MODELL

A Sajó–Hernád rendszer jó példája lehet annak, hogyan kapcsolható össze a vízenergia-hasznosítás és a vízvisszatartás. Sajóivánkán a Q_{50} vízhozam 35 m³/s [4], a mederlejtés Felsőzsolcáig 0,6–0,8 ezrelék. Alsózsolcán a kisvízi szint 107–108 mAf, amely duzzasztás után 112,5–113,3 mAf-ig emelhető. A Hernád Bőcsnél 107,5 mAf duzzasztott vízszinten áll. Így a két folyó között akár 5-6 méter esés is kialakítható. A számításainknál 5,3 méter eséssel számoltunk.

7.1. A Sajó–Hernád csatorna részletes vizsgálata, mint integrált vízgazdálkodási fejlesztési modell

A Sajó és a Hernád közötti vízátvezetés gondolata nem új keletű: a vízügyi szakirodalomban már a XX. század közepén is megjelent olyan elképzelésként, amely képes lehet a két folyó vízháztartási különbségeinek kiegyenlítésére, az árvizek csökkentésére és az öntözési vízigények kielégítésére. A koncepció az utóbbi években kapott ismét kiemelt figyelmet, mivel a térségben a kisvizek gyakorisága nő, míg a talajvízszint tartós süllyedése mind a mezőgazdaság, mind a természetvédelmi területek fenntarthatóságát veszélyezteti. A Sajó–Hernád csatorna lényegében egy rövid, gravitációs esésen alapuló vízkormányzó műtárgy lenne, amely a Sajó duzzasztott vizét vezetné át a Hernádba, miközben járulékosan energiatermelésre is alkalmas lehetne.

A rendszer hidrológiai alapját az adja, hogy a Sajó vízjárása Sajóivánka és Felsőzsolca között évtizedes idősorok alapján rendkívül stabil. A Q50 érték 35 m³/s körül alakul [4], ami azt jelenti, hogy a vízhozam az év felében ennél magasabb, vagyis a középvízi szint feletti no-flow időszakok ritkák. A Sajó középső szakaszának lejtése 0,6–0,8 ezrelék, amely Felsőzsolcánál és Alsózsolcánál már alacsonyabb, és a folyó medre fokozatosan szélesedik. A kisvízi szint Alsózsolcán 107–108 mAf, amely a duzzasztás után elérheti a 112,5–113 mAf értéket. Ezzel párhuzamosan a Hernád duzzasztott vízszintje Bőcsnél 107,5 mAf körül rögzül [4]. A két folyó közötti szintkülönbség így 5,3 méter, amely már önmagában is elegendő ahhoz, hogy a vizet gravitációsan át lehessen vezetni a Hernádba.

A teljesítmény:

$$P = 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 35 \cdot 5{,}3 \cdot 0{,}9 \approx 1{,}6 \text{ MW}. \quad (3)$$

Ez évente 5–15 GWh energiát jelent. A projekt valódi hozama azonban nem ez, hanem az árvízi csúcsok csökkentése, a Hernád kisvízi vízpótlása, valamint a mezőgazdasági vízigények biztonságának növelése. Ezen vízvisszatartási rendszer társadalmi haszna évente 2–4 milliárd forint lehet [4].

A csatorna elhelyezésének szempontjából Bőcs stratégiai pont, hiszen itt már ma is egy zsilip–duzzasztó jellegű műtárgyegyüttes működik a Hernádon, amely bizonyítottan alkalmas a vízszintek finom szabályozására. A Sajón szükséges duzzasztási szint Felsőzsolca/Alsózsolca térségében adódna, ami nem igényel nagy léptékű vízlépcső létesítését: a térszín adottságai miatt egy alacsony, bukó jellegű műtárgy is elegendő lenne a kívánt vízszint megemeléséhez. Amennyiben Felsőzsolca és Alsózsolca között indítjuk a csatornát, már jelenleg is van 3 méter szintkülönbség. Amennyiben Alsózsolca alatt kezdődik a csatorna, úgy jelenleg nincs szintkülönbség, azaz a duzzasztással meg lehet valósítani a gravitációs vízkivételt a Sajóból. A csatorna Hernádba való bekötését Hernádnémeti település alatt lehet megvalósítani. A két folyó közötti távolság a lehetséges nyomvonalon mindössze 6-6,5 kilométer, ezért a csatorna megvalósítása hidrológiai és topográfiai szempontból kedvező.

Az energiatermelési lehetőséget a már korábban bemutatott teljesítmény-képlet segítségével lehet számszerűsíteni. A Sajó Q_{50} = 35 m³/s vízhozama és az 5,3 méteres hasznos esés, valamint egy reális η=0,9 hatásfok figyelembevételével a vízerőmű teljesítménye mintegy 1,6 MW-ra adódik. Ez önmagában nem lenne jelentős az országos energiamix szempontjából, de évi 5–15 GWh energiatermelés így is biztosítható lenne. Az energiatermelés azonban csupán járulékos elem. A rendszer valódi értéke a vízkormányzásban rejlik.

A Sajó–Hernád csatorna ugyanis egyszerre látna el árvízi, kisvízi, öntözési és hidrológiai kiegyenlítő funkciókat. Árvízi helyzetben a Sajó felsőbb vízgyűjtőjéről érkező hirtelen árhullám gravitációsan átvezethető lenne a Hernádba, ezzel több települést — Felsőzsolcát, Sajóládot, Sajópetrit, Alsózsolcát, Ónodot — is tehermentesítve. A két folyó vízrendszere szempontjából ez azért különösen előnyös, mert az árhullámok időbeni lefolyása eltér: gyakran akkor tetőzik a Sajó, amikor a Hernád még a kisvízi tartományban van. A vízátvezetés tehát valódi árvízcsökkentő hatással bírna.

Kisvízi időszakban a rendszer fordított irányban működne, vagyis a duzzasztott Sajó-vízből lehetne vizet juttatni a Hernádba, amely a térségben gyakran extrém alacsony vízszinteket mutat. A Hernád medrének kisvízi vízpótlása hosszú távon mérsékelné a medereróziót és javítaná több mellékág ökológiai állapotát. Emellett a csatorna környezetében a talajvízszint akár 1–2 méterrel is növekedhetne, amely különösen értékes a mezőgazdasági területek számára. A Tisza vízrendszerében már bizonyított, hogy a duzzasztott szakaszok mentén a talajvízszint tartósan emelkedik [5].

A mezőgazdasági öntözés szempontjából is nagy jelentőségű lenne a rendszer. A Sajó–Hernád közötti vízátvezetés lehetővé tenné a közel ezer hektárnyi termőföld öntözővízzel való ellátását gravitációs módon, különösen Felsőzsolca, Alsózsolca, Hernádnémeti és Bőcs térségében. A terület az ország egyik legjobb minőségű termőföldjeit tartalmazza, de a vízszűkösség miatt ma csak korlátozott mértékben öntözhető.

A vízkormányzás mellett a csatorna ökológiai szerepe sem elhanyagolható. A Sajó és a Hernád vízterei közötti kapcsolat részben helyreállítaná azokat a történelmi vízfolyási összefüggéseket, amelyek a folyószabályozások során megszűntek. A több víz jelenléte javítaná a holtágak és mellékágak vízellátását, csökkentené a hőterhelést, és kedvezőbb feltételeket teremtene az ívóhelyek számára. A vízminőségre gyakorolt hatás pedig összességében pozitív lenne, mert a

duzzasztott szakaszokon a lebegtetett hordalék szállítása csökken, ami tisztább vizet eredményez a csatornába jutó szakaszon.

A koncepció közgazdasági értékelése szerint a rendszer társadalmi haszna évente 2–4 milliárd forint lehet [4]. Ez tartalmazza az árvízi védekezés költségeinek csökkenését, az aszálykárok mérséklését, az öntözési kapacitásnövekedést és a talajvízszint-emelkedésből fakadó terméshozam-növekedést. Mindezek alapján a Sajó–Hernád csatorna a magyar vízgazdálkodás olyan integrált fejlesztési eleme lehet, amely egyszerre szolgálja a vízbiztonságot, a mezőgazdasági stabilitást, a térségi vízpótlást és járulékosan az energiatermelést is.

8. ÖSSZEGZÉS

Magyarország vízenergia-potenciálja hidrológiai és mérnöki alapon 1500 MW-ra becsülhető a szivattyús tározós erőművek nélkül, ami a villamosenergia-termelés 10–12%-át fedezhetné. A jelenlegi kihasználtság azonban ennek kevesebb mint 5%-a. A szivattyús tározós erőművek alsó kapacitásának nagysága 1200-1500 MW-ra tehető, összességében tehát a tudomány mai állása szerint Magyarország teljes vízenergia potenciálja 3000 MW.

A vízlépcsők valódi értéke azonban nem az energiatermelésben rejlik, hanem a vízbiztonság, aszálycsökkentés, árvízvédelem és a mezőgazdasági vízellátás javításában. A szivattyús-tározós erőművek a modern villamosenergia-rendszer szükséges elemei, míg a Sajó–Hernád integrált vízgazdálkodási modell példája jól mutatja, hogy a hazai folyókban rejlő lehetőségek kombinálhatók az energetikai és vízvédelmi célokkal. A XXI. századi magyar vízgazdálkodás egyik kulcsa a víz helyben tartása és ebben a vízlépcsők és a szivattyús-tározós létesítmények megkerülhetetlen szerepet játszanak.

9. IRODALOMJEGYZÉK

[1] E. Czakó, *Magyarország vízierői*, M. Kir. Folyammérnöki Hivatal, Budapest, 1927.
[2] VIZITERV, *Duna és Tisza vízlépcsőrendszereinek tervei*, Budapest, 1965–1975.
[3] Országos Vízügyi Hivatal, *A hazai vízlépcsők gazdasági értékelése*, Budapest, 1970.
[4] Országos Vízügyi Főigazgatóság (OVF), *VIZIR hidrológiai adatsorok*, 2010–2023.
[5] European Commission, *Flood Risk and Water Retention Measures*, Brussels, 2020.
[6] European Small Hydropower Association, *Small Hydropower and River Basin Management*, Brussels, 2015.
[7] MEKH, *Vízkészlet-használati járadék adatbázis*, Budapest, 2023.
[8] IPCC, *Climate Change and Water – Central Europe*, Geneva, 2019.
[9] J. R. Knox et al., "Groundwater Response to River Level Stabilization in Central Europe," Journal of Hydrology, vol. 624, 2023.
[10] S. Fischer and M. Blume, "Hydro-ecological Benefits of Controlled River Impoundments," Water Resources Management, vol. 37, pp. 5121–5140, 2023.
[11] European Environment Agency, Climate Adaptation and Water Retention Strategies in the EU, Copenhagen, 2022.

ASZIMMETRIKUS QUBITKONFIGURÁCIÓK VIZSGÁLATA A FÉLIG ESZKÖZFÜGGETLEN KVANTUMHITELESÍTÉS ESZKÖZEIVEL

INVESTIGATION OF ASYMMETRIC QUBIT CONFIGURATIONS USING THE TOOLS OF SEMI–DEVICE-INDEPENDENT QUANTUM AUTHENTICATION

VERES Gergő[1], DRÓTOS Gábor[2,3]

[1]fizikus mester szakos hallgató, veresgergo03@gmail.com
[1]Debreceni Egyetem, Természettudományi és Technológiai Kar, Fizikai Intézet

[2]PhD, tudományos munkatárs, drotos.gabor@atomki.hu
[2]HUN-REN Atomki, Kvantuminformatikai Kutatócsoport

[3]Instituto de Física Interdisciplinar y Sistemas Complejos (IFISC), CSIC-UIB, Palma de Mallorca, Spain

Kivonat: *Félig eszközfüggetlen keretrendszert használva szeretnénk három qubitból álló konfigurációk aszimmetriáját hitelesíteni lineáris tanú használatával egy preparálás-és-mérés elrendezésben. Ehhez aszimmetrikus konfiguráció öntesztelésére megalkotott tanút tekintünk, és vizsgáljuk, hogy a szóban forgó konfigurációval kiértékelve meghaladja-e az értéke azt a maximális tanúértéket, amit szimmetrikus konfigurációval el lehet érni. A kettő különbsége definiálja a gapet. Miután azt találtuk, hogy a gap legnagyobb értékei egy síkra eső konfigurációk esetében adódik, ábrázoljuk ezen a síkon a gapet. Ezt követően analitikusan bizonyítjuk a zérusvonalak létezését és az optimumok ekvivalenciáját. Bár nagyobb tanúértékbeli különbségek elméletben egyszerűbbé tehetik az aszimmetria hitelesítését, a gap nem lesz jó univerzális mérőszáma az aszimmetriának, mivel értéke függ a tanúfüggvény megalkotásának módjától, és a háromszög méretétől.*

Kulcsszavak: *qubit, tanúfüggvény, kvantumhitelesítés*

Abstract: *Using a semi–device-independent framework, we aim to certify the asymmetry of configurations consisting of three qubits by means of a linear witness in a prepare-and-measure setup. To this end, we consider a witness constructed for the self-testing of an asymmetric configuration and examine whether its value—when evaluated on the configuration in question—exceeds the maximum witness value achievable with a symmetric configuration. The difference between the two defines the gap. After finding that the largest gap values occur for configurations lying in a plane, we plot the gap on this plane. We then analytically prove the existence of zero lines and the equivalence of optima. Although larger differences in witness values can in principle simplify the certification of asymmetry, the gap will not serve as a good universal measure of asymmetry, as its value depends on the particular construction of the witness function and on the size of the triangle.*

Keywords: *qubit, witness function, quantum certification*

1. BEVEZETÉS

A kvantuminformatika számos területen jelenthet nagy előrelépést. Többek között kvantumeffektusok vizsgálatában, random-szám generálásban, kvantumszámításban, valamint titkosításban. Pontos vizsgálatukhoz és használatukhoz szükséges a protokollokban használt eszközök precíz beállítása, így ezek az eszközök hitelesítésre szorulnak. Egy lehetséges megközelítés egyszerű statisztikai megfontolásokon alapszik, egy eszköz által preparált állapotokon különböző bázisokban méréseket végezve valamilyen statisztikát kapunk, aminek segítségével megfigyeléseket tehetünk a hitelesíteni kívánt eszközről. Ehhez azonban szükséges, hogy pontos legyen a mérést implementáló eszköz, amit szintén hasonló hitelesítéssel tudunk vizsgálni, így egymásra halmozódnának a hibák.

Ez a hibaforrás kiküszöbölhető egy olyan módszerrel, amihez, ideális esetben, nem szükséges feltevéseket tennünk az eszköz belső működéséről, a mérést végző eszköz hitelesítése csak a mérés kimenetelein alapszik. Az ilyen hitelesítési formát eszközfüggetlennek nevezünk. Ennek egy relaxált változatát félig eszközfüggetlen protokolloknak nevezzük, ilyenkor egyéb feltételezésekkel élünk a rendszerrel kapcsolatban. Leggyakrabban ez a kvantumrendszer dimenziójának korlátozását jelenti. öntesztelés alatt pedig azt értjük, hogy pontosan megmondjuk, hogy a kívánt konfigurációt preparáltuk- e és a kívánt méréseket végeztük-e el.

A félig eszközfüggetlen hitelesítés keretrendszerének segítségével egy olyan preparáció-és-mérés szituációt vizsgálunk, ahol Alice egy x bemenet alapján preparál egy ρ_x állapotot, majd elküldi Bobnak, aki egy másik, y bemenet alapján mérést végez a kapott állapoton, és a mérési eredmény alapján meghatároz egy b kimeneti értéket. Feltételezzük, hogy közöttük a küldésen kívül semmilyen más kommunikáció nincs.

A félig eszközfüggetlen öntesztelésnek már létezik a keretrendszere [6]. A dolgozatban ezen keretrendszeren belül definiált W tanúfüggvény segítségével szeretnénk vizsgálni konfigurációk aszimmetriáját, valamint azt, hogy ennek mérőszáma hogyan függ a tanúfüggvény megalkotásának módjától.

2. PROJEKTÍV MÉRÉSEK, SŰRŰSÉGMÁTRIX ÉS A BLOCH VEKTOROK

A kvantumvilágban történő mérések befolyásolják a mért rendszert, így az tipikusan valamilyen információ elvesztésével jár. A mérés következtében a preparált állapot egy úgynevezett kvantum összeesést szenved el, "elfelejti" korábbi állapotát. A mérések leírására projektorokat használunk, amik idempotens ($P^2 = P$) és önadjungált ($P^\dagger = P$) operátorok. Ha a mérés valamilyen |k⟩ bázisvektorokkal definiált bázisban történt, akkor a mérést egy adott |k⟩ bázisvektorhoz tartozó kimenetel esetén leíró projektor:

$$P_k = |k\rangle\langle k| \tag{1}$$

Állapotokat szintén jellemezhetünk, vagy éppen jellemeznünk kell operátorokkal, az úgynevezett sűrűségoperátorokkal. Egy ρ sűrűségoperátor egy olyan Hilbert térbeli nemnegatív önadjungált operátor, aminek nyoma 1. Tehát bármilyen $|\psi\rangle$ esetén $\langle\psi|\rho|\psi\rangle \geq 0, \rho^\dagger = \rho$ és $tr(\rho) = 1$. Tiszta állapotok egy csoportjához a következőképpen tudunk sűrűségoperátort definiálni:

$$\rho = \sum_i p_i |\psi_i\rangle\langle\psi_i| \tag{2}$$

Ha Alice p_i valószínűséggel preparál egy $|\psi_i\rangle$ állapotot, amit elküld Bobnak anélkül, hogy megmondaná, hogy mit preparált, akkor Bob csak a 2. egyenlet alakjában tudja leírni a rendelkezésére álló állapotot, míg Alice tudja, hogy ő $|\psi_i\rangle$-t küldött. Ekkor az állapot Alice leírásában tiszta, míg Bob leírásában kevert. A kevertség statisztikus jellegű és teljesen eltérő a szuperpozíciótól.

Bármilyen 2x2-es önadjungált mátrix, így egy qubit sűrűségoperátora is, felírható az egységoperátor és a Pauli mátrixok segítségével az alábbi módon:

$$\rho = \frac{\mathbb{1} + \vec{m}\cdot\vec{\sigma}}{2} \tag{3}$$

Ahol a képletben szereplő $\vec{\sigma} = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ a Pauli mátrixokból előállított vektor, $\vec{m}$ pedig a ρ sűrűségoperátor Bloch vektora. Ezek segítségével vektorokként tudjuk reprezentálni a kétdimenziós állapotok, azaz a qubitek sűrűségoperátorait. Ezen vektorok hossza az

állapot "tisztaságával" áll kapcsolatban. A tiszta állapotok egység hosszúak lesznek, a gömb felületére mutatnak, a maximálisan kevert állapot (amikor bármilyen mérés kimenetele teljesen véletlenszerű), pedig a nullvektor. [1] Továbbá, mivel a projektív mérést leíró operátorok is projektorok, akárcsak a tiszta állapotok sűrűségoperátorai, így ezeket is lehet Bloch vektorral jellemezni.

3. ÖNTESZTELÉS [2]

Az öntesztelésehez csak a kimenetelekhez rendelt $P(b|xy)$ feltételes valószínűségeket használjuk. Ezek segítségével egy úgynevezett tanúfüggvényt konstruálunk az alábbi módon:

$$W = \sum_{x=1}^{M_m} \sum_{y=1}^{M_v} \sum_{b=0}^{M_b} w_{xy}^{(b)} P(b|xy) \tag{4}$$

A képletben szereplő feltételes valószínűség a következő módon fejezhető ki, a preparáltρ_x sűrűségoperátorral és a b kimenetelű y mérést leíró $M_{b|y}$ operátorral:

$$P(b|xy) = tr(\rho_x M_{b|y}) \tag{5}$$

Ez pontosan a Born szabály. Továbbá, ha $b \in \{0, 1\}$, valamint $M_{b|y}$ nem degenerált és statisztikailag nem "kevert" mérés egy kimenetelét leíró projektor, akkor $M_{b|y}$ a következőképpen írható fel Bloch vektor segítségével:

$$M_{b|y} = \frac{\mathbb{1} + (-1)^b \overrightarrow{v_y} \cdot \vec{\sigma}}{2} \tag{6}$$

Ekkor a korábbi egyenletek és $w_{xy} \equiv w_{xy}^{(0)} = -w_{xy}^{(1)}$ felhasználásával a tanúfüggvény a következő alakban írható:

$$W = \sum_{x=1}^{M_m} \sum_{y=1}^{M_v} w_{xy} \overrightarrow{m_x} \cdot \overrightarrow{v_y} = \sum_{x=1}^{M_m} \overrightarrow{m_x} \sum_{y=1}^{M_v} w_{xy} \overrightarrow{v_y} = \sum_{x=1}^{M_m} \overrightarrow{m_x} \cdot \overrightarrow{u_x} \tag{7}$$

ahol bevezetjük az $\overrightarrow{u_x}$ jelölést.

Célunk, hogy a tanúfüggvény qubitokkal elérhető optimális értéke Q öntesztelje a kívánt preparációkat és méréseket. Belátható, hogy adott $\overrightarrow{v_y}$ esetén $\overrightarrow{m_x}$ optimális választása a megfelelő esetben:

$$\overrightarrow{m_x} = \frac{\sum_{y=1}^{M_v} w_{xy} \overrightarrow{v_y}}{\left|\sum_{y=1}^{M_v} w_{xy} \overrightarrow{v_y}\right|} = \frac{\overrightarrow{u_x}}{|\overrightarrow{u_x}|} \tag{8}$$

Ekkor W értéke maximális és a következő alakban számolható:

$$Q_v = \sum_{x=1}^{M_m} |\overrightarrow{u_x}| \tag{9}$$

Ahol $\overrightarrow{u_x}$ definíciójának megfelelően:

$$|\overrightarrow{u_x}| = \sqrt{\sum_{y=1}^{M_v} w_{xy}^2 + 2 \sum_{y=1}^{M_v - 1} \sum_{y'=y+1}^{M_v} w_{xy}\, w_{xy'} \overrightarrow{v_y} \cdot \overrightarrow{v_{y'}}} \tag{10}$$

Ha w_{xy} mátrix egyes oszlopaiban található elemek összege 0, akkor a tanúfüggvény optimumában nem adhatják degenerált mérések. Degenerált mérés alatt, olyan mérést értünk, aminek bemenettől függetlenül mindig ugyanaz a kimenetele. A w_{xy} mátrix választásában van további szabadságunk. Legyen $w_{xy} = r_x \mu_{xy}$ úgy, hogy $\sum_{y=1}^{M_v} \mu_{xy}^2 = 1$. Ezen alak (9) és (10) egyenletekbe történő behelyettesítése mellett igazolható, hogy adott M_m darab qubit állapot öntesztelésére, r_x paramétereket pozitívra kell választani, valamit μ_{xy}-t úgy, hogy $\overrightarrow{m_x}$-ek komponensei legyenek egy olyan koordináta-rendszerben, amiben az $\sum_x r_x \overrightarrow{m_x} \otimes \overrightarrow{m_x}$ operátor mátrixa diagonális. A degenerált mérések, mint optimális mérések, kizárásához elégséges feltétel, hogy az $\overrightarrow{m_x}$ vektorok pozitív r_x-ekkel vett lineáris kombinációjuk kiadja a nullvektort. Ha ez nem teljesülhet, akkor mindig elegendő egy segédállapot hozzáadása ($-\sum_x r_x \overrightarrow{m_x}$ alakban) ahhoz, hogy ez teljesüljön. Belátható, hogy akkor lesz egyértelmű az optimum helye, ha $M_m \geq \frac{M_v(M_v-1)}{2} + 1$ teljesül. Igazolható továbbá az is, hogy az így definiált tanú értéke invariáns egy forgatásra.

4. ALGORITMUS AZ ASZIMMETRIA VIZSGÁLATÁHOZ

A korábbiak segítségével szeretnénk adott aszimmetrikus konfigurációt öntesztelni. Ehhez tanúfüggvényt alkotunk és vizsgáljuk szimmetrikus konfigurációk által elérhető legnagyobb tanúértéket, majd ezt végignézzük az összes lehetséges aszimmetrikus konfigurációra és keressük a legnagyobb elérhető különbséget. Mindkét konfigurációban 4-4 állapot Bloch vektort definiálunk a rendszer szabadsági fokainak felhasználásával. Az aszimmetrikus konfigurációban Alice olyan állapotokat preparál, amik Bloch vektorai a következőképpendefiniálhatóak:

$$\overrightarrow{m_1} = (0,0,1) \qquad \overrightarrow{m_2} = (0, \sin\theta_2, \cos\theta_2)$$

$$\overrightarrow{m_3} = (-\sin\theta_3 \cos\phi_3, \sin\theta_3 \sin\phi_3, \cos\theta_3) \qquad \overrightarrow{m_4} = -\sum_x^3 r_x \overrightarrow{m_x}$$

Ahol $\theta_2 \in [0,\pi]$, $\theta_3 \in [0,\pi]$ és $\phi_3 \in [0,2\pi]$. A segédállapotra azért van szükség, hogy minden esetben lineárisan összekombinálható legyen a nullvektor.

A szimmetrikus esetben Alice 3 olyan vektort preparál, amik a Bloch gömbben egy egyenlő szárú háromszöget definiálnak, valamint egy tetszőleges negyediket. A negyedikre azért van szükség, hogy teljesüljön az optimumra az unicitási feltétel. Mivel az öntesztelésre alkotott elrendezés 4 bemeneti értékkel (lehetséges állapottal) dolgozik, így a szimmetrikus konfigurációhoz is 4 vektort kell rendelni, amiből az első hármat jelöltük ki a vizsgálat céljának megfelelően. Ezeket a Bloch vektorokat a következőképpen definiáltuk:

$$\overrightarrow{m_1}' = (0,0,1) \qquad \overrightarrow{m_2}' = (\sin\theta_2' \cos\phi_2', \sin\theta_2' \sin\phi_2', \cos\theta_2')$$

$$\overrightarrow{m_3}' = (-\sin\theta_2' \cos\phi_2', \sin\theta_2' \sin\phi_2', \cos\theta_2') \qquad \overrightarrow{m_4}' = (\sin\theta_4' \cos\phi_4', \sin\theta_4' \sin\phi_4', \cos\theta_4')$$

Ahol $\theta_2' \in [0,\pi]$, $\phi_2' \in [0,2\pi]$, $\theta_4' \in [0,\pi]$ és $\phi_4' \in [0,2\pi]$. Továbbá a vizsgálat során ezen vektorok permutációit is számításba kell venni.

Az előző fejezetekben ismertetett konstrukció alapján kiszámítjuk a w_{xy} mátrixot az aszimmetrikus konfigurációra. Ennek a mátrixnak a segítségével fogjuk mindkét konfiguráció tanúértékét számítani. A feladatot numerikusan vizsgáltuk, a program C nyelvben íródott a GNU tudományos könyvtár (GSL) segítségével.

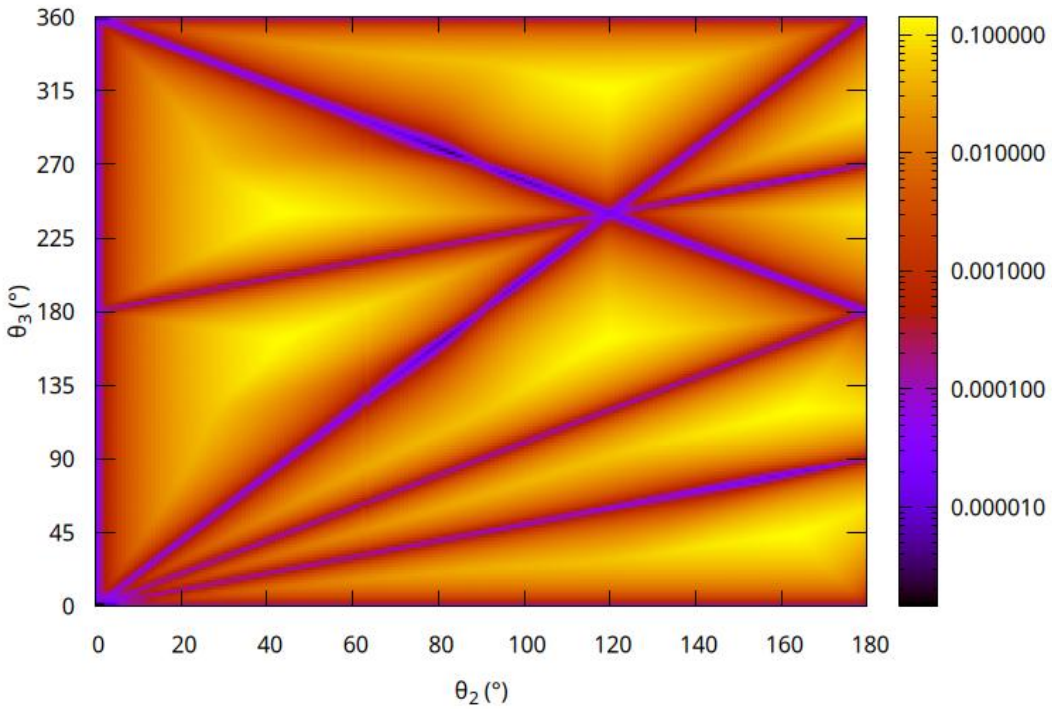
5. EREDMÉNYEK

Kezdetben azt szerettük volna vizsgálni, hogy milyen aszimmetrikus konfiguráció lesz a két konfiguráció közötti tanúérték-különbség (gap, Δ) a legnagyobb. Ehhez két egymásba ágyazott Nelder-Mead optimalizációs algoritmust használtunk. GSL-ben elérhető az algoritmus C-ben megvalósított változata. Kezdetleges paraméterbeállítások mellett azt tapasztaltuk, hogy a legnagyobb Δ értékeket $\phi_3 = 90°$ valamint $\phi_3 = 270°$ mellett kaptuk, így ezen esetek vizsgálatát helyeztük előtérbe és az ábrázolás megkönnyítése érdekében áttértünk erre a paraméterezésre. Későbbiekben tervezzük a teljes optimalizáció újrafuttatását már az algoritmus megfelelően hangolt paraméterbeállításai mellett.Rögzített $\phi_3 = 90°$ érték mellett csak az $\overrightarrow{m_3}$ Bloch vektor változik a következő alakra:

$$\overrightarrow{m_3} = (0,\ \sin\theta_3,\ \cos\theta_3)$$

Könnyen látható, hogy a $\phi_3 = 270°$ eset megfelel annak, hogy $\phi_3 = 90°$ és $\theta_3 \in [180°, 360°]$.

Ebben az esetben egyetlen optimalizáció használatával vizsgáltuk, hogy adott vesszőtlen Bloch vektorok esetén milyen vesszős Bloch vektorok mellett lesz legnagyobb a Δ értéke, így az 1. ábrán látható tájképet kaptuk a Δ értékére az aszimmetrikus konfiguráció θ_2 és θ_3 paraméterei fölött:



1. ábra: *értéke θ_2 és θ_3 mint az aszimmetrikus konfiguráció szabadon hagyott paraméterei függvényében, valamint $\phi_3 = 90°$ rögzítésével és $\theta_3 \in [0°, 360°]$. Ekkor a függőleges tengely két részre bontható: az alsó fele felel meg a $\phi_3 = 90°$-os esetnek, a felső pedig a $\phi_3 = 270°$-os esetnek*

Az ábrán látható zérusvonalak létezése analitikusan is bizonyítható, a vonalakon található szögértékek mellett a vesszőtlen rendszer Bloch vektorai is egyenlő szárú háromszögeket definiálnak. Valamint 6 globális optimumhelyet találunk az ábrán (az ábra jobb felső részében nincs optimum, az csak a jobb alsó rész "folytatása", ha a θ_2 értéket tovább engednénk). Belátható, hogy ezek valójában ugyanannak az optimumnak felelnek meg olyan értelemben, hogy a geometria az $\overrightarrow{m_x}$ vektorok indexeit permutálva nem változik meg; a bizonyításhoz fel kell használnunk a tanúérték tetszőleges forgatásra való invarianciáját. Ugyanezen gondolatmenet tetszőleges szögpárok mellett is működik feltéve, hogy a Bloch vektorok egy síkban vannak. így azt kapjuk, hogy minden síkba írható konfigurációnak 5 másik ekvivalens párja van. Ez azonban láthatóan következik a tanú konstrukciójából. Ha felbontjuk Δ tájképét aszimmetrikus és szimmetrikus tanúérték-tájképekre, akkor láthatjuk, hogy a szimmetrikusságra való korlátozás fogja fogja csökkenteni az ilyen konfigurációk által elérhető tanúértéket.

Az ATOMKI munkatársai más tanúfüggvény, több mérés és segédpreparáció használata esetén is elvégezték ezt a vizsgálatot [5]. A két esetben közös, hogy az aszimmetrikusságban vizsgált 3 Bloch vektor a legnagyobb Δ érték esetén egy síkra esik, aminek tájképén 6 maximum található, valamint a zérusvonalak is ugyanott vannak és közöttük pontosan 1 maximum található. Eltérés azonban a Δ-ra kapott érték és az optimumok pontos helye.

Ezen eredmények alapján arra következtethetünk, hogy Δ nem lesz igazán jó mérőszáma az aszimmetriának, hiszen az értéke függ a tanúfüggvény definiálásának módjától. Valamint azt is tapasztaltuk, hogy a tanú értéke függ a háromszög méretétől is, ami szintén az aszimmetriától független tulajdonság. Továbbá az is látható, hogy a Δ-t a szimmetrikusságra konfiguráció fogja nagyban meghatározni.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] EKERT et al.: *Introduction to Quantum Information Science*. 2024. okt. 24. URL: qubit.guide.

[2] G. DRÓTOS et al.: *Towards minimal self-testing of qubit states and measurements in prepare-and-measure scenarios*. New J. Phys. 26, 063012 (2024).

[3] M. GALASSI et al. *GNU Scientific Library Reference Manual*. 3rd. ISBN: 0954612078.

[4] G. DRÓTOS, KÁROLY F. P. és T. VÉRTESI. *Self-testing of semisymmetric informationally complete measurements in a qubit prepare-and-measure scenario*. Phys. Rev. A 110 (3 2024), 32427. old.

[5] TAOUTIOUI, ABDELMALEK et al.: *Certifying asymmetry in the configuration of three qubits.* New J. Phys. (2025).

[6] THOMAS VAN HIMBEECK et al.: *Semi-device-independent framework based on natural physical assumptions,* Quantum 1, (2017).

SZÉLTURBINA LAPÁTPROFIL-ÍVELTSÉG JEGESEDÉSI ÉRZÉKENYSÉGRE GYAKOROLT HATÁSÁNAK NUMERIKUS VIZSGÁLATA

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF WIND TURBINE BLADE AIRFOIL PROFILE CURVEDNESS ON ICING SENSITIVITY

TOLLÁR Sándor

mesteroktató, sandor.tollar@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

Kivonat: *A tanulmány a szélturbina lapátok profiljaként gyakran használt 4 jegyű NACA profilok jegesedésre való érzékenységének vizsgálati eredményiről számol be. A vizsgálat célja, hogy összefüggést találjon a hasonló geometriájú, de különböző íveltségű profilok jegesedésre való érzékenysége között, illetve meghatározza a teljesítményromlás mértékét az íveltség függvényében. A vizsgálat számos szimulációt igényel, jelen publikáció az eddigi részeredmények ismertetését tartalmazza. Ismerteti a levonható következtetéseket, illetve a további feladatokat.*

Kulcsszavak: *szélturbina lapátprofil, jegesedés vizsgálat, NACA 4 jegyű profilok*

Abstract: *The study presents the results of an investigation into the susceptibility of four-digit NACA airfoil profiles—commonly used in wind turbine blades—to icing. The objective of the research is to identify correlations between airfoils of similar geometry but differing camber, in terms of their sensitivity to ice accretion, and to quantify the resulting performance degradation as a function of camber. The analysis requires a series of numerical simulations; the current publication summarizes the partial results obtained thus far. The paper discusses the main conclusions that can be drawn from these results and outlines the remaining tasks for future work.*

Keywords: *wind turbine blade airfoil profile, icing investigation, NACA four-digit airfoils*

1. BEVEZETÉS

A tanulmány célja a szárazföldi – onshore – szélturbina lapátok jegesedése okozta aerodinamikai teljesítmény veszteség és a profil íveltsége közti összefüggések feltárása. A tapasztalatok alapján a szélturbinák hatásfoka jelentős mértékben romlik, ha az időjárási körülmények miatt a lapátok felületére jég rakódik le [1-4]. Az onshore szélturbinák lapátprofiljait általában a légáramlásokhoz optimalizált profilok alkotják. Számos NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) 4-számjegyű profilt alkalmaznak erre a célra, attól függően, hogy az adott gyártó és tervező milyen specifikációk szerint optimalizálja a lapátprofilokat a saját szélturbináihoz. Ezek a profilok különböző aerodinamikai jellemzőkkel rendelkeznek. Az általánosan használt profiltulajdonságot kifejező adat a felhajtóerő-tényező és az ellenállástényező hányadosaként értelmezett jósági tényező. A tanulmány ezért a profilok jóság tényezőjének alakulását vizsgálja. A számítások során a kiválasztott 4 jegyű NACA profilok vastagsága és a profil maximális íveltségének helye nem változott. A tanulmány kizárólag a profil íveltsége és a jegesedés okozta teljesítményveszteség közti kapcsolatot vizsgálja. A számítások különböző megfúvási szögek mellett készültek a profil jegesedésre való érzékenységének megállapítása céljából.

A jegesedést befolyásoló időjárási körülmények (jellemző szélerősség, környezeti hőmérséklet, a levegő nedvességtartalma, a jellemző csapadék megjelenési formája) a szakirodalomban fellelhető adatok alapján kerültek meghatározásra [5].

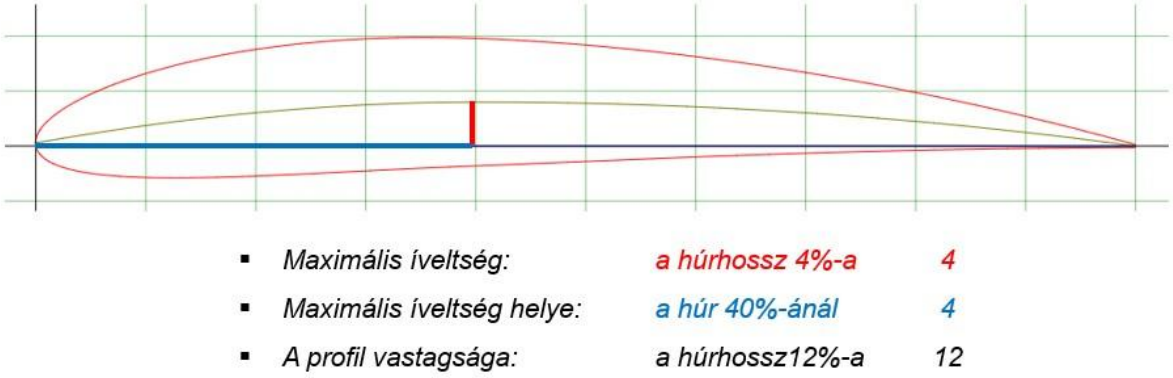
A tanulmányban szereplő eredmények az Ansys fluent 2022 FensAP ICE moduljával készített szimulációkon alapulnak.

2. VIZSGÁLATI PARAMÉTEREK

2.1. NACA profilok

A vizsgálatok a 2412, 4412, 6412 jelű 4 jegyű NACA profilokon kerültek elvégzésre. A NACA 2412 profil jegesedés okozta aerodinamikai paramétereinek változását jégképződést lehetővé tevő szélcsatornában hasonló céllal vizsgálta Rotich I., Kollár L. E. szerzőpáros [6]. Ezért ezt a profil szolgál referenciaként a vizsgálatokhoz.

Az alkalmazott profilok húrhossza 1 m. A profilok geometriai adatai közül a profil maximális íveltsége a 4 jegyű azonosító szám első karaktere. A számjegyek jelentését az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra: *NACA 4412 profil geometriai adatai*

2.2. Időjárási körülmények

Az időjárási körülményeket a jégképződést okozó jellemző és gyakran előforduló értékek [5] megválasztásával az 1. táblázat mutatja. A csapadékcseppek eloszlása a szimulációban monodispers eloszlásként került meghatározásra. A szimuláció eredményét nem befolyásolja érdemben, azonban a multidispers eloszlás számítási időszükséglete a figyelembe vett különböző méretű cseppek számával arányosan sokszorozódik.

1. táblázat: *A rögzített időjárási körülmények*

U_∞ **= szélsebesség**	10 m/s
T_s **= környezeti levegőhőmérséklet**	-5 ˚C
***LWC* = nedvességtartalom**	1 g/m^3
***MVD* = a csapadékcseppek közepes átmérője**	30 µm
***DSD* = csapadékcsepp eloszlás**	Monodispers

2.3. Jegesedés szimuláció

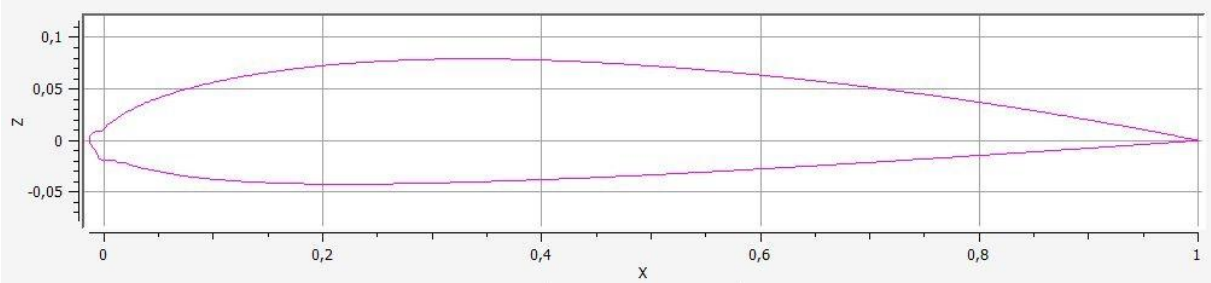
Működés közben a profil relatív megfúvási szöge (α, AoA – Angle of Attack) az aktuális időjárási körülményekhez igazodva változik, ezért a vizsgálat különböző megfúvási szögek mellett került elvégzésre. A megfúvási szögek értéke α=0° és α=10° között került változtatásra 2° lépésközzel.

A vizsgált szárnyprofilok jegesedése az ANSYS Fensap-ICE szimulációs moduljával került meghatározásra. A szimuláció k-ω SST turbulencia model használatával készült. A vizsgálat minden konfiguráció esetén 120 perc jégképződési idővel zajlott. A szimuláció teljes felépítése egy korábbi cikkben került ismertetésre [3].

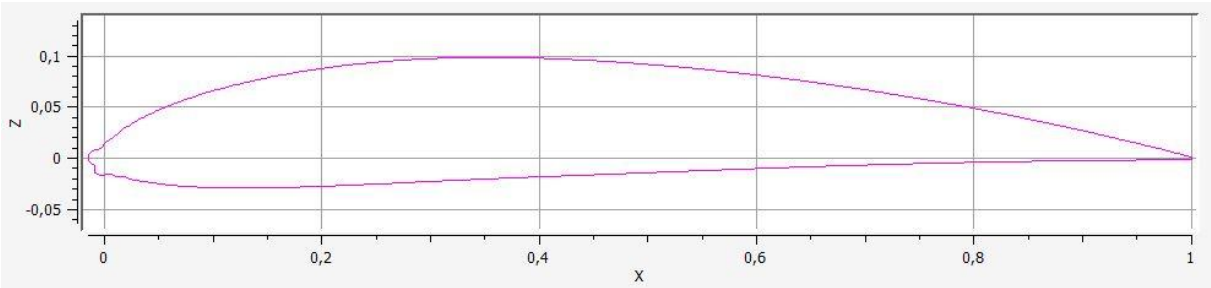
3. SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK

3.1. Jégalakok a vizsgált profilokon

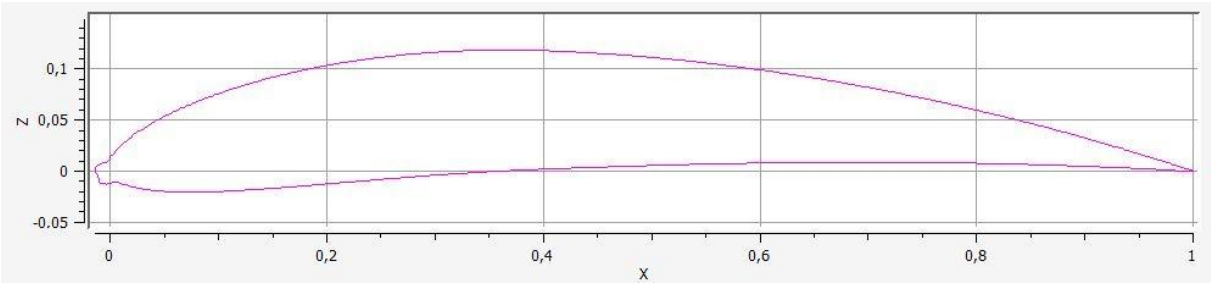
A szimulációk eredményeként a kialakuló jég által módosított profilok geometriai alakként állnak rendelkezésre. A szimuláció a futtatás során számítja a módosult profilok ellenállás és felhajtóerő tényezőjét is. Az adatok 15 perc jegesedési időnként rögzítésre kerültek. A szimulációs eredmények közül szemléltetésként az α=4° megfúvási szög esetén 75 perc jégképződés után kialakuló jégalak látható a 2. - 4. ábrán.



2. ábra: *NACA2412 - jégalak szárnyprofilon, Monodispers cseppeloszlás, k-ω SST turbulencia modell, Fensap-ICE Szimuláció, Re=7,75x10^5, T=-5 °C, α=4 °, idő=75 perc*



3. ábra: *NACA4412 - jégalak szárnyprofilon, Monodispers cseppeloszlás, k-ω SST turbulencia modell, Fensap-ICE Szimuláció, Re=7,75x10^5, T=-5 °C, α=4 °, idő=75 perc*



4. ábra: *NACA6412 – jégalak szárnyprofilon, Monodispers cseppeloszlás, k-ω SST turbulencia modell, Fensap-ICE Szimuláció, Re=7,75x10^5, T=-5 °C, α=4 °, idő=75 perc*

3.2. A jósági fok alakulása különböző íveltségű profilokon 4° megfúvási szög esetén

A profilokra ható emelő erők (Lift Force), ellenállás erők (Drag Force), felhajtóerő tényezők (C_L), ellenálláserő tényezők (C_D), valamint a jósági tényezők (C_L/C_D) és annak a tiszta profilhoz viszonyított relatív értékeinek alakulása a jegesedési idő (IAT – Icing Accretion Time) függvényében α=4° megfúvási szög esetén 75 perc jegesedési idő alatt a 2., 3., 4. táblázatban láthatók.

2. táblázat: A NACA2412-es profil adatai

NACA2412, T=-5°C, α=4°, Re=7,75x10⁵				***C_L ref.***	32,76826	
IAT	***Force***	***[N]***			***C_L/C_D***	***C_L/C_D / $C_L/C_D(T_0)$***
0 perc	***lift***	37,67000	***C_L***	0,57410	32,76826	100,00 %
	drag	1,15000	***C_D***	0,01752		
15 perc	***lift***	37,08000	***C_L***	0,56510	31,71156	96,78 %
	drag	1,16900	***C_D***	0,01782		
30 perc	***lift***	37,39000	***C_L***	0,56970	33,02609	100,79 %
	drag	1,13200	***C_D***	0,01725		
45 perc	***lift***	37,49000	***C_L***	0,57120	32,36261	98,76 %
	drag	1,15800	***C_D***	0,01765		
60 perc	***lift***	37,44000	***C_L***	0,57050	32,01459	97,70 %
	drag	1,16900	***C_D***	0,01782		
75 perc	***lift***	37,36000	***C_L***	0,56930	31,10929	94,94 %
	drag	1,20100	***C_D***	0,01830		

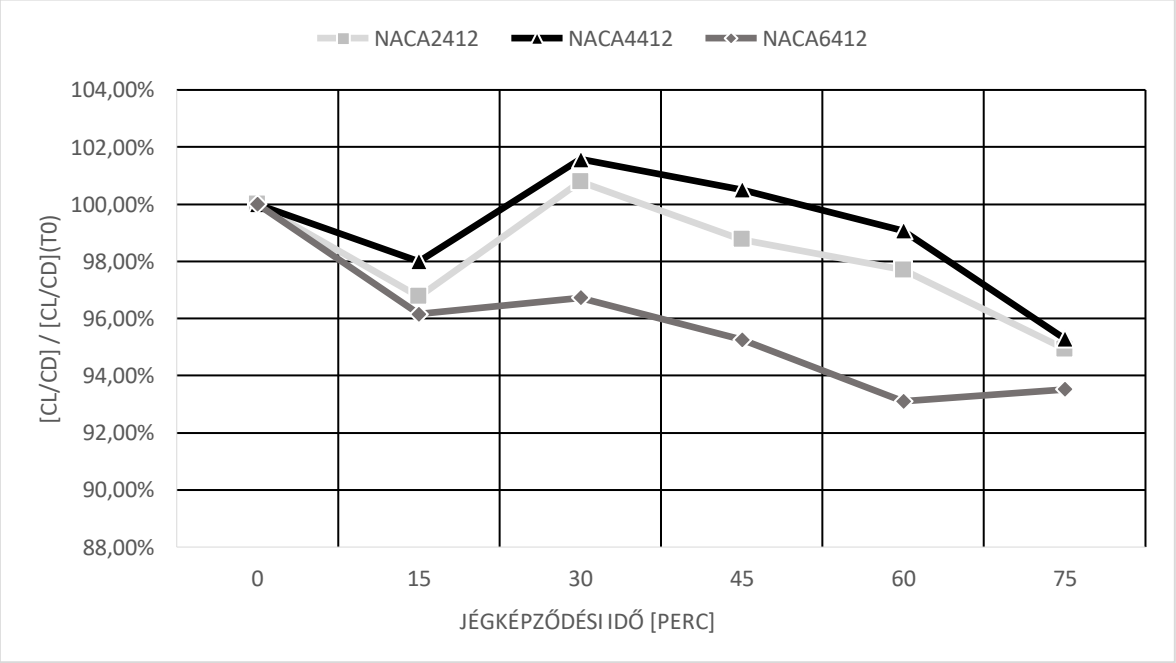
3. táblázat: *A NACA4412-es profil adatai*

NACA4412, T=-5°C, α=4°, Re=7,75x10⁵				***C_L ref.***	35,46800	
IAT	***Force***	***[N]***			***C_L/C_D***	***C_L/C_D / $C_L/C_D(T_0)$***
0 perc	***lift***	48,74000	***C_L***	0,74270	35,46800	100,00 %
	drag	1,37400	***C_D***	0,02094		
15 perc	***lift***	47,65000	***C_L***	0,72610	34,75826	98,00 %
	drag	1,37100	***C_D***	0,02089		
30 perc	***lift***	47,86000	***C_L***	0,72920	36,02767	101,58 %
	drag	1,32800	***C_D***	0,02024		
45 perc	***lift***	47,96000	***C_L***	0,73080	35,64878	100,51 %
	drag	1,34500	***C_D***	0,02050		
60 perc	***lift***	47,90000	***C_L***	0,72990	35,14203	99,08 %
	drag	1,36300	***C_D***	0,02077		
75 perc	***lift***	47,77000	***C_L***	0,72800	33,79759	
	drag	1,41300	***C_D***	0,02154		95,29 %

4. táblázat: *A NACA6412-es profil adatai*

NACA6412, T=-5°C, α=4°, Re=7,75x10^5					***C_L ref.***	35,14376	
IAT	***Force***	***[N]***				***C_L/C_D***	***C_L/C_D / $C_L/C_D(T_0)$***
0 perc	***lift***	58,56000		***C_L***	0,89230	35,14376	100,00%
	drag	1,66600		***C_D***	0,02539		
15 perc	***lift***	57,01000		***C_L***	0,86880	33,79230	96,15%
	drag	1,68700		***C_D***	0,02571		
30 perc	***lift***	56,91000		***C_L***	0,86720	33,99451	96,73%
	drag	1,67400		***C_D***	0,02551		
45 perc	***lift***	56,83000		***C_L***	0,86600	33,47507	95,25%
	drag	1,69800		***C_D***	0,02587		
60 perc	***lift***	56,68000		***C_L***	0,86380	32,71970	93,10%
	drag	1,73200		***C_D***	0,02640		
75 perc	***lift***	56,76000		***C_L***	0,86500	32,86474	
	drag	1,72700		***C_D***	0,02632		93,52%

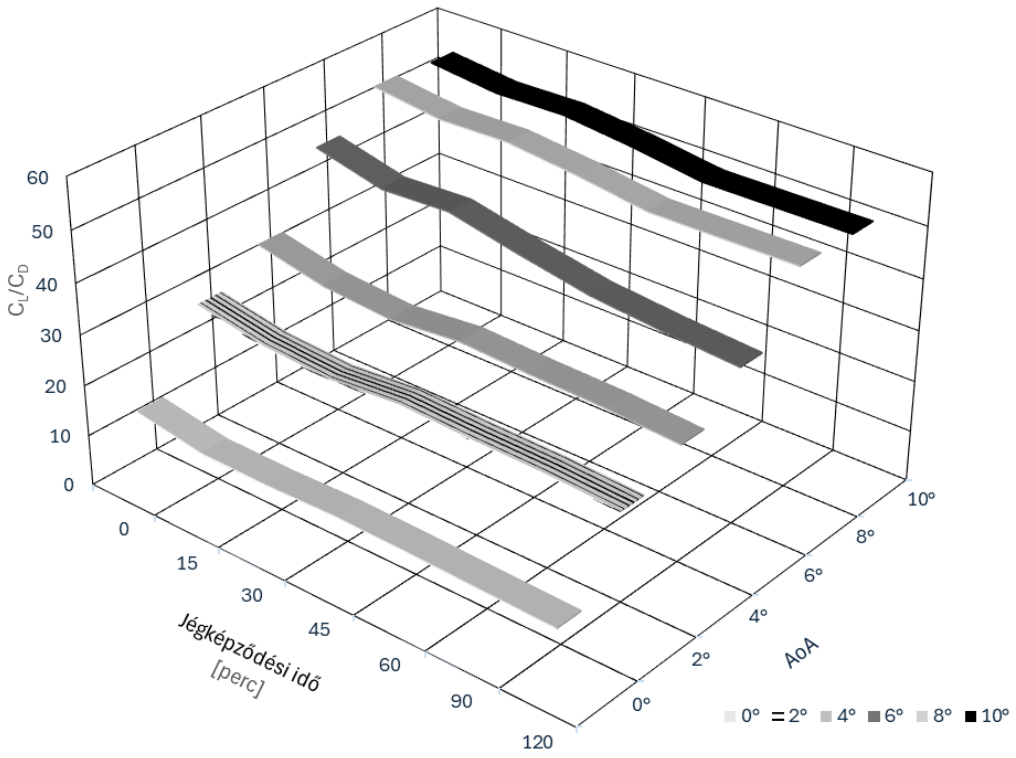
A profilok relatív jósági tényezőinek egymáshoz viszonyítását a 5. ábra tartalmazza. Megfigyelhető, hogy a jegesedés kezdeti szakaszán jelentősen csökkennek az értékek, majd a tiszta profilnál jobb eredményeket látunk. Ennek magyarázata további vizsgálatot kíván. Azonban 30 perc jegesedés után konzekvens csökkenés figyelhető meg. A jósági tényező 60 perc jegesedés után egyértelműen kisebb a tiszta profilhoz viszonyítva. A vizsgált profilok közül a nagyobb íveltségű profil szenvedi el a legnagyobb teljesítményromlást. Azonban a legkevésbé érzékeny profil a NACA 4412 profil.



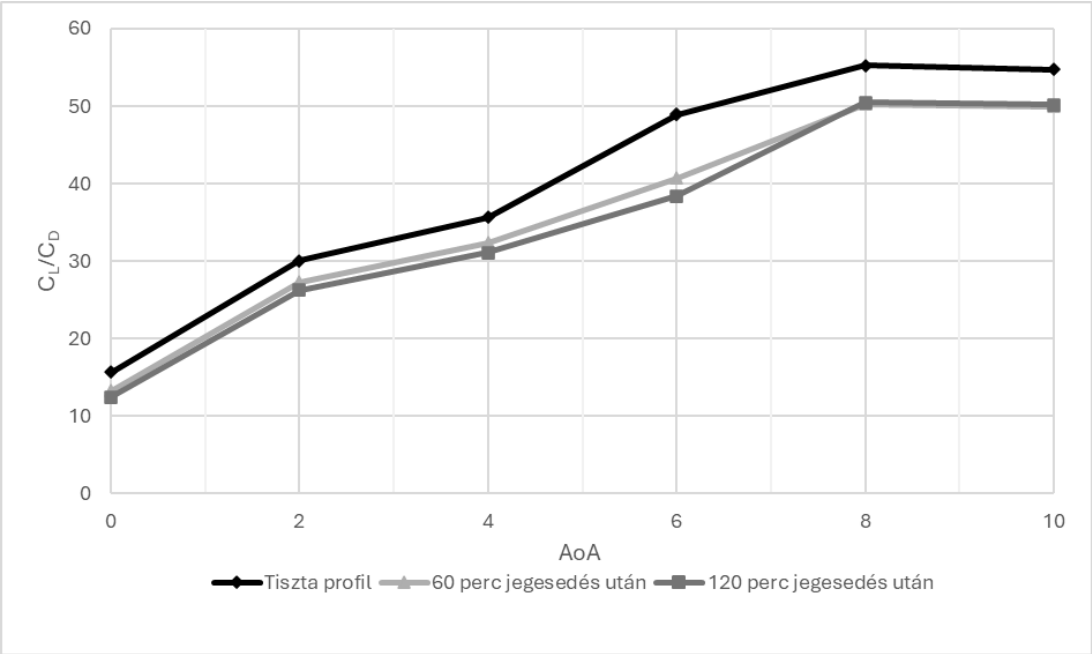
5. ábra: *A relatív jósági tényező alakulása a jégképződési idő függvényében*

3.3. A NACA 2412 profil teljes vizsgálata

A NACA 2412 profilról teljes szimulációs adat áll rendelkezésre a vizsgálati tartományban. A kapott eredményeket a megfúvási szög és a jegesedési idő függvényében az 6. ábra mutatja. A jósági tényező romlása a jegesedési idő függvényében egyértelműen megfigyelhető az ábrán.



6. ábra: *C_L/C_D viszony NACA 2412 profilon különböző megfúvási szögeknél*



7. ábra: *C_L/C_D viszony NACA 2412 profilon különböző megfúvási szögeknél*

A kezdeti időpontban, 60 perc jegesedést követően, valamint 120 perc jegesedést követően készült metszetek láthatók a 7. ábrán. Megállapítható, hogy a jósági fok romlása a megfúvási szöggel is változik, 6° esetén e legnagyobb. Az is megfigyelhető, hogy az első 60 percben kialakult értéke a második 60 percben már csekély mértékben változnak. Ennek oka további vizsgálatokat igényel.

4. ÖSSZEGZÉS

A Vizsgált profilok szimulációs eredményei alapján egyrészt megállapításra került, hogy a profilok íveltsége és jegesedésre való érzékenysége között szoros összefüggés van. Továbbá a NACA 2412 profil teljes vizsgálati tartományban rendelkezésre álló adatai alapján bizonyos állásszögeknél, jelen esetben 4° és 8° közötti tartományban érzékenyebb a profil a jégképződésre. A pontos relációk megállapításához a további szimulációs eredményekre is szükség van. Ezen eredményekről egy későbbi tanulmány fog beszámolni.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] BATTISTI, L.: *Wind Energy in Cold Climates,* Green Energy and Technology, pp. 43-111. 2015.

[2] HOMOLA, MATTHEW C., VIRK, MUHANMMAD S., NICKLASSON, PER J., SUNDSBO, PER A.: *Performance losses due to ice accretion for a 5MW wind turbine,* Wind Energy 15, pp. 379–389. 2012.

[3] LAMRAOUI, F., FORTIN, G., BENOIT, R., PERRON, J., MASSON, C.: *Atmospheric icing impact on wind turbine production.* Cold Regions Science and Technology, 100, pp. 36–49. 2014.

[4] BLASCO, P., PALACIOS, J., SCHMITZ, S.: *Effect of icing roughness on wind turbine power production.* Wind Energy 20, 601–617. 2026.

[5] TÓTH, K.: *Zúzmaraképződés előre jelezhetőségének vizsgálata numerikus modell outputok alapján.* ELTE. 2007.

[6] ROTICH, I., & KOLLÁR, L. E.: *Numerical simulation of the performance of an asymmetrical airfoil under extreme weather conditions.* Mérnöki És Informatikai Megoldások. 2022.

[7] TOLLÁR, S.: *CFD Model For Free-Flow Simulation of Wind Turbine Bade*s, The 9th International Conference on "Advanced Composite Materials Engineering" – COMAT 2022, Brașov, pp. 133-139. 2022.

SZERVES NAPELEMEK FEJLŐDÉSTÖRTÉNETE

THE DEVELOPMENT HISTORY OF ORGANIC SOLAR CELLS

MATUSZ-KALÁSZ Dávid

PhD, adjunktus, david.matusz-kalasz@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

Kivonat: *Az organikus fotovoltaikus (OPV) technológia az elmúlt két évtizedben gyors fejlődésen ment keresztül, a kis molekulás kezdetektől a korszerű nem-fullerén akceptoros rendszerekig. A tanulmány áttekinti a technológia három–négy generációját, különös hangsúlyt helyezve a fullerén alapú időszak két szakaszára: a klasszikus P3HT:PCBM rendszerekre és a halogénezett polimer–új fullerén derivátumú cellákra. Bemutatom a szerkezeti felépítést, az anyagi innovációkat, valamint az energetikai és morfológiai fejlesztéseket, amelyek lehetővé tették a hatásfok folyamatos növekedését. A nem-fullerén akceptorok (NFA) megjelenése új korszakot nyitott meg, jelentősen javítva a spektrális elnyelést, az üresjárási feszültséget (V_{OC}) és a cellák stabilitását. A tanulmány célja, hogy átfogó képet adjon az OPV technológia fejlődési útjáról és a jelenlegi kutatási irányokról.*

Kulcsszavak: *organikus fotovoltaika (OPV), fullerén- és nem-fullerén akceptorok, bulk heterojunction (BHJ), polimer alapú napelemek*

Abstract: *Organic photovoltaic (OPV) technology has undergone remarkable development over the past two decades, progressing from early small-molecule devices to today's highly efficient non-fullerene acceptor (NFA) systems. This paper reviews the evolution of OPV across three to four generations, with particular emphasis on the two fullerene-based stages: the classical P3HT:PCBM architecture and the later halogenated polymer–advanced fullerene derivatives. The structural design, material innovations, and energetic as well as morphological improvements responsible for efficiency gains are presented. The emergence of NFA materials has opened a new era, offering enhanced spectral absorption, higher open-circuit voltages (V_{OC}), and improved operational stability. The study aims to provide a comprehensive overview of OPV development pathways and current research trends.*

Keywords: *organic photovoltaics (OPV), fullerene and non-fullerene acceptors, bulk heterojunction (BHJ), polymer solar cells*

1. BEVEZETÉS

A napenergia hasznosítása az elmúlt évtizedekben a fenntartható energiaellátás egyik kulcsterületévé vált. A globális energiaigény folyamatos növekedése, valamint a fosszilis energiahordozók környezeti és gazdasági korlátai miatt egyre nagyobb figyelem irányul a megújuló forrásokra. A fotovoltaikus technológiák között a szilícium alapú napelemek napjainkban uralkodó szerepet töltenek be, köszönhetően érett gyártástechnológiájuknak, 20–25% körüli kereskedelmi hatásfokuknak és akár több évtizedes élettartamuknak. Ugyanakkor a szilícium cellák előállítása energiaigényes, költséges, és a kialakításuk jellemzően merev, ami korlátozza az alkalmazhatóságukat bizonyos területeken.

E korlátok ösztönözték új, alternatív fotovoltaikus koncepciók kutatását, amelyek közül az úgynevezett „harmadik generációs" technológiák (például a festék-érzékenyített, a perovszkit alapú, valamint a szerves polimer és molekuláris napelemek) kiemelt figyelmet kaptak [1]. Ezek közös jellemzője, hogy olcsóbban és egyszerűbben előállíthatók, gyakran oldatfeldolgozhatók, valamint könnyű és akár flexibilis hordozókra integrálhatók.

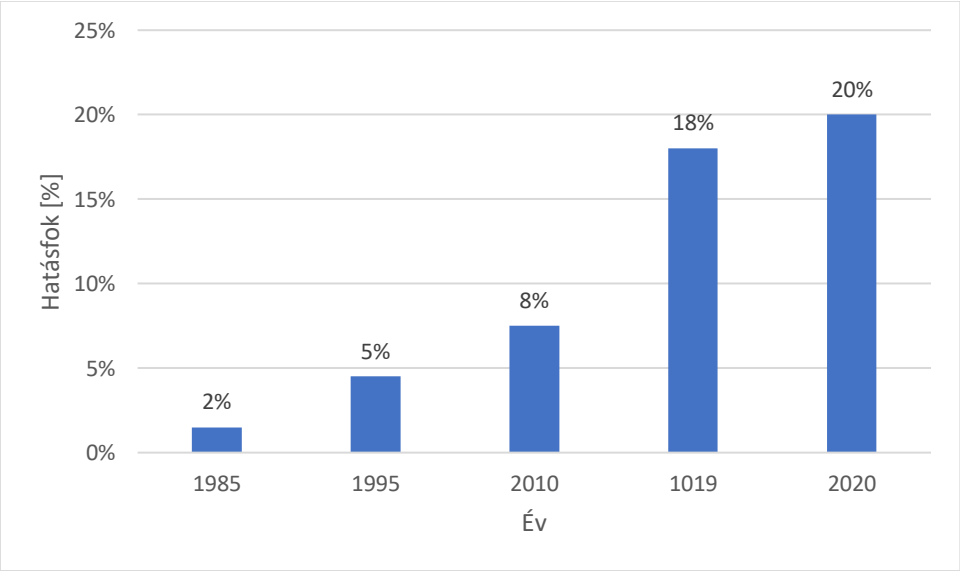
A szerves napelemek (OPV – organic photovoltaics) különösen ígéretesek, mivel a szénalapú konjugált polimerek és kis molekulák fényelnyelő és töltésszállító tulajdonságai révén lehetővé teszik vékony, könnyű és részben átlátszó eszközök létrehozását. A szilíciumtól eltérően a szerves anyagokban a fotonok elnyelése elsősorban excitonokat hoz létre, amelyek szétválasztása speciális szerkezetek kialakítását igényli. Ez a működési sajátosság alapvetően eltérő

fejlődési irányt és anyagfejlesztést indított el [2].

1. táblázat: *Az organikus napelem generációk és főbb jellemzőik*

Generáció	***Anyag***	***Hatásfok***	***Megjegyzés***
1.	Kis molekulák	~1%	Alapkutatás, alacsony teljesítmény
2.	Polimer–fullerén keverékek	~5%	Bulk heterojunction koncepció
3.	Halogénezett polimerek, új fullerének	8–10%	Spektrális elnyelés javítása
4.	Nem-fullerén akceptorok	>19%	Stabilabb és szélesebb spektrumú fényelnyelés

Az elmúlt négy évtizedben a szerves napelemek fejlődése több jól elkülöníthető generációra bontható. Az első kísérleti egyrétegű és kétrétegű cellák még csak laboratóriumi érdekességnek számítottak, néhány tizedszázalékos hatásfokkal. A második generációban a polimer–fullerén alapú bulk heterojunction (BHJ) szerkezetek már nagyságrendekkel jobb teljesítményt nyújtottak, és megteremtették a mai kutatások alapját. A legújabb, harmadik generációs fejlesztésekben a nem-fullerén akceptorok (NFA) és a tandem cellák révén a laboratóriumi hatásfok elérte, sőt meg is haladta a 18–20%-ot (1. ábra), amely a szilícium technológia szintjéhez közelít [3].



1. ábra: *Az organikus napelemek hatásfokának javulása az elmúlt évtizedekben*

Jelen tanulmány célja, hogy áttekintse a szerves napelemek fejlődéstörténetét az első laboratóriumi kísérletektől a legújabb anyagtudományi és szerkezetfejlesztési áttörésekig, bemutatva a főbb anyagokat, koncepciókat és kihívásokat, valamint felvázolva a jövőbeli lehetőségeket.

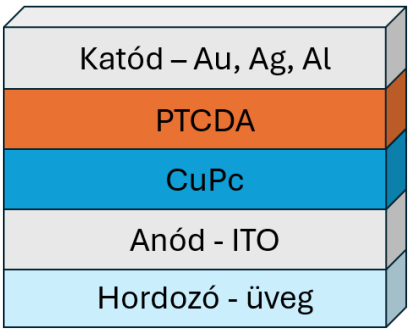
2. ELSŐ GENERÁCIÓ – KIS MOLEKULÁS SZERVES CELLÁK

A szerves anyagok fotovoltaikus alkalmazásának gondolata a 20. század második felében jelent meg, amikor világossá vált, hogy bizonyos aromás és konjugált molekulák képesek fényt elnyelni, és foton hatására vezetőképességük megváltozik. Az 1970-es évek végén és az 1980-as évek elején születtek meg az első kísérleti szerves fotodiódák, amelyek egyszerű egyrétegű szerkezetek voltak [4]. Ezekben a cellákban egy vékony szerves félvezető filmet helyeztek két elektróda közé, és a fény hatására létrejött töltéshordozók áramot generáltak. A hatásfok azonban rendkívül alacsony, tipikusan 0,1% alatti volt, mivel a szerves anyagokban keletkező gerjesztett állapot, az úgynevezett exciton, erősen kötött formában jön létre, és önmagában nem képes hosszú távon szabad elektronra és lyukra szétválni.

A fejlődés egyik legfontosabb mérföldkövét Ching W. Tang és munkatársai érték el 1986-ban a Kodak kutatólaboratóriumában. Tang kétrétegű heteroszerkezetet épített, amelyben két különböző szerves molekulát alkalmaztak: a réz-ftalocianint (CuPc), mint donor anyagot, valamint a perilen-tetrakarboxi-dianhidrid (PTCDA) nevű molekulát, mint akceptort [5]. A két anyag határfelületén lehetőség nyílt arra, hogy az exciton szétváljon, mivel a molekulák elektronszerkezetében lévő energiakülönbség elősegítette az elektron átadását a CuPc-ről a PTCDA-ra.

A 2. ábra mutatja be a donor-akceptor rétegek helyét az első generációs napelemeken belül. Ezen felül további rétegekre is szükség van. A fény felőli oldalról haladva sorrendben az első réteg a hordozó felület, ami leggyakrabban üveg. A pozitív, anód elektróda anyaga ITO (Indium-Tin-Oxide / Indium-ón-oxid), ami egy átlátszó vezető oxid réteg. Feladata a pozitív töltéshordozók (lyukak) összegyűjtése és elvezetése a külső áramkör felé. Fontos, hogy az ITO fényáteresztő legyen, mert ezt a réteget követi a fényelnyelő CuPc szerves p-típusú félvezető. Ez a réteg nyeli el a fény egy részét, és itt keletkeznek az excitonok (elektron-lyuk párok). A CuPc lyukvezetőként viselkedik, és átadja az elektronokat a következő rétegnek a határfelületen. A következő réteg szerves n-típusú félvezető PTCDA akceptor, ami fogadja a CuPc-ből érkező elektronokat. Mindkét réteg jellemzően 30-50 nm vastagságú.

A sort a negatív elektróda (katód) zárja, ami jellemzően ezüst (Ag) vagy arany (Au), esetenként alumínium (Al). Ez a hátsó kontaktus, amely összegyűjti az elektronokat a PTCDA rétegből. Mivel ez a réteg nem átlátszó, gyakran tükörként is szolgál, visszaverve a fényt az aktív rétegekbe a hatásfok növelése érdekében. Ez a felsorolási rend gyártástechnológiai okokra vezethető vissza.



2. ábra: *Az első generációs napelem cellák rétegrendje*

Ez a kétrétegű cella már körülbelül 1% körüli hatásfokkal működött, amely a korábbi eredményekhez képest nagyságrendi előrelépést jelentett. Bár ez a teljesítmény messze elmaradt a szilícium napelemekétől, bebizonyította, hogy a szerves anyagokból készült eszközök valóban alkalmasak lehetnek napenergia átalakítására. A Tang-féle heterostruktúra tekinthető tehát a szerves napelemek első generációjának.

Az első generációs szerves napelemek legfőbb korlátja az volt, hogy a kétrétegű szerkezet határfelülete túl kicsi volt ahhoz, hogy a rövid élettartamú excitonok nagy számban érjék el és ott szétváljanak. Az exciton diffúziós hossza szerves anyagokban általában mindössze 10–20 nanométer, miközben a fény hatékony elnyeléséhez vastagabb rétegre lenne szükség. Ez az ellentmondás – a fényelnyelés és az excitonszétválás hatékonyságának konfliktusa – határozta meg a korai szerves cellák teljesítményét.

Mindezek ellenére az első generáció mérföldkőnek tekinthető, mivel lefektette a későbbi fejlesztések alapjait: megmutatta, hogy a donor–akceptor koncepció működőképes, és hogy az energiasávok megfelelő illesztése kulcsfontosságú a szerves fotovoltaikus eszközök hatékony működéséhez.

3. MÁSODIK GENERÁCIÓ – POLIMER–FULLERÉN RENDSZEREK

Az 1990-es évektől kezdve a szerves napelemek kutatása új lendületet kapott a konjugált polimerek és a fullerének alkalmazásával. Sariciftci és munkatársai 1992-ben kimutatták, hogy a polimerekből az elektron fotonhatásra átadható a fullerén molekuláknak [6]. Ez volt a polimer–fullerén elektronátadás első bizonyítéka. Az első generáció kétrétegű szerkezeteinek legnagyobb korlátja az volt, hogy az excitonok diffúziós hossza (10–20 nm) sokkal kisebb volt, mint a fényelnyeléshez szükséges rétegvastagság, ezért a gerjesztett állapotok jelentős része rekombinálódott, mielőtt elérhette volna a donor–akceptor határfelületet. Erre a problémára jelentett megoldást a második generáció kulcskoncepciója: a bulk heterojunction (BHJ) szerkezet.

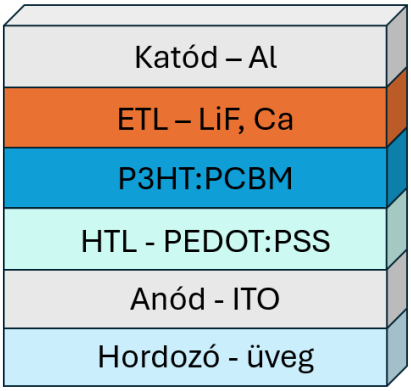
1995-ben Yu és munkatársai bevezették a bulk heterojunction (BHJ) koncepciót, amelyben a donor és akceptor anyagokat oldatban keverik, és nanoszerkezetű hálózatot hoznak létre [7]. Ez forradalmi előrelépést jelentett az excitonok szétválasztásában.

A BHJ cellákban a donor és az akceptor anyagot nem külön rétegekbe rendezik, hanem oldatban összekeverve, majd közösen felvitt vékonyfilmben kristályosítják ki. Ennek eredményeként egy nanoszkopikus méretű, összekuszált hálózat jön létre, amelyben a donor és akceptor fázisok eloszlása nagy felületet biztosít az excitonok szétválásához. Így a rövid diffúziós hossz ellenére a legtöbb exciton hatékonyan elérheti a határfelületet, ami jelentősen javítja a kvantumhatásfokot.

A második generációs szerves napelemekben jellemzően konjugált polimereket használnak donor anyagként, amelyek előnye, hogy oldható formában előállíthatók, könnyen feldolgozhatók és jól illeszthetők az optikai elnyelés igényeihez. Az egyik első sikeres polimer a poli(3-hexiltiofén) (P3HT) volt, amelyet a 2000-es évek elején széles körben alkalmaztak. Akceptor anyagként pedig a fullerének – különösen a C_{60} származékai – bizonyultak alkalmasnak. A leggyakrabban alkalmazott vegyület a fenil-C61-vajsav-metil-észter (PCBM), amely jó elektrontranszport-tulajdonságai és oldhatósága miatt vált a szerves fotovoltaika egyik standard anyagává.

A P3HT:PCBM alapú bulk heterojunction cellák kezdetben 2–3% hatásfokot értek el, de a rétegvastagság, az oldószerek és a hőkezelési eljárások optimalizálásával 4–5%-ig sikerült növelni ezt az értéket. Ez a teljesítmény már demonstrálta, hogy az OPV képes lehet kilépni a laboratóriumi érdekesség szintjéről, és reális alternatívává válhat speciális alkalmazásokban.

A 3. ábra mutatja be a második generációs organikus napelem cellák rétegrendjét. A fény felőli oldalról haladva sorrendben az első réteg a hordozó felület, ami leggyakrabban az első generációs példához hasonlóan üveg. A korábbi generációhoz képest a pozitív elektróda újfent az ITO (Indium-Tin-Oxide / Indium-ón-oxid), ami egy átlátszó vezető réteg, és a lyukak összegyűjtésére hivatott. Egy nagy áttörést és újítást jelentett a PODOT:PSS lyukszállító puffer réteg (HTL - Hole Transport Layer) alkalmazása. Az ITO felülete mikroszkopikus szinten "tüskés", a PEDOT:PSS ezt kisimítja, valamint segít a lyukaknak könnyebben átlépni az aktív rétegből az ITO-ba. A PEDOT:PSS egy géles, vizes diszperzió, ami száradás után egy nagyon sima filmet képez. Eltünteti az egyenetlenségeket, így biztonságos alapot ad a további rétegeknek. Az első generációtól eltérően a fényérzékeny rétegben keverve (Bulk Heterojunction) helyezkednek el a P3HT (donor polimer) és PCBM (akceptor fullerén származék) anyagok. A két anyagot közös oldószerben feloldják, majd felviszik (pl. spin-coatinggal). Száradás közben a két anyag fázis-szétválik, és egy kb. 10–20 nanométeres tartományokban összefonódó hálózatot alkotnak. Így bárhol keletkezik exciton (gerjesztés), az szinte azonnal talál egy határfelületet, ahol szétválhat töltésekké, mielőtt elveszne az energiája. További lényeges újítást jelentett az elektronszállító puffer réteg (ETL - Electron Transport Layer) alkalmazása. Anyaga jellemzően LiF (lítium-fluorid) vagy Ca (kalcium) és extrém vékony (néha csak 1 nm). Csökkenti a kilépési munkát a fém katódnál, és védi az aktív réteget a forró fém gőzölésekor. Zárásképp a negatív, katód elektróda jellemzően alumínium.



3. ábra: *A második generációs napelem cellák rétegrendje*

A 2000-es évek végére új, kifinomultabb polimer donorok jelentek meg, mint a PCDTBT és a PTB7, amelyek szélesebb spektrumú fényelnyelést és jobb energiaszint-illesztést biztosítottak. Ezekkel a polimerekkel, PCBM akceptorral párosítva már 7–8% körüli hatásfokokat is sikerült elérni [8]. A második generáció végére tehát a szerves napelemek hatásfoka nagyságrendileg tízszeresére nőtt az első generációhoz képest, ami új kutatási és ipari érdeklődést eredményezett.

A polimer–fullerén rendszerek ugyanakkor korlátozott fejlődési lehetőségekkel rendelkeznek. A fullerének fényelnyelése gyenge, kémiai stabilitásuk korlátozott, és az energiaszintek hangolhatósága is nehézkes. Ezek a problémák készítették elő a terepet a harmadik generációs és később a nem-fullerén akceptorokon alapuló cellák számára.

4. HARMADIK GENERÁCIÓ – HALOGÉNEZETT POLIMER ÉS ÚJ FULLERÉN

A harmadik generációs OPV korszakát (kb. 2010–2017) a fejlett polimer donormolekulák, valamint az új fullerén-származékok (C_{70}, ICBA, bisfullerén) alkalmazása jellemzi. Ekkor a kutatás fókusza a molekula–energetika hangolására helyeződött, melynek célja:

- a sávszélesség optimalizálása,
- a Voc–Jsc–FF összefüggésének javítása,
- a spektrális elnyelés vörös tartományig történő kiterjesztése.

A korszak egyik kiemelkedő fejlesztése volt a halogénezett polimer donortípusok bevezetése, például PTB7, PTB7-Th és PBDTT–TS1, amelyek a frekvenciatartomány finomhangolásával 8–10% hatásfokot is lehetővé tettek [2, 9, 10]. Ezek mellett, a C_{70} fullerén-származékok alkalmazása jelentősen javította a rövidzárási áramot (I_{SC}), mivel ezek szélesebb spektrális elnyelést biztosítottak a látható fény felső (kék-zöld) tartományában. Az ICBA (indene-C60 bis-adduct) akceptor bevezetése tovább növelte a V_{OC} értékét, amely a korábbi PCBM-alapú cellák egyik fő korlátja volt [11]. Egyúttal ekkor vált egyértelművé a fullerén-limitáció, amely végül a nem-fullerén akceptor (NFA) generáció 2016 utáni megjelenéséhez vezetett [1]. A generáció legfontosabb eredményei:

- a hatásfok 10% közelébe emelése [2],
- ipari stabilitás javulása (tokozástechnológiai fejlődés),
- optimalizált fázisszétválási karakter (nano-domén struktúra),
- pontosított optoelektronikai paraméterhangolás.

2. táblázat: *Példák anyagválasztásara az organikus napelemekben betöltött funkció szerint*

Jellemző	***2. generáció***	***3. generáció***
Időszak	~1995–2010	~2010–2017
Donor anyag	P3HT	PTB7, PTB7-Th, PBDTT-TS
Akceptor	C_{60}–PCBM	C_{70}, ICBA, bis-fullerén
Fő cél	BHJ működés megértése	Energetikai hangolás és nagyobb V_{OC}
Tipikus hatásfok	3–5%	8–10%
Morfológiai kontroll	hőkezelés	oldószer–additív, terpénes módszer
Spektrális elnyelés	látható tartomány fele	szélesebb spektrum (UV–látható–NIR)
Korlát	V_{OC} limit, spektrális hiányosság	fullerén hatékonyság plafon

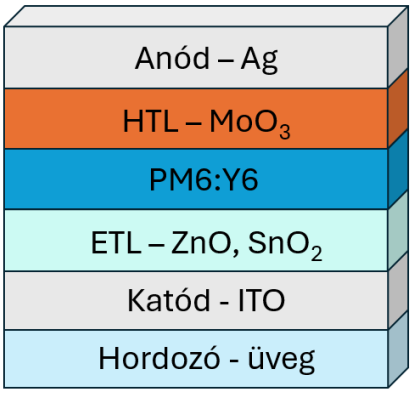
5. NEGYEDIK GENERÁCIÓ – NEM-FULLERÉN AKCEPTOROK ÉS TANDEM CELLÁK

A szerves napelemek fejlődésének következő állomását a nem-fullerén alapú akceptorok (NFA) megjelenése jelentette a 2010-es évek közepétől. A fullerén-származékok, minden előnyük ellenére, több komoly korláttal rendelkeztek: fényelnyelésük gyenge, szerkezetileg instabilak, valamint energiaszintjeik csak korlátozottan voltak hangolhatók. A kutatók ezért olyan új molekulákat kerestek, amelyek képesek szélesebb spektrumú elnyelésre, jobb energiaszint-illesztésre, és nagyobb stabilitásra.

Az első jelentős áttörést az ITIC (indacenodithieno-bisz-indanone) típusú molekulák hozták, amelyek sík, aromás vázzal és erősen elektronvonzó csoportokkal rendelkeznek. Az ITIC és hasonló akceptorok alkalmazásával a hatásfok rövid időn belül 10% fölé emelkedett [12]. A következő nagy előrelépést a Y6 nevű nem-fullerén akceptor jelentette, amelynek kifinomult molekulatervezése (fluorozott aromás gyűrűk, hosszú oldalláncok, planáris szerkezet) lehetővé tette a kiváló fényelnyelést a látható és közeli infravörös tartományban is. A Y6 alapú rendszerek 2019 után már 15–16%-os [13, 14], majd rövid időn belül közel 20%-os laboratóriumi hatásfokot értek el [3].

A nem-fullerén akceptorokkal párhuzamosan új donor polimerek is megjelentek, mint például a PM6 és a PTB7-Th, amelyek energiaszintjei jól illeszkednek az NFA-kéhoz, és elősegítik a hatékony excitonszétválást. Ezzel együtt a szerves napelemek működési mechanizmusa is finomodott: a korábbi „éles” elektronátadás helyett egyre inkább a finomhangolt energiaszintek és a delokalizált töltésállapotok játszanak szerepet a magas kvantumhatásfok elérésében.

A 4. ábra mutatja a legújabb generációs organikus napelemcellák rétegrendjét. A rétegrend hasonlít a második és harmadik generáció rétegrendjére. A változás inkább a hatékonyabb anyagválasztásban rejlik, mint a fényérzékeny réteg, mint a ETL és HTL rétegek esetében. Főbb változás, hogy a modern cellákban a fényérzékeny oldali ITO elektróda már negatív, katód lett. Pozitív elektródaként általában ezüstöt alkalmaznak.



4. ábra: *A negyedik generációs napelem cellák*

A negyedik generáció másik fontos iránya a tandem szerves cellák fejlesztése. Ezekben két vagy több aktív réteget helyeznek egymásra, amelyek különböző hullámhossztartományokban nyelik el a fényt. Így hatékonyabban kihasználható a napfény teljes spektruma, és csökkenthetők az energiaveszteségek. A tandem OPV cellák laboratóriumi körülmények között elérték, sőt bizonyos esetekben meg is haladták a 20%-os hatásfokot, ami már közvetlenül versenyképes a kristályos szilícium napelemekkel [3].

2. táblázat: *Példák anyagválasztásara az organikus napelemekben betöltött funkció szerint*

Funkció	***Anyagok***	***Megjegyzés***
Akceptor (elektron befogadó)	PCBM, ITIC, Y6	Fullerének és NFA-k
Donor (fényelnyelő)	P3HT, PTB7, PM6	Polimer, hosszú konjugált lánc
Elektróda	ITO, Ag,	Felső/belső kontaktus
Transzportréteg	ZnO, SnO_2, MoO_3	Segíti a töltésszeparációt

Mindemellett a negyedik generáció kihívásai is egyértelműek: a szerves anyagok stabilitása továbbra is korlátozott, a nedvesség, az oxigén és az UV-sugárzás gyorsan degradálhatja a teljesítményt. A gyártás ipari méretezése, valamint a hosszú élettartam biztosítása a jelenlegi kutatások fő célkitűzései közé tartozik.

Összességében a harmadik generációs szerves napelemek elérték azt a teljesítményszintet, amely már nem csupán tudományos érdekességként, hanem valódi alternatívaként is felveti a gyakorlati alkalmazások lehetőségét. Az NFA-k és a tandem architektúrák kombinációja a szerves fotovoltaika történetének eddigi legnagyobb ugrását hozta.

6. SPECIÁLIS IRÁNYOK ÉS ALKALMAZÁSOK

A szerves napelemek kutatása a fő fejlesztési irányokon – mint a polimer–fullerén rendszerek vagy a nem-fullerén akceptorok – túl számos speciális koncepcióval és alkalmazási lehetőséggel bővült. Ezek célja, hogy kihasználják az OPV technológia egyedi tulajdonságait, és olyan területeken nyújtsanak megoldást, ahol a hagyományos, szilícium alapú napelemek nem, vagy csak korlátozottan alkalmazhatók.

3. táblázat: *A szilícium, organikus és festék-érzékenyített napelem technológiák összehasonlítása*

Jellemző	***OPV***	***DSSC***	***Szilícium***
Fényelnyelés	Polimerek	Festékmolekula	Szilícium kristály
Hatásfok (rekord)	~19%	~14%	~27%
Stabilitás	Közepes, javuló	Alacsony	Magas
Előny	Nyomtatható, rugalmas	Jó gyenge fényben	Ipari dominancia
Hátrány	Rövidebb élettartam	Elektrolit instabil	Drága gyártás

Az egyik ilyen irány a félig átlátszó szerves napelemek fejlesztése. Mivel a polimer- és kis molekulás anyagok fényelnyelése molekulaszerkezettel hangolható, lehetőség nyílik olyan cellák létrehozására, amelyek csak a napfény bizonyos tartományát nyelik el, míg más hullámhosszakat átengednek. Ez különösen ígéretes az épületintegrált fotovoltaika (BIPV) területén, ahol az ablakok vagy üvegfelületek egyben energiatermelő funkciót is betölthetnek. Az ilyen félig átlátszó OPV cellák esztétikai és funkcionális előnyöket kínálnak, és lehetővé teszik a kreatív építészeti alkalmazásokat [1].

Szintén fontos fejlesztési irány a nyomtatható és flexibilis OPV technológia. A szerves anyagok oldhatósága lehetővé teszi, hogy festékszerű oldatok formájában kerüljenek feldolgozásra, például roll-to-roll nyomtatással. Ez a gyártási eljárás rendkívül költséghatékony, és olyan könnyű, hajlékony napelemfóliák előállítását teszi lehetővé, amelyek szinte bármilyen felületre integrálhatók. A flexibilis OPV különösen hasznos lehet hordozható elektronikai eszközök, ruházatba épített energiatermelő rétegek vagy ideiglenes telepítések (pl. sátorfedések, vészhelyzeti áramellátás) esetén.

Egy további, intenzíven kutatott irány a hibrid rendszerek, amelyekben a szerves napelemeket más fotovoltaikus technológiákkal kombinálják. A legnagyobb érdeklődés a perovszkit–OPV tandemcellák felé irányul, ahol a perovszkit réteg hatékonyan elnyeli a rövidebb hullámhosszú fényt, míg a szerves réteg a látható és közeli infravörös tartományt hasznosítja. Az ilyen kombinációk potenciálisan 25% feletti hatásfokokat ígérnek, miközben megőrzik a szerves anyagok rugalmasságát és könnyű feldolgozhatóságát [1].

Az ipari alkalmazások szempontjából az OPV különösen ott kínál előnyt, ahol a szilícium cellák túl nehezek, merevek vagy költségesek lennének. Már napjainkban is léteznek kereskedelmi megoldások: az épületburkolatokra telepíthető, fóliaszerű OPV modulok (pl. Heliatek), a beltéri energiaellátásra tervezett, nyomtatott OPV cellák (pl. Epishine), valamint az egyedi dizájnmegoldásokat kínáló testre szabott modulok (pl. ASCA). Ezek az alkalmazások jól mutatják, hogy a szerves napelemek sajátos piaci résekben már most is hasznosíthatók, még akkor is, ha nagy léptékű, hálózati áramtermelésben egyelőre nem versenyképesek a szilícium alapú technológiákkal.

Összességében a speciális irányok és alkalmazások rávilágítanak a szerves napelemek sokoldalúságára. Nem csupán egy újabb napelem-technológiáról van szó, hanem egy olyan platformról, amely teljesen új integrációs lehetőségeket nyit az építészetben, a hordozható eszközökben és a jövő energiahatékony infrastruktúráiban.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A szerves napelemek története jól példázza, hogy az anyagtudományi és szerkezetfejlesztési innovációk milyen mértékben képesek átalakítani egy teljes kutatási területet. Az első generációs, egyrétegű és kétrétegű szerves cellák még csak laboratóriumi érdekességnek számítottak, néhány tizedszázalékos hatásfokkal [5]. Ezek azonban lefektették a donor–akceptor koncepció alapjait, amely nélkülözhetetlen kiindulópontja lett a későbbi fejlesztéseknek.

A második generáció, a polimer–fullerén alapú bulk heterojunction szerkezetek, áttörést hoztak az excitonok hatékony szétválasztásában, és nagyságrendekkel növelte a teljesítményt. A 2000-es évek elejétől kezdve ezek a rendszerek 5–10% közötti hatásfokukkal már komoly kutatási érdeklődést váltottak ki, és megteremtették a szerves fotovoltaika ipari alkalmazásának lehetőségét [7, 8].

A harmadik generációs fejlesztések a nem-fullerén akceptorok és a tandem architektúrák megjelenésével új szintre emelték az OPV technológiát. Az olyan molekulák, mint az ITIC és az Y6, valamint a fejlett polimerek (pl. PM6, PTB7-Th) révén a laboratóriumi hatásfok elérte a 18–20%-ot, amely már közvetlenül versenyképes a kereskedelmi szilícium napelemekkel [3; 13]. Bár a stabilitás, az élettartam és a nagyüzemi gyárthatóság továbbra is kihívást jelent, az elért eredmények egyértelműen mutatják a technológia potenciálját.

A speciális irányok – félig átlátszó, flexibilis, nyomtatható vagy hibrid OPV rendszerek – arra utalnak, hogy a szerves napelemek nem feltétlenül a hagyományos szilícium panelek közvetlen kiváltására törekszenek, hanem inkább új alkalmazási területeket nyitnak. Épületintegrált fotovoltaika, beltéri energiatermelés vagy hordozható elektronikai eszközök esetében a szerves technológia egyedi előnyei jól érvényesülnek.

Összességében a szerves napelemek fejlődéstörténete a kezdeti kísérleti szakasztól napjainkig egy dinamikus és ígéretes kutatási területet rajzol fel. Bár a kereskedelmi elterjedéshez még szükség van a stabilitási problémák megoldására és a gyártási folyamatok ipari méretezésére, az OPV technológia mára a harmadik generációs fotovoltaikus eszközök egyik legsikeresebb képviselőjévé vált. A jövőben, amennyiben a tudomány és az ipar közösen képes kezelni a még fennálló korlátokat, a szerves napelemek széles körben is hozzájárulhatnak a fenntartható energiaellátáshoz.

8. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] HOU, J., INGANÄS, O., FRIEND, R. H., GAO, F.: *Organic solar cells based on non-fullerene acceptors*, Nature Materials, 17(12), pp. 119–128. 2018. https://doi.org/10.1038/s41563-018-0244-9

[2] LI, W., HENDRIKS, K. H., FURLAN, A., ROELOFS, W. S. C., WIENK, M. M., ANSSEN, R. A. J.: *Efficient small bandgap polymer solar cells with high fill factors for 10% power conversion efficiency*, Journal of the American Chemical Society, 134(31), 2012. pp. 13787–13795. https://doi.org/10.1021/ja3042537

[3] LIU, Q., JIANG, Y., JIN, K., QIN, J., XU, J., LI, W., XIONG, J., LIU, J., XIAO, Z., SUN, K., YANG, S., ZHANG, X., DING L.: *18% Efficiency organic solar cells,* Science Bulletin, 65(4), pp. 272–275. 2020. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36659090/

[4] KALLMANN, H., POPE, M.: *Photovoltaic Effect in Organic Crystals,* The Journal of Chemical Physics, 37(10), 1898. 1972.

[5] TANG, C. W.: *Two-layer organic photovoltaic cell*, Applied Physics Letters, 48(2), pp. 183–185. 1986.

[6] SARICIFTCI, N. S., SMILOWITZ, L., HEEGER, A. J., WUDL, F.: *Photoinduced electron transfer from a conducting polymer to buckminsterfullerene*, Science, 258(5087), pp. 1474–1476. 1992.

[7] YU, G., GAO, J., HUMMELEN, J. C., WUDL, F., HEEGER, A. J.: Polymer photovoltaic cells: enhanced efficiencies via a network of internal donor-acceptor heterojunctions, Science, 270(5243), pp. 1789–1791. 1995.

[8] LI, G., SHROTRIYA, V., HUANG, J., YAO, Y., MORIARTY, T., EMERY, K., YANG, Y.: *High-efficiency solution processable polymer photovoltaic cells by self-organization of polymer blends*, Nature Materials, 4(11), pp. 864–868. 2005.

[9] LI, G., ZHU, R., YANG, Y.: *Polymer solar cells.* Nature Photonics, 6(3), 153–161. 2012.

[10] LIU, Y., ZHAO, J., LI, Z., MU, C., MA, W., HU, H., JIANG, K., LIN, H., ADE, H., YAN, H.: *Aggregation and morphology control enables multiple cases of high-efficiency polymer solar cells*, Nature Photonics, 7(7), pp. 561–568. 2013.

[11] HE, Z., ZHONG, C., SU, S., XU, M., WU, H., CAO, Y.: *Enhanced power-conversion efficiency in polymer solar cells using an inverted device structure*, Nature Photonics, 6(9), pp. 591–597. 2012. https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.190

[12] LIN, Y., WANG, J., ZHANG, Z. G.: *An electron acceptor challenging fullerenes for efficient polymer solar cells,* Advanced Materials, 27(7), 1170–1174. 2015.

[13] YUAN, J., ZHANG, Y., ZHOU, L., ZHANG, G., YIP, H. L., LAU, T. K., LU, X., ZHU, C., PENG, H., JOHNSON, P. A., LECLERC, M., CAO, Y., ULANSKI, J., LI Y., ZOU, Y.: Single-junction organic solar cell with over 15% efficiency using fused-ring acceptor with electron-deficient core, Joule, 3(4), 1140–1151. 2019.

[14] CUI, Y., YAO, H., ZHANG, J., ZHANG, T., WANG, Y., HONG, L., XIAN, K., XU, B., ZHANG, S., PENG, J., WEI, Z., GAO F., HOU, J.: *Over 16% efficiency organic photovoltaic cells enabled by a chlorinated acceptor with increased open-circuit voltages,* Nature Communications, 11(1), 1–9. 2020.

A PEROVSZKIT NAPELEMEK FEJLŐDÉSTÖRTÉNETE

THE DEVELOPMENT HISTORY OF PEROVSKITE SOLAR CELLS

MATUSZ-KALÁSZ Dávid

PhD, adjunktus, david.matusz-kalasz@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

Kivonat: *A perovszkit alapú napelemek az elmúlt évtized legdinamikusabban fejlődő fotovoltaikus technológiáját jelentik, amelyek hatásfoka a 2009-es 3,8%-ról mára túllépte a 26%-ot. A tanulmány áttekinti a perovszkit cellák szerkezetét, anyagtípusait (ólomalapú, ólommentes, többkationos rendszerek), valamint azokat a transzportrétegeket és tokozási technikákat, amelyek a stabilitás javítását célozzák. Kitérek a nedvességgel, hővel és UV-fénnyel kapcsolatos degradációs mechanizmusokra is. Külön hangsúlyt kapnak a tandem (perovszkit–szilícium) cellák, amelyek már laboratóriumi rekordot értek el, és ipari szinten is megjelentek. A cikk célja a perovszkit technológia jelenlegi helyzetének és jövőbeli lehetőségeinek bemutatása.*

Kulcsszavak: *perovszkit napelemek, transzportréteg (ETL/HTL), degradációs mechanizmusok, perovszkit–szilícium tandem cellák*

Abstract: *Perovskite solar cells represent the most rapidly advancing photovoltaic technology of the past decade, with efficiencies rising from 3.8% in 2009 to over 26% today. This paper reviews the structure of perovskite devices, their material families (lead-based, lead-free, multi-cation systems), and the electron and hole transport layers that contribute to improved stability. Degradation mechanisms related to moisture, heat, and UV exposure are examined in detail. Particular emphasis is placed on perovskite–silicon tandem architectures, which now hold laboratory efficiency records and are entering industrial deployment. The study provides an overview of the current state of perovskite technology and its future prospects.*

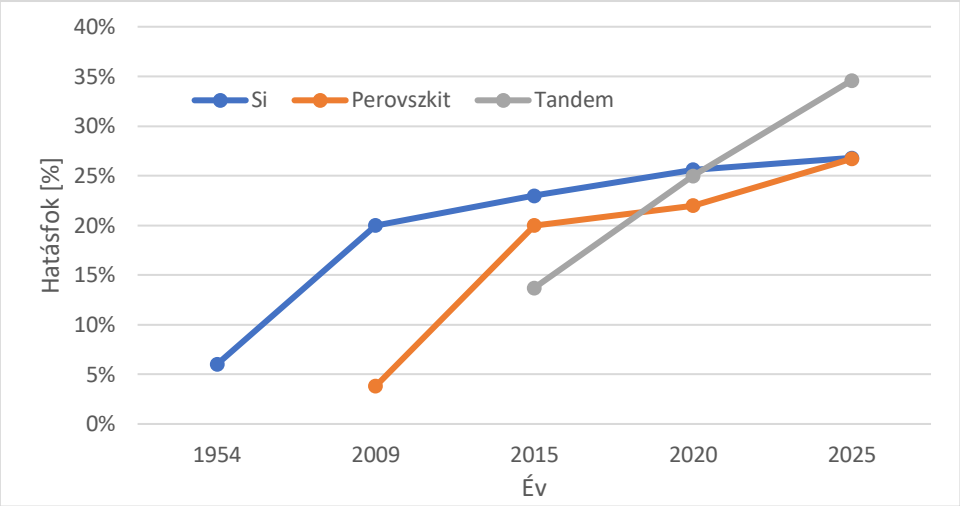
Keywords: *perovskite solar cells, transport layers (ETL/HTL), degradation mechanisms, perovskite–silicon tandem devices*

1. BEVEZETÉS

A napenergia-hasznosítás egyik legdinamikusabban fejlődő területe az elmúlt másfél évtizedben a perovszkit alapú napelemek kutatása. A perovszkit kifejezés eredetileg egy ásványtípus kristályszerkezetét jelöli, amely általános képlettel ABX_3 írható le, ahol az A pozíciót alkáli- vagy szerves kation (pl. metil-ammonium, formamidinium, cézium), a B pozíciót átmenetifém-kation (pl. Pb^{2+}, Sn^{2+}), az X helyet pedig halogenid-anion (I^-, Br^-, Cl^-) foglalja el. E vegyületek kiemelkedő optikai és elektronikai tulajdonságai – nagy fényelnyelési együttható, hosszú töltéshordozó-élettartam és alacsony rekombinációs veszteség – tették őket a fotovoltaika ígéretes új anyagává [1].

Az első perovszkit napelemek 2009-ben jelentek meg, amikor Kojima és munkatársai szerves–szervetlen halogenid perovszkitokat alkalmaztak festékérzékenyített cellákban. Bár a hatásfok mindössze 3,8% volt, ez a kísérlet megmutatta az új anyagcsalád potenciálját [2]. A következő években a fejlődés példátlan gyorsaságot mutatott: 2012-ben Kim és munkatársai már 9% feletti, stabilabb szilárd perovszkit cellát mutattak be [3], míg ugyanebben az évben Snaith és társai új architektúrával 10% fölé emelték a hatásfokot [4].

A hatásfok-növekedés üteme minden korábbi fotovoltaikus technológiát felülmúlt: míg a szilícium napelemeknek több évtizedre volt szükségük a 20% körüli hatásfok eléréséhez, a perovszkit cellák kevesebb mint tíz év alatt átlépték ezt a küszöböt [5, 6]. A legfrissebb eredmények szerint (1. ábra) a tanúsított hatásfok már meghaladja a 25%-ot [7], tandem architektúrákban (perovszkit–szilícium kombinációban) pedig 30% feletti értéket is elértek [8].



1. ábra: *A szimpla szilícium és perovszkit, valamint perovszkit-Si tandem cellák fejlődése*

E gyors fejlődés mellett azonban komoly kihívások is fennállnak. A stabilitás problémája – az anyagok nedvesség- és hőérzékenysége, valamint az ólomtartalom környezeti aggályai – jelenleg is a kutatás fókuszában áll [9]. Ennek ellenére a perovszkit napelemek mára a harmadik generációs fotovoltaikus technológiák egyik legsikeresebb képviselőjévé váltak, és ipari szinten is közel állnak a kereskedelmi bevezetéshez.

2. A PEROVSZKIT ANYAGOK TULAJDONSÁGAI

A perovszkit napelemek központi eleme az ABX_3 kristályszerkezet, amelyben az A kation lehet szerves (metil-ammonium – MA, formamidinium – FA) vagy szervetlen (cézium, rubídium), a B helyet jellemzően ólom (Pb^{2+}) vagy ón (Sn^{2+}), míg az X helyet halogenid-ionok (I^-, Br^-, Cl^-) foglalják el [1]. A szerkezet nagy előnye a rugalmasság: az ionok cseréjével vagy kombinálásával a kristályrács tulajdonságai széles tartományban hangolhatók.

A perovszkit vékonyrétegek kiemelkedő fényelnyelő képességgel rendelkeznek. Már 300–500 nm vastag filmek képesek a látható fény túlnyomó részét elnyelni, ami kb. 1000-szer vékonyabb rétegeket tesz lehetővé a szilíciumhoz képest [1]. Az optikai sávszélesség (bandgap) 1,2–2,3 eV tartományban szabályozható a halogenid-összetétel és a kationok változtatásával [5]. Ez különösen előnyös tandem cellák esetén, ahol a spektrum különböző tartományait hasznosító rétegek kombinációja magas hatásfokot eredményezhet [10].

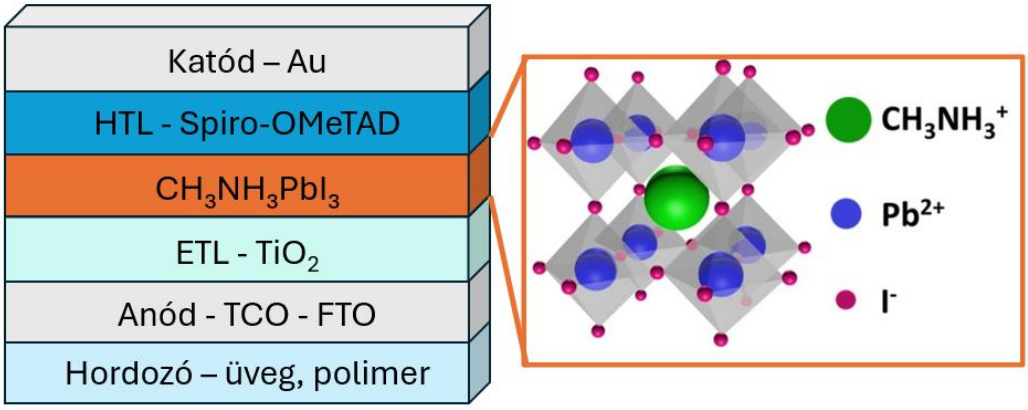
A perovszkit anyagok egyik legnagyobb előnye a hosszú töltéshordozó-élettartam és nagy diffúziós hossz, amely lehetővé teszi a hatékony töltéskiválasztást még egyszerű architektúrákban is [1]. E tulajdonság részben a kristályszerkezetben lévő hibák önpassziváló jellegéből adódik, ami mérsékli a rekombinációs veszteségeket.

A szerkezet módosításával a stabilitás is javítható. Saliba és munkatársai például kimutatták, hogy a rubídium-ionok beépítése jelentősen növeli a film hő- és fényállóságát, miközben a teljesítményt is javítja [11]. Ez rávilágít arra, hogy a perovszkit anyagok ioncsere-alapú finomhangolhatósága kulcsfontosságú a gyakorlati alkalmazásokhoz.

A perovszkit anyagok további nagy előnye az oldatfeldolgozhatóság: festékszerű prekurzoroldatokból egyszerű bevonási technikákkal (spin-coating, slot-die, roll-to-roll nyomtatás) vékony, aktív rétegek készíthetők. Ez lehetőséget teremt a költséghatékony, nagy felületű gyártásra, amely versenyképessé teheti a technológiát az iparban [9]. A cellák rétegrendjét és a rétegek szerepkörét az 1. táblázat és a 2. ábra mutatja be.

1. táblázat: *A perovszkit cella komponenseiben alkalmazott anyagok*

Réteg	***Anyag***	***Funkció***
Katód	Au	Nem lép reakcióba I^--al
HTL	Spiro-OMeTAD	Lyuk vezetése az anód felé
Fényelnyelő	$CH_3NH_3PbI_3$	Foton abszorpció, töltéshordozó generálás
ETL	TiO_2, SnO_2, ZnO	Elektron vezetése az anód felé
Anód -TCO	FTO	Áramgyűjtés
Hordozó	Polimerek, üveg, hibrid anyagok	Stabilitás javítása



2. ábra: *A perovszkit alapú cellák általános rétegrendje és a perovszkit kristályszerkezet*

Az 2. ábrán látható a klasszikus, n-i-p perovszkit cella rétegrend, ami gyártástechnológiai okokból ered. A hordozó leggyakrabban üveg vagy polimer, ami a mechanikai tartást adja. Az elülső kontaktus a fényáteresztő (TCO - Transparent Conductive Oxide) FTO (fluorozott ón-dioxid). gyakran használnak magas hőmérsékletet (4-500°C) a következő réteg kialakításához, amit az ITO (Indium-ón-oxid) nem bírna, az FTO viszont igen.

A következő az elektronszállító réteg (ETL - Electron Transport Layer) általában két részből áll, egy vékony tömör TiO_2 (lyukak elzárása az FTO-tól) és egy porózus váz szintén TiO_2-ból, a DSSC (fényérzékeny festék) cellákhoz hasonlóan.

A legfontosabb réteg maga a perovszkit kristályszerkezet, ami ellentétben a szerves anyagokkal (OPV), itt a gerjesztéskor keletkező elektronok és lyukak szinte azonnal szétválnak és hatalmas távolságokat (mikrométereket) képesek megtenni rekombináció nélkül. Ezért lehet ez a réteg vastagabb (300-600 nm), mint az OPV-nél (30-50 nm).

A következő a lyukszállító réteg (HTL - Hole Transport Layer), aminek anyaga a Spiro-OMeTAD (spirobifluorid-metoxi-tetrakis-amino-derivátum). Ez egy szerves anyag, ami kiszívja a lyukakat a perovszkitból és blokkolja az elektronokat. Önmagában rossz vezető, ezért szennyezik (dopolják) lítium-sókkal (Li-TFSI) és kobalt komplexekkel, hogy jól működjön.

A sort a negatív kontakt (katód) zárja, aminek anyaga arany (Au). Az OPV-knél használt ezüst (Ag) vagy alumínium (Al) itt nem jó, mert a perovszkitban lévő jód (I^-) illékony, átdiffundál a rétegeken, és reakcióba lép az ezüsttel (AgI keletkezik), ami tönkreteszi az elektródát. Az arany kémiailag ellenállóbb, ezért ajánlott választás (bár drága).

Összességében a perovszkit anyagok tulajdonságai – hangolható optikai sávszélesség, nagy fényelnyelés, hosszú töltéshordozó-élettartam és egyszerű feldolgozhatóság – egyedülálló kombinációt alkotnak. E tulajdonságok adják a magyarázatát annak, hogy a perovszkit napelemek miért értek el rekordsebességű fejlődést a fotovoltaikus technológiák történetében.

3. A FEJLŐDÉSTÖRTÉNET

A perovszkit napelemek története mindössze másfél évtizedre nyúlik vissza, ám ez idő alatt olyan gyors fejlődést értek el, amely példa nélküli a fotovoltaikus technológiák között. Míg a szilícium alapú celláknak több évtizedbe telt, mire laboratóriumi körülmények között átlépték a 20%-os hatásfokot, a perovszkit napelemek kevesebb mint tíz év alatt érték el ugyanezt az értéket [1, 7].

Az első mérföldkő 2009-ben született, amikor Kojima és munkatársai bemutatták a metil-ammonium-ólom-halogenid perovszkitokat, amelyek festékérzékenyített cellákban fényérzékenyítőként működtek [2]. Bár a hatásfok mindössze 3,8% volt, az eredmény rávilágított a perovszkit anyagok ígéretes optoelektronikai tulajdonságaira.

A következő jelentős előrelépés 2012-ben történt, amikor két kutatócsoport is áttörést ért el. Kim és munkatársai stabilabb, teljes szilárdtest-architektúrában alkalmaztak metil-ammonium-ólom-jodidot ($MAPbI_3$), és több mint 9%-os hatásfokot értek el [3]. Ugyanebben az évben Snaith és társai egy meso-szuperstruktúrájú cellát mutattak be, amelyben a perovszkit nem csupán fényérzékenyítőként, hanem töltésszállító anyagként is funkcionált, így a hatásfok meghaladta a 10%-ot [4].

Ettől kezdve a fejlődés felgyorsult. 2013–2015 között több kutatócsoport alkalmazott kompozíciós mérnöki módszereket, amelyek során a metil-ammonium (MA^+) kationt részben formamidiniumra (FA^+) vagy céziumra (Cs^+) cserélték, illetve a halogenid-ionokat (I^-, Br^-, Cl^-) variálták. Ez a stratégia javította a kristályrács stabilitását és lehetővé tette a sávszélesség hangolását, amely kulcsfontosságúnak bizonyult a további hatásfoknövelésben [5].

2016-ban Saliba és munkatársai rubídiumionokkal egészítették ki a kationkeveréket, amely tovább növelte a stabilitást és elősegítette a 20% körüli hatásfok elérését [11]. Ezzel a perovszkit napelemek már nem csupán laboratóriumi érdekességnek, hanem valódi technológiai alternatívának számítottak.

A következő nagy ugrást a tandem cellák megjelenése hozta. 2017-ben Bush és munkatársai 23,6%-os hatásfokot értek el monolitikus perovszkit–szilícium tandem cellával, amely egyben jobb stabilitást is mutatott [10]. Azóta a tandem architektúrák a kutatás központi területévé váltak, hiszen a perovszkit anyag bandgap-hangolhatósága ideálissá teszi a szilícium kiegészítésére.

A hatásfok-rekordok azóta is folyamatosan emelkednek. A *Solar Cell Efficiency Tables* 2022-es kiadása szerint a tanúsított egycsomópontos (single-junction) perovszkit cellák hatásfoka meghaladta a 25%-ot [7]. 2023-ban pedig az Oxford PV ipari környezetben 28,6%-os hatásfokot jelentett perovszkit–szilícium tandem cellára [8].

2. táblázat: *A fejlődési mérföldkövek*

Év	***Fejlesztés***	***Hatásfok (%)***	***Forrás***
2009	Első perovszkit cella ($MAPbI_3$)	3,8	Kojima et al. (2009)
2012	Hatásfok >10%	10,9	Lee et al. (2012)
2015	Többkationos perovszkit	~20	Saliba et al. (2016)
2021	Labor rekord	>25	NREL adatbázis
2023	Tandem (perovszkit–Si)	28,6	Oxford PV (2023)

Összességében a perovszkit napelemek fejlődéstörténete rendkívül rövid idő alatt vezetett a kezdeti 3–4%-os értékektől a ma már 25–29% közötti rekordokig. Ez a gyors előrehaladás jól mutatja az anyagcsaládban rejlő potenciált, ugyanakkor rávilágít arra is, hogy a stabilitási és

gyártási kihívások megoldása nélkülözhetetlen a széles körű ipari alkalmazhatóság szempontjából [9].

4. ESZKÖZARCHITEKTÚRÁK

A perovszkit napelemek egyik legnagyobb erőssége, hogy az anyag sokoldalú feldolgozhatósága különböző architektúrák kialakítását teszi lehetővé. Ezáltal a kutatók több szerkezeti megoldást fejlesztettek ki, amelyek eltérő előnyöket kínálnak hatásfok, stabilitás és gyárthatóság szempontjából.

4.1. Mesopórusos szerkezet

A legelső nagy hatásfokú perovszkit cellák a mesopórusos architektúrán alapultak, ahol egy porózus TiO_2 rétegbe töltötték be a perovszkit anyagot [4]. Ebben a szerkezetben a TiO_2 nemcsak elektronszállítóként, hanem a kristályosodás segítőjeként is funkcionált. Bár e megoldás magas hatásfokot eredményezett, a nagy hőkezelési hőmérséklet (>450 °C) korlátozta a rugalmas hordozókra való feldolgozhatóságot.

4.2. Planáris heteroszerkezet

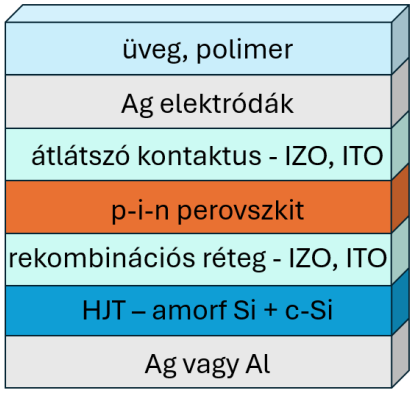
A planáris architektúra egyszerűbb felépítést kínál, ahol a perovszkit vékonyfilm egy elektrontranszport-réteg (pl. TiO_2, SnO_2) és egy lyuktranszport-réteg (pl. Spiro-OMeTAD, NiOx) közé kerül. Az ilyen szerkezetek előnye a gyártás egyszerűsége és az alacsonyabb hőmérsékletű feldolgozhatóság, ami megnyitja az utat a nyomtatható, flexibilis napelemek felé [9]. A planáris cellák az elmúlt években már 20% feletti hatásfokokat is elértek [5].

4.3. Inverz (p–i–n) architektúra

Az inverz vagy p–i–n szerkezet abban különbözik a hagyományostól, hogy a rétegek sorrendje fordított: a fény a lyuktranszport-rétegen keresztül lép be. Ez a konfiguráció jobb kezdeti stabilitást és kisebb hiszterézist biztosít a jellemző I–V görbéken, továbbá kompatibilis az alacsony hőmérsékletű feldolgozással is. Emiatt különösen ígéretes a nagyméretű modulok és a flexibilis hordozók alkalmazásában [9].

4.4. Tandem cellák

A perovszkit napelemek legnagyobb potenciálja a tandem architektúrákban rejlik. A perovszkit sávszélesség-hangolhatóságának köszönhetően ideális felső cellaként működhet szilícium vagy akár CIGS napelemek fölött, kiegészítve azok spektrumhasznosítását [10]. 2023-ban az Oxford PV ipari környezetben 28,6%-os tanúsított hatásfokot ért el perovszkit–szilícium tandem cellával [8], ami jelenleg a legmagasabb értékek egyike a fotovoltaikus technológiák között.



3. ábra: *A perovszkit-szilícium tandem cellák általános rétegrendje*

A 3. ábra mutatja be a perovszkit- szilícium tandem cellák rétegrendjét. Itt két teljes értékű napelem van egymásra építve. Két fő elrendezés létezik:

- 4-Terminálos (Mechanikus): Két külön cellát gyártanak és egyszerűen egymásra teszik őket (4 kivezetés). Ez egyszerűbb, de drágább (több üveg, több vezeték).
- 2-Terminálos (Monolitikus): A szilícium cellára közvetlenül ráépítik a perovszkit rétegeket. Ez a technológiai csúcs, csak 2 kivezetése van, mint egy sima napelemnek.

A következőkben és a 3. ábrán a 2-Terminálos (Monolitikus) rétegrend kerül bemutatásra, mert ez az ipari cél és a bonyolultabb struktúra. Lentről felfelé haladva (a hátsó laptól a napfény felé), az első réteg a hátsó elektróda, a szilícium cella hátsó kontaktusa, aminek anyaga általában ezüst (Ag) vagy alumínium (Al). Az „alsó” cella (Bottom Cell) a szilícium, ami ebben az eseten nem az általánosabb (PERC) cella, hanem a drágább, de jobb HJT (heterojunction) technológia. Ez nyeli el a vörös és infravörös fényt (amit a felső réteg átenged). A HJT (heterojunction) technológia szerkezete:

- *a-Si:H (p):* Amorf szilícium réteg.
- c-Si (n): Kristályos szilícium ostya (ez a vastag, teherhordó elem, kb. 150 µm).
- *a-Si:H (n):* Másik amorf réteg.

A HJT szilícium felülete a sima napelemek (piramisos a fénycsapda miatt) felületével ellentétben, a tandemnél az elülső oldalt gyakran polírozzák (simítják), mert a „tüskés” felületre lehetetlen ráilleszteni a nanométer vékony perovszkitot (bár a legújabb kutatások már a texturált felszínnel is próbálkoznak).

A következő a rekombinációs réteg (Tunnel Junction / ICL), ami egy beágyazó és az anyaga általában IZO (Indium-Zinc-Oxide) vagy egy vékony ITO réteg, esetleg p+/n+ szilícium átmenet. Értelemszerűen ez köti össze elektromosan a két cellát, ezért nagyon lényeges a szerepe. Az alsó cellából jövő elektronok itt találkoznak a felső cellából jövő lyukakkal. Itt rekombinálódniuk kell (kioltják egymást), hogy az áram folytonos legyen. Ha ez a réteg nem tökéletes, a cellafeszültségek nem adódnak össze, hanem lerontják egymást.

A felső cella (Top Cell) a perovszkit, ami gyakran a p-i-n (fordított) sorrendet követ, mivel a szilíciumra épül, ami általában n-típusú a fény irányába. Tehát a HTL (Hole Transport Layer) érintkezik a rekombinációs réteggel, ami lehet NiOx vagy PTAA (Poli(triaril-amin)). A perovszkit abszorber sem a standard (sötét, fekete) perovszkit, hanem a kémiáját elhangolják. Széles sávszélességet kap (~1,7 eV), mert át kell engednie a vörös fényt a szilíciumnak, és csak a nagy energiájú (kék/zöld) fényt szabad elnyelnie. Emiatt ez a réteg szabad szemmel nézve sárgás-barnásabb, átlátszóbb. A perovszkit abszorber ETL (Electron Transport Layer) rétege

(puffer réteg) kapcsolódik az elülső kontaktushoz (Top Electrode). Ennek a fény felé néző kontakt rétegnek az anyaga jellemzően ITO vagy IZO, mivel teljesen átlátszónak kell lennie, hogy a fény bejusson a két abszorber rétegbe. A sort az ezüst (Ag) fémrács (Metal Fingers) zárja, ami összegyűjti a generált áramot az ITO -ról.

A tandem technológia működésének lényege az áramillesztés (Current Matching). Jelenleg ez a legnagyobb mérnöki kihívás ennél a rétegrendnél. Mivel a két cella sorba van kötve, a feszültségek összeadódnak, így az áramot a leggyengébb láncszem határozza meg: A két cellának pontosan ugyanannyi áramot kell termelnie. Ha a perovszkit réteg túl vastag mindent elnyel, a szilícium nem kap fényt és lekorlátozza az egész rendszert. Ha a perovszkit túl vékony túl sok fényt enged át, túl kevés áramot termel és lekorlátozza a rendszert. A mérnököknek patikamérlegen kell kiszámolniuk a perovszkit réteg vastagságát és kémiai összetételét, hogy a két réteg árama tökéletesen megegyezzen. A 3. táblázat foglalja össze a perovszkit - szilícium tandem működését.

3. táblázat: *A perovszkit - szilícium tandem működés összefoglalása*

Pozíció	***Komponens***	***Funkció***
Teteje	Üveg / Fólia	Védelem
Top Cella	Széles sávú Perovszkit	Kék/Zöld fény hasznosítása (Nagy feszültség generálás)
Közép	Tunnel Junction (ITO/IZO)	Elektromos összekapcsolás (Rekombináció)
Bottom Cella	HJT Szilícium	Vörös/IR fény hasznosítása
Alja	Ezüst	Záró kontaktus

Összességében a perovszkit napelemek architektúrái rendkívüli rugalmasságot biztosítanak: a laborban optimalizált mesopórusos szerkezetektől a nyomtatható, rugalmas planáris és inverz cellákig, valamint a rekordhatásfokú tandem megoldásokig. Ez a sokoldalúság alapvető szerepet játszik abban, hogy a technológia gyorsan közelít a kereskedelmi hasznosítás felé.

5. KIHÍVÁSOK

A perovszkit napelemek példátlan fejlődése ellenére a technológia széles körű ipari alkalmazását jelenleg több alapvető kihívás korlátozza. Ezek közül a legjelentősebbek a hosszú távú stabilitás, az ólomtartalom környezeti problémái, valamint a méretezhetőség és a nagyüzemi gyártás kérdései.

5.1. Stabilitás

A perovszkit napelemek egyik legnagyobb gyengesége a nedvességgel, oxigénnel, hővel és UV-sugárzással szembeni érzékenység. A metil-ammonium-ólom-jodid ($MAPbI_3$) alapú cellák különösen instabilak: már kis páratartalom mellett is gyorsan lebomlanak, ami drasztikus hatásfokcsökkenéshez vezet [9]. Az utóbbi években jelentős előrelépést hozott a többkationos és többhalogenides kompozíciók alkalmazása. Saliba és munkatársai kimutatták, hogy a rubídium hozzáadása a FA-Cs (formamidinium-cézium) perovszkithoz nagymértékben javítja a hő- és fényállóságot [11]. Emellett új tokozási (encapsulation) technológiák fejlesztése is kulcsfontosságú a hosszú élettartam biztosításához.

5.2. Ólom-probléma

A legtöbb nagy hatásfokú perovszkit napelem ólmot (Pb^{2+}) tartalmaz, ami környezetvédelmi és egészségügyi aggályokat vet fel. Bár a cellákban használt mennyiség viszonylag kicsi, (huszad része a hagyományos szilíciumnak, ezredrésze egy klasszikus CRT monitornak) a modulok sérülése vagy a gyártási hulladék kezelése problémás lehet [Park et al., 2016]. Alternatívaként kutatják az ón (Sn)-alapú perovszkitokat, amelyek azonban instabilabbak és jellemzően alacsonyabb hatásfokúak [7]. Ezért jelenleg a legígéretesebb irány az ólom minimalizálása, illetve stabil kapszulázással a környezetbe jutás teljes megakadályozása.

5.3. Méretezhetőség és gyártás

Míg laboratóriumban néhány négyzetmilliméteres cellák rekordhatásfokokat érnek el, a nagyméretű modulok gyártása továbbra is kihívást jelent. A perovszkit rétegek minősége nagymértékben függ a kristályosodási folyamat szabályozásától, amit ipari környezetben, „roll-to-roll” vagy „slot-die” bevonással sokkal nehezebb reprodukálni, mint spin-coating technikával a laborban [9]. További problémát jelent az I–V hiszterézis, amely különösen a nem megfelelően optimalizált elektródák és transzport-rétegek esetén lép fel.

5.4. Élettartam és tanúsítás

A kereskedelmi forgalomba kerülő szilícium napelemek élettartama 20–30 év, míg a perovszkit cellák jelenleg néhány ezer órás stabil működést tudnak biztosítani. Bár folyamatosan javulnak az eredmények, a hosszú távú tanúsítás (IEC szabványok szerinti tesztek) még csak kevés esetben sikerült [7]. Az ipari szintű elterjedéshez elengedhetetlen, hogy a perovszkit modulok ne csak hatékonyak, hanem tartósak és megbízhatóak is legyenek.

Összességében a perovszkit napelemek előtt álló legnagyobb kihívás nem a hatásfok további növelése – hiszen az már elérte a kereskedelmi szilícium szintjét –, hanem a stabilitás, a környezetbiztonság és a nagyüzemi gyárthatóság problémáinak megoldása. Csak ezek rendezése után válhatnak széles körben alkalmazhatóvá és piacképes technológiává.

6. IPARI FEJLESZTÉSEK ÉS ALKALMAZÁSOK

A perovszkit napelemek rövid története ellenére már nemcsak laboratóriumi érdekességként, hanem ipari szinten is komoly figyelmet kiváltó technológiaként jelennek meg. Az elmúlt években több vállalat indított pilotprojektek és gyártási kísérletek sorát, amelyek célja a laboratóriumi eredmények ipari méretekre való átültetése.

Az egyik legjelentősebb szereplő az Oxford PV, amely perovszkit–szilícium tandem cellákat fejleszt. A vállalat 2023-ban jelentette be a világcsúcsnak számító 28,6%-os tanúsított hatásfokot, amelyet ipari gyártási környezetben értek el [8]. Az Oxford PV célja, hogy a szilícium ipari dominanciáját ne kiváltsa, hanem kiegészítse: a meglévő gyártósorokhoz illeszthető perovszkit-topcellák révén (4. táblázat).

4. táblázat: *A perovszkit - szilícium – organikus cella (OPV) összehasonlítás*

Jellemző	***Perovszkit***	***Szilícium***	***Organikus***
Hatásfok (rekord)	~26% (egyréteg), ~36% (tandem)	~27%	~20%
Stabilitás	Közepes (kapszulázással javul)	Nagyon magas	Közepes
Gyártás	Oldatfeldolgozás, nyomtatható	Energiaigényes, drága	Nyomtatható
Anyagköltség	Alacsony, de ólomprobléma	Magas	Alacsony
Előny	Gyors fejlődés, nagy hatásfok	Hosszú élettartam	Rugalmas, könnyű
Hátrány	Instabilitás, ólom	Drága, merev	Rövid élettartam

Ezzel párhuzamosan a lengyelországi Saule Technologies a nyomtatható, rugalmas perovszkit napelemek területén vált úttörővé. Roll-to-roll eljárással készítenek könnyű, vékony filmeket, amelyek akár ablakokra vagy homlokzatokra is integrálhatók. A Saule moduljai elsősorban épületintegrált fotovoltaika (BIPV) alkalmazásokra irányulnak, ahol az esztétikai és szerkezeti integráció legalább olyan fontos, mint a hatásfok.

Az átlátszó és félig átlátszó perovszkit cellák további lehetőségeket kínálnak. Kísérleti projektekben már bemutattak olyan ablakmodulokat, amelyek nemcsak fényt engednek át, hanem villamos energiát is termelnek. Ez különösen ígéretes az okosépületek energiahatékonyságának növelésében [9].

A rugalmas hordozókra készített perovszkit rétegek új alkalmazásokat nyithatnak a hordozható elektronikában, az IoT-eszközök energiaellátásában és a könnyű, hajlítható napelemes panelekben. Ezek olyan piaci réseket célozhatnak meg, ahol a hagyományos szilícium cellák merevsége és tömege hátrányt jelent.

Mindeközben Kínában, Németországban és az Egyesült Államokban több vállalat és kutatóközpont kezdett pilot gyártósorokat kiépíteni, hogy a perovszkit modulokat ipari körülmények között is vizsgálják. Bár a stabilitás és az élettartam továbbra is kulcsprobléma, a költséghatékony előállítás és a rendkívüli hatásfok miatt a befektetői érdeklődés folyamatosan nő.

Összességében a perovszkit napelemek ipari alkalmazásai ma már kézzelfogható valósággá váltak. A tandem cellák révén a szilícium technológia teljesítménye tovább növelhető, míg a nyomtatható, rugalmas és átlátszó perovszkit modulok olyan új piacokat céloznak meg, amelyek eddig elérhetetlenek voltak a hagyományos napelemek számára. Az ipari fejlesztések tehát jól mutatják, hogy a perovszkitok nemcsak laboratóriumi rekorderekként, hanem jövőbeli kereskedelmi termékként is egyre inkább számításba jönnek.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A perovszkit napelemek története kivételes példa arra, hogy egy új anyagcsalád milyen gyorsan képes átalakítani a fotovoltaikus kutatás irányát. Az első, 2009-ben bemutatott prototípus mindössze 3,8%-os hatásfokot ért el [2], ám alig egy évtizeddel később már meghaladta a 25%-ot a tanúsított laboratóriumi teljesítmény [7]. Tandem architektúrában pedig 28% fölötti értékeket is elértek ipari környezetben [8]. Ez a fejlődési ütem minden korábbi fotovoltaikus technológiát messze felülmúl.

A perovszkit anyagok tulajdonságai – nagy fényelnyelési együttható, hangolható sávszélesség, hosszú töltéshordozó-élettartam és oldatfeldolgozhatóság – alapvető előnyt jelentenek más

napelem-technológiákkal szemben [1, 9]. Ezek tették lehetővé a rövid idő alatti hatásfoknövekedést és az ipari alkalmazások felé való gyors elmozdulást.

Mindazonáltal a technológia előtt komoly kihívások állnak. A stabilitás kérdése, az ólom környezeti problémái és a nagyléptékű gyártás megbízhatósága továbbra is akadályozzák a széles körű kereskedelmi elterjedést [9, 11]. A jelenlegi kutatások középpontjában ezért a tartós, tokozott modulok, az ólommentes vagy alacsony ólomtartalmú alternatívák, valamint a roll-to-roll gyártási technológiák optimalizálása áll.

Összességében a perovszkit napelemek mára a harmadik generációs fotovoltaikus technológiák vezető képviselőivé váltak. Bár a kereskedelmi forgalomban még csak kísérleti jelleggel vannak jelen, ipari szinten egyre több projekt mutatja, hogy rövid időn belül valódi piaci alternatívát jelenthetnek. Ha sikerül megoldani a stabilitás és környezetbiztonság problémáit, a perovszkit napelemek nemcsak kiegészítői, hanem akár jövőbeni versenytársai is lehetnek a szilícium alapú technológiának.

8. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] GREEN, M. A., HO-BAILLIE, A., SNAITH, H. J.: *The emergence of perovskite solar cells.* Nature Photonics, 8(7), 506–514. 2014.

[2] KOJIMA, A., TESHIMA, K., SHIRAI, Y., MIYASAKA, T.: *Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells.* Journal of the American Chemical Society, 131(17), pp. 6050–6051. 2009.

[3] KIM, H. S., LEE, C. R., IM, J. H., LEE, K. B., MOEHL, T., MARCHIORO, A., Grätzel, M.: *Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9%.* Scientific Reports, 2, 591. 2012.

[4] LEE, M. M., TEUSCHER, J., MIYASAKA, T., MURAKAMI, T. N., SNAITH, H. J.: *Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites.* Science, 338(6107), pp. 643–647. 2012.

[5] JEON, N. J., NOH, J. H., YANG, W. S., KIM, Y. C., RYU, S., SEO, J., SEOK, S. I.: *Compositional engineering of perovskite materials for high-performance solar cells.* Nature, 517(7535), pp. 476–480. 2015.

[6] YANG, W. S., NOH, J. H., JEON, N. J., KIM, Y. C., RYU, S., SEO, J., & SEOK, S. I.: *High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange,* Science, 356(6345), pp. 1376–1379. 2017.

[7] GREEN, M. A., DUNLOP, E. D., HOHL-EBINGER, J., YOSHITA, M., KOPIDAKIS, N., HAO, X.: *Solar cell efficiency tables (Version 59).* Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 30(1), pp. 3–12. 2022.

[8] Oxford PV (2023). *Oxford PV achieves world record 28.6% efficiency for perovskite-on-silicon tandem solar cell.* (Sajtóközlemény).

[9] PARK, N. G., GRÄTZEL, M., MIYASAKA, T., ZHU, K., EMERY, K.: *Towards stable and commercially available perovskite solar cells,* Nature Energy, 1, 16152. 2016.

[10] BUSH, K. A., PALMSTROM, A. F., YU, Z. J., BOCCARD, M., CHEACHAROEN, R., MAILOA, J. P., MCGEHEE, M. D.: *23.6%-efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with improved stability,* Nature Energy, 2, 17009. 2017.

[11] SALIBA, M., MATSUI, T., DOMANSKI, K., SEO, J. Y., UMMADISINGU, A., ZAKEERUDDIN, S. M., GRÄTZEL, M.: *Incorporation of rubidium cations into perovskite solar cells improves photovoltaic performance,* Science, 354(6309), pp. 206–209. 2016.

A FESTÉK-ÉRZÉKENYÍTETT NAPELEMEK HELYE A MODERN FOTOVOLTAIKUS TECHNOLÓGIÁK PALETTÁJÁN

THE ROLE OF DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS IN THE LANDSCAPE OF MODERN PHOTOVOLTAIC TECHNOLOGIES

MATUSZ-KALÁSZ Dávid

PhD, adjunktus, david.matusz-kalasz@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

Kivonat: *A festék-érzékenyített napelemek (DSSC) a fotoszintézis elvét követő hibrid fotovoltaikus technológiát képviselik, ahol a fényelnyelést szerves vagy fémorganikus festék végzi, míg a töltéstranszport anorganikus félvezetőhöz és elektrolithoz kötődik. A tanulmány bemutatja a DSSC technológia fejlődését az első, 1991-es bemutatástól a modern szerves festékekkel elért 13–14%-os hatásfokig. Kiemelésre kerülnek a kulcsanyagok (TiO_2, ruthénium-festékek, szerves donor–akceptor molekulák), valamint a stabilitási kihívások, amelyek korlátozzák az ipari alkalmazhatóságot. A DSSC különleges előnye a gyenge fényviszonyok melletti hatékonyság, amely ideálissá teszi beltéri és IoT alkalmazásokhoz. A cikk célja a DSSC helyének meghatározása a modern fotovoltaikus technológiák között.*

Kulcsszavak: *fényelnyelő festékek, TiO_2 alapú félvezetők, redox elektrolit, alacsony fényintenzitású működés*

Abstract: *Dye-sensitised solar cells (DSSCs) represent a hybrid photovoltaic technology inspired by natural photosynthesis, in which light absorption is performed by organic or metal–organic dyes, while charge transport occurs through an inorganic semiconductor and a redox electrolyte. This paper outlines the development of DSSC technology from its first demonstration in 1991 to current devices exceeding 13–14% efficiency using advanced organic dyes. Key materials such as nanocrystalline TiO_2, ruthenium complexes, and modern donor–acceptor dyes are discussed alongside the stability challenges that limit large-scale deployment. The exceptional performance of DSSCs under low-light conditions makes them particularly well-suited for indoor and IoT applications. The study positions DSSC technology within the broader landscape of contemporary photovoltaic solutions.*

Keywords: *light-harvesting dyes, TiO_2 semiconductor, redox electrolyte, low-light performance*

1. BEVEZETÉS

A napenergia-hasznosítás területén a szilícium alapú napelemek dominanciája vitathatatlan, azonban a költség- és gyártástechnológiai korlátok már a kezdetektől ösztönözték az alternatív megoldások keresését. Az úgynevezett „második generációs” fotovoltaikus eszközök közé tartoznak a festék-érzékenyített napelemek (dye-sensitized solar cells, DSSC), amelyeket 1991-ben mutattak be Grätzel és O'Regan úttörő munkájának köszönhetően [1]. Az új típusú cellák áttörést jelentettek, mivel egyszerű szerkezetük és alacsony előállítási költségük mellett meglepően magas, 7% körüli hatásfokot értek el.

Bár ipari méretben nem váltak versenytársává a szilíciumnak, egyedi előnyeik – alacsony költség, jó teljesítmény gyenge fényviszonyok között, esztétikus, színes és átlátszó kivitel – lehetővé teszik speciális alkalmazásokban való hasznosításukat, például az 1. ábrán bemutatott beltéri energiaellátásban és épületintegrált fotovoltaikában (BIPV) [2].

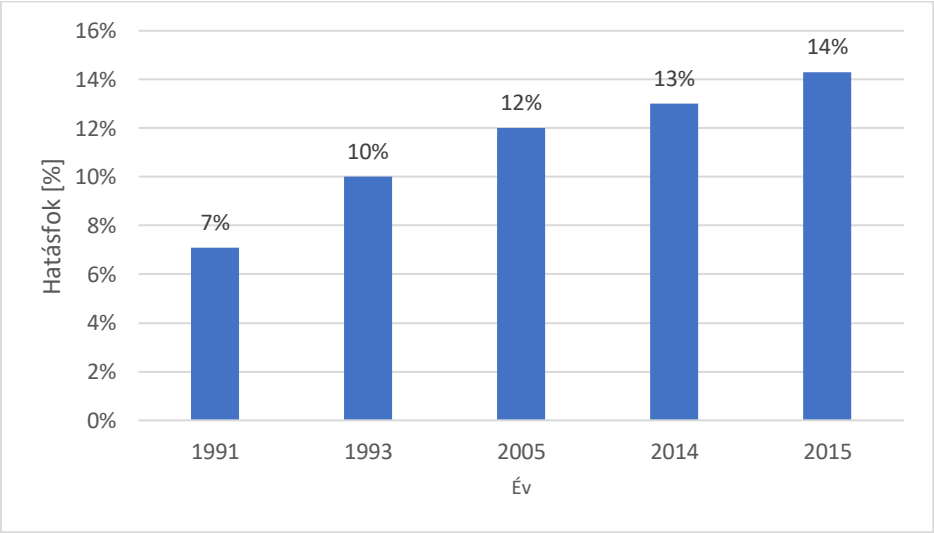
1. ábra: *A DSSC technológia hatásfokának fejlődése [2]*

A DSSC-k koncepciója a fotoszintézis folyamatát idézi: a fényelnyelő festékmolekula szerepe a klorofilléhoz hasonló, amely fény hatására gerjesztett állapotba kerül, majd elektront ad át egy vezető anyagnak. A gyakorlatban a nanokristályos TiO_2 rétegre kötődő szerves vagy fémorganikus festék a fényelnyelés központi eleme, míg a töltéstranszport az anorganikus félvezetőben és a redox elektrolitban zajlik [3, 4]. Ez a hibrid működési elv különbözteti meg a DSSC-ket mind a szilícium alapú celláktól, mind a teljesen szerves fotovoltaikus rendszerektől (OPV).

Kapcsolatuk az organikus napelemekkel szoros: a DSSC-k esetében a fényelnyelő anyag jellemzően szerves molekula (pl. porfirinek, ftalocianinok, donor–π–akceptor típusú festékek), amely funkcionálisan megfeleltethető az OPV-k aktív rétegében használt polimereknek. Ugyanakkor a töltéshordozók elválasztása és transzportja itt nem szerves anyagokban, hanem anorganikus nanostruktúrákon és elektrolitokon keresztül valósul meg. Ez a kettős természet – szerves fényelnyelő és szervetlen töltéstranszport – teszi a DSSC-ket izgalmas átmenetet képező technológiává a második generációs napelemek fejlődéstörténetében.

Az elmúlt három évtizedben a DSSC-k hatásfoka fokozatosan nőtt, a legjobb laboratóriumi cellák már 13–14% feletti értékeket is elértek [5, 6]. Az 2. ábra mutatja a hatásfok fejlődésének történetét. Összességében a DSSC technológia fejlődése három fő szakaszra bontható:

- 1990-es évek: alapelvek lefektetése, ~7% hatásfok.
- 2000-es évek: ruthénium komplexek dominanciája, ~11–12% hatásfok.
- 2010-es évek és napjaink: szerves és hibrid festékek, 13–14% hatásfok, specializált alkalmazások.



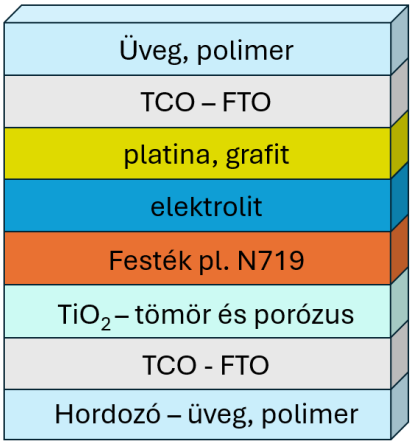
2. ábra: *A DSSC technológia hatásfokának fejlődése*

2. A DSSC MŰKÖDÉSI ELVE

A festék-érzékenyített napelemek (DSSC) működése a fotoszintézis analógiáján alapul: a fény elnyelését egy festékmolekula végzi, amely gerjesztett állapotban elektront ad át egy félvezető vezetési sávjába. A folyamat során a fényenergia közvetlenül elektromos árammá alakul.

A 3. ábra mutatja be a DSSC-k általános rétegsorrendjét. A cella felépítése általában a következő rétegekből áll:

- Üveg vagy polimer hordozóréteg – mechanikai tartás. Fontos, hogy hőálló legyen a gyártási folyamat (szinterezés) miatt.
- Átlátszó vezető oxid (TCO) réteg – jellemzően fluor-indium-oxid (FTO), amely biztosítja az elektród átlátszóságát és vezetőképességét.
- Tömör TiO_2 film – megakadályozza, hogy az elektrolit közvetlenül érintkezzen az FTO-val, ami rekombinációt/rövidzárlatot okozna.
- Nanopórusos TiO_2 váz – szivacsszerű, nagy fajlagos felületet biztosít a festékmolekulák adszorpciójához, valamint vezeti az elektronokat. Elektronszállító réteg, nem donor.
- Festékmolekulák – ezek kötik meg a fotonokat, és gerjesztett állapotból elektronokat injektálnak a TiO_2 vezetési sávjába [1]. Ez a folyamat helyettesíti a p-n átmenetet.
- Redox elektrolit – leggyakrabban jodid/trijodid (I^-/I_3^-) alapú elektrolit, amely regenerálja az oxidálódott festéket. Újabban kobalt-komplexek és szilárd halogénmentes elektrolitok is kutatás alatt állnak [4].
- Katalizátor réteg – jobb minőségű cellákban platina, ritkábban grafit, vagy korom. Feladata a trijodid (I_3^-) visszaalakítása jodiddá (I^-).
- Ellenelektród – általában FTO bevonattal ellátott vezető üveg, amely a redox körfolyamat lezárását segíti, és lehetővé teszi az áramkör zárását.



3. ábra: *A DSSC technológia általános rétegsorendje*

A működés lépései a következők:

- A festékmolekula elnyeli a fotont → gerjesztett állapot jön létre.
- Az elektron a festékből a TiO_2 vezetési sávjába injektálódik.
- Az elektron a TiO_2 nanorészecskéken keresztül a TCO elektródához jut, majd a külső áramkörön át elvégzi a hasznos munkát.
- A festék közben oxidálódik, de az elektrolit redukálja, helyreállítva az eredeti állapotát.
- Az elektrolit regenerációját az ellenelektród katalizálja, így a körfolyamat zárul.

A DSSC hatásfokát több tényező befolyásolja: a festék fényelnyelési spektruma és injektálási hatásfoka, a TiO_2 film kristályossága és porozitása, valamint az elektrolit diffúziós tulajdonságai [3]. Az OPV-hez képest lényeges különbség, hogy itt a fényelnyelő és a töltésszállító funkció szétválik: míg az organikus cellákban a polimer vagy molekuláris keverék végzi mindkét feladatot, addig a DSSC-ben a festék „csak" fényelnyelőként szerepel, a töltésszállítást pedig az anorganikus komponens (TiO_2) és az elektrolit végzi. Ez a hibrid felépítés magyarázza a DSSC-k sajátos teljesítményprofilját, különösen a gyenge fényviszonyok között tapasztalt kedvező hatásfokot [4].

3. ANYAGOK ÉS FEJLESZTÉSEK

A festék-érzékenyített napelemek (DSSC) teljesítményét alapvetően az egyes rétegekhez választott anyagok határozzák meg. Az elmúlt három évtizedben a DSSC fejlesztések fókusza az anyagválasztáson keresztül a hatásfok és stabilitás növelésére irányult. A ruthénium komplexekről a szerves festékekre való áttérés, az elektrolitok és elektródok finomhangolása, valamint a nanostrukturált félvezetők optimalizálása mind hozzájárult ahhoz, hogy a DSSC-k mára 14% körüli hatásfokot érjenek el, miközben megőrzik egyszerű és költséghatékony szerkezetüket.

3.1. Festékmolekulák

A fény elnyeléséért felelős festék a DSSC „szíve". Az első, nagy hatékonyságú cellákban ruthénium-komplexeket használtak, például az N3 és N719 festékeket, amelyek széles abszorpciós spektrummal és jó injektálási hatékonysággal rendelkeznek [7]. Ezeket tekinthetjük a DSSC-k klasszikus referencia-anyagainak.

A 2000-es évektől kezdve fokozatosan előtérbe kerültek a teljesen organikus festékek, amelyek olcsóbbak és környezetbarátabbak, miközben lehetővé teszik a molekulaszerkezet finomhangolását. A tipikus dizájn a donor–π–akceptor (D–π–A) szerkezet, ahol az elektron-donor csoport (pl. indoline, triphenylamine) fény hatására elektronokat juttat a π-konjugált hídon keresztül az elektron-akceptorhoz, amely a TiO_2 felületéhez kötődik [4].

Ezen kívül nagy figyelmet kaptak a porfirinek és ftalocianinok, amelyek természetes minták (pl. klorofill) alapján tervezett biomimetikus festékek. Mathew és munkatársai 2014-ben porfirin alapú DSSC-vel 13%-os hatásfokot értek el [5]. Később Kakiage és társai egy kombinált porfirin–organikus festékrendszerrel 14,3%-os rekordot állítottak fel [6].

3.2. Elektrontranszport-rétegek

A festék által injektált elektronokat a nanokristályos TiO_2 vezeti el a gyűjtőelektród felé. A TiO_2 nagy fajlagos felülete lehetővé teszi sok festékmolekula adszorpcióját, ugyanakkor jó elektronszállító is. Alternatívaként a cink-oxid (ZnO) is vizsgálat tárgyát képezte, ám instabilitása és a festékmolekulákkal való kémiai reakciói miatt ritkábban alkalmazzák [4].

3.3. Elektrolitok

Az eredeti DSSC-kben a redox körfolyamatot a jodid/trijodid (I^-/I_3^-) elektrolit biztosította [O'Regan & Grätzel, 1991]. Bár megbízhatóan működik, erősen korrozív és fényelnyelése rontja a hatásfokot. Ezért az elmúlt években alternatívákat, például kobalt-komplexeket és szilárd halogénmentes elektrolitokat fejlesztettek ki, amelyek javítják a feszültséget és a stabilitást [Hagfeldt et al., 2010].

3.4. Ellenelektródák

A redox elektrolit regenerációjához szükséges katalitikus felületet általában platinabevonat biztosítja, amely kiváló hatásfokú, de drága és korlátozottan elérhető. Ezért alternatív anyagokat is vizsgálnak, például karbonnanocsöveket, grafént és vezető polimereket, amelyek költséghatékonyabb és fenntarthatóbb megoldásokat kínálnak [4].

1. táblázat: *A DSSC-ben felhasználható anyagok szerepének összefoglalása*

Komponens	***Tipikus anyag***	***Funkció***
Fényelnyelő	Ruthénium-komplex (N719), porfirinek, szerves D–π–A festékek	Fény elnyelése és elektron-injektálás
Félvezető	Nanokristályos TiO_2	Elektrontranszport a festéktől az elektródáig
Elektrolit	I^-/I_3^-, kobalt-komplex, szilárd/gél alternatívák	Festék regenerálása
Ellenelektród	Pt, grafén, nanocsövek	Elektrolit redox reakció katalízise
Hordozó	ITO, FTO üveg	Átlátszó elektród, áramgyűjtés

4. FEJLŐDÉSTÖRTÉNET ÉS HATÁSFOKOK

A festék-érzékenyített napelemek (DSSC) fejlődéstörténete jól példázza, hogy egy új koncepció rövid időn belül képes komoly hatást gyakorolni a fotovoltaikus kutatásra.

Az első DSSC-t 1991-ben mutatta be O'Regan és Grätzel, amely nanokristályos TiO_2 hordozón adszorbeált festékmolekulákat és jodid/trijodid redox elektrolitot alkalmazott. Ez az úttörő eszköz már ekkor elérte a 7,1%-os hatásfokot [2], ami az adott időszak amorf szilícium celláihoz mérhető eredmény volt, miközben a gyártási költsége jóval alacsonyabbnak ígérkezett.

A következő évtizedben a kutatások középpontjában a ruthénium alapú komplexfestékek (pl. N3, N719) álltak, amelyek stabilabb működést és szélesebb abszorpciós spektrumot biztosítottak [7]. A 2000-es évek közepére ezekkel az anyagokkal a hatásfok 10–11% körüli értékre emelkedett, amely hosszú ideig referenciaértéknek számított.

A 2010-es években újabb előrelépést jelentett a molekuláris tervezésű szerves festékek bevezetése. Mathew és munkatársai 2014-ben porfirin alapú festékkel 13% feletti hatásfokot értek el [5], míg Kakiage és társai 2015-ben egy porfirin–organikus festék kombinációval 14,3%-os rekordot állítottak fel [6]. Ezek a mérföldkövek bizonyították, hogy a teljesen organikus fényelnyelők képesek versenyképes teljesítményt nyújtani a fémorganikus komplexekkel szemben.

2. táblázat: *A történeti mérföldkövek és hatásfokok*

Év	***Fejlesztés / újdonság***	***Hatásfok (%)***	***Forrás***
1991	O'Regan & Grätzel – első DSSC	7,1	O'Regan & Grätzel (1991)
1993	Ruthénium-komplex (N3 festék)	10	Nazeeruddin et al. (1993)
2005	Stabilizált N719 festék	11–12	Hagfeldt et al. (2010)
2014	Porfirin alapú festék	13	Mathew et al. (2014)
2015	Porfirin–organikus festék kombináció	14,3	Kakiage et al. (2015)

A DSSC-k különösen figyelemre méltóak a gyenge fényviszonyok alatti hatékonyságuk miatt. Ellentétben a szilícium alapú cellákkal, amelyek beltéri vagy szórt fény mellett drasztikusan csökkent teljesítményt mutatnak, a DSSC-k ilyenkor is képesek aránylag magas hatásfokot biztosítani [4]. Ez a tulajdonság tette őket vonzóvá a beltéri energiaellátás és az IoT-eszközök alkalmazásában, ahol nem a maximális, hanem a stabil teljesítmény a fontos.

Bár a DSSC nem érte el a szilícium vagy perovszkit cellák hatásfokát, a koncepció újszerűsége és bizonyos alkalmazási környezetekben mutatott kiemelkedő teljesítménye biztosította, hogy máig fontos kutatási irányként és speciális technológiai platformként maradjon jelen a fotovoltaika világában.

5. KIHÍVÁSOK ÉS IPARI ALKALMAZÁSOK

Bár a festék-érzékenyített napelemek (DSSC) számos előnnyel rendelkeznek – egyszerű szerkezet, alacsony gyártási költség, jó teljesítmény gyenge fényviszonyok mellett –, a széles körű ipari elterjedés előtt több technikai és gazdasági akadály is áll.

5.1. Stabilitás és élettartam

A legjelentősebb kihívás a hosszú távú stabilitás. A klasszikus DSSC-kben alkalmazott jodid/trijodid (I^-/I_3^-) elektrolit erősen korrozív, és fokozatosan károsítja az elektródákat, valamint fény hatására is bomlási folyamatokat indíthat [4]. Emellett a folyékony elektrolit szivárgása mechanikai megbízhatósági problémát jelent, különösen nagyméretű modulok esetén. Ennek megoldására szilárd vagy gél alapú elektrolitokat fejlesztettek, valamint alternatív redox rendszereket, például kobalt-komplexeket, amelyek nagyobb nyitott körfeszültséget (Voc) és jobb stabilitást biztosítanak [5].

5.2. Hatásfok és skálázhatóság

Bár laboratóriumi szinten már elérték a 13–14%-os rekordokat [6], az ipari méretű DSSC modulok hatásfoka általában alacsonyabb (6–8%). Ez a nanokristályos szerkezet reprodukálhatóságának, a festék egyenletes rögzítésének és az elektrolit tökéletlen kapszulázásának tudható be. A nagy felületű gyártás gazdaságossága ezért jelenleg még nem éri el a szilícium és perovszkit technológiák szintjét.

5.3. Környezetvédelem

A technológia legfontosabb ökológiai előnye a gyártás alacsony energiaigényében (embodied energy) rejlik. Míg a nagy tisztaságú szilícium előállítása és kristályosítása hatalmas hőenergiát emészt fel, addig a DSSC egyszerűbb kémiai eljárásokkal (pl. szitanyomás), alacsonyabb hőmérsékleten és energiafaló vákuumtechnológia nélkül gyártható.

Anyaghasználata is fenntarthatóbb a versenytársaknál. A cella váza, a titán-dioxid (TiO_2) egy nem toxikus, a Földön bőségesen rendelkezésre álló vegyület (amelyet élelmiszerekben és fogkrémekben is használnak). Bár a korai típusok ritka ruténiumot alkalmaztak, a modern fejlesztések már a teljesen szerves, fémmentes festékeket preferálják, minimalizálva a bányászat környezeti terhelését. A DSSC valódi, közvetett környezetvédelmi hatása azonban a felhasználási területében rejlik.

Ugyanakkor, a ruthénium alapú festékek drágák és ritkaföldfémeket tartalmaznak, ami nem kedvez a fenntartható ipari méretezésnek, valamint stabilitásuk még fejlesztésre szorul, különösen hosszú távú kültéri használat esetén [3].

5.4. Ipari alkalmazások és piaci rések

Bár a DSSC-k nem váltak a szilícium napelemek versenytársává a nagy hálózati áramtermelésben, több speciális alkalmazásban komoly előnyökkel bírnak:

- Beltéri energiaellátás: A DSSC-k kiemelkedően jól teljesítenek gyenge fényben (pl. irodai világítás, LED-ek), így ideálisak IoT-eszközök, szenzorok, kisfeszültségű elektronikák tápellátására.
- Épületintegrált fotovoltaika (BIPV): Színezhető, félig átlátszó kivitelük miatt ablaküvegekbe vagy homlokzatokba építve (esztétikai és energetikai funkció) [2].
- Hordozható elektronika: Rugalmasságuk és könnyű gyárthatóságuk miatt használhatók hordozható töltőkben, kisebb elektronikai eszközökben.

Az elmúlt években több vállalat, köztük a japán Sharp és a svájci Solaronix is bemutatott DSSC-alapú termékeket, míg más cégek beltéri energiaellátásra optimalizált modulokkal kísérleteznek. Összességében a DSSC technológia nem váltotta be a kezdeti reményeket a szilícium közvetlen kihívójaként, ugyanakkor bizonyos alkalmazási területeken – különösen beltéri környezetben és esztétikai integrációt igénylő építészeti megoldásokban – reális alternatívát kínál (3. táblázat). A további fejlesztések kulcsa a stabilabb elektrolitok, az olcsóbb és tartósabb festékek, valamint a nagy felületű gyártási módszerek ipari szintű bevezetése lehet.

3. táblázat: *A DSSC – OPV – szilícium összehasonlítás*

Jellemző	***DSSC***	***OPV***	***Szilícium***
Fényelnyelő	Festékmolekula	Polimerek, fullerének	Szilícium kristály
Töltéstranszport	TiO_2 + elektrolit	Szerves réteg	Szilícium kristály
Hatásfok (rekord)	~14%	~19%	~27%
Előny	Jó gyenge fényben, átlátszó, esztétikus	Rugalmas, nyomtatható	Nagy stabilitás, ipari dominancia
Hátrány	Elektrolit instabil	Rövid élettartam	Drágább, merev

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A festék-érzékenyített napelemek (DSSC) története jól illusztrálja, hogy a fotovoltaikus kutatásban a biomimetikus megközelítés – amelynek lényege a természetben előforduló szerkezetek, folyamatok és funkciók utánzása, jelenesetben a fotoszintézis ihletésével – miként vezethetett egy teljesen új technológiai platform megszületéséhez. Az 1991-es bemutatás óta [1] a DSSC-k több mint három évtized alatt fejlődtek a kezdeti 7% körüli hatásfokról a jelenlegi 13–14%-os rekordokra [5, 6]. Bár a szilícium és a perovszkit napelemek hatásfokát nem érték utol, a DSSC-k egyedi előnyei – alacsony gyártási költség, rugalmasság, esztétikus és félig átlátszó kivitel – biztosították számukra a helyet a második generációs napelemek között.

Különösen értékes tulajdonságuk a gyenge fényviszonyok melletti magas hatékonyság, amely alkalmassá teszi őket beltéri energiaellátásra és IoT-eszközök táplálására. Emellett a színes és átlátszó kivitelek révén az épületintegrált fotovoltaika (BIPV) területén is ígéretes alternatívát kínálnak [1, 4].

Kapcsolatuk az organikus fotovoltaikus cellákkal (OPV) szoros, hiszen a fényelnyelést itt is szerves molekulák végzik. A két technológia közötti különbség azonban lényeges: míg az OPV-ben a szerves réteg felel mind a fényelnyelésért, mind a töltéstranszportért, addig a DSSC hibrid eszköz, amelyben a szerves festék és az anorganikus félvezető funkciói szétválnak. Ez a kettős természet jól példázza, hogy a szerves és szervetlen komponensek ötvözésével új és életképes fotovoltaikus megoldások hozhatók létre.

Összességében a DSSC-k nem a szilícium közvetlen kihívói, hanem speciális alkalmazásokra optimalizált, rugalmas és esztétikus alternatívák. A jövőben várhatóan niche-piacaikon (beltéri energiaellátás, BIPV) továbbra is releváns szerepet játszanak, miközben inspirációként szolgálnak a hibrid és bioinspirált fotovoltaikus technológiák további fejlődéséhez.

7. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] O'REGAN, B., GRÄTZEL, M.: *A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films.* Nature, 353, pp. 737–740. 1991.

[2] BARICHELLO, J., MARIANI, P., VESCE, L., SPADARO, D., CITRO, I., MATTEOCCI, F., BARTOLOTTA, A., DI CARLO A., CALOGERO, G.: *Bifacial dye-sensitized solar cells for indoor and outdoor renewable energy-based application*, Journal of Materials Chemistry C, 12, pp. 2317-2349. 2024.

[3] GRÄTZEL, M. *Dye-sensitized solar cells.* Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, 4(2), pp. 145–153. 2003.

[4] HAGFELDT, A., BOSCHLOO, G., SUN, L., KLOO, L., & PETTERSSON, H. *Dye-sensitized solar cells.* Chem. Rev., 110(11), pp. 6595–6663. 2010.

[5] MATHEW, S., YELLA, A., GAO, P., HUMPHRY-BAKER, R., CURCHOD, B. F. E., ASHARI-ASTANI, N., & GRÄTZEL, M. *Dye-sensitized solar cells with 13% efficiency achieved through the molecular engineering of porphyrins.* Nature Chemistry, 6(3), pp. 242–247. 2014.

[6] KAKIAGE, K., AOYAMA, Y., YANO, T., OYA, K., FUJISAWA, J. I., & HANAYA, M. *Highly-efficient dye-sensitized solar cells with collaborative sensitization of porphyrin and organic dyes.* Chem. Commun., 51(88), pp. 15894–15897. 2015.

[7] NAZEERUDDIN, M. K., KAY, A., RODICIO, I., HUMPHRY-BAKER, R., MÜLLER, E., LISKA, P., & GRÄTZEL, M. *Conversion of light to electricity by cis-X_2bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylate)ruthenium(II) charge-transfer sensitizers.* J. Am. Chem. Soc., 115(14), pp. 6382–6390. 1993.

MESTERSÉGES INTELLIGENCIA ALKALMAZHATÓSÁNAK VIZSGÁLATA AZ ENERGETIKÁBAN

OBSERVATIONS FROM THE USAGE OF ARTIFICIALINTELLIGENCE IN THE FIELD OF ENERGETICS

JOBBÁGY Marcell

egyetemi tanársegéd, marcell.jobbagy@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

Kivonat: *A generatív mesterséges intelligencia egy olyan eszköz, illetve tudományág, amely napról napra fejlődik, újabb és újabb modellek jelennek meg, változnak, tanulnak, fejlődnek. Most már mindenhol megtalálhatók a mindennapi életben: nem kell messzire menni, elég egy Google keresést indítanunk, és rögtön kapunk egy MI összefoglalót. Az oktatási órákon is egyre több helyen használják ezeket az eszközöket, mind oktatói, mind hallgatói szemmel nézve, legyen szó kutatásról vagy jegyzetek összefoglalásáról. A cikk a GenAI használatáról, mint programozó eszköz fog szólni.*

Kulcsszavak: *mesterséges intelligencia, generatív mesterséges intelligencia, Fuzzy logika*

Abstract: *Generative artificial intelligence is a tool or discipline that is developing day by day, new and new models appear, change, learn, and evolve. They can now be found everywhere in everyday life: you don't have to go far, just start a Google search, and you will immediately get an AI summary. These tools are also increasingly used in educational classes, both from the perspective of teachers and students, whether it is research or summarizing notes. The article will talk about the use of GenAI as a programming tool.*

Keywords: *artificial intelligence, generative artificial intelligence, Fuzzy logic*

1. BEVEZETÉS

A kutatási területem számára elengedhetetlen, hogy naprakész tudással rendelkezzek, valamint az ehhez szükséges (szintén) naprakész eszközök álljanak rendelkezésemre. A generatív mesterséges intelligencia egy olyan eszköz, illetve tudományág, amely napról napra fejlődik, újabb és újabb modellek jelennek meg, változnak, tanulnak, fejlődnek. Most már mindenhol megtalálhatók a mindennapi életben: nem kell messzire mennünk, elég egy Google keresést indítanunk, és rögtön kapunk egy MI összefoglalót. Egy hosszabb szöveg fordítása is már mesterséges intelligenciával történik. A saját portánkon is természetesen észre lehet venni, hogy az oktatási órákon egyre több helyen használják ezeket az eszközöket, mind oktatói, mind hallgatói szemmel nézve. A hallgatók, ha valamit nem értenek, legtöbbször nem az oktató kollégát kérdezik már meg, hanem a ChatGPT-t, vagy a Gemini-t. Az oktatók a tananyag fejlesztéséhez, illetve gyakrabban a kutatásokhoz használják ezeket, de az értekezleteket is képes összefoglalni, illetve átiratot is tud írni a Co-Pilot.

Tekintettel arra, hogy a mesterséges intelligenciával szeretnék, illetve foglalkozom a doktori kutatásomban, aktívan használok GenAI-t, valamint a sajátomat is fejlesztem, felvetődött a témavezetőmnél, mi lenne, ha a korábban megírt diplomamunkámat, amely Fuzzy logikát használt, valamelyik modellnek odaadnánk, hogy írja át egy másik felhasználási területre, majd értékeljük ki ennek a végeredményét. Ebben a cikkben ezt a kiértékelést szeretném megmutatni és végig vezetni.

2. TANULÁSI ALGORITMUSOK

Először egy történelmi és evolúciós összefoglaló: Maga a mesterséges intelligencia egy informatikai kutatásterület. Szoftverek és módszerek kifejlesztésével és kutatásával foglalkozik, melyeknek a segítségével az ezzel felruházott gépek képessé válnak a környezetük érzékelésére és lehetővé teszi azok számára a tanulást és a döntéshozást egy adott cél elérése érdekében.

A korábbi cikkemben említettem, hogy négy alapvető megközelítést különböztet meg a szakirodalom. Az első, hogy emberszerűen tud-e cselekedni: képes értelmezni az emberi nyelvet, képes eltárolni az ismereteit, képes magától válaszolni kérdésekre, végül pedig képes tanulni. Ezeket a kritériumokat Alan Turing 1950-ben alkotta meg, de elhanyagolta a fizikai interakciókat.

A második megközelítés az emberszerű gondolkodás, amit három féle képpen határozhatunk meg: az önelemzés, a pszichológiai kísérletezés és az agyi képalkotás. Miután valamelyik módszerrel meghatároztuk, hogyan gondolkodik az ember, az elméletet alkalmazhatjuk a program megírására.

A harmadik a racionális döntéshozatal, azaz jelenti, hogy logikusan tud gondolkodni és döntéseket hozni a cél érdekében.

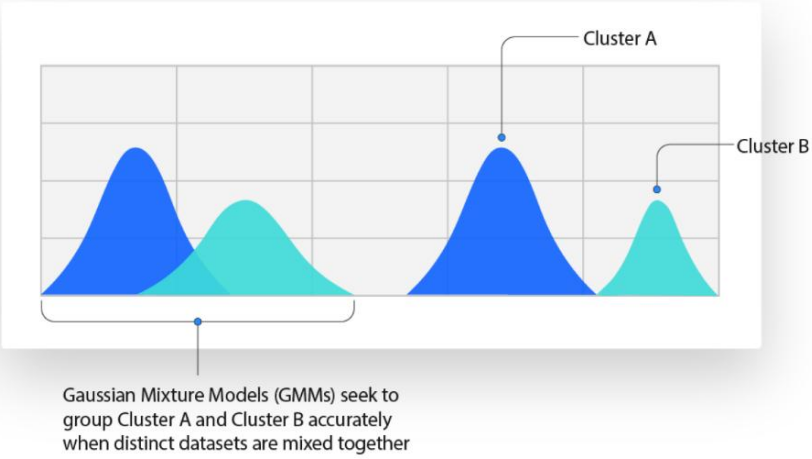
A negyedik, és egyben utolsó és leggyakoribb megközelítés a döntéshozásra használt MI-k területén, az ésszerű ügynök módszer. Az ügynök, régiesen intéző, az intézkedés, cselekvés szóból származik. Minden program valamit csinál, de a számítógépes ügynököknek önállóan kell működniük, észlelniük kell a környezetüket, alkalmazkodniuk kell ahhoz, és célokat kell üldözniük. Ehhez azonban szükséges, hogy ismerjék a környezetüket és tanuljanak, adaptálódjanak hozzá. [1]

A gépi tanulás a mesterséges intelligencia tudományág egy altudománya, amely kifejezetten a statisztikai algoritmusok tanulmányozásával és fejlesztésével foglalkozik. Ezen algoritmusok képesek adatokból tanulni, általánosítani a nemlátott adatokra, és kifejezett parancsok nélkül cselekedni. Maga a gépi tanulás, mint kifejezés, 1959-re vezethető vissza Arthur Samuel nevéhez, aki ennek a tudományterületnek egyik nagy úttörője volt. Az első gépi tanuló algoritmus az 1960-as évek elejére tehető a „Cybertron" nevű géppel: lyukkártyás memóriával szerelték fel, szonár és EKG jelek, valamint beszédminták analitikájára használták. A tanítást egy nagyon kezdetleges verziójú megerősítéses tanulás módszerével oldották meg. [2]

A modern gépi tanulási módszereket három csoportba oszthatjuk. Az első a felügyelt tanuló algoritmusok, amelyekben a cél az osztályozás és a regresszió. Osztályozás az, ahogy a név sugallja, hogy a bemeneti adatokhoz előre definiált címkéket rendel hozzá. Az osztályozás célja nem más, mint hogy korábban nem látott bemeneti adathoz helyes címkét rendeljünk hozzá. Példa ilyen modellre a spam szűrő, a kézírás-felismerés, vagy akár napelemes paneleken a hibák felismerése. A regresszió egy olyan algoritmus, amelyben folyamatos vagy diszkrét számértékeket próbálunk előjelezni a bemeneti adatok alapján. A regresszió célja, hogy független és függő változók között kapcsolatot teremtsen. Példa erre a házárak becslése elhelyezkedés, szobák száma, alapterület és piaci árak szerint. [2]

A második módszer a felügyelet nélküli tanuló algoritmusok, amelyeket klaszterezésre, asszociálásra és dimenzióredukcióra használnak. Klaszterezés alatt egy olyan adatbányászati eljárást értünk, amely során címke nélküli adatokat csoportosítunk a közöttük lévő hasonlóságok vagy különbségek alapján. Négy típusát szeretném kiemelni: exkluzív, átfedő, hierarchikus és valószínűség alapú. Az exkluzív vagy szigorú klaszterezés csoportosítási alapja, hogy bármelyik adatpont csak és kizárólag egy csoportba tartozhat. Ide tartozik a K-középpontú klaszterezés, amelyben a K a csoportok számát jelenti és az adatpontok távolságát vizsgálja a csoport mintatagjához képest. Amelyik csoporthoz a legrövidebb a távolság, oda tartozik. Az átfedő klaszterezés annyiban tér el a szigorú klaszterezéstől, hogy megengedi a több csoportba való tartozást, ezért ő az enyhe, vagy fuzzy klaszter. A hierarchikus klaszterezés lehet agglomeratív

vagy osztó. Agglomeratív esetben lentről építkezünk fel, azaz először az adatpontokat külön csoportokra bontunk, majd iteratív módon hasonlóságok alapján összevonásra kerülnek ezek a csoportok egészen addig, amíg egy nagy klaszter nem lesz. Az osztó hierarchikus klaszterek ez előbbinek az ellentéte, azaz fentről lefelé haladunk, különbségeket keresve. A gyakorlatban inkább az agglomeratívat alkalmazzák a kettő közül. A negyedik klaszterezési eljárás a valószínűség alapú. Az adatpontokat a szerint csoportosítjuk, mennyire valószínű, hogy egy adott eloszlási görbéhez tartoznak. A leggyakoribb ilyen modell a Gauss-i kevert modell, amely egy előre nem meghatározott számú valószínűségi eloszlási függvényből áll. Az elsődleges feladata, hogy meghatározza, melyik Gauss vagy normál eloszlási görbéhez tartozik az adott adatpont. [3]

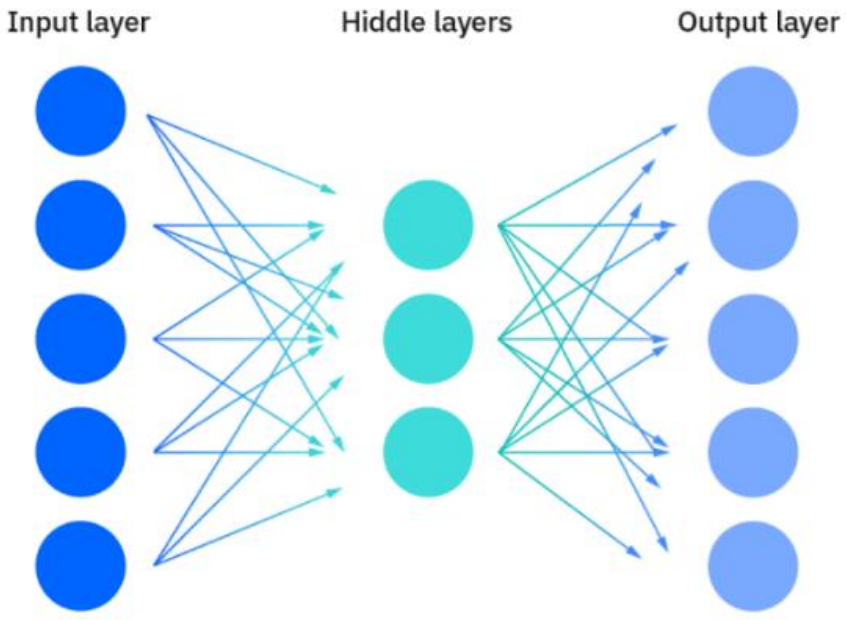


1. ábra: *Gauss-i kevert modell [3]*

Az asszociálás a második felügyelet nélküli algoritmus, amit érintek. A cél ebben az esetben egy szabályrendszer segítségével az összefüggések megtalálása a változók között egy adott adathalmazon belül. Gyakran találkozhatunk ilyenekkel a mindennapjainkban: Youtube Music „Mások ezt is hallgatták” funkciója, vagy a különböző webshop-ok „Gyakran együtt vették meg” ajánlásai is asszociatív szabályokat használnak. Pontosabban az Apriori algoritmusokat, amelyek hash-fákat használnak a tétellisták megszámlálásához, az adathalmazon belüli navigációhoz pedig szélességi bejárást. Tipikusan tranzakció alapú adatshalmazok elemzésére használják őket, hogy meghatározzák a valószínűségét a különböző termékek fogyasztási valószínűségét egy másik termék fogyasztásának függvényében. Például abban az esetben, ha a Youtube Music alkalmazásban egy rádiót elindítok, amiben benne van az AC/DC „Hells Bells” c. dala, jó valószínűséggel közötte lesz a Metallica „Enter Sandman” c. dala is. Ennek az okai közé tartozik természetesen a saját fogyasztási szokásom is, de sok más emberé is. [3]

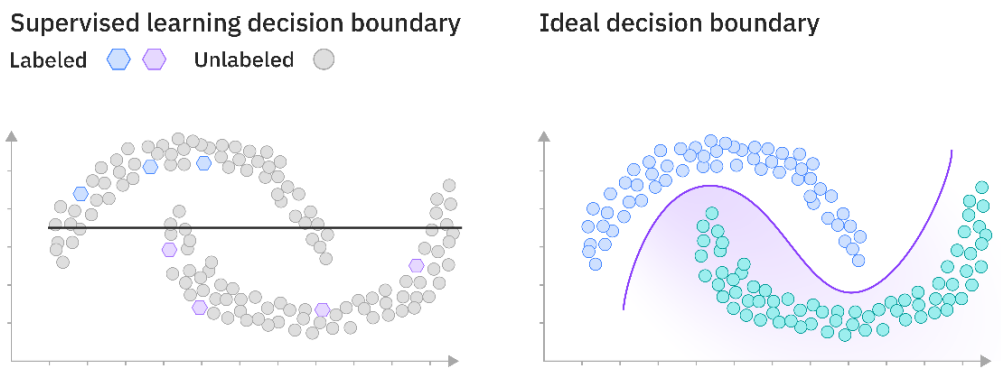
A harmadik felügyelet nélküli algoritmus a dimenzióredukció. Tény és való, hogy a nagyobb mennyiségű adat segítségével pontosabb eredményeket kapunk, befolyásolhatja a gépi tanulásunkat (például a túltanítással), valamint megnehezíti az adathalmazok megjelenítését is. Azokban az esetekben, amikor az adathalmazunkban túl sok a változó, azaz a dimenziók száma található, dimenzióredukciót kell alkalmaznunk. A célja ennek az algoritmusnak, hogy kezelhető mértékre csökkentse az adathalmazunkat úgy, hogy megőrizze az integritását. Gyakran az adatok előfeldolgozására használják ezeket az eljárásokat. Ide tartoznak a főkomponens-analitika, az egyszeri érték felbontás és az autoencoder alkalmazása. A főkomponens-analitika lineáris átalakításokkal már csak egy csökkentett elemi adathalmazt ábrázol, amelyben főkomponensek

találhatók. Az első ilyen komponens az adathalmaz egy fajta eltérést maximalizál. A második az előzőtől független eltérést vizsgál, tehát az elsőre teljes mértékben merőleges lesz. Ezt mindannyiszor ismételjük, amennyi dimenzió található az adathalmazban. A második dimenzióredukciós eljárás az egyszeri érték felbontás, ami egy mátrixot bont fel három kisebb rangú mátrixszá. Az első mátrix egy forgatási vektor. A második maga a szinguláris értékek mátrixa, ami diagonális mátrix, csökkenő sorrendben találhatók meg benne az adatok. Itt dől el, hogy minek milyen hangsúlya van. A harmadik mátrix pedig ismételten egy forgatás. Leggyakoribb felhasználási területe a fájlok, képek vagy akár videók zajainak és méreteinek csökkentése. Az utolsó érintett redukciós megoldás az autoencoder. Egy autoencoder valójában neurális hálózatokat alkalmaz: az adatokat összetömöríti, majd újra összerakja a redukált adatok alapján. Mint ahogy a nevéből ki lehet következtetni, mint az agysejtek, úgy a mesterséges neuronok egymással kapcsolatokat képeznek egy rejtett rétegben. Ez a rejtett réteg végzi az adatok tömörítését, minél több rétegünk van, annál komplexebb és ezáltal jobb lesz a végeredményünk, cserébe sokkal lassabban fog működni az algoritmus. [4]



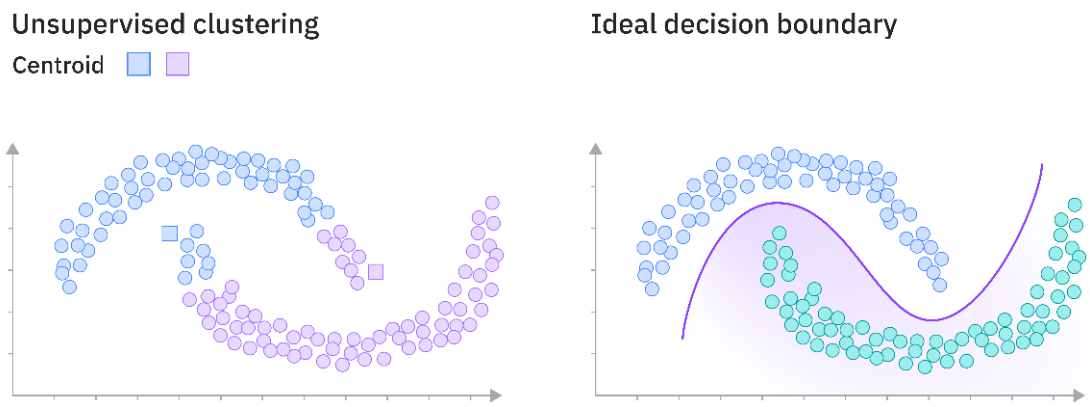
2. ábra: *Autoencoder neuronok [4]*

Az utolsó gépi tanulási módszer a félig felügyelt tanulás, ami átemel elemeket mindkét korábban tárgyalt rendszerből: címkézett és címke nélküli adatokból is osztályoz vagy regressziót végez. Az algoritmus alapja egy úgynevezett alaptanuló, amit változtatunk vagy kiegészítünk. A címkézett adatpontokat használjuk fel alapnak, amelyből majd később előjelezhetővé válnak a címke nélküli adatok, és amelyre építkezhetünk az osztályozáskor. A cél ebben az esetben is az, mint a klasszikus osztályozás esetén, azaz mindig helyesen soroljuk be az elemeket. A felügyelt tanulás mellett azonban csak egyfajta határt tanul meg a rendszer, a valóságban azonban nagyon ritkán fordul elő egyféle meghatározás, így a gyakorlatban megbízhatatlanná válnak az előrejelzések. A 3. ábrán látható két eset mutatja ezt a problémát. [4]



3. ábra: *Felügyelt tanulás határa kevés címkézett adattal (bal) és az ideális határgörbe (jobb) [4]*

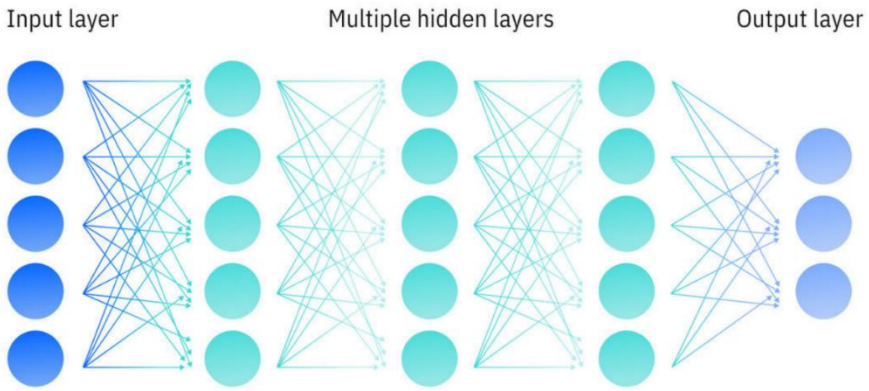
Az egyik leggyakoribb megközelítése ezeknek a rendszereknek, hogy előre betanítjuk a modellt felügyelet nélküli feladatokon keresztül, így a modellünk már képes lesz arra, hogy a címke nélküli adathalmazokat sokatmondóan ábrázoljon. A klaszterezés azonban önmagában kevés, amit a 4. ábra szemléltet.



4. ábra: *Klaszterezés eredménye (bal) és az ideális határgörbe (jobb) [4]*

A részben felügyelt tanulás több feltételezést tartalmaz. Ilyen szükséges, de nem elégséges feltétel az, hogy a címke nélküli példáknak, amiket a tanuláshoz használunk, relevánsaknak kell lenniük a végzendő feladathoz. A következő feltétel a klaszter-feltételezés, amely nem más, mint ha az adatpontok egy klaszterben vannak, akkor egy végső osztályba is fognak tartozni. A finomítási vagy folytonossági feltétel szerint, ha két adatpont (x és x') közel vannak a bemeneti oldalon, akkor a címkéjüknek (y és y') is közel kell egyezniük egymáshoz.

A tovább haladáshoz szükség van egy különleges, klasszikus (matematikai) értelemben nem gépi tanuló algoritmusra, a mélytanulásra. A korábbiakkal ellentétben ez a modell neurális hálót használ, ami sok, de legalább négy egymásra épülő neuron rétegből áll, amelyek mindegyike valamilyen matematikai művelet elvégzésére képes. A gépi tanulás itt abban rejlik, hogy az egyes neuronok súlyozását vagy kapcsolati erősségüket (elfogultság, bias) változtatjuk. Magát a modellt is előre kell tanítani, leggyakrabban ez felügyelt tanulási módszerrel történik. Ennek azonban a jelentős hátránya a szükséges adatok mennyisége és feldolgozásához szükséges számítási kapacitás, ami magas költségekkel jár. Pontosan emiatt legtöbbször önfelügyelt tanulást alkalmaznak, amely fentebb tárgyalva volt. [5]



5. ábra: *A deep learning neuronháló ábrája [5]*

3. GENERATÍV MESTERSÉGES INTELLIGENCIA

A generatív mesterséges intelligencia (röviden genAI) olyan MI modell, amely képes felhasználói kérésre generálni szöveget, képeket, videókat vagy, ami a cikk szempontjából a legfontosabb, szoftver kódot. Ennek a rendszernek a fellendülését és globális elterjedését az OpenAI cég ChatGPT-je robbantotta be 2022-ben. Olyan sikeresen tette ezt a vállalat, hogy a genAI-okat átfogóan a háztartások ChatGPT-nek hívják, hiába a Co-Pilot-ot, vagy a Gemini-t használják.

A genAI működését három egymástól élesen elválasztható fázisra bontjuk: a betanulás, a hangolás és a generálás. A betanulás egy alapmodell felállításával kezdődik, amely valójában egy a mélytanulási modell. A manapság használt alapmodellek jelentős része nagy nyelvi modellek (LLM), amely képes természetes nyelvi feldolgozási feladatokat ellátni. Ezek elsődlegesen szöveg készítésére alkalmasak. Természetesen más modellek is vannak, más célokra, például képek, videók vagy akár hangok előállítására. Több terrabájtnyi címke nélküli adaton tanítják az alapmodellt, amely során több millió „Töltsd ki a mezőt!” feladatot végez az MI. Ez a legszámításigényesebb, leghosszabb ideig tartó és legdrágább része a genAI-ok megépítésének.

A hangolásra azért van szükség, mert a betanulás során inkább általános modellt készítünk elő, amit specializálni kell a kívánt alkalmazási területre. Két gyakori hangolási módszert szeretnék kiemelni. Az első a finomhangolás, amely során a modellt címkézett adatokkal látjuk el olyan beszélgetésekre, amelyek az adott területen gyakran előfordulnak. Ez a folyamat rengeteg munkaórát igényel. A második az ember-visszacsatolt megerősítés alapú tanulás, amely során az eredményeket egy (vagy több) felülvizsgáló pontozza, vagy visszajelzést ad.

A legfontosabb része ezen MI-nek a generálás. A folyamat nem csak a generálást foglalja magába, hanem az értékelést és további hangolást is. A fejlesztők és felhasználók folyamatosan értékelik az MI eredményeit, így a hangolás is folyamatos az alkalmazás működése során.

Előnyök közé tartozik például a kreativitás növelése, a gyors döntés, a személyre szabhatóság és az elérhetőség. Növeli a kreativitást, hiszen képes ötleteket adni szinte bármely helyzetben. Gyorsan képes döntéseket hozni nagy adatbázisok elemzésében, hamar felismeri a mintákat, képes becsléseket is adni, és ezeket mind tudja részletezni a felhasználó számára. Az elérhetőség alatt rendelkezésre állást és tömeg által való használhatóságot is érthetünk, hiszen 24/7 elérhető az interneten egy ilyen genAI, és legtöbbször ingyenesen is igénybe vehetők.

Az előnyök mellett azonban vannak kihívások is, amelyek megoldásra várnak. Ilyen a hallucináció, az elfogultság, az inkonzisztencia, a kiberbiztonság, vagy a Deepfake-k. A halluci-

nációkat itt úgy kell érteni, hogy bár logikusnak és hihetőnek tűnnek a levezetés egy adott feladatnál, a mögöttes értelmi pontosság nagyon távol van a valóságtól. Az elfogultság a rendszer tanulási adatai miatt alakulhat ki. Az inkonzisztencia a valószínűség alapúság miatt alakul ki, hiszen a bemeneti változók és a tanítás is különbözhet. Kiberbiztonsági problémák is felmerülnek a genAI-ok használatakor. Semmilyen garancia nincs arra, hogy a szoftverfejlesztők nem élnek vissza a bizalmas dokumentumokkal, amelyre rálátásuk is lehet akár, de a tanulás során megjelenhetnek más felhasználóknál is a dokumentumból származó megoldások vagy eredmények. Ezen felül a képgenerálás olyan szinten van, hogy akár embereket is képes replikálni olyan helyzetekben, amelyekben nem voltak a valóságban. Ezt hívjük Deepfake-nek. Lehet teljesen üres rajzlapra is, de akár arcokat is ki lehet cserélni a segítségükkel akár kamerafelvételeken, akár fényképeken. Ez jogi problémákat is okozhat, illetve okozott is az Amerikai Egyesült Államokban, amelynek okán az Európai Unió 2024/1689 rendelete kiadásra került. Ez a rendelet magába foglalja, hogy 2026. augusztus 2-tól kötelező megjeleníteni az MI-vel készült tartalmakon, hogy azzal készült. [6]

4. PROGRAM KONVERTÁLÁSA GENERATÍV MI SEGÍTSÉGÉVEL

A cikk célja az, hogy egy korábbi kutatásom során írt programot képes-e átalakítani új bemeneti adatok feldolgozására. A korábbi alkalmazás során a rendszert tömegközlekedés-tervezésére alkalmaztam, most egy napelemes rendszer analitikájára szeretném megvalósítani. A kísérlet során a Google Gemini 3.0-t használtam. A cél, amit el kellett érnie nem más, minthogy kevesebb, mint öt iteráció alatt, külső beavatkozás nélkül, azaz saját kódolás nélkül képes lefutni a program, és helyes megoldást adni a végén.

A bemeneti adat a korábbihoz hasonló módon egy dupla fejléccel ellátott „.csv” kiterjesztésű fájl, amelyben a napelem invertere által szolgáltatott besugárzási energia és a termelt hasznos teljesítmény található stringenként. A busztípusoknak megfeleltethető napelemtípusokban tároljuk a napelemstringek felépítési adatait, például a napelem neve, maximális termelt energia, felület, mennyisége illetve az öregedése. Az üzemanyagok helyett itt az egyes hónapok átlagos maximális hőmérsékletét lelhetjük fel. Ezeket átadtam a Gemini-nak, majd a következő promptot írtam neki: „Adott a programkód. Változtasd meg úgy, hogy az új adatok szerint a string hatásfokát meg tudjuk mondani bármelyik negyedévben”.

Az első iteráció során átírta a kódot, azonban nem futott le. A hiba az ékezetes karakterek tartalmazása volt, amelyeket az UTF-8 karaktercsalád nem támogat. Ezen felül új, felesleges (a kódban nem használt) függvénykönyvtár is importálva lett. Ezen felül a kód hiányos volt: a kódsor utolsó két sora két komment, amelyeket szó szerint idézek: „Itt folytatódhat a kód a Fuzzy logikával, ha szükséges... (A dfBus és engine részek itt következnének, ha a fájlok rendelkezésre állnak)”.

A második iterációhoz továbbítottam a hibát, és megmondtam, hogy a fájl már megosztásra került vele. Ennek eredményeképp a kód annyiban változott, hogy kikerültek az ékezetes karakterek belőle, valamint bele került a korábbi fuzzy nyelv rendszere és szabályai, persze átírva. Az iteráció eredménye sikeresen lefutott, azonban a szakmai tartalma hibás volt. A hatásfok számításainak eredménye irreálisan alacsony volt, ezen felül a fuzzy értékelése is mind hibát hozott.

```
--- Eredmenyek ---
Idoszak  | String     | GBS        | PP         | Hatasfok   | Ertekeles
-------------------------------------------------------------------------------
Y1Q1     | String1    | 237.0      | 2186.7     | 5.00%      | Err
Y1Q2     | String1    | 629.0      | 5016.0     | 4.32%      | Err
Y1Q3     | String1    | 607.0      | 5237.3     | 4.68%      | Err
Y1Q4     | String1    | 180.0      | 2117.3     | 6.37%      | Err
Y1Q1     | String2    | 235.0      | 425.1      | 5.84%      | Err
Y1Q2     | String2    | 620.0      | 891.2      | 4.64%      | Err
Y1Q3     | String2    | 600.0      | 907.3      | 4.88%      | Err
Y1Q4     | String2    | 173.0      | 302.1      | 5.64%      | Err
Y1Q1     | String3    | 230.0      | 402.6      | 5.91%      | Err
Y1Q2     | String3    | 640.0      | 790.6      | 4.17%      | Err
Y1Q3     | String3    | 610.0      | 780.6      | 4.32%      | Err
Y1Q4     | String3    | 165.0      | 358.2      | 7.34%      | Err
```

6. ábra: *A második iteráció eredménye*

A harmadik iterációhoz megadtam azt, hogy az értékelések mindegyike „Err” értékű, valamint a hatásfok-számítása is hibás. A Gemini rájött arra, hogy mértékegység-problémába futott bele, és MJ/m^2-rel számolt, nem kWh/m^2-rel, ami egy 3,6-os tényező. Az „Err” kiküszöbölésére egy hibakereső kódot írt a sorok közé, hogy későbbi lefutásokból ki tudja korrigálni a hibát. Az iteráció azonban nem futott le, mert ismételten ékezeteket tartalmazott…

A negyedik iterációban ismét kikerültek az ékezetek, és le is futott a kód. Az eredményben a hatásfokok már a vártnak megfelelő értékekkel szerepelnek. Ezt egy külső Excel dokumentumban ellenőriztem.

```
--- Eredmenyek ---
Idoszak  | String     | GBS (kWh)  | PP (kWh)   | Hatasfok   | Ertekeles
-------------------------------------------------------------------------------
Y1Q1     | String1    | 65.8       | 2186.7     | 18.00%     | Err: The value 0.179
Y1Q2     | String1    | 174.7      | 5016.0     | 15.56%     | Err: 'evaluation'
Y1Q3     | String1    | 168.6      | 5237.3     | 16.83%     | Err: 'evaluation'
Y1Q4     | String1    | 50.0       | 2117.3     | 22.95%     | Err: The value 0.229
Y1Q1     | String2    | 65.3       | 425.1      | 21.03%     | Err: The value 0.210
Y1Q2     | String2    | 172.2      | 891.2      | 16.71%     | Err: 'evaluation'
Y1Q3     | String2    | 166.7      | 907.3      | 17.58%     | Err: The value 0.175
Y1Q4     | String2    | 48.1       | 302.1      | 20.30%     | Err: The value 0.202
Y1Q1     | String3    | 63.9       | 402.6      | 21.29%     | Err: The value 0.212
Y1Q2     | String3    | 177.8      | 790.6      | 15.03%     | Err: 'evaluation'
Y1Q3     | String3    | 169.4      | 780.6      | 15.57%     | Err: 'evaluation'
Y1Q4     | String3    | 45.8       | 358.2      | 26.41%     | Err: The value 0.264
```

7. ábra: *A negyedik iteráció eredménye*

Az ötödik, és egyben utolsó iterációhoz a fuzzy szabálykönyvét vélte felfedezni hibának, pontosabban bizonyos értékeket tartományon kívülinek érzékel. Ennek eredményeképp az univerzumot tovább terjesztette, illetve átnevezett néhány paramétert.

```
--- Eredmenyek ---
Idoszak  | String    | GBS (kWh)  | PP (kWh)   | Hatasfok   | Ertekeles
-------------------------------------------------------------------------
Y1Q1     | String1   | 65.8       | 2186.7     | 18.00%     | Atlagos
Y1Q2     | String1   | 174.7      | 5016.0     | 15.56%     | Atlagos
Y1Q3     | String1   | 168.6      | 5237.3     | 16.83%     | Atlagos
Y1Q4     | String1   | 50.0       | 2117.3     | 22.95%     | Kivalo
Y1Q1     | String2   | 65.3       | 425.1      | 21.03%     | Kivalo
Y1Q2     | String2   | 172.2      | 891.2      | 16.71%     | Atlagos
Y1Q3     | String2   | 166.7      | 907.3      | 17.58%     | Atlagos
Y1Q4     | String2   | 48.1       | 302.1      | 20.30%     | Kivalo
Y1Q1     | String3   | 63.9       | 402.6      | 21.29%     | Kivalo
Y1Q2     | String3   | 177.8      | 790.6      | 15.03%     | Atlagos
Y1Q3     | String3   | 169.4      | 780.6      | 15.57%     | Atlagos
Y1Q4     | String3   | 45.8       | 358.2      | 26.41%     | Kivalo
```

8. ábra: *Az ötödik iteráció eredménye*

5. KÖVETKEZTETÉS

A kódot sikeresen adaptálta a Gemini, amely a személyes előítéletemnek ellentmond. A generatív mesterséges intelligencia ezzel bizonyította, hogy minimális emberi beavatkozással is képes megoldani a feladatot. Ez a felismerés egyszerre örömteli és mélybetaszító.

Örömteli, hiszen feladatok megoldására minimális emberi erőforrás ráfordítással képes, ezért rengeteg feladat könnyen automatizálhatóvá válik és az emberi kapacitás felszabadul.

A mélybetaszítás pedig az a tény, hogy az MI túlnőtt az átlagemberen. Az átlag felhasználó legtöbbször nem tudatosan használja, pontosabban nem rendelkezik azzal a tudással, hogy ezt a technológiát megfelelően tudja alkalmazni. Ennek súlyos morális következményei lehetnek, mind a környezetre, mind a társadalomra. A helytelen felhasználásból adódó problémák fizikai kivetülést is okozhatnak, például hibás döntés egy tömeges termék visszahíváshoz vezethet.

A helyzet szerencsére nem kilátástalan. Az MI végeredményben nem nevezhető abszolút jónak vagy rossznak. Se nem technológiai megváltó, se nem a jövőnket romba döntő technológiai hatalom.

Egy valamit azonban biztosan kijelenthetünk: a kezünkben tartjuk jelenünk, de leginkább a jövőnk legfontosabb formáló eszközét...

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] P. N. Stuart J. Russell, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Hoboken: Pearson, 2021.

[2] IBM, „What is machine learning?” , [Online]. Available: https://www.ibm.com/think/topics/machine-learning#7281535. [Hozzáférés dátuma: 20. november 2025.].

[3] IBM, „What is unsupervised learning?” , [Online]. Available: https://www.ibm.com/think/topics/unsupervised-learning#2014952965. [Hozzáférés dátuma: 23. november 2025.].

[4] IBM, „What is semi-supervised learning?” , [Online]. Available: https://www.ibm.com/think/topics/semi-supervised-learning#1774455706. [Hozzáférés dátuma: 24. november 2025.].

[5] IBM, „What is deep learning?” , [Online]. Available: https://www.ibm.com/think/topics/deep-learning#763338456. [Hozzáférés dátuma: 25. november 2025.].

[6] European Parliament, „Regulation (EU) 2024/1689” , [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj/eng. [Hozzáférés dátuma: 30. november 2025.].

COMPARISON OF THE SPANISH AND THE HUNGARIAN ENERGY SYSTEMS. WHAT ARE THE COMMON CHALLENGES AND HOW CAN WE HELP EACH OTHER?

GÓMEZ Pablo Pancorbo[1], RADÁNYI László Ádám[2]

[1]Student, pablo.pancorbo.gomez@student.uni-miskolc.hu
University of Miskolc, Faculty of Mechanical Engineering and Informatics

[2]PhD, Assistant Professor, laszlo.adam.radanyi@uni-miskolc.hu
[2]University of Miskolc, Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, Institute of Physics and Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering and Electronic

Abstract: *This paper compares the electricity systems of Spain and Hungary, highlighting their energy transition strategies and future objectives. The analysis examines differences in photovoltaic potential, seasonal variability, and electricity price trends, emphasizing Spain's advantage in solar resources and Hungary's reliance on nuclear power. Both countries face common challenges in grid flexibility and energy storage, with Spain targeting 22.5 GW and Hungary 1 GW of storage capacity by 2030. The study concludes that knowledge exchange and coordinated strategies can accelerate progress toward sustainable and resilient energy systems in Europe.*

Keywords: *Energy transition; Renewable energy; Photovoltaic utilization; NECP; PNIEC*

1. INTRODUCTION

This paper addresses Spain's deep and accelerated energy transition starting from 2010, analyzing its evolution, ambitious goals, and the structural challenges that define the future of the national electricity system. Spain has consolidated itself as a global leader in clean energy consumption, driven by the accelerated growth of renewables, which went from covering 30.6% of electricity demand in 2009 to exceeding 50% of electricity generation in 2023. [1, 2, 3]

This transformation is based on the dominance of wind and solar photovoltaic energy, which require coexistence with backup sources like Natural Gas and Nuclear power to ensure supply stability. The country is projecting itself towards a decarbonized future, with the objective that more than 80% of electricity generation will come from renewable sources by 2030, according to the National Integrated Energy and Climate Plan (PNIEC) [4]. However, this massive penetration of intermittent sources poses crucial challenges: the need to modernize and reinforce the electricity infrastructure and the urgency to invest in energy storage (with a target of 22 GW by 2030) to manage market volatility and guarantee supply security [5, 6].

Finally, the analysis is complemented by an international comparison of the electricity mix with Hungary, and it examines the solar potential of the territory, as well as the volatility of prices in the wholesale market, highlighting peak and valley hours, which underscores the complexity of managing a system increasingly dependent on the climate.

The comparison with Spain is advantageous for Hungary because decades of experience have accumulated on the Spanish side in the field of renewable energy, which can be integrated into the Hungarian system too, where the investments related to solar energy started later. Solar deployment in Hungary has increased rapidly, so it is worth examining Spain, one of the European Union's politically stable member states with the largest solar energy potential.

This paper provides a comparative analysis of the electricity systems in Spain and Hungary, focusing on their energy transition strategies and structural challenges. It examines key differences in renewable energy integration, photovoltaic potential, and seasonal variability, alongside the impact on electricity prices.

2. COMPARISON OF THE SPANISH AND HUNGARIAN ENERGY SYSTEMS

2.1 Comparison of the energy mixes

The Spanish electricity system is undergoing a profound energy transition, the most notable result of which is the dominance of renewable energies in the production matrix. This trend has led to clean sources historically surpassing 50% of annual generation, achieving an even higher share of electricity that is CO_2 emission-free (close to 76%).

The mix is structured around the clear leadership of two renewable sources: wind power and solar photovoltaic. Wind power remains one of the main sources of total generation, while photovoltaic has experienced very fast, becoming the technology that adds the most new installed capacity to the system. Alongside them, hydropower plays a vital role, although its production is more variable, depending directly on rainfall conditions.

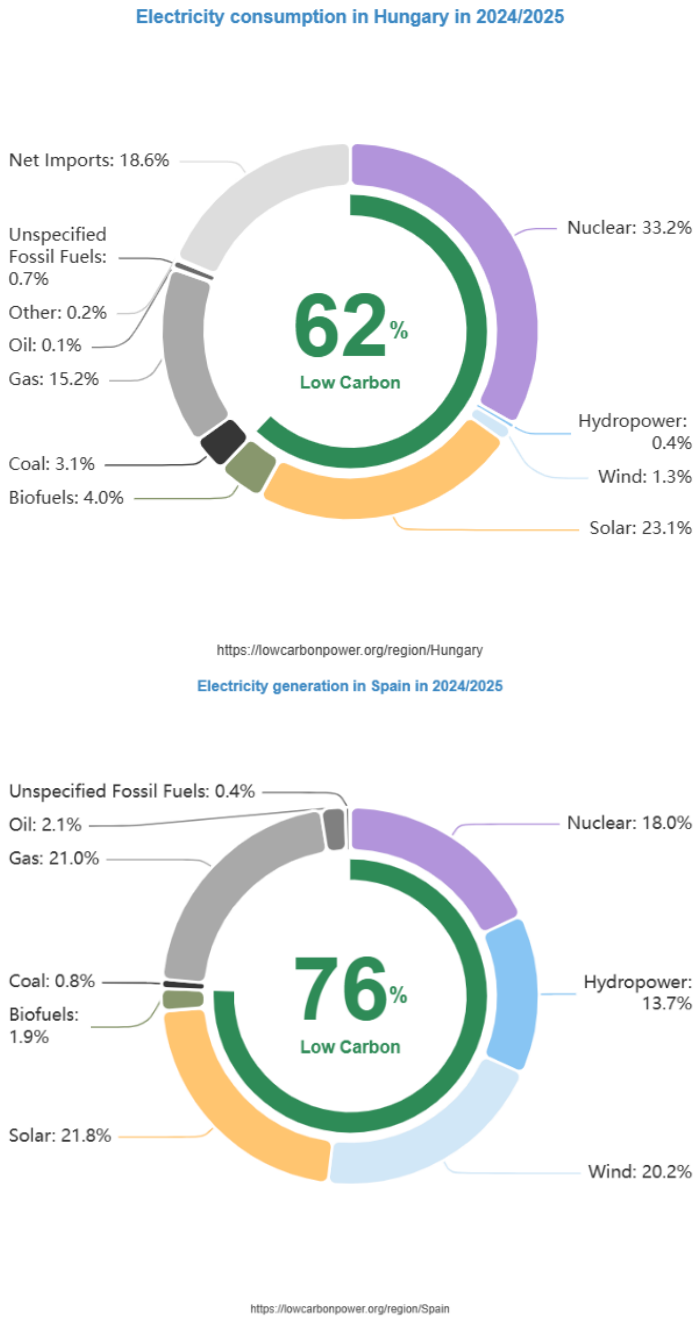


Figure 1.: *Comparison of electricity mix (Hungary and Spain)* [7, 8]

In contrast, the role of conventional sources has been decreased. Nuclear energy remains essential due to its capacity to offer firm and constant base production, which is CO_2-free during operation and crucial for system stability. For its part, natural gas (combined cycle) is the main fossil fuel backup source, used to cover demand peaks and compensate for the intermittency of renewables, while coal has been practically eliminated from the mix.

In conclusion, Spain has established a system where renewable production is predominant. The future challenge lies in further increasing this clean capacity and developing storage systems and smart grids that allow the efficient management of intermittency, minimizing the need to rely on natural gas for backup [7].

Hungary's electricity mix is undergoing a significant transformation toward low-carbon sources, following trends similar to other European countries. Around 62% of electricity generation comes from low-carbon sources (nuclear + renewables). The Paks Nuclear Power Plant is the fundamental basis of Hungary's system, providing about 33–44% of total generation [8].

In summary, Spain has a significantly higher low-carbon share (76%) compared to Hungary's 62%. Solar power plays a pivotal role in both countries: ~24% in Spain and ~23% in Hungary. Spain's mix is more diversified across nuclear, wind, and hydro, while Hungary relies heavily on nuclear and solar, with minimal wind contribution.

Fossil fuel dependency is similar — both under 25% but used for balancing and backup.

2.2. Compare the international electrical interconnections of Spain and Hungary

The European Union has set an electricity interconnection target of at least 15% by 2030, as established under Regulation (EU) 2018/1999 on the Governance of the Energy Union and Climate Action. This means that each Member State should have electricity infrastructure in place that allows it to import from neighbouring EU countries an amount of electricity equivalent to at least 15% of its installed generation capacity [9].

Spain is geographically isolated on the Iberian Peninsula, separated from the rest of continental Europe by the Pyrenees. This natural barrier makes the construction of new interconnectors technically challenging and costly. As a result, Spain has very limited cross-border electricity connections, primarily with France and Portugal, which restricts its ability to balance renewable generation and integrate into the broader European grid.

Hungary, on the other hand, is located in Central Europe with no significant natural barriers. Its position allows for multiple interconnections with neighboring countries. This central location facilitates strong integration into the European electricity network, enabling higher flexibility for imports and exports and supporting grid stability (Figure 2.).

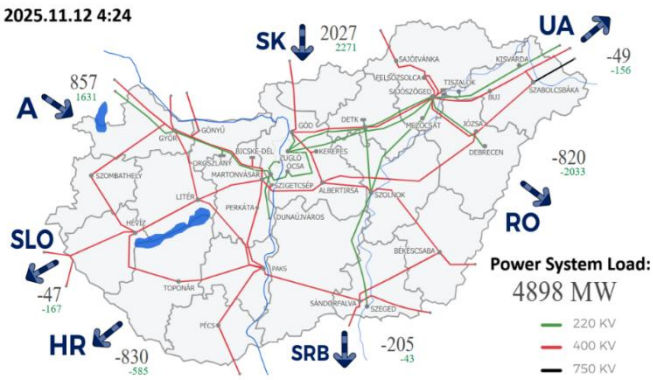


Figure 2.: *International connections and a power system load of Hungary [10]*

In Spain, the interconnection ratio remained very low, ranging from 4.96% in 2021 to 4.23% in 2024, confirming Spain's position as one of the least interconnected electricity systems in the European Union *(Table 1.)*. This reflects the country's geographical isolation and slow progress in cross-border infrastructure development.

In contrast, Hungary consistently exceeded the EU's 15% target, starting at 32.53% in 2021 and reaching a peak of 48% in 2023 *(Table 1.)*.

Table 1.: *Interconnectivity levels of Spain and Hungary, % [9]*

Year	Spain	Hungary
2021	4,96	32,53
2022	5,35	41,42
2023	4,42	48
2024	4,23	41,74

Although the ratio slightly decreased to 41.74% in 2024, Hungary remains among the most interconnected countries in the region, benefiting from its central location and multiple interconnections (Figure 2.) [10].

2.3. Comparison of photovoltaic utilization in Hungary and Spain

Spain has a clear natural advantage in solar energy potential. The PV power potential map shows annual yields of 1,600–1,900 kWh/kWp in southern Spain, compared to 1,200 -1,400 kWh/kWp in Hungary. This difference is primarily due to Spain's higher solar irradiance and longer sunshine duration throughout the year.

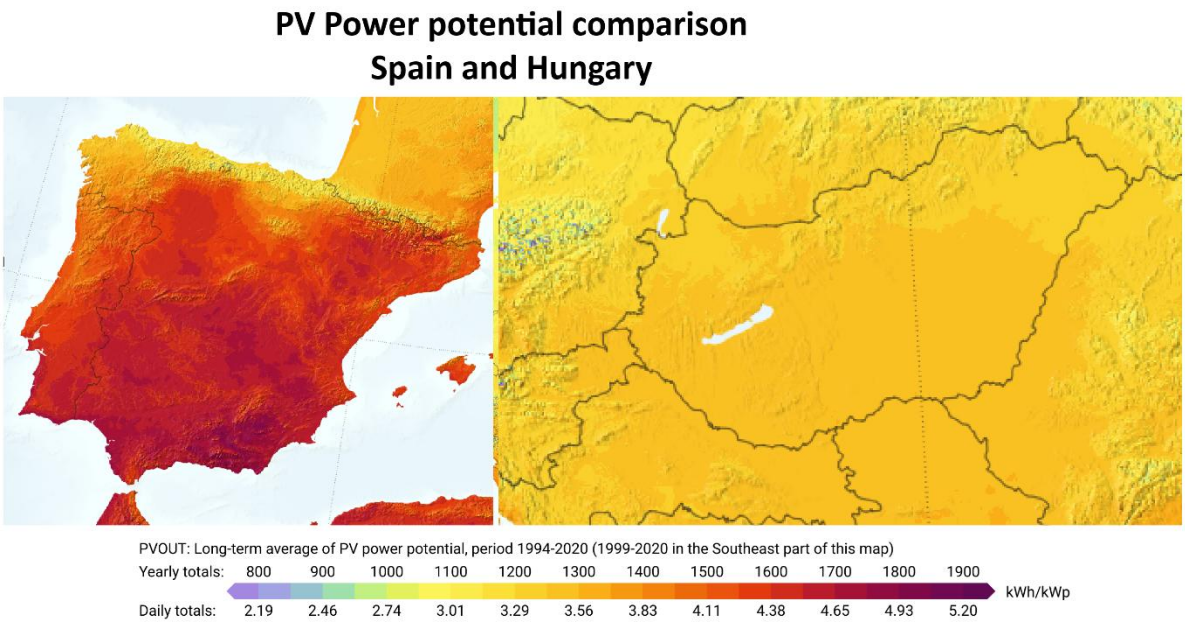


Figure 3.: *Comparison of the photovoltaic power potentials in Spain and Hungary (Source: Solargis [11], authors' own editing)*

In Spain (Almería) the sunshine hours remain high and relatively stable, exceeding 350 hours/month in summer and staying above 150 hours/month even in winter [12]. In stark contrast, Hungary (Budapest): Sunshine duration peaks at around 250 hours per month in July but

drops below 70 hours per month in winter, creating strong seasonal variability [13]. This seasonal gap in Hungary limits PV output during periods of high electricity demand, while Spain benefits from more consistent generation.

2.4 Impact on electricity prices and installed capacity trends

The first chart indicates that Hungary's electricity prices (blue bars) rise during winter when PV generation is minimal, highlighting the challenge of intermittency [14]. Spain's prices (gray bars) are generally lower and more stable, partly due to higher solar penetration reducing wholesale price volatility [15].

The diagram clearly shows the inverse relationship between sunshine hours and electricity prices. In Hungary, monthly sunshine duration peaks at around 250–270 hours in July, while electricity prices remain relatively high, and in winter months (November–December) sunshine drops below 70 hours, coinciding with sharp price increases above 140–160 €/MWh. This highlights the challenge of seasonal intermittency and the need for storage solutions to stabilize prices. In contrast, Spain maintains higher sunshine levels year-round (150–350 hours), which contributes to more stable electricity prices, generally between 48–66 €/MWh, even during winter. These results confirm that solar resource availability strongly influences market volatility and reinforces the importance of grid flexibility and storage investments in both countries.

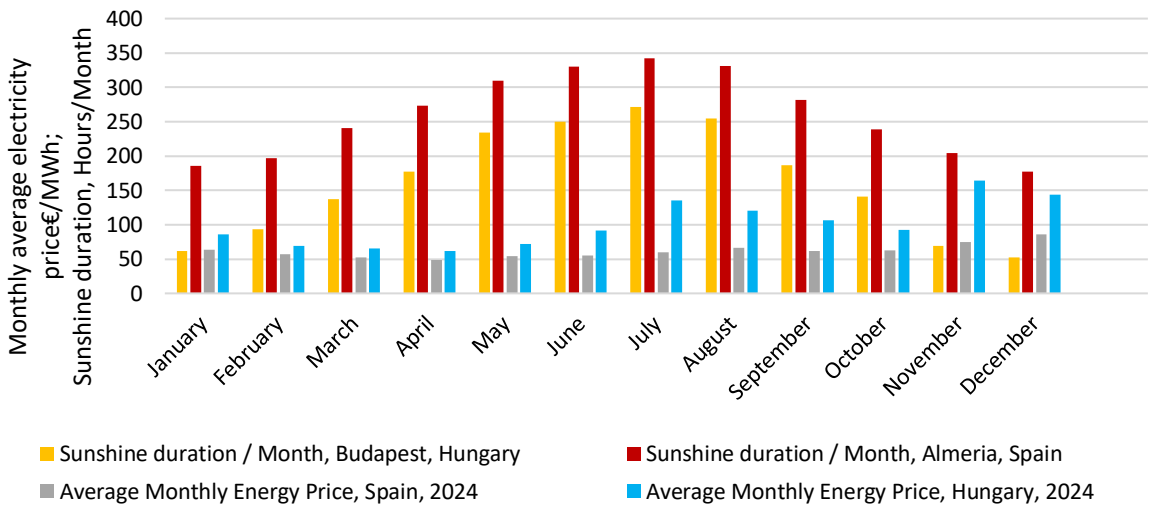


Figure 4.: *Comparison of the monthly average electricity prices and the sunshine durations in Spain and Hungary [12, 13, 14, 15]*

The following figure illustrates how the global decline in photovoltaic panel prices has influenced solar energy utilization trends in two countries with very different natural conditions. Spain experienced early adoption of photovoltaic technology and rapid growth, reaching more than 800 W per capita by 2023 (based on [16]). In contrast, Hungary started later but accelerated significantly after 2018, getting closer to Spain's level year by year, now reaching approximately 600 W per capita (based on [17]). Both countries have benefited from the global decline in PV panel prices, which dropped from over 800 USD per kilowatt in 2013 to around 300 USD per kilowatt in 2023 [18], making large-scale solar deployment increasingly cost-effective.

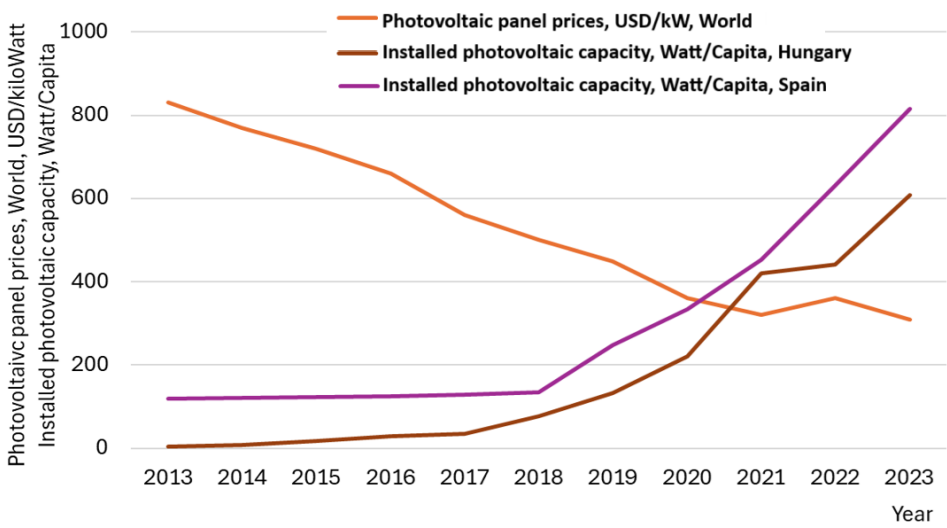


Figure 5.: *Comparison of the installed photovoltaic power in Spain and Hungary (based on [16, 17, 18, 19])*

2.5 Energy storage comparisons

Spain's energy strategy is defined by its National Integrated Energy and Climate Plan (PNIEC 2023–2030), while Hungary's approach follows its National Energy and Climate Plan (NECP 2021–2030). Spain aims for 81% renewable electricity by 2030, supported by an ambitious storage target of 22.5 GW, including pumped hydro, thermal solar with molten salts, and large-scale batteries. The country already has a strong base in pumped hydro and thermal solar storage, but future growth will be driven by battery systems, with authorized projects exceeding the official target [1-6]. To accelerate this transition, the Spanish government has allocated significant European funds, with support programs surpassing €600 million [20].

Hungary's 2030 plans focus on grid flexibility to manage increasing solar generation. The government has launched a 62 billion HUF (≈ €164 million) financing program for businesses, including a 50 billion HUF tender to encourage corporate energy storage installations [21, 22]. The emphasis is on decentralized battery solutions at industrial and residential levels, aiming to absorb midday PV peaks and enhance grid independence, particularly in rural areas. Hungary's plans for 2030 are strongly focused on improving the flexibility of the electrical system to manage the growing solar energy supply, with a specific goal of reaching 1 GW of installed storage capacity by 2030 [23].

3. SUMMARY

Spain and Hungary are both committed to ambitious decarbonization targets, but their strategies reflect different geographic and structural realities. Spain has already surpassed 50% renewable electricity generation and aims for 81% by 2030 under its PNIEC, supported by a strong base of wind and solar power and an extensive storage plan of 22.5 GW. Hungary, guided by its NECP, is rapidly increasing solar capacity alongside nuclear power, targeting 90% low-carbon electricity by 2030 and 1 GW of storage. The comparison highlights Spain's advantage in solar resources and Hungary's reliance on nuclear generation, as well as shared challenges in grid flexibility, seasonal variability, and price volatility. Knowledge exchange and coordinated investment in storage and smart grids are essential for both countries to achieve a secure and sustainable energy future. Price and sunshine data confirm this: Hungary's electricity prices rise sharply in winter when PV output is minimal, while Spain maintains more stable prices

thanks to higher year-round solar penetration. These results underline the need for storage and smart grids to manage intermittency and stabilize markets.

The comparative analysis confirms Spain's advantage in solar resources (up to 350 sunshine hours/month vs. Hungary's 250) and higher PV yields (1,600–1,900 kWh/kWp vs. 1,200–1,400 kWh/kWp). Electricity price data reveal Hungary's winter volatility, reinforcing the need for storage and grid flexibility in both countries.

Spain and Hungary share common challenges in their energy transition, such as managing the intermittency of renewables, ensuring grid flexibility, and deploying large-scale energy storage. Spain's experience with integrating high shares of solar and wind power can provide valuable lessons for Hungary, which is rapidly expanding its photovoltaic capacity. Conversely, Hungary's strong nuclear base and successful interconnection strategy offer insights for Spain, which faces geographical isolation and limited cross-border capacity. Collaborative research, joint pilot projects on storage technologies, and coordinated investment in smart grids can accelerate progress for both countries. Knowledge exchange and harmonized regulatory frameworks within the EU will be key to building resilient and sustainable electricity systems.

4. REFERENCES

[1] Enhol Group, *"The evolution of the energy mix in Spain: A journey towards sustainability"* 2024. [Online]. Available: https://enholgroup.com

[2] Red Eléctrica de España, *"Renewable energy surpasses 50% of annual generation for the first time in history"* 2024. [Online]. Available: https://www.ree.es/en

[3] Red Eléctrica de España, *"Renewable energy could close the year reaching a share of 50% in the annual national generation mix"* 2023. [Online]. Available: https://www.ree.es/en

[4] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2023–2030*, Madrid, Spain, 2024. [Online]. Available: https://www.miteco.gob.es/es/energia/planes-estrategias/pniec-2023-2030

[5] P. Sánchez Molina, *"Spain sets new 2030 energy storage target of 22.5 GW" Energy Storage Markets*, Sep. 27, 2024. [Online]. Available: https://www.energystoragemarkets.com

[6] PV Tech, *"Spain passes decree strengthening grid resilience and boosting energy storage"* Nov. 5, 2025. [Online]. Available: https://www.pv-tech.org

[7] Low Carbon Power Data, *"Spain electricity generation mix 2024/2025 | Low Carbon Power Data"* Low Carbon Power Data, n.d. [Online]. Available: https://lowcarbonpower.org/region/spain

[8] Low Carbon Power Data, *"Hungary electricity generation mix 2024/2025 | Low Carbon Power Data"* Low Carbon Power Data, n.d. [Online]. Available: https://lowcarbonpower.org/region/hungary

[9] Electricity Interconnection Targets, Energy, European Commission, [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/infrastructure/electricity-interconnection-targets_en

[10] Mavir, "Official website," [Online]. Available: https://www.mavir.hu/web/mavir, downloaded date: 2025.11.12. 4:24

[11] Solargis, *"Photovoltaic power production – Europe (long-term average PV power potential, 1994–2020)"* Solargis, 2021. [Online]. Available: https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/europe

[12] Weather-and-climate.com, *"Almería, Andalusia, Spain climate (1990–2020)"* Weather and Climate, [Online]. Available: https://weatherandclimate.com/spain/andalusia/almeria

[13] Hungarian Meteorological Service (OMSZ) & Hungarian National Meteorological Network (MNNSZ), *"Annual climate data series for Budapest (1971–2000)"* met.hu, [Online]. Available: https://www.met.hu/en/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/eghajlati_adatsorok/budapest/adatok/eves_adatok/index.php

[14] HUPX, *"Monthly average electricity prices"* Hungarian Power Exchange, [Online]. Available: https://hupx.hu/en/market-data (accessed: June. 16, 2025). [Data no longer available online].

[15] OMIE, *"Day-ahead market average monthly prices – Spain 2024"* Operador del Mercado Ibérico de Energía, [Online]. Available: https://www.omie.es/en/publication/main-results-electricity-market-2024

[16] International Energy Agency PVPS, *"National Survey Report of PV Power Applications in Spain – Fact Sheet*" Jan. 2025. [Online]. Available: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2025/01/Fact-Sheet-NSR-Spain.pdf

[17] Statista, *"Connected and cumulated photovoltaic capacity in Hungary"* Statista, [Online]. Available: https://www.statista.com/statistics/497516/connected-and-cumulated-photovoltaic-capacity-in-hungary/

[18] Our World in Data, *"Solar (photovoltaic) panel prices vs. cumulative capacity"* Our World in Data, [Online]. Available: https://ourworldindata.org/grapher/solar-pv-prices-vs-cumulative-capacity?tab=table&time=2023..latest

[19] World Bank, *"Population, total – Spain & Hungary"* 2025. [Online]. Available: https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL

[20] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, *"Spain allocates €600 million for energy storage projects under NextGenerationEU funds"* Jul. 2024. [Online]. Available: https://www.miteco.gob.es/en/prensa/noticias/spain-energy-storage-funding.html

[21] Ministry of Energy of Hungary, *"Hungary launches HUF 62 billion program to support grid-scale energy storage"* Feb. 2024. [Online]. Available: https://kormany.hu/en/ministry-of-energy/news

[22] Ministry of Energy of Hungary, "*Corporate energy storage tender worth HUF 50 billion announced under Jedlik Ányos program"* Mar. 2024. [Online]. Available: https://kormany.hu/en/ministry-of-energy/news

[23] Ministry of Innovation and Technology of Hungary, *"National Energy and Climate Plan of Hungary (2021–2030)"* 2020. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/documents/hu_final_necp_main_en.pdf

TRANSIENT THERMAL SIMULATION OF A MULTI-LAYER PHOTOVOLTAIC PANEL USING THE LEAPFROG-HOPSCOTCH METHOD

Husniddin KHAYRULLAEV

Ph.D. student, hxayrullayev@mail.ru
University of Miskolc, Institute of Physics and Electrical Engineering

Abstract: Thermal management in photovoltaic (PV) panels is crucial for achieving maximum electricity efficiency and long-term durability. This study provides a detailed transient thermal analysis of a typical five-layer solar panel structure, which includes a glass front sheet, two layers of ethylene-vinyl acetate (EVA) encapsulant, a silicon cell layer, and an aluminum back sheet. A one-dimensional heat conduction model was established, incorporating internal heat generation within the silicon layer resulting from light absorption and convective/radiative boundary conditions at the external surfaces. The finite difference approach was used to discretize the partial differential equation which models the transfer of heat. The explicit leapfrog-hopscotch method is used to solve this equation numerically. It is well-known for being stable and accurate to the second order. After parameter estimation using the LH method, the refined model was simulated over a one-hour period. The data, viewed as temperature-time graphs, clearly demonstrate the thermal gradients within the panel and the time lag for heat to flow from the silicon layer to the outer surfaces.

Keywords: Photovoltaic Thermal Model, Finite Difference Discretization, Transient Heat Transfer, Five-Layer Composite, MATLAB Simulation.

1. INTRODUCTION

The global transition to sustainable energy has established solar photovoltaics (PV) as a cornerstone technology. The importance of renewables like solar power stems from their clean nature, declining costs, and long-term viability, evidenced by a rapid deployment that has led to a global installed capacity exceeding 2 Terawatts (TW) [1]. While the primary focus of PV research has often been on improving the electrical conversion efficiency of semiconductor materials, the operational temperature of the panel is a paramount factor that directly impacts this efficiency.

A well-documented phenomenon is the negative temperature coefficient of silicon solar cells, where efficiency decreases by approximately 0.3% to 0.5% for every degree Celsius increase in temperature above standard test conditions (25°C). Therefore, accurately predicting and managing the operating temperature is not merely an exercise in thermal engineering but a crucial aspect of performance optimization and lifetime forecasting.

Dust accumulation is widely recognized as a significant factor in performance loss. The research by Bodnár et al. [2] empirically demonstrates that certain types of dust can lead to not only transmittance loss but also permanent surface damage that accelerates material fatigue, thereby reducing the panel's expected service life beyond simple cleaning cycles.

A typical PV module is a complex composite structure. The standard lamination process bonds multiple layers with distinct thermophysical properties. From top to bottom, these typically include a tempered glass superstrate for protection and light transmission; a first layer of ethylene-vinyl acetate (EVA) for encapsulation; the silicon PV cells, where photon-to-electron conversion and associated heat generation occur; a second layer of EVA; and finally a back sheet, often made of a polymer or aluminum, for electrical insulation and environmental protection.

This multi-layer architecture necessitates robust thermal modeling. The application of the finite-difference method for this purpose is well-established, as demonstrated by Notton et al. [3] for a double-glass architecture. Furthermore, Shahverdian et al. [4] systematically quantified the trade-off between model complexity and accuracy, concluding that a five-layer representation is essential for capturing the detailed thermal behavior. Notably, Nagy et al. [5] developed

a comprehensive 3D computational model in MATLAB to simulate coupled thermal and electrical behavior. Their work calculated the averaged silicon temperature to derive electrical parameters like short-circuit current and open-circuit voltage, validating their model against experimental data for both short-term and one-hour simulations.

In contrast to this comprehensive 3D approach, the present work introduces a highly specialized one-dimensional methodology. We developed a novel MATLAB simulator that implements the Leapfrog-Hopscotch algorithm to solve the transient heat equation exclusively for a five-layer PV panel. This focused 1D model provides a computationally efficient alternative specifically designed for rapid thermal analysis across individual panel layers, a specific application not yet explored with this advanced explicit solver.

The remainder of this paper is structured as follows: Section 2 details the mathematical model and the numerical discretization using the Leapfrog-Hopscotch method. Section 3 describes the geometry, material properties, and simulation setup. The results of the transient thermal simulation are presented and discussed in Section 4. Finally, Section 5 summarizes the key findings and conclusions.

2. METHODS

2.1 The equations and discretization

Heat transfer through a five-layer panel is modelled as one-dimensional transient conduction. The terms for radiation, convection, and the heat source included in the heat conduction equation are as follows:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \nabla^2 u + q - K \cdot u - \sigma \cdot u^4 \quad . \tag{1}$$

where $u = u(\vec{r},t)$ is the temperature, $\alpha = k/(c\rho)$ is the thermal diffusivity, where $c = c(\vec{r},t)$, specific heat $\rho = \rho(\vec{r},t)$ density , $k = k(\vec{r},t)$ the heat conductivity of the material, respectively. Here q is the heat generation or source of heat.

The convective transfer of heat between a moving fluid and a surface is referred to as $K(u_a - u)$ in accordance with Newton's law of cooling. This term represents the rate of heat transfer per unit area between the solar panel surface (temperature u) and the ambient air (temperature u_a). According to the Stefan-Boltzmann equation [6], where the proportionality constant σ is the product of the positive Stefan-Boltzmann constant and the surface area, the radiative heat loss from the surface may be expressed by the term $-\sigma u^4$.

We use the most popular central difference approach on the $\alpha \nabla^2 u$ term in the one-dimensional Eq. (1):

$$\frac{du_i}{dt} = \alpha \frac{u_{i\text{-}1} - 2u_i + u_{i+1}}{\Delta x^2} + q - Ku_i - \sigma u_i^{\,4} \, . \tag{2}$$

where $i = 1,\ldots,N$ if there are N nodes in total.

We are currently transitioning to a resistance-capacitance model akin to lumped parameter thermal networks, albeit with an increased number of nodes as is customary. For further information on this process, read [7]. Cells encircle the nodes, and the heat conductivity between node *i* and its right neighbour is $k_{i,i+1}$. The following is the discretized equation's result:

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{1}{c_i \rho_i \Delta x}\left(k_{i,i+1} \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta x} + k_{i\text{-}1,i} \frac{u_{i\text{-}1} - u_i}{\Delta x} \right) + q - K u_i - \sigma u_i^{\,4} . \tag{3}$$

The terms $q - K u_i - \sigma u_i^{\,4}$ are used only at the boundary points to represent heat losses. For all other points, these terms are set to zero. A cell's length and cross-sectional area are expressed as Δx and S, where S is the area of the cross section. The volume of the unit can be calculated as $V = S\Delta x$, heat capacity can be calculated from $C_i = c_i \rho_i V$. It is possible to estimate the heat transfer resistance between the two nodes using the formula $R_{i,i+1} \approx \Delta x / \left(k_{i,i+1} S \right)$. The following formula is obtained for the time derivative of each cell variable using the new quantities:

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{u_{i-1} - u_i}{R_{i-1,i} C_i} + \frac{u_{i+1} - u_i}{R_{i+1,i} C_i} + q - K u_i - \sigma u_i^{\,4} \tag{4}$$

2.2 The Leapfrog-Hopscotch formulation and structure

Leapfrog-Hopscotch (LH) method that requires the odd-even space structure is the recently developed approach [8]. Its structure also consists of two half-time steps and numerous full-time phases. The calculation starts by taking a half-sized time step for the odd nodes using the original values. After then, the even and odd nodes perform full-time steps in strict alternate order until the final timestep is achieved for odd nodes, this timestep should be cut in half to reach the same final time point as the even nodes, as shown in Figure 1.

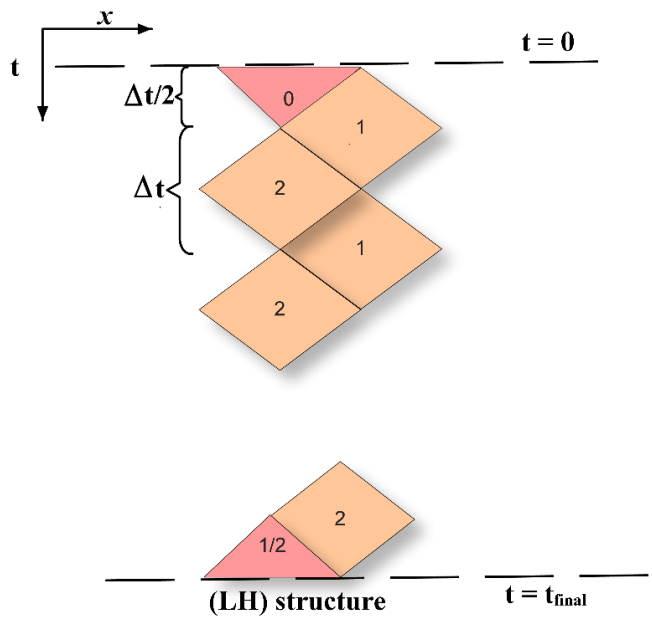


Figure 1.: *The leapfrog–hopscotch (LH) structure t = t^0.*

The leapfrog-hopscotch (LH) formulas are the following: The" zeroth" stage equation has the form

$$u_i^{1/2} = \frac{u_i^0 + r_i / 2(u_{i-1}^0 + u_{i+1}^0) - K\Delta t u_i^0 / 4}{1 + r_i + K\Delta t / 4 + \delta\Delta t (u_i^0)^3 / 2}.$$

Then a full-time step stages are calculated as

$$u_i^1 = \frac{u_i^0 + r_i (u_{i-1}^{1/2} + u_{i+1}^{1/2}) - K\Delta t u_i^0 / 2}{1 + r_i + K\Delta t / 2 + \delta\Delta t (u_i^0)^3},$$

and this equation is applied at the last stage as well, but with halfed time step size. Where $r_i = \Delta t / C_i R_{i,i-1} + \Delta t / C_i R_{i,i+1}$ is the generalization of the widely used mesh ratio.

This numerical scheme was successfully applied not only to the heat-conduction or diffusion equation, but also to the nonlinear Fisher- [9], Huxley [10-11] , coupled reaction diffusion [12], and Kardar-Parishi-Zhang equations [13] as well. Besides these, it was employed to simulate the behaviour of phase-change materials [14-15] and thermal bridges in building walls [16] in the field of building energetics.

2.3 Geometry and material properties of the PV

The schematic in Figure 2 depicts the one-dimensional heat transfer model used in the simulation. An incident solar irradiance of 800 W/m² is applied to the top surface of the panel. The composite structure, comprising glass, EVA, silicon, and aluminium layers, facilitates heat conduction through its thickness. The primary cooling mechanisms are convective heat loss to the ambient air and radiative heat loss to the surroundings, both occurring from the external glass surface.

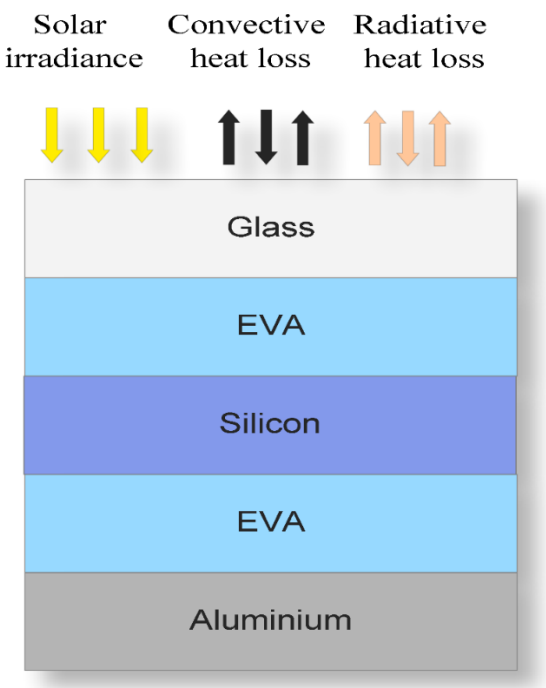


***Figure 2**.: One-dimensional heat transfer model of the photovoltaic panel*

In this investigation, the true material properties listed in Table 1 are taken into account. Although these coefficients have a discontinuity at the material's boundary, they are constants inside the material and do not vary with temperature, time, or space.

Table 1.: *Properties of the materials used in the simulation*

Material	Specific Heat (J/kg·K)	Density (kg/m³)	Thermal Conductivity (W/m·K)	Absorp-tion	Thickness (m)
Glass	840	2500	0.78	0.1	0.006
EVA	2090	950	0.35	0.15	0.002
Silicon	705	2330	148	0.75	0.0006
Alumi-num	237	2700	237	0.0	0.001

The thermal boundary conditions applied to the PV model are summarized in Table 2. These parameters define the convective cooling and radiative heat loss on the interior and exterior surfaces, as well as the incident solar energy treated as a heat source.

Table 2.: *Convection, radiation, and heat generation applied to the five-layer solar panel*

	$h_c \left[\frac{W}{m^2K}\right]$	$\sigma^* \left[\frac{W}{m^2K^4}\times 10^{-8}\right]$	ε
Left Elements (inside)	8	3.97	0.7
Right Elements (outside)	10	4.82	0.85

3. RESULTS FOR THE SIMULATION OF THE PV

The transient thermal response of the PV panel, simulated over a two-hour period with a computational time step of $\Delta t = 10$ seconds, is shown in Figure 3. The temperature profiles at the three critical locations the front glass, the silicon cell, and the aluminum back sheet exhibit a rapid initial heating phase followed by convergence toward a near steady-state condition.

The silicon cell consistently acts as the thermal hotspot, reaching a peak temperature of approximately 58.5 °C, which is higher than both the aluminum back sheet (~55.5 °C) and the front glass (~52.5 °C). The resulting maximum temperature differential of about 6 °C across the module's thickness demonstrates a substantial and persistent thermal gradient.

These quantitative results, obtained using a stable explicit numerical scheme, directly characterize the thermal state of the PV module. The elevated silicon-cell temperature is a key contributor to electrical efficiency losses, while the significant temperature gradient through the layered structure highlights the level of thermal stress that can affect long-termmechanical reliability.

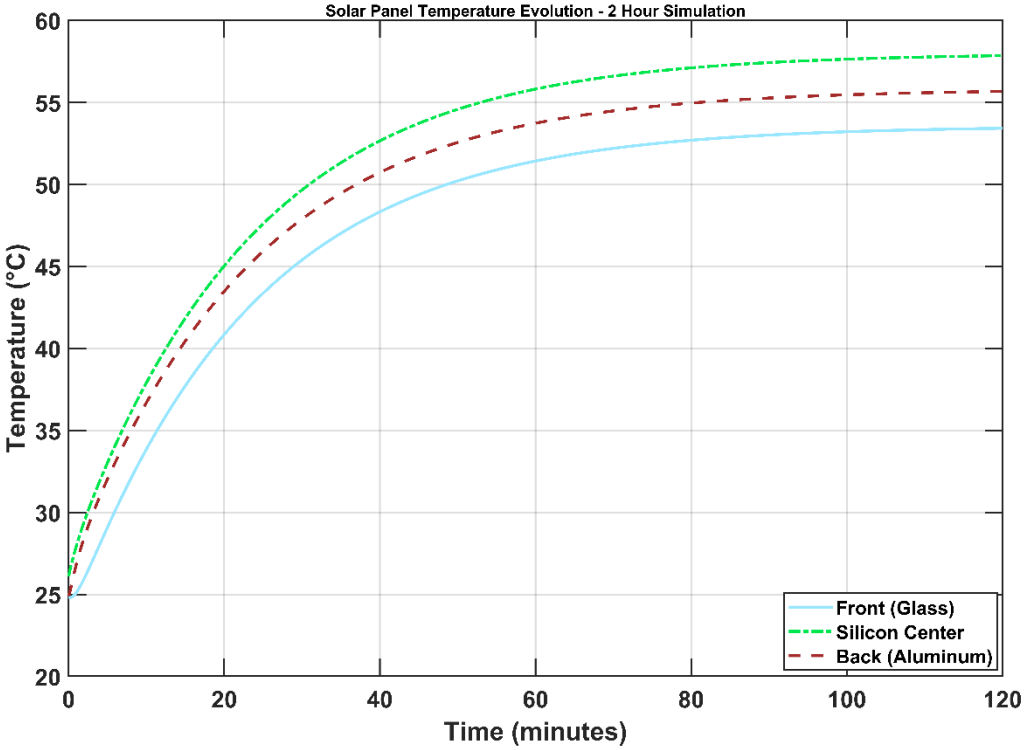


Figure 3.: *The temperature of the PV panel as a function of time in minutes*

4. CONCLUSION

This study developed a transient thermal model for a five-layer photovoltaic (PV) module and solved it using the Leapfrog–Hopscotch explicit scheme.The approach demonstrated strong numerical stability and computational efficiency for multilayer heat-conduction problems.

By integrating realistic material properties and boundary conditions, the model accurately captured the dynamic thermal behaviour of the PV structure. The analysis provides essential insight into how heat propagates through the layered assembly and establishes a framework for assessing thermal stresses and their impact on module reliability and performance.

Overall, the modelling strategy presented here offers a practical and adaptable tool for future optimisation of PV thermal management, enabling improved design, enhanced cooling strategies, and better prediction of operating conditions.

5. REFERENCES

[1] SolarPower Europe. (n.d.). Global Market Outlook for Solar Power 2025–2029.

[2] BODNÁR, I., MATUSZ-KALÁSZ, D., & BOROS, R. R. (2023). Exploration of Solar Panel Damage and Service Life Reduction Using Condition Assessment, Dust Accumulation, and Material Testing. *Sustainability*, *15*(12), 9615

[3] NOTTON, G., CRISTOFARI, C., MATTEI, M., & POGGI, P. (2005). Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences. *Applied Thermal Engineering, 25*(17–18), 2854–2877.

[4] SHAHVERDIAN, M. H., ET AL. (2023). Multi-layer modeling of bifacial photovoltaic panels: Evaluating the accuracy of one-, three-, and five-layer models. *Journal of*

Solar Energy Engineering, 145(2), 021001.

[5] NAGY, Á., BODNÁR, I., & KOVÁCS, E. (2024). Simulation of the thermal behavior of a photovoltaic solar panel using recent explicit numerical methods. *Advanced Theory and Simulations.*

[6] ASKAR, A. H., OMLE, I., KOVÁCS, E., & MAJÁR, J. (2022). Testing some different implementations of heat convection and radiation in the leapfrog-hopscotch algorithm. *Algorithms, 15*(11), 400.

[7] MUNKA, M., & PÁPAY, J. (2001). *4D Numerical Modeling of Petroleum Reservoir Recovery.* Budapest: Akadémiai Kiadó. ISBN 963 05 7843 3.

[8] NAGY, Á., OMLE, I., KAREEM, H., KOVÁCS, E., BARNA, I. F., & BOGNÁR, G. (2021). Stable, explicit, leapfrog-hopscotch algorithms for the diffusion equation. *Computation, 9*(8), 92.

[9] KHAYRULLAEV, H., OMLE, I., & KOVÁCS, E. (2024). Systematic investigation of the explicit, dynamically consistent methods for Fisher's equation. *Mathematics, 12*(3), 49.

[10] KHAYRULLAEV, H., OMLE, I., & KOVÁCS, E. (2025). Exploring the performance of some efficient explicit numerical methods with good stability properties for Huxley's equation. *Mathematics, 13*, 207.

[11] KHAYRULLAEV, H., & KOVÁCS, E. (2025). Unconditionally dynamically consistent numerical methods with operator-splitting for a reaction-diffusion equation of Huxley's type. *Mathematics, 13*(17), 2848.

[12] KHAYRULLAEV, H., ZAIN, A., & KOVÁCS, E. (2025). Solution of coupled systems of reaction–diffusion equations using explicit numerical methods with outstanding stability properties. *Computation, 13*(6), 129.

[13] SAYFIDINOV, O., BOGNÁR, G., & KOVÁCS, E. (2022). Solution of the 1D KPZ equation by explicit methods. *Symmetry, 14*(4), 699.

[14] JALGHAF, H. K., & KOVÁCS, E. (2025). Energy and cost savings in sustainable building walls: Transient heat transfer simulation with PCM and TIM optimization. *Energy Conversion and Management X, 22*, 101227.

[15] JALGHAF, H.K., KOVÁCS, E., 2024. Simulation of phase change materials in building walls using effective heat capacity model by recent numerical methods. *Journal of Energy Storage*, 110669.

[16] OMLE, I., ASKAR, A. H., & KOVÁCS, B. (2023). Comparison of the performance of new and traditional numerical methods for long-term simulations of heat transfer in walls with thermal bridges. *Energies, 16*(5), 2356.

DEVELOPMENT OF A WEB-BASED CARBON FOOTPRINT CALCULATOR FOR UNIVERSITY STUDENTS

AMMAR Ammar[1], KUMAR Baibhaw[2], SZAMOSI Zoltán[3]

[1]Msc student, ammar.ammar@student.uni-miskolc.hu
University of Miskolc, Institute of Energy Engineering and Chemical Machinery
[2]Assistant Professor, baibhaw.kumar@uni-miskolc.hu
University of Miskolc, Institute of Energy Engineering and Chemical Machinery
[3]Associate Professor, zoltan.szamosi@uni-miskolc.hu
University of Miskolc, Institute of Energy Engineering and Chemical Machinery

Abstract: *The increasing concern over climate change necessitates the development of innovative tools to enhance awareness and promote sustainable practices. This study presents a web-based carbon footprint calculator designed for university students to assess their environmental impact based on key lifestyle factors, including transportation, energy consumption, dietary habits, waste generation, water usage, and digital activities. The platform employs a structured step-by-step data collection process, ensuring accuracy and comprehensive evaluation. Using standardized emission factors, the system quantifies individual carbon footprints and provides personalized insights. The results highlight transportation as the dominant contributor, followed by energy consumption and dietary choices. Future enhancements will incorporate machine learning for predictive analysis, visualization tools, gamification features, and personalized recommendations to encourage long-term behavioural change. This digital innovation serves as an educational and sustainability tool, fostering awareness and promoting data-driven climate action among students.*

Keywords: *Carbon Footprint Assessment, Sustainability Education, Digital Innovation, Behavioural Change*

1. INTRODUCTION

The concept of a carbon footprint originated from the broader idea of an ecological footprint, which was first introduced in the 1990s by Mathis Wackernagel and William Rees. The carbon footprint specifically refers to the total amount of greenhouse gases (GHGs) emitted directly and indirectly by human activities, measured in carbon dioxide equivalents (CO_2e). These emissions result from energy consumption, transportation, food production, industrial processes, and digital activities. Initially, carbon footprint assessments focused on national and corporate levels, but over time, the focus has shifted toward individuals, households, and specific industries. The growing concern over climate change in the late 20th and early 21st centuries has driven scientists, policymakers, and environmental organizations to refine methodologies for calculating carbon footprints. The Kyoto Protocol (1997) and the Paris Agreement (2015) emphasized reducing carbon emissions globally. Many governments and organizations now track emissions using the Life Cycle Assessment (LCA) method to determine the environmental impact of products and services from production to disposal. Despite increasing awareness and international climate policies, global carbon emissions continue to rise. According to the Global Carbon Project (2023) [2], global CO_2 emissions reached 37.5 gigatons in 2022, driven primarily by fossil fuel combustion and industrial activities. The largest contributors to global carbon emissions are China, the United States, India, and the European Union. Although some countries have implemented strong carbon reduction policies, the overall global trend remains concerning due to economic growth, urbanization, and increasing energy demands. One major factor behind rising carbon footprints is the global reliance on coal, oil, and natural gas. The transition to renewable energy sources has accelerated in recent years, but fossil fuels still account for over 80% of the world's energy consumption. Furthermore, industries such as agriculture, manufacturing, and transportation contribute significantly to GHG emissions, making decarbonization efforts more complex.

Europe has been a leader in climate action, with ambitious targets set by the European Green

Deal, which aims for net-zero carbon emissions by 2050. According to the European Environment Agency (EEA) [3], the European Union's carbon emissions have declined by approximately 30% since 1990, thanks to increased renewable energy adoption, energy efficiency improvements, and carbon pricing mechanisms such as the EU emissions trading System (ETS). However, some challenges persist. The transportation sector remains one of the largest contributors to carbon emissions in Europe, particularly due to aviation and road transport. Germany, France, Italy, and Poland have some of the highest carbon footprints in Europe, primarily due to their industrial activities and energy production. A brief projection of the carbon footprint generated individually in Hungary over the last two decades is shown in Figure 1. Additionally, the growing demand for digital services, including cloud computing and streaming, has introduced new concerns regarding the energy-intensive nature of data centers. Several industries contribute significantly to carbon footprint growth. The energy sector remains the primary emitter, as fossil fuel-based power generation accounts for nearly 40% of global CO_2 emissions. Transportation, including aviation, shipping, and automobiles, plays a crucial role in emissions despite ongoing transitions to electric vehicles. Agriculture and food production contribute significantly, particularly livestock farming, which alone accounts for up to 18% of global greenhouse gas emissions [4]. Deforestation for agricultural expansion further exacerbates the issue by reducing the planet's ability to absorb CO_2 naturally [5]. Manufacturing and heavy industries, such as cement and steel production, also have substantial carbon footprints, given their reliance on high-energy processes [6]. More recently, the digital economy has emerged as a major concern, with growing demand for cloud computing, cryptocurrency mining, and streaming services driving energy consumption [7]. The IT industry alone is projected to contribute up to 8% of global emissions by 2030 [8].

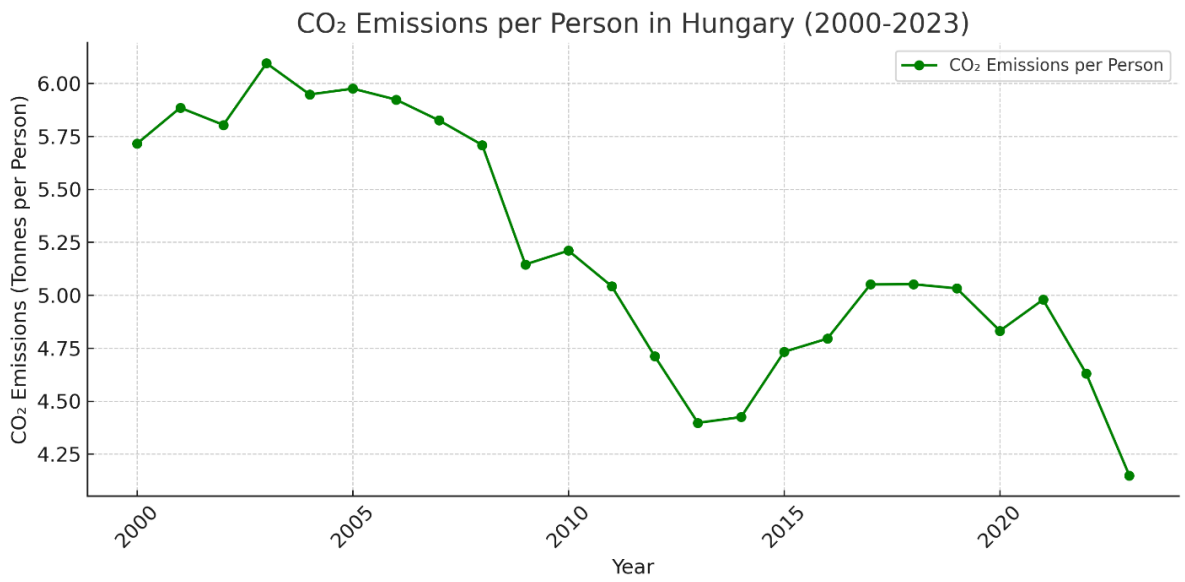


Figure 1.: *A visual representation of carbon footprint trends over the last two decades in Hungary [1]*

To address this challenge, we propose developing a web-based carbon footprint calculator tailored for university students. This tool will allow students to input their daily activities and assess their individual carbon footprint, providing personalized insights on how to reduce emissions. By making users aware of the impact of their lifestyle choices, the platform aims to encourage sustainable behaviour and informed decision-making. Additionally, the web application will serve as a research platform for tracking sustainability behaviours over time, offering

valuable data to policymakers and university administrations. Through this initiative, we seek to bridge the gap between awareness and action, empowering students to make conscious decisions that contribute to climate change mitigation and a more sustainable future.

2. METHODOLOGY

The development of the web-based carbon footprint calculator followed a structured process to ensure accurate data collection, analysis, and reporting. The website was designed to estimate the total carbon footprint of university students by analysing key lifestyle factors. The system operates through a step-by-step completion process, where users must sequentially input their data across six categories: transportation, energy consumption, dietary habits, waste generation, water usage, and digital footprint. This structured approach, as shown in Figure 2, ensures logical consistency in the calculations and prevents incomplete assessments.

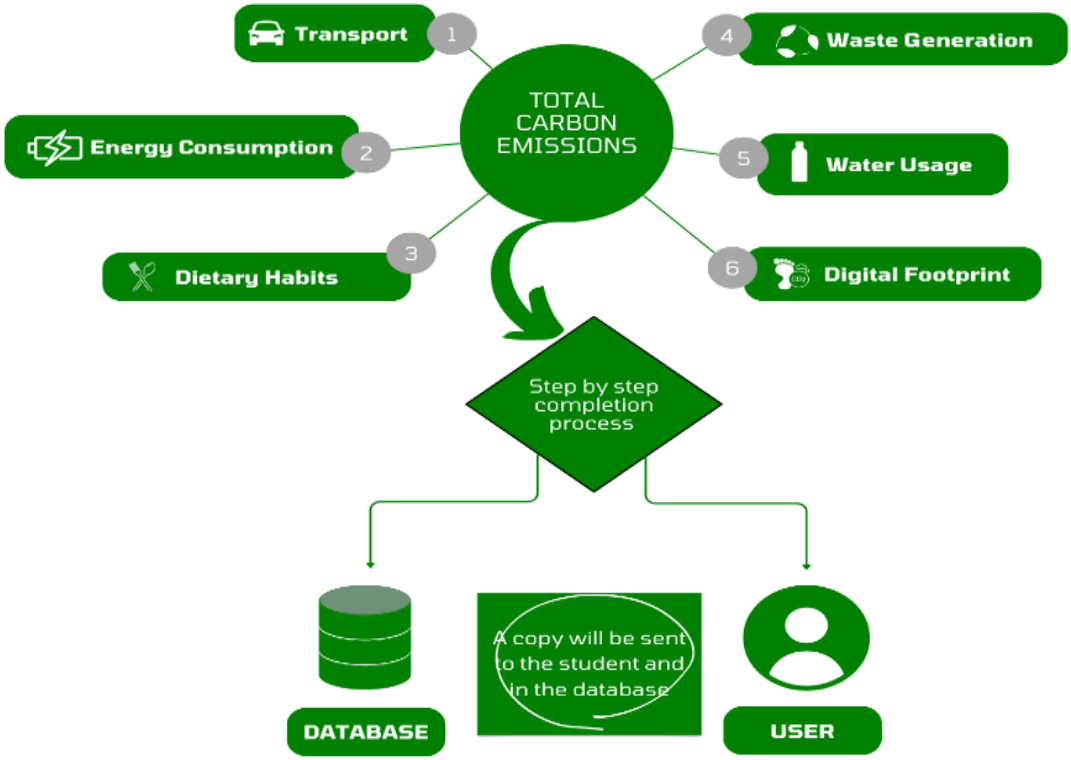


Figure 2.: *Illustration of the key contributors and flowchart to an individual's total carbon emissions*

The web application was designed with coding done on the VS Studio (https://code.visualstudio.com/) to collect data from students by requiring them to input their behavioural details into structured forms. The database securely stores all inputted information, ensuring the integrity and accessibility of records. Upon completion, a copy of the final carbon footprint estimation is sent to both the user and is stored within the database for future analysis and reference. This workflow ensures data reliability and allows students to monitor their environmental impact over time. The parameters considered and the equations used for calculations are mentioned in Table 1 and Table 2, respectively.

To calculate the carbon footprint, standardized emission factors were applied to each category based on globally accepted references such as the IPCC guidelines and regional emission

databases. The collected data is processed using a calculation model that converts user inputs into CO_2 equivalents, providing insights into major emission sources for each student. The website also incorporates recommendations based on the individual footprint, guiding students on ways to reduce their environmental impact through informed lifestyle choices.

The structured workflow of the web application ensures that users complete each section sequentially. This approach maintains data accuracy and prevents missing information. Once all required data is provided, the system calculates the total carbon footprint and generates a detailed summary. Users receive their carbon footprint report via email, allowing them to track their impact over time. Additionally, the system stores this data in a secure database, enabling long-term analysis and the potential for future sustainability initiatives within the university.

The methodology employed in the development of this platform ensures that students gain a comprehensive understanding of their carbon footprint and how their everyday choices contribute to environmental impact. By integrating behavioural data with scientifically validated emission factors, the tool serves as an educational platform that empowers students to take action toward sustainability. This initiative not only facilitates self-awareness but also contributes to broader environmental research and policy development at the university level.

Table 1.: *Presentation of the key parameters integrated into the system, detailing how each factor contributes to the overall carbon footprint estimation*

Category	Parameter	Unit
Transportation	Distance travelled per month	km
	Vehicle type (EV, gasoline, diesel)	NA
	Emission factor based on fuel type	kg CO_2e/km
Energy Consumption	Monthly electricity usage	kWh
	Heating type (electric, gas, etc.)	NA
	Emission factor for electricity and heating	kg CO_2e/kWh
Dietary Habits	Monthly meat consumption	kg
	Monthly vegetarian food consumption	kg
	Monthly vegan food consumption	kg
	Emission factor for each food type	kg CO_2e/kg
Waste Generation	Monthly landfill waste	kg
	Emission factor for waste	kg CO_2e/kg
Water Usage	Monthly cold water consumption	liters
	Monthly hot water consumption	liters
	Emission factor for water usage	kg CO_2e/litre
Digital Footprint	Hours of video streaming	hours
	Hours of web browsing	hours
	Hours of video calling	hours
	Emission factor for digital activities	kg CO_2e/hour

Table 2.: *Presentation of the formulas that quantify carbon emission from various activities, including transportation, energy consumption, dietary choices, waste generation, water usage, and digital activities, by multiplying relevant activity metrics with their respective emission factors to estimate total CO_2e emissions*

Category	Calculation Equation
Transportation Variables T_{milage}, $T_{consumption}$, $EF_{transport}$	Total Emissions (kg CO_2e) $= (T_{milage} \times T_{consumption} \times EF_{transport})$
Energy Consumption Variables E_{elec} , E_{heat} , EF_{elec} , EF_{heat}	$Total\ Emissions$ (kg CO_2e) $= (E_{heat} \times EF_{heat}) + (E_{elec} \times EF_{elec})$
Dietary Habits Variables M_{meat} , M_{veg} , M_{vegan}, EF_{meat} , EF_{veg} , EF_{vegan}	$Total\ Emissions$ (kg CO_2e) $= (M_{meat} \times EF_{meat}) + (M_{veg} \times EF_{veg}) + (M_{vegan} \times EF_{vegan})$
Waste Generation Variables $W_{landfill}$, $EF_{landfill}$	$Total\ Emissions$ (kg CO^2e) $= W_{landfill} \times EF_{landfill}$
Water Usage Variables W_{cold} , W_{hot} , EF_{cold} , EF_{hot}	$Total\ Emissions$ (kg CO^2e) $= (W_{cold} \times EF_{cold}) + (W_{hot} \times EF_{hot})$
Digital Footprint Variables $H_{streaming}$, $H_{browsing}$ $H_{videocall}$, $EF_{streaming}$, $EF_{browsing}$, $EF_{videocall}$	$Total\ Emissions$ (kg CO^2e) $= (H_{streaming} \times EF_{streaming}) + (H_{browsing} \times EF_{browsing}) + (H_{videocall} \times EF_{videocall})$

3. RESULTS

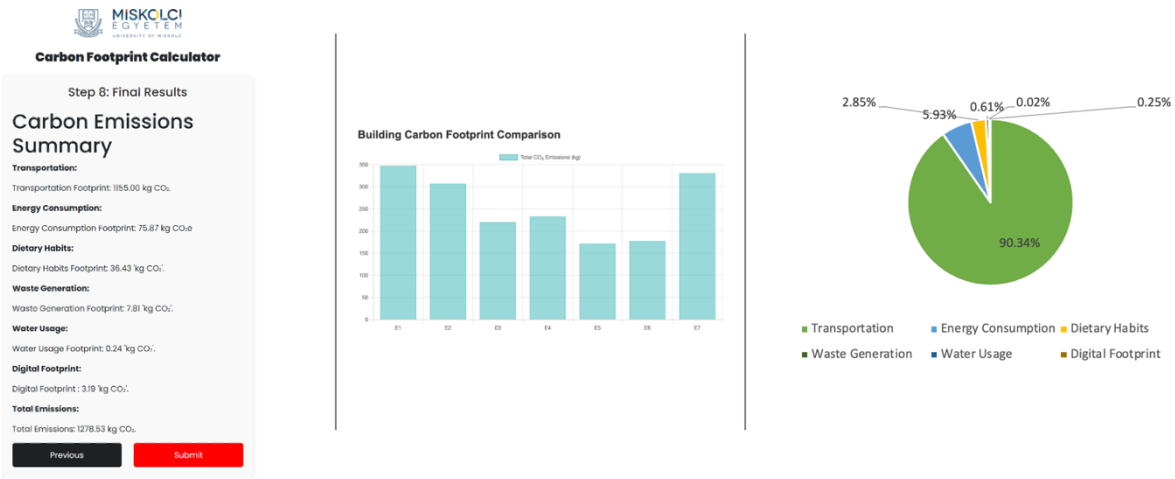
The developed web-based carbon footprint calculator can be found on the website link- https://ammaraslam.com/carbonCalculator/ , which allows university students to input their consumption patterns and receive an estimation of their individual carbon footprint. The system provides detailed feedback on emissions from different lifestyle categories, enabling users to assess and compare their environmental impact. The results obtained from the platform demonstrate the variability of carbon footprints among students and provide valuable insights into emission trends across different domains such as transportation, energy use, dietary habits, waste generation, water consumption, and digital activities. Figure 3 illustrates different aspects of the web application results.

Figure 3(a) presents a screenshot of the final data collection page, where students receive their Carbon Emissions Summary after inputting their consumption habits. The categories include transportation, energy consumption, dietary habits, waste generation, water usage, and digital footprint. Each category's contribution to the total footprint is displayed in kg CO_2e, providing a breakdown of emission sources. This step allows students to review their results before submission and receive personalized recommendations.

Figure 3(b) displays a bar chart comparing the carbon footprint of different dormitory buildings on the university campus. This comparison helps identify which buildings or student accommodations have higher emissions based on aggregated student data. Such insights can be useful for campus sustainability initiatives, encouraging energy-efficient housing and targeted awareness campaigns among students.

Figure 3(c) shows a pie chart representation of an individual student's carbon footprint distribution. The chart provides a visual breakdown of how different lifestyle activities contribute to the total emissions. In this particular case, transportation accounts for the majority (90.34%)

of the student's total emissions, followed by energy consumption (5.93%), dietary habits (2.85%), waste generation (0.61%), water usage (0.02%), and digital footprint (0.25%). The dominance of transportation emissions suggests that commuting choices significantly influence an individual's carbon footprint, emphasizing the need for sustainable mobility options such as public transport, cycling, or electric vehicles. These preliminary results showcase the effectiveness of the platform in raising awareness about individual and collective carbon footprints. By visualizing emissions data, students can make informed decisions to reduce their environmental impact.



(a) (b) (c)

Figure 3.: *(a) web-application screenshot (b) carbon footprint barchart, (c) individual's footprint distribution*

4. DISCUSSION AND FUTURE ENHANCEMENTS

The web-based carbon footprint calculator developed in this study provides an effective platform for students to estimate and analyse their environmental impact. However, to further improve its functionality and engagement, several enhancements are planned for future updates. These additions aim to improve user experience, ensure better data analysis, and encourage long-term behavioural changes toward sustainability.

One of the key planned updates is the integration of machine learning algorithms. By utilizing data collected from 400-500 students, the system will be able to predict the average carbon footprint for Hungary. This trained model will enable users to compare their individual footprints with national averages, providing a benchmark for self-evaluation. Additionally, the machine learning system can detect trends and patterns in student consumption behaviours, offering more targeted sustainability recommendations based on real-world data. To enhance user engagement and data accessibility, dynamic visualization and reporting tools will be introduced. These tools will allow students to track their personal emissions over time using interactive graphs, helping them understand how changes in their behaviour impact their footprint. These visual representations will not only be beneficial for individual users but can also support university-wide sustainability initiatives by highlighting larger trends in student emissions. Another significant improvement will be the introduction of gamification features. Implementing reward-based mechanisms such as points, badges, and leaderboards will incentivize students to

adopt more sustainable habits. By making the process interactive and engaging, gamification will encourage students to actively reduce their carbon footprint while competing with their peers in a friendly and educational manner.

Moreover, personalized recommendations will be incorporated into the platform. These suggestions will be generated based on individual user input, guiding students on how they can effectively reduce their carbon emissions. Recommendations may include switching to energy-efficient appliances, choosing sustainable transportation options, reducing food waste, or limiting unnecessary digital activity. By providing tailored advice, the system will not only educate students about sustainability but also help them implement meaningful changes in their daily lives. By implementing these future enhancements, the web application will go beyond simple carbon footprint calculations and transform into a comprehensive sustainability tool. It will not only allow students to understand their emissions but also motivate them to take action and develop sustainable habits that can extend beyond university life. Through these updates, the platform will contribute significantly to raising awareness and fostering a culture of environmental responsibility among young individuals.

5. CONCLUSION

The development of the web-based carbon footprint calculator has successfully achieved its objectives of providing university students with an intuitive and interactive platform to assess their environmental impact. The system effectively quantifies emissions from multiple lifestyle categories, helping students understand which aspects of their daily routines contribute the most to their carbon footprint. By offering insights into transportation, energy use, dietary habits, waste generation, water consumption, and digital activities, the platform serves as a valuable educational tool for sustainability awareness.

Key results that have been achieved through this study:

- The web-based calculator allows students to easily input their behavioural data and receive real-time feedback on their carbon emissions.
- A comparison feature enables users to benchmark their footprint against those of other students in different dormitory buildings, facilitating a broader understanding of collective emissions.
- The results visualization system provides users with intuitive charts and graphs that simplify the interpretation of carbon footprint data.
- The platform's structured methodology ensures accuracy and completeness in data collection and calculation, enhancing its reliability for personal and academic use.

As part of the broader movement toward digital innovation in sustainability, this web-based tool represents a crucial step in integrating technology with climate action. The ability to instantly calculate emissions, visualize trends, and receive tailored recommendations enables students to make informed decisions about their consumption habits. Unlike traditional carbon footprint assessments, which are often static and complex, this platform provides a user-friendly, data-driven approach to sustainability education. The impact of such a tool extends beyond individual behaviour changes. Universities can leverage the data collected to develop institutional policies that promote sustainability, such as reducing dormitory energy consumption, optimizing campus transportation options, and implementing waste reduction initiatives. Additionally, this tool can serve as a model for other institutions, encouraging the adoption of similar digital platforms for carbon footprint analysis in different educational settings. Moving forward, the continuous development and integration of machine learning, gamification, and dynamic reporting features will enhance the platform's effectiveness and engagement. By keeping students motivated and informed, the web application has the potential to foster long-term sustainability habits that extend beyond university life and into future careers and households.

Ultimately, digital tools like this carbon footprint calculator represent an innovative approach to tackling climate change by empowering individuals with the knowledge and resources they need to make sustainable choices.

6. REFERENCES

[1] Hannah Ritchie, Pablo Rosado, and Max Roser - "*CO_2 and Greenhouse Gas Emissions"* Published online at OurWorldinData.org. Retrieved from:'https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions' [Online Resource] (2023)

[2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 2 - Energy, Chapter 3: Mobile Combustion*. IGES. Available at: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf (Accessed: 2025-02-23). (2006)

[3] European Environment Agency (EEA) *EEA Greenhouse Gas Data*. Available at: https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/de803073-7dff-4c75-af40-166ba6c16e95 (Accessed: 2025-02-24). 2025

[4] Clune, S., Crossin, E. and Verghese, K. 'Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories', *Journal of Cleaner Production*, 140(2), pp. 766–783. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616303584 (Accessed: 2025-02-24). (2017)

[5] Ram Lal Verma and Guilberto Borongan 'Emissions of Greenhouse Gases from Municipal Solid Waste Management System in Ho Chi Minh City of Viet Nam', *Urban Sci.*, *6*(4), 78; Available at: https://doi.org/10.3390/urbansci6040078 2022

[6] European Commission. *Eurostat database: Greenhouse gas emissions by sector*. Available at: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/explore/all/all_themes (Accessed: 2025-02-26). (2025).

[7] International Energy Agency (IEA) *The carbon footprint of streaming video: Fact-checking the headlines.* Available at: https://www.iea.org/commentaries/the-carbon-footprint-of-streaming-video-fact-checking-the-headlines (Accessed: 2025-01). (2020)

[8] Massachusetts Institute of Technology (MIT) *How to reduce the environmental impact of your next virtual meeting.* Available at: https://news.mit.edu/2021/how-to-reduce-environmental-impact-next-virtual-meeting-0304 (Accessed: 2025-01). (2021)