

MTK 20.

**TUDOMÁNYOS BIZOTTSÁG/LEKTOROK
SCIENTIFIC ADVISORY BOARD/PEER REVIEWERS**

Bagyinszki Gyula (Budapest)
Baranyai Bálint (Pécs)
Bitay Enikő (Kolozsvár/Marosvásárhely)
Csavdári Alexandra (Kolozsvár)
Czigány Tibor (Budapest)
Dávid László (Marosvásárhely)
Diószegi Attila (Jönköping, Svédország)
Dobránszky János (Budapest)
Domokos József (Marosvásárhely)
Dulf Éva Henriett (Kolozsvár)
Dusza János (Kassa)
Egyed-Faluvégi Erzsébet (Marosvásárhely)
Erdei Timotei István (Debrecen)
Forgó Zoltán (Marosvásárhely)
Háber István Ervin (Pécs)
Horváth Richárd (Budapest)
Gobesz Ferdinánd-Zsongor (Kolozsvár)
Kakucs András (Marosvásárhely)
Kántor József (Marosvásárhely)
Kopenetz Gy. Lajos (Kolozsvár)
Kovács Tünde Anna (Budapest)
Máté Márton (Marosvásárhely)
Pásztor Judit (Marosvásárhely)
Pokorádi László (Budapest)
Réger Mihály (Budapest)
Roósz András (Miskolc)
Szántó Attila (Debrecen)
Talpas János (Kolozsvár)
Tóth László (Budapest)
Tóth-Nagy Csaba (Szeged)
Virág Zoltán István (Miskolc)

ISSN 2393 – 1280

MŰSZAKI TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

20.

Szerkesztette / Edited by
BITAY ENIKŐ – MÁTÉ MÁRTON



ERDÉLYI MÚZEUM-EGYESÜLET
Kolozsvár
2024

A kötet megjelenését támogatta a Magyar Tudományos Akadémia,
a Bethlen Gábor Alapkezelő Zrt., és az EME Műszaki Tudományok Szakosztálya.

The publication of this volume was supported by the Hungarian Academy of Sciences,
by the Bethlen Gábor Fund, and by the TMS – Department of Engineering Sciences,



Copyright © a szerzők/the authors, EME/TMS 2024

*Minden jog a kiadvány kivonatos utánnomására, kivonatos vagy teljes másolására
(fotokópia, mikrokópia) és fordítására fenntartva.*

*All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in
any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the
prior written permission of the publisher.*

Kiadó/Publisher: Erdélyi Múzeum-Egyesület

Felelős kiadó/Responsible Publisher: Biró Annamária

Szerkesztette/Edited by: Bitay Enikő, Máté Márton

Olvasószerkesztő/Proofreader: András Zselyke (magyar), David Speight (English)

Műszaki szerkesztő/DTP: Szilágyi Júlia

Borítóterv/Cover: Könczey Elemér

Nyomdai munkálatok/Printing-work

F&F International Kft. Kiadó és Nyomda, Gyergyószentmiklós

Ügyvezető igazgató/Manager: Ambrus Enikő

Tel./Fax: +40-266-364171

Online elérhető/Online available at:

Magyar/Hungarian

Angol/English

<https://eme.ro/publication-hu/mtk/mtk-main.htm>

<https://eme.ro/publication/mtk/mtk-main.htm>

DOI: 10.33895/mtk-2024.20

DOI: 10.33894/mtk-2024.20

TARTALOM

| | |
|---|----|
| Bársony István | |
| <i>Fejlődésünk záloga: a félvezető-technológia</i> | 1 |
| Dósa János, Kovács József, András József | |
| <i>A tüzelőanyag összetételének hatása a gőzkazán működési jellemzőire</i> | 7 |
| Egyed-Faluvégi Erzsébet, Gál Károly, Farnos Rudolf-László, Kántor József, Gergely Attila | |
| <i>Additív gyártással előállított polimer fogaskerekek méret-, alak- és helyzetpontoságának vizsgálata koordinátamérő gépeken</i> | 14 |
| Gobesz Ferdinánd-Zsongor, Máthé Aliz Éva | |
| <i>Betonfelület optikai vizsgálata</i> | 19 |
| Hodgyai Norbert, Mircea Viorel-Drăgoi, Máté Márton | |
| <i>Hőjező csigamaró modellezése egyenes fogú lécből</i> | 24 |
| Keresztes Kristóf, Gergely Attila Levente | |
| <i>Hőre lágyuló polimerek fröccsöntési üreghyomásának mérésére alkalmas berendezés tervezése</i> | 30 |
| Masuk Abdullah, Diós Szabolcs Sándor, Dinya Tamás, Szántó Attila, Husi Géza | |
| <i>Laborfejlesztések és oktatást segítő módszerek a Kiberfizikai és Intelligens Robotrendszerek Laboratóriumában</i> | 36 |
| Máder Patrik, Rák Olivér, Bakai Nándor | |
| <i>Ultra-sávszélességű (UWB) vezeték nélküli technológiával végzett épületfelmérés és algoritmussal támogatott épületmodellezés</i> | 42 |
| Máté Márton, Gál Károly-István | |
| <i>Koszinus-fogaskerékpár profileltolásának hatásai</i> | 48 |
| Palánkai Emese, Sarvajcz Kornél | |
| <i>Virtuális gyártás alkalmazása ipari gyártóegységek korszerűsítésére</i> | 54 |
| Pásztor Judit, Szócs Krisztina, Csegedi Ferenc-József, Márton Botond | |
| <i>Bolyai Farkas által tervezett öntöttvas kemence tanulmányozása</i> | 59 |

Popa-Müller Izolda, Gál Zsolt

Mérőeszköz fejlesztése és validációja kenőanyagok konzisztenciájának vizsgálatára 65

Rák Olivér, Bakai Nándor, Motasem Altamimi

Épületek külső sztereo-fotogrammetriai felmérésének pontosítására irányuló módszertani fejlesztés 69

Szabó Lóránt, Weltsch Zoltán

AI-alapú röntgenképelemzési eljárás valós idejű out-of-distribution-detektálás segítségével 74

Tolvaly-Roşca Ferenc, Fekete Albert-Zsombor, Forgó Zoltán

Decentralizált hővisszanyerő szellőztetőrendszer valós hatásfokának vizsgálata 78

Trabelsi Omar, Kovács Tünde Anna

A lítium-ion akkumulátorok tűzoltása 83

SZERZŐK JEGYZÉKE 88

CONTENT

| | |
|---|----|
| István BÁRSONY <i>Key to Progress: the Semiconductor Technology</i> | 1 |
| János DÓSA, József KOVÁCS, József ANDRÁS <i>The Influence of Fuel Composition on the Operating Characteristics of the Steam Boiler</i> ... | 7 |
| Erzsébet EGYED-FALUVÉGI, Károly GÁL, Rudolf-László FARMOS, József KÁNTOR, Attila GERGELY <i>The Investigation of Dimensional, Form and Orientation Accuracy of Polymer Gears Prepared by Additive Manufacturing</i> | 14 |
| Ferdinánd-Zsongor GOBESZ, Aliz Éva MÁTHÉ <i>Optical Inspection of Concrete Surface</i> | 19 |
| Norbert HODGYAI, Mircea VIOREL-DRĂGOI, Márton MÁTÉ <i>Gear Hob Base Worm Modelling from a Straight Toothed Generating Rack</i> | 24 |
| Kristóf KERESZTES, Attila Levente GERGELY <i>Design of a Cavity Pressure Monitoring System for Plastic Injection Molding</i> | 30 |
| Abdullah MASUK, Szabolcs Sándor DIÓS, Tamás DINYA, Attila SZÁNTÓ, Géza HUSI <i>Labor Developments and Methods for Supporting Education in the Cyber-Physical and Intelligent Robot Systems Laboratory</i> | 36 |
| Patrik MÁDER, Olivér RÁK, Nándor BAKAI <i>Building Geometry Survey by Using Ultra-Wideband (UWB) Wireless Technology and Algorithm-Based BIM Modelling</i> | 42 |
| Márton MÁTÉ, Károly-István GÁL <i>Effects of Profile Shifting of a Cosine Gear</i> | 48 |
| Emese PALÁNKAI, Kornél SARVAJ CZ <i>Application of Virtual Production to Upgrade Industrial Production Units</i> | 54 |
| Judit PÁSZTOR, Krisztina SZŐCS, Ferenc-József CSEGEDI, Botond MÁRTON <i>Study of a Cast Iron Stove Designed by Farkas Bolyai</i> | 59 |

Izolda POPA-MÜLLER, Zsolt GÁL

Development and Validation of a Measuring Equipment for Testing the Consistency of Lubricating Grease..... 65

Olivér RÁK, Nándor BAKAI, Altamimi MOTASEM

Methodological Development to Improve the Accuracy of External Stereo-Photogrammetric Surveys of Buildings 69

Lóránt SZABÓ, Zoltán WELTSCH

Development of Robust AI Based X-Ray Analysis WorkFlow Based on Real-Time out of Distribution Detection 74

Ferenc TOLVALY-ROŞCA, Albert-Zsombor FEKETE, Zoltán FORGÓ

Investigation of the Real Efficiency of a Decentralized Heat Recovery Ventilation System 78

Omar TRABELSI, Tünde Anna KOVÁCS

Fire Extinguishing of Lithium-Ion Batteries 83

LIST OF AUTHORS 88



FEJLŐDÉSÜNK ZÁLOGA: A FÉLVEZETŐ-TECHNOLÓGIA

KEY TO PROGRESS: THE SEMICONDUCTOR TECHNOLOGY

Bársony István

HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet,
Budapest, Magyarország. barsony.istvan@hun-ren.ek.hu

Abstract

Future progress in our life is unthinkable without semiconductor technology. Below is a brief survey of the development facilitated by the integration of silicon devices since the discovery of the transistor 75 years ago, hinting also at the limitless future opportunities. In all sectors of everyday life integrated circuits are fundamental components in our instruments, their role in the industrial food-chain and their accessibility is of global-political importance, as witnessed today.

Keywords: *semiconductors, IC, complexity, functionality.*

Összefoglalás

Életünk további fejlődése elképzelhetetlen a félvezető-technológia nélkül. A 75 éves tranzisztor apropóján futólag áttekintjük azt az utat, amelyet a szilíciumtranzisztorok integrálásával a mai napig megtettünk, kitekintést adva a jövőben várható korlátlan lehetőségekre is. Az integrált áramkörök életünk valamennyi területén eszközeink alapvető alkatrészei, az ipari táplálékláncbéli szerepük, hozzáférhetőségük globálpolitikai jelentőségű, ahogy napjaink fejleményei bizonyítják.

Kulcsszavak: *félvezetők, IC, komplexitás, funkcionalitás.*

1. Bevezetés

Az eszköz, amely mindent megváltoztatott, a 75 évvel ezelőtt a Bell Laboratóriumban szabadalmaztatott, pontkontaktusos, bipoláris működésű Ge-tranzisztor volt, John Bardeen, Walter Brattain és William Shockley Nobel-díjas találmánya. A következő forradalmi áttörést a technológiában Jack Kilby, majd Robert Noyce felismerése jelentette 1958-ban. Kimutatták, hogy az egyedi, aktív félvezető-erősítő, ill. -kapcsolóelemeket passzív áramköri elemekkel egyetlen szubsztráton huzalozva komplett integrált áramkört is meg lehet valósítani. Noyce igazi monolitikus, azaz egy szilíciumlapkán Al-huzalozással kialakított, integrált eszközt készített. A fizikai Nobel-díjat végül Kilby kapta ezért 2000-ben, mert az Intel-alapító Noyce ezt már nem érhetette meg. 1960 táján tehát elindult a szilíciumalapú, digitális, integrált áramköri technológia máig tartó diadalútja [1].

2. Miért éppen szilícium?

Az elemi félvezető Si tilos sávja ($E_g = 1,12$ eV) és a termikus zajt meghatározó sajátvezetése éppen a földi, emberi tevékenység hőmérséklet-tartományában (-40 – 140 °C) teszi alkalmassá a (termosztálás nélküli) megbízható (digitális) működés megvalósítására.

A szilícium oxigéntartalmú közegben nagy hőmérsékletre hevítve természetes oxidot képez, amely kiváló szigetelő és „maszkoló-réteg” a Si-szubsztrát adalékolása során. Ez az integrált-áramkör-gyártásban mindmáig uralkodó, kétdimenziós építkezés, az ún. planáris technológia alapja.

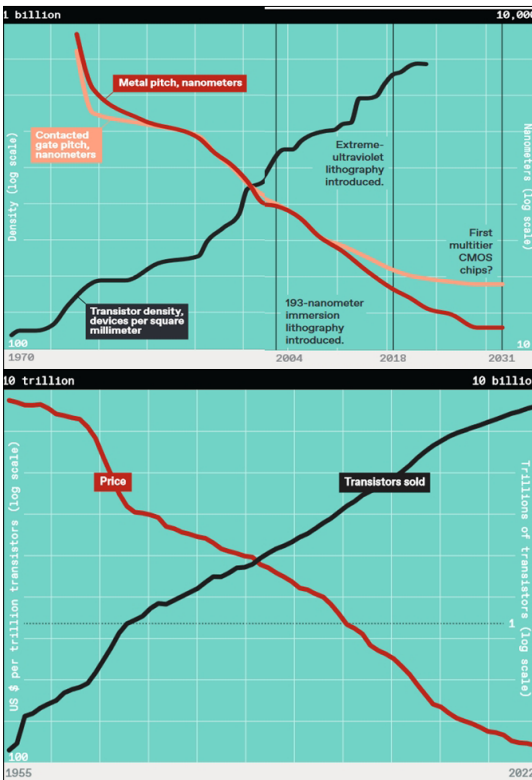
Indirekt tilossávszerkezete folytán hatékony fénykibocsátásra ugyan nem alkalmas, kristályhiba-mentessége és töltéshordozó-mozgékonyága folytán csökkentett méretekkkel a fizikai-technológiai korlátok eléréséig viszont predesztinált a nagyfrekvenciás működésre.

Bioinert anyag, azaz toxicitási szempontból alkalmas beültetésre az élő szervezetbe biokompatibilis módon [2].

3. Moore jóslata digitális IC-k-re

1965-ben Gordon E. Moore, az Intel egyik vezetője felállított egy tapasztalati „törvényt” [3].

A „Moore-jóslat” szerinti exponenciális kapacitásnövekedés (az egy csipen integrált tranzisztorok száma) (1. ábra) a csipgyártásban csupán középtávú megfigyelés volt a technológia hajnalán, gazdasági előrejelzés, ami viszont eddig hatvan éven át önbeteljesítő jóslattá, azaz önként követett úttervvé vált! Különleges érdeme volt az Intel szerint, hogy segítette a koordinációt: a szoftverházak fejleszthettek már előre a majd két év múlva megjelenő csipekre, ami megeremtette az

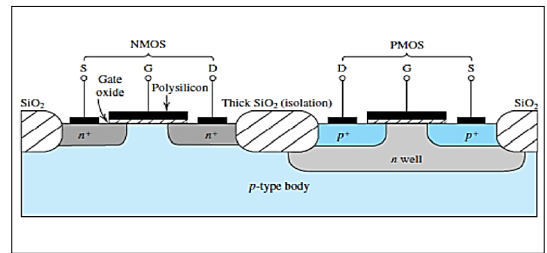


1. ábra. A Moore-törvény exponenciális növekedést ír elő tranzisztorok sűrűségére (fent, fekete görbe a bal ordinátán), ami csakis a karakterisztikus méretek csökkentésével érhető el (piros görbe a bal ordinátán). Az alsó ábra szerint ez a csipenként eladott tranzisztorok számának exponenciális növelésével (fekete görbe a jobb ordinátán) és fajlagos árának exponenciális csökkenésével (piros görbe a bal ordinátán) jár

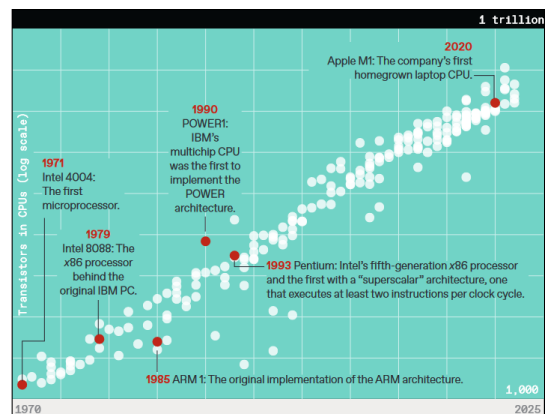
új eszköz piacát. A planár technológiában hamar uralkodóvá vált a komplementer fém-oxid-szilícium (C-MOS) áramkör-architektúra (2. ábra).

Az integráció fejlődése azonban nem volt mindig zökkenőmentes (3. ábra). 1980-ra a csipenkénti teljesítményfelvétel kezelhetetlen szintet ért el, így a tápfeszültséget fokozatosan 5 V-ról 1 V-ra csökkentették, amivel az ipar 30 éven át töretlenül fejlődhetett. 2010 táján újra a teljesítmény-disszipáció vált problémává. Szimulációs előrejelzések szerint a négyzetcentiméternyi csipfelületen kialakuló hőviszonyok „hamarosan elérnék a nukleáris erőmű magjában uralkodó hőmérsékletet!”

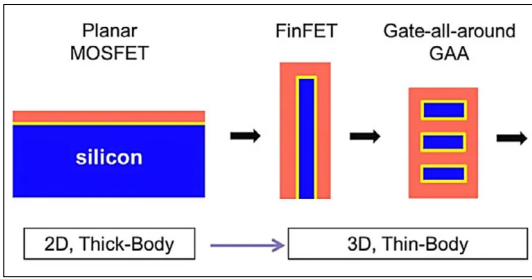
Megoldás a háromdimenziós, vékony szubsztráton kialakított, ún. FinFET (cápauszony-térvezérlés) (4. ábra), valamint a többmagos pro-



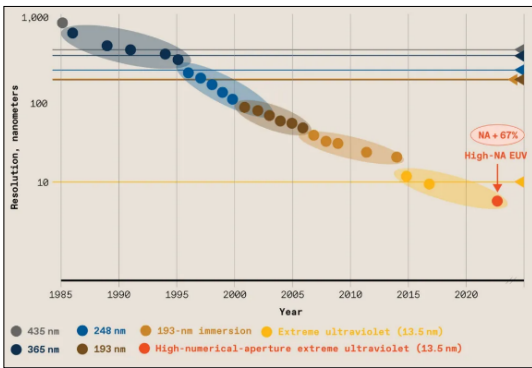
2. ábra. A planár szilíciumtechnológiában máig uralkodó komplementer MOS inverter alapkapcsolás keresztmetszeti képe



3. ábra. Az Intel mikroprocesszorainak megjelenése nagy lendületet adott az áramköri komplexitásnövekedésnek. 1985-re érték el az 1 millió tranzisztor/cm² elemsűrűséget. Az alkalmazás-specifikus igények hajtották a CPU-architektúra-fejlesztést, így ma a processzorcsipek elemsűrűsége már meghaladja a 100 millió tranzisztor/mm²-t [3]



4. ábra. Áttérés a kétdimenziós planáris tranzisztor kialakításról a 3D-s FinFET és a körkörös vezérlőelektrodás, vékony szubsztátos szilíciumtechnológiára



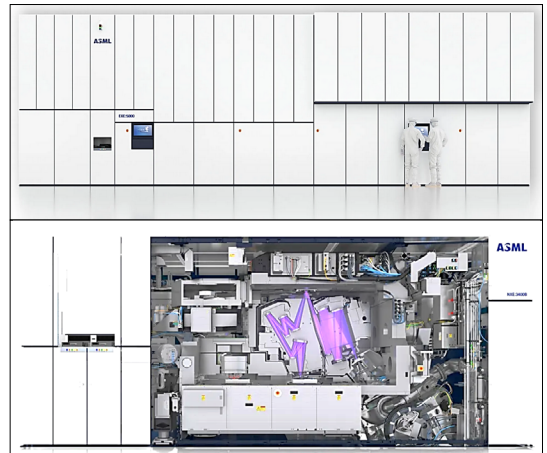
5. ábra. Az UV-fotolitográfiai léptető-megvilágítók hullámhosszának csökkenése 35 év alatt

cesszorarchitektúra alkalmazása jelentett, ami biztosítja a további méretcsökkentésen (1. ábra) alapuló komplexitásnövelést. A vékony szubsztátot adott esetben egy 2D-s félvezető vagy grafén is lehet a jövőben [4].

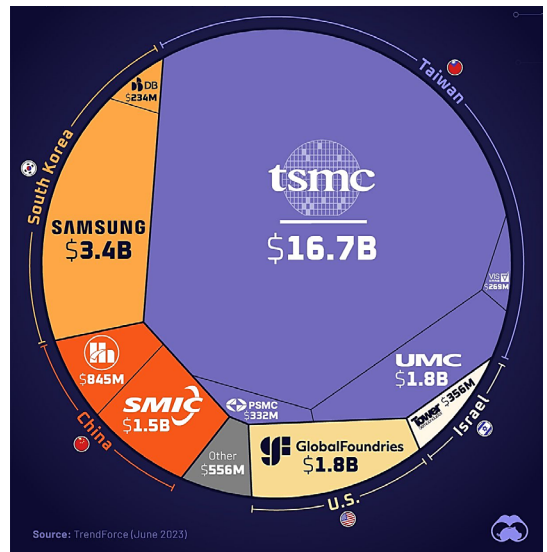
4. Átrendeződés az ellátási láncban

A termelékenységi, azaz a szellemi munka átadásának folyamatos növelése alapvető gazdasági szempont. Tulajdonképpen ez hajtja a szellemi munka növelését és a kritikus méretek csökkentését. A fotolitográfia máig uralkodó ábrakialakítási eljárás maradt az iparban. Viszont az egyre kisebb méretek optikai leképezését csak az UV-megvilágítás hullámhosszának 435 nm-ről 13,5 nm-re csökkentésével és a numerikus apertúra növelésével lehetett, ill. lehet majd elérni (5. ábra). [5]

Az ezt megvalósító, szobányi vákuumberendezés értéke >200 millió USD, ez ma a finommechanika-optika, robotika és vezérléstechnika abszolút csúcsteljesítménye, ami csak az űrtechnológiához fogható (6. ábra). [6]



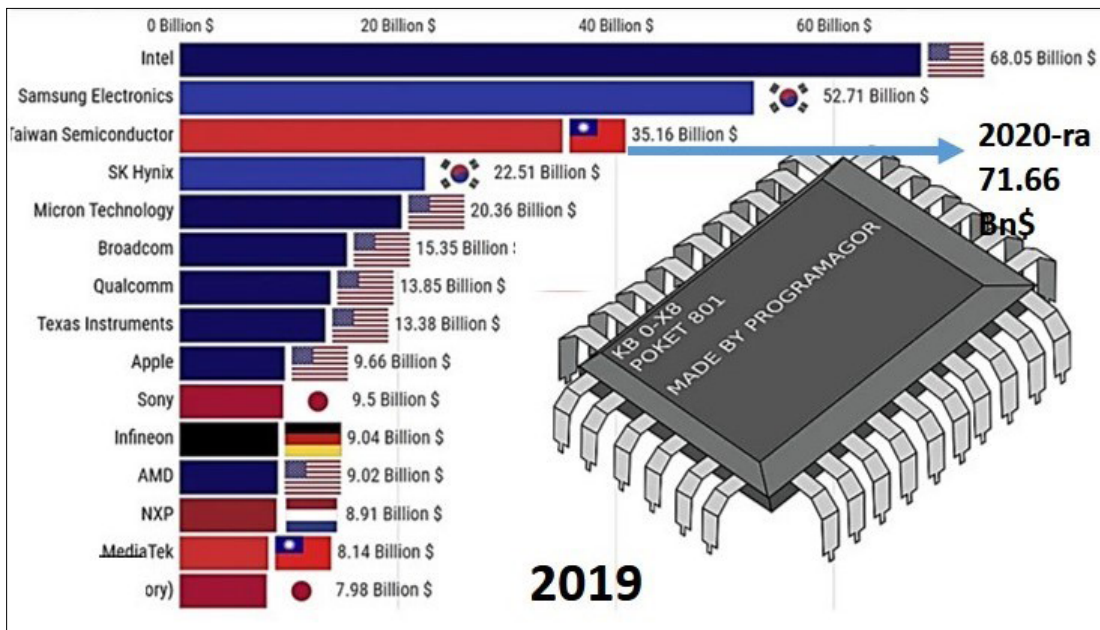
6. ábra. Az ASML EXE:5000 nagy numerikus apertúrájú, extrém UV-litográfiai, tekintélyes méretű berendezése (forrás: ASML) az UV-sugármenetek szemléltetésével [6]



7. ábra. A 10 legkorszerűbb IC-gyártó Foundry, az ASML megrendelőinek megoszlása, jól szemléltetve Ázsia dominanciáját [7]

Mára a korszerű litográfiában az egyedüli berendezésszállító a holland multinacionális cég, az ASML lithography. A fejlesztés tehát európai, jól lehet a tőkeerős megrendelők jobbára Ázsiában működő cégek (7. ábra).

A legnagyobb intellektuális hozzáadott értéket képviselő áramkörtervezés a nagy, USA-beli IC-gyártóknál és részben Európában működik, amelyek a sorozatgyártást, a Foundryk gyártókapacitását kihasználva, Ázsiában végeztetik



8. ábra. A világ élenjáró áramkörgyártó vállalatai éves forgalmuk szerint 2019-ben. 2020-ra már a tajvani TSMC vezette a listát a Samsung előtt [7]

(8. ábra). Különösen konfliktusos gazdasági helyzetben kockázatos a töredezett ellátási lánc.

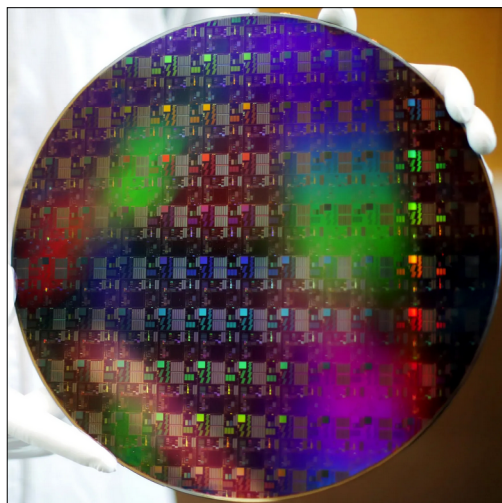
1986-ban 5 japán és 3 amerikai gyártó mellett még 3 európai cég (Philips, Siemens, SGS-Thomson) is képviseltette magát az első tízben.

5. Mi várható 25 éven belül?

A digitális áramkörök alapelemének, a tranzistoroknak a működési elve várhatóan egészen <1 nm méretéig a tervezéssel kapcsolatos töltés-átvitel marad. Előtérbe kerülnek viszont a speciális, adott alkalmazásra optimalizált integrált konstrukciók.

A merőlegesen pozicionált csatornák révén (3. ábra) szilícium-alapanyagon is még tovább növelhető az elemsűrűség – esetleg új anyagokkal, valószínűleg egymásra rétegzett 3D-s szerkezetekkel. [4]

A ma még zömmel 30 cm átmérőjű Si-szeleteket (9. ábra) a gyártásban felváltja a 45 cm-es szelétátmérő, ami a teljes gyártósor átszerszámozását igényli, különös tekintettel a litográfiára. Az 5. ábra szerinti kritikumérlet-csökkenés csupán a numerikus apertúra növelésével lesz elérhető. Ekkora felületen a megfelelő felbontás melletti levilágítás megkívánja a nyalábszög manipulálását. Egy ilyen FAB-beruházás mai árak mellett



9. ábra. A GlobalFoundries Dresden egy 300 mm átmérőjű, processzált Si-szelete

több száz milliárd USD, és csak a legtokeerősebb gyártók engedhetik meg maguknak (8. ábra).

Az extrém vékony szigetelő- és félvezetőrétegeken fellépő óriási térerőségek miatt ($1 \text{ V} / 1 \text{ nm} = 1 \text{ GV/m}$) az áramkörökben preferált a kisebb feszültség szinteken történő működés. Domináns probléma marad az IC-k teljesítményfelvételének kordában tartása!

Egy-egy új működési elv bevezetése a tapasztalatok alapján 20–25 év is lehet. Mai elképzeléseink szerint a kvantumtechnológia fejlődése nem lesz elég gyors ahhoz, hogy egy negyedszázadon belül veszélyeztesse a tranzisztorokra épülő IC-technológia egyeduralmát a hétköznapi számítástechnikában. Mire alapozható ez a kijelentés?

6. A kvantumszámítógép-technika

A kvantumállapotokkal (qubit) operáló számítástechnika alapproblémája a termikus zaj kiiktatása, ami még abszolút 0 K közelében is <20 μ s alatt lerombolja a két logikai állapot közötti különbséget.

Az IBM új krio-CMOS-vezérlőcsipje (10. ábra) 14nm-es fin-FET technológiával durván 4K (-269,15 °C) hőmérsékleten működik. A korábbi 100 W/qubit teljesítményigényt sikerült 10 mW/qubit-re csökkenteniük. Ezzel lehetett a csipenkénti qubitek számát növelni. [8]

A kvantumtechnológia elsősorban a felhőszolgáltatások révén fogja a mesterséges intelligencia (AI) számítástechnikai hátterét biztosítani (11. ábra). Becslések szerint teljes elterjedése esetén a mindenki számára hozzáférhető AI-szolgáltatás folyamatos működtetése mintegy 100 TWh energiát igényelne, ami megfelel egy fejlett gazdaság, pl. Hollandia vagy Svédország éves energiaszükségletének. Ezek az adatok józanságra intenek, és egyben kijelölik a jövőbeni fejlesztés irányát, ami elsősorban az energiafelhasználás csökkentése.

A kvantumkomputer-technológiai fejlődése feltehetően nem lesz elég gyors ahhoz, hogy még 25 évig veszélyeztesse a szilícium-IC-technológia hegemoniáját a számítástechnikában és az automatizálásban.

7. Következtetések

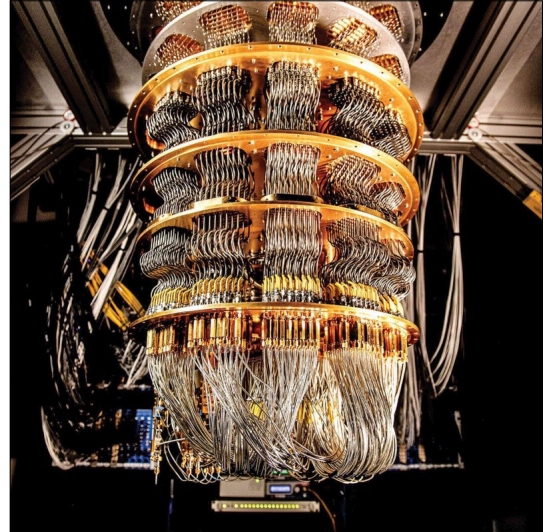
A tranzisztorok a hétköznapi életünket minden területen befolyásolják az ipari folyamatok vezérlésétől a közlekedésen, szállításon, mezőgazdaságon, egészségügyi szolgáltatásokon, hírközlésen át az oktatás és kultúra támogatásáig.

Már most kijelenthető, hogy a következő negyedszázadban is az érzékelőkkel kombinált integrált áramkörök fogják az emberiség jövőbeni problémáit megoldani, beleértve a klímadaptációt is!

Az elmúlt évek globálpolitikai eseményei, a Covid-krisis és a háborús fejlemények, rámutattak azonban ennek a tökéletesen kiépült, globális ellátási láncnak a sérülékenységre. A nagy gyártócégek profitmaximalizálási törekvései miatt az elmúlt évtizedekben az élő munkaerőt foglal-



10. ábra. Az IBM 2016 óta 5 qubit szintről fejlesztett kvantumcsip családjá



11. ábra. A Google kvantumcsip hűtésére fejlesztett kriogenerátor. Qubitek lehetnek ionok, fotonok és atomok egyaránt. A Google qubit szupravezető fémlemezekből épül fel, melyek alacsony energiaállapota a logikai 0, a magasabb az 1 állapot. Mikrohullámmal bármelyik állapotba, ill. egyszerre mindkettőbe vezérelhetők. A nagyobb algoritmusok futtatásának biztonsága szempontjából kritikus a termikus zaj [8]

koztató folyamatokat olcsóbb bérű országokba, nevezetesen Ázsiába, szervezték ki. Előrelátó gazdaságfejlesztésükkel elsősorban az ázsiai kis-tigrisek, Dél-Korea, Tajvan, Szingapúr, Hongkong és Kína nem csak felzárkóztak a korábban vezető Japán mögé (7. és 8. ábra), de az európai és amerikai ipar mikroelektronikai beszállítóiként megkerülhetlenné váltak. Különösen igaz ez a legkorszerűbb technológiát birtokló tajvani TSMC cégre, amelyik a fenti intézkedések eredményeként mára globálisan a legnagyobb integráltságú áramköröcsipek 70%-ának gyártója!

Amikor a járvány, ill. a háborús szankciós politika intézkedései miatt a szállítási útvonalakban zavar lépett fel, az európai és amerikai gépko-

csiggyártóknak és egyéb kulcs-iparágaknak alkatrészhiány miatt hetekre kellett leállniuk. Ez élesen rávilágított az IC-ellátásban a szuverenitás megteremtésének szükségességére. Napjainkban mind az USA-ban, mind az EU-ban az ún. Chips Act-támogatásokkal ösztönzik a hazai gyártókat, és próbálják a jelenlegi teljes kiszolgáltatottságot felszámolni. [9]

Az USA mindamellettt szeretné gazdasági fejlettségi előnyét hosszabb távon fenntartani. Mindenáron meg kívánja akadályozni, hogy a népi Kína Tajvant mint országa részét bekebelezze. Egy lokális háború viszont egyik Tajvanra utalt félnek sem érdeke, paradox módon ez a patthelyzet a „béke” záloga. Ezért az USA szankciós intézkedésekkel tiltja meg az európai monopolhelyzetű gyártónak a legkorszerűbb ASML litográfiai berendezések (6. ábra) exportját a Kínai Népköztársaságba. Ezzel a legkorszerűbb technológia alkalmazásában megmutatkozó mintegy 6–7 éves lemaradás konzerválását remélik fenntartani.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Cressler, J.D.: *Silicon Earth. A Historical Perspective on the Invention/Discovery of the Transistor*. IEEE Electron Devices Magazine, June 2023, 16–24.
- [2] Bársony I.: *Szilíciumtechnológia – és amit neki köszönhetünk*. Székfoglaló előadások a Magyar Tudományos Akadémián, Magyar Tudományos Akadémia, Budapest, 2021, 7–11.
- [3] Crass S.: *The Transistor's Amazing Evolution from Point Contacts to Quantum Tunnels*. Spectrum, IEEE.org, December 2022, 30–31.
- [4] Radosavljevic M., Kavalieros J.: *Taking Moore's Law to New Heights, When Transistors Can't Get Any Smaller, the Only Direction Is up*. Spectrum, IEEE.org, December 2022, 32–37.
- [5] Moore S. K.: *The Transistor of 2047*. Spectrum, IEEE.org, December 2022, 38–39.
- [6] Schoot J. van: *This Machine Could Keep Moore's Law on Track*. IEE Spectrum, April 2024, <https://spectrum.ieee.org/high-na-euv>
- [7] Révész B. Á.: *Íme,ők a legerősebb katonák a globális chipháborúban*. <https://mandiner.hu/makronom/2023/11/legerosebb-katonak-globalis-chiphaboruban>
- [8] Adrian Cho: *Quantum computers take key step toward curbing errors*. https://www.science.org/content/article/quantum-computers-take-key-step-toward-curbing-errors?utm_source=sfm-c&utm_medium=email&utm_campaign=DailyLatestNews&utm_content=alert&utm_rid=581465878&utm_cid=4612861
- [9] <https://www.european-chips-act.com/>



A TÜZELŐANYAG ÖSSZETÉTELÉNEK HATÁSA A GŐZKAZÁN MŰKÖDÉSI JELLEMZŐIRE

THE INFLUENCE OF FUEL COMPOSITION ON THE OPERATING CHARACTERISTICS OF THE STEAM BOILER

Dósa János,¹ Kovács József,² András József³

¹ Petroszényi Egyetem, Gép- és Villamosmérnöki Kar, Gépészeti, Ipari és Közlekedésmérnöki Tanszék, iondosa@upet.ro

² Petroszényi Egyetem, Gép- és Villamosmérnöki Kar, Gépészeti, Ipari és Közlekedésmérnöki Tanszék, iosif.andras@gmail.com

³ Petroszényi Egyetem, Gép- és Villamosmérnöki Kar, Gépészeti, Ipari és Közlekedésmérnöki Tanszék, IosifKovacs@upet.ro

Abstract

The paper presents the impact of using high ash content and poor heating value hard coal as fuel for a steam boiler. As expected, the poor quality of the fuel has an important impact on the efficiency of the steam boiler, reducing it by almost 4%. From that also results an increase in specific fuel consumption of the boiler. The mechanism by which these negative results are reached are mainly the increase in losses through combustion gases by nearly 2% and the heat of the evacuated slag which almost doubles.

Keywords: *fuel, heating value, steam boiler, efficiency, specific fuel consumption.*

Összefoglalás

A cikk bemutatja a magas hamutartalmú és rossz fűtőértékű kőszén gőzkazán-tüzelőanyagként való felhasználásának hatását. Amint az várható volt, a tüzelőanyag rossz minősége jelentős hatással van a gőzkazán hatásfokára, mivel azt közel 4%-kal csökkenti. Ebből is adódik a kazán fajlagos tüzelőanyag-fogyasztásának növekedése. A negatív eredmények elérésének mechanizmusa elsősorban az égési gázok veszteségeinek közel 2%-os növekedése és a kiürített salak hője, amely csaknem megkétszereződött.

Kulcsszavak: *tüzelőanyag, fűtőérték, a gőzkazán, hatásfok, fajlagosüzemanyag-fogyasztás.*

1. Bevezetés

Az energiaválság egy kevésbé említett összetevője az energiaforrások hozzáférhetősége, ami most, a térségben fennálló háborús körülmények miatt előtérbe került. A termelés visszaesése egyes régiókban, a kereskedelmi útvonalak bizonytalansága miatt, valamint egyre több logisztikai probléma nehezíti az energiaforrások beszerzését. Például a hőerőművek működtetéséhez szükséges szén esetében az egyes forrásokból történő ellátás megszakadása miatt más beszállítók felkutatására lesz szükség. Mivel megtörténhet, hogy a kőszén minden alkalommal más telepek-

ről származik, az összetétele és fűtőértéke is változni fog.

Mint ismeretes, az alacsony fűtőértékű szén kicsi teljesítményt nyújt, és ebből kifolyólag több fogy belőle. A fekete kőszén vagy a nem megfelelően kiválasztott fiatal kőszén nem ég ki teljesen, égetlenül hullik le a rostélyról, és a magas fűtőérték ellenére szintén kicsi teljesítményt nyújt, magas fogyasztás mellett.

A kőszén fűtőértéke, de összetétele is befolyásolja a gőzkazán hatékonyságát. Tehát ahhoz, hogy helyes képet kapjunk arról, miképpen hat az üzemanyag minősége a gőzkazán hatékonyságára, energiámérleget kell készíteni.

A dolgozat célja, hogy rávilágítson a gőzkazán hatékonyságának energetikai elemzésére, különböző fűtőértékű kőszén használatára függvényében. Ezzel a szakemberek a lehetséges veszteségek mértékét értékelni tudják, még mielőtt az üzemanyag felhasználásra kerül, és intézkedéseket tehetnek azok csökkentése érdekében.

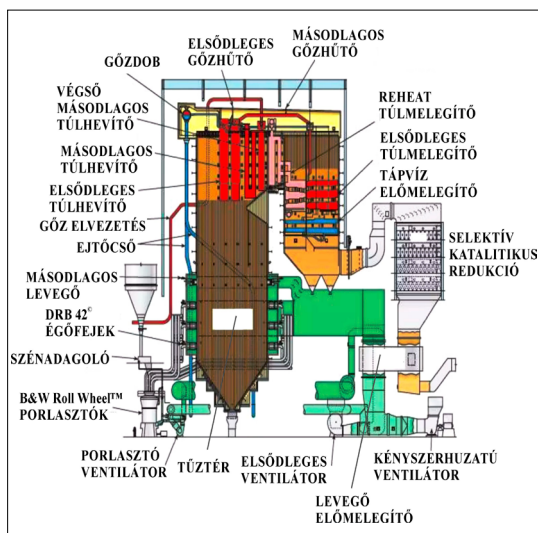
2. A gőzkazán felépítése és műszaki adatai

A modern, nagy teljesítményű erőművi kazánok mind túlhevített gőzt állítanak elő, és erre a célra vízcsöves kazánokat használnak. Az erőművekben található gőzkazánok rendeltetése a betáplált tápvizből túlhevített vízgőz előállítására.

Egy jellegzetes vízcsöves kazán felépítése az **1. ábrán** található. Itt láthatóak a gőzkazán fő szerkezeti elemei: gőzdob vagy kazándob – feladata a víz és a gőz szétválasztása, a kazándobból száraz, telített gőz távozik; forracsövek és ejtőcsövek – feladatuk a tápszivattyúval együtt a vízcirkuláció biztosítása; gőztúlhevítő – a doból érkező gőz túlhevítése adott hőmérsékletre; tápvíz-előmelegítő – a betáplált hideg tápvizet a forráspontot megközelítő hőmérsékletre melegíti; léghevítő – az égési levegő előmelegítésére.

Az erőművekben található gőzkazánok névleges teljesítménye pár száz tonna gőz óránként, és ennek megfelelően az üzemanyag fogyasztása is magas, meghaladja a száz tonnát óránként.

Egy ilyen fajta gőzkazán esetében a törvénynek megfelelően bizonyos időközönként energiaauditálást kell végezni.



1. ábra. A vízcsöves kazán felépítése [8]

Az auditálást normáknak megfelelően kell elvégezni, és nagyszámú szakkiadvány áll az auditálók rendelkezésére [1–7].

A közeli hőerőmű korszerűsítése alkalmából, 2000 és 2007 között, új kazán került a régi, Ramzin-típusú helyére, és azóta több alkalommal átment az energetikai auditálási eljárás, illetve a teljesítménymutatók értékelésén.

A gőzkazán névleges jellemzői az **1. táblázat**ban találhatóak.

1. táblázat. A gőzkazán névleges jellemzői

| Cím | Érték |
|---|-------|
| Névleges teljesítmény (gőztömegáram), t·h ⁻¹ | 540,0 |
| Gőz hőmérséklete (75–100% tömegáram esetén), °C | 541,0 |
| Gőz nyomása (relatív), MPa | 13,85 |
| Újrahevített (reheat) gőztömegáram, t·h ⁻¹ | 471,4 |
| Újrahevítőbe belépő gőz hőmérséklete, °C | 350,7 |
| Újrahevítőbe belépő gőz nyomása, MPa | 3,12 |
| Újrahevítőbe kilépő gőz hőmérséklete, °C | 541,0 |
| Újrahevítőbe kilépő gőz nyomása, MPa | 2,96 |
| Tápvíz-előmelegítőbe belépő tápvíz hőmérséklet, °C | 235,4 |
| Levegő-előmelegítőből kilépő füstgáz hőmérséklete, °C | 143,0 |
| Légfelesleg a tápvíz-előmelegítő után mérve | 1,20 |
| Légfelesleg a levegő-előmelegítő után mérve | 1,30 |
| Kazánhatásfok, % | 90,70 |

A fent említett gőzkazán kőszénrel működik, és ennek a névleges összetétele, illetve fűtőértéke a **2. táblázat**ban található, és ennek megfelelően garantálja a gyártó a 90,70%-os hatásfok elérését.

Ahhoz, hogy az energiaauditálást el lehessen végezni, az érvényben lévő előírások szerint a méréseket három különböző üzemmódban kell elvégezni: technológiai minimum, névleges és maximális teljesítmény. Ha nem lehetséges, akkor a lehető legkisebb, a lehető legnagyobb, illetve közbenső üzemmódban is el lehet végezni.

A tüzelőanyag fűtőértékét megközelítőleg meg lehet határozni különböző egyenletekből kiindulva. Az egyenleteket elemezve, következtetni lehet arra, hogy miként befolyásolja az üzemanyag összetétele ennek fűtőértékét.

2. táblázat. A kőszén névleges összetétele

| Névleges részarány | % |
|---|------|
| Elemi szén C ⁱ | 36,6 |
| Hidrogén H ⁱ | 2,8 |
| Kén S ⁱ | 1,5 |
| Nitrogén N ⁱ | 0,7 |
| Oxigén O ⁱ | 7,6 |
| Víztartalom W ⁱ | 12,8 |
| Hamutartalom A ⁱ | 29,6 |
| Fűtőérték 13.816,4 kJ·kg ⁻¹ (3.300,0 kcal·kg ⁻¹) | |

A kiindulópont a következő egyenlet [1]:

$$H_i = \frac{4,187}{100} \left[8097 \cdot C^i + 28690 \left(H^i - \frac{O^i}{8} \right) + 2210 \cdot S^i - 600 \cdot W^i \right] \frac{kJ}{kg} \quad (1)$$

X_i-vel jelöljük az elemi összetevők részarányát, ahogy az a **2. táblázat**ban látható.

Jól látható, hogy a fűtőérték magasabb, ha több elemi szén (C), hidrogén (H), illetve kén (S) van a tüzelőanyagban, míg magas oxigéntartalom, illetve víztartalom negatívan befolyásolja az üzemanyag fűtőértékét.

Következtetésképpen a kőszén összetétele befolyásolja a fűtőértékét, nem csak az égethető összetevők által, tehát érdemes elemezni minden olyan típusú energiavesztést, amely a tüzelőanyag összetételéhez köthető. Ezek után pedig, ezek függvényében elemezni a gőzkazán működési jellemzőit.

A legnagyobb fajsúlyú veszteségekkel kezdjük: távozó füstgázokkal elvitt hő Q_{gacos} [1] [9]:

$$Q_{gacos} = B_i \cdot (1 - n) \cdot V_{ga} \cdot i_{ga} \quad (2)$$

B_i-vel jelöljük az üzemanyag tömegáramát, kg·s⁻¹; V_{ga} – az üzemanyagból keletkezett füstgáz térfogata m³_N·kg⁻¹; i_{ga} – a füstgáz entalpiája kJ·m⁻³_N, míg n – együtttható, amely figyelembe veszi a salakban és pernyében található égetlen üzemanyag részarányát, %.

Tovább elemezve a (2) képletet, a füstgáz térfogatáramát a következőképpen lehet meghatározni [1, 9]:

$$V_{ga} = V_{gus} + V_{H2O} \frac{m_N^3}{kg} \quad (3)$$

V_{gus}-szal jelöljük az üzemanyagból keletkezett száraz füstgáz térfogatát, m³_N·kg⁻¹; V_{H2O} pedig a füstgázban található vízgőz térfogata, m³_N·kg⁻¹.

Ezeket a szilárd, illetve a folyékony üzemanyag esetében a következő képletekkel lehet kiszámítani [1]:

$$V_{gus} = \frac{1}{100} (1,867 \cdot C^i + 0,7 \cdot S^i + 0,8 \cdot N^i) + (\lambda - 0,21) \cdot L_0 \frac{m_N^3}{kg} \quad (4)$$

$$V_{H2O} = \frac{1,244}{100} (9 \cdot H^i + W^i + 0,1 \cdot \lambda \cdot L_0 d_a) + 1,244 \cdot g_{inj} \frac{m_N^3}{kg} \quad (5)$$

X_i-vel jelöljük az elemi összetevők részarányát, ahogy az a **2. táblázat**ban látható, és ezenkívül, L₀ – az égéshez szükséges levegő mennyiség, m³_N·kg⁻¹, λ – légfeszültség-tényező, d_a – a környezeti levegő nedvességtartalma (%).

A gáz-halmazállapotú üzemanyag esetében [1, 9]:

$$V_{gus} = \frac{1}{100} \left((CO_2)_c^i + (CO)_c^i + \sum m(C_m H_m)_c^i + (H_2S)_c^i + (N_2)_c^i \right) + (\lambda - 0,21) \cdot L_0 \frac{m_N^3}{m_N^3} \quad (6)$$

$$V_{H2O} = \frac{1}{100} \left((H_2)_c^i + \sum \frac{n}{2} (C_m H_n)_c^i + (H_2S)_c^i \right) + 1,244 \cdot (d_c + L_0 \cdot d_a) \frac{m_N^3}{m_N^3} \quad (7)$$

A fenti jelölésekkel összevetve ráadásul d_c-vel jelöljük az üzemanyag nedvességtartalmát, m³_N·m⁻³_N.

Ugyanakkor az üzemanyag teljes égéséhez szükséges levegőmennyiséget a következő képletekkel számítjuk ki [1, 9]:

– szilárd vagy cseppfolyós üzemanyag esetében:

$$L_0 = \frac{1}{100} \left[8,89 \cdot C^i + 26,7 \cdot \left(H^i - \frac{O^i}{8} \right) + 3,33 \cdot S^i \right] \frac{m_N^3}{kg} \quad (8)$$

– gáz-halmazállapotú üzemanyag esetében:

$$L_0 = \frac{1}{21} \left(0,5 \cdot (CO)_c^i + 0,5 \cdot (H_2)_c^i + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) (C_m H_n)_c^i + 1,5 \cdot (H_2S)_c^i - (O_2)_c^i \right) \frac{m_N^3}{m_N^3} \quad (9)$$

Amint a fenti képletek mutatják, a keletkezett füstgáz mennyiségét nagyon befolyásolja az üzemanyag összetétele, ami minden képletben benne van, és ezáltal a távozó füstgázokkal elvitt hővesztést is befolyásolja.

Mivel a távozó füstgázokkal elvitt hő, Q_{gacos} jelenti egy gőzkazán esetében a legnagyobb veszteséget, arra lehet következtetni, hogy ezáltal a gőzkazán hatásfokát is döntő módon befolyásolja.

Az eddig bemutatott egyenletekben nem fordul elő az üzemanyag hamutartalma, ezért újabb képleteket kell elemezni.

A salakban maradt égethető anyag és szállókoks-veszteséget, Q_{cmech} a következő képlettel határozzuk meg [1] [10]:

$$Q_{mec} = 78 \cdot B_i \left(\frac{C_{sg} \cdot A^i \cdot a_{sg}}{100 - C_{sg}} + \frac{C_{pvc} \cdot A^i \cdot a_{pvc}}{100 - C_{pvc}} \right) \frac{kJ}{h} \quad (10)$$

B_i -vel jelöljük az üzemanyag tömegáramát, $kg \cdot s^{-1}$; A_i -vel jelöljük a hamu részarányát %; C_{sg} és C_{pvc} az elemi szén részaránya a salakban maradt égethető anyagban és a szállókoksban, míg a_{sg} és a_{pvc} a salak meg a szállókoks részaránya az üzemanyag hamutartalmához viszonyítva.

Egy másik veszteség, amelyben szerepel a nyersanyag hamutartalma, a forró salakkal eltávolított hő Q_{sg} [1]:

$$Q_{sg} = 0,3 \cdot G_{sg} \cdot t_{sg} \frac{kJ}{h} \quad (11)$$

G_{sg} -vel jelöljük a salak tömegáramát ($kg \cdot h^{-1}$) és t_{sg} -vel a salak hőmérsékletét, °C.

Mivel a szakirodalomban [1–6], [11] található adatok azt mutatják, hogy a salakban maradt égethető anyag és szállókoks-veszteség Q_{cmech} részaránya nagyon alacsony, a továbbiakban a távozó füstgázokkal elvitt hő, Q_{gacos} és a forró salakkal eltávolított hő, Q_{sg} mennyiségének változását az üzemanyag összetételének függvényében fogjuk tanulmányozni.

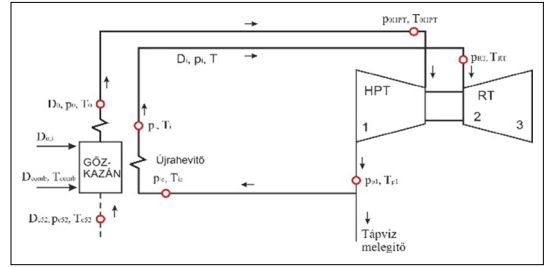
Ezenkívül a kazán hatásfokát, illetve fajlagosüzemanyag-fogyasztását is elemezni fogjuk, a fent bemutatott képletek elemzése eredményeként.

3. Mért adatok és eredmények

A mérések ideje alatt a gőzkazán üzemeltetése a következő feltételek betartásával történt: a földgáz tömegáramértékét az égés stabilitása érdekében a gőzkazán felhasználója határozta meg, ugyanúgy a porlasztott szén előállításához szükséges malmok számát; az összes tápvíz-előmelegítő működésben volt; a kazán automata üzemmódban működött, a paraméterértékeket a folyamatszámító-gép állította be; a kilépő gőz hőmérséklete úgy lett beállítva, hogy ne haladja meg az 535 °C-ot; a gőz tömegáramértéke egyenlő a tápvíz tömegáramértékével.

A mérőműszerek elhelyezése a kívánt adatok mérése érdekében a 2. ábrán van feltüntetve (a turbinából csak a nagynyomású turbinarész és a középnyomású turbinarész van megjelölve).

A veszteségfeltárások két különböző alkalommal lettek elkészítve, míg egy alkalommal az



2. ábra. A mérőműszerek elhelyezése, a gőzkazán és a gőzturbina bekötési diagramja

üzemeltető végzett teljesítménymutató-értékelést, minden alkalommal a mérések három különböző üzemmódban zajlottak le. Az üzemmód terhelése jellegzetesen a turbina terhelését jelöli meg, amely minden alkalommal más érték volt. A 3. táblázatban a második alkalommal történt veszteségfeltáráshoz szükséges adatok vannak bemutatva, és a terhelés a következő volt: minimális terhelés: 74 MW, közepes terhelés 116 MW, míg a maximális terhelés 130 MW.

3. táblázat. A második veszteségfeltáráshoz szükséges adatok

| Cím | Min. terhelés | Közepes terhelés | Max. terhelés |
|--|---------------|------------------|---------------|
| Belépő üzemanyag (kőszén) hőmérséklete, °C | 74,99 | 74,26 | 75,11 |
| Üzemanyag-tömegáram, t·h ⁻¹ | 72,02 | 111,46 | 125,12 |
| Metángáz-tömegáram, m ³ _N ·h ⁻¹ | 2.714,2 | 1.785,4 | 1.013,7 |
| Gőzinjekció-tömegáram, t·h ⁻¹ | 7,088 | 24,654 | 54,040 |
| Összlevegő-tömegáram, t·h ⁻¹ | 375,03 | 518,06 | 589,83 |
| Üzemanyag | | | |
| C ⁱ | 0,315 | 0,312 | 0,332 |
| N ⁱ | 0,007 | 0,007 | 0,007 |
| H ⁱ | 0,011 | 0,015 | 0,015 |
| S ⁱ | 0,012 | 0,014 | 0,013 |
| O ⁱ | 0,038 | 0,041 | 0,039 |
| A ⁱ | 0,475 | 0,473 | 0,464 |
| W ⁱ | 0,142 | 0,137 | 0,129 |
| Kőszén fűtőértéke, kJ·kg ⁻¹ | 10.949 | 10.992 | 11.432 |
| Salakban található égetlen üzemanyag, % | 0,47 | 0,49 | 0,51 |
| Pernyében található égetlen üzemanyag, % | 0,32 | 0,33 | 0,34 |

| Cím | Min. terhelés | Közepes terhelés | Max. terhelés |
|--|---------------|------------------|---------------|
| Füstgáz összetétele: | | | |
| CO ₂ , % | 11,70 | 11,83 | 17,67 |
| O ₂ , % | 6,49 | 6,39 | 5,88 |
| SO ₂ , ppm | 1.164 | 1.164 | 1.164 |
| CO, mg·m ⁻³ _N | 18,55 | 18,55 | 18,55 |
| NO _x , mg·m ⁻³ _N | 143,3 | 143,3 | 143,3 |
| Légfelesleg-tényező a levegő-előmelegítő előtt | 1,41 | 1,40 | 1,39 |
| Levegő-előmelegítőbe belépő levegő hőmérséklete, °C | 26,71 | 26,53 | 27,63 |
| Levegő-előmelegítőből kilépő levegő hőmérséklete, °C | 283,6 | 308,2 | 321,7 |
| Levegő előmelegítőbe belépő füstgáz hőmérséklete, °C | 319,9 | 349,5 | 366,6 |
| Levegő-előmelegítőből kilépő füstgáz átlaghőmérséklete, °C | 153,3 | 164,6 | 173,7 |
| Kazánból kilépő túlhevített gőz nyomása, bar | 126,7 | 127,3 | 127,8 |
| Kazánból kilépő túlhevített gőz hőmérséklete, °C | 526,9 | 532,7 | 535,0 |
| Újrahevítőbe belépő gőz nyomása, bar | 13,08 | 20,93 | 24,00 |
| Újrahevítőbe belépő gőz hőmérséklete, °C | 315,8 | 340,5 | 350,6 |
| Újrahevítőből kilépő gőz nyomása, bar | 13,33 | 21,38 | 24,55 |
| Újrahevítőből kilépő gőz hőmérséklete, °C | 512,2 | 531,2 | 533,6 |
| Tápvíz hőmérséklet, °C | 192,8 | 212,4 | 218,1 |
| Tápvíznyomás, bar | 130,0 | 133,7 | 135,6 |

A **4. táblázat** és az **5. táblázat** magában foglalja a kőszén összetételét, ahogy az meg lett határozva a teljesítménymutató-értékelés, illetve a második elvégzett auditálás folyamat alkalmával.

A **6. táblázat** bemutat egy jellegzetes veszteségfeltáró táblázatot, ahol a gőzkazán különböző típusú veszteségei vannak feltüntetve.

A veszteségek arányai megegyeznek a szakirodalomban [1–6, 11] található adatokkal. Ami a veszteségek értékeit illeti, a távozó füstgázokkal elvitt hő Q_{gacos} és a forró salakkal eltávolított hő Q_{sg} nagyobb, mint amire lehetne számítani egy modern gőzkazán esetében.

4. táblázat. A kőszén meghatározott összetétele

| Részarány | Teljesítménymutatók értékelése | | |
|--------------------------------|--------------------------------|--------|--------|
| | 113 MW | 130 MW | 150 MW |
| Elemi szén C ⁱ | 38,13 | 38,13 | 38,13 |
| Hidrogén H ⁱ | 2,93 | 2,93 | 2,93 |
| Kén S ⁱ | 1,18 | 1,18 | 1,18 |
| Nitrogén N ⁱ | 7,44 | 7,44 | 7,44 |
| Oxigén O ⁱ | 0,61 | 0,61 | 0,61 |
| Víztartalom W ⁱ | 7,27 | 7,27 | 7,27 |
| Hamutartalom A ⁱ | 42,44 | 42,44 | 42,44 |
| Fűtőérték, kJ·kg ⁻¹ | 15.638,6 | | |

5. táblázat. A kőszén meghatározott összetétele

| Részarány | Második auditálás | | |
|--------------------------------|-------------------|----------|----------|
| | 115 MW | 130 MW | 150 MW |
| Elemi szén C ⁱ | 43,3 | 41,5 | 41,5 |
| Hidrogén H ⁱ | 2,8 | 2,8 | 2,8 |
| Kén S ⁱ | 1,65 | 7,6 | 7,6 |
| Nitrogén N ⁱ | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| Oxigén O ⁱ | 7,6 | 1,5 | 1,4 |
| Víztartalom W ⁱ | 10,5 | 10,5 | 10,5 |
| Hamutartalom A ⁱ | 33,45 | 35,4 | 35,5 |
| Fűtőérték, kJ·kg ⁻¹ | 16.169,4 | 15.545,6 | 15.533,0 |

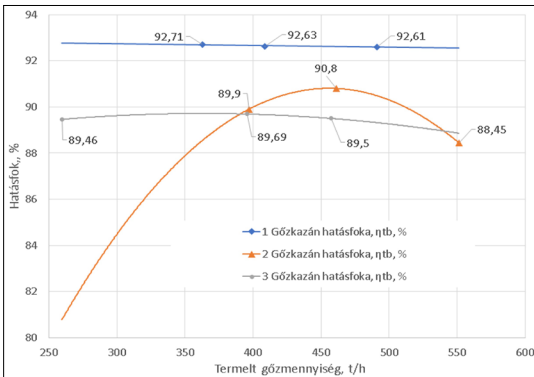
6. táblázat. Energiámérleg, 74 MW generátorteljesítmény mellett

| BEFEKTETETT (BELÉPŐ ENERGIA) | | |
|---|---------------------|---------------|
| Megnevezés | MJ·h ⁻¹ | % |
| Tüzelőanyaggal bevitt, kémiailag kötött hő, Q_{cBi} | 856.309,18 | 78,88 |
| Az üzemanyag fizikai hője, Q_B | 7.582,56 | 0,70 |
| A tápvíz fizikai hője, Q_a | 214.330,63 | 19,74 |
| A környezeti hőmérsékletű levegővel bevitt hő, Q_L | 7.408,30 | 0,68 |
| ÖSSZESEN (Q_i) | 1.085.630,67 | 100,00 |
| KILÉPŐ ENERGIA | | |
| HASZNOS ENERGIA | | |
| Elállított gőzmennyiség energiája, Q_D | 885.942,00 | 81,61 |
| Az újrahevítőben termelt hőmennyiség, Q_{sci} | 94.429,93 | 8,70 |
| Hasznos energia összege, Q_u | 980.371,93 | 90,31 |

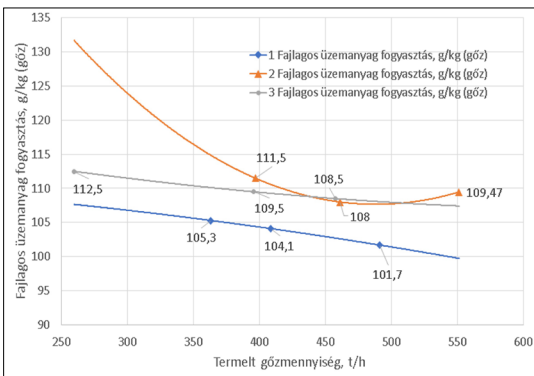
| ENERGIAVESZTESÉGEK | | |
|---|---------------------|---------------|
| Salakban maradt égethető anyag és szállókoksz-veszteség, Q_{cmec} | 1.287,43 | 0,12 |
| Tökéletlen égés okozta veszteség, Q_{cga} | 56,45 | 0,01 |
| Távozó füstgázokkal elvitt hő, Q_{gacos} | 77.446,03 | 7,13 |
| A forró salakkal eltávolított hő, Q_{sg} | 20.581,59 | 1,89 |
| Sugárzási veszteség, Q_{per} | 8.126,64 | 0,75 |
| Egyéb, ΔQ | -2.239,40 | -0,21 |
| Veszteségek összege, Q_p | 105.258,74 | 9,69 |
| ÖSSZESEN (Q_e) | 1.085.630,67 | 100,00 |

4. Következtetések

Az adatok jobb elemzése érdekében, ábrák formájában, a termelt gőzmennyiség függvényében, a következő mutatók, illetve veszteségek lettek bemutatva: a gőzkazán hatásfoka, η_{tb} [%], **3. ábra**; a fajlagosüzemanyag-fogyasztás pedig b_c



3. ábra. A gőzkazán hatásfoka



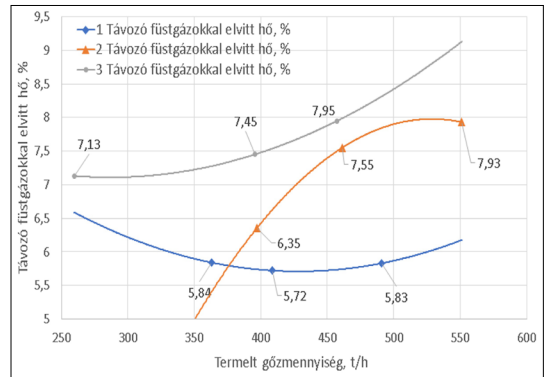
4. ábra. A fajlagosüzemanyag-fogyasztás

$g \cdot kg^{-1}$ (gőz), **4. ábra**; veszteség a távozó füstgázokkal elvitt hővel [%], **5. ábra**; veszteség a forró salakkal eltávolított hővel [%], **6. ábra**.

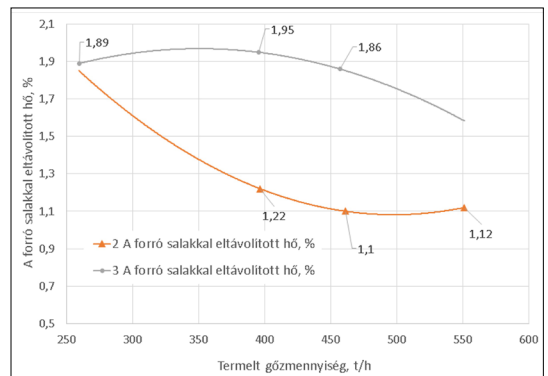
Meg kell említeni, hogy az 1. azonosító a teljesítménymutató-értékelést, míg 2-es, illetve 3-as a két különböző alkalommal készített veszteségfeltárásokat jelöli. A **3.**, illetve **4. táblázat**ban jól látható, hogy a teljesítménymutató-értékelés alkalmával az üzemanyag átlagos fűtőértéke volt a legnagyobb (kivéve a második auditálás esetében, 115 MW terhelésen), utána az első auditálás alkalmával már alacsonyabb volt, elérve a legalacsonyabb értéket a második auditálás alkalmával. Mivel minden alkalommal Zsil-völgyi szenet használtak, ez jól szemlélteti a helyi bányászat helyzetét.

Figyelembe véve a fent említetteket, az ábrákon jól látható, hogy a mutatók egyenesen arányosak az üzemanyag átlagos fűtőértékével, minél jobb a fűtőérték, annál jobb a mutatók is (a gőzkazán hatásfoka η_{tb} %, **3. ábra**, illetve a fajlagosüzemanyag-fogyasztás b_c $g \cdot kg^{-1}$ (gőz), **4. ábra**).

A veszteségek esetében is látszik a fűtőérték befolyása, ugyanis a veszteségek fordított arányban



5. ábra. Veszteség a távozó füstgázokkal elvitt hővel



6. ábra. Veszteség a forró salakkal eltávolított hővel

vannak az üzemanyag átlagos fűtőértékével, minél jobb az üzemanyag, annál kisebb a veszteség a távozó füstgázokkal elvitt hővel [%], **5. ábra**; illetve a forró salakkal eltávolított hővel, [%], **6. ábra**.

Az ábrákon bemutatott adatok alapján több következtetés vonható le, és ezek az alábbiakban részletezve vannak.

Létezik egy nyilvánvaló összefüggés az üzemanyag fűtőértéke és a gőzkazán hatásfoka között, mint az a **3. ábrán** látható. A jó minőségű üzemanyag kb. 4%-kal javíthatja a gőzkazán hatásfokát, ami nem elhanyagolható.

A fajlagosüzemanyag-fogyasztás, **4. ábra**, megerősíti a fentebb levont következtetéseket, ugyanis, mint várható volt, a jó minőségű üzemanyag kisebb üzemanyag-fogyasztást eredményez, tehát ezzel arányosan az üzemanyaggal járó költségek is kisebbek.

Az **5. és 6. ábra** egyértelműen mutatja be, miként befolyásolja az üzemanyag minősége a veszteségeket és ezáltal a gőzkazán mutatóit. Mint látható, a távozó füstgázokkal elvitt hő mennyisége fordítottan arányos az üzemanyag minőségével.

A maximális és minimális értékek közötti különbség eléri a 2%-ot, ami nem tűnik soknak, de a **6. táblázatban** látható adatok alapján ki lehet számolni ennek a hozzávetőleges értékét, amely a bemutatott gőzkazán esetében $21.724 \text{ MJ}\cdot\text{h}^{-1}$.

Ami a forró salakkal eltávolított hővel való veszteséget illeti, a teljesítménymutató-értékelés alkalmával nem volt kiszámolva, de a következő két alkalommal viszont igen.

Jól látszik, hogy ennek a veszteségnek az értéke majdnem megduplázódott, mivel az üzemanyag hamutartalma jóval nagyobb. Ez a veszteség nem függ egyenesen az üzemanyag fűtőértékétől, hanem inkább a hamutartalmával egyenesen arányos. Persze, a magas hamutartalmú üzemanyagnak általában kisebb az elemiszen-tartalma és ennek a függvényében a fűtőértéke is.

Összegezve a jó minőségű, magas fűtőértékű üzemanyag használata jó hatással van a gőzka-

zán mutatóira, csökkenti a veszteségeket és az üzemanyaggal járó költségeket.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Berinde T. ș.a.: *Calculul componentelor uzuale ale bilanșurilor energetice*. In: *Întocmirea și analiza bilanșurilor energetice în industrie*. Vol. I. Editura Tehnică, București, 1976, 50–103.
- [2] Carabulea A., Carabogdan I. Gh.: *Modele de bilanșuri energetice reale și optime*. Editura Academiei R.S.R., București, 1982, 123–176.
- [3] Mușatescu V., Postolache P.: *Balanțe și optimizări energetice*. I.P.B., București, 1981, 53–92.
- [4] Carabogdan I. Gh., Brătianu C.: *Bilanșul energetic. Aplicabilitate și limite*. ENERG, nr. 1, Editura Tehnică, București, 1986, 5–16.
- [5] Carabogdan I. Gh., ș.a.: *Instalații termice industriale*. Vol. 1. Editura Tehnică, București, 1978, 81–126.
- [6] *Normativ E(2-7)-70 privind metodică de întocmire și analiză a bilanșurilor energetice în întreprinderile industriale și similare*. MEE, Inspekția generală energetică, 1970.
- [7] *Îndrumător E-6-60 pentru întocmirea și analiza bilanșurilor termice ale cazanelor de abur*. Direcția generală pentru energie, metrologie, standarde și invenții, Inspectoratul de stat pentru energie, 1960.
- [8] Mohammad Shoeb Siddiqui: *Steam Generator Boiler. Boiler. Water Tube Boiler*. (letöltve: 2023. szeptember 15.)
<http://www.slideshare.net/MohammadShoebSiddiqui/steam-generator-part-2>
- [9] Vakkilainen E. K.: *Boiler Processes*. In: (Eds.: Esa Kari Vakkilainen) *Steam Generation from Biomass*. Butterworth-Heinemann, 2017, 57–86.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804389-9.00003-4>.
- [10] BEE India, Energy assessment of industrial boilers, (accessed: 15 September 2023)
<https://www.beeindia.gov.in/sites/default/files/4Ch1.pdf>
- [11] IEA-ETSAP, Industrial combustion boilers, (accessed: 20 September 2023)
https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/I01-ind_boilers-GS-AD-gct.pdf



ADDITÍV GYÁRTÁSSAL ELŐÁLLÍTOTT POLIMER FOGASKEREKEK MÉRET-, ALAK- ÉS HELYZETPONTOSSÁGÁNAK VIZSGÁLATA KOORDINÁTAMÉRŐ GÉPEKEN

THE INVESTIGATION OF DIMENSIONAL, FORM AND ORIENTATION ACCURACY OF POLYMER GEARS PREPARED BY ADDITIVE MANUFACTURING

Egyed-Faluvégi Erzsébet,¹ Gál Károly,² Farnos Rudolf-László,³ Kántor József,⁴
Gergely Attila⁵

*Sapiientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék,
Marosvásárhely, Románia*

¹ faluvegi.erszebet@ms.sapiientia.ro

² gal.karoly@ms.sapiientia.ro

³ farnos_rudolf@ms.sapiientia.ro

⁴ kantorjozsef@ms.sapiientia.ro

⁵ agergely@ms.sapiientia.ro

Abstract

Among the additive manufacturing techniques Fused Deposition Modeling (FDM) is a widely used process, due to its rapid development in the recent years, and its consequent drop in price. 3D printing has multiple process parameters, which affect the dimensional, form, and orientation accuracy, and thus the usability of the final product. In this work the effects of layer thickness, printing speed, and infill on the dimensional and geometric deviations were studied with a 3 factor Box-Behnken experimental design. The measured deviations were within the tolerance range specified by the standards. Based on this, it can be stated that 3D printing is a promising gear manufacturing technology for light and medium load applications.

Keywords: spur gear, 3D printing, additive manufacturing, accuracy, Box-Behnken.

Összefoglalás

Az additív gyártástechnológiák közül az ömledékrétegezés (Fused Deposition Modeling) 3D-nyomatási technológia nagyon elterjedt, mivel az utóbbi évek során rohamos fejlődésen ment keresztül, és ez jelentős ár-csökkenéshez vezetett. A 3D-nyomatásnak számos technológiai paramétere van, melyek hatása nagymértékben befolyásolja használhatóságát. 3 faktoros Box-Behnken kísérleti terv segítségével tanulmányoztuk a fogaskerekek méret-, alak és helyzetpontosságát. Ez a három faktor a rétegvastagság, a nyomtatási sebesség és a kitöltési tényező. A kapott eredmények szerint a gyártott fogaskerekek a szabvány által meghatározott tűrési tartományon belül voltak, mely alapján kijelenthetjük, hogy a 3D-nyomatás egy ígéretes fogaskerékgyártó technológia lehet kis és közepes terhelések esetén.

Kulcsszavak: fogaskerék, 3D-nyomatás, additív gyártástechnológia, pontosság, Box-Behnken.

1. Bevezetés

A fogaskerekes hajtások képezik a hajtástechnika egyik legfontosabb megoldását. A fogaskerékipiac évről évre növekszik, és az előrejelzések szerint 2030-ra eléri a 218.7 milliárdos USD határt [1]. Különösen nagy igény van olyan fogaskerekekre, melyek a kis és közepes terhelési tartományban használhatóak. Ilyen alkalmazásoknál a műanyag fogaskerekek már kiválthatják a fém fogaskerekeket, hiszen számos előnnyel rendelkeznek: alacsony tömeg, könnyebb, gyorsabb és gazdaságosabb gyártás, csendesebb járás, ütések elnyelése és akár kenés nélküli működés is [2].

A műanyag fogaskerekek gyártása additív gyártástechnológiával ígéretes alternatívát biztosít egyedi alkatrészek, illetve alacsony sorozatok gyártására [3]. Az ömledékretegezés (Fused Deposition Modeling, FDM) 3D-nyomatási eljárása most már elérhetővé teszi az átlagos felhasználó számára az egyedi alkatrészek otthoni gyártását. A technológia során egy műanyag szál (filament) vezetnek be egy fűtött egységbe (extruder), mely azt megömleszt, és egy mechanizmus síkbeli rétegeket hoz létre. A rétegek egymásba olvadásával a kívánt alkatrészt fokozatosan hozzuk létre. Az FDM-technológiának számos gyártási paramétere van, melyek kisebb-nagyobb mértékben befolyásolják a nyomtatott alkatrész felületi minőségét és geometriai pontosságát.

A munkánk célja vizsgálni az FDM 3D-nyomatási paraméterek közül a rétegvastagság, nyomtatási sebesség és a kitöltési tényező hatását az előállított műanyag fogaskerekek méret-, alak- és helyzetpontosságára.

2. Kísérleti módszertan

2.1. Anyagok

A fogaskerekek nyomtatása politejsav (PLA), Sunlu PLA Black 1510101A, $\phi 1.75$ mm átmérőjű filamentból történt.

2.2. 3D-s modell létrehozása

A fogaskerék 3D-s modellje a CATIA V5R17 tervezőszoftver Generative Shape Design moduljában került létrehozásra. A fogaskerék elemi fogazattal, 3 mm-es modullal, 21 darab foggal és $r_a = 29.6$ mm-es alapkör sugarával rendelkezik. Az evolvens fogprofil generálása az alábbi parametrikus egyenletek segítségével történt:

$$\begin{cases} x = r_a \sin \theta - r_o \theta \cos \theta \\ y = r_a \cos \theta + r_o \theta \sin \theta \\ z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Az evolvens mindössze egyszer került kigenerálásra, ezután tükrözés és körmintázat segítségével lett sokszorosítva.

2.3. Kísérleti terv

A 3 faktoros Box-Behnken kísérleti terv generálása a MiniTab 16 szoftverben történt. A választott paraméterek a rétegvastagság, nyomtatási sebesség és a kitöltési tényező voltak. A paraméterek határértékei előzetes kísérletek során kerültek meghatározásra. Az 1. táblázatban láthatóak a paraméterek három szintjéhez tartozó értékek. A kísérleti terv három centrális pontot tartalmaz.

1. táblázat. Box-Behnken kísérleti terv faktorainak értékei a három szinten.

| Nyomatási paraméter | Alsó (-1) | Középső (0) | Felső (+1) |
|-----------------------------|-----------|-------------|------------|
| Rétegvastagság [mm] | 0.1 | 0.15 | 0.2 |
| Nyomatási sebesség [mm/min] | 40 | 80 | 120 |
| Kitöltés [%] | 10 | 30 | 50 |

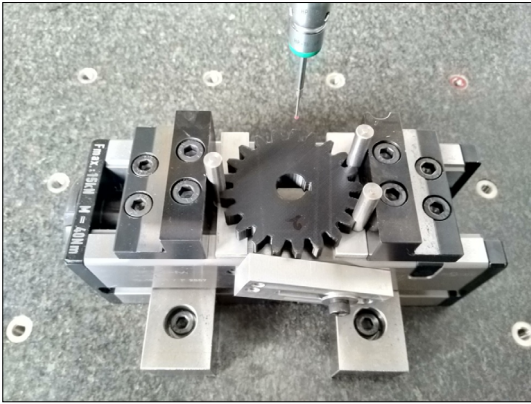
A tanulmányozott eredmények a fogaskerék bizonyos jellemzői: méretek szempontjából a fejkör- (D_a), lábkör- (D_b) és furatátmérők (D_f), az alak- és helyzetűrések közül pedig a homlokfelület síklapúsága (FLAT1), a tengelyfurat hengerecsége (CYLY1), a fejkör (CIR1) és lábkör (CIR2) köralakúsága, a furat tengelyének merőlegessége a homlokfelületre (PERP1), illetve a fejkör (CONCEN1) és lábkör (CONCEN2) koncentrikussága a tengelyfurathoz képest.

2.4. 3D-s nyomtatás

Az additív gyártás egy Artillery Sidewinder X2 3D-nyomtatóval lett megvalósítva. A fogaskerék modelljéből a nyomtatáshoz szükséges G-kód létrehozása a Prusa szeletelő programot használva történt. A szeletelés során alkalmazott sablon a 0.2 mm SPEED Prusa gyári sablon volt, így biztosítva, hogy csak az 1. táblázatban megjelölt paraméterek változtak. A nyomtatás során a fűvóka 210 °C, míg a tárgyasztal 60 °C hőmérsékleten volt, valamint a fogaskerekek a méhsejt kitöltési formával készültek.

2.5. Méretellenőrzés koordinátamérő gépen

A koordinátamérés egy Hexagon Tigo SF-mérőgépen történt. A mérőgép egy közepes érzékenységű (medium force, MF) touch-trigger mé-



1. ábra. A fogaskerék befogva a készülékbe

rőcellával volt ellátva, illetve a tapintószár hossza 40 mm, a tapintógömb átmérője 2 mm volt. A mérés 18 ± 0.5 °C-on történt. A felvett pontokat illetően, síkok meghatározásához 12 pont (pl. homlokléület), körvekhez 7 pont (fejkör és lábör), hengerhez 25 pont került lemérésre. Minden idom illesztési eljárása a legkisebb négyzetek módszerét alkalmazta. A nyers adatok feldolgozása a PC-DMIS 2019 szoftverben történt.

A mérőgép asztalán a fogaskerek az 1. ábrán látható készülék segítségével kerültek befogásra. A fogak közé illesztett csapok felfeküdtek a satupofákra, ezáltal biztosítva egy következetes tájolást a munkadarabnak. Egy ütköző és egy távtartóként szolgáló mérőhasáb járult hozzá a fogaskerek lineáris pozíciójának pontos megtartásához.

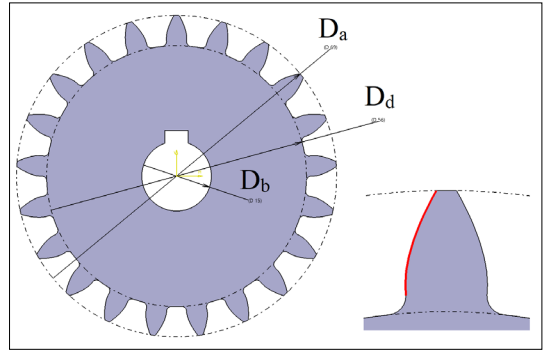
3. Eredmények

A 2. ábra mutatja a 3D-s modellt homloknézetben, valamint a generált evolvens fogprofil. Az ábrán bejelölt körök a fejkör (D_a , 69 mm), lábör (D_b , 56 mm), valamint a tengelyfurat (D_b , 15 mm).

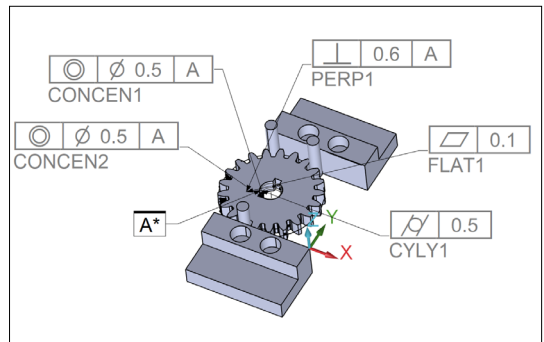
A vizsgált alak- és helyzetűrések és ezek tűrésértékei a 3. ábrán láthatóak.

A Box-Behnken-terv szerinti nyomtatási körülményeket a 2. táblázat tartalmazza. A 0.15 mm rétegvastagság, 80 mm/min nyomtatási sebesség és 30%-os kitöltés kombinációja háromszor fordul elő a táblázatban, mivel három centrális pontja van a kísérleti tervnek.

Összehasonlítás alapként az ISO 2768-cL szabványból származó értékek szolgáltak, a c - durva (méretek esetén) és L - durva (geometriai tűrések esetén) pontossági osztályokból. A 3. táblázatban szerepelnek a mért értékek intervallumai és a hozzájuk rendelt tűrésmezők.



2. ábra. A fogaskerék modelljének homloknézete. Az egyenletekkel generált evolvens profil piros színnel jelenik meg



3. ábra. A tanulmányozott alak- és helyzetűrések. Az A bázist a furat tengelye képezi.

2. táblázat. A 15 fogaskerék nyomtatási paramétereit.

| No. | Rétegvastagság [mm] | Nyomtatási sebesség [mm/min] | Kitöltés [%] |
|-----|---------------------|------------------------------|--------------|
| 1 | 0.15 | 120 | 50 |
| 2 | 0.1 | 120 | 30 |
| 3 | 0.15 | 80 | 30 |
| 4 | 0.2 | 80 | 10 |
| 5 | 0.1 | 80 | 10 |
| 6 | 0.2 | 80 | 50 |
| 7 | 0.15 | 40 | 50 |
| 8 | 0.1 | 80 | 50 |
| 9 | 0.15 | 80 | 30 |
| 10 | 0.2 | 120 | 30 |
| 11 | 0.15 | 120 | 10 |
| 12 | 0.15 | 80 | 30 |
| 13 | 0.15 | 40 | 10 |
| 14 | 0.2 | 40 | 30 |
| 15 | 0.1 | 40 | 30 |

3. táblázat. A tanulmányozott jellemzők mért értékei.

| Jellemző | Mért érték [mm] | Tűrés* [mm] |
|--|-----------------|-------------|
| Fejkörátmérő-eltérés (ΔD_a) | -0.449 - -0.072 | ± 0.8 |
| Láb körátmérő-eltérés (ΔD_d) | -0.392 - -0.083 | ± 0.8 |
| Furatátmérő-eltérés (ΔD_b) | -0.126 - -0.01 | ± 0.5 |
| Síklapúság (FLAT1) | 0.013 - 0.06 | 0.1 |
| Hengeresség (CYLY1) | 0.064 - 0.149 | 0.5 |
| Merőlegesség (PERP1) | 0.132 - 0.44 | 0.6 |
| Koncentrikusság (furat-fejkör) (CONCEN1) | 0.009 - 0.315 | 0.5 |
| Koncentrikusság (láb-kör-fejkör) (CONCEN2) | 0.045 - 0.354 | 0.5 |

* - az ISO 2768-cL szerint.

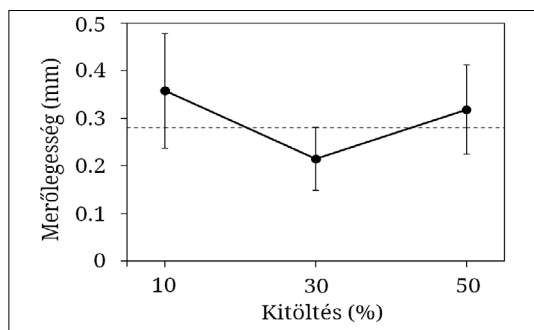
Mindhárom méret (D_a , D_d és D_b) kisebb volt, mint a nominális érték a 3D-s modellen. Ez a nyomtatást követő összehúzódásnak tudható be, és kompenzálni lehet azzal, hogy az alkatrészt 1-2%-kal nagyobbra tervezzük. Ami az alak- és helyzet-tűréseket illeti, a legnagyobb eltérések elérték a 0.3–0.45 mm-es tartományt, kivéve a síklapúságot, ahol az értékek egy nagyságrenddel kisebbek voltak. Mindazonáltal, az összes érték benne volt a tűrésmezőben.

A nyomtatási paraméterek befolyásának vizsgálata a méret- és formabeli eltérésekre a Box-Behnken kísérleti tervre alapuló válaszfelület-regresszióanalízis segítségével történt. Az eredményeken végzett ANOVA nem utalt szignifikáns hatásra. Az összes lineáris, négyzetes és interakciós tag közül mindössze a merőlegesség (PERP1) esetén jelentkezett statisztikai szignifikancia a 95%-os konfidencia-intervallumban, és ott is csak a kitöltés lineáris ($p = 0,048$), illetve négyzetes ($p = 0,03$) tagjainál. A regressziós modell módosított R-sq. értéke 51,04% volt (R-sq. = 82,51%), ami jó illeszkedés az adathalmazhoz, és arra utal, hogy a modell legalább részben leírja a rendszer viselkedését. Ez volt a legmagasabb az összes módosított R-sq. érték között, amelyek amúgy a 0–30% között mozogtak. Az eredmények azt mutatták, hogy a merőlegességtől való eltérés 30% kitöltésnél a legkisebb, és megnő a szélső értékekben (4. ábra). A főhatás abszolút értékét tekintve látható, hogy a merőlegességi hiba lecsökkent 0,35 mm-ről 0,21 mm-re, ahogy a kitöltés 10%-ról 30%-ra nőtt, majd ismét felment 0,32 mm-re 50% kitöltésnél. Egy lehetséges magyarázat erre a jelenségre az,

hogy magas kitöltési értékeken a darab belsejében több anyag található, és ezért a zsugorodás és az ezzel járó feszültségek is nagyobbak, ezért a darab deformálódik. Ami az alacsony kitöltésről illeti, a legyártott darab nagyrészt egy héjből áll, és ekkor a héjban keletkező hőjelenségek okozta feszültségek felülkerekednek az immár gyéren elhelyezett belső szerkezetek merevítő hatásán, ami ismét deformációhoz vezet.

Mindamellet, hogy csak a PERP1 esetében volt szignifikáns a kitöltés hatása (4. ábra), a főhatásbrák a többi jellemző nagy részénél is azt mutatták, hogy 30%-os kitöltésnél a legalacsonyabb a hiba. Ez azonban véletlenszerűen is létrejöhetett. Más kutatások azt mutatják, hogy általában a rétegvastagság növelése a deformációk növekedéséhez vezet [4]. Ezt azzal magyarázzák, hogy nagyobb rétegvastagságnál a zsugorodás is megnő, főként függőleges irányban [5], és emiatt a feszültségek is megnőnek. Az általunk kapott adathalmazban növekvő és csökkenő trend is megfigyelhető, de szignifikancia hiányában ez is betudható a véletlen művének. A nyomtatási sebességet illetően pedig a szakirodalomban közölt eredmények elmentmondásosak. Egyesek a sebesség növelésével a pontosság romlását [4], mások a javulását vélték felfedezni [6].

Egy másik tényező, amely nem került bele a tanulmányba, a nyomtatott darabok felületi érdessége. A rétegelés miatt kialakult érdességen kívül sorják is megjelennek, főként a függőleges felületeken (például a tengelyfuratban), amelyek akadályozhatják a mérőszondát. A fogaskerekek nem estek át semmilyen felületi kezelésem (a nagy sorják eltávolításán kívül, amelyek megakadályozták volna a mérést) azért, hogy a nyomtató által létrehozott felület minél jobban megőrződjön. Ezek a felületi elváltozások jelentős intenzitáshoz vezethetnek a mérési adathalmazba.



4. ábra. A PERP1 főhatásábrája

4. Következtetések

Következtetésként elmondható, hogy az FDM 3D-nyomtatási technológiával gyártott fogaske-rek alak-, méret- és helyzetpontossága az ISO 2768-cL szabvány által meghatározott intervallumokon belül volt. Továbbá azt is megállapítottuk, hogy az FDM-eljárás a tanulmányozott határértékeken belül egy robusztus gyártási eljárásnak mondható, hiszen szignifikáns hatása kizárólag a kitöltési tényezőnek volt a merőlegességre.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Gears, Drives and Speed Changers - Global Strategic Business Report. 2024.
https://www.researchandmarkets.com/reports/338745/gears_drives_and_speed_changers_global (letöltve: 2024. március)
- [2] Adams C. E.: *Plastics Gearing: Selection and Application*. 1st edition. CRC Press, New York, 1986.
- [3] Zhang Y., Mao K., Leigh S., Shah A., Chao Z., Ma G.: *A Parametric Study of 3D Printed Polymer Gears*. Int J Adv Manuf Technol, 107. (2020) 4481–4492.
<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05270-5>
- [4] Cappellini C., Borgianni Y., Maccioni L., Nezzi C.: *The Effect of Process Parameters on Geometric Deviations in 3D Printing with Fused Deposition Modelling*. Int J Adv Manuf Technol, 122. (2022) 1763–1803.
<https://doi.org/10.1007/s00170-022-09924-4>
- [5] Elkaseer A., Schneider S., Scholz S. G.: *Experiment-Based Process Modeling and Optimization for High-Quality and Resource-Efficient FFF 3D Printing*. Appl. Sci., 10. (2020) 2899.
<https://doi.org/10.3390/app10082899>
- [6] Agarwal K. M., Shubham P., Bhatia D., Sharma P., Vaid H., Vajpeyi R.: *Analyzing the Impact of Print Parameters on Dimensional Variation of ABS Specimens Printed Using Fused Deposition Modelling (FDM)*. Sensors International, 3. (2022) 100149.
<https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100149>



BETONFELÜLET OPTIKAI VIZSGÁLATA

OPTICAL INSPECTION OF CONCRETE SURFACE

Gobesz Ferdinánd-Zsongor,¹ Máthé Aliz Éva²

¹ Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Tartószerkezet-mechanikai Tanszék, Kolozsvár, Románia, go@mecon.utcluj.ro,

² Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Tartószerkezet-mechanikai Tanszék, Kolozsvár, Románia, aliz.mathe@mecon.utcluj.ro

Abstract

In order to obtain accurate and reliable data on the properties of concrete surfaces, professional testing methods and specialised equipment may be required. Optical inspection can be carried out as part of, or as preparation for, diagnostic testing. This paper describes a procedure that can be applied to microscopic inspection too, as it is based on data obtained from the use of a software package developed for biological digital image processing. As an example, the quantification of cavities on the side of a concrete cube specimen is described, step-by-step, but such a convenient procedure could also be used to evaluate other surface features.

Keywords: *concrete, surface, inspection, digital image processing.*

Összefoglalás

Ahhoz, hogy pontos és megbízható adatokat lehessen nyerni a betonfelületek jellemzőiről, szakszerű vizsgálati módszerekre és különleges berendezésekre lehet szükség. Az optikai vizsgálatok a diagnosztikai vizsgálatok részét vagy előkészítését képezhetik. A dolgozatban egy olyan eljárás kerül ismertetésre, mely mikroszkopikus vizsgálatra is alkalmazható, ugyanis egy biológiai digitális képfeldolgozásra fejlesztett programcsomag alkalmazásából származó adatokra támaszkodik. Példaként egy betonkocka próbatest oldalán levő üregek mennyiségi számítását ismertetjük, lépésenként, de ilyen kézenfekvő eljárással más felületi jellemzőket is értékelni lehetne.

Kulcsszavak: *beton, felület, vizsgálat, digitális képfeldolgozás.*

1. Bevezetés

A beton az egyik legelterjedtebb anyag az építőiparban, mivel előállításuk könnyű és költség-hatékony. A friss beton képlékeny, így szinte bármilyen formát fel tud venni, megszilárdulása után pedig nyomásterhelésre ellenálló és hosszú élettartamú lesz. Minősége főleg az alapanyagoktól (cement, víz, adalékanyag, ásványi és vegyi kiegészítő anyagok), a kivitelezési technológia megfelelőségétől, illetve a karbantartástól függ. A beton szilárdságát és tartósságát nemcsak az adalékanyag és a cement fajtája, hanem a cementpép szilárdulása után kialakuló cementkő pórustartalma (a pórusmérettel és a póruseloszlással) is

befolyásolja [1]. A megszilárdult beton porozitása nemcsak szilárdság és tartósság miatt fontos, hanem a fagyállóság, vízzáróság és a felületi kopás miatt is, az estleges esztétikai követelmények mellett. A cementek fajtáját a környezeti hatásoknak megfelelően kell kiválasztani, ügyelve a megfelelő víz-cement tényezőre [2].

A friss beton összetevőinek a minőségét engedélyezett laboratóriumokban végzett vizsgálatokkal ellenőrzik, a hatályos jogszabályok és szabványok [3] szerint.

A bedolgozott beton tulajdonságait is ellenőrizni kell [4], ezt általában próbatesteken végzik, de előfordulhat, hogy in situ vizsgálatok is szükségesek.

2. Betonfelület kinézete

A beton felületének optikai vizsgálata során általában a következő jellemzőket lehet értékelni:

- szín;
- egyenletesség;
- textúra;
- kopás;
- repedések;
- esetleges szennyeződések;
- hőmérséklet;
- nedvesség;
- porozitás.

A betonfelület színe és kinézete építészeti (esztétikai és funkcionális) szempontból lehet fontos. A felület egyenletessége a kivitelezés minőségéről tanúskodik, a simaság, érdeesség, esetleges szabálytalanságok főleg a közlekedési felületeknél fontosak, illetve olyan burkolatoknál, ahol a textúra is szerepet játszik. A felületi kopás és elhasználódás mértéke, az erózió vagy a felületi károsodások egyéb formái a karbantartás vagy javítás szükségességének a meghatározásában lényeges. A betonfelületen lévő repedések jelenléte, mérete és kiterjedése kulcsfontosságú lehet a beton szerkezeti épségének és tartósságának az értékeléséhez. Szintén a tartósságra utal a felületi kúszás vagy zsugorodás mértéke. A karbantartás és tisztítás szempontjából fontos a betonfelületen lévő esetleges szennyeződések, kivirágzás vagy biológiai szaporodás jelenlétére utaló foltok értékelése. A betonfelület hőmérsékletének mérése hasznos lehet a kötési és szilárdulási folyamat értékeléséhez, a lehetséges termikus igénybevételek azonosításához vagy az energiahatékonyság optimalizálásához szabályozott hőmérsékletű környezetben. A betonfelületen jelen lévő nedvesség mennyisége szintén a kötési folyamat értékelését segíti, de esetleges problémák, például vízszivárgások azonosítását is segítheti. A felület porozitási adatai segítenek értékelni a betonfelület permeabilitását, ami kulcsfontosságú a tartósság, valamint a betonfelület nedvességgel vagy vegyi behatolással szembeni ellenálló képességének az értékeléséhez.

Ahhoz, hogy pontos és megbízható adatokat lehessen nyerni a betonfelületek fent említett jellemzőiről, szakszerű vizsgálati módszerekre és különleges berendezésekre lehet szükség.

Az optikai vizsgálatok a diagnosztikai vizsgálatok részét vagy előkészítését képezhetik. Bár az ilyen vizsgálatoknak elég széles körű a palettája (pl. fotogrammetria, sztereoszkópia, felületi szkennelés, átvilágítás, sugárzás vizsgálat stb.)

dolgozatunkban csupán egy olyan digitális képfeldolgozásra alapuló eljárást ismertettünk, mely mikroszkopikus vizsgálatokból származik.

3. Digitális képfeldolgozás

3.1. Alapok

Optikai vizsgálatokkal csupán azokat a jellemzőket lehet értékelni, melyek optikailag érzékelhetők és mérhetők. Az optikai vizsgálat szemrevételezést, illetve optikai eszközök alkalmazására utal. A szemrevételezés sokszor pontatlan vagy elégtelen adatokkal szolgál, ezért ajánlott megfelelő optikai eszközök alkalmazásával kiegészíteni. Bár az analóg eszközök pontosak, a velük kapott adatokat nehezebben lehet kezelni, mint a numerikus adatokat. A digitális eszközök alkalmazásával könnyebben bővíthető az adatkezelés, például zavarok és zajok szűrésével, geometriai vagy morfológiai képtranzformációkkal, képszegmentálással stb.

A digitális fénykép elemi pontok (pixelek) halma, melyekhez általában 0–255 közötti színintenzitási értékek tartoznak. Színes képek esetén minden pixelhez több (képernyők RGB-komponensei esetén 3 érték, nyomtatók CYMK-komponensei esetén 4 érték), míg szürke skálájú képek esetén 1 érték szükséges. A fekete-fehér képek esetében nincsenek színintenzitási értékek, mert elég egy bit egy pixel jellemzésére. A digitális képfeldolgozás a jelfeldolgozás egy változata, mely során algoritmusokkal kezelik a képet alkotó adathalmazt.

A színek vagy a szürkesség intenzitási értékeinek az eloszlását hisztogrammal lehet ábrázolni. Amennyiben ez módosítható, a pixelek intenzitásainak a kiküszöbölésével a megjelenítés is változtatható.

3.2. Eljárás

Vizsgálataink során a szemrevételezés mellett digitális fényképezőgéppel készítettünk különféle betonfelületekről képeket, majd az így kapott képeket egy szoftver segítségével dolgoztuk fel, hogy könnyen értékelhető számszerű eredményekhez juthassunk.

Mivel a kutatásunkba építőmérnöki hallgatókat szerettünk volna bevonni, a digitális képfeldolgozáshoz olyan szoftvert kerestünk, mely alkalmazásához nem szükséges programozási nyelv ismeret. A digitális képfeldolgozáshoz előbb az Irfanview [5] szoftvert használtuk, mellyel könnyen ellenőrizhető a képminőség, és kivágható a vizsgálandó felület képe. Az így kapott digitális

képrést a Fiji [6, 7] szoftvercsomag segítségével vizsgáltuk, mely többek között lehetőséget nyújt a különféle foltok (részcsekék) jellemzőinek az értékelésre is. Elvileg a következő lépéseket alkalmaztuk:

- a megnyitott digitális kép színintenzitási értékeinek küszöbvágása;
- maszkgenerálás a megjelenített képre;
- vizsgálati beállítások kiválasztása;
- vizsgálat futtatása.

A program vizsgálati beállításainak megfelelően, két szöveges táblázatban kaptuk a számszerű értékeket (pixelméretek, minimális és maximális színintenzitási értékek, átlagok, eltérések stb.). A kapott pixelméretek természetesen az elemzett digitális kép pixeleinek összege alapján kellett arányosan valós felületméreteké alakítani.

Fontos megjegyezni, hogy megnyitott kép minősége és a színintenzitások küszöbértékének a vágása (amely igencsak befolyásolja a maszk generálását) döntően kihat a számszerű eredmények mennyiségére és pontosságára. A vizsgálati eljárás részletesebb ismertetését a következő példával tesszük.

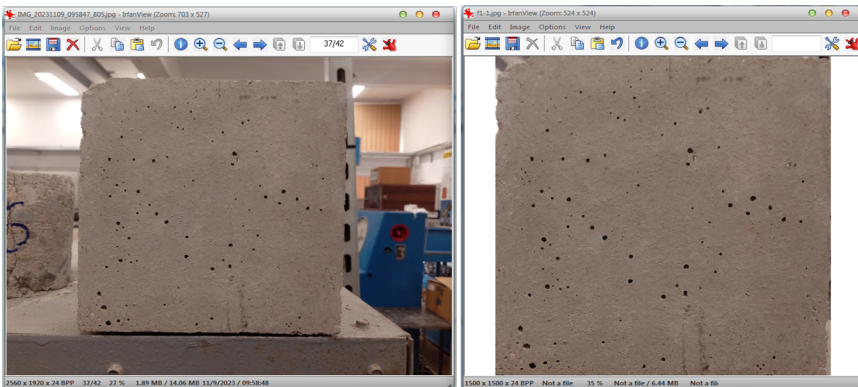
3.3. Alkalmazási példa

Gyakorlati órákon az építőmérnöki hallgatók betonkocka próbatesteket öntenek, majd nyomószilárdsági tesztnek vetik alá ezeket.

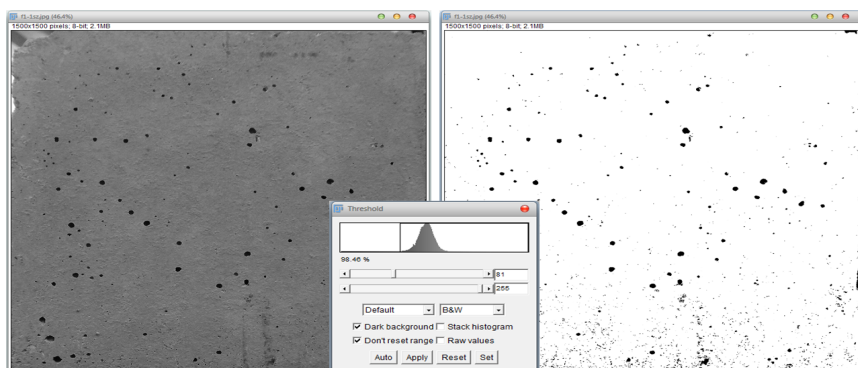
Egy ilyen, C20/25-ös betonból kiöntött kocka oldalát fényképeztük le, miután a felülete szín és textúra szempontjából megfelelőnek tűnt. Mivel 150 mm-esek a kocka élei, a csak az oldalt ábrázoló, kivágott, digitális képrést 1500×1500 pixelre méreteztük át a számítások egyszerűsítése végett (1. ábra). A vizsgálat céljaként a kocka oldalán látható üregek számszerű értékelését választottuk.

A kivágott és átméretezett kép megnyitása után 8-bit szürke árnyalatúvá változtattuk a Fiji programban, majd a hisztogram segítségével az intenzitások küszöbértékét vágással változtattuk (2. ábra). A megfelelő küszöbvágás beállítása kulcsfontosságú az utána látható képrészletek szempontjából.

A program mérési beállításai közül ki lehet választani a foltok felületei mellett a kerületeiket, árnyalataikat és sok más jellemzőjét is, de jelen esetben csupán az üregek számára és méreteire



1. ábra. A betonkocka laborbeli fényképe (balra) és az oldal kivágott, átméretezett képe (jobbra)



2. ábra. A szürke árnyalatú kép (balra) és a hisztogramos küszöbvágás (középen) utáni kép (jobbra)

szorítottunk. A küszöbvágás után fekete-fehér maszkot generáltunk, és az értékeléshez számozott körvonalak fedési ábrázolását választottuk (3. ábra). Az automatikusan generált maszk részletei a küszöbvágás mértékétől függenek, alacsonyabb küszöbértékkel kevesebb és kisebb felületű foltok lesznek, míg magasabb küszöbértékkel a foltok nagyobbak lesznek, és az apróbb zajok is megjelennek.

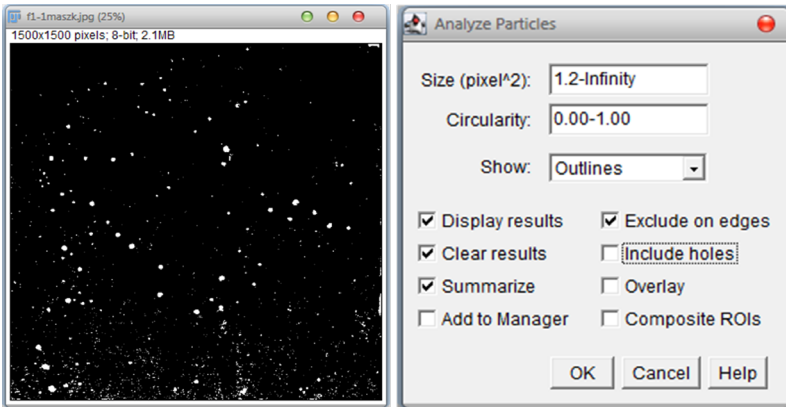
A betonkocka töredezett élei miatt figyelmen kívül hagytuk a maszk szélein levő foltokat. A számozott körvonalak átfedési rajza mellett a program két táblázatban nyújtotta a pixelmérés eredményét: egy összegzésben meg egy részletes táblázatban (mindkettőt vesszővel tagolt szöveges adattömbként), ahogy a 4. ábrán van érzékelve. A részletes táblázat tartalmazza a foltok körvonalainak a számozását és pixelméreteit.

3.4. Számszerű eredmények

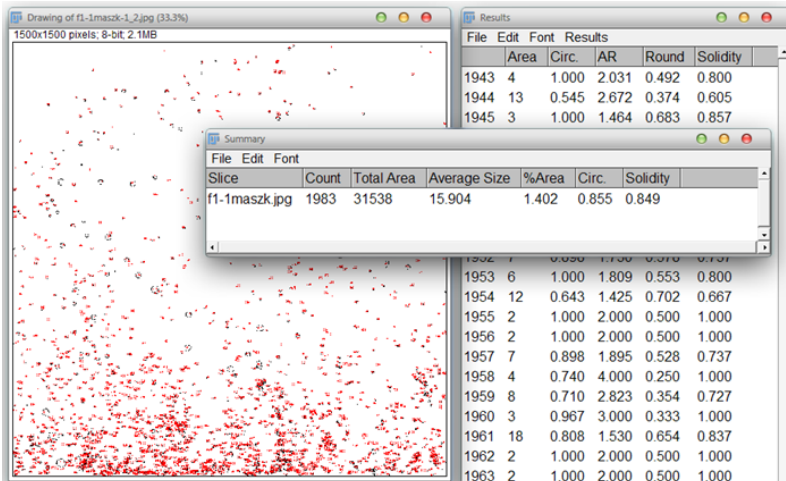
A kapott pixelmérési eredmények alapján ezek után ki lehet számítani a foltok valós méreteit, tudván, hogy az 1500×1500 pixelméretű kép egy 150×150 cm-es oldalnak felel meg (tehát $1 \text{ pixel} = 0,1 \text{ mm} \times 0,1 \text{ mm}$, azaz $0,01 \text{ mm}^2$). A részletes mérési táblázatból így ki lehet számítani minden egyes bejelölt folt méretét, illetve igények szerinti statisztikai jellemzőket az észlelt foltokra (mérétek szerint is lehet szűrni vagy csoportosítani).

A képfeldolgozás eredményeként kapott adatok átdolgozása után az üregek összesített felülete $3,1538 \text{ cm}^2$, ami a 225 cm^2 -es oldalfelület $1,40\%$ -át teszi ki.

A képfeldolgozásból származó adatok természetesen a vizsgálathoz megadott paraméterektől is függenek, nemcsak a feldolgozandó digitális kép minőségétől. A 3. ábra jobb oldalán látható beál-



3. ábra. A bitmaszk (balra) és a foltmérési ablak (jobbra)



4. ábra. A számozott körvonalak átfedési rajza és a táblázatként kínált eredmények.

lítással (1,2–végtelen pixel²) 1983 darab folt (ügynevezett részecske) lett felismerve, de a program alapbeállításával (0–végtelen pixel²) 2869 darab folt lett volna. Amennyiben az alapbeállításokkal dolgoztunk volna, a 2869 folt összterülete 32 424 pixel, azaz 3,2424 cm²-et tett volna ki, ami a betonkocka 225 cm²-es oldalfelületének 1,44%-át jelenti.

A részletes eredmények lementett szövegállományában szűrni lehet utólag a pixelfoltok méretei szerint az adatokat, és így jól érzékelhető a vizsgálat foltméretre vonatkozó beállításának a hatása. Az **1.** és **2. táblázat**oknak az első oszlopában „m” a számításba vett minimális pixelméret, a második oszlopában a minimális pixelmérettől nagyobb foltok darabszáma, a harmadik és negyedik oszlopában pedig a darabszámnak megfelelően összesített felület (pixelekben, illetve cm²-ben), az utolsó oszlopában pedig a 225 cm²-es betonfelülethez viszonyított százalékos érték szerepel.

1. táblázat. Az alapbeállításával (0–végtelen pixel²) kapott értékek

| m | Foltok | Felület | | |
|---|--------|---------|--------------------|------|
| | | [pixel] | [cm ²] | [%] |
| 0 | 2869 | 32 424 | 3,2424 | 1,44 |
| 1 | 1983 | 31 538 | 3,1538 | 1,40 |
| 2 | 1484 | 30 540 | 3,054 | 1,36 |
| 3 | 1206 | 29 699 | 2,9699 | 1,32 |
| 4 | 997 | 28 863 | 2,8863 | 1,28 |
| 5 | 822 | 27 900 | 2,79 | 1,24 |

2. táblázat. A példabeli beállításával (1,2–végtelen pixel²) kapott értékek

| m | Foltok | Felület | | |
|---|--------|---------|--------------------|------|
| | | [pixel] | [cm ²] | [%] |
| 0 | 1983 | 31 538 | 3,1538 | 1,40 |
| 1 | 1983 | 31 538 | 3,1538 | 1,40 |
| 2 | 1484 | 30 540 | 3,054 | 1,36 |
| 3 | 1206 | 29 699 | 2,9699 | 1,32 |
| 4 | 997 | 28 863 | 2,8863 | 1,28 |
| 5 | 822 | 27 900 | 2,79 | 1,24 |

Könnyen észrevehetőek az azonos értékek a **2. táblázat** első két sorában, jelezve, hogy ez esetben nem voltak 1 pixel nagyságú pontok észlelve a vizsgálat által. A bemutatott példában alkalmazott paraméterrel gyakorlatilag ki lettek szűrve az 1 pixel nagyságú foltok, így a második sortól lefelé

mindkét táblázatban azonos foltszám és felületi értékek láthatók.

A betonkocka oldalát ábrázoló kivágott kezdeti képek az átméretezése 1500×1500 pixel nagyságra vélhetően nem befolyásolta negatív módon az eredményeket, mivel eredetileg nagyobb méretű volt.

4. Következtetések

A megfelelő eredmények kiválasztásához érzékenységi tesztet is lehet futtatni. A digitális képfeldolgozások során sok esetben az adatok leszűkítése az egyik cél. Minél kevesebb adatot kell kezelni, annál gyorsabb és egyszerűbb az eljárás.

Végezetül felmerülhet az a kérdés, hogy mely eredmények helyesek, milyen paraméterekkel kell dolgozni? A helyes választ erre csakis az eljárást alkalmazó szakértelme és tapasztalata alapján lehet megadni, a megfogalmazott feladat függvényében.

A bemutatott optikai vizsgálat műszaki eszköze a digitális képfeldolgozásra alapozódik. Bár a kutatás során használt programcsomagot biológiai digitális képfeldolgozásra készítették, ez nem korlátozza más szakterületen való alkalmazását. Az optikai vizsgálat digitalizálása és a számítástechnikai eszközök alkalmazása számos előnyt kínál, a számszerű adatok kezelése pedig sok lehetőséget nyújt, de nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy az eredmények a bevitt adatokból születnek.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Nehme S. G.: *A porozitás hatása a beton tartósságára*. In: *Betonszerkezetek tartóssága*. (Szerk.: Balázs Gy., Balázs L. Gy.). Műegyetemi Könyvkiadó, Budapest, 2008. 12–140.
- [2] Kausay T.: *Beton. A Betonszabvány néhány fejezetének értelmezése*. Mérnöki Kamara Nonprofit Kft., Budapest, 2013. 47–52.
- [3] ASRO, Catalog standarde (ICS). SR EN 12350-1...12. <https://magazin.asro.ro/Search?q=EN+12350&ics=&l=&sp=1> (letöltve: 2023. október 31.).
- [4] ASRO, Catalog standarde (ICS). SR EN 12390-1...19. <https://magazin.asro.ro/Search?q=S-R+EN+12390&ics=&l=&sp=1> (letöltve: 2023. október 31.).
- [5] Irfan Skiljan: Irfanview Graphic Viewer. <https://www.irfanview.com/> (letöltve: 2023. október 4.).
- [6] Schindelin J., Arganda-Carreras I., Frise E. et al.: *Fiji: an Open-Source Platform for Biological-Image Analysis*. *Nature Methods* 9/7. (2012) 676–682. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2019>
- [7] Fiji: *ImageJ, with "Batteries Included"*. <https://fiji.sc/> (letöltve: 2023. október 4.).



LEFEJTŐ CSIGAMARÓ MODELLEZÉSE EGYENES FOGÚ LÉCBŐL

GEAR HOB BASE WORM MODELLING FROM A STRAIGHT TOOTHED GENERATING RACK

Hodgyai Norbert,¹ Mircea Viorel-Drăgoi,² Máté Márton³

¹ Transilvania University of Braşov, Faculty of Technological Engineering and Industrial Management, Department of Manufacturing Engineering, hodgyai@ms.sapientia.ro

² Transilvania University of Braşov, Faculty of Technological Engineering and Industrial Management, Department of Manufacturing Engineering, dragoi.m@unitbv.ro

³ Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia, mmate@ms.sapientia.ro

Abstract

The precision of a gear realized by hobbing is mainly influenced by the precision of the base worm, the adequate form of the rake face and the number of resharpenings. Gering theory states that the base worm of a gear hob must be of involute type. Despite of this, manufacturing technology often admits a convolute worm as gear hob base worm. Due to the rake face grinding technology, there appears a difference between the theoretical and the real surface. On the other hand, the profile modification of the cutting edges occurs due to the re-sharpening. As a result, the cutting edges cannot reproduce that initial basic worm surface from which the gear hob was derived. In our opinion, the computing of the generating surfaces of the basic worm is still an unsolved problem. This paper deals with the study of a worm derived from a straight toothed generating rack. The incidence of an involute worm and that developed from the generating rack is investigated.

Keywords: gear hob, profile error, base worm, machining, generating rack.

Összefoglalás

A simító csigamaróval gyártott fogazat pontosságát főként a származtató csiga pontossága, a megfelelő homlokl felület kialakítása és az újraélezések száma határozza meg. A generáláselmélet szerint a csigamarót evolvens csigából származtatják, a gyakorlatban ennek ellenére nagyon gyakran használnak konvolut alapcsigát. A csigamaró homlokl felület-kialakítási technológiája eredményeként az elméleti és a gyakorlati felület között eltérés keletkezik. Az élek az utánélezések következtében torzulnak, így a csigamaró már nem adja vissza az elméleti alapcsigát, amelyből származtattuk. Véleményünk szerint a csigamaró-származtató alapcsiga típusmeghatározásának a kérdése még nyitott kutatási terület. Jelen dolgozatban a gyártóléccel generált csiga profilját tanulmányozzuk. A dolgozatban numerikusan vizsgáljuk, hogy az egyenes vágóélű származtató léccel lefejtett csigamaró alapcsigája megegyezik-e az elméletben tárgyalt evolvens alapcsigával.

Kulcsszavak: csigamaró, profilhiba, alapcsiga, gyártás, gyártóléc.

1. Bevezetés

A csigamaró a fogaskerékgyártás legtermelékenyebb szerszáma. A csigamarókat három fő csoportra oszthatjuk: nagyoló, félsimító és simító csigamarókra. A simító csigamarók monolit szer-

kezetűek, pontosságukat a szabvány [1] három osztályba sorolja, pontosság szerint csökkenő sorrendben, melyeket AAA, AA és A jelöléssel különböztet meg [2, 3]. Az újabb szabvány [4] 2020-ban jelent meg, amelyben a simító szerszámokat négy

kategóriába sorolják, amelyek pontosságuk szerint csökkenő sorrendben a következők: 4A, 3A, 2A és A.

A csigamarók pontosságát jelentősen befolyásolja a származtató csiga típusa és ennek pontos megmunkálása. A csigamaró hagyományos szerzőgépeken történő megmunkálásakor az elméleti evolvens alapcsiga helyett konvolut csigát használnak, mivel ez utóbbi gyártása egyszerűbb, és nagyobb termelékenységgel megvalósítható [5].

A csigamaró magas pontossági osztályának eléréséhez és a vágóélek éltartamának optimalizálása érdekében a monolit csigamarókat csavar-homlokfelülettel készítik [6]. A csavar-homlokfelület gyártására használt beállítás matematikai modelljének numerikus ellenőrzésekor alámetszést figyelhettünk meg [7, 8].

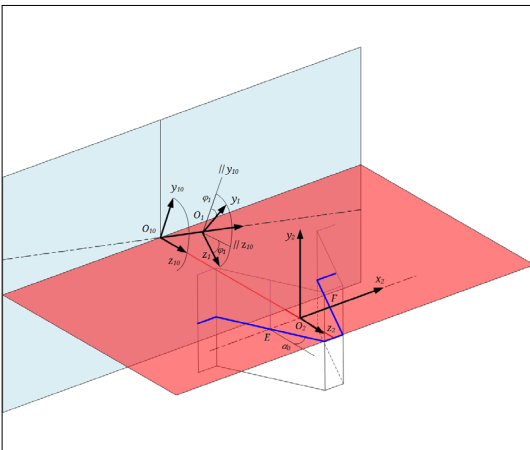
A dolgozatban numerikusan vizsgáljuk, hogy az egyenes vágóélű származtató léccel lefejtett csigamaró alapcsigája megegyezik-e az elméletben tárgyalt evolvens alapcsigával.

2. A matematikai modell felépítése

2.1. A geometriai modell felépítése

A generált csiga menetszárnyfelülete a fogasléc (generáló lécc) fogárka által burkolt felület. A felületek és a csatolt koordináta-rendszerek kölcsönös helyzete az 1. ábrán látható. A csiga felületeinek származtatásához a generáló lécc fogarkát az $O_2X_2Y_2Z_2$ koordináta-rendszerhez kötjük.

A csigához kötött koordináta-rendszer az $O_1X_1Y_1Z_1$ rendszer, melynek kezdeti helyzetét az $O_1^0X_1^0Y_1^0Z_1^0$ jelöli. A csiga O_1X_1 tengelye a fogasléc haladási irányával a λ_0 - szöget zárja, mely meg-



1. ábra. A geometriai modell felépítése

egyezik az osztóhengeri csavarvonal dőlésszögével, azért, hogy az osztóhengeren levő érintkezési pontban a csavarvonal érintője a lécc fogirányvonalával egybeessen. A kölcsönös mozgás során a csiga a saját, O_1X_1 tengelye mentén p paraméterű csavarmozgást végez. Tengelye körüli elfordulásának szögét φ_1 -gyel jelöljük. A származtató fogasléc fogárokfelületeinek generáló egyenesei kék színnel vannak kiemelve. A generáló lécc profil-szögét a szabványos $\alpha_0 = 20^\circ$ értékre választjuk.

A csiga felületeinek kiszámításához föl kell írunk a fogasléc és a csiga koordináta-rendszerei közötti transformációt, melynek egyenlete az,

$$\underline{r}_1 = \mathbf{M}_{11^0} \cdot \mathbf{M}_{1^0_2} \cdot \underline{r}_2 \tag{1}$$

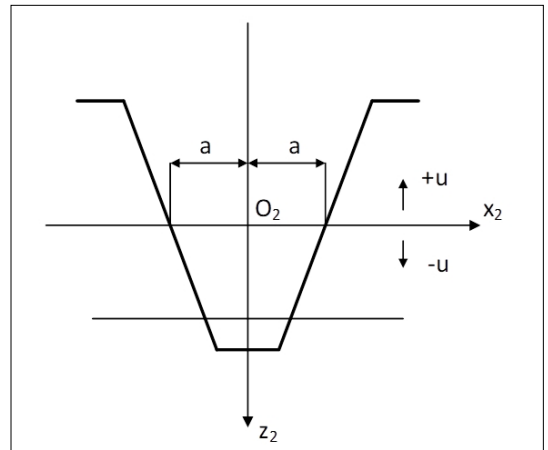
ahol

$$\mathbf{M}_{11^0} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -p\varphi_1 \\ 0 & \cos\varphi_1 & \sin\varphi_1 & 0 \\ 0 & -\sin\varphi_1 & \cos\varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{2}$$

$$\mathbf{M}_{1^0_2} = \begin{pmatrix} \cos\lambda_0 & -\sin\lambda_0 & 0 & 0 \\ \sin\lambda_0 & \cos\lambda_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r_{10} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3}$$

A generáló lécc profilját a következő, parametrikus 2. ábrán adjuk meg:

$$\begin{cases} x_2(u, j) = j(a + u \operatorname{tg} \alpha_0) \\ y_2(v) = v \\ z_2(u) = -u \end{cases}, \quad a = \frac{\pi m}{4} \tag{4}$$



2. ábra. A generáló profil ábrázolása

A j paramétert a jobb, illetve a bal oldali származtató felület felírásának összevonásáért alkalmazzuk: a bal oldali felület esetére $j = -1$, míg a jobb oldalra $j = +1$. A jobb vagy bal oldalt a **2. ábrán** a z_2 tengely irányításával ellentétesen, azaz a csiga felé nézve állapítjuk meg.

2.2 A kapcsolódási egyenlet megoldása

A kapcsolódási egyenletet a [Litvin] szerint vektoralakban írjuk fel, és a léchez kötött S_2 koordináta-rendszerben oldjuk meg:

$$\mathbf{v}_2^{(12)} \cdot \mathbf{n}_2^{(2)} = 0 \quad (5)$$

A relatív sebességvektort a

$$\mathbf{v}_2^{(12)} = \boldsymbol{\omega}_{o_2}^{(1)} \times (\mathbf{r}_2 - \mathbf{A}) + p\varphi_1 \mathbf{i}_1 \quad (6)$$

egyenlettel fejezzük ki, ahol

$$\underline{\boldsymbol{\omega}_{o_2}^{(1)}} = \begin{pmatrix} \cos \lambda_0 \\ -\sin \lambda_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

a csiga szögsebessége,

$$\underline{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} p\varphi_1 \cos \lambda_0 \\ -p\varphi_1 \sin \lambda_0 \\ -r_{10} \end{pmatrix} \quad (8)$$

pedig a csigához kötött rendszer origójának helyvektora a léchez kötött rendszerben. A behelyettesítések és a számítások elvégzése után a relatív sebességvektor a következő alakot ölti:

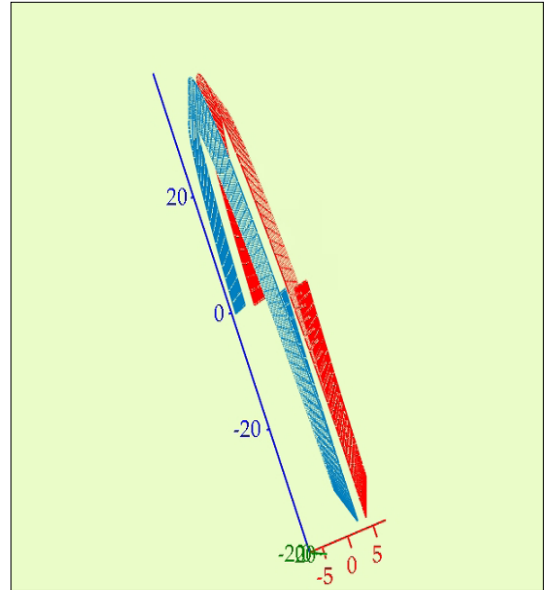
$$\mathbf{v}_2^{(12)} = \begin{pmatrix} -(r_{10} - u) \sin \lambda_0 + p \cos \lambda_0 \\ -(r_{10} - u) \cos \lambda_0 - p \sin \lambda_0 \\ j(a + u \operatorname{tg} \alpha_0) \sin \lambda_0 + v \cos \lambda_0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

A normális vektor alakja

$$\mathbf{n}_2^{(2)} = \begin{pmatrix} j \cos \alpha_0 \\ 0 \\ \sin \alpha_0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Behelyettesítvén a (9) és (10) vektorokat az (5) egyenletbe, $\Phi(u, v) = 0$ skaláregyenlethez jutunk, melyből a következő paraméter-összefüggést állítjuk elő:

$$v(u) = -j \operatorname{tg} \lambda_0 \left(a + \frac{u}{\sin \alpha_0 \cos \alpha_0} \right) \quad (11)$$



3. ábra. A csiga profiljának ábrázolása

A csiga felületének egyenleteit az (1) mátrixegyenletből számoljuk ki, a (11) összefüggés bevetésével:

$$\begin{cases} x_1(u, \varphi_1; j) = j \left(\frac{a}{\cos \alpha_0} + u \frac{\sin^2 \alpha_0 \cos^2 \lambda_0 + \sin^2 \lambda_0}{\sin \alpha_0 \cos \alpha_0 \cos \lambda_0} \right) \\ y_1(u, \varphi_1; j) = -j u \frac{\sin \lambda_0}{\operatorname{tg} \alpha_0} \cos \varphi_1 + (r_{10} - u) \sin \varphi_1 \\ z_1(u, \varphi_1; j) = j u \frac{\sin \lambda_0}{\operatorname{tg} \alpha_0} \sin \varphi_1 + (r_{10} - u) \cos \varphi_1 \end{cases} \quad (12)$$

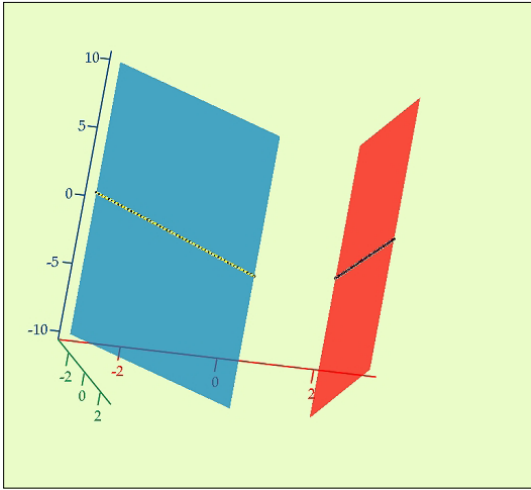
A csiga menetszárnyfelületeit MathCad-környezetben ábrázolva, a **3. ábrán** láthatjuk, $m = 5$ mm-es modul és $\lambda_0 = 2^\circ$ osztóhengericsavarvonal-dőlésszöggel.

3. A csiga profiljának vizsgálata

3.1. A kontaktgörbe meghatározása

A származtató lécz felületein a kontaktgörbe parametrikus egyenleteit megkapjuk, ha a (11) összefüggést a származtató felületek (4) egyenleteibe helyettesítjük:

$$\begin{cases} x_2(u, j) = j(a + \operatorname{tg} \alpha_0) \\ y_2(u, j) = -j \operatorname{tg} \alpha_0 \left(a + \frac{u}{\sin \alpha_0 \cos \alpha_0} \right) \\ z_2(u, j) = -u \end{cases} \quad (13)$$



4. ábra. A csiga felületét generáló felületek és a kon-
taktgörbék ábrázolása

3.2. A csiga homlokmetzeti profiljának meghatározása

A csiga egyenleteit az egyszerűbb számítás érdekében hengerkoordinátákba vezetjük át.

A csiga parametrikus egyenleteinek egyszerűsítése érdekében bevezetjük az alábbi jelöléseket:

$$a_x = \frac{a}{\cos \lambda_0}; \quad b_x = \frac{\sin^2 \alpha_0 \cos^2 \lambda_0 + \sin^2 \lambda_0}{\sin \alpha_0 \cos \alpha_0 \cos \lambda_0}; \quad (14)$$

Ezzel a csiga (12) parametrikus egyenletei az alábbi, egyszerűsített alakban írhatók fel:

$$\begin{cases} x_1(u, \varphi_1; j) = j(a_x + ub_x) - p\varphi_1 \\ y_1(u, \varphi_1; j) = -j \frac{\sin \lambda_0}{\operatorname{tg} \alpha_0} u \cos \varphi_1 + (r_{10} - u) \sin \varphi_1 \\ z_1(u, \varphi_1; j) = j \frac{\sin \lambda_0}{\operatorname{tg} \alpha_0} u \sin \varphi_1 + (r_{10} - u) \cos \varphi_1 \end{cases} \quad (15)$$

A csiga parametrikus egyenletei hengerkoordinátákban a következő alakot öltik:

$$\begin{cases} \rho(u) = (y_1^2 + z_1^2)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{\sin^2 \lambda_0}{\operatorname{tg}^2 \alpha_0} u^2 + (r_{10} - u)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ \theta(u) = \operatorname{arctg} \frac{z_1}{y_1} = -\operatorname{tg} \left(\varphi_1 + \operatorname{arctg} \left(\frac{r_{10} - u}{u} \frac{\operatorname{tg} \alpha_0}{\sin \lambda_0} \right) \right) \\ x_1(u, \varphi_1; j) = j(a_x + ub_x) - p\varphi_1 \end{cases} \quad (16)$$

A csiga tengelyre merőleges szelvényét megkapjuk, ha a menetszárny felületeit elmentesszük egy,

a tengelyére merőleges síkkal, legyen ez, a minél egyszerűbb eredmények elérése érdekében, az $y_1 O_1 z_1$ sík:

$$x_1 = 0 \Rightarrow \varphi_1 = j \frac{a_x + ub_x}{p} \quad (17)$$

A φ_1 (17) függvényének a (16) egyenletekbe való helyettesítése és a számítások elvégzése után megkapjuk a keresett szelvény poláregyenleteit:

$$\begin{cases} \rho(u) = \left(\frac{\sin^2 \lambda_0}{\operatorname{tg}^2 \alpha_0} u^2 + (r_{10} - u)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ \theta(u) = - \left(j \frac{a_x + ub_x}{p} + \operatorname{arctg} \left(\frac{r_{10} - u}{u} \frac{\operatorname{tg} \alpha_0}{\sin \lambda_0} \right) \right) \end{cases} \quad (18)$$

A (18) parametrikus egyenletek vizsgálata rávet arra, hogy a léccel kölcsönös burkolásban levő csiga nem lehet Arkhimédész-féle csiga, mivel egyrészt a $\theta(u)$ függvény $u(\theta)$ inverzét nem lehet kifejezni explicit módon, és ha lehetne, akkor sem lenne lineáris. Másrészt, a $\rho(\theta)$ függvény u -ban négyzetes, így kizárt, hogy a $\rho(\theta)$ polársugárfüggvény a θ polárszögváltozóban lineáris legyen. Következésképpen feltételezésünk, miszerint a burkolt csiga nem Arkhimédész-típusú, bizonyított.

3.3. A csiga alkotóegyenesei és a csiga forgástengelye közötti viszonyok vizsgálata

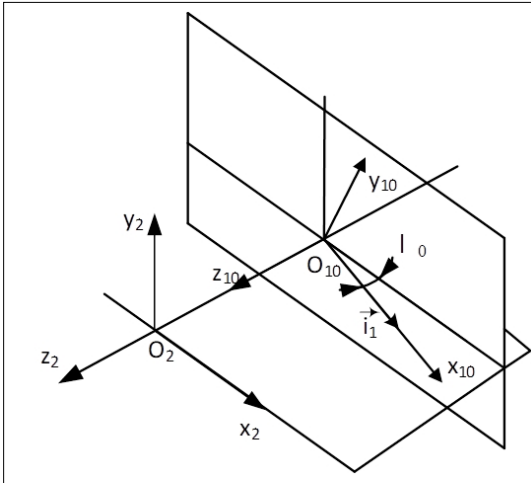
Az evolvens csiga ismert tulajdonsága, hogy két olyan egyenes csavarmozgásából generáljuk a menetszárny felületét, melyek a csiga r_{1b} sugarú alaphengerét érintő két, párhuzamos síkba illeszkednek. Az igazoló számítást a származtató léchez kötött, S_2 koordináta-rendszerben végezzük el. A (13) kifejezésekkel meghatározott egyenesek irányítványzóit u szerinti deriválással kapjuk:

$$\dot{\underline{i}}_2 = \begin{pmatrix} j \operatorname{tg} \alpha_0 \\ -j \left(\frac{\operatorname{tg} \lambda_0}{\sin \alpha_0 \cos \alpha_0} \right) \\ -1 \end{pmatrix} \quad (19)$$

A csigatengely irányegységvektora az S_2 koordináta-rendszerben (5. ábra):

$$\underline{i}_2^{(1)} = \begin{pmatrix} \cos \lambda_0 \\ -\sin \lambda_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

A közös merőleges irányvektorát a (19) és (20) vektorszorzataként kapjuk:



5. ábra. A csigatengely egységvektorának ábrázolása

$$\underline{w} = [\tilde{\mathbf{i}}_2^{(1)}] \dot{\underline{r}}_2 = \begin{pmatrix} \sin \lambda_0 \\ \cos \lambda_0 \\ -j \frac{\sin \lambda_0}{\operatorname{tg} \alpha_0} \end{pmatrix} \quad (21)$$

A w vektor hosszúsága:

$$\begin{aligned} |\underline{w}| &= \sqrt{\sin^2 \lambda_0 + \cos^2 \lambda_0 + \frac{\sin^2 \lambda_0}{\operatorname{tg}^2 \alpha_0}} = \\ &= \frac{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha_0 + \sin^2 \lambda_0}}{\operatorname{tg} \alpha_0} \end{aligned} \quad (22)$$

A közös normális irány egységvektorainak koordinátái az S_2 rendszerben, a (21)-ből és (22)-ből azonnal következnek:

$$\begin{aligned} w_{ev2} &= \frac{\sin \lambda_0 \operatorname{tg} \alpha_0}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha_0 + \sin^2 \lambda_0}} \\ w_{ev2} &= \frac{\cos \lambda_0 \operatorname{tg} \alpha_0}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha_0 + \sin^2 \lambda_0}} \\ w_{ev2} &= -j \frac{\sin \lambda_0}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha_0 + \sin^2 \lambda_0}} \end{aligned} \quad (23)$$

Továbbá szükséges a két kitérő egyenes egy-egy pontját fölvenni. A csiga tengelyén az origót veszünk fel, melynek koordinátái az S_2 -ben

$$O_1 = (0 \quad 0 \quad r_{10}) \quad (24)$$

A két kapcsolódó egyenesen az $u=0$ értékre megkapjuk az O_2x_2 tengelyre illeszkedő pontokat:

$$\underline{A}_j = \underline{r}_2(0) = \begin{pmatrix} ja \\ -ja \operatorname{tg} \lambda_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (25)$$

A (24) és (25) képletekkel megadott pontokra a

$$\underline{P}_j = \overline{O_1 A_j} = \begin{pmatrix} -ja \\ ja \operatorname{tg} \lambda_0 \\ r_{10} \end{pmatrix} \quad (26)$$

vektorokat illesztjük, melyeknek a w vektor egységvektorával való skalárszorzatuk adja meg a két érintkező egyenes és a csiga tengelye közötti távolságot. A (23) és (26) képletek segítségével, a távolságok értéke

$$d_j = \left| \underline{P}_j \cdot \frac{\underline{w}}{|\underline{w}|} \right| = \frac{r_{10} \sin \lambda_0}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha_0 + \sin^2 \lambda_0}} \quad (27)$$

A szakirodalomból ismert, hogy a fogasléc normál és homlokmetszeti kapcsolószögei közötti összefüggés jelesen $\operatorname{tg} \alpha_{or} = \operatorname{tg} \alpha_0 / \cos \beta$, innen pedig

$$\cos \alpha_{or} = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{or}}} = \frac{\cos \beta}{\sqrt{\cos^2 \beta + \operatorname{tg}^2 \alpha_{or}}} \quad (28)$$

Tudván, hogy a csiga egy annyira dőlt fogú fogaskerékkel ekvivalens, melynek fogszáma a csiga bekezdéseinek számával egyenlő, dőlésszöge pedig az osztóhengericsavarvonal-dőlésszög pótszöge, azaz $\beta = \pi/2 - \lambda_0$, a (28) képlet a

$$\cos \alpha_{or} = \frac{\sin \lambda_0}{\sqrt{\cos^2 \lambda_0 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{or}}} \quad (29)$$

alakot ölti. A (27) és (29) képletek együttes vizsgálatából kikövetkeztethető, hogy a csiga és a generáló fogasléc érintkezési egyenseinek a csiga tengelyétől való távolságai egyenlők, és egyenlők a jól ismert $r_{10} \cos \alpha_0$ értékkel, ami, az evolvens trigonometria első alapösszefüggése [Szeniczai] értelmében, az alapkör sugarával egyenlő.

A fenti bizonyítás alapján kijelenthető, hogy az egyenes fogú léccel kapcsolódó csiga evolvens csiga.

4. Következtetések

A gyártóléc által generált csiga profiljának vizsgálata során megállapítottuk, hogy a csiga evolvens profilú.

A csigát generáló síkfelületeken egyenes kontaktusgörbéket találtunk.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] [DIN 3968] Tolerances for Single-start Hobs for Involute Spur Gears.

- [2] Hollanda D.: *Aschiere si scule*. Reprografia I.I.S. Tg. Mures, 1982.
- [3] Máté M.: *Hengeres fogaskerekek gyártószerszámjai*. MTF 12. Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2016.
<https://doi.org/10.36242/mtf-12>
- [4] [ISO 4468 : 2020] Gear hobs – Accuracy Requirements.
- [5] Radzevich, S. P.: *Gear Cutting Tools: Fundamentals of Design and Computation*. CRC Press; 1st edition, 2010.
- [6] Radzevich, S. P.: *On the Accuracy of Precision Involute Hobs: An Analytical Approach*. Journal of Manufacturing Processes, 9/2. (2007) 121–136.
- [7] Hodgyai N., Máté M., Tolvaly-R. F., Drăgoi M. V., *Peculiarities of the Grinding Process of a Gear Hob Helical Rake Face*. Acta Universitatis Sapientiae Electrical and Mechanical Engineering, 13. (2021) 39–51
<https://doi.org/10.2478/auseme-2021-0004>.
- [8] Máté M., Tolvaly-R. F., Hodgyai N., Egyed-F. E.: *A csigamaró-homlokfelület köszörülésének valós modellje* („The Realistic Model of the Gear-Hob Rake face Grinding”) In: Barabás I. (szerk.) *XXX. Nemzetközi Gépészeti Konferencia – OGÉT 2022, Kolozsvár*. EMT, 73–79.



HŐRE LÁGYULÓ POLIMEREK FRÖCCSÖNTÉSI ÜREGNYOMÁSÁNAK MÉRÉSÉRE ALKALMAS BERENDEZÉS TERVEZÉSE

DESIGN OF A CAVITY PRESSURE MONITORING SYSTEM FOR PLASTIC INJECTION MOLDING

Keresztes Kristóf,¹ Gergely Attila Levente²

¹ Sapiientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia. keresztes.kristof@student.ms.sapiientia.ro

² Sapiientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia. agergely@ms.sapiientia.ro

Abstract

This work aims to create an instrument that allows the measurement of cavity pressure during plastic injection molding. The designed device is intended to contribute to the equipment inventory of the Polymer Technology Laboratory at Sapiientia EMTE, Faculty Târgu Mureș. The design criteria were the ease of mounting and use. The system was implemented with two load cells, two HX711 amplifiers, an ESP32-based microcontroller and a corresponding computer user interface. The user interface was developed using National Instruments LabVIEW program and finalized as a stand-alone application. During the design steps, attention was also paid to the practical applicability of the system.

Keywords: injection molding, cavity pressure, microcontroller, LabVIEW, load cell.

Összefoglalás

A dolgozat célja egy eszköz létrehozása, amely lehetővé teszi az üregnyomás mérését műanyag fröccsöntés közben. A tervezett berendezés a Sapiientia EMTE Marosvásárhelyi Karának polimertechnológiai laboratóriuma eszközkészletét hivatott bővíteni. A tervezés során a fő hangsúly az egyszerű felhasználhatóságot biztosító kivitelezésre esett. A berendezés két erőmérő cellával, két HX711 erősítővel, egy ESP32-alapú mikrovezérlővel, illetve az ezekhez tartozó számítógépes felhasználói felülettel lett megvalósítva. A felhasználói felület a National Instruments LabVIEW programjával lett elkészítve, majd egy különálló alkalmazásként véglegesítve. A tervezési lépések során figyelem fordult a berendezés gyakorlati alkalmazhatóságára is.

Kulcsszavak: fröccsöntés, üregnyomás, mikrovezérlő, LabVIEW, erőmérő cella.

1. Bevezetés

A XXI. században a polimerek gyártástechnológiájában bekövetkező fejlődésnek köszönhetően a műanyagok egyre elterjedtebbek mindennapi életünkben. Az autóiparban különösen érezhető ez a változás, ahol a polimerek alacsony sűrűségük, gazdaságos előállíthatóságuk és kiváló tulajdonságaik miatt egyre inkább felváltják a hagyományos fém alkatrészeket. Az iparágban tapasztalható rohamos növekedés azt mutatja, hogy a polimerek feldolgozása ma már az egyik

legjelentősebb iparág, így a gyártásellenőrzés és annak digitalizálása elengedhetetlen.

1.1. A fröccsöntés alapjai

A fröccsöntés alapelve az alacsony viszkozitású műanyagömladék befecskendezése zárt szerzőmba, amely szűk járatokon (csatornákon) keresztül történik. A szerszám gyors és teljes kitöltéséhez elengedhetetlen a kis viszkozitás. A teljes kitöltést a magas fröccsöntőnyomás is elősegíti. A fröccsöntési folyamat természetéből adódóan

az ömledék lehülése viszonylag rövid idő alatt megtörténik, illetve a folyamat kiváló méretpontosságú végterméket eredményez. Emellett előnyt jelent, hogy a fröccsöntés lehetővé teszi bonyolult formájú alkatrészek készítését, amelyek nem igényelnek további megmunkálást, kivéve a vezetékcsatornában megdermedt műanyag eltávolítását. A fröccsöntési technológia alkalmazásával akár nagy tömegű alkatrészek (>50 kg) gyártása is megvalósítható, megfelelően nagy fröccsöntő berendezéssel [1].

1.2. A mikrovezérlők alapjai

A mikrovezérlők kis méretű, digitális jelek feldolgozására és beágyazott rendszerek vezérlésére specializálódott önálló számítógépek. Alapvető fontosságúak ipari automatizálásban, háztartási eszközökben, járművekben, orvosi berendezésekben stb. Ezen mikroprocesszorok egy chipen integrálják a CPU-t, az operatív memóriát és a perifériás eszközöket, kis helyet foglalnak el, alacsony energiafogyasztásúak és gazdaságosan gyárthatók nagy mennyiségben.

A mikrovezérlők programozhatók, fejlesztők, saját szoftvert hozhatnak létre alkalmazásaikhoz, testre szabott megoldásokat készíthetnek. A perifériák mint az analóg-digitális átalakítók (ADC), a digitális-analóg átalakítók (DAC), az időzítők és a kommunikációs interfészek lehetővé teszik a külvilággal való kommunikációt és az inputok-outputok kezelését.

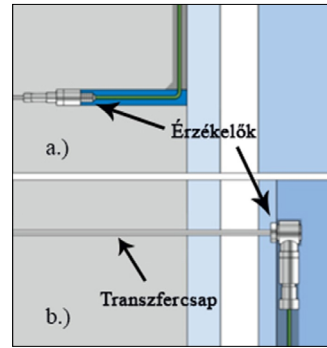
Elérhetők különböző architektúrákban és teljesítményszinteken. A programozáshoz speciális fejlesztői eszközökre vagy fejlesztői lapokra van szükség. Ezek tartalmazzák a mikrovezérlő programozásához szükséges alkatrészeket a [2].

1.3. A fröccsöntési üregnyomás mérése

Az üregnyomás fröccsöntés közbeni mérésének lehetősége rendkívül hasznos. Az erőmérő cellák szerepe egy ismert összefüggés létrehozása az érzékelőkre ható erő és az általa kibocsátott jel között. Erőmérő cellák esetében ez a kapcsolat nagy mérési tartományban lineáris, így a kalibrálásuk egyszerű. Az iparban nyomásmérő cellák mellett elterjedten használnak piezoelektromos vagy piezorezisztív érzékelőket is.

A nyomásmérő rendszereket két fő kategóriába lehet sorolni az általuk alkalmazott érzékelési módszer alapján: direkt és indirekt módszer (1. ábra).

A direkt módszer egyszerűbb kivitelezésű, mivel nem alkalmaz transzfercsapot, viszont pontatlanabb eredményeket ad, több karbantartást követel, és nagy figyelmet igényel az érzékelők kiválasz-



1. ábra. a.) Direkt és b.) indirekt (transzfercsapos) nyomásmérési módszer [3]

tásánál. Az indirekt módszer egy transzfercsapot alkalmazva továbbítja a fröccsöntési nyomásból származó erőt az érzékelőnek, ami lehetővé teszi, hogy az érzékelő alacsonyabb hőmérsékleten működjön, mivel távolabb helyezkedik el a szerzőműregtől [3]. Mindkét módszer esetében az érzékelők feladata a nyomásból adódó erő időbeli változásának érzékelése.

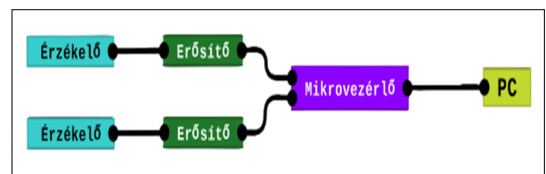
2. Célkitűzés

A kutatásom célja egy, a hőre lágyuló műanyagok fröccsöntési üregnyomásának mérésére alkalmas berendezés tervezése és kivitelezése. A berendezés a Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem Marosvásárhelyi Karán a polimer technológia laboratórium eszközkészletét hivatott bővíteni. A berendezés célja az, hogy lehetővé tegye az üregben kialakuló nyomás időbeli változásának vizsgálatát, ábrázolását és a mérési adatok lementését.

3. A berendezés felépítése

A berendezést, felépítését (2. ábra) és működését tekintve, feloszthatjuk hardver- és szoftver-rezsrre:

- hardver: érzékelők, erősítők, a mikrovezérlő és az ezeket összekötő vezetékek
- szoftver: az ESP32 mikrovezérlőn futó program, illetve a számítógépen (PC) a LabVIEW környezetben kifejlesztett felhasználói felület



2. ábra. A tervezett berendezés felépítési diagramja

4. Hardver

4.1. ESP32

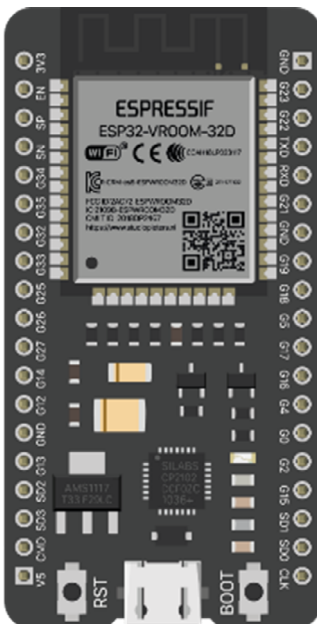
A projekthez kiválasztott fejlesztői lap egy ESP32-típusú mikrovezérlővel ellátott készülék (3. ábra). Számítási képességei célunkhoz kiválóak, illetve előnyt jelent a fizikai mérete is, amely segít a berendezés végső méretének csökkentésében.

A választott mikrovezérlő számos ADC-vel van ellátva. A projekt első fázisaiban megpróbáltuk ezeket felhasználni az érzékelők analóg jeleinek beolvasására, viszont felbontásuk igen kicsinek minősült ezen alkalmazáshoz, hiszen ez csak 12 bit. Továbbá, a mikrovezérlőn található ADC-k linearitása messze nem tökéletes, és befolyásolta volna a tervezett berendezés méréseinek hitelességét. Ezekből az okokból adódóan egy külső, 24 bites ADC-vel ellátott erősítő áramkört iktatunk be az érzékelők és a mikrovezérlő közé.

Mivel az erősítők és a mikrovezérlő között szinkronos kommunikációval történik az adatátvitel, a betápláláson kívül 4 db digitális bemenet volt alkalmazva. Ezekből 2 db az adatnak, illetve 2 db az órajelnek (taktusnak).

4.2. RC15-5 erőmérő cellák

A használt érzékelők híd típusú erőmérő cellák, melyeket a CavityEye Kft. cégnek köszönhetjük, akik kutatásunk az érzékelők adományozásával támogatták.



3. ábra. ESP32 mikrovezérlő [4]

Az RC15-5 érzékelők (4. ábra) elnevezése a Ring Cell megnevezésből származik. A számok a külső átmérőre, illetve a maximális terhelhetőségre utalnak, melyek esetünkben 15 mm és 5 kN. Működési hőmérséklet-intervallumuk $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ [5].

Az érzékelők betáplálása 5–12 V feszültséggel történik, melynek hatására a kiadott jel a 10–20 mV tartományba esik. Az érzékelőkre ható erő és az általuk kibocsátott jel között lineáris összefüggés van, melyet leolvasva következtetni lehet a terhelőerő nagyságára.

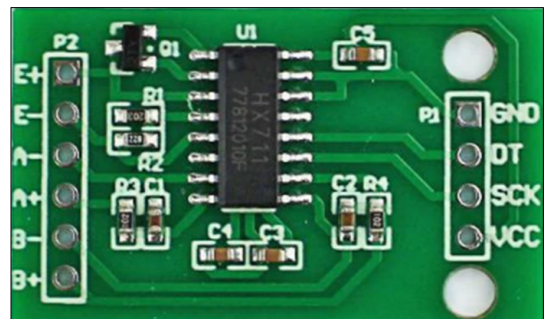
4.3. HX711 erősítők

Mivel az érzékelők által kibocsátott jel kis intenzitású, ennek kellő pontossággal történő mérése egy erősítőt igényel. A pontosan erre a célra kifejlesztett HX711 áramkör (5. ábra) műszererősítőt jelent alkalmazva kellően fel lehet erősíteni a jelet annak érdekében, hogy az hasznos eredményhez vezessen. Az erősítési szorzó értéke választható: 128, 64 vagy 32 (esetünkben 128). Emellett a HX711 áramkör rendelkezik egy ADC-vel, melynek felbontása 24 bit.

A HX711 betáplálási feszültségintervalluma 2.6–5.5 V. Az áramkörön található tápegység-szabályozónak köszönhetően betáplálható mind a mikrovezérlő 3.3 V, mind az 5 V (VIN) feszültségű lábáról, mely alkalmazását tovább egyszerűsíti [6].



4. ábra. RC15-5 típusú erőmérő cella (5000 N)



5. ábra. HX711 típusú erősítő áramkör

4.4. 3D nyomtatott ház

Mivel nem ajánlott, hogy az elektromos alkatrészeket csupán a vezetékek tartsák össze, 3D-nyomtatástechnológiával elkészült egy rekeszes tárolóegység, (6. ábra) mely biztosítja a hardverelemek megfelelő tárolását és biztonságos használatát.

5. Szoftver

A mikrovezérlő programjának megírására az Arduino fejlesztői környezet volt használva (Arduino IDE), míg a számítógépes felhasználói felület LabVIEW környezetben volt elkészítve.

5.1. Mintavételezési idő meghatározása

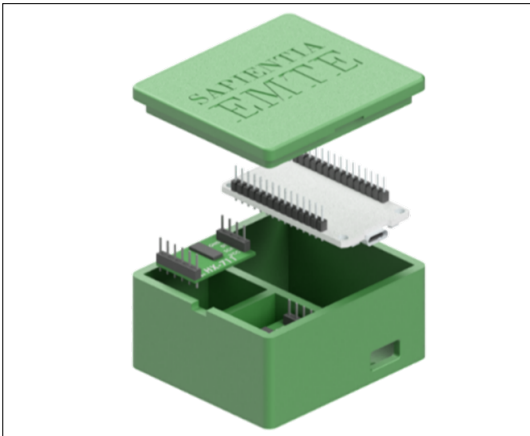
Annak érdekében, hogy a LabVIEW környezetben fejlesztett programot optimalizálni lehessen, szükséges volt megbecsülni a mikrovezérlő program fő ciklusának lefutásához szükséges időt.

A program ciklusának lefutási ideje, mely egyben a mintavételezési periódust is jelenti, egy tesztprogrammal volt meghatározva. Ez nem csak a mintavételezéshez szükséges parancsokat, hanem az idő mérésére szükséges kódrészt is tartalmazza.

5.2. Érzékelők kalibrálása

A nyomásmérő cellák kalibrálásához egy külön program készült. Ennek szerepe az, hogy az érzékelőktől kapott jelekből származó digitalizált értéket kiírja. Ez az az érték, amelyet a HX711 ADC-je állít elő és küld a mikrovezérlőhöz.

A program mindkét szenzorról érkező nyers értéket kiírja a Serial Monitor (Arduino IDE) segítségével, melyet a felhasználó le tud olvasni.



6. ábra. Tárolótokmány és a belehelyezett alkatrészek

A kalibráció során több iterációban lejegyeztük az érzékelők kimeneteit:

- terheletlen állapotban,
- ismert terhelés mellett,
- 10 s terhelés után.

A 10 s utáni érték leolvasásának szerepe az érzékelők ún. „creep” hatásának minimalizálása, mely miatt konstans terhelés mellett az érzékelők által kibocsátott jel idővel csökken.

A kalibrálási mérések kiértékelése során megbizonyosodhattunk arról, hogy az érzékelők által kiadott jel és a rájuk ható erő közötti kapcsolat linearitása megfelelő a mért tartományban. A regressziós együttható négyzete (R^2) 0.9997, illetve 0.9996 a két érzékelő esetében.

5.3. ESP32 program

A mérés során egyes aritmetikai műveleteket szükséges elvégezni annak érdekében, hogy az érzékelőktől kapott jelnek értelmet adhassunk. Ezen műveletek elvégzése kötelező, viszont az nem megszabott, hogy kötelezően a mikrovezérlő kell, hogy elvégezze. Az időigényesebb számítások terhéért előnyös levenni a mikrovezérlőről, így minimalizálhatjuk a mintavételezési periódust. A fenti okokból kifolyólag a 7. ábrán látható program került a mikrovezérlőre, amely az adatok regisztrálására alkalmas.

5.4. LabVIEW felhasználói felület

A LabVIEW program felhasználói felületnek (8. ábra) biztosítania kell a következő funkcionálisokat:

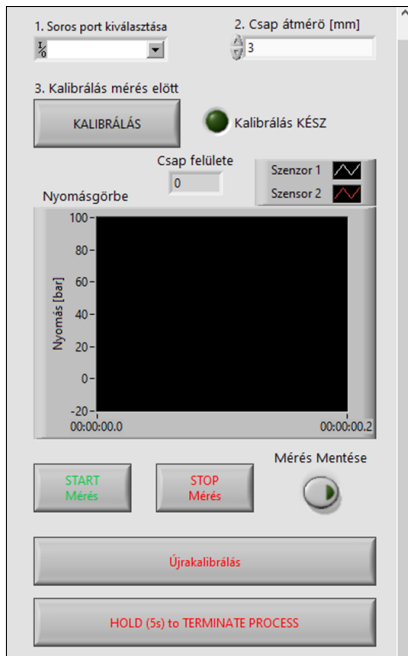
- soros kommunikációs port kiválasztása;
- transzfercsap átmérőjének megadása;
- kalibrálás indítása;
- a mérés megkezdése, illetve leállítása;
- adatok lementése;
- újrakalibrálás indítása.

A felhasználói felület tervezése során a kontrollok intuitív elhelyezésére került a hangsúly.

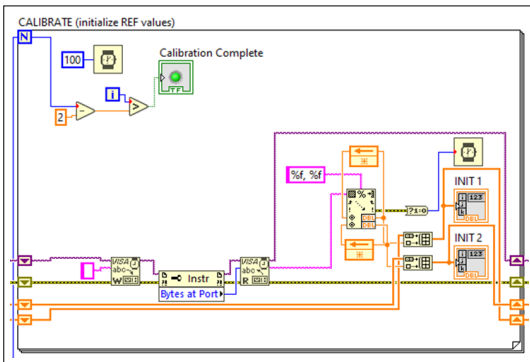
```
void loop() {
  if (scale1.is_ready() && scale2.is_ready()) {
    long rawValue1 = scale1.read();
    long rawValue2 = scale2.read();

    Serial.print(rawValue1);
    Serial.print(", ");
    Serial.println(rawValue2);
  }
}
```

7. ábra. Mintavételező program a HX711 könyvtár felhasználásával



8. ábra. A LabVIEW program felhasználói felülete



9. ábra. Kalibrálási ciklus LabVIEW grafikus felületen



10. ábra. Az összeszerelt berendezés a tárolótkba helyezve

5.5. LabVIEW Block Diagram

A LabVIEW programfejlesztői környezet teljes mértékben grafikus. Ebben a felhasználónak lehetősége van a szokásos programozási struktúrák implementálására, mint például a while és for ciklus.

A LabVIEW programcsomagban megtalálható Virtual Instrument Software Architecture (VISA) protokollok segítségével volt megvalósítva a mikrokontroller és a PC közötti soros kommunikáció.

Az 5.3 fejezetben kifejtett okból kifolyólag a jelek feldolgozásához szükséges számítások a LabVIEW programmal voltak elvégezve.

A program fő ciklusának első lépése az erőmérő cellák referenciaértékének meghatározása (inicializálás) (9. ábra). Ez terheletlen érzékelőkkel kell, hogy történjen. Az inicializálás minden programindításkor automatikusan lefut, viszont manuálisan is elvégezhető (reinitializálás). Ez egy kimondottan hasznos funkciónak bizonyult már a program tesztelése során.

Ugyancsak a fő ciklusban történik a mintavételezés, illetve a szükséges aritmetikai műveletek elvégzése.

6. Berendezés összeszerelése

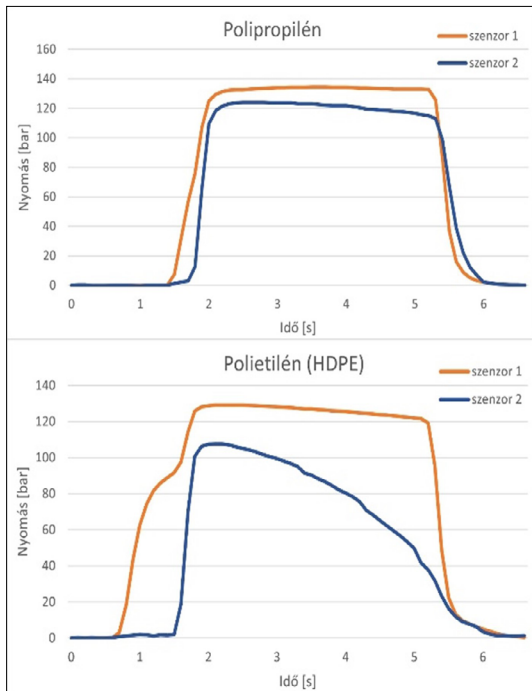
A berendezés elektromos komponenseinek összeszerelése az ezeken található lábok/pinek és vezeték segítségével történt. A csatlakozások megvalósítása után az alkatrészeket behelyeztük a számukra készített 3D nyomtatott dobozba, amelyből a betáplálás és adatkommunikációs, illetve az érzékelők vezetékai ki vannak vezetve (10. ábra).

7. Mérési eredmények

A berendezést, alkalmazhatóságának tesztelése érdekében, üzembe helyeztük. Az indirekt nyomásmérő módszer (1.3. fejezet) elvei alapján elkészült fröccsöntő szerszámba szereltük az érzékelőket, majd a Sapientia EMTE polimer technológiai laboratóriumában próbaméréseket végeztünk. A fröccsöntés egy korábbi államvizsga-dolgozat keretén belül elkészült pneumatikus fröccsöntőgép segítségével történt.

A fröccsöntött alkatrészek szakítószilárdság-vizsgálatára alkalmas próbatestek, polipropilénből, illetve polietilénből készültek.

A polietilén ömledéket újrahasznosított HDPE, míg a polipropilén ömledéket tiszta granulátum képezte. A pneumatikus fröccsöntő gép 6 bar nyomáson volt működtetve. A fröccsöntő henger hőmérséklete polietilén fröccsöntése esetében 265 °C, míg a polipropilén esetében 280 °C volt.



11. ábra. Polipropilén és polietilén fröccsöntési nyomásgörbéje az 1-es (narancssárga) és 2-es (kék) érzékelők jeleivel ábrázolva

8. Következtetések

Kijelenthető, hogy sikeresen elkészült egy, a fröccsöntési nyomás mérésére alkalmas berendezés. Sikertelenül elkészíteni az áramkört, illetve a szükséges programokat mind a mikrovezérlőre, mind a felhasználói felületre. A rendszerrel gyakorlati méréseket is sikerült végeznünk.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: *A polimertechnika alapjai*. 2007. 1–453.
- [2] Gliwa P.: *Microprocessor Technology Basics*. In: *Embedded Software Timing*, Cham. Springer International Publishing, 2021, 13–36. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64144-3_2.
- [3] Sensors for Monitoring of the Injection Molding Process. [Online]. <https://www.kistler.com/KR/en/sensors-for-monitoring-of-the-injection-molding-process/C00000060>
- [4] ESP32 diagram. [Online] <https://iztuts.com/lap-trinh-cho-esp32-wroom/>
- [5] *CavityEye Catalogue*. CavityEye, Kecskemét. [Online]. https://cavityeye.com/media/files/pdf/catalog2019_v1_pressure_sensors.pdf
- [6] Avia, „Data Sheet - HX-711”, Avia Semiconductor, 1/1. (2017) 1–9.



LABORFEJLESZTÉSEK ÉS OKTATÁST SEGÍTŐ MÓDSZEREK A KIBERFIZIKAI ÉS INTELLIGENS ROBOTRENDSZEREK LABORATÓRIUMBAN

LABOR DEVELOPMENTS AND METHODS FOR SUPPORTING EDUCATION IN THE CYBER-PHYSICAL AND INTELLIGENT ROBOT SYSTEMS LABORATORY

Masuk Abdullah,¹ Diós Szabolcs Sándor,² Dinya Tamás,³ Szántó Attila,⁴ Husi Géza⁵

¹ Debreceni Egyetem, Járműmérnöki Tanszék, Debrecen, Magyarország, masuk@eng.unideb.hu

² Debreceni Egyetem, Mechatronika Tanszék, Debrecen, Magyarország, dios.szabolcs@eng.unideb.hu

³ Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Debrecen, Magyarország, tamasdinya@gmail.com

⁴ Debreceni Egyetem, Informatikai Tudományok Doktori Iskola, Debrecen, Magyarország, szanto.attila@eng.unideb.hu

⁵ Debrecen University, Járműmérnöki Tanszék, Debrecen, Magyarország, husigeza@eng.unideb.hu

Abstract

This study investigates the education and laboratory market trends in the Cyber-Physical and Intelligent Robot Systems Laboratory and presents the previous works. The laboratory utilizes augmented reality, virtual reality, and simulation technologies to offer immersive learning experiences. The program emphasizes industry-aligned projects to prepare students and researchers for Industry 4.0. The curriculum teaches collaborative problem-solving and human-robot interaction. The lab trains flexible automation professionals for industry. The integration of technology and pedagogy empowers students to apply CPS and IRS concepts effectively. The laboratory is instrumental in advancing the educational landscape in these domains and is at the forefront of preparing students for the evolving challenges of automation technologies.

Keywords: *Cyber-Physical Systems, Intelligent Robot Systems, Laboratory Developments, Robotics Education.*

Összefoglalás

Jelen tanulmány célja az oktatási és munkaerőpiaci trendek vizsgálata, valamint a Kiberfizikai és Intelligens Robotrendszerek Laboratóriumában végzett munkák általános bemutatása. A laboratórium kiterjesztett, virtuális valóságot, valamint különféle szimulációs technológiákat alkalmaz. Ennek köszönhetően innovatív tanulási technikákat integrál. A labor az iparághoz igazodó projektekre helyezi a hangsúlyt, hogy felkészítse a hallgatókat és kutatókat az Ipar 4.0-ra. A tanulmány célja az együttműködésen alapuló probléma megoldása és az ember-robot interakció elsajátítása. A labor maga automatikában jártas szakembereket képez az ipar számára. A technológia és a pedagógia integrációja lehetővé teszi a hallgatók számára, hogy hatékonyan alkalmazzák a CPS és az IRS koncepcióit. A laboratórium fontos szerepet játszik az oktatási környezet fejlesztésében és a diákok felkészítésében az automatizálási technológiák változó kihívásaira.

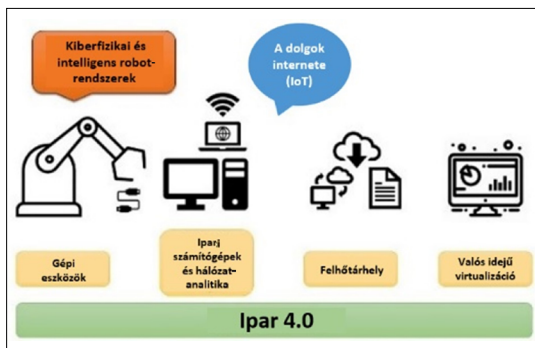
Kulcsszavak: *kiberfizikai rendszerek, intelligens robotrendszerek, laborfejlesztés, robotikai oktatás.*

1. Bevezetés

A Cyber-Physical Systems (CPS) és az Intelligent Robot Systems (IRS) integrációja (1. ábra) forradalmasította az automatizálási technológiákat,

mely hidat képezett az elméleti tudás és a gyakorlati jártasság között.

A CPS és az IRS Laboratórium úttörő ezen a területen, fejlett technológiákat és pedagógiai mód-



1. ábra. Kiberfizikai rendszer implementálása robot-rendszerben

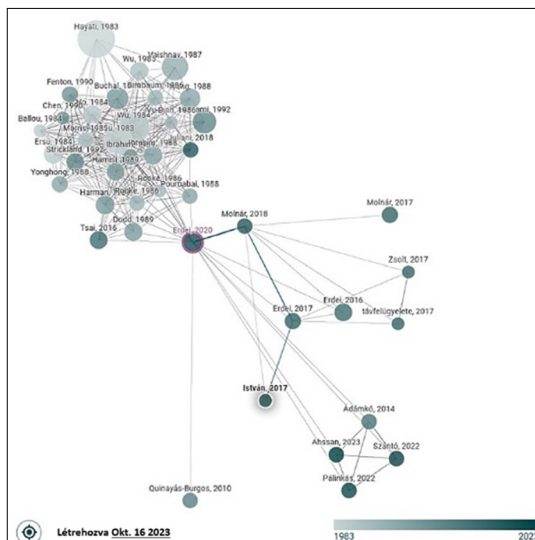
szertanokat alkalmazva képes hasznosítható tudás átadására, fizikai alkalmazások révén.

A kiterjesztett valóság (AR) és a virtuális valóság (VR) platformok kifinomult szimulációs környezetekkel kombinálva javítják a tanulók CPS- és IRS-rendszerének megértését. A labor tananyagát úgy alakították ki, hogy igazodjon az Ipar 4.0 trendek követelményeihez, hangsúlyozva a gyakorlati projekteket, amelyek a valós ipari kihívásokat tükrözik.

A technikai készségeken túl a laboratórium az együttműködésen alapuló problémamegoldást és az ember-robot interakciós tanulmányokat helyezi előtérbe, elősegítve a holisztikus készségeket. A workshopokon, szemináriumokon és stratégiai iparági partnerségeken keresztül a hallgatók és kutatók olyan átfogó tudáshoz jutnak, mely túlmutat a hagyományos módszereken. Ez a holisztikus megközelítés biztosítja, hogy a végzett mérnökök alkalmazkodóképes és ipára kész szakembereké váljanak, akik képesek az automatizálási technológiák terén a fejlődésre. A laboratórium szerepe a robotikai mérnökök és kutatók oktatási környezetének alakításában jelentős, hiszen ötvözi a tapasztalati tanulást, a legmodernebb technológiákat és ezek dinamikus iparági integrációját.

2. Cyber-Physical Systems (CPS)

A kiberfizikai rendszerek olyan komplex vezérlőrendszerek, amelyek smart eszközökön és hálózatokon (pl. autókön, repülőgépeken) átívelnek. A komplex CPS-rendszerek létrehozásához ismerni kell az internetes hálózati korlátokat, valamint meg kell határozni, hogy a valós idejű, zárt hurkú rendszer mely részei valósíthatók meg internet-protokoll segítségével. Az úgynevezett valós idejű (real-time) számítástechnika, az 1960-as és 1970-es évek óta a számítógépes rendszerek területén történő kutatások elsődleges célja [1]. A 2. ábra pre-



2. ábra. A laborhoz köthető publikációk

zentálja azon további kulcsfontosságú irodalmak összekapcsolt grafikonját, melyek a létesítményben belüli CPS-labor eszközök felhasználásával készültek az elmúlt években.

A kutatóközpont célja a meglévő technológiák optimalizálása és a balesetek megelőzése a folyamatban lévő kutatási projektek figyelemmel kíséréssel [2]. A Debreceni Egyetem Műszaki Karának egy 2020-ban készített tanulmánya a robotok alkalmazásának fontosságát elemzi a 21. században, az ipar 4.0 kontextusában. A kutatás főként robotrendszerek ember-gép interfészen (HMI) vagy vezetéknélküli hálózati kapcsolaton keresztül történő vezérlésre szorítkozik. A tanulmány rávilágít arra, hogy a robotok hogyan javíthatják a feldolgozó- és termelési egységek hatékonyságát folyamatos és önálló munkavégzésükkel. A projekt elsősorban egy, a Microsoft Xbox Kinect mélységérzékelőjével felszerelt mobilrobot alkalmazására összpontosít, melyet a Cyber-Physical System Lab 3D-s cloud mappingre használtunk. A cloud map leképezésének folyamata során Linux UBUNTU-n futó ROS OS lett alkalmazva. A mobil robotegységünk SLAM-t használt, hogy megbecsülje helyzetét, miközben feltérképezi az adott laborkörnyezetet. Ezen laborban készült tanulmány fő célja az volt, hogy egy olyan mobilrobot kifejlesztése valósulhasson meg, amely képes önállóan feltérképezni és felismerni ismeretlen területeket és objektumokat [3].

Általánosan a CPS-ek olyan elosztott rendszerek, amelyek a számítási és fizikai folyamatokat egyesítik, így pedig olyan funkciók használata is

lehetségessé válik, mint az adatgyűjtés és -elemzés, vagy rendszererőforrás-allokáció.

Az említett rendszerre magas szintű automatizálást és visszacsatolást is szükségessé tesznek. Az energiaellátás pedig önmagában is jelentős kihívást jelent a CPS-ek számára, hiszen hálózati instabilitás vagy áramszünet esetén a rendszer megbénulhat. Továbbá a kereslet-kínálat is jelentősen befolyásolja egy CPS-rendszer kiépítését. Éppen ezért a kutatási program során komoly kihívást jelent a fizikai rendszerek integrálása a kibertérbe. Hiszen fontos szerepet játszanak a beágyazott rendszerek és a szenzorhálózatok is [4, 5].

2.1. Intelligent Robot Systems (IRS)

Egy, a labort érintő projekt részeként 2020-ban egy ipari hegesztőrobot, név szerint a KUKA KR5 szingularitásának kérdése volt elemezve. A szingularitások negatív hatással lehetnek a robot teljesítményére, ezért figyelembe kell venni az összeszerelő sorok tervezésénél (1. táblázat).

A probléma elemzése céljából kifejlesztésre került egy egyedi mérőrendszer, amely közvetett módon képes mérni a robot tengelyeinek elmozdulását. A rendszer maga egy vezérlőből, robotkarból, lézerekből, gyorsulásmérőből és egy szögsebesség-érzékelőből áll [6]. A problémával kapcsolatban korábbi kutatások foglalkoztak, melyek alapul szolgáltak a rendszer kialakítása során [7].

Szintén a laborhoz köthető (2016) tanulmányában egy 6-DOF ipari robot adatfeldolgozásával és force-controllal foglalkozott, aminek az automatizálásra is kihatással van.

A labor maga állandó felügyelet alatt van, ugyanis korábban egy másik kutatás tárgyát ké-

1. táblázat. KUKA KR5 robot pozíciói [10]

| Név | Érték | Mértékegység |
|--------------------|----------|--------------|
| Tool/Base | | |
| - | #NONE | Tool |
| - | #NONE | Base |
| Pozíció | | |
| X | 396.160 | mm |
| Y | 40.593 | mm |
| Z | 1255.304 | mm |
| Irányultság | | |
| A | 4.30 | deg |
| B | 26.93 | deg |
| C | 10.59 | deg |

pezte, egy, az épületen belül található felügyeleti rendszer kiépítése, biztonságtechnikai szempontokat figyelembe véve. Az egyes események megfigyelésére a CPS-laborban TCP-IP kamerák lettek telepítve [8].

Ipari szimulációk témakörében is történtek (2019) előrelépések a Debreceni Egyetem robotikai laborjának fejlesztése kapcsán. Ennek témakörében készült el a KUKA KR5 kockatartójának átalakítása, a lineáris meghajtású rendszer implementálása, valamint egy gyártási folyamat szimulációja a robotcellán belül. Az automata módban a folyamat szekvenciális módszert követ, így könnyen követhetőek az egyes lépések és módosítható a meglévő program.

A vezérléséhez CodeSysben került tesztelésre a program, amelyben egy szimulációs modell készült el. Többek között manuális és automatikus futtatási lehetőségekkel. A KUKA KR-5 robottal (3. ábra) együtt a kockák meghatározott módon történő mozgatásához lineáris meghajtókat használtunk [9].

A robotcellára alapozva, a jövőbeli ipari szimulációkkal prediktálható lehet a robotmanipulátor viselkedése. Így támpontként szolgálhat a gyártósorokba való integrációnál. A szimulációs modellekkel akár pneumatikus és elektromos megfogó mozgások is tesztelhetőek lehetnek [11]. A KUKA KR5 ipari hegesztőrobot új alkatrészek 3D-nyomtatásával pedig bővíthető. A laborban KUKA KR5 integrációja és programozása sikeres volt, de a vezérlő- és az operációs rendszer miatt korlátozottak a lehetőségek [12].

2.2. Kiterjesztettség- (AR) és virtuálisvalóság- (VR) technológiák

A kiterjesztettség- (AR) alapú technológia rendkívül sokoldalú. Javíthatja az ipari körülmények „vizualizációját”, szimulációját, programozását, karbantartását és képzési metodikáját. Az AR-, oktatási környezetben való használata innovatív megoldást nyújt, különösen a roboti-



3. ábra. KUKA KR5 robot [10]

ka területén. A robotkarok 3D-CAD-modelljének AR-környezetbe való integrálása segíthet a hallgatóknak megérteni az ipari robotok működését és funkcionalitását anélkül, hogy a drága fizikai berendezésekre lenne szükségük (4. ábra) [10]. Ahol láthatóvá tehető, hogy ki mikor és milyen formában fért hozzá egyes szenzitív adatokhoz. Ezenkívül a rendszer képes lehet a robotoknak szánt parancsok titkosítására, így biztonságos kommunikációt és vezérlést tesz lehetővé [13].

2022-ben digitalizációs VR-, AR- és „digital twin”-technikákat alkalmazva kiegészítésre került a labor edukációja. Fontos megjegyezni, hogy ezen technológiáknak a meglévő rendszerekbe való integrálása kihívást jelent, ugyanis nem minden szabványosított (5. ábra). A digitalizáció ezen formája kevésbé elterjedt, éppen ezért is időigényes ilyen rendszerek fejlesztése, mint Kiberfizikai és Intelligens Robotikai Laboratórium esetében is történt. A virtuális laborok lehetőséget biztosítanak a szakemberek számára a virtuális úton történő képzésre, lehetővé téve számukra, hogy informálisan gyakorolhassanak, a fizikai sérülés minimális kockázata nélkül [14].

2.3. CPS és IRS algoritmusok

A közösségi hálózatokhoz hasonlóan, a CPS is lehetővé teszi a gépek állapotának elemzését HMI-n keresztül.

A gép állapotában vagy munkaterében bekövetkezett változások nyomon követése, az adatokból való következtetések levonása, mind algoritmusokat igényel [15]. Adatszintézis segítségével (2022) a laborban, 3D-robotmodellből előállított képek alapján képesek voltak virtuális képkockák előállítására.

A Blender segítségével virtuális állapotok szimulálása történt különféle textúrák, geometriák, fényeffektusok és kameranézetek felhasználásával. A tesztelés során hozzáadásra került a Ray Tracing Precision, az OptiX temporal zajtalanítás és az Optimal compact BVH. A zajmentesítés kulcsfontosságú volt, mivel gyorsabb képalkotást és tisztább képet eredményez a renderelés során [16].

A laborelemek 3D-nyomtatásához 2016-ban, nyílt forráskódú Arduino platformra alapozva, egy deltatípusú (FDM) “fused deposition modeling” 3D-nyomtató került megalkotásra (6. ábra).

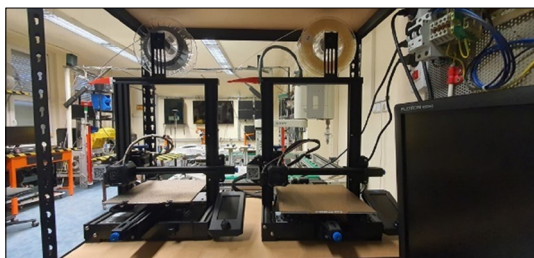
Ezen technológia gyors prototípus-készítést tesz lehetővé, ami csökkenti a fejlesztés idejét, valamint költségeit. A nyomtató által használt motorok maximális áramerőssége fázisonként 1,3 A. Az alkatrészek nyomtatása 50 mm/s sebességgel



4. ábra. Sony SRX-611 Lab robotkar



5. ábra. Fanuc Spider Robot



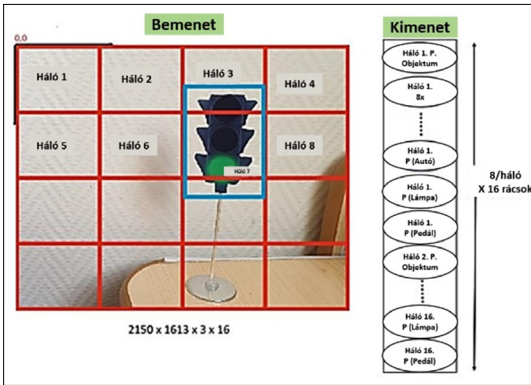
6. ábra. 3D-printer

történik, 0,2 mm rétegvastagsággal, 30%-os kitöltési tényezővel [17].

2.4. AI-ökoszisztéma

Az ipar 4.0 mesterséges intelligencia ökoszisztémájának kiépítése rendkívül fontos a gépek közötti interakciók és adattechnológiák szempontjából. Azonban ki kell emelni a kibertérrel kapcsolatos sebezhetőséget, mely kockázatot rejt. Továbbá szintén problémákat jelenthet a valós adatok és AI által prediktált értékek validálása [18].

A laborban, mintegy előfutárként, AI-alapú algoritmus került alkalmazásra. 2020-ban a YOLO algoritmus (7. ábra) használatát a közlekedési táblák felismerésére használták autonóm járművek



7. ábra. YOLO input-output algoritmus [19]

ben, ezzel imitálva a II. szintű önvezetési módot egy terepasztalon [19]. Az algoritmus valós idejű képességeiről és objektumészlelési pontosságáról ismert, így pedig autonóm járművek fejlesztésében is alkalmazható [20]. (2. táblázat)

2. táblázat. Példa egy Output YOLO algoritmusra [19]

| Grid 7 | |
|--------------|-----|
| P.Object | 1 |
| Bx | 0.8 |
| By | 0.9 |
| Bw | 1.5 |
| Bh | 1.2 |
| P.Light | 1 |
| P.Pedestrian | 0 |
| P.Car | 0 |

*P.Object: 0 az összes többi rácsához.

Általánosan elmondható, hogy a kiberfizikai rendszerek (CPS) olyan vezérlőrendszereket takarnak, amelyek egymáshoz kapcsolódó objektumok és hálózatok széles skáláját ölelik fel, beleértve, de nem kizárólagosan az autókat, repülőgépeket és egyéb járműveket [21].

A Debreceni Egyetem Műszaki Karán található kutatóközpont, megtervezte és bevezette az „Intelligent facility” korszerű felügyeleti és biztonsági rendszerét. Ezen fejlett rendszer a folyamatban lévő kutatási projektek nyomon követését és a létesítmény általános biztonságának megőrzését szolgálja. A kutatóközpont elsődleges célja a jelenlegi technológiák hatékonyságának növelése és a balesetek előfordulásának mérséklése.

A Kiberfizikai és Intelligens Robotrendszerek Laboratóriuma kiegészített digitális tanulási lehetőséget kínál a kiterjesztett és a virtuális valóság, valamint a szimulációs technológiák segítségével.

Felkészíti a hallgatókat az Ipar 4.0 követelményeire és az iparághoz igazodó projektekre egy olyan tanterv révén, amely elősegíti az együttműködésen alapuló problémamegoldást és az ember-robot interakción alapuló későbbi tanulmányokat. A kialakított laboratórium integrálja a technológiát és ötvözi a gyakorlati képzéssel, lehetővé téve a hallgatók számára, hogy hatékonyan alkalmazzák a CPS- és IRS-koncepciót.

3. Következtetések

A Kiberfizikai és Intelligens Robotrendszerek Laboratóriumának célja, hogy felkészítse a diákokat, valamint a fiatal kutatókat az Ipar 4.0-ra és a mesterséges intelligencia használatára, azáltal, hogy immerzív tanulási élményt nyújt a kiterjesztett valóság, a virtuális valóság és a szimulációs technológiák segítségével. A labor a mérnöki problémamegoldásra, valamint az ember-gép interakciós tanulmányokra fókuszál [22].

A kiberfizikai rendszerek (CPS) automatizálását, fejlett vezérlési technológiákat, megbízhatóságot és biztonsági intézkedéseket követelnek meg. A CPS-labor egyik tulajdonsága, hogy egyedi elemek is implementálhatóak a labor környezetébe. Az AR-rel pedig gyakorolhatóak a karbantartási, vezérlési és modellezési feladatok.

Ezen elvégzett kutatás segítséget jelenthet a jövőben olyan járműtémakörben, mint amelyet korábban az egyetemen végeztek, könnyű repülőgépek és antennák tervezése kapcsán [23, 24], valamint virtuális járműmodellek [25] tervezéséhez is támogatott nyújthat, vagy motorok jellemzőinek virtuális úton történő vizsgálatához [26].

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] W. Wolf: *Cyber-Physical Systems*. Computer (Long. Beach. Calif.), 42/3. (2009) 88–89. <https://doi.org/10.1109/MC.2009.81>
- [2] T. I. Erdei, N. C. Obinna, Z. Molnar, G. Husi, *Surveillance and Security System in the Building Mechatronics Research Center*. In 2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), IEEE, Jun. 2017, 509–512. <https://doi.org/10.1109/ICE.2017.8279928>.
- [3] Rohit Singh Chauhan, T. I. Erdei, Géza Husi: *ROS OS-based 3D Mapping of Cyber-Physical System Lab by the Depth Sensor*. Recent Innov. Mechatronics, 7/1. 2020. <https://doi.org/10.17667/riim.2020.1/5>
- [4] J. Shi, J. Wan, H. Yan, H. Suo: *A Survey of Cyber-Physical Systems*. In 2011 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), IEEE, Nov. 2011, 1–6. <https://doi.org/10.1109/WCSP.2011.6096958>

- [5] A. Masuk, O. M. Kende, A. Husam, I. Balajti: *Cyber-Physical System Aspects of Microstrip Patch Antenna of Radar Sensor Application*. In 23rd International Radar Symposium (IRS), IEEE, Sep. 2022, 378–383. <https://doi.org/10.23919/IRS54158.2022.9904974>.
- [6] T. I. Erdei, G. Husi: *Singularity Measurement in the Cyber-Physical and Intelligent Robot Systems Laboratory*. *Int. Rev. Appl. Sci. Eng.*, 11/2. (2020) 82–87. <https://doi.org/10.1556/1848.2020.20001>.
- [7] G. Á. Sziki, A. Szántó, J. Kiss, G. Juhász, É. Ádámkó: *Measurement System for the Experimental Study and Testing of Electric Motors at the Faculty of Engineering, University of Debrecen*. *Applied Science*, 12/19. (2022) 10095. <https://doi.org/10.3390/app121910095>.
- [8] T. I. Erdei, Z. Molnár, G. Husi: *Selecting Equipment and Supplies for Self-Replicating 3D Printer*. *Acta Technica Corviniensis*, IX/1. (2016) https://www.researchgate.net/publication/296696614_Selecting_Equipment_and_Supplies_for_Self-Replicating_3D_Printer
- [9] T. Pajkos, T. I. Erdei, G. Husi: *CodeSys Modeling of an Industrial Cell, and Linear Drive Control with PLC & ATmega2560 Microcontrollers for Testing and Improvement Purposes*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 568/1. (2019) 012061. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/568/1/012061>.
- [10] T. Istvan Erdei, R. Krakó, N. David Peter, G. Husi: *3D CAD Design of KUKA Robot Arm & Integration into AR Environment to Educational Purposes*. In: *IEEE 20th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, IEEE, Sep. 2022, 590–596. <https://doi.org/10.1109/PEMC51159.2022.9962864>.
- [11] A. Szántó, S. Hajdu, G. Á. Sziki: *Dynamic Simulation of a Prototype Race Car Driven by Series Wound DC Motor in Matlab- Simulink*. *Acta Polytech. Hungarica*, 17/4. (2020) 103–122. <https://doi.org/10.12700/APH.17.4.2020.4.6>.
- [12] T. I. Erdei, N. C. Obinna, Z. Molnár, T. Gönczi, G. Husi: *Industrial KUKA Robot Manipulator in Simulation Environment and Position Read-back*. In: *1st International Symposium on Small-scale Intelligent Manufacturing Systems (SIMS 2016)*, 2016. https://www.researchgate.net/publication/311970929_Industrial_KUKA_Robot_Manipulator_in_Simulation_Environment_and_Position_Read-back
- [13] T. I. Erdei, Z. Molnár, N. C. Obinna, G. Husi: *A Novel Design of an Augmented Reality Based Navigation System & its Industrial Applications*. *ACTA IMEKO*, 7/1. (2018) 357. https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v7i1.528.
- [14] T. I. Erdei, R. Krakó, G. Husi: *Design of a Digital Twin Training Centre for an Industrial Robot Arm*. *Appl. Sci.*, 12/17. (2022) 8862. <https://doi.org/10.3390/app12178862>.
- [15] J. Lee, B. Bagheri, H.-A. A. Kao: *A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems*. *Manuf. Lett.*, 3. (2015) 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>.
- [16] T. P. Kapusi, T. I. Erdei, G. Husi, A. Hajdu: *Application of Deep Learning in the Deployment of an Industrial SCARA Machine for Real-Time Object Detection*. *Robotics*, 11/4. (2022) 69. <https://doi.org/10.3390/robotics11040069>.
- [17] T. Templom, T. István Erdei, Z. Molnár, E. Shaw, G. Husi: *Designing a Delta Tripod Based Robot Fused Deposition Modelling 3 Dimensional Printer Using an Open-Source Arduino Development Platform*. *MATEC Web Conf.*, 184. (2018) 02013. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818402013>.
- [18] J. Lee, H. Davari, J. Singh, V. Pandhare: *Industrial Artificial Intelligence for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems*. *Manuf. Lett.*, 18. (2018) 20–23 <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.09.002>.
- [19] Szántó A., Ádámkó É., Juhász G., Sziki G. Á.: *Simultaneous Measurement of the Moment of Inertia and Braking Torque of Electric Motors Applying Additional Inertia*. *Measurement*, 204. (2022) 112135.
- [20] C. Dursun, T. I. Erdei, G. Husi: *Artificial Intelligence Applications in Autonomous Vehicles: Training Algorithm for Traffic Signs Recognition*. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 898/1. (2020) 012035. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/898/1/012035>.
- [21] A. Masuk I. Balajti: *Mechatronics Engineering Aspects of VHF band Antenna Design of Industry 4.0 Applications*. In *23rd International Radar Symposium (IRS)*, IEEE, Sep. 2022, 77–82. <https://doi.org/10.23919/IRS54158.2022.9905051>.
- [22] Szántó A., Kiss J., Mankovits T., Sziki G. Á.: *Dynamic Test Measurements and Simulation on a Series Wound DC Motor*. *Applied Sciences*, 11/10.(2021) 4542. [23] A. Masuk, H. Géza: *Aero Graphene in Modern Aircraft & UAV*. *Recent Innov. Mechatronics*, 9/1. (2022) <https://doi.org/https://doi.org/10.17667/riim.2022.1/4>.
- [24] A. Masuk H. Géza: *Uses of Aero Graphene and CNT in Modern Aircraft*. 2023, 020029. <https://doi.org/10.1063/5.0181354>.
- [25] A. Szántó, É. Ádámkó, G. Juhász, G. Á. Sziki: *Simultaneous Measurement of the Moment of Inertia and Braking Torque of Electric Motors Applying Additional Inertia*. *Measurement*, 204, (2022) 112135. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112135>.
- [26] A. Szántó, J. Kiss, T. Mankovits, G. Á. Sziki: *Dynamic Test Measurements and Simulation on a Series Wound DC Motor*. *Applied Sciences*, 11/10. (2021) 4542. <https://doi.org/10.3390/app11104542>.



ULTRA-SÁVSZÉLESSÉGŰ (UWB) VEZETÉK NÉLKÜLI TECHNOLÓGIÁVAL VÉGZETT ÉPÜLETFELMÉRÉS ÉS ALGORITMUSALAPÚ TÁMOGATOTT ÉPÜLETMODELLEZÉS

BUILDING GEOMETRY SURVEY BY USING ULTRA- WIDEBAND (UWB) WIRELESS TECHNOLOGY AND ALGORITHM-BASED BIM MODELLING

Máder Patrik,¹ Rák Olivér,² Bakai Nándor³

¹ Pécsi Tudományegyetem, Műszaki és Informatikai Kar, Mérnöki és Smart Technológiák Intézet, Mérnöki Ismeretek Tanszék, BIM Skills lab kutatócsoport, Pécs, Magyarország, mader.patrik@mik.pte.hu

² Pécsi Tudományegyetem, Műszaki és Informatikai Kar, Mérnöki és Smart Technológiák Intézet, Mérnöki Ismeretek Tanszék, BIM Skills lab kutatócsoport, Pécs, Magyarország, rak.oliver@mik.pte.hu

³ Pécsi Tudományegyetem, Műszaki és Informatikai Kar, Mérnöki és Smart Technológiák Intézet, Mérnöki Ismeretek Tanszék, BIM Skills lab kutatócsoport Pécs, Magyarország, bakai.nandor@mik.pte.hu

Abstract

The efficiency and degree of maturity of the architectural survey determine the construction process in many ways. From the economic and technical point of view, it is significant. It can be found in almost all activities and, depending on the technology used, it provides different qualities and quantities of initial data and information to prepare and support, among other things, the design, demolition, and construction work processes. The objective of the research and development project and this article is to investigate and demonstrate the application of a novel solution that differs from the conventional building survey tools, methods, and procedures of the information. It breaks with traditional methods by implementing wireless (using Ultra-Wideband (UWB) technology) spatial positioning and algorithm-based post-processing methods, as well as Building Information Modelling (BIM).

Keywords: *building survey, building information modeling, ultra-wideband technology.*

Összefoglalás

Az építészeti felmérés hatékonyságának és korszerűségének mértéke több szempontból is meghatározza az építőipari folyamatokat. Gazdasági és műszaki oldalról megközelítve is kijelenthető, hogy nagy jelentőséggel bír. Szinte minden tevékenységben megtalálható, és technológiájától függően különféle minőségű, mennyiségű kiindulási adatot és információt szolgáltat többek között a tervezési, bontási, kivitelezési munkafolyamatok előkészítéséhez, támogatásához. A kutatásfejlesztési program és a cikk célja olyan újszerű megoldás alkalmazásának vizsgálata és bemutatása, amely eltér a szokványos épületfelmérések eszközeitől, módszereitől és az előállított információk feldolgozási módjától. Szakítva a hagyományos eljárásokkal, vezeték nélküli (ultra-sávszélességű, azaz UWB-technológiát alkalmazva) térbeli pozicionálást és algoritmusokkal támogatott utófeldolgozást, valamint építményinformációs modellezést (BIM) valósít meg.

Kulcsszavak: *épületfelmérés, építményinformációs modellezés, ultra-sávszélességű technológia.*

1. Bevezetés

Manapság számos felmérőeszköz érhető el, amelyek működési technológiájuk alapján csoportokba rendezhetők.

Léteznek ma már hagyományosnak nevezhető megoldások, mint például a mérőszalag és az egyszerű lézeres távolságmérő, amelyek hatékonysága kompromisszumokhoz kötött. Az eredmények minőségének befolyásoló tényezője leginkább maga a kezelő személy.

Ezzel párhuzamosan egy másik, már kifejezetten digitalizált munkavégzésre kialakított eszközcsoport népszerűsége folyamatosan növekszik. Ezek azok a berendezések, amelyek már sok esetben minden jelenleg elérhető műszaki megoldással fel vannak szerelve. Közéjük tartoznak többek között a különféle kiterjesztettség-, virtuálisvalóság- (AR-, VR-) alapú megoldások is. Viszont a technológiának ára is van, ugyanis a berendezések, eszközök magas bekerülési költsége mellett a kezelő személyzet is magas vagy legalábbis magasabb szaktudással kell, hogy rendelkezzen, mint a hagyományos eszközök esetén. A felmérés során elérhető hatékonyság szempontjából az emberi tényező befolyásoló hatása háttérbe szorul (leginkább az eszközkézelésre korlátozódik), és az elérhető minőség, pontosság leginkább az eszközök hardveres és szoftveres megoldásaitól függ. Azonban a felmérési információk feldolgozása és elfogadott műszaki tervvé, vagy modellállományokká alakítása még ebben az esetben is emberi, mérnöki erőforráshoz kötött.

Úgy gondoljuk, hogy ezeken felül célszerű egy harmadik kategóriát is megalkotni. Ebbe tartoznak véleményünk szerint azok a megoldások, amelyekben a célspecifikus hardverösszetevők (akár egyedi kialakításban) összekapcsolásra kerülnek, és kiegészülnek célzott programokkal, algoritmusokkal. Utóbbiak nagy segítségre lehetnek a tervezőszoftverekkel történő olyan sajátos kapcsolat kiépítésében, amelyek kiterjesztik az egyébként különböző formában már létező általános megoldások és programfunkciók lehetőségeit. [1]

1.1. Ultra-Wideband- (UWB-) technológia

Az UWB egy olyan vezeték nélküli kommunikációs technológia, amelyet leggyakrabban a magas pontosságú térbeli helymeghatározásra használnak. [2] Maga a technológia a széles frekvenciasávú jeleket (általában több GHz-es tartományban) használja adatátvitelre, jellemzően nagyon rövid impulzusok és energiafelhasználás mellett. [2, 3]

Az alkalmazott rendszerek jellemző felépítését tekintve fix horgonypontokból és egy vagy több mozgó egységből állnak. [2] Utóbbiak pozíciója a horgonypontokhoz viszonyítva matematikai összefüggések segítségével kerül meghatározásra. [4] A technológia népszerűségének növekedése az elmúlt évekre tehető. Megfizethetővé váltak a hardverek és egyre több fogyasztói termékben is megjelentek (pl. Apple Iphone 11). [5] Alapvető nehézsége, hogy a horgonypontok egymáshoz viszonyított pozíciója legbiztosabban manuális mérések segítségével állapítható meg. Természetesen ezt áthidalóan fejlesztés alatt állnak az önkalibrációt és az együttműködésen alapuló lokalizációt lehetővé tévő technikai megoldások is. [6, 7] Pontosságát tekintve, a környezeti adottságtól is függően számos szakirodalom a 20 cm vagy annál kisebb centiméteres tartományban helyezi el [8], amely már éppen elegendő ahhoz, hogy a jövőbeli fejlesztéseket követően az épületfelmérések egy lehetséges, jövőbeli, korszerű alternatívája legyen. A jelenlegi kutatás erre alapozva fogalmazódott meg, és célja az ilyen irányú felhasználás lehetőségeinek vagy akadályozó tényezőinek feltárása.

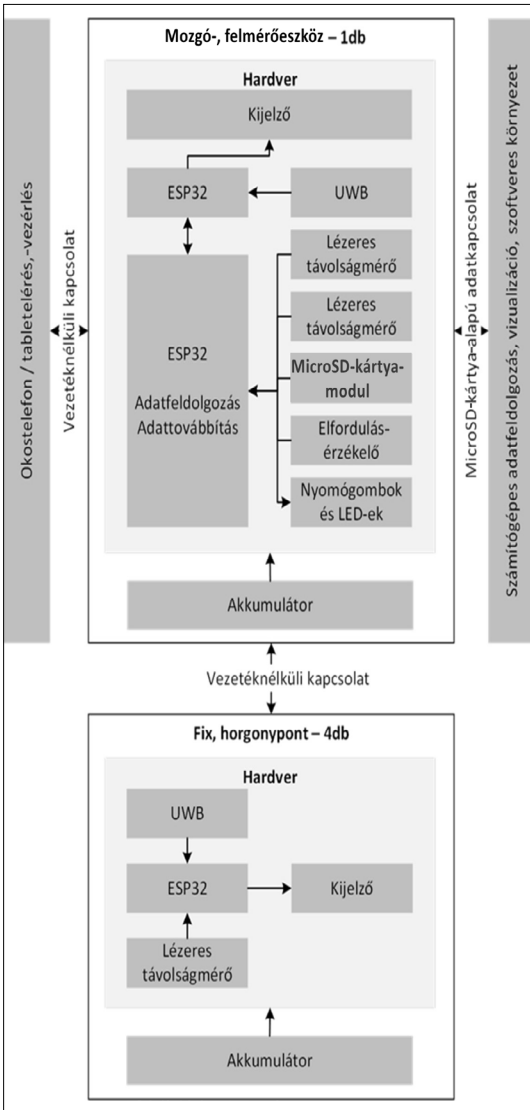
2. Konceptió, kialakítás, felépítés

Figyelembe véve azokat az alapvető célkitűzéseket, amelyek egy olyan eszkörendszer létrehozásának vizsgálatát irányozták elő, amely segítségével épületszerkezeti pozíciók rögzítése, majd algoritmusokkal támogatott automatizált utófeldolgozása válik lehetővé egy nem megszokott technológia (UWB) használatával, már alapvetően is számos nehézséget tartogatott magában. A témában folytatott szakirodalmi kutatás pedig rávilágított arra, hogy a kezdeti elképzelések összetettsége csupán töredéke volt annak, ami a technológia valóságban történő alkalmazásával jár.

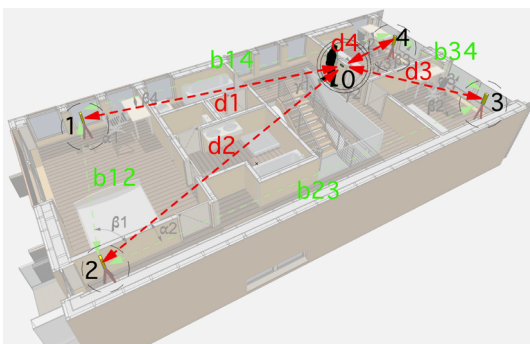
Ettől függetlenül az elképzelt felhasználási mód megvalósítására való törekvés továbbra is prioritást élvez. A távoli cél egy olyan újszerű eszköz és szoftveres környezet felépítése, amelyben egy egyszerű épület felmérése minimális emberi erőforrás bevonásával könnyen elvégezhető, és 3D-vagy BIM-modellezése automatizálható.

2.1. Kialakítás és felépítés

Annak érdekében, hogy a legkiterjedtebb kutatást és fejlesztést lehessen lefolytatni, már a folyamatok elején ki kellett terjeszteni a használandó eszközök körét (1. ábra).



1. ábra. Hardveres felépítés logikai vázrajza



2. ábra. Működési logika

Hamar egyértelművé vált, hogy nem elég kizárólag a Decawave DW1000-típusú UWB-modul, hanem szükség van még számos szenzor és kiegészítő hardver működésének összehangolására.

A vezérlő elektronika alapegysége minden különálló modul esetén egy-egy ESP32 programozható mikrovezérlő, amely lehetővé teszi az alkotó hardverek együttműködését és ezáltal az építészeti felmérési folyamatok Wi-Fi-protokollon keresztüli vezetékek nélkül vezérlését.

Az ESP32-modulokhoz kapcsolódnak VL53L0X [9]-és VL53L1X [10]-típusú lézeres távolságmérő egységek is, amelyek a mozgó felmérőegység esetén a padló és a mennyezet műszertől mért távolságát mérik, a horgonypont esetén pedig az elhelyezési szinttől mért magasságot.

Ezekon felül a felmérőegység rendelkezik egy gyorsulás- és elfordulásérzékelő szenzorral, amely az eszköz helyzetéről közöl információkat a mérés során (pl.: függőleges, ferde vagy vízszintes állapotban van).

Kiegészítő hardver még többek között egy MicroSD-kártya-modul, amelyre a mérés során történő adatrögzítés valósul meg, és egy-egy funkciógomb, valamint visszajelző led.

Természetesen minden egység rendelkezik akkumulátorral és a mérési folyamat releváns adatainak (pl.: távolság a horgonypontoktól, alsó, felső távolság) megjelenítésére szolgáló OLED, 1.3" 128*64 felbontású kijelzővel. Utóbbi a horgonypontok esetén biztosítja, hogy az üzemkészégükről meg lehessen bizonyosodni, valamint azt, hogy az egyedi hálózati azonosítójuk látható legyen. A mérőműszer esetén pedig lehetővé teszi a legfontosabb információk leolvasását.

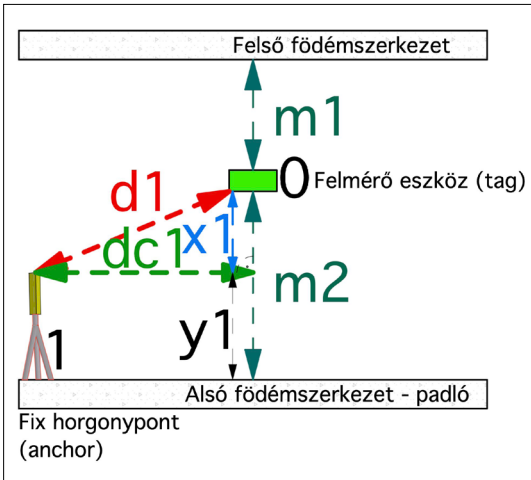
Mivel a mobilos megjelenítő a tervek szerint minden adatot részletesen fog tartalmazni, az egységen látható információk csak a legszükségesebbekre fókuszálnak.

3. Működési mechanizmus

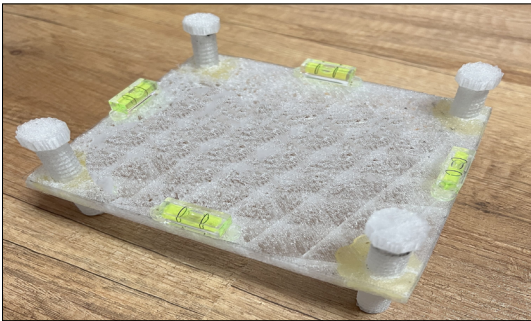
A megtervezett felmérési és adatrögzítési folyamat a horgonypontok épületen belüli elhelyezésével kezdődik (2. ábra).

Jelenlegi projektfázisban a horgonypontok (2. ábra – 1, 2, 3, 4) egymástól való távolsága (2. ábra – b12, b23, b34, b14) még minden pozícionálás során megméréndő és rögzítendő a számításokhoz használatos matematikai trigonometriai egyenletekbe. A távolság rögzítéséhez ez esetben egy hagyományos lézeres távolságmérő és mérőszalag kerül felhasználásra.

Ezenfelül rögzítésre kerül a horgonypont padlósíktól mért távolsága is annak érdekében, hogy



3. ábra. Függőleges pozíció meghatározása



4. ábra. Szintezőasztal

| | |
|------------------------------|-------------------------|
| Távolságvérték | Elfordulásadatok |
| m | x,y,z |
| Kalibráció | Mérés indítása |
| Egyedi információ 1 | Egyedi információ 2 |
| Egyedi információ 3 | |
| Műszer státusz lekérdezése | Küldés |
| Előző mérés távolságadatai | |
| Előző mérés elfordulásadatai | |
| Mérésifolyamat-napló | |

5. ábra. HTML-weblap előzetes felépítése

ne csak vízszintes síkon tudjon megvalósulni az épületszerkezetek pozícióinak kalkulációja, hanem valós, 3 dimenziós térbeli felmérési pontok váljanak számíthatóvá (3. ábra – y_1).

A horgonypontok elhelyezését követően a felmérőegység kalibrációját szükséges elvégezni. Ezt is csak a mérési folyamatok kezdetén kell teljesíteni. Ehhez 3D-nyomtató segítségével elkészítésre került egy szintezőasztal, amelyre az eszközt ráhelyezve, beállítható a vízszintes tengely helyzete (4. ábra).

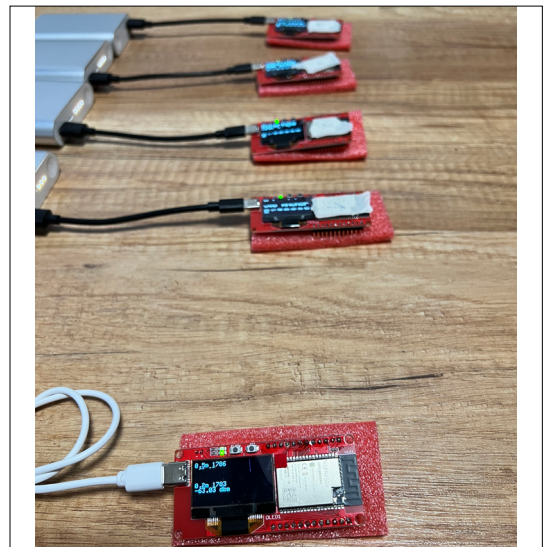
Ennek hiányában kevésbé megbízható információk generálódnak az eszköz tájolásáról. A félrevezető adatokat el kell kerülni, mert befolyásolják a végeredményként készítendő BIM-modell pontosságát.

Előkészületként szükség van még mobiltelefonnal vagy tablettel az eszköz által létrehozott hálózathoz Wi-fi-protokollon keresztül csatlakozni, és az általam definiált 192.168.6.66 IP-címen elérhető weblapot megjeleníteni. A tervek szerint a felmérőeszköz vezérlése és a mérés nyomon követése ezen keresztül valósítható meg (5. ábra).

A végső verzió elkészítése során szempont lesz, hogy egy modern kinézetű, rezponzív felület jöjjön létre.

A felmérés munkafolyamata ezt követően megkezdhető (6. ábra).

Az épületet besétálva, a rögzítendő épületszerkezetek síkjára helyezve a felmérőegységet, az (gombnyomásra vagy a webalapú felület funkcionalitását kihasználva) rögzíti a horgonypontok-



6. ábra. UWB-modulok

| | | | | | |
|----|-----------------|---------------|----------|---------|----------|
| 24 | Distance1: 1230 | Distance2: 22 | X: -0.09 | Y: 0.00 | Z: -0.19 |
| 25 | Distance1: 1683 | Distance2: 23 | X: -0.02 | Y: 0.01 | Z: -0.19 |
| 26 | Distance1: 2004 | Distance2: 22 | X: -0.02 | Y: 0.00 | Z: -0.18 |
| 27 | Distance1: 1686 | Distance2: 21 | X: -0.01 | Y: 0.00 | Z: -0.17 |
| 28 | Distance1: 1827 | Distance2: 23 | X: -0.01 | Y: 0.01 | Z: -0.16 |
| 29 | Distance1: 1985 | Distance2: 21 | X: -0.01 | Y: 0.00 | Z: -0.16 |
| 30 | Distance1: 1767 | Distance2: 22 | X: -0.01 | Y: 0.01 | Z: -0.15 |
| 31 | Distance1: 1886 | Distance2: 22 | X: -0.01 | Y: 0.01 | Z: -0.14 |
| 32 | Distance1: 1947 | Distance2: 23 | X: -0.02 | Y: 0.01 | Z: -0.13 |
| 33 | Distance1: 1857 | Distance2: 22 | X: -0.02 | Y: 0.01 | Z: -0.13 |
| 34 | Distance1: 1770 | Distance2: 21 | X: -0.01 | Y: 0.01 | Z: -0.13 |
| 35 | Distance1: 1644 | Distance2: 23 | X: -0.01 | Y: 0.01 | Z: -0.12 |
| 36 | Distance1: 1973 | Distance2: 22 | X: -0.02 | Y: 0.01 | Z: -0.11 |
| 37 | Distance1: 1979 | Distance2: 23 | X: -0.01 | Y: 0.02 | Z: -0.11 |
| 38 | Distance1: 1805 | Distance2: 23 | X: -0.02 | Y: 0.02 | Z: -0.09 |
| 39 | Distance1: 1633 | Distance2: 21 | X: -0.01 | Y: 0.02 | Z: -0.09 |
| 40 | Distance1: 1854 | Distance2: 21 | X: -0.02 | Y: 0.02 | Z: -0.08 |
| 41 | Distance1: 1867 | Distance2: 21 | X: -0.01 | Y: 0.03 | Z: -0.07 |
| 42 | Distance1: 1601 | Distance2: 23 | X: -0.00 | Y: 0.04 | Z: -0.05 |
| 43 | Distance1: 1845 | Distance2: 21 | X: 0.00 | Y: 0.04 | Z: -0.05 |
| 44 | Distance1: 1777 | Distance2: 21 | X: -0.00 | Y: 0.04 | Z: -0.05 |
| 45 | Distance1: 1820 | Distance2: 22 | X: 0.00 | Y: 0.05 | Z: -0.05 |
| 46 | Distance1: 1755 | Distance2: 22 | X: 0.01 | Y: 0.05 | Z: -0.03 |
| 47 | Distance1: 1879 | Distance2: 23 | X: -0.00 | Y: 0.06 | Z: -0.02 |
| 48 | Distance1: 1622 | Distance2: 23 | X: 0.01 | Y: 0.06 | Z: -0.02 |
| 49 | Distance1: 1967 | Distance2: 23 | X: 0.02 | Y: 0.06 | Z: -0.01 |
| 50 | Distance1: 1667 | Distance2: 22 | X: 0.00 | Y: 0.05 | Z: -0.00 |
| 51 | Distance1: 1896 | Distance2: 23 | X: -0.00 | Y: 0.06 | Z: 0.01 |
| 52 | Distance1: 1877 | Distance2: 21 | X: -0.01 | Y: 0.06 | Z: 0.02 |
| 53 | Distance1: 1938 | Distance2: 21 | X: -0.01 | Y: 0.05 | Z: 0.03 |

7. ábra. Mérés során generált adatok

tól való távolságát (2. ábra – d1, d2, d3, d4), és így a szerkezet térbeli pozícióját, valamint a helyes műszerkalibrációt követően azok helyzetét.

Az épületszerkezetek irányultságának és felületi síkjának meghatározása az elfordulásérzékelő adatait felhasználva történik.

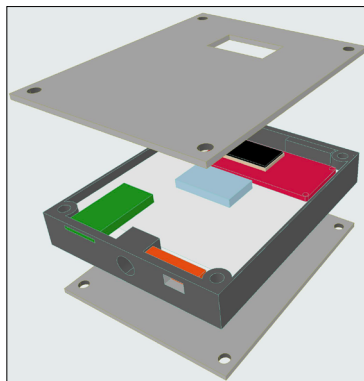
Ezeket felül ugyanebben az időpontban a korábban már említett műszertől mért padló és mennyezet távolsága is rögzítésre kerül (3. ábra – m1, m2).

A mérési adatok a felmérő egységhez kapcsolt microSD-kártyára kerülnek rögzítésre, amely segítségével egyszerűen átvihetők bármelyik számítógépre. A rajta tárolt strukturált adat teszi lehetővé az utófeldolgozást végző algoritmus helyes működését és az információkból történő automatizált modellépítést (7. ábra).

A munkafolyamat végeredménye az építészeti tervezőszoftverekben megjeleníthető egyszerűsített épületmodell, amelyet fel lehet használni többek között a jövőbeli tervezési folyamatok támogatására.

Az algoritmus alapvető működési elve szerint az épületszerkezetekről rögzített felületi síkokat és azok kapcsolatait használja fel a térbeli modellek létrehozásához. Ebben további segítséget jelent mérésenként a mérőműszer horgonypontoktól és mennyezettől, padlótól való távolsága. Ezek az információk együttesen járulnak hozzá a síkok megfelelő térbeli pozíciókba történő rendezéséhez. Az így beigazított síkok között összemetsződések keletkeznek. A létrejövő metszéspontok pedig elkülönítik egymástól a felesleges és a felmérési teret alkotó síkdarabokat. Utóbbiakat használják fel az algoritmus programjai a modellelemek (pl.: falak, födémek) generálásához.

Az ismertetett folyamatokhoz szükséges programok és algoritmusok részben már elkészültek, azonban még nem teljeselek.



8. ábra. Mérésegyeség tervezett vázának 3D-modellje

4. Eszközüváz

A projektben részt vevő horgonypontok és a felmérőegység esetén is biztosítani kell alapvető védelmet a hardverösszetevők számára. Ennek érdekében mind a horgonypontok, mind pedig a felmérőegység számára egyedi váz kerül megtervezésre.

A tesztverziók tervezése (8. ábra) és tesztjelleggel történő 3D-nyomatása folyamatban van. A végleges eszközüváz még kialakítás alatt áll. Az esetleges leejtés, leesés elleni védelem miatt fekete színű, 1,75 mm átmérőjű Extrudr Green-TEC PRO Carbon-típusú, karbonszálas filament felhasználása valósult meg a projektben, amely sokkal ellenállóbb a különböző környezeti hatásokkal szemben, mint a hagyományos Polylactic Acid (PLA). Az általam alkalmazott típus a mechanikai hatásoknak való ellenálláson felül magas hőmérséklet-állóság és alacsony súly is jellemzi. Utóbbi kifejezetten fontos egy hosszú ideig kézben tartott eszköz esetén.

5. Következtetések

Annak ellenére, hogy a kutatásfejlesztési folyamat még kezdeti állapotban van, az eredmények bizakodásra adnak okot. Az UWB-technológia és a kifejlesztés alatt álló szoftveres környezet, valamint módszertan alkalmas a térben való mozgás során az épületszerkezetek pozíciójának és sajátosságaira vonatkozó adatainak rögzítésére, feldolgozására, valamint tervezőszoftverben való megjelenítésére. Az előállítandó 3D-, vagy BIM-álmennyok kiindulási információt biztosíthatnak a felmérésre épülő magasabb rendű projektfolyamatokhoz. A kutatásfejlesztési folyamatok során felmerülő észleletmérési pontatlanság (változó, de több kalibrációt követően átlagértékben 5–10 cm között) egyelőre még mindig jelentősnek

nevezhető, amely csökkentésére irányuló tevékenységek a jövőben prioritásként kezelendők. Ezenfelül szükséges pontosan megértenünk és tanulmányoznunk a térben található objektumok okozta interferenciát, amelyek szintén eltérítetik a mérést, valamint a horgonypontok egymáshoz viszonyított pozícióinak automatikus meghatározási lehetőségeit.

Összességében az elért eredmények az előírányzott elképzelések szerint alakulnak. Ennek megfelelően az eljárás továbbfejlesztése folytatódik a funkcionalitás bővítésével és a jelentkező problémák megoldására irányuló törekvésekkel.

Köszönetnyilvánítás

A Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a nemzeti kutatási, fejlesztési és innovációs alpból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Máder P. M.: *Algoritmussal támogatott BIM-alapú tevékenységek az építőipar megvalósulási és megvalósítási folyamataiban*. Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Kar, Breuer Marcell Doktori Iskola, PhD-értekezés (2021). 26–27.
- [2] Fontaine J., Ridolfi M., Van Herbruggen B., Shahid A., De Poorter E.: *Edge Inference for UWB Ranging Error Correction Using Autoencoders*. IEEE Access, 8. (2020) 139143–139155. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3012822>
- [3] Zhuang, W., Shen, X. and Bi, Q.: *Ultra-Wideband Wireless Communications*. Wireless Communica-
- tions and Mobile Computing, 3. (2003) 663–685. <https://doi.org/10.1002/wcm.149>
- [4] ESP32 UWB Indoor Positioning Test. (letöltve: 2024. február 10.) <https://www.makerfabs.com/article/esp32-uwband-indoor-positioning-test.html>
- [5] Tudnivalók az Ultra Wideband technológiáról (letöltve: 2024. február 10.) <https://support.apple.com/hu-hu/guide/iphone/iph771fd0aad/ios>
- [6] Matteo R., Jaron F., Ben Van H., Wout J., Jeroen H., Eli De P.: *UWB Anchor Nodes Self-Calibration in NLOS Conditions: a Machine Learning and Adaptive PHY Error Correction Approach*. Wireless Networks, 2021/27:3007–3023. <https://doi.org/10.1007/s11276-021-02631-0>
- [7] Matteo R., Abdil K., Rafael B., Maarten W., Wout J., Eli De P.: *Self-Calibration and Collaborative Localization for UWB Positioning Systems: A Survey and Future Research Directions*. ACM Computing Surveys, 54/4. Article No. 88., 1–27. <https://doi.org/10.1145/3448303>
- [8] Malajner M., Planinšič P., Gleich D.: *UWB Ranging Accuracy*. Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), London, UK, 10–12 September 2015. 61–64.
- [9] VL53L0X Time-of-Flight Ranging Sensor Datasheet - Production Data. (letöltve: 2024. február 14.) <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l0x.pdf>
- [10] VL53L1X Time-of-Flight Ranging Sensor Datasheet - Production Data. (letöltve: 2024. február 14.) <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l1x.pdf>



KOSZINUSZ-FOGASKERÉKPÁR PROFILELTOLÁSÁNAK HATÁSAI

EFFECTS OF PROFILE SHIFTING OF A COSINE GEAR

Máté Márton,¹ Gál Károly-István²

¹ Sapiientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia, mmate@ms.sapiientia.ro

² Sapiientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia, gal.karoly@ms.sapiientia.ro

Abstract

Cosine gears are a special type of gear drive, in which the tooth profile of the theoretical generating rack is described by the cosine function. According to recent research results, the cosine gear drive has a lower slip coefficient and the contact and bending stresses supported by the teeth during the load are smaller than those occurring in involute gears. The main advantage of the cosine drive pair lies in the apparent higher rigidity of the gear tooth: this can reduce flank wear and increase gear life, especially in heavy load and high-speed applications. In contrast to involute profile gears, cosine gears do not show undercut root fillet, even with small teeth number.

This paper deals with cosine gear tooth profile design and the meshing of the cylindrical cosine gear pair conceived without, or with the application of the profile shifting. The mathematical model of the meshing was implemented in a Mathcad environment, showing that there exists a significant difference compared to the well-known involute gears. The simulation of the motion during the rolling of the gear pairs was realized with the Autolisp programming interface. Solid models were created and tested in the Autodesk Inventor environment.

Keywords: cosine gear, involute gear, meshing, generating rack, profile shifting, simulation.

Összefoglalás

A koszinusz-fogaskerek egy fogaskerékhajtások egyik speciális típusát képviselik, ahol a generáló elméleti lécpofilt koszinuszfüggvénnyel írjuk le. A témához kapcsolódó kutatások eredményei azt mutatják, hogy a koszinusz-fogaskerékpár esetében kisebb a relatív csúszás, mint az evolvens fogaskerekéknél, továbbá a terhelés alatt ébredő nyomó- és hajlítófeszültségek is kisebbek lesznek. A koszinusz-hajtópár fő előnye a fogtő láthatóan nagyobb merevségében rejlik: ez csökkentheti a fogaskerek kopását, és növelheti az élettartamukat, különösen nagy terhelésű és nagy sebességű alkalmazásokban. Az evolvens profilú fogaskerekkel szemben a koszinusz-fogaskerek esetében kis fogszám esetén nem jelenik meg alámetszés.

Jelen közleményben a koszinusz-hajtópár fogprofiljának léccel való származtatását hoztuk létre, majd a kialakított kerek kapcsolódását vizsgáltuk, elemi, illetve kompenzált fogazatokon. A kapcsolódás matematikai modelljét Mathcad környezetben vizsgáltuk, és kimutattuk, hogy ez eltér a hagyományos evolvens fogaskerekétől. Autodesk-Autocad környezetben létrehoztuk a fogaskerékpárok modelljeit, majd ezeket vizsgáltuk.

Kulcsszavak: koszinusz-hajtópár, evolvens hajtópár, burkolás, származtatóléc, profileltolás, szimuláció.

1. Bevezetés

Gépszerkesztők és gépgyártók körében jól ismert tény, hogy a fogaskerek azok a gépelemek, amelyek az egységnyi tömegre jutó legnagyobb

nyomatékátviteli képességgel bírnak. A fogaskerek a fogak profilja szerint lehetnek evolvens, pálcs, ciklois vagy köríves kialakításúak. A leggyakrabban alkalmazott fogaskerékpárprofil az evol-

vens, amelynek számos előnye közé tartozik az áttételi arány tengelytávától való függetlensége és az egyszerű gyártás. Emellett hátrányai is vannak, mint például a korlátozott terhelhetőség és az interferenciára való hajlam.

Az evolvens fogaskerekek esetén a hajtópár háromféleképpen valósítható meg: elemi fogazással, kompenzált fogazással, illetve általános fogazással [1].

Elemi fogazás esetében nincs profileltolás, így a szerszámosztóvonal érinti lefejtéskor az osztóköröket. Ennek megfelelően az osztókörök az osztóvonalon gördülnek le, tehát az osztókörök egybeesnek a gördülőkörkörrel.

Az elemi evolvens fogazatnak legjelentősebb hátrányai az alámetszési fogszámhatárban ($Z=17$), a fogtő szilárdságában és a rossz csúszási viszonyokban jelentkeznek.

Ha a szerszámot a kiskeréken adott távolságra kihúzzuk, és a nagykeréken ugyanakkora távolsággal betoljuk, akkor kompenzált fogazatról beszélünk. Az elemi fogazathoz képest, a profileltolásnak köszönhetően, a szerszámközpont a kiskerék osztókörének érintőjétől kifelé $+m\xi$ távolságra, illetve a nagykerék esetében az osztókör érintőjétől befelé $-m\xi$ távolságra helyezkedik el. Az így kialakított fogaskerékpár esetében a kiskeréken a fogak vastagabbak lesznek, ami maga után vonja a teherbírás növekedését, ezzel ellentétben a nagykeréken a fogak elvékonyodnak, ami a teherbírás csökkenését eredményezi.

A profileltolás legnagyobb előnye, minden vitán felül, az alámetszés elkerülésében áll, ezenkívül pedig a fogoldal kapcsolódás közbeni csúszása is lényegesen javítható. A kompenzált eredménye a nulla profileltolás-összeg. Ennek értelmében, ha egy adott fogaskerékpár kiskereke belesik az alámetszési tartományba, akkor kompenzált alkalmazásával, a tengelytáv és a fogszámok megtartása mellett az adott fogaskerékpárnál elkerülhető az alámetszés.

A napjainkban rendelkezésre álló modern és igen pontos, numerikusan vezérelt gépek segítségével olyan fogaskerékprofilok alakíthatók ki, amelyek mind mechanikai, mind kapcsolódási szempontból felülmúlhatják a klasszikus fogaskereket.

Jelen kutatásunkban az evolvens fogaskerekek korlátait szem előtt tartva egy olyan, az evolvens profiltól eltérő kompenzált koszinuszprofilú fogaskerékpár szintézisét tűzi ki célul, amely az evolvens fogaskerekek hiányosságait hivatott kijavítani, azaz teherbírása nagyobb az evolvens

hajtópárénál, nincsen hajlama interferenciára, és az evolvens kerekre jellemző $Z=17$ minimális fogszám alatt sem jön létre az alámetszés.

2. A koszinuszgeneráló léc

2.1. A klasszikus gyártóléc felépítése

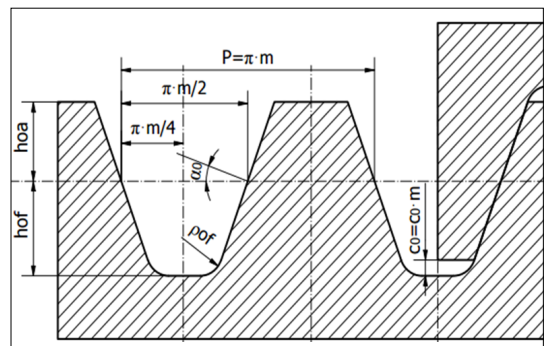
A koszinusz hajtópár szakirodalmi megközelítésében [2] a fogaskereket úgy hozták létre, hogy a koszinuszfüggvény abszcisszáját egyszerűen ráillesztették – nem rágördítették – az osztókörre, mindkét kerék esetében. A kapcsolódás bizonyítva volt, akárcsak a javított fogalak és a növelt terhelhetőség. Véleményünk szerint ez egy CAD-környezet-alkalmazás, amely nem tükrözi a gyártás valóságát. Ebből kiindulva fogalmazódott meg a léccel való gyártás ötlete, Olivier első módszere szerint [3]. A származtatóléc profilját az evolvens fogazat alapprofiljából származtatjuk (1. ábra).

Az általánosíthatóság érdekében az alapprofil egységnyi m (modulra) határozzuk meg. A szabványos alapprofil szög értéke $\alpha=20^\circ$. A fogtő szilárdságának növelése érdekében az előírt foglángörbületi sugár értéke legyen $\rho_{of}=0.38\cdot m$ [4, 5].

A koszinuszprofilú gyártóléc kialakításában az előbb bemutatott evolvens alapléc paramétereiből indulunk ki, melyeket a modulra építünk.

2.2. Koszinuszgyártóléc-kialakítás egyenlet-módosítással

Előző közleményünkben [6] bebizonyítottuk, hogy a sablon-ellensablon elv [3] koszinuszprofil esetében érvényes, így az egyetlen szerszámmal történő gyártás lehetséges. A koszinuszprofil görbületéből adódóan általános fogazás [7] nem alkalmazható, mivel profileltolás csakis $\Sigma\xi=0$ profileltolásösszeg-érték mellett lehetséges. Ha a lefejtőléc egyenletéből [6],



1. ábra. Szabványos alapprofil [2]

$$y_{s1}(x_{s1}) = a \cos\left(\frac{2}{m} x_{s1}\right) \tag{1}$$

indulunk ki, és a koszinuszprofilú lefejtőlécet profileltolással látjuk el, a $\Sigma \xi = 0$ feltételnek megfelelően, akkor (1) tehát kompenzált fogazatot alakítottunk ki. Így a koszinuszléc egyenletét a következő formában írjuk fel:

$$y_s(x) = a \cos(bx) + \xi_s m, \text{ ahol} \tag{2}$$

$$a = a_s = b_s = (h_0^* + c_0^* m)$$

$$h_0^* = 1, c_0^* = 0,25, \xi_s \neq 0$$

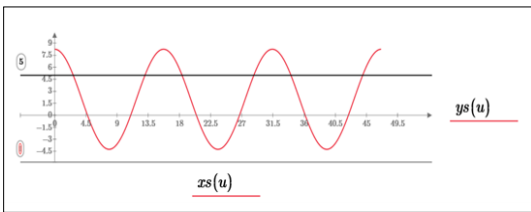
A már meglévő egyenletek alapján, pozitív, illetve negatív profileltolást alkalmazva, a 2. és 3. ábrákon látható lécszerszámprofilokat generáltuk, Mathcad környezetben:

Mivel a koszinuszgyártó léc egyenletét módosítottuk, a koszinusz-fogaskerékpár generálása a [6] alapján fog megvalósulni, így a kapcsolódási egyenletek formálisan nem változnak.

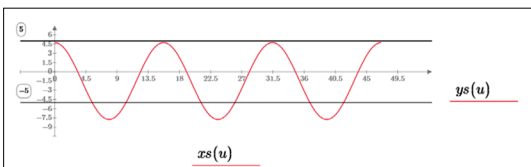
2.3. Koszinuszgyártóléc-kialakítás elcsúsztatással

A következőkben a kompenzált fogazatot elcsúsztatással fogjuk kialakítani, vagyis a kiskerék esetében a szerszámot $+m\xi$ értékkel kihúzzuk, míg a nagykerék esetében ezt $-m\xi$ értékkel betoljuk az előgyártmányba, így kialakítva a kompenzált fogazást. A koordináta-rendszerek lefejtés közbeni relatív helyzeteit a 4. ábrán szemléltettjük.

Megjegyzendő, hogy a 4. ábrán illusztrált két kerék koordináta-rendszerét egymáshoz képest ellentétes irányítással választottuk meg. Ez megkönnyíti a számítást, mivel így egyik esetben sem kapunk negatív előjelű kifejezést. Amint az belátható, az O_0O_{ps} lécelmozdulást mindkét kerék ese-



2. ábra. Szerszámprofil $+\xi$ profileltolással



3. ábra. Szerszámprofil $-\xi$ profileltolással

tében az elfordulási szög és az adott kerék osztókörugarának szorzatával tudjuk meghatározni.

A burkoláshoz felhasznált transzformációs egyenletek mátrixos alakjai a következők:

$$\mathbf{M}_{1ps} = \mathbf{M}_{1p} \mathbf{M}_{Ops} \tag{3}$$

$$\mathbf{M}_{2ps} = \mathbf{M}_{2p} \mathbf{M}_{Ops} \tag{4}$$

Profileltolás esetén a rendszerek közötti transzformációs mátrixok, a [6]-ban található 3. ábra alapján, a következő alakban írhatók fel:

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{M}_{10} \mathbf{M}_{Os1} \mathbf{r}_{s1}$$

$$\mathbf{M}_{1s1} = \mathbf{M}_{10} \mathbf{M}_{Os1}$$

$$\mathbf{r}_2 = \mathbf{M}_{20} \mathbf{M}_{Os2} \mathbf{r}_{s2}$$

$$\mathbf{M}_{2s2} = \mathbf{M}_{20} \mathbf{M}_{Os2} \tag{5}$$

A burkoláshoz felhasznált transzformációs egyenletek mátrixos alakjai hasonlóak az elemi fogazat képzésénél használt formákhoz, csak a translációoszlopba bekerülnek a profileltolások. Ezen mátrixok kifejtett alakjától jelen közleményben eltekintünk.

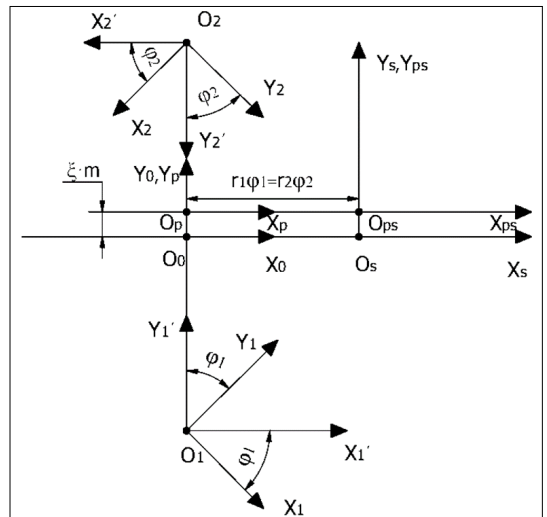
A szögsebességeket, valamint ezeknek ekvipolens eltolásait meghatározó helyvektorok, kompenzált fogazás esetében, a következők lesznek:

$$\mathbf{w}_{O1s}^{(1)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}; \mathbf{A}_{1s} = \begin{bmatrix} -(r_1 + \xi_s m) \varphi_1 \\ -(r_1 + \xi_s m) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\mathbf{w}_{O2s}^{(2)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ i_{21} \end{bmatrix}; \mathbf{A}_{2s} = \begin{bmatrix} -(r_2 + \xi_s m) \varphi_2 \\ r_2 + \xi_s m \\ 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

A normál vektor alakja a [6]-hoz képest változatlan:

$$\mathbf{n}(u) = \begin{bmatrix} \frac{2a}{m} \sin\left(\frac{2}{m} u\right) \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{8}$$



4. ábra. Egyazon léccel történő lefejtés

A számítások elvégzése után a sebességvektorok oszlopai következők lesznek:

$$\underline{v}_{ps}^{(ps,1)} = \begin{bmatrix} -(y_s + \xi_s m) \\ x_s + r_1 \varphi_1 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\underline{v}_{ps}^{(ps,2)} = \begin{bmatrix} i_{21}(y_s + \xi_s m) \\ -i_{21}(x_s + r_2 \varphi_2 + \xi_s m) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{10}$$

Az eddig ismert egyenletek, illetve mátrixok alkalmazásával, és a megfelelő számításokat elvégezve, a kapcsolódási egyenletek explicit alakjai a következők lesznek:

$$\varphi_1(u) = \frac{1}{mz_1} \left(u - \left(\frac{a^2}{m} \sin\left(\frac{4u}{m}\right) + \xi_s m \frac{2a}{m} \sin\left(\frac{2u}{m}\right) \right) \right) \tag{11}$$

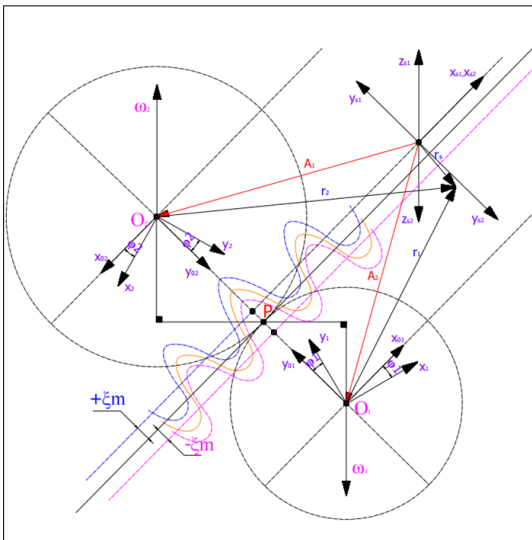
$$\varphi_2(u) = \frac{1}{mz_2} \left(\frac{2a^2}{m} \sin\frac{4u}{m} + 4a\xi_s \sin\left(\frac{2u}{m}\right) - m\xi_s - u \right) \tag{12}$$

2.4. A kapcsolódási egyenletek felírása profiletolás esetén

A kapcsolódási egyenletet az 1. és 2. kerékre írjuk fel, figyelembe véve a profiletolás jelenlétét. Az **5. ábrát** felhasználva felírjuk a relatív sebességeket, melyek a feltüntetett helyvektorokból és szögsebességekből határozhatók meg [7].

$$\underline{v}_{s1}^{(1,s1)} = \underline{v}_{s1}^{(1)} - \underline{v}_{s1}^{(s1)} = \omega_{o1}^{(1)} \times \underline{r}_{s1} + \underline{A}_1 \times \omega_{o1}^{(1)} - \omega_1 r_1 \underline{i}_{s1} \tag{13}$$

$$\underline{v}_{s2}^{(2,s2)} = \underline{v}_{s2}^{(2)} - \underline{v}_{s2}^{(s2)} = \omega_{o2}^{(2)} \times \underline{r}_{s2} + \underline{A}_2 \times \omega_{o2}^{(2)} - \omega_2 r_2 \underline{i}_{s2}$$



5. ábra. Negatív, illetve pozitív profiletolások koszi-nuszfogazat esetén

3. Profiletoló (kompenzált) koszinusz-és evolvens kerek gyártásszimulációja és testmodellje

Ahhoz, hogy a koszinuszlécprofil minél pontosabban közelítsük, az Autodesk Inventorban 2000 pontot kívántunk felvenni a nagyobb pontosság érdekében, de a megengedett maximálisan importálható pontok száma nem haladhatja meg az 500-at, ezért csupán 500 pontot tudtunk importálni. Az importált pontokat Spline-görbékkel kötöttük össze. A kapott profilból létrehozott léccel az Autolisp programozási környezet segítségével három különböző fogszámú koszinusz-, illetve evolvens fogaskereket generáltunk. Tudva, hogy az evolvens profilú fogaskerek minimális fogszáma Z=10, erre az esetre tűztük ki célul az evolvens és a koszinuszprofilú kerek összehasonlítását. A gyártásszimulációk elvégzésekor a megfelelő pontosság elérésének érdekében a lécet, illetve az előgyártmányt 0,2 mm-es osztással léptettük.

Annak érdekében, hogy összehasonlítsuk az evolvens, illetve koszinusz-fogaskerékpárokat, az evolvens fogaskerekre talált profiletolási értékeket alkalmaztuk [9–12].

A generálás során alkalmazott eltolási értékeket az **1. táblázat**ban foglaltuk össze.

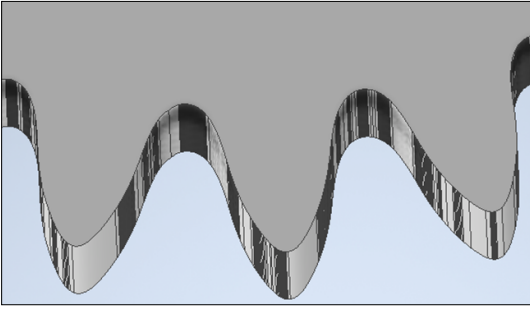
1. táblázat. Alkalmazott profiletolások

| Z | -ξ _{min} | -ξ _{max} | +ξ _{min} | +ξ _{max} |
|----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 10 | × | × | × | × |
| 19 | -0,4 | -0,2 | 0,2 | 0,4 |
| 27 | -0,4 | -0,2 | 0,2 | 0,4 |

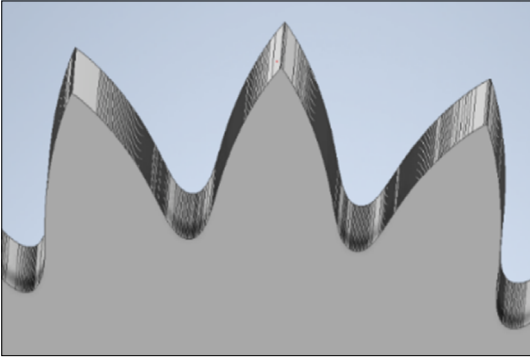
Az **1. táblázat**ban feltüntetett profiletolási értékekre létrehoztuk a fogaskereket, viszont a **6., 7., 8.,** illetve **9. ábrán** jelenleg a ξ=0,4, illetve ξ=-0,4 eseteket tüntettük fel.

Amint az a **6.,** illetve **7. ábrán** megfigyelhető, a profiletolás nagymértékben befolyásolja a fogalakot. A **6. ábrán** látható Z=19 fogú fogaskerék esetében a ξ=-0,4 profiletolás hatására a fogak elnyúlnak és elvékonyodnak, ez általában maga után vonja a fogtörés veszélyét, de ez esetben szemmel láthatóan a fogtő robusztus kialakítású, tehát a jelenség nem valószínű.

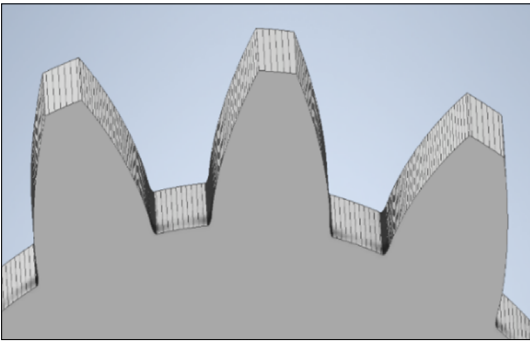
A **7. ábrán** feltüntetett Z=27 fogú fogaskerék esetében robusztusabb fog-, illetve fogtő alakú ki, ugyanakkor a fogak kihegyesednek, ami a fogaskerék élettartamát csökkenti.



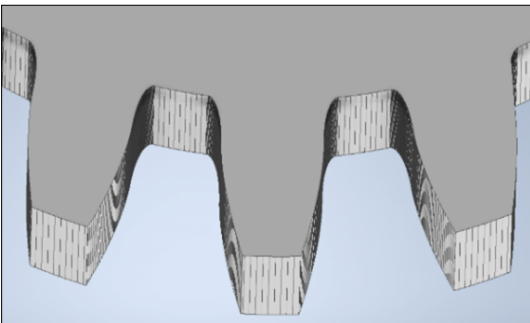
6. ábra. $Z = 19$, $\xi = -0,4$. Koszinuszfogazat



7. ábra. $Z = 27$, $\xi = +0,4$. Koszinuszfogazat



8. ábra. $Z = 19$, $\xi = +0,4$. Evolvens fogazat



9. ábra. $Z = 27$, $\xi = -0,4$. Evolvens fogazat

A 8., illetve 9. ábrán szemléltetünk két profileltolt evolvens fogaskereket, amelyek egy fogaske-rek-párt alkotnak. Ebben az esetben ugyancsak pozitív, illetve negatív profileltolást alkalmaztunk, ennek hatására, amint az a 8. ábrán is lát-ható, fogfejkönyödést tapasztalunk. A 9. ábra esetében szembetűnő, hogy a fejszalag növekedik, de a fogtő szilárdsága gyengül. Egyik evolvens fo-gazat sem közelíti meg a koszinusz-fogaskerek-robusztus fogtövet.

Kimondható, hogy akár elemi, akár kompenzált fogazatot kívánunk kialakítani, a koszinuszpro-filú kialakítás szilárdsági-merevségi szempontból sokkal előnyösebb.

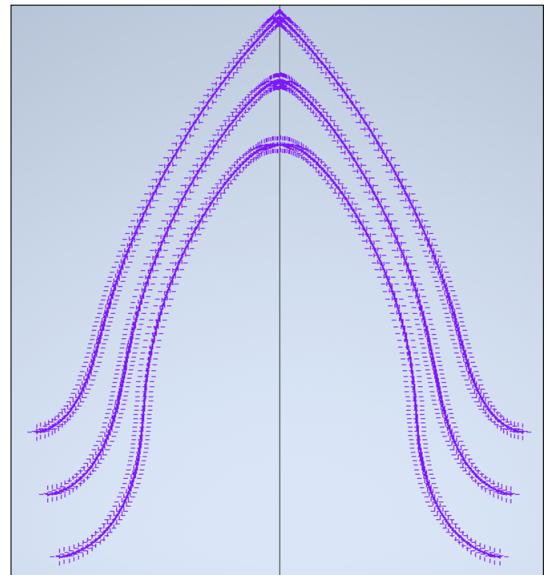
4. A profileltolás hatása a koszinusz-profil alakjára

A 10. ábrán szemléltetjük a $Z = 19$ fogú evolvens fogaskerek profiljait, elemi, pozitív, illetve negatív profileltolási helyzetekben.

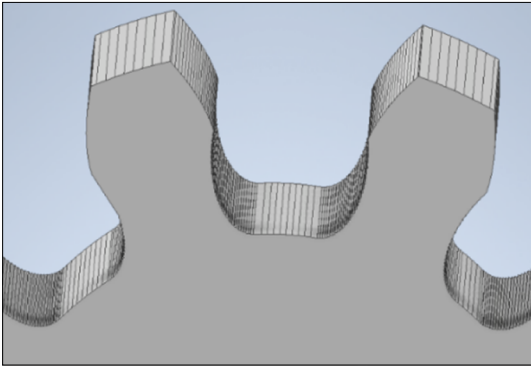
Amint azt láthatjuk, a profileltolás hatással van a profil alakjára, a fejkörátmérőre, a lábkörre, a fogtő alakjára, illetve az adott profilú fogaskere-kek élettartamára.

5. Az alámetszés kiküszöbölése

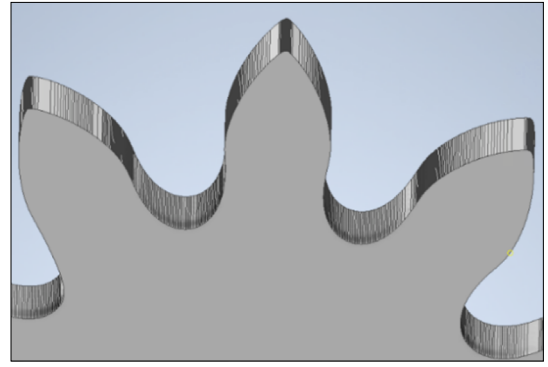
Amint azt már említettük, a legerterjedtebb fo-gaskeréktípus az evolvens, ennek legnagyobb hátránya a korlátozott minimális fogszámhatár. A fogszámhatár azért korlátozott evolvens ke-rek esetében, mert $Z = 17$ fogszám alatt, gyártás-



10. ábra. Profileltolt koszinusz-fogaskerekprofilok



11. ábra. $Z = 10$ fog. Evolvens profil



12. ábra. $Z = 10$ fog. Koszinuszprofil

kor a szerszám kikotorja a fogaskerék fogtövet, tehát alámetszi a gyártott fogaskereket, ahogy ez a 11. ábrán szembeszökő. Az alámetszés a szemléltetett evolvens fogaskerék esetében olyan nagy, hogy a létrehozott fogláb görbe ívhossza majdnem nagyobb, mint a működő fogoldal ívhossza. Ezzel ellentétben, a 12. ábrán szemléltetett koszinusz-fogaskerék fogán nem jelentkezik az alámetszés, tehát koszinusz-fogaskerekek esetében a minimális fogszámhatár az evolvens fogazathoz képest csökkenthető. Ez későbbi tanulmányunk egyik célja.

6. Következtetések

A profiletolás jelentősen befolyásolja a fogaskerék profiljának alakját, illetve teherbíró és nyomtávkátviteli képességét.

Amikor fogaskerékpárt generáltunk, észrevettük, hogy ha különböző fogszámú fogaskereket gyártunk, a nagyobb fogszám előnyösebb, mivel ekkor erősebb fogtövet tudunk kialakítani koszinuszgörbe esetében.

A koszinusz-fogaskerekek, fogláb görbék alakját tekintve, kedvezőbbek, mint az evolvens fogazat, mivel az evolvens esetében gyengébb fogtő alakul ki, ez jelentősen befolyásolja a nyomtávkátviteli képességet és a terhelhetőséget, ami az élettartam csökkenéséhez vezet.

A koszinuszfogazat esetében, kis fogszámoknál, a fogat közrezáró profilok közötti távolság jelentősen csökken a fejkör felé haladva, ami a kihegyesedés veszélyét hordozza.

Koszinuszprofil alkalmazásával $Z = 17$ -nél kisebb fogszámú elemi kerek is kialakíthatók.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Pálfi K., Prezenszky Tibor., Csibi V., Antal B., Gyenge Cs., Balogh F.: *Fogazott alkatrészek tervezése, szerszámai és gyártása*. Gloria Kiadó, Kolozsvár, 1999.
- [2] Shanming Luo, Yue Wu, Jian Wang: *The Generation Principle and Mathematical Models of a Novel Cosine Gear Drive*. Mechanism and Machine Theory, 43. (2008) 1543–1556.
- [3] Litvin F. L.: *A fogaskerékkapcsolás elmélete*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1974.
- [4] DIN 867:1986, Basic Rack Tooth Profiles for Involute Teeth of Cylindrical Gears for General Engineering and Heavy Engineering.
- [5] ISO 21771:2007(en) Gears — Cylindrical Involute Gears and Gear Pairs — Concepts and Geometry.
- [6] Máté M., Gál K. I., Tolvaly-Roşca F.: *Koszinuszprofilú lefejtőléccel gyártott fogaskerékpár szintézise és CAD-vizsgálata*. Műszaki Tudományos Közlemények, 19. (2023) 37–43. <https://doi.org/10.33895/mtk-2023.19.06>
- [7] Szeniczai L.: *Az általános fogazás*. Nehézipari Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1958. 49–50.
- [8] Tolvaly-Roşca F.: *A számítógépes tervezés alapjai: AutoLisp és Autodesk Inventor alapismertetek*. MTF 7, Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2009. <https://doi.org/10.36242/mtf-07>
- [9] Vörös I.: *Gépelemek III.*, Tankönyvkiadó, Budapest, 1957.
- [10] Rohonyi V., Killmann V.: *Fogaskerékajtások*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1980.
- [11] Máté M.: *Hengeres fogaskerekek gyártószerszámai*. MTF 12, Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2016. <https://doi.org/10.36242/mtf-12>
- [12] Hollanda D.: *Aşchiere și scule*. Reprografia I. I. S. Tg. Mureş, 1994. (234-240).



VIRTUÁLIS GYÁRTÁS ALKALMAZÁSA IPARI GYÁRTÓEGYSÉGEK KORSZERŰSÍTÉSÉRE

APPLICATION OF VIRTUAL PRODUCTION TO UPGRADE INDUSTRIAL PRODUCTION UNITS

Palánkai Emese,¹ Sarvajcz Kornél²

¹ Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Debrecen, Magyarország,
palankaiemese02@gmail.com

² Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Villamosmérnöki és Mechatronikai Tanszék, Debrecen, Magyarország,
sarvajcz@eng.unideb.hu

Abstract

Our research work involves the study, analysis and modernisation of the production line of a company that has been operating with traditional systems for a long time with unchanged principles. The paper highlights the use of virtual production as a tool for modernising the company's production processes, providing a comprehensive understanding of its characteristics, advantages and positive impact on process development. The scientific article, after an overview of a selected real production process, describes the steps to build a digital twin for the implementation of virtual manufacturing. It explains in detail the different features and the results obtained in the Tecnomatix Plant Simulation modelling environment used to build the model. After evaluating the simulation, the paper examines the current state of the real process and its overall tool efficiency, and based on the conclusions drawn, it presents a way forward for the development of the production line and the possibilities for further research.

Keywords: *virtual production, Industry 4.0, Tecnomatix Plant Simulation, digital twin, simulation.*

Összefoglalás

Kutatómunkánk egy hosszú ideje változatlan elveken üzemelő, hagyományos rendszerekkel dolgozó vállalat egyik gyártósorának megismerésére, elemzésére, majd modernizálására terjed ki. A publikáció a cég gyártási folyamatainak korszerűsítésére alkalmas módszerek közül a virtuális gyártás eszközeit emeli ki. Átfogó ismereteket ad annak tulajdonságairól, előnyeiről, valamint a folyamatok fejlődésére gyakorolt pozitív hatásairól. A tudományos cikk a kiválasztott valós termelési folyamat áttekintése után a virtuális gyártás megvalósításához létrehozott digitális ikertestvér felépítésének lépéseit mutatja be. Részletesen kifejti a modell megalkotásához felhasznált Tecnomatix Plant Simulation modellalkotó környezet különböző funkcióit és az abban elért eredményeket. A tanulmány a szimuláció kiértékelését követően vizsgálja a valós folyamat jelenlegi állapotát, illetve teljes eszközhatékonyságát, majd a levont következtetések alapján előremutat a gyártósor fejlesztésére vonatkozóan, valamint bemutatja a kutatás továbbhaladásának lehetőségeit.

Kulcsszavak: *virtuális gyártás, ipar 4.0, Tecnomatix Plant Simulation, digitális iker, szimuláció.*

1. Bevezetés

Manapság a világ minden részén gyártnak termékeket. Az iparban kétféle gyártípust különböztethetünk meg digitalizációs felkészültségük alapján. A ma már újonnan épülő vállalatok teljesen digitális alapokról indulnak. Megtervezésük

folyamán nagy hangsúlyt fektetnek az innovatív szemléletek beágyazására, illetve a gyártási stratégiák gondos kialakítására. Ezzel szemben a másik csoportot az évtizedek óta változatlan elveken működő gyárak képezik, amelyek elavult gyártósorai már kevésbé alakíthatóak. Ezen cégek fej-

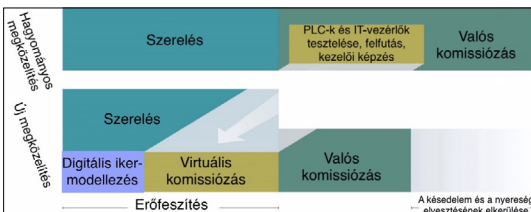
lődésében nagy akadályt jelent, hogy termelési rendszereik nehezen összeegyeztethetőek a jelenkori technológiákkal. Azonban a cél mindkét esetben azonos, azaz a minél több, jó minőségű fogyasztási cikk előállítására minél rövidebb időn belül.

Kutatómunkánk irányvonala egy ilyen régi típusú, illetve az ipar 4.0 adta lehetőségeket csak részben hasznosító gyár termelésének támogatása a virtuális gyártás eszközeinek alkalmazásával. Célunk az üzem egy kiválasztott gyártósorának korszerűsítése egy szimulációs programban felépített digitális ikertestvér segítségével, melynek köszönhetően a cég fejlődésében előrelépés érhető el.

2. Virtuális kommissiózás

2.1. A fogalom jelentése

A virtuális kommissiózás az a folyamat, melynek során a gyártást virtuális környezetben szimulálják egy számítógépes program felhasználásával a valóságos rendszer telepítése előtt (1. ábra). Egy gyártóegység kiépítéskor az üzembe helyezéssel ki a legidőigényesebb részfolyamatot, és a rendszer hibáinak mintegy 70%-a ekkor derül ki, melyek korrigálása számos munkaóra mellett hatalmas költségeket emészt fel. Így a virtuális kommissiózás alkalmazásának legfőbb funkciója a tervezési és összeszerelési hibák korai észlelése és a megvalósítás előtti módosítása. [1]



1. ábra. Gyártás virtuális kommissiózással és anélkül [1]

2.2. Jelentősége napjainkban

Az ipar 4.0 és a korszerű számítástechnika a virtuális gyártás kialakulását eredményezték. Ennek alap gondolata, hogy a piaci igényekre gyors és hatékony válasz adható, ha a termékek előállítását szimulációs modellekkel virtuális környezetbe integrálják. A szimulációk használata támogatja a termelési folyamatok fejlesztését, valamint elősegíti a cégek versenyképességének fokozását. Egyre inkább céliránnyá vált a gyártási technológiák javítása és a termelékenység növelése, melyek megvalósítására a virtuális gyártás tökéletes megoldást jelenthet.

3. Virtuális gyártás

3.1. Előnye

A virtuális gyártás technológiája az iparban egyre jelentősebb szerepet tölt be, számos előnnyel rendelkezik. Digitális iker felépítésén keresztül alkalmas új termelési rendszerek tervezésére vagy a már meglévők fejlesztésére. A szimuláció alapján megtörténik a gyártás előzetes elemzése anélkül, hogy a valós folyamatokba beavatkoznának. A tesztelés során elsősorban az egyes gyártóegységek tökéletes működését, a termékek legyárthatóságát ellenőrzik, majd a gyártási folyamat működőképességét, hatékonyságát értékelik. A hibák időben történő észlelése leredukálja a gyártás beindításáig szükséges időt, és a későbbiekben kevesebb termelési leállás tapasztalható, valamint a modellalkotásnak köszönhetően a rendszer utólagos áttervezései elkerülhetőek. Bár a megfelelő szoftver megvásárlása jelentős ráfordítással jár, azonban a hibakeresés és az átdolgozás költségei csökkennek, így a beruházás az évek múltán megtérül. Egy esetleges átalakítás során a digitális ikerről gyűjtött nagyszámú adat lehetővé teszi a legcélravezetőbb döntéshozatalt. [2]

3.2. Az ipar 4.0 témakörében végzett kutatások ismertetése

Az ipar 4.0 adta lehetőségekkel kapcsolatban egyre több tanulmány születik, kedvező lehetőségeket rejt a témában elmélyedni vágyó kutatók számára.

A negyedik ipari forradalom tervezési alapelvei William de Paula Ferreira et al. publikációjában kerülnek ismertetésre. [3] Simon János tanulmánya szerint a VR-technológia a humán erőforrás oktatásában lehetővé teszi az ipari dolgozók digitális gyárban történő képzését. [4] Raimund Wegener et al. a szimuláció eszköztét fonalak és gyalpuszálak gyártásának virtualizációjához használják fel. [5] Eric VanDerHorn et al. a digitális iker fogalmára egy általánosított meghatározást alkotott meg. [6]

Kuldeep Kumar Verma és Vivek Babele publikációja előnyben részesíti a szimulációk használatát, és feltárja a Tecnomatix Plant Simulation programban rejlő különféle lehetőségeket. [7] Karolina Bendowska és Przemysław Zawadzki a Tecnomatix Plant Simulation alkalmazásával egy automatizált összeszerelő sor lehető legpontosabb szimulációs modelljét készítették el kutatásukban. [8]

A fenti tanulmányok ösztönzően hatottak projektünkre, számos taglalt elmélet hasznunkra vált, amelyeket igyekeztünk beépíteni munkánkba.

3.3. Alkalmazása az autóiparban

A virtuális gyártás egyik legnagyobb felhasználója az autóipar. A BMW Group legújabb eredménye, hogy felépítettek egy olyan virtuális gyárat, melynek a valóságos kiépítése a világon egyedülálló módon csak a modellezést követően történik meg. Az NVIDIA Omniverse rendszerében létrehozott pontos, magas színvonalú előkészítés lehetővé teszi a NEUE KLASSE modellek virtuális járműgyártását a tényleges sorozatgyártás beindítása előtt.

4. Tecnomatix Plant Simulation

Kutatásunk során létrehoztunk egy valóságos gyártóegység virtuális másolatát a Tecnomatix Plant Simulation használatával. A program egy diszkrét, eseményvezérelt folyamatszimulációs eszköz, melyben a gyártási és logisztikai folyamatok digitális ikertestvére gyorsan felépíthető és vizsgálható (2. ábra). Leggyakoribb felhasználási területe az áramlási folyamatok szimulációja. A program kínálja kitűnő lehetőségek segítségével a valós termelési folyamatok felgyorsíthatóak, a termékfejlesztés hatékonyabbá tehető.

5. A cég valós termelési folyamata

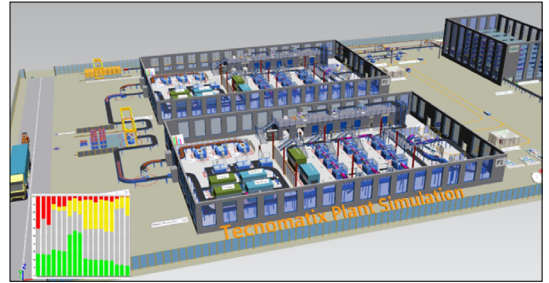
A kutatási projektet támogató cég egy piacvezető szerepet betöltő multinacionális vállalat, amely folyékony tisztítószer gyártásával és csomagolásával foglalkozik. Több helyszíni bejárás alkalmával lehetőségünk volt mélyreható elemzést készíteni az üzem egy adott terméket előállító gyártósoráról. A kiválasztott tisztítószer gyártásának azon részfolyamatát vizsgáltuk, melyben az üres műanyag flakonok elindulnak egy futószalagon, majd különböző állomásokon keresztül eljutnak a piacképes állapotig, és megkezdődik a termékek dobozolása (3. ábra).

A termelési rendszerben bár folyamatos gyártás zajlik, azonban a gyártósor életkorából, illetve a gyártóegységek működési pontatlanságaiból adódóan vannak leállások. Ezek kiküszöbölésére jelenthet egy lehetséges megoldási módot a virtuális gyártás.

6. A felépített digitális iker

A virtuális gyártás megvalósításához a valóságos gyártás folyamatait virtuális környezetbe ültettük át. A Tecnomatix Plant Simulation program alkalmazásával létrehoztunk egy folyamatszintű digitális ikertestvért, amely a valós gyártórendszert pontosan reprezentálja (4. és 5. ábra). A modellezés során a cég által összegyűjtött 2022. évi

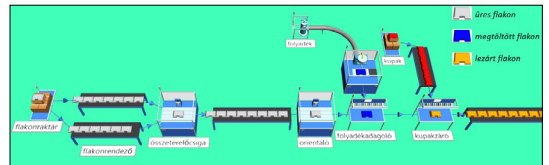
gyártósori adatok alapján dolgoztunk. A felépített digitális modell elemeihez emellett számos további adat került hozzárendelésre, mint például a futószalagok hossza és sebessége, valamint az egyes állomásokon percenként legyártott termékek száma. Ezen paramétereket a valóságban precízen megfigyeltük és megmértük, majd a szimulációs szoftverbe beilleszthetővé alakítottuk át. A következőkben ismertetjük a modell egyes részeit, amelyeken a bemutatás során láthatóvá válik, hogyan feleltethetőek meg a valóságnak.



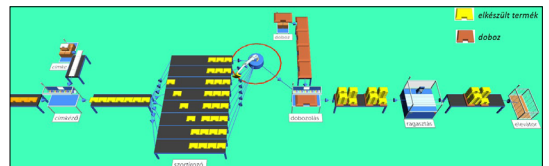
2. ábra. Plant Simulation modell a gyakorlatban [9]



3. ábra. A termelési folyamat gyártórendszere



4. ábra. A felépített virtuális modell I.



5. ábra. A felépített virtuális modell II.

6.1. A valós gyártósor a Tecnomatix Plant Simulation programban

A szimuláció első lépéseként a flakonraktárból az üres palackok egy gravitációs elven működő adagolón keresztül ömlesztve érkeznek az első állomásra. Ezt követően a flakonok talpukra állítva, sorokba rendeződve indulnak tovább két futószalagon, melyeket végül egy összetereelő csiga egyetlen sorra egyesít.

A modellben szereplő futószalagok hosszanti méretei centiméter-pontossággal megfelelnek a valóságnak. Ezenfelül a sebességüket határoztuk meg, melyet a valós egységeknél feltüntetett BPM mértékegységről a modellben beállítható m/s értéké számoltunk át.

Az összetereelő csigát követő futószalag az orientáló állomásra irányítja a flakonokat. Az orientáló olyan egység, amely az üres flakonokat 30°-os döntés mellett megfelelő irányba fordítja, miközben töltőfej nagyságú hézagot állít be közöttük. Ezen műveletekkel előkészíti a folyadéktöltést. A töltőberendezés $\pm 1\%$ -os tűréssel minden egyes flakonba 0,75 liter vegyi anyagot juttat. Ennek menetét a modellben összeszerelésként értelmeztük.

Mind az állomásokhoz, mind az összeszerelésekhez feldolgozási időt adtunk meg, amely azt jelenti, hogy az adott részegység mennyi ideig foglalkozik a meghatározástól függően egy vagy akár több termékkel.

Ezt követően a megtöltött flakonok biztonságos lezárása következik. A kupakzáró állomás a gravitációs elven érkező kupakokat 40 N nagyságú meghúzási erő kifejtésével tekeri rá a flakonokra. A következő futószalag a kupakzáró és címkéző összeszerelések közötti anyagáramlást biztosítja. A címkéző állomáson a lezárt flakonok maguk köré csavarják a címkéjüket, melyek megfelelő rögzítése ragasztott kötással történik. A már megtöltött és külső borítással ellátott késztermékek egy futószalagon keresztül a szortírozó egységbe jutnak, ahol egy pneumatikus útterelő $2 \times 4 = 8$ utas pályára rendezi azokat, majd megkezdődik a palettázásuk.

A dobozba helyezés műveletét egy pneumatikus megfogással rendelkező TT manipulátor 8,3 s alatt viszi véghez. Egyszerre 40 db termék megemelésére képes, melyeket 4×5 -ös elrendezésben (4 oszlop, 5 sor) helyez el, egyidejűleg 2 doboz feltöltését elvégezve.

A dobozolás befejeztével egy futószalag vezet a dobozok leragasztását végző állomáshoz. Utolsó lépésként megvalósul a 20 db flakon befogadására alkalmas kartondobozok ragasztószalag hasz-

nálatával történő biztonságos lezárása, melyeket egy futószalag, majd az elevátor szállít tovább a csomagolóüzembe.

A digitális iker felépítésének szempontjából az elemek 3D-s alakja helyett a funkcióik kerültek előtérbe, ezen túlmenően a Plant Simulation sem kezeli tökéletesen a 3D-s objektumok megjelenítését, ezért a szimuláció külalakra csak szemléltető, azonban a valósággal megegyező feladatokat ellátó munkaállomásokkal dolgozik.

6.2. A szimulációs modell pontosítása

Annak érdekében, hogy a digitális iker még jobban tükrözze a valóságot, a cég gyártósori adatai alapján összegeztük a részegységeken előforduló működési hibákat. Az **1. táblázat** alapján látható, hogy az egyes állomások működési pontatlanságaiból adódó hibák a 2022. évben jelentős állásidőket okoztak a cégnek. Azért, hogy ezek a veszteségek a szimuláció eredményeiben is megjelenjenek, az egységekhez hozzárendeltük ezen üzemelési hibákat. A modell minden egyes eleméhez beállítható, hogy a szimulációs időhöz viszonyítva milyen rendelkezésre állás mellett képes dolgozni. Az egyes állomások évre tett működési hibája a szimulációban rendelkezésre állásként mutatkozik meg.

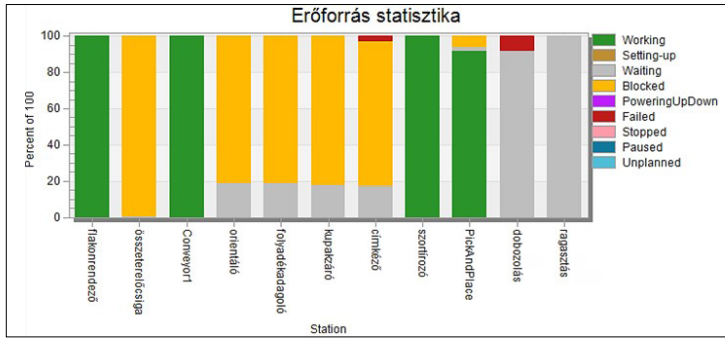
1. táblázat. A gyártósor 2022. évi működési hibája

| Gyártósori elem | Okozott hiba (perc) | Rendelkezésre állás (%) |
|--------------------|---------------------|-------------------------|
| Flakonrendező | 3838 | 98,97 |
| Összetereelő csiga | 1326 | 99,65 |
| Conveyor | 676 | 99,94 |
| Orientáló | 1694 | 99,56 |
| Folyadékadagoló | 7830 | 97,95 |
| Kupakzáró | 2766 | 99,28 |
| Címkéző | 3048 | 99,20 |
| Szortírozó | 1309 | 99,56 |
| Robotkar | 1519 | 99,60 |
| Dobozolás | 13904 | 96,36 |
| Ragasztás | 970 | 99,75 |

6.3. A szimulációs modell kiértékelése

A modellen elvégzett elemzések kapott eredményei a valóságnak megfelelő szimulációt tükröznek (**6. ábra**).

Ezekből megállapítható, hogy az egyes részfolyamatok nincsenek megfelelően összehangolva, a rendszer korszerűsítésre szorul. Míg az összetereelő csiga már a gyártósor elején szinte teljesen blokkolja a termelési folyamatot, addig a dobozolás



6. ábra. A jelenlegi gyártósor erőforrás-statisztikája

és a ragasztás állomásai az üzemelési idejük több mint 90%-ában termékekre várnak. A gyártórendszer 2022. évi adatai alapján a termelési folyamat jelenlegi hatékonysága (OEE) megközelítőleg eléri a 72%-ot, mely értékhez a következő módon jutottunk:

tervezett gyártási idő: 382 022 perc
 tényleges gyártási idő: 274 785 perc
 leállások összesített ideje: 62 987 perc
 tervezett ütemidő: 0,0038 perc/db
 legyártott termékmennyiség: 60 448 969 db

Selejttel nem számol a cég, mivel minden alapanyag újrahasznosítható.

$$A = \frac{274\,785}{382\,022 - 62\,987} \cdot 100 = 86,13\% \quad (1)$$

$$P = \frac{60\,448\,969 \cdot 0,0038}{274\,785} \cdot 100 = 83,59\% \quad (2)$$

$$Q = \frac{60\,448\,969}{60\,448\,969} \cdot 100 = 100\% \quad (3)$$

$$OEE = (0,8613 \cdot 0,8359 \cdot 1) \cdot 100 = 71,99\% \quad (4)$$

Mindezek alapján megállapítható, hogy a gyártórendszer fejlesztésre szorul. A cég fejlődésének érdekében szükséges a teljes eszközhatékonyság nagymértékű növelése.

7. A kutatás fejlesztési lehetőségei

A kutatás során sikerült egy ipari gyártósor digitális ikertestvérét létrehozni, melyet a vállalat 2022. évi adatai alapján elemeztünk. A projekt további fejlesztési tervei között szerepel a kapott eredményeknek megfelelően módosítási javaslatok megfogalmazása, melyekkel a folyamat hatékonyságában jelentős növekedés és az egyes elemek működésében maximális kihasználtság érhető el.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Xcelgo by Schneider Electric, What Is Virtual Commissioning?. (letöltve: 2024. február 22.) <https://xcelgo.com/virtual-commissioning>
- [2] Morshedzadeh I., Amos H. C. Ng, Jeusfeld M., Oscarsson J.: *Managing Virtual Factory Artefacts in the Extended PLM Context*. Journal of Industrial Information Integration, 28. (2022) 100369. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100369>
- [3] Ferreira W. P., Armellini F., Santa-Eulalia L. A.: *Simulation in Industry 4.0: A State-of-the-Art Review*. Computers & Industrial Engineering, 149. (2020) 106868. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106868>
- [4] Simon J.: *Ipari digitalizáció – Ipar 4.0 és virtuális valóság (VR) a gyártásban*. Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok, 2023, 431–443. <https://doi.org/10.14232/jtfg.2023.kulonszam.431-443>
- [5] Wegener R., Marheineke N., Hietel D.: *Virtual Production of Filaments and Fleeces*. Currents in Industrial Mathematics, 2015, 103–162. https://doi.org/10.1007/978-3-662-48258-2_6
- [6] VanDerHorn E., Mahadevan S.: *Digital Twin: Generalization, Characterization and Implementation*. Decision Support Systems, 145. (2021) 113524. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>
- [7] Verma K. K., Babel V.: *Evaluation and Enhancement of Transfer Line in Production Process by Simulation*. Research Journal of Science and Technology, 12. (2020) 110–122. <https://doi.org/10.5958/2349-2988.2020.00014.5>
- [8] Bendowska K., Zawadzki P.: *Development and Verification of a Simulation Model of an Automated Assembly Line*. Applied Sciences, 13. (2023) 10142. <https://doi.org/10.3390/app131810142>
- [9] Siemens Digital Industries Software, Discrete Event Simulation with Tecnomatix Plant Simulation Tutorials. (letöltve: 2024. február 28.) <https://resources.sw.siemens.com/en-US/download-discrete-event-simulation-with-tecnomatix-plant-simulation-tutorials#disw-fulfillment-form>



BOLYAI FARKAS ÁLTAL TERVEZETT ÖNTÖTTVAS KEMENCE TANULMÁNYOZÁSA

STUDY OF A CAST IRON STOVE DESIGNED BY FARKAS BOLYAI

Pásztor Judit,¹ Szócs Krisztina,² Csegedi Ferenc-József,³ Márton Botond⁴

¹ Sapientia EMTE, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia, pjudit@ms.sapientia.ro

² Sapientia EMTE, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia, szocs.krisztina@student.ms.sapientia.ro

³ Sapientia EMTE, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia, csegedi.ferenc@student.ms.sapientia.ro

⁴ Sapientia EMTE, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia, marton.botond@student.ms.sapientia.ro

Abstract

Farkas Bolyai is known among mathematicians. However, he was also interested in the design and construction of stoves and ovens. In our paper we study a cast iron stove designed by Farkas Bolyai, based on a specimen found in the Museum Teleki Téka on Târgu-Mureş. Although the technical realization is nearly two hundred years old, the problem of inspiration is still a concern of our society today. We believe that, looking back, we can find answers, perhaps partial or complete solutions to the problem of the economical stove.

Keywords: oven, stove, thermal energy saving, Farkas Bolyai.

Összefoglalás

Bolyai Farkas neve a matematikusok körében ismert. Azonban kályhák, kemencék tervezése és építése is foglalkoztatta. Dolgozatunkban a Bolyai Farkas által tervezett öntöttvas kemencét tanulmányozzuk a Teleki Tékában található mintadarab alapján. Bár közel kétszáz éves műszaki megvalósításról van szó, az illető probléma mind a mai napig foglalkoztatja a társadalmunkat. Úgy gondoljuk, visszatekintve, válaszokat találhatunk, esetleg rész- vagy egész megoldást a takarékos tűzhely problémájára.

Kulcsszavak: kemence, kályha, hőenergia, takarékoság, Bolyai Farkas.

1. Az öntöttvas kemence/kályha bemutatása

Bolyai Farkast (1775–1856) is foglalkoztatta a gazdaságos fűtés, energiafelhasználás. Marosvásárhelyen, a Teleki Téka Bolyai termében fellelhető egy cserépkályha és egy öntöttvas kályha, amelyek tervezése és építése az ő nevéhez kötődik. Az öntöttvas kályha alakja, kialakítása különleges, története érdekes. A meglepő tudású szakember iránti tiszteletünket munkássága szakmai értékelésével fejezhetjük ki [1, 2, 3]. Így dolgozatunkban

a Bolyai Farkas által tervezett öntöttvas kályhát tanulmányozzuk.

Bolyai a Kemence-tan kéziratban a tüzelőberendezéseket kemencének nevezte, a pontosítást a hozzáfűzött jelzők segítségével oldotta meg. Írt melegítőkemencékről, főzőkemencékről és sütőkemencékről, azaz kályhákról, tűzhelyekről és kemencékről [1].

A tanulmányozandó tüzelőberendezés melegítésre szolgált, így továbbiakban nevezhető kályhának. A címben szereplő „kemence” megnevezés tisztelgés az alkotó tudós előtt.

Bolyai a Kemence-tanban fogalmazta meg a kályhák iránti elvárásait: „A tűznek mindenik használatában megkívántatik: Hogy füstölés és gőz nélkül minél célszerűtbb legyen; Az égőnek s kemence költségnek lehető megkímélése; A tűz könnyű tétele.

A szoba melegítésben megkívántatik az első négy ponton kívül még: Hogy a meleg a földig terjedjen fűtő sugárzás alkalmatlansága nélkül; Hogy tartós legyen; Hogy a kivitt rossz lég helyébe friss jöjjön, nem hűtve; Hogy a külső a szobát ne dísztelenítse” [1].

A kályhát 1840-ben öntötték Vajdahunyadon, majd közel 150 évig állt szolgálatban Marosvásárhely különböző helyszínein, mielőtt a múzeumnak adományozták volna [1]. Felépítése az **1. ábrán** követhető.

A kályha kialakítása a fatakarakós fűtésre irányul. A tűztér a tüzelőanyag befogadását és elégetését biztosítja. Nem találtunk rostély alkalmazására utaló jeleket. A tűztér feletti több fekvő kályhaelem dobozszerű, üreges, bennük füstjárat kígyózik. A kályhaelemek közti függőleges tagok a füstjárat kialakításában vesznek részt. A tekervényes járat jobb hatásfokkal hasznosítja a tüzelőanyagot. A kályhaelemek tetszés szerinti számban egymás fölé helyezve növelik a kályha fűtőképességét [3]. A füstjárat hosszát nyitható-zárható nyílással lehet változtatni, ezt Bolyai Farkas kurtitónak nevezte, **2. ábra**.

A füstgázjelző a II. és III. kályhaelem között található, **2. ábra**. A nyitott nyílás esetén könnyű a gyújtás, a zárt nyílás hosszabb füstutat, nagyobb fűtőfelületet, több hőleadást eredményez. A képen a zárt állapot figyelhető meg. A könnyű tisztítás érdekében a kályha elemeire szedhető. Az elemenként kialakított bordás tisztítónyílás-aj-

tók ezt tovább könnyítették. Az összeállítás utáni a füstmentességet agyaggal, a történet szerint szilvaivázzal biztosították [1].

2. A Bolyai öntöttvas kályha vizsgálat

A mai korszerű fűtőrendszerek kialakítása és működése szorosan kapcsolódik a matematikai modellezéshez és mérések sorozatához [4, 5]. Ezen elvek és eszközök együttes alkalmazása lehetővé teszi a tervezők és mérnökök számára, hogy energiahatékony és optimalizált rendszereket hozzanak létre [6, 7].

Egy kályha méretezése a névleges teljesítmény, a hőtárolási idő, a maximális tüzelőanyag-mennyiség és az ennek megfelelő füstjárat alapján történik. Jellemzésére hatásfokot használnak [2].

Jelen esetben csak ellenőrizni, vizsgálni tudjuk a Bolyai Farkas által tervezett kályhát.

A vizsgálat módszere:

- a kályha méreteinek pontos meghatározása, testmodell készítése, a kályha típusának meghatározása;
- a tűztér vizsgálata;
- a füstjárat hossz számítása, vizsgálata;
- a füstgázok hőmérsékletének számítása;
- a kályha hatásfokának számítása;
- a kályhában zajló folyamatok Ansys programmal való modellezése és szemléltetése.

2.1. A kályha méretei, testmodellje, típusa

A kályha méreteit digitális tolómérce, mérőszalag és mikrométer segítségével határoztuk meg. Megfigyeltük, hogy a falak vastagsága nem egyenletes, amely a kiforratlan öntési technikával magyarázható. A modell pontossága érdekében több mérést végeztünk. Az adatok átlagait az **1. táblázat**ban foglaltuk össze.



1. ábra. A tanulmányozott Bolyai-kályha felépítése



2. ábra. A füstgázjelző, kurtító zárt állapota

1. táblázat. A kályharészek méretei

| Mért adatok átlagai (mm) | Tüztér | I. elem | II. elem | III. elem | IV. elem | V. elem | Füstjárat |
|--------------------------|--------|---------|----------|-----------|----------|---------|-----------|
| Hosszúság | 605 | 715 | 717 | 716 | 717 | 722 | 100 |
| Szélesség | 314 | 314 | 314 | 314 | 314 | 314 | 314 |
| Magasság | 322 | 124 | 122 | 123 | 10 | 119 | 75 |
| Falvastagság | 9,15 | 9 | 9,2 | 8,85 | 9 | 9,15 | - |

A mérési adatok alapján, Autodesk Inventor műszaki rajzolóprogrammal, elkészítettük a kályha térbeli modelljét, **3. ábra**.

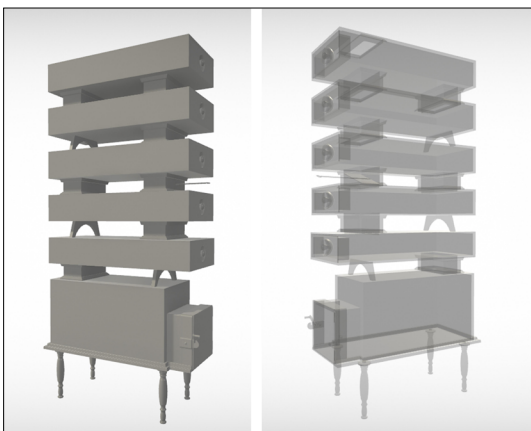
A Bolyai Farkas által tervezett öntöttvas kályha szakaszos, szilárd tüzelésű, egyhájú, légrés nélküli tüzelőberendezés, **[2]**.

A tüztér hasáb alakú, egyterű, fekvő elrendezésű. Az égési levegő bevezetése a tömör tüztérfenékre ajtón keresztül történik. Az égési levegő bevezetésének helye fontos a kályha hatékony működése szempontjából, ez 50 mm-rel a tüztérfenék síkja fölött kellene, hogy elhelyezkedjen, **[2]**. Ez a vizsgált kályha esetében nem állapítható meg pontosan, mert az ajtón utólagos átalakítás történt.

A hőtároló test, a kályhaelemek belsejében kialakított járatrendszer a tüztérből való kilépéstől a füstgáz kijáratig tart. A hosszabb járatszakaszok vízszintesek, így ez a kialakítás soros, vízszintes járatnak tekinthető **[2]**.

2.2. A fűtőfelület és a tüztér vizsgálata

A kályha hőközlése összetett folyamat. A kályha járataiban áramló forró füstgáz átadja a hőt a kályhaelemek falának. Innen a hő elvezetődik



3. ábra. A Bolyai-kályha testmodellje

a hidegebb felület felé, amely hőtadással és sugárzással átadja a fűtendő tér levegőjének **[1, 2]**. A kályhák üzemére az állandó változás jellemző, **[4]**. A számítások egyszerűsítése érdekében néhány adatot mértékadónak fogad el a szakirodalom, amely évtizedes tapasztalatokra és szabványokra alapoz, **[2]**.

A kályha A_k fűtőfelülete kiszámolható a mért adatok alapján. A fűtőfelület 1,01 m² nyitott füstelzáró esetén, és 2,3 m² zárt füstelzáró esetében.

A kályhába betehető maximális tüzelőanyag-mennyiség és a tüztér mérete közötti összefüggés, a közép-európai méretezési mód alapján és MSZ EN 15544 szabvány szerint, **[2]**:

$$A_{tmax} = \frac{900 \cdot m - (25 + m) \cdot K}{2} \text{ [cm}^2\text{]}, \quad (1)$$

ahol: A_{tmax} a maximális tüztérterület [cm²]; K a tüztér alapkerülete [cm]; m a tüzelőanyag maximális tömege [kg].

Az (1) összefüggés alapján meghatározható adott méretű tüztérbe betehető maximális famennyiség:

$$m = \frac{2 A_t + 25 K}{900 - K} \text{ [kg]}. \quad (2)$$

Számolt érték $m=11,33$ kg.

Az Österreichischer Kachelofenverband kísérletei alapján alkotott szabvány tapasztalati összefüggése szerint számolt maximális famennyiség, **[2]**:

$$m = \frac{O_t}{900} \text{ [kg]}, \quad (3)$$

ahol: O_t a tüztér belső felülete, [cm²].

Az így számolt érték: $m=10,30$ kg.

2.3. A füstjárat hosszának számítása, vizsgálata

A szabványok 78%-os hatásfokú működéshez minimális füstjáratossz határoznak meg. Ennek megfelelően a tüztérkilépésnél a füst hőmérséklete 550 °C és a minimális járatossz végén 240 °C lesz. A minimális füstjáratossz meghatározása egyhájú, légrés nélküli, soros járatú kályha esetén az alábbi empirikus összefüggéssel számolható **[2]**:

$$L_{jmin} = 1,3 \sqrt{m} \text{ [m]}, \quad (4)$$

ahol: m a tüztérbe betehető maximális famennyiség, [kg].

Számolt értéke: $L_{jmin} = 4,37$ m, ha $m = 11,33$ kg.

A kályha füstjاراتának vizsgálatához megrajzoltuk a füstjارات nyomvonalát. A nyomvonalak a füstgáz-elzáró két helyzetében, a **4. ábrán** láthatóak.

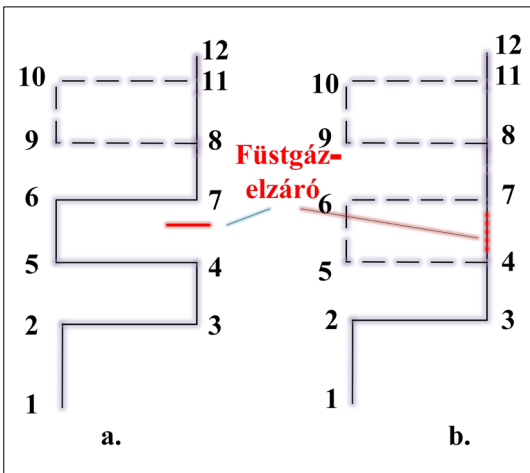
A nyomvonalak hosszainak számítása a **2. táblázat** adatai alapján történt.

A kályha füstjاراتának hossza mindkét esetben kevesebb az adott tüztérterület alapján elvárt minimális füstjاراتhossznál.

Ha a 8 és 11 pont között is lenne füstelzáró, akkor annak zárt állapota esetén a füstjاراتhossz közelítené az elvárt 4,37 m-t. Léteznek fényképek, amelyek a felső füstgázjاراتban is elhelyezett füstelzáróra utalnak.

2. táblázat. A Bolyai-kályha füstjاراتainak számítása

| Hosszú füstjارات [mm] | | Rövidfüstjارات [mm] | |
|-----------------------|---------------|---------------------|---------------|
| Zárt füstelzáró | | Nyitott füstelzáró | |
| 1--2 | 298 | 1--2 | 298 |
| 2--3 | 615 | 2--3 | 615 |
| 3--4 | 197 | 3--4 | 197 |
| 4--5 | 617 | 4--7 | 198 |
| 5--6 | 198 | 7--8 | 195 |
| 6--7 | 593 | 8--11 | 194 |
| 7--8 | 195 | 11--12 | 134,5 |
| 8--11 | 194 | | |
| 11--12 | 134,5 | | |
| L_{jzart} | 3041,5 | $L_{jnyitott}$ | 1831,5 |



4. ábra. A füstjارات nyomvonala: a – Hosszú jارات, zárt füstgáz-elzáró; a – Rövid jارات, nyitott füstgáz-elzáró

2.4. A füstgáz hőmérsékletének számítása

A fa égése összetett folyamat, hőmérsékleti adatai: a gyulladás, 230–370 °C; az égés, 400–1000 °C; az utóizzás, itt elfognak az éghető anyagok, és a faszén 500–800 °C hőmérsékleten elizzik.

A kályha hatásfokának számításához szükséges a füstjارات mentén bekövetkező hőmérséklet-csökkenés. Ez az alábbi összefüggéssel számolható [2]:

$$t = 550 e^{-\frac{0,83 L_j}{L_{jmin}}} \text{ [}^\circ\text{C]}, \quad (5)$$

ahol: t füstgáz hőmérséklete [°C]; L_j jاراتhossz [m]; L_{jmin} a minimális jاراتhossz [m]; 550 [°C] érték a L_{jmin} tüztérből kilépő füstgáz mértékadó hőmérséklete.

Számolt értékei a hosszabb füstjارات végén $t_{k\text{hosszú}} = 308,74$ °C, és a rövidebb füstjارات kilépésénél $t_{k\text{rövid}} = 388,47$ °C. Mindkettő nagyobb 240 °C-nál.

A füstgáz hőmérsékletének alakulását a füstjاراتok mentén a **5. ábra** szemlélteti.

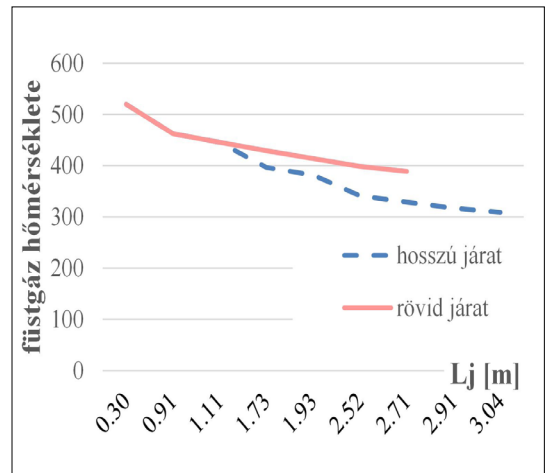
A rövidebb füstjاراتon kilépő füst hőmérséklete nagyobb, mint a hosszabb füstúton haladó füstgáz kilépő hőmérséklete.

2.5. A kályha hatásfokának számítása

A hatásfok számítására az alábbi empirikus képlet használatos [2]:

$$\eta = 101,09 - 0,0941 t_k - 6,275 \cdot 10^{-6} t_k^2 - 3,173 \cdot 10^{-9} t_k^3 \text{ [%]}, \quad (6)$$

ahol: t_k a kályha füstjاراتából kilépő füstgáz hőmérséklete [°C].

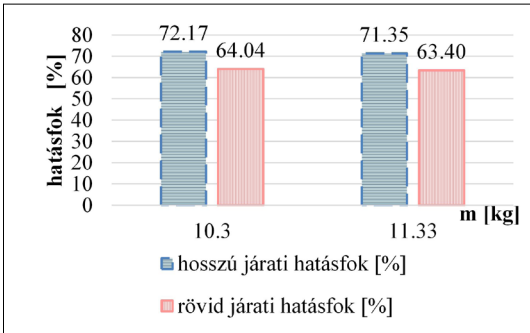


5. ábra. A füstgáz hőmérsékletének alakulása a füstjاراتok mentén

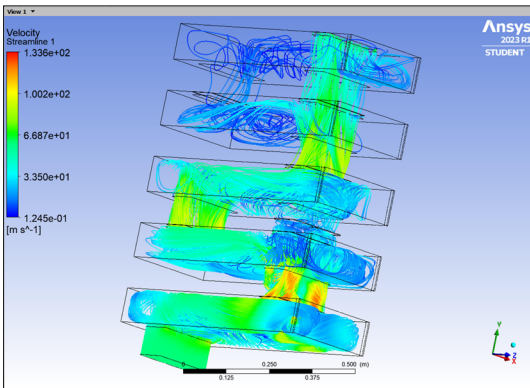
A számolt hatásfokok értékeit a két füstjárat mentén, a két szabvány szerint meghatározott famennyiség alapján a **6. ábra** tartalmazza és jeleníti meg.

A rövidebb füstúton kisebb a kályha hatásfoka.

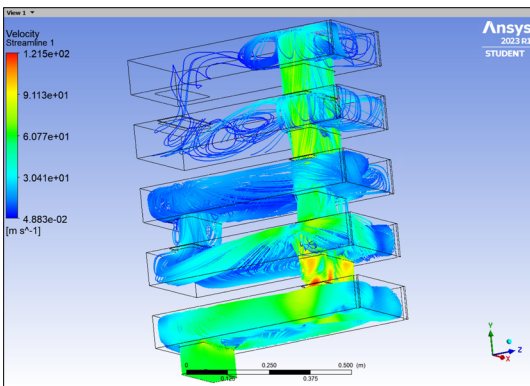
A kevesebb m famennyiség javítja a kályha hatásfokát.



6. ábra. A Bolyai-kályha hatásfoka



7. ábra. A hosszú füstjáraton haladó füstgázok áramlása



8. ábra. A rövid füstjáraton haladó füstgázok áramlása

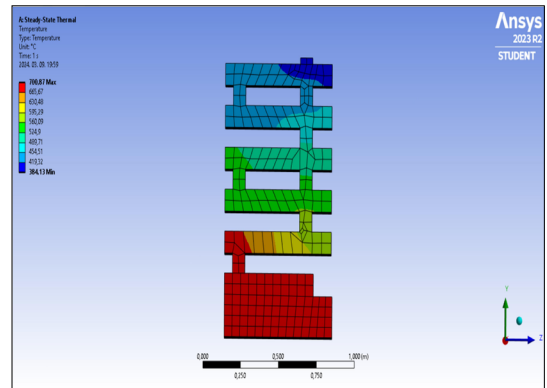
2.6. A kályha folyamatainak vizualizálása

Az Ansys Discovery Student **[8]** modellezési megoldásaival vizualizáltuk a Bolyai-kályhában zajló összetett folyamatokat. Ansys Discovery Student programmal végeztünk gázáramlási elemzéseket a **7–8. ábrán** láthatóak.

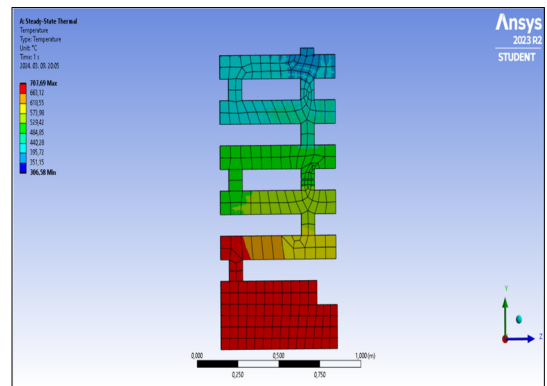
A hosszú füstjárat végén a kilépő gáz sebessége $v = 1,12$ m/s. A rövid füstjárat végén a kilépő gáz sebessége $v = 3,99$ m/s.

A modellek igazolják, hogy a rövidebb füstjárat mentén nagyobb sebességgel történik a gázok áramlása.

Az égés során keletkezett hő a forró füstgázoktól a kályhaelemek hőátadással veszik át. Az Ansys Discovery Student modellezési megoldásaival vizualizáltuk a Bolyai-kályhában zajló összetett hőtan folyamatokat. A modellek üregek, a belépési hőmérséklet 700 °C , a kilépési hőmérsékleteiket az (5) összefüggéssel számoltuk. A kályha termikus elemzése tulajdonképpen csak szemlélteti a jelenségeket, **9–10. ábra**.



9. ábra. A kályha hőelemzése a hosszú füstjáraton haladó füstgázok esetén



10. ábra. A kályha hőelemzése a rövid füstjáraton haladó füstgázok esetén

A modellek azt mutatják, hogy a tüztér átmelegszik mindkét helyzetben, így a kályha a padlóhoz közeli térben is ad le hőt.

A hosszú füstjárat mentén, **9. ábra**, a kályhaelemek jobban átmelegednek, mint a rövidebb füstjárat mentén, **10. ábra**. Ez jól követhető a kályhaelemek szinkódjával. Ez is igazolja azt, hogy a rövid füstjárat mentén több hőt tartalmazó füstgáz hagyja el a kályhát, és lépik a kéménybe, mint a hosszújáratú üzemeltetés során.

3. Következtetések

A dolgozat során bepillantást nyerhettünk a Kemence-tan kéziratába.

A megvalósított testmodell belátást nyújt a kályha belső felépítésébe.

A kályha füstjáratának hossza kevesebb az adott tüztérterület alapján elvárt minimális füstjárat-hossznál, azonban a szakaszos tüzelés és vélhetően kevesebb famennyiség biztosíthatta a megfelelő hatásfokú, füstmentes fűtést.

Bolyai egyedülálló szerkezetű kályhákat hozott létre. Bár a hőtan elméleti kérdései akkor még homályban lapultak, tapasztalataival mégis sikerült megfognia a lényegét és felhasználni azt munkásságában: a hosszabb füstjáraton a füstgáz jobban lehűl, így több hőt ad át a fűtendő térnek.

A kályhában a tűz könnyű gyújtása a rövid füstgázjárat mentén füstölés nélkül megtörténhetett, a nagyobb sebességgel mozgó füstgáz miatt.

Az üzemeltetés, fűtés során a meleg akár a földig terjedhetett.

A kályha tartósságát igazolja, hogy a Kolozs megyei Aranyosgerenden, a református templomban még ilyen kályhával fűtenek.

A kályha kellően érdekes kialakítása a modern terekbe is beépíthető, így az a kívánalom is teljesül, miszerint a szobát ne dísztelenítse.

A kályha felépítésének vizsgálata és működésének modellezése alapján kijelenthető, hogy az akkor újszerű kialakítás megfelelt a mai korszerű előírásoknak is.

A kályha tanulmányozásával, ötvözve a múltbeli értékeket a jelenben használt technikákkal és tudással, jobban megértettük a fűtés gépészetét.

Köszönetnyilvánítás

Tisztelettel megköszönjük a Teleki Téka munkaközösségének, hogy lehetővé tették a Kemence-tan tanulmányozását és a Bolyai kályha vizsgálatát, készségesen támogattak a méréseinkben, a kérdéseinkre szakszerű válaszokat adtak.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Oláh A.: *Bolyai Farkas hőtani elméletei, kemencera kó, -öntő tapasztalatai*. L'Harmattan Kiadó, Kolozsvár, 2015.
- [2] Libik A.: *Fatüzelésű épített kályhák*. Terc Kft. Kiadó, Budapest, 2013.
- [3] Sabján T.-L., Kiss K., Lengyel K.: *Öntöttvas kályhák*. Terc Kft. Kiadó, Budapest, 2013. 108–109.
- [4] Sánta R., Fürstner I.: *Investigation of the Pressure Drop in the Shell Side of the Evaporator*. Acta Polytechnica Hungarica 19/9. (2022) 239–249.
- [5] Bošnjaković M., Santa R., Crnac Z., Bošnjaković T.: *Environmental Impact of PV Power Systems*. Sustainability, 15/15 :11888. (2023) 2–26. <https://doi.org/10.3390/su151511888>.
- [6] Harangus K., Kakucs A.: *Valószínűségszámítás és statisztika a mérnöki gyakorlatban*. EME Kiadó, Kolozsvár, 2021.
- [7] Yaheliuk S., Didukh V., Busnyuk V., Boyko G., Shubalyi O.: *Optimization on Efficient Combustion Process of Small-Sized Fuel Rolls Made of Oleaginous Flax Residues*. INMATEH Agricultural Engineering, 62/3. (2020) 361–368. <https://doi.org/10.35633/inmateh-62-38>.
- [8] <https://www.ansys.com/products/structures>



MÉRŐESZKÖZ FEJLESZTÉSE ÉS VALIDÁCIÓJA KENŐANYAGOK KONZISZTENCIÁJÁNAK VIZSGÁLATÁRA

DEVELOPMENT AND VALIDATION OF A MEASURING EQUIPMENT FOR TESTING THE CONSISTENCY OF LUBRICATING GREASE

Popa-Müller Izolda,¹ Gál Zsolt²

¹ Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék,
Marosvásárhely, Románia, ipmuller@ms.sapientia.ro

² Babor Srl., Aluniș, Románia, galzsotika22@gmail.com

Abstract

We designed a penetrometer to measure the consistency of lubricating grease, the consistency value of which corresponds to the value given by the manufacturers. This is shown to be an important tool for testing lubricating grease in tribology laboratory practice, as the measuring instrument can be used to measure any lubricating grease consistency.

Keywords: *constraints, kinematic pairs, constraint equations.*

Összefoglalás

A kenőzsír konzisztenciájának mérésére egy penetrométert terveztünk és kiviteleztünk. Ellenőriztük, hogy a mért konzisztenciaértékek megfelelőek legyenek a gyártók által megadott értékkel. Ez egy fontos eszköz a tribológialaborgyakorlat kenőzsírvizsgálatának elvégzésére, hiszen a mérőműszer bármilyen kenőzsír-konzisztencia mérésére alkalmazható.

Kulcsszavak: *konzisztencia, penetrométer, jelfeldolgozó, LabView.*

1. Bevezetés

A kenőzsírok konzisztens kenőanyagok, amelyek alapolajból, sűrítőanyagból (fémszappan) és adalékból állnak.

A konzisztencia a kenőzsírok folyási tulajdonságainak meghatározásában játszik szerepet, vagyis a kenőzsírok keménységét, folyósságát jellemzi.

A kenőzsírok konzisztenciája a penetráció mértékével számszerűsíthető.

A kenőzsírokkal szemben támasztott követelmények:

- hosszú élettartam;
- jó tapadóképesség;
- tömítőképesség;

- korrózióvédő hatás;
- kopáscsökkentő hatás;
- alacsony mechanikai veszteség, nagy terhelés üzemelés esetén is megfelelő kopásvédelem (EP-hatás);
- extrém alacsony vagy magas hőmérsékleten is megfelelő kenés biztosítása.

A kenőzsírok konzisztencia szerinti osztályozását az amerikai Nemzeti Kenőzsír Intézet (National Lubricating Grease Institute) NLGI-fokozatba sorolja, az **1. táblázat**an bemutatva. [1–6].

A dolgozatban terveztünk, kiviteleztünk a konzisztencia mérésére egy penetrométert, és ellenőriztük annak pontosságát.

1.táblázat. A kenőzsír NLGI-fokozata [7]

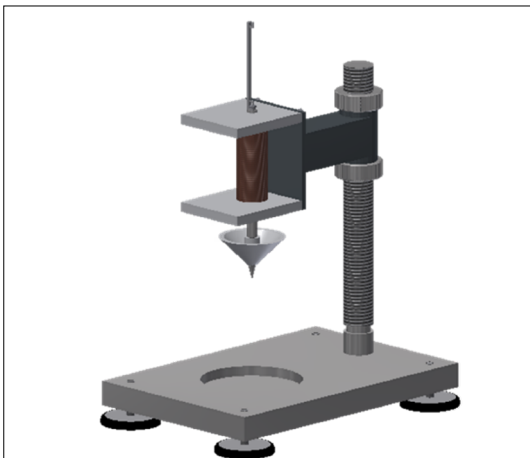
| Konzisztencia-fokozat NLGI szerint | Penetráció 60 törés után, 25 °C-on, 0,1 mm-ben | A kenőzsír állaga |
|------------------------------------|--|-------------------|
| 000 | 445–475 | folyós |
| 00 | 400–430 | folyós |
| 0 | 355–385 | nagyon lágy |
| 1 | 310–340 | lágy |
| 2 | 265–295 | mérsékelten lágy |
| 3 | 220–250 | tömör |
| 4 | 175–205 | félkemény |
| 5 | 130–160 | kemény |
| 6 | 85–115 | nagyon kemény |

2. A kenőanyagok konzisztenciamérése

2.1. Kenőanyagok konzisztenciamérésének eszköze

A konzisztencia értékét penetrométerrel végzik. A mérés során a penetrométer szabványosított alakú, 150 g súlyú kúpja a kenőzsírba merül 5 másodperc alatt, 25 °C-os szobahőmérsékleten. A bemerülési mélység jellemzi a konzisztencia értékét.

A mérőkészülék, **1. ábra**, szerkezete az alapzattól, egy szabványos méretű kúpból, **2. ábra**, kúp-

**1.ábra.** Mérőkészülék**3.ábra.** Összeszerelt mérőtest

szárból áll, amelyre rögzítve van egy szalagtartó és egy beosztásos szalag, **3. ábra**.

A szalag feszességének érdekében egy húzórugót használtunk, amely egy szalagtartóra van rögzítve, **3. ábra**. A keresztrúd egy elektromágne-
st tart, amely a mérőtest elengedésére és megvezetésére alkalmas. A mérőtest süllyedésére egy optikai érzékelőmodult használtunk, **4. ábra**. Az inkrementális adó jeleinek feldolgozására egy NI USB-6008 adatgyűjtőkártyát alkalmaztunk.

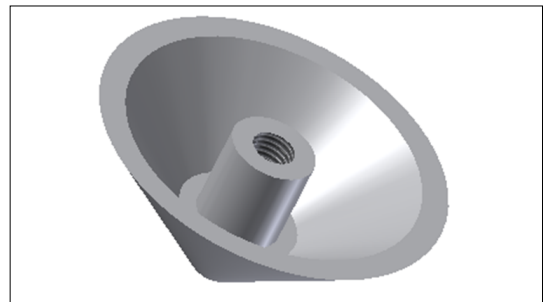
2.2. Adatgyűjtés, megjelenítés

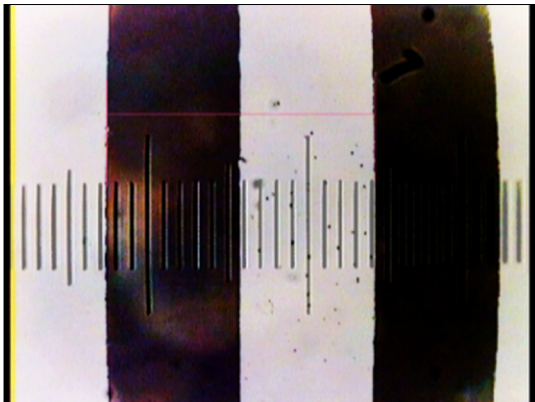
Az érzékelésre inkrementális adót használunk, amelyben a jeladó egy beosztásos szalag, a jeladó egység pedig egy optikai érzékelő modul.

A beosztásos szalagot egy tintasugaras nyomtatóból használtuk fel.

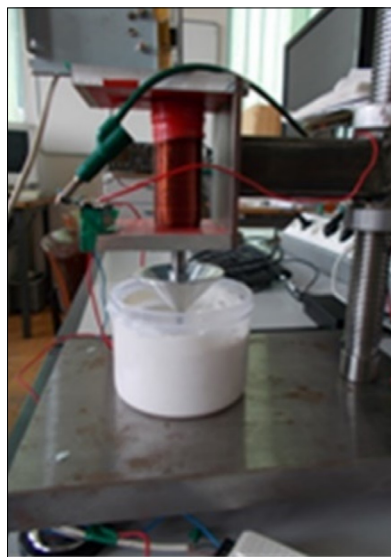
Mivel a szalag paramétereit nem ismerjük, a mintavételezéshez szükséges a szalagon levő beosztás mérete, ezért szükséges egy mikroszkóp és egy 0.01mm skála.

A szalag nagyított képét lefényképeztük a mikroszkópra szerelt kamera segítségével. Majd ugyanezen a nagyításon le van fényképezve a skála nagyított képe is. A képeket számítógépen a GIMP nevű pixelgrafikus képszerkesztő programban egymásra illesztettük, ezáltal meg lehet számolni a szalag egy periódusára eső skálaperiódusok számát, **5. ábra**.

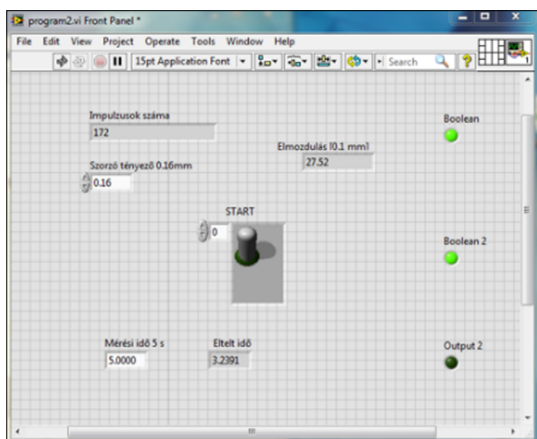
**2.ábra.** Szabványos kúp**4.ábra.** Optikai érzékelő modul



5. ábra. A szalag és a skála egymásra illesztett nagyított képe



6. ábra. Penetrométer mérés közben



7. ábra. Kezelőfelület

Az optikai érzékelő modul analóg jelet fogad, amelyet átalakít digitális jellé, és ennek a jelnek a feldolgozására egy USB-6008-as adatgyűjtő kártyát használtunk.

A szalagon levő 1 periódusra 16 darab skála-periódus esett, mivel 1 skála-periódus 0.01 mm, így a szalag 1 periódusa 0,16 mm. Az érzékelő 0,16 milliméterenként egy jelet fog küldeni az USB 6008 adatgyűjtő kártyának, amely megszámlolja és továbbítja a számítógépnek.

Az adatgyűjtő kártyán keresztül betápláljuk az érzékelőt, és vezéreljük a tekercsáramkörben levő relét. Az USB-6008-as adatgyűjtő kártya programozása LabView programozási környezetben készült.

A programozás során három feladat van megoldva:

- a relé vezérlése;
- 5 másodpercre a mérés időtartamának szabályozása;
- a mérés értékének kiszámítása és kijelzése.

2.3. Mérés megvalósítása

A mérésnél három különböző, NLGI-fokozatú kenőzsírt használtunk:

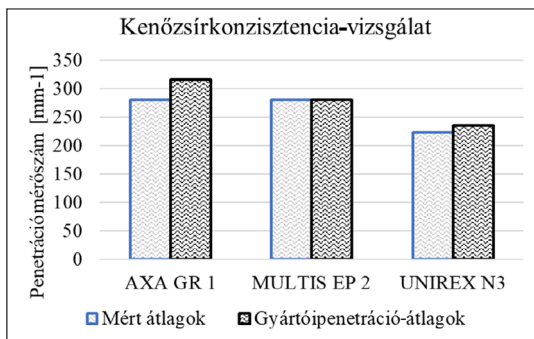
1. AXA GR1 kenőzsír, NLGI 1, lágy kenőzsír, csapágyak, csuklók, szűkítő, szánok, bütykös mechanizmusok stb. kenésére használják;
2. MULTIS EP2, NLGI 2, mérsékeltén lágy kenőzsír, többcélú zsír, a nyomás alatti csúszó-, golyós-, és görgőcsapágyak, kerékcspapágyak, kardáncsuklók, futóművek és különböző lengéscsillapítók vagy rezgő alkatrészek kenésére;
3. UNIREX N3, NLGI 3 tömör kenőzsír, alkalmazsak gördülő elemek és csapágyak magas hőmérsékleten való karbantartására, elektromos motorok kenésére.

A kenőzsírok penetrációját pihentetett állapotban mértük. A mérés elvégzéséhez a kenőzsír felületét elsimítottuk, 6. ábra.

A számítógépen a LabView programozási környezetben megnyitjuk a programot, és a Front Panel nevű ablakban megjelenik a kezelőfelület, 7. ábra, ahol be kell állítani a méréshez szükséges paramétereket. A szabványos kúp hegyét pozicionáljuk a kenőzsír fölött. A kezelőfelületen elindítjuk a programfuttatást, és a START kapcsolóval elindítjuk a mérést. Az 5 másodperc elteltével a Elmozdulás kijelzőről leolvassuk a mérőtest kenőzsírba való süllyedésének értékét tizedmilliméterben kifejezve. Ezt a mérést mindegyik kenőzsírra 5 alkalommal végeztük el. A mérési adatokból számtani

2. táblázat. A kenőzsírok értékei

| | AXA GR 1 | MULTIS EP 2 | UNIREX N3 |
|--|----------|-------------|-----------|
| Mért átlagok | 280,32 | 279,78 | 223,04 |
| Szórásnégyzet | 132,51 | 61,38 | 191,55 |
| Szórás | 11,52 | 7,83 | 13,84 |
| Gyártóipenetráció-átlagok | 315,00 | 280,00 | 235,00 |
| Különbség mérés és gyártói adat között | -34,68 | -0,22 | -11,96 |

**8. ábra.** Konzisztenciavizsgálat**3. táblázat.** Hipotézisvizsgálat

| | Különbség mérés és gyártói adat között | Hipotézisek | | |
|-----------------------|--|------------------------------------|------------|--------------------|
| 1 | -34,68 | H0: $x_k=0$ | | |
| 2 | -0,22 | H1: $x_k \neq 0$ | | |
| 3 | -11,96 | | | |
| Átlag, x_k | -15,62 | | | |
| Szórás | 14,30 | | | |
| $t_{kritikus}^{0,95}$ | 4,30265273 | | | |
| $t_{vizsgálat}$ | -1,891363374 | | | |
| Döntés | -1,891363374 | € (-4,30; 4,30) € (-4,30; 4,30) | >>> >>> | H0 igaz H1 igaz |

átlagot számítottunk. A mérési adatok átlagai a **2. táblázat**ban találhatóak.

2.4. A mérési eredmények feldolgozása

A mérési adatok feldolgozása a **2. táblázat**ban található, megjelenítése az **8. ábrán** követhető.

Az **1. táblázat** tartalmazza a gyártó által megadott penetrációértékeket is. Vizsgáltuk, hogy jelentős-e a különbség az általunk mért penetrációs adatok és a gyártó által megadott értékek között. A t - eloszlás módszerét felhasználva vizsgáltuk, hogy a különbség lényegesen eltér-e nullától.

Hipotézisvizsgálattal ellenőriztük, a **3. táblázat**ban, hogy 95%-os valószínűséggel nincs lényeges különbség az általunk mért penetrációs adatok és a gyártó által megadott értékek között, tehát a be rendezés jól mér.

3. Következtetések

A penetrométer fontos eszköz a tribológia-laborgyakorlat kenőzsírvizsgálatának elvégzésére.

A penetrométerrel mért kenőzsírok konzisztenciaértéke megfelel a gyártó által megadott értékeknek.

A mérőműszer használható a kenőzsír konzisztenciamérésére.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Kozma M.: *Tribológia alapjai*. Veszprémi Egyetem Szakmérnöki Jegyzet, Kézirat, Budapest, 1997.
- [2] Kozma M.: *Gépelemek 9*. Budapesti Műszaki Egyetem Gépészmérnöki Kar, Műegyetemi Kiadó, 1995.
- [3] Valasek I.: *Tribológiai Kézikönyv*. Tribotechnik Kft. Budapest, 1996.
- [4] Pavelescu D., Muşat M. Tudor A.: *Tribologie*. E.D.P., Bucureşti, 1977.
- [5] Johnson M., Spurlock M.: *Best practices: Strategic oil analysis: Instrument-based on-site-lubricant analysis*. Tribology and Lubrication Technology, 2010.
- [6] Lintian Shi, Yuqi Zhang, Yu Huang, Hengfeng Wei, Xiaoxing Ma: *ViSearch: Weak Consistency Measurement for Replicated Data Types*. Preprint 2022.
<https://arxiv.org/pdf/2205.03160>
- [7] Olajinfo.hu, *Kenőzsírok NLGI konzisztenciaosztályai*. 2009.
<https://www.olajinfo.hu/szabvanyok/16-kenozsir-szabvanyok/18-kenozsirok-nlgi-konzisztenciasztalyai>



ÉPÜLETEK KÜLSŐ SZTEREO-FOTOGRAMMETRIAI FELMÉRÉSÉNEK PONTOSÍTÁSÁRA IRÁNYULÓ MÓDSZERTANI FEJLESZTÉS

METHODOLOGICAL DEVELOPMENT TO IMPROVE THE ACCURACY OF EXTERNAL STEREO-PHOTOGRAMMETRIC SURVEYS OF BUILDINGS

Rák Olivér,¹ Bakai Nándor,² Motasem Altamimi³

¹ Pécsi Tudományegyetem, Műszaki és Informatikai Kar, Mérnöki és Smart Technológiák Intézet, Mérnöki Ismeretek Tanszék, PTE MIK BIM SKILLS LAB kutatócsoport, rak.oliver@mik.pte.hu

² Pécsi Tudományegyetem, Műszaki és Informatikai Kar, Mérnöki és Smart Technológiák Intézet, Mérnöki Ismeretek Tanszék PTE MIK BIM SKILLS LAB kutatócsoport, bakai.nandor@mik.pte.hu

³ Pécsi Tudományegyetem, Műszaki és Informatikai Kar, Mérnöki és Smart Technológiák Intézet, Mérnöki Ismeretek Tanszék PTE MIK BIM SKILLS LAB kutatócsoport

Abstract

Although unmanned aircraft (UA) based surveys are becoming a more common solution, their accuracy is questionable. Regulation is a major issue in the use of UA, which is currently having a negative impact on the spread of the technology. Many rules need to be applied during the survey and there are hundreds of settings to use during post-processing. Testing and evaluation of several combinations is necessary for an optimized process definition. In the present research, studies have been carried out focusing on different solutions of survey methodologies. The case studies analyzed different survey, flight rules and their combinations. The study presents the advantages and disadvantages of using UA and makes recommendations for survey methodologies through the evaluations carried out. In addition, several future research directions are presented which could lead to the advancement of building surveys.

Keywords: *unmanned aircraft, building survey, accuracy.*

Összefoglalás

Napjainkban a pilóta nélküli légi járművekkel (UA) végzett felmérések egyre elterjedtebb megoldásnak számítanak, azonban azok pontossága megkérdőjelezhető. A szabályozás nagy jelentőséggel bír az UA alkalmazásában, mely technológia elterjedésére jelenleg negatívan hat. Számos szabályt szükséges alkalmazni felmérés közben, és több száz beállítás közül választhatunk az utófeldolgozás során. Több kombináció tesztelése és kiértékelése szükséges egy optimalizált folyamatmeghatározáshoz. Jelen kutatásban a felmérési módszertanok eltérő megoldásaira fókuszáltnak készültek vizsgálatok. Az esettanulmányokban az eltérő felmérési, repülési szabályrendszerek és azok kombinációi kerültek elemzésre. A tanulmány bemutatja az UA alkalmazásának előnyeit és hátrányait, valamint az elvégzett kiértékelések révén javaslatokat fogalmaz meg a felmérési módszerek vonatkozásában. Ezenfelül számos jövőbeni kutatás irány is ismertetésre került, melyek az épületfelmérések fejlődéséhez vezethetnek.

Kulcsszavak: *pilóta nélküli légi jármű, épületfelmérés, felmérési pontosság.*

1. Bevezetés

A pilóta nélküli légi járművek (UA – Unmanned Aircraft) felhasználásával végzett felmérések már régóta ismertek, azonban építőipari felhasználása csak az utóbbi évtizedben kezdett elterjedni [1–7]. A felmérőeszközök és utófeldolgozó szoftverek, algoritmusok fejlődése hozzájárul a technológia széles körű elterjedéséhez. Manapság már egy kezünkben tartott telefonnal is képesek vagyunk sztereo-fotogrammetriai kiértékelést és geometriai leképezést végrehajtani. Természetesen ezek eredményessége és felhasználhatósága megkérdőjelezhető, azonban néhány egyszerű felhasználási cél támogatható általa. A professzionális eszközök alkalmazásával épületek, építmények akár centiméterpontos felmérése is lehetségessé válik. [8] Ahhoz, hogy megfelelő minőségű végeredményt kapjunk meghatározott szabályrendszerek szerint szükséges a felmérést és utófeldolgozást végezni, azonban ezek nagyvonalú, általános irányelvek formájában kerültek a szakma és szoftvergyártók által megfogalmazásra. Ahhoz, hogy hatékonyan és kellő biztonsággal tudjunk felmérési munkát végezni, ezen meghatározások pontosítására és tesztelésére van szükség.

1.1. Jelenlegi szabályok és utasítások

Attól függően, hogy milyen eszközökkel készül a felmérés, változhatnak a felmérés módszertani szabályai, valamint az utófeldolgozás lehetőségei is.

1.1.1. Általános szabályok

Általános szabályként említhető, hogy a sztereo-fotogrammetria alkalmazása esetén szükség van megfelelő mértékű természetes fényre, kerülendők a teljesen homogén és tükröződő felületek. Mivel passzív távérzékelési eljárásról van szó, ezért fizikai kontaktust nem létesítünk a felméréndő épülettel, építménnyel. Pillanatfelvétel készül, ahol a felületről visszaverődő fény szolgáltatja a felméréshez szükséges adatállományt. [9] Ezt követően az utófeldolgozó szoftver a készített képeken egyező pontpárokat keres, melyek tükröződő és homogén felületek esetén vagy nem lehetséges, vagy hibás eredményhez vezethetnek. Ezenfelül javasolt a képkészítő eszköz GPS-adatainak mentése és képekben való tárolása, mivel ezáltal a képek pozicionálása pontosabb és gyorsabb folyamattá válhat. Az eddigieken felül fontos még a megfelelő képátfedés (kb. 80%), valamint minél nagyobb képfelbontás és fix beállítások alkalmazása. [10]

1.1.2. Homlokzatok felmérésére vonatkozó szabályok

Épületek homlokzati felmérése esetén az utófeldolgozó szoftverek által javasolt a merőleges kép-készítési pozíció alkalmazása, amely földi kép-készítés esetén problémás lehet, azonban pilóta nélküli légi járművekkel ez megvalósítható. [10]

1.1.3. Hiányzó szabályok

Az előző fejezetekben leírt szabályok betartása a legtöbb esetben megfelelő végeredményhez vezet. Azonban a felmérés során bejárt útvonalak optimalizálásával további hatékonyságnövekedés érhető el. Jelen kutatás célként tűzte ki, hogy megvizsgálja a felmérések optimálisútvonal-lehetőségeit egy kis léptékű épülethomlokzat esetén. Alaptézisként került megfogalmazásra, hogy egy rendezett adathalmazzal (jelen esetben fotóállománnyal) optimalizálható a felmérés, és megfelelő minőségű végeredmény állítható elő.

2. Alkalmazott eszközök és vizsgálati módszerek

2.1. Eszközök

A vizsgálatok, felmérések során elsődlegesen egy DJI mavic 2 enterprise drónt használtunk, mely megfelelő repülési és képkészítési tulajdonságokkal rendelkezik. A sztereo-fotogrammetriai utófeldolgozáshoz 3DF ZEPHYR szoftvert használtunk, mely előzetes tesztjeink alapján megfelelő végeredményt képes generálni.

A felmérés eredményességét egy referenciaállomány segítségével mértük, mely állomány egy földi lézerszkennelvel készített regisztrált pontfelhő volt. Az alkalmazott eszköz Leica BLK 360 gen. 2 volt, amelyet a legmagasabb felbontással használtunk (1. ábra). A szkennelt állomány regisztrálását követően a generált állomány CloudCompare szoftverben került összehasonlításra.



1. ábra. A felmért épülethomlokzat lézerszkennelt állománya

2.2. Módszertanok

A felmérési módszertanok fejlesztése és optimalizációja során a módszertani lépések megegyeztek. Ezen lépések a **2. ábrán** kerültek bemutatásra, ahol jól látható, hogy az 1. lépés a fotózás, 2. lépés a pontfelhő-generálás, 3. lépés a pontfelhő-manipulálás, 4. lépés az összehasonlítás.

A repülési variációk során figyelembe vettük az általános szabályokat (az 1.1.1 fejezet szerint), és azok felhasználásával kerültek meghatározásra a repülési útvonalak és kombinációk (**3. ábra**).

Korábbi felmérési tapasztalatunk szerint a repülési irányok és a fotózás sorrendisége befolyásolja az utófeldolgozás minőségét. Jelen kutatás során automata fotókészítés volt beállítva az eszközön 3 másodperces gyakorisággal.

A fotózási útvonalakon felül fontos megemlíteni a pilóta nélküli légi járművön elhelyezett kamera pozícióját. A vizsgált módszertanok esetén a repülések túlnyomó részét elvégeztük +25 fok és -25 fok vízszinteshez viszonyított kameraszöggel. Ezenfelül még a távolságot vizsgáltuk a variációk szempontjából, ahol a drónon lévő távolságérzékelő segítségével került beállításra a kb. 2,5 és kb. 5 méteres repülési távolság. Ezek kombinációjából 19 különböző repülést végeztünk az alábbi, **1. táblázat** szerint.

3. Eredmények

A sztereo-fotogrammetriai kiértékelés eredményei legtöbb esetben megfelelő sűrűségű és alakú pontfelhőállományt eredményeztek (**4. ábra**). Ezáltal mindegyik állomány alkalmas volt az összehasonlítás elvégzésére.

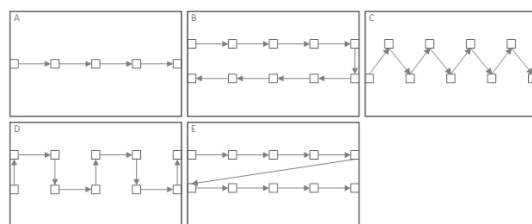
A kutatás részeként többféle kiértékelési módszertan került alkalmazásra. Ezek közül az első a pontfelhő-összehasonlítás volt, ahol a szoftver a pontok alapján meghatározott feltételezett síkok szerint hasonlítja össze a pontok egymástól való távolságát. Jelen összehasonlítás esetén a CloudCompare „compute cloud/cloud distance” funkcióját használtuk. A szoftver a pontok távolságát 8 részegységre bontva összesítette számunkra, amely egy 0–5 cm-ig terjedő skála felosztásán alapult. Ezeket 4 fő egységre átszámítottuk, ezáltal 1,25 cm-ként értékeltük a pontfelhők pontosságát a lézerszkennelt állományhoz képest. A tisztított és pozicionált pontfelhők összehasonlításából a különböző kategóriákba eső pontok darabszámát kaptuk meg, melyet a teljes pont darabszámához arányosítva tudtunk százalékos értéket kapni. A **5. ábrán** látható az összesített eredmény, melyből jól látszik, hogy majdnem mindegyik

1. táblázat. A kutatás során végzett repülések módszertani összesítése (a betűkódok a **3. ábrával** összhangban értelmezhetők)

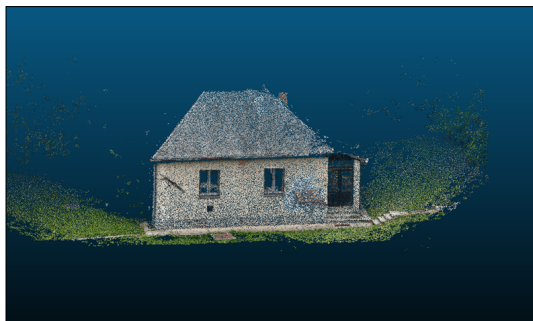
| Sorszám | Repülési útvonal | Távolság mértékegység (m) | Kameraszög (°) |
|---------|------------------|---------------------------|----------------|
| 001 | A | 2,5 | 0 |
| 002 | A | 5 | 0 |
| 003 | B | 2,5 | 0 |
| 004 | B | 5 | 0 |
| 005 | C | 2,5 | 0 |
| 006 | C | 5 | 0 |
| 007 | D | 2,5 | 0 |
| 008 | D | 5 | 0 |
| 009 | E | 2,5 | 0 |
| 010 | E | 5 | 0 |
| 011 | A | 5 | +25° |
| 012 | B | 5 | +25° |
| 013 | E | 5 | +25° |
| 014 | D | 5 | +25° |
| 015 | A | 5 | -25° |
| 016 | B | 5 | -25° |
| 017 | E | 5 | -25° |
| 018 | D | 5 | -25° |
| 019 | C | 5 | -25° |



2. ábra. Módszertani logikai ábra



3. ábra. Repülési útvonalakat szemléltető ábra



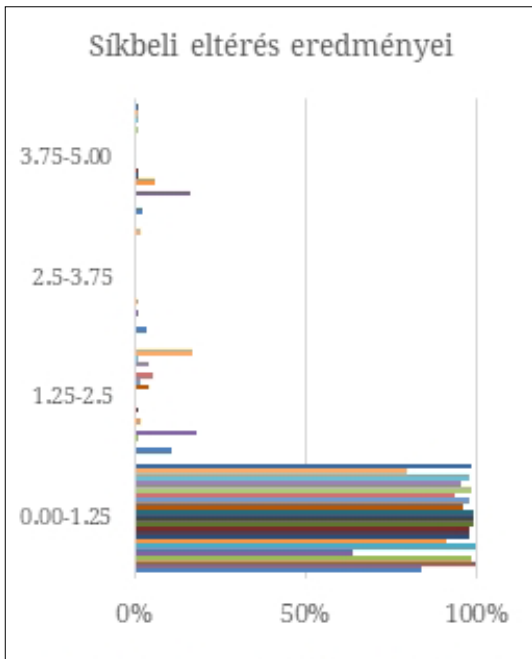
4. ábra. A sztereo-fotogrammetriai kiértékelés végtermékeként előállított pontfelhőállomány (019-es felmérés esetén)

felmérési eljárás magas minőségű, 1,25 cm alatti pontosságot mutat. Ettől a 001, 004 és 018-as számú mérések térnek el. A 001-es mérés esetén a pontok 83,74%-a, a 004-es mérés esetén a pontok 63,86%-a, míg a 018-as számú mérés esetén a pontok 79,72%-a esett a jelölt tartományba. A többi mérés esetén a pontok több mint 90%-a esett a 0–1,25 cm tartományba, ezáltal nagyon csekély eltérést mutatva a lézerszkennelt állományhoz képest. Ezt az eredményt árnyaltuk egy úgynevezett „local modell” lehetőség alkalmazásával, amely nagy eltérést nem mutatott az előzőekben leírt

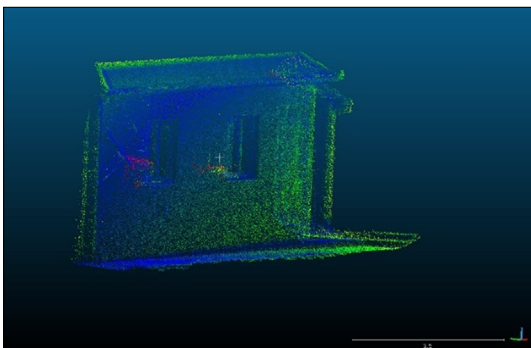
számításhoz képest, azonban a pontosítás miatt átlagoltuk a két értéket.

A 6. ábrán látható, hogy a szoftver vizuális visszacsatolást is kínál a pontfelhő pontjainak színezésével. A beállított, 0–5 cm-ig terjedő skála alapján a kék színtől egészen a piros színig színezi a pontokat a távolságok függvényében. Így a jövőben akár pontos adatelemzés nélkül is megbecsülhető a pontok szórása és a pontfelhő pontossága egy referenciaállományhoz viszonyítottan.

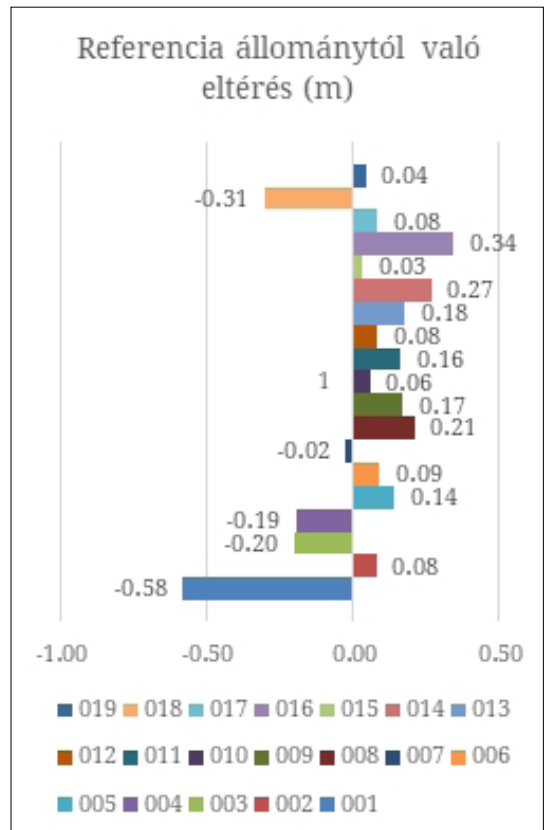
A kiértékelés során látható volt, hogy a pontok szórása mellett a teljes pontfelhő torzulása, méretbeli eltérése is problémás lehet. Ezért összevetettük a lézerszkennelt állományon mért teljes homlokzathosszúságot a sztereo-fotogrammetriai kiértékelés végeredményeként kapott pontfelhőállományok hosszúságával. A 7. ábrán látható, hogy a referenciaállományhoz képest (9,034 m) milyen mértékű eltérés látható a pontfelhőállományokon. Ebből ugyancsak következtethetünk a pontfelhők pontosságára, hiszen, ha egy kb. 9 mé-



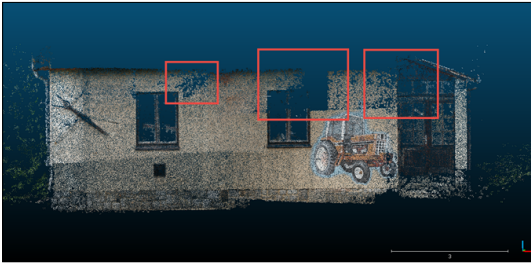
5. ábra. A pontfelhő-pontfelhő összehasonlításból származó pontossági értékek 0–5 cm-ig terjedő skálán bemutatva



6. ábra. Színezett pontfelhő a síkbeli eltérések alapján



7. ábra. A referenciaállományhoz viszonyított homlokzathossz-eltérések az egyes felmérések esetén



8. ábra. Felmérési állomány hiányosságai

ter hosszú homlokzat esetén több mint fél méter eltérést tapasztalunk, az súlyos probléma. Természetesen léteznek eljárások, melyek segítségével a pontfelhő utólagosan manipulálható, valamint a felmérés pontosabbá tehető (pl.: targetek alkalmazásával), azonban jelen kutatás célja, hogy a nyers állományok esetén vizsgálja a pontfelhők megfelelőségét a pontosságuk szempontjából.

A vizsgálat eredményeként kijelenthető, hogy a vizsgálati szempontok alapján a 002., 005., 006., 007., 010., 012., 015., 017., 019. számú felmérési módszertan megfelelőnek tekinthető, míg a többi esetén kardinális eltérések tapasztalhatók a lézerszkennelt állományhoz képest.

A kutatás folytatásaként vizsgálni fogjuk a generált felületek részletgazdagságát, mivel sok esetben vizuálisan látható, hogy hiányosak a pontfelhők (8. ábra).

Célunk, hogy a módszertani javaslatokat 2-3 főbb repülési javaslatra szűkítsük. Ezenfelül az itt alkalmazott tesztelési eljárásokat nagyobb léptékű épületek, építmények esetén is vizsgálni fogjuk, mely összehasonlítás ugyancsak eltérő eredményhez vezethet.

4. Következtetések

Jelen kutatás a sztereo-fotogrammetriai felmérések pilóta nélküli légi járművel történő alkalmazását vizsgálta, mely során eltérő repülési és fotózási módszertanok kerültek elemzésre. A kutatás fő célja a fotózási szabályrendszer tovább pontosítása volt, a homlokzati felmérésekre fókuszálva. A kutatás során vizsgáltuk az eltérő módszertanok végeredményének pontosságát pontfelhő-összehasonlítások révén. A felvázolt repülési útvonalak, távolságok és kamerapozíciók egy-egy esetet kívántak szemléltetni, de a kutatás a későbbiekben bővíthető ezen variációk kombinálásával, új megoldások fejlesztésével.

Köszönetnyilvánítás

A Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-4. kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Filippelli S. K., Lefsky M. A., Rocca M. E.: *Comparison and Integration of Lidar and Photogrammetric Point Clouds for Mapping Pre-Fire Forest Structure*. Remote Sensing of Environment, 224. (2019) 154–166.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.029>
- [2] Somogyi Á., Lovas T., Barsi Á.: *Comparison of Spatial Reconstruction Software Packages Using DSLR Images*. Pollack Periodica, 12/2. (2017) 17–27.
<https://doi.org/10.1556/606.2017.12.2.2>
- [3] Kenarsari A. E., Vitton S. J., Beard J. E.: *Creating 3D Models of Tractor Tire Footprints Using Close-Range Digital Photogrammetry*. Journal of Terra-mechanics, 74. (2017) 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.jterra.2017.06.001>
- [4] Ferraby R., Powlesland D.: *Heritage and Landscape Change: Recording, Archiving and Engaging with Photogrammetry on the Jurassic Coast World Heritage Site*. Proceedings of the Geologists' Association, 130/3–4. (2019) 483–492.
<https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2019.02.007>
- [5] O'Driscoll J.: *Landscape Applications of Photogrammetry Using Unmanned Aerial Vehicles*. Journal of Archaeological Science: Reports, 22. (2018) 32–44.
<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.09.010>
- [6] Rák O., Szilágyi D.: *Photogrammetry Possibilities and Rules Focusing on Architectural Usage*. Pollack Periodica, 15/1. (2020) 187–196.
<https://doi.org/10.1556/606.2020.15.1.18>
- [7] Colomina I., Molina P.: *Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92. (2014) 79–97.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- [8] Oniga E., Chirilă C., Stătescu F.: *Accuracy Assessment of a Complex Building 3D Model Reconstructed From Images Acquired With a Low-Cost UAS*. IThe International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W3. (2017) 551–558.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-551-2017>
- [9] Baltsavias E. P.: *A Comparison between Photogrammetry and Laser Scanning*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54/2. (1999) 83–94.
[https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00014-3](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00014-3)
- [10] “3DF Zephyr Manual 7.500 English.pdf.”



AI-ALAPÚ RÖNTGENKÉPELEMZÉSI ELJÁRÁS VALÓS IDEJŰ OUT-OF-DISTRIBUTION-DETEKTÁLÁS SEGÍTSÉGÉVEL

DEVELOPMENT OF ROBUST AI BASED X-RAY ANALYSIS WORKFLOW BASED ON REAL-TIME OUT OF DISTRIBUTION DETECTION

Szabó Lóránt,¹ Weltsch Zoltán²

¹ AI Research Center (Neumann János Egyetem), Kecskemét, Magyarország. szabo.lorant@nje.hu

² Széchenyi István Egyetem, Győr, Magyarország. weltsch.zoltan@sze.hu

Abstract

In medicine, the role of artificial intelligence (AI) is becoming increasingly common. An important example here is the application of AI in X-Ray analysis, as a known aspect of medical imaging and finding-detection. However, the effectiveness of AI image analysis may be challenging due to the out-of-distribution (OOD) records, i.e. data that significantly differ from the data set used to train the model. These OOD data may result from symptoms, that the model is not prepared for, or even from unpredictable tool behaviour, environmental changes or new errors that have not occurred during the data-gathering phase. This paper shows that with proper OOD analysis the AI-based tool may be prepared for handling “unknown” input data.

Keywords: AI, OOD, ID, t-SNE.

Összefoglalás

Az orvostudományban a mesterséges intelligencia (AI) szerepe egyre nagyobb. Kiváló példa erre az AI alkalmazása a röntgenképek elemzésére, ami az orvosi képalkotás során történő képletfelismerés egyik ismert aspektusa. A mesterséges intelligencián alapuló képelemzés alkalmazása szempontjából jelentős kihívással bírnak az úgynevezett out-of-distribution- (OOD-)esetek, melyek a modell betanításához használt adathalmaztól jelentősen különböző adatokat takarnak. OOD-adatok származhatnak olyan tünetekből, amelyekre a modell nincs felkészítve, avagy adódhatnak akár az eszköz előre nem látható viselkedéséből vagy környezeti anomáliákból, esetleg olyan hibákból, amelyek az elsődleges adatgyűjtési fázis során nem fordultak elő. Ez a cikk bemutatja, hogy megfelelő OOD-elemzéssel az AI-alapú eszköz felkészülhet az “ismeretlen” bemeneti adatok kezelésére.

Kulcsszavak: AI, OOD, ID, t-SNE.

1. Bevezetés

1.1. AI az orvosi képalkotásban

Egyre több kórház használja a különböző mesterségesintelligencia-alapú módszereket az egyes osztályokon. Ezzel együtt az AI használatának egyik legnagyobb kihívása továbbra is az, hogy miként szavatolható annak megfelelő működése. A mesterséges intelligencia hatékony felhasználá-

sa érdekében olyan munkafolyamatot kell meghatározni, amelyben a mesterséges intelligencia elsősorban az orvosi felvételeken található elváltozások megtalálására szolgál, míg az orvos ezen iránymutatások alapján diagnosztizál. A legtöbb esetben nem az a probléma, hogy a mesterséges intelligencia esetleg nem képes osztályozni vagy felismerni egy rendelleneséget. A probléma akkor merül föl, amikor nem biztos, hogy az adott AI-alapú modell fel van készítve egy adott beme-

net feldolgozására, és ennek ellenére annak kiértékelését várjuk tőle. Ebben a tanulmányban egy kísérletet mutatunk be mellkas-röntgenfelvételek segítségével, melyek négy osztályba sorolhatók: Normal, Lung Opacity, Pneumonia és Covid. Itt a Covidot új típusú tünetegyüttesnek tekintjük; e tanulmány ismerteti, hogyan kezelhetők azok az adatok, amelyek „ismeretlenek” az éppen használt AI-eszköz számára.

1.2. Out-of-distribution-adatok

A robusztus, szabályozott rendszerek esetén különösen fontos a modellek új adatokhoz, valamint az előre nem jelezhető körülményekhez való alkalmazkodóképessége. A mesterségesintelligencia-alapú technikák hatékonyságának növelése terén különösen nagy kihívást jelentenek az OOD-adatok [1]. Az OOD-adatok és ezek eloszlása valamilyen módon eltér a tanító halmaztól (in-distribution- vagy ID-adatok) akár reprezentáció, akár kontextus, akár más tekintetében. Másrészt, ha X és Z adott eloszlású adathalmazok, és egy modellt az X -ben lévő x_1, x_2, \dots, x_n adatokra optimalizáltunk, akkor a Z -beli z adat akkor és csak akkor OOD, ha

$$X \neq Z$$

Az OOD-adatok jelentősen befolyásolhatják a mélytanulási modellek teljesítményét, azaz gyakran alacsony pontossághoz vagy váratlan viselkedéshez vezetnek. A probléma abból a feltételezésből ered, hogy a tanító adatok minden lehetséges szempontból reprezentatívak; ez a feltételezés azonban a valós esetekben gyakran nem állja meg a helyét.

E tanulmány a hivatkozott módszerekkel egy online adathalmazból [2, 3] elérhető röntgenfel-

vételek elemzését mutatja be. Ezek a felvételek mint képek szolgálnak elsődleges bemeneti adatként; a diagnózis alapján négy különböző osztályba sorolhatók: Normal, Lung Opacity, Pneumonia és Covid.

2. Kiértékelési módszerek

E fejezet a kísérlet módszertani részleteit ismerteti: a megfelelő neurális háló finomhangolása után az OOD-adatok klasszifikációval egy időben történő detektálási lehetőségét mutatja be.

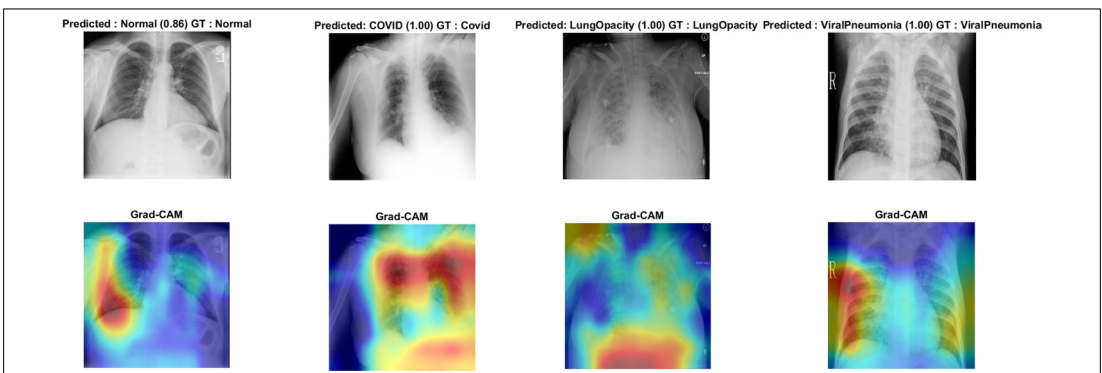
2.1. Adatok előkészítése OOD-análízishez

A röntgenfelvételek a korábban említetteknek megfelelően az alábbi osztályokba sorolhatók: Normal, Lung Opacity, Pneumonia és Covid. A négy osztályból álló adathalmaz segítségével a következő stratégiát alkalmazzuk: ahelyett, hogy mind a négy osztály felhasználásával tanítanánk egy osztályozó neurális hálót, egy olyan hálót tanítunk, amely csak az első három osztály, azaz a Normal, a Lung Opacity és a Pneumonia klasszifikációjára képes.

A negyedik osztályt, a Covidot kizárjuk a tanító halmazból, így ez OOD-mintául szolgál. Ez a megközelítés lehetővé teszi a háló teljesítményének tanulmányozását, egyúttal az OOD-adatok által támasztott elvárások tesztelését.

2.2. OOD-detekciós algoritmusok

Az OOD-adatok kezelése kritikus fontosságú az AI-alapú alkalmazásokban; nemcsak a modellek teljesítményének javítása szempontjából, hanem a dinamikusan változó környezetben való robusztus viselkedés biztosítása céljából is. Az OOD-detektálás célja az olyan bemeneti adatok azonosítása, amelyek jelentősen eltérnek a tanító adathalmaz elemeitől.



1. ábra. Röntgenkép példák a négy osztályból, Normal, Covid, Lung Opacity és Viral Pneumonia. Az ezekhez tartozó Grad-CAM térképek az osztályozási folyamat szempontjából leginkább fontos régiókat emelik ki

Az OOD-adatok kiértékelése során az első lépés a megfelelő konfidenciaszint meghatározása egy adott bemenet esetén. Az így kapott konfidenciaszint-értéket egy előre meghatározott küszöbértékkel hasonlítjuk össze, így az összehasonlítás alapján könnyen megállapítható, hogy az adott bemenet OOD- vagy ID-kategóriába tartozik-e. Ha a számított konfidenciaszint a küszöbérték alatt van, az adatot OOD-adatnak, ellenkező esetben ID-adatnak tekintjük.

A konfidenciaszintek számításához a következő módszereket használhatjuk:

– **A softmax-alapú módszerek** általában a neurális háló softmax-rétegének kimenetét veszik alapul a konfidenciaszint becsléséhez. Az ID-adatoknak magasabb a softmax-kimenete, mint az OOD-adatoknak. Így a konfidencia-pontszám definiálása a softmax-értékek függvényeként logikusnak tűnik. Az ilyen algoritmusok azonban csak egyetlen softmax-kimenettel rendelkező, klasszifikáló neurális háló esetében működnek [4–6].

– **A feature-density-alapú módszerek** a konfidenciaértéket a softmaxtól különböző, mélyebb réteg kimenetének felhasználásával számítják ki: az egyik „feature-recognition”-réteg egyikét veszik alapul. Az ötlet azon a feltételezésen alapul, hogy az OOD-adatok olyan súlyeloszlást eredményeznek mélyebb feature-recognition-rétegekben, amelyek jelentősen eltérnek az ID-minták „átlagos jellemzőeloszlásától”. A gyakorlatban tehát a sűrűség-alapú algoritmusok a háló által megtanult jellemzők súlyeloszlásait veszik alapul, és valószínűségi eloszlásoknak tekintik őket. Így, a feature-eloszlások terén az alacsony sűrűségű területekre eső mintákat OOD-adatoknak tekinthetjük. A jellemzők eloszlásai, azaz az egyes jellemzők sűrűségfüggvénye

egy-egy hisztogrammal közelíthető, melyeket a tanító (ID) adatok alapján kapunk. Ennek megfelelően e módszer egy histogram-based outlier score (HBOS)-eljárást valósít meg [7].

A megfelelő OOD-detektálásimódszer kiválasztása a felhasználás jellegétől függ, ideértve az adatok típusát, a neurális háló architektúráját és a modell elvárt robusztusságát [8]. Tekintettel arra, hogy a HBOS-algoritmus sokkal általánosabban alkalmazható, mint a softmax-alapú módszerek, ezt a módszert választottuk a további alkalmazási példák bemutatásához.

2.3 Megfelelő neurális háló választása

Összesen 24 221 felvételt használtunk a tanításhoz, ebből osztályonként 3058-at a validáláshoz. A Resnet18- [9] hálóarchitektúrát vettük alapul; a röntgenfelvételek, azaz a bemeneti adatok $299 \times 299 \times 3$ méretű színeskép-formátumúak. A tanítóhalmaztól elválasztott validációs halmaz segítségével optimalizáltuk a neurális háló-tréning paramétereit és pontosságát.

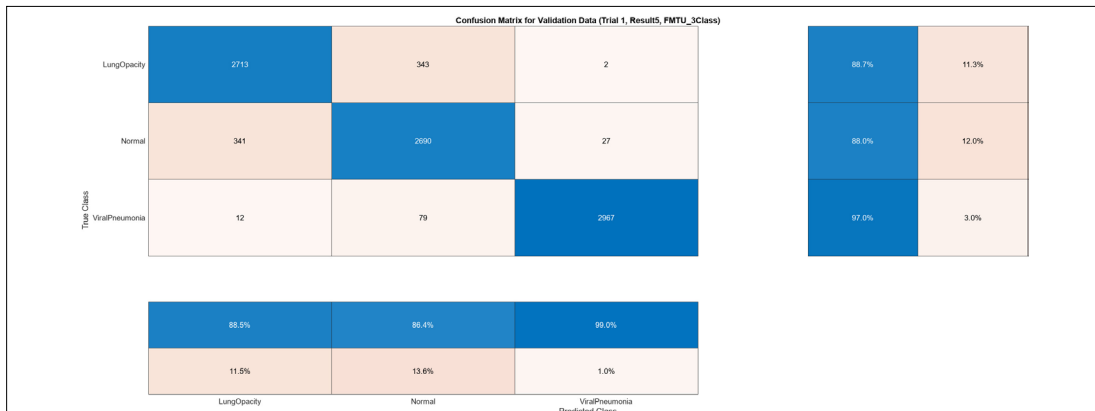
3. Következtetések

A Resnet18 architektúra megfelelő definiálását követően egy klasszifikáló hálót tanítottunk a teljes, 4 osztályt tartalmazó adathalmazon, valamint egy másik hálót csupán 3 osztály segítségével – kihagyva a Covid osztályt. Az **1. ábra** az egyes osztályokból választott egy-egy példát mutatja, valamint a hozzájuk tartozó Grad-CAM-„hőterképeket”, amelyek az osztályozási folyamat szempontjából leginkább fontos régiókat emelik ki.

A **2. ábrán** látható konfúziós mátrix alapján világosan látszik, hogy egy jól megtanított háló mind a négy osztályt hatékonyan elkülöníti egymástól; ugyanez érvényes akkor is, ha a tanításhoz csak 3 osztályt használtunk – lásd a **3. ábrát**.



2. ábra. Konfúziós mátrix a 4 osztályon tanított neurális háló esetén



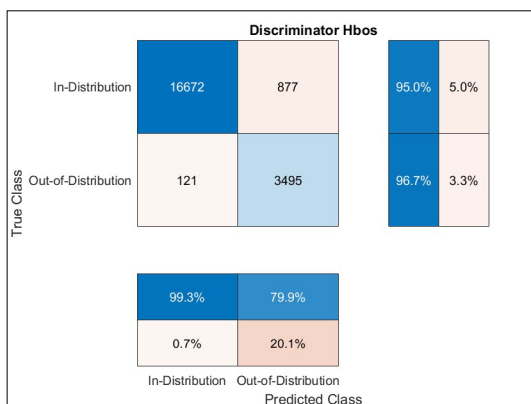
3. ábra. Konfúziós mátrix a 3 osztályon tanított neurális háló esetén, mellőzve a „Covid” osztályt

A 4. ábra azt mutatja, hogy a HBOS-diszkriminátor jól teljesít a 3 osztályon tanított háló esetén, azaz a Covid osztály elemeit OOD-adatoknak tekinti. Igaz ugyan, hogy ez ebben a tényleges helyzetben nem meglepő, az a tény, hogy az OOD-adatok hatékonyan elkülöníthetők azoktól az adatoktól, amelyekre a hálót tanították, bővíti az AI alkalmazhatósági körét. Így a diagnózisok tekintetében a diszkriminátor jelzi, ha egy új betegséget kell feltételezni azokhoz képest, mint amelyekre az AI-eszközt ténylegesen létrehozták.

További kísérletekre lesz szükség a HBOS-diszkriminátor lehetséges finomhangolásával kapcsolatban. Továbbra is kihívást jelentő feladat ugyanis a megfelelő mély réteg automatikus kiválasztása egy neurális hálózaton belül annak érdekében, hogy a HBOS-módszer a lehető legjobb pontossággal működhessen. E cikk szerzői ennek megfelelően folytatják a kutatást, hogy optimális eljárást definiáljanak az OOD-adatok detektálására.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Yang J., Zhou K., Li Y., Liu Z.: *Generalized out-of-Distribution Detection: A Survey*. (2021,10)
- [2] Chowdhury M. E. H., Rahman T., Khandakar A., Mazhar R., Kadir M. A., Mahbub Z. B., Islam K.R., Khan M. S., Iqbal A., Al-Emadi N., Reaz M. B. I., M. T. Islam: *Can AI Help in Screening Viral and COVID-19 Pneumonia?* IEEE Access, 8. (2020) 132665–132676.
- [3] Rahman T., Khandakar A., Qiblawey Y., Tahir A., Kiranyaz S., Kashem S.B.A., Islam M.T., Maadeed S.A., Zughailer S.M., Khan M.S., Chowdhury M.E., *Exploring the Effect of Image Enhancement Techniques on COVID-19 Detection Using Chest X-ray Images*. arXiv preprint arXiv:2012.02238. 2020.
- [4] Shalev, Gal, Gabi Shalev, Joseph Keshet: *A Baseline for Detecting Out-of-Distribution Examples in Image Captioning*. In Proceedings of the 30th ACM



4. ábra. HBOS-diszkriminátor konfúziós mátrixa

International Conference on Multimedia, Lisboa Portugal. ACM, 2022. 4175–4184.

<https://doi.org/10.1145/3503161.3548340>

- [5] Shiyu Liang, Yixuan Li, R. Srikant: *Enhancing the Reliability of Out-of-Distribution Image Detection in Neural Networks*. arXiv:1706.02690 [cs.LG], August 30, 2020. <http://arxiv.org/abs/1706.02690>.
- [6] Weitang Liu, Xiaoyn Wang, John D. Owens, Yixuan Li: *Energy-Based out-of-Distribution Detection* arXiv:2010.03759 [cs.LG], April 26, 2021. <http://arxiv.org/abs/2010.03759>
- [7] Markus Goldstein, Andreas Dengel: *Histogram-Based Outlier Score (hbos): A Fast Unsupervised Anomaly Detection Algorithm*. KI-2012: Poster and Demo Track 9 (2012).
- [8] Lee, Kimin, Kibok Lee, Honglak Lee, Jinwoo Shin: *A Simple Unified Framework for Detecting Out-of-Distribution Samples and Adversarial Attacks*. arXiv, October 27, 2018. <http://arxiv.org/abs/1807.03888>
- [9] He K., Zhang X., Ren S., Sun J.: *Deep Residual Learning for Image Recognition*. (2015. 12) <https://doi.org/10.48550/arXiv.1512.03385>



DECENTRALIZÁLT HŐVISSZANYERŐ SZELLŐZTETŐRENDSZER VALÓS HATÁSFOKÁNAK VIZSGÁLATA

INVESTIGATION OF THE REAL EFFICIENCY OF A DECENTRALIZED HEAT RECOVERY VENTILATION SYSTEM

Tolvaly-Roşca Ferenc,¹ Fekete Albert-Zsombor,² Forgó Zoltán³

¹ Sapiientia EMTE, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia, tferi@ms.sapiientia.ro

² Tetronic SRL, Marosszentgyörgy, Románia, zsombor.feketefazs@gmail.com

³ Sapiientia EMTE, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia, zforgo@ms.sapiientia.ro

Abstract

The paper presents the measurement method and values of the temperatures of the incoming and outgoing air obtained as a result of the connection and automation of 4 decentralized heat recovery ventilation units into one system, and the measured results of the thermal efficiency of the entire system. The built system consists of four single-room heat recovery devices, which are integrated into an automated system. The built-in sensors can be used to measure the average temperature of the ventilated rooms or the current temperature and relative humidity of the air flowing through the ventilation units, as well as the carbon dioxide level of the rooms. The units received automation that complements the original individual control elements, which is capable of complex control tasks from any computing device, graphic interface and Wi-Fi connection. The units' sensors, which can be moved into the air stream, are suitable for the momentary measurement of the parameters of the flowing air, thereby estimating the thermal efficiency of the entire system.

Keywords: *decentralized heat recovery ventilation, automation, real thermic efficiency.*

Összefoglalás

A dolgozat 4 darab decentralizált hővisszanyerő szellőztetőegység egy rendszerbe való kötésének és automatizálásának eredményeként elért, ki-be áramló levegő hőmérsékleteinek mérési módszerét, értékeit és a teljes rendszer termikus hatásfokának számított eredményeit mutatja be. A megépített rendszer négy darab egyhelyiséges hővisszanyerő berendezésből áll, melyek egy automatizált rendszerbe épülnek be. A beépített szenzorokkal valós időben mérhető a szellőztetett szobák átlaghőmérséklete vagy a szellőztetőegységeken átáramló levegő pillanatnyi hőmérséklete, relatív páratartalma, illetve a szobák szén-dioxid-szintje. Az egységek az eredeti egyéni vezérlőelemeket kiegészítő automatizálást kaptak, amely bármilyen számítástechnikai eszköztől, grafikus felületről és wi-fi kapcsolaton keresztül, komplex vezérléstechnikai feladatokra képes. Az egységek légáramába áthelyezhető érzékelői alkalmasak az áramló levegő paramétereinek a pillanatnyi mérésére, ezáltal a teljes rendszer termikus hatásfokának a becslésére.

Kulcsszavak: *decentralizált hővisszanyerő szellőztető, automatizálás, valós termikus hatásfok.*

1. Bevezetés

A decentralizált hővisszanyerő szellőztetőberendezés egy olyan légtechnikai eszköz, amelynek célja a belső levegő minőségének javítása és a hővesz-

teség minimalizálása a szellőztetés során. A decentralizált jelző arra utal, hogy ezek a rendszerek helyi szinten működnek, azaz egy-egy helyiségben vagy kisebb területen alkalmazzák őket.

Ezek a berendezések általában két fő funkciót látnak el:

– A levegő keringtetése és frissítése: A decentralizált szellőztetők friss levegőt juttatnak be az épületbe, és egyidejűleg eltávolítják a használt, szennyezett levegőt. Ez javítja a beltéri levegő minőségét, csökkenti a páratartalmat, valamint segít megszabadulni a szagoktól és a légtérben halmozódó káros gázaktól.

– Hővisszanyerés: A hővisszanyerő funkció lényege az, hogy az épületből távozó meleg levegő hőjét átadja az épületbe beáramló hideg friss levegőnek. Ezáltal minimalizálható a fűtési vagy hűtési rendszer által felhasznált energia mennyisége, mivel a rendszer visszanyeri és visszaárasztja a hőt a környezetbe.

A decentralizált hővisszanyerő szellőztetőberendezések rendkívül hatékonyak lehetnek kisebb épületekben vagy olyan helyiségekben, ahol nem megvalósítható egy központi szellőztetőrendszer kiépítése. Emellett energiahatékonyságuk révén hozzájárulnak az épület fenntarthatóságához és a fűtési/hűtési költségek csökkentéséhez.

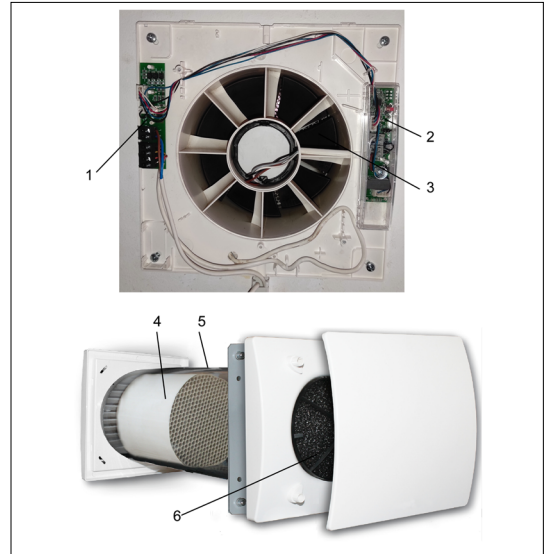
A decentralizált hővisszanyerős szellőztetőberendezések két fő hővisszanyerési elv alapján működhetnek: a hőcserélés elvén (rekuperatív) és a hőtárolás és hőleadás elvén (regeneratív).

Ezek közül a regeneratív változat az elterjedtebb, a jelen dolgozat témája is egy ilyen típusú szellőztetővel épített rendszer termikus hatásfokának a vizsgálata.

A regeneratív hőcserélés elve: a berendezésben egy hőtároló egység van (általában kerámiából készített betét). A gépben egyetlen, változtatható forgásirányú ventilátor van, amely adott ideig (általában 70 másodperc) a belső meleg levegőt kifújja a lakásból, így az felmelegítve a hőtároló betétet. Az adott idő elteltével a ventilátor irányt vált, és a kinti friss, hideg levegőt befújja a hőtároló betéten keresztül, felmelegítve azt, így a friss levegő felmelegítve kerül be a lakásba. A kerámiabetét a pára egy részét is képes felvenni és leadni, így a friss, előmelegített levegőszárító hatása kevésbé jelentkezik, mint a hőcserélős megoldásnál.

A regeneratív típusú egységeket párosával szükséges beépíteni, hogy biztosítva legyen a hatékony légcseré, és ne váltakozzon a túlnyomás-depresszió a szellőztetett lakrészben.

Egy ilyen szellőztető szerkezete az **1. ábrán** látható. Elven egy műanyag csőbe zárt kefe nélküli ventilátorból, a regeneratív kerámiabetétből, egy táp- és egy, a levegő áramlási irányát és sebességét változtató, vezérlőegységből, illetve por és egyéb szennyeződések eltávolításra alkalmas szűrőből áll.



1. ábra. Decentralizált hővisszanyerő szellőztetőberendezés: 1 – tápegység; 2 – egyéni vezérlőegység; 3 – kefe nélküli motorral épített ventilátor; 4 – hővisszanyerő kerámiabetét; 5 – ABS-ház; 6 – porszűrő.

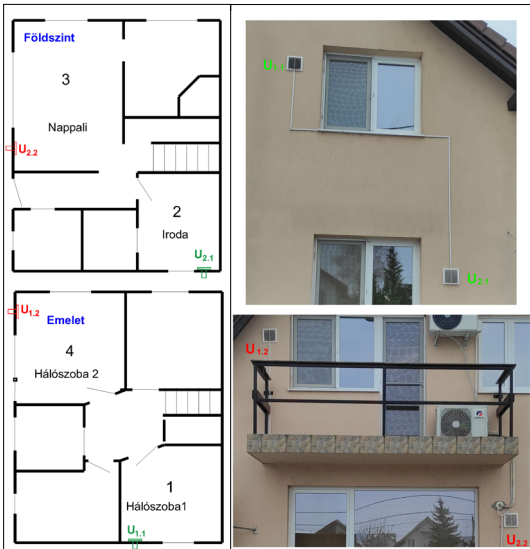
Az ilyen berendezések az épületek befejezése után is beépíthetők, hátrányuk a centralizált hővisszanyerő szellőztetőberendezésekhez képest a központositott automatizálás majdnem teljes hiánya. Előnye pedig a sokkal kisebb beszerzési ár, még több egység szerelése esetén is [**1**, **2**, **3**].

2. A megépített rendszer

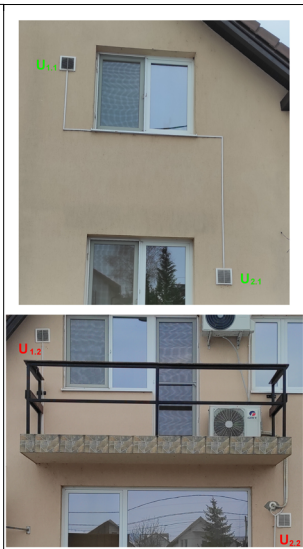
A vizsgált rendszer 4 darab Aerauliqa HR150-es [**4**] típusú egységgel épült fel, amely egy kb. 100 m²-es, 250 m³ légtérű, 50 cm-es külső falakkal ellátott, emeletes lakóház szellőztetését biztosítja (**2. ábra** és **3. ábra**).

Az egységek elektronikusan (a gyártó útmutatója alapján), párba vannak kötve: a földszinti U1.1 az emeleti U2.1-vel és a földszinti U1.2 az emeleti U2.2-vel. Ezek a párok egymástól teljesen függetlenül képeznek egy-egy önálló rendszert, eredeti szerelésben egy mechanikus kapcsoló segítségével lehetett változtatni egy pár levegő áramlási sebességét (és ezúton a térfogat hozamát).

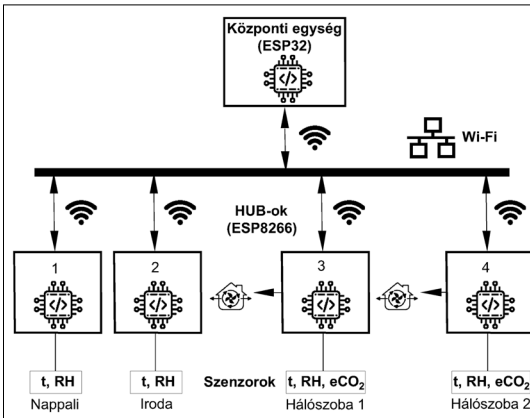
Célunk egy automatizálás építése volt, amely segítségével a két önálló rendszer összeköthető egyetlen rendszerre, amelynek jellemző paraméterei, vagyis a hőmérséklet, relatív páratartalom és a CO₂ mérhetőek mind a szobákban, mind a szellőztetők belsejében. A teljes rendszer egy számítógépes felületről vezérelhető kell, hogy legyen, manuálisan vagy teljesen automatizált módon.



2. ábra. A szellőztető-egységek elhelyezése a házban

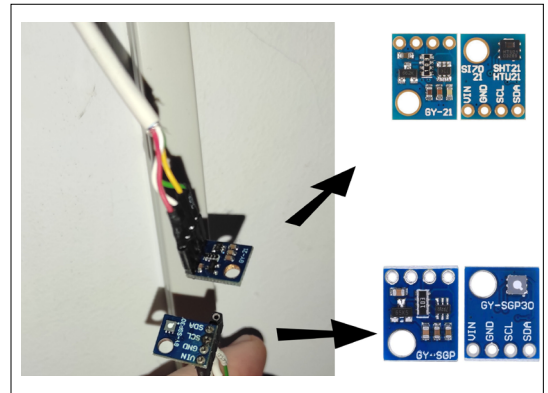


3. ábra. A szellőztetők elhelyezkedése az épület falán

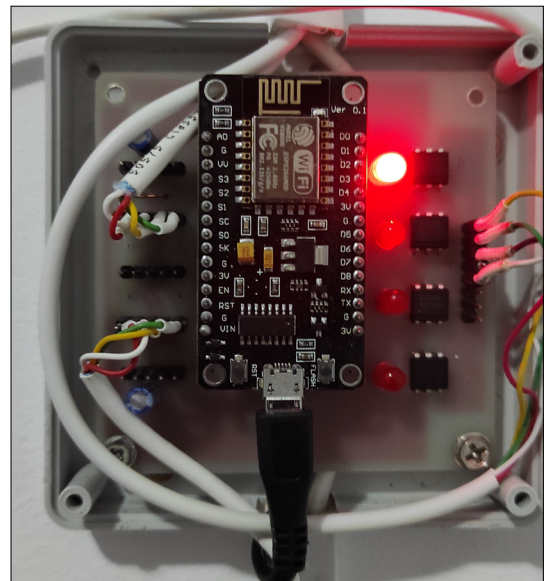


4. ábra. A szellőztetőrendszer vezérlési és mérési egységrajza

A rendszert egy igen költséghatékony megoldással építettük a 4. ábrán látható működési elvek alapján: egy központi mikrovezérlővel (ESP32) és négy darab ESP8266-os típusú HUB-egységgel, amelyek WI-FI-hálózaton keresztül csatlakoznak egymással [5]. A központi egységen automatizálási és mérési algoritmusok és egy webszerver fut. Az ESP8266-tal épített HUB-ok a szellőztetőegységek alapvezérlési feladatait kiegészítő központosított vezérlési parancsokat és az egységeket a központtal összekötő kommunikációt, illetve a szenzorok által biztosított környezeti paraméterek mérési feladatait látják el.



5. ábra. Az SHT21- (hőmérséklet és relatív páratartalom) és SGP30 (eCO₂)-szenzorok áthelyezhetők a szobából a szellőztető légáramába

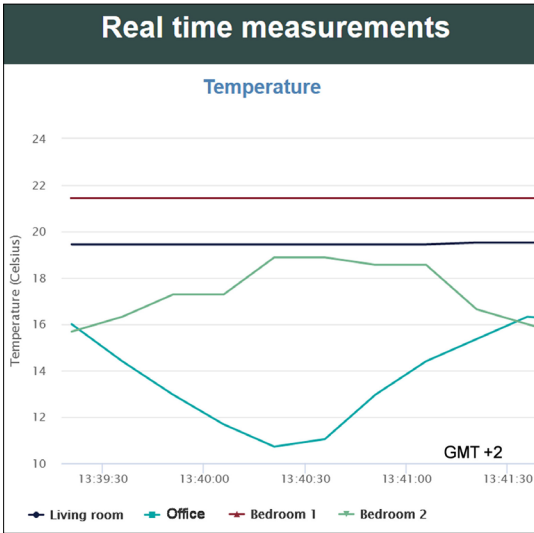


6. ábra. ESP8266-tal épített egyéni vezérlő és mérő HUB működés közben

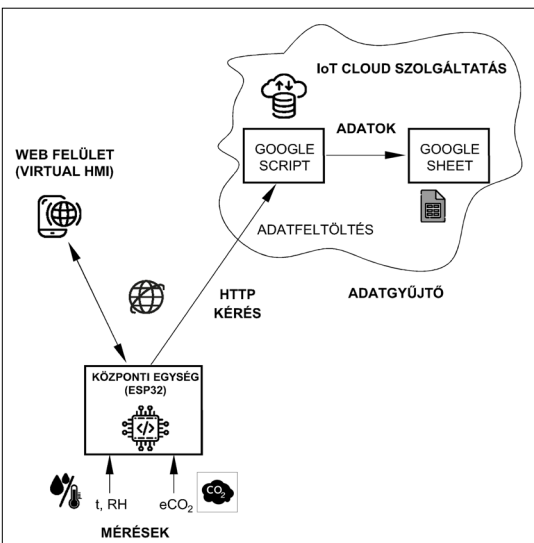
A méréseket ellátó szenzorok: minden szellőztetőnél egy SHT21- (hőmérséklet és relatív páratartalom), illetve a két hálósobában egy-egy SGP30 eCO₂-szenzor (5. ábra) [6, 7]. A szenzorok normális működési állapotban a szobák levegőparamétereit mérik, de áthelyezhetők a szellőztetők belső részébe a porszűrők elé.

Egy ilyen, működésben lévő, vezérlő-mérő egység a 6. ábrán látható. Az elektronikai rendszer megépítése és működése, illetve az automatizálási algoritmusok, a kommunikáció nem a jelen cikk témája.

A működő rendszer paraméterei folyamatosan vannak figyelve, a mintavételezési paraméterek a mérési feladatnak megfelelően állíthatók 3-99 sec felbontásban. A mért adatok számokban (RH) vagy valós idejű grafikonokon követhetők. Ehhez okostelefonon vagy személyi számítógépen elérhető az ESP32-n futó webfelülethez kell csatlakozni a világhálón keresztül. A 7. ábrán részlet látható a HMI-felhasználófelülettel, ahol a valós idejű hőmérsékletek láthatóak (két szenzor a szobákban és kettő a szellőztető belsejébe).



7. ábra. Részlet a számítási eszközökön futtatható felhasználói felületről – a hőmérsékletek valós időben

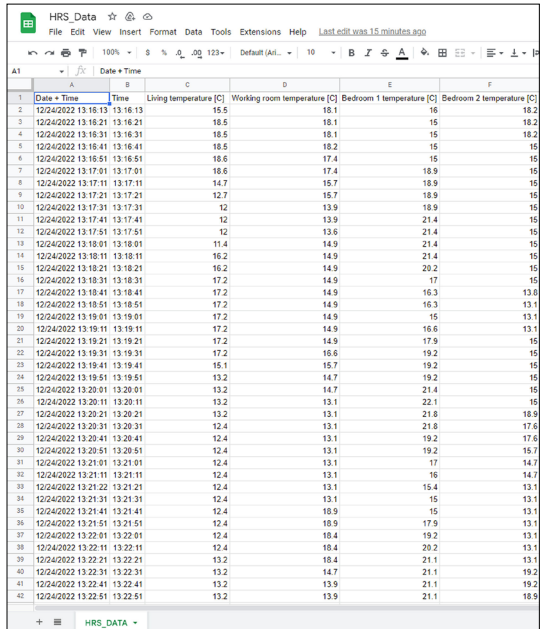


8. ábra. A mért környezeti paraméterek feltöltése az IoT Cloudba

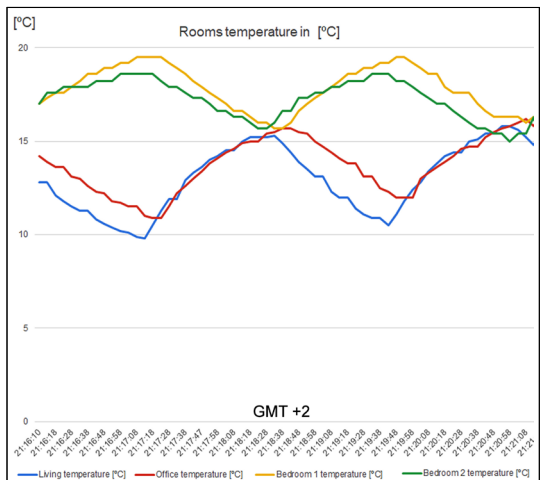
A mérési adatok egy scripthen keresztül, kérésre (a HMI-felületen keresztül egy gombbal indítható) a Google Cloudba, egy Google Sheetbe rögzíthetők. Az adatrögzítési rendszer elvi vázlata a 8. ábrán látható.

A Google Sheetben rögzített adatok a letöltésükig elérhetők az interneten keresztül, az itt található adatok bármikor feldolgozhatók (9. ábra).

Az itt található adatok egy Excel-állományba menthetők, és akár grafikusan is megjeleníthetők (manuálisan), amint a 10. ábrán látható.



9. ábra. Részlet a Google Sheetben rögzített mérési adatokról



10. ábra. A mentett adatok vizualizálása Excelben

3. Mérési eredmények

Az automatizálásnak köszönhetően pillanatnyi hőmérsékletek mérhetők a szellőztetőegységek belsejében. Ennek köszönhetően felmérhető a teljes rendszer termikus hatásfoka.

A ki-be áramló levegő hőmérséklete, a kerámia-betétnek köszönhetően, a **10. ábrán** látható módon folyamatosan változik. Ez rögzítésre került 2 alkalommal: -12 és $+4$ °C kinti hőmérsékleten, mindhárom szellőztetési sebességnél. A mért adatokat a Google-felhőről egy Excel-állományba mentettük, átlagot számoltunk a 70 másodpercenként folyamatosan változó hőmérsékletadatokból, a **[8]**-ban található képletekkel termikus hatásfokot számoltunk. Az eredmények az **1. táblázat**ban láthatók.

1. táblázat. A helységekben és a teljes rendszerben számolt hatásfokok hasonlítása a gyártó által előírt hatásfokokhoz

| Kinti hőmérséklet [°C] | Termikus hatásfok [%] | | | | | | |
|------------------------|-----------------------|---------|-------|--------|--------|----------|--------|
| | Sebességfok. | Nappali | Iroda | Háló 1 | Háló 2 | Rendszer | Gyártó |
| -12 | 1 | 51 | 49 | 96 | 93 | 72.25 | 82 |
| -12 | 2 | 60 | 58 | 85 | 82 | 71.25 | 74 |
| -12 | 3 | 64 | 63 | 73 | 73 | 68.25 | 70 |
| +4 | 1 | 62 | 62 | 85 | 87 | 74 | 82 |
| +4 | 2 | 63 | 63 | 78 | 80 | 71 | 74 |
| +4 | 3 | 67 | 67 | 71 | 73 | 69.5 | 70 |

4. Következtetések

Az automatizálási rendszer alkalmas a központosított egyhelyiséges egységek által biztosított szellőztetésre jellemző paraméterek mérésére.

A levegő paramétereinek mérése és az adatok rögzítése egy külső adatfelhőbe lehetővé teszi az adatok utólagos elemzését és feldolgozását.

A szellőztetőkön átáramló levegő pillanatnyi hőmérsékletének mérése lehetővé teszi az egyedi egységek, majd a teljes szellőztetőrendszer valós termikus hatásfokának a megállapítását.

A hatásfokok mért és számított átlagai nagyon kevéssel alatta vannak a gyártó által „ígért” hatásfoknak. De erre a magyarázat az épületben a fenti, lenti és külső hőmérsékletek közti különbség miatt létrejövő szabad légáramlat kialakulása, amely jól látható módon emeli a fenti egységek, és csökkenti az alsó egységek hatásfokát. Azonban a gyártó honlapján megadott 74%-os átlaghatásfoktól mindössze maximum 4,6%-kal marad el a rendszer mért/számolt átlaghatásfoka.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Zender-Świercz E.: *A Review of Heat Recovery in Ventilation*. *Energies*, 14/6. (2021) 1759, 1–23. <https://doi.org/10.3390/en14061759>.
- [2] Pekdogan T., Tokuç A., Ezan M.A., Başaran T.: *Experimental Investigation of a Decentralized Heat Recovery Ventilation System*. *Journal of Building Engineering*, 35. (2021) 102009, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.102009>
- [3] Zemitis J., Bogdanovics R.: *Heat Recovery Efficiency of Local Decentralized Ventilation Devices*. *Magazin of Cicile Engineering*, 2/94. (2020) 120–128. <https://doi.org/10.18720/MCE.94.10>.
- [4] Quantum HR. *Decentralized Heat Recovery Unit*. https://www.aerauliqa.com/pdf/datasheet/Quantum_HR.pdf. (letöltve 2023 február 8-án).
- [5] Laftchiev E., Nikovski D.: *An IoT System to Estimate Personal Thermal Comfort*. 2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Reston, VA, USA, 2016, 672–677, <https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2016.7845401>.
- [6] Pieš M., Hájovský R., Velička J.: *Design, Implementation and Data Analysis of an Embedded System for Measuring Environmental Quantities*. *Sensors*, 20. (2020) 2304. <https://doi.org/10.3390/s20082304>
- [7] Sensirion Environmental Sensing for IoT and Industrial Applications – Virtual Training. <https://empa.com/wp-content/uploads/2020/12/iotsensorweek-Sensirion.pdf> (letöltve 2023 január 5-én)
- [8] Carbonare N., Fugmann H., Asadov N., Pflug T., Schnabel L., Bongs C.: *Simulation and Measurement of Energetic Performance in Decentralized Regenerative Ventilation Systems*. *Energies*, 13/22. (2020) 6010, 1–25. <https://doi.org/10.3390/en13226010>



A LÍTIUM-ION AKKUMULÁTOROK TŰZOLTÁSA

FIRE EXTINGUISHING OF LITHIUM-ION BATTERIES

Trabelsi Omar,¹ Kovács Tünde Anna²

¹ Óbudai Egyetem, Biztonságtudományi Doktori Iskola. Budapest, Magyarország, am.rouch93@live.com

² Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar. Budapest, Magyarország, kovacs.tunde@bgk.uni-obuda.hu

Abstract

The spread of electric cars means the ever-wider spread of batteries. The use of lithium-ion batteries carries many dangers. The biggest danger is the possible explosion of the battery. Firefighting is not easy due to the properties of lithium. In recent years, there have been many fires caused by lithium-ion batteries. Firefighters use different methods, but their development is of utmost importance to ensure the safe use of electric vehicles. In this study, the authors try to draw attention to the dangers and present practical firefighting options.

Keywords: *electric car, batteries, fire, risk, Fire Extinguishing.*

Összefoglalás

Az elektromos autók elterjedése az akkumulátorok egyre szélesebb körű elterjedését jelenti. A lítium-ion akkumulátorok használata számos veszélyt rejt magában. A legnagyobb veszélyt az akkumulátor esetleges felrobbanása jelenti. A tűzoltás a lítium tulajdonságai miatt nem egyszerű. Az elmúlt években sok lítium-ion akkumulátor okozta tüzesettel találkoztunk. A tűzoltók különböző módszereket alkalmaznak, de ezek fejlesztése kiemelten fontos az elektromos járművek biztonságos használata miatt. A szerzők ebben a tanulmányban a veszélyekre próbálják felhívni a figyelmet, és gyakorlati tűzoltási lehetőségeket mutatnak be.

Kulcsszavak: *elektromos autó, akkumulátor, tűz, kockázat, tűzoltás.*

1. Bevezetés

Az EU határozott célja, hogy a következő években betiltsa a fosszilis tüzelésű járművek használatát. Ezt a tervet az elektromos autók elterjesztésével kívánja megvalósítani. A káros szén-dioxid-kibocsátás csökkentése miatt egyre nagyobb számban használnak elektromos autókat [1]. Az elektromos autók jelenleg lítium-ion akkumulátorokat használnak energiaforrásként.

2. A lítium-ion akkumulátorok bemutatása

A lítium az alkálifémek családjába tartozó fémes kémiai elem, amelyet alacsony sűrűsége és nagy reakcióképessége jellemez. Széles körben használják a lítiumakkumulátorok gyártásában, mi-

vel képes hatékonyan tárolni és felhasználni az energiát [2]. A lítiumot más alkalmazásokban is használják, mint például gyógyszerek, kenőanyagok és fémötvözetek. Erősen reaktív természete miatt a lítiummal óvatosan kell bánni, hogy elkerüljük a tűz vagy a robbanás veszélyét [3]. A lítium akkumulátoranyagként nyújtott előnyei ellenére biztonsági és hulladékkezelési kihívásokat jelent, amelyek használata és újrahasznosítása során különös figyelmet igényel.

A lítiumakkumulátorokat nagy energiasűrűségű és hosszú élettartamuk miatt széles körben használják számos elektronikus eszközben [4]. Fontos azonban felismerni az ezekkel az akkumulátorokkal kapcsolatos lehetséges kockázatokat, például a túlmelegedést, a túltöltést és a rövidzárlatokat, amelyek súlyos eseményekhez, például

tűzekhez vezethetnek. A lítiumelemek belső működésének megértésével, valamint a megfelelő kezelési és tárolási gyakorlatok elfogadásával lehetőség nyílik a kockázatok minimalizálására és e fejlett technológiák biztonságos használatának biztosítására. A lítiumakkumulátorok fő típusai a lítium-ion (Li-ion) akkumulátorok, a lítium-polimer (LiPo) akkumulátorok [5] és a lítium – vas – foszfát (LiFePO4) akkumulátorok [6]. A Li-ion akkumulátorokat nagy energiasűrűségük és hosszú élettartamuk miatt széles körben használják fogyasztói elektronikai eszközökben és elektromos járművekben [7]. A LiPo-akkumulátorokat rugalmas és könnyű formájuk miatt gyakran használják drónokban, modellautókban és hordozható eszközökben. A LiFePO4-akkumulátorok hőstabilitásukról és tartósságukról ismertek [8], így ideálisak a nagy teljesítményt és fokozott biztonságot igénylő alkalmazásokhoz [9]. Minden lítiumakkumulátor-típusnak megvannak a maga előnyei és hátrányai, és az akkumulátor típusának kiválasztása az alkalmazás speciális igényeitől függ [10].

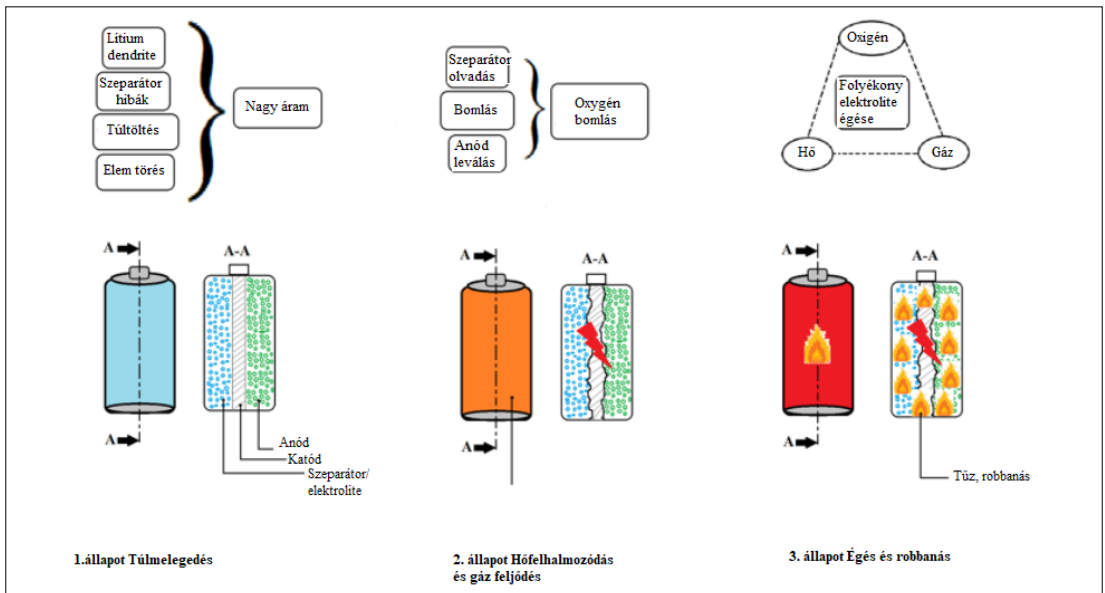
3. A lítium-ion akkumulátorok kockázatai

A lítiumakkumulátorok gyulladási veszélyt jelentenek, amelyet komolyan kell venni, mivel súlyos eseményeket okozhatnak. Az egyik fő kockázat az akkumulátorok túlmelegedése, amelyet túltöltés, rövidzárlat vagy magas hőmérsék-

letnek való kitétség okozhat. Ez a túlmelegedés ellenőrizetlen kémiai reakciót idézhet elő az akkumulátor belsejében, ami tüzet vagy robbanást okozhat. Ezen túlmenően a lítiumakkumulátorok meggyulladhatnak fizikai sérülés, például defekt vagy zúzódás (pl. autózúzódás) [11] esetén is, ami veszélyeztetheti az akkumulátor épségét és tüzet okozhat. Ezért kulcsfontosságú a lítiumakkumulátorok megfelelő kezelése és tárolása a gyulladás kockázatának csökkentése és a fejlett energiaforrások biztonságos használata érdekében [12].

A lítiumakkumulátor gyulladása vagy felrobbanása különböző tényezők miatt fordulhat elő, például túltöltés, túlmelegedés, rövidzárlat vagy fizikai sérülés [13]. Ha a lítiumakkumulátor túl van töltve, a lítium-ionok nem egyenletesen rakódhatnak le az elektródákon, forró pontokat hozva létre, amelyek ellenőrizetlen hőreakcióhoz vezethetnek. Hasonlóképpen, az akkumulátor belső rövidzárlata túlzott felmelegedést és a belső nyomás növekedését okozhatja, ami esetleg robbanáshoz vezethet. A fizikai sérülések, például az akkumulátor kilyukadása szintén gyúlékony elektrolit folyadékot szivároghat, és tüzet okozhat [14].

1. A lítiumakkumulátor túlterhelése hibás vagy nem megfelelő töltő miatt.
2. Az akkumulátor megnövekedett belső hőmérséklete, amely instabil kémiai reakciót okoz.
3. Gyúlékony gázok felhalmozódása az akkumulátor belsejében.



1. ábra. Akkumulátortűz kialakulása

4. Az elválasztó membrán meghibásodása, ami belső rövidzárlatot eredményez.
5. Gyors láncreakció kiváltása, hirtelen hőmérséklet-emelkedés előidézése.
6. Az akkumulátor gyors tágulása és a külső burkolat megrepedése.
7. Erős hő és láng felszabadulása, ami potenciálisan veszélyes tüzet okozhat.
8. A lítiumakkumulátor felrobbanásának veszélye a megnövekedett belső nyomás és a gyúlékony gázok felszabadulása miatt.

4. Esettanulmányok lítium-ion akkumulátortüzekről és következményeiről

4.1. Esettanulmány: Egy mobiltelefon ki- gyulladt a lítium-ion akkumulátor belső rövidzárlata miatt

2016-ban a Samsung Galaxy Note 7 incidens széles körben nyilvánosságra került, mivel a hibás akkumulátorok tüzet és robbanást okoztak. Az incidensek okaként a mobiltelefonban használt lítium-ion akkumulátorokat azonosították, amelyek tömeges visszahívásokhoz és az eszköz repülési tilalmához vezettek. Az akkumulátor tervezési és gyártási hibái túlmelegedéshez, rövidzárlatokhoz és termikus hibákhoz vezettek, ami a felhasználó biztonságát veszélyezteti.

Ez az incidens rávilágított az elektronikus alkatrészek minőségének és biztonságának fontosságára, ami arra készítette a gyártókat, hogy erősítsék meg minőség-ellenőrzési eljárásaikat, hogy a jövőben elkerüljék az ilyen problémákat. A világ számos légitársasága megtiltotta az utasoknak a Samsung Galaxy Note7 okostelefonok használatát vagy töltését a gépeiken, mert aggodalmaik vannak gyúlékony akkumulátoraik miatt [15].

4.2. esettanulmány: Felicity Ace-teherhajó- tűz

2022 februárjában a Felicity Ace teherhajó ki-
gyulladt, és végül az Atlanti-óceán fenekére süllyedt. A tüzesetben mintegy 4000 autót pusztult el, ezek többsége a Volkswagen-csoport különböző márkáinak új járműve volt. A VW-csoportot kétszer perelték be, mert azt állítják, hogy a tűz egy lítium-ion akkumulátorcsomagból keletkezett egy Porsche autóban, amely egy vásárlóhoz tartott. Felicity Ace becslések szerint 155 millió dollár értékben szállított csúcskategóriás autókat. A legénység mind a 22 tagját biztonságosan evakuálták a hajóról.

5. A megfelelő tűzoltási technikák fontossága

A tűzoltási technikák elengedhetetlenek az emberek és a tulajdon biztonságának biztosításához tűzvesz esetén. Különböző módszereket alkalmaznak a tüzek oltására, beleértve a vizet, habot, szén-dioxidot és száraz vegyszereket. Mindegyik technikát a tűz típusához és sajátosságaihoz, például az üzemanyagforráshoz és az intenzitáshoz igazítják [16]. A tűzoltásnak van egy osztályozása, amely a tüzek különböző típusainak kategorizálására szolgál tüzelő-anyag-források alapján. A tűznek öt fő osztálya van:

- A osztály: Szilárd anyagok, például fa, papír és szövetek tüzei.
- B osztály: Gyúlékony folyadékokkal, például benzinnel, olajjal és zsírral járó tüzek.
- C osztály: Feszültség alatt álló elektromos berendezéseket érintő tüzek.
- D osztály: Éghető fémeket, például magnéziumot és nátriumot érintő tüzek.
- K osztály: Zsír és növényi olaj tüzelése kereskedelmi konyhákban.

A tűz minden osztálya speciális oltási módszereket és megfelelő oltóanyagokat igényel a biztonságos ellenőrzéshez.

A tűzoltásnak van egy osztályozása, amely a tüzek különböző típusainak kategorizálására szolgál tüzelőanyag-források alapján. A tűznek öt fő osztálya van:

A lítiumakkumulátorok, valamint általában az autókban található akkumulátorok általában a B osztályú tüzek kategóriába tartoznak [17]. A B osztályú tüzek gyúlékony folyadékokat vagy gázokat tartalmaznak, amelyek magukban foglalhatják az akkumulátorokban található elektrolitokat és egyéb összetevőket. Fontos megjegyezni, hogy a lítiumelemekkel fellépő tüzek a C osztályú tüzek jellemzőit is mutathatják, ha elektromos alkatrészeket érintenek. Ezért a lítiumelemes tüzek megfelelő oltási technikáinak meghatározásakor elengedhetetlen figyelembe venni a tűz sajátos természetét és az érintett anyagokat [18].

6. Általános tűzoltási módszerek lítiumakkumulátorokhoz

A lítiumakkumulátorok kémiai összetételük és túlmelegedési lehetőségük miatt tűz esetén különleges kockázatot jelentenek. A lítiumakkumulátorral fellépő tűz oltására számos általános oltási módszert alkalmaznak.

- Homok vagy föld használata: Homok vagy föld használható a tűz elfojtására azért, hogy az akkumulátorokat megvonják az égéshez szükséges oxigéntől.
 - Porral oltó készülék használata: A porral oltó készülékek hatékonyan oltják el a lítiumelemek tüzeit azért, hogy elfojtják a lángokat, és lehűtik a hőforrást.
 - Vízbe merítés: Ha lehetséges, merítse vízbe a lítiumakkumulátorokat, hogy gyorsan lehűtse a hőt, és megakadályozza a tűz továbbterjedését. Habbal oltó készülék használata: A habbal oltó készülékek hatékonyan elfojthatják a lángokat, és megakadályozhatják a lítiumakkumulátorok újraégését.
 - Szén-dioxid tűzoltó készülék használata: A szén-dioxid tűzoltó készülékek a lángok elfojtására használhatók azért, hogy megvonják az akkumulátorokat az égéshez szükséges oxigéntől.
- A megfelelő képzés és az oltási technikák ismerete döntő fontosságú a hatékony tűzoltás és a további károk megelőzése szempontjából.

7. A lítiumelemes tüzek oltásának legjobb gyakorlatai

A lítiumakkumulátor-tüzek kémiai összetételük és heves reakcióképességük miatt egyedülálló elnyomási kihívást jelentenek [19]. E tüzek hatékony oltásához elengedhetetlen a tűzbiztonsági szakértők által ajánlott legjobb gyakorlatok követése [20]. Kulcsfontosságú, hogy biztonságos távolságot tartsunk az égő akkumulátortól, mivel a lítiumakkumulátor tüze mérgező gázokat és gyúlékony anyagokat bocsáthat ki [21]. A lehetséges veszélyek elleni védelem érdekében ajánlott megfelelő egyéni védőfelszerelés, például légzőmaszk és hőálló kesztyű viselése. Fontos, hogy a lítiumakkumulátorok tüzeire speciális oltóanyagokat használjunk, például szén-dioxidot, lítium-karbonátot vagy kifejezetten akkumulátortüzekhez tervezett oltóanyagokat [22]. Ezek a szerek hatékonyan elfojtják a tüzet, veszélyes kémiai reakció veszélye nélkül [23]. Javasoljuk, hogy a tűz eloltása után hűtse le az akkumulátort, hogy elkerülje az égés újraindulását. Ha szabályozott mennyiségű vizet használ az akkumulátor hűtésére, megelőzheti a túlmelegedés és a hőreakció kockázatát [24, 25].

8. Következtetések

A lítiumakkumulátor gyulladása esetén a tűzoltás megfelelő technikáinak ismerete elengedhetetlen mind az egyének, mind a vagyonbiztonság biztosításában. Azokat a járműveket, melyek haj-

tásához az energiát lítiumakkumulátorral biztosítják, fel kell szerelni tűzoltó készülékkel, hogy az oltást a tűz első jelére meg lehessen kezdeni. A kutatásokat tovább kell folytatni, egy olyan megoldás elérése érdekében, amely biztonságosabbá teszi ezeknek a járműveknek a használatát. Ennek érdekében egyrészt szükséges egy biztonsági szabályrendszer felépítése, pl. parkolók kialakítása, megfigyelőrendszerrel és automata tűzoltó berendezésekkel, valamint a járművek akkumulátorai esetében egy érzékelő- és tűzoltó rendszer kifejlesztése.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Bisschop R., Amon F., Rosengren M., Willstrand O.: *Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles*. May 2019, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18738.15049>
- [2] Nitta N., Wu F., Lee J. T., Yushin G.: *Li-ion Battery Materials: Present and Future*. *Materials Today*, 18/5. (2015) 252–264.
- [3] Cavanagh K., Ward J., Behrens S., Bhatt A., Ratnam E., Oliver E., Hayward J.: *Electrical Energy Storage: Technology Overview and Applications*. CSIRO: Canberra, Australia, 2015; EP154168.
- [4] Pacala S., Socolow R.: *Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies*. *Science*, 305. (2004) 968–972.
- [5] Kritzer, P., Doring H., Emermacher B.: *Improved Safety for Automotive Lithium Batteries: An Innovative Approach to Include an Emergency Cooling Element*. *Advances in Chemical Engineering & Science*, 4/2. (2014) 197–207. <https://doi.org/10.4236/aces.2014.42023>
- [6] Li J., Suzuki T., Naga, K., Ohzawa Y., Nakajima T.: *Electrochemical Performance of LiFePO₄ Modified by Pressure-Pulsed Chemical Vapour Infiltration in Lithium-Ion Batteries*. *Materials Science and Engineering: B*, 142/2-3. (2007) 86–92. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.07.003>
- [7] Takahashi M., Ohtsuka H., Akuto K., Sakurai Y.: *Confirmation of Long-Term Cyclability and High Thermal Stability of LiFePO₄ in Prismatic Lithium-Ion Cells*. *Journal of The Electrochemical Society*. 152/5. (2005) A899–A904. <https://doi.org/10.1149/1.1874693>
- [8] Roy P., Srivastava S. K.: *Nanostructured Anode Materials for Lithium-Ion Batteries*. *Journal of Material Chemistry A* 6/2015. 2454–2484.
- [9] Mizushima K., Jones P. C., Wiseman P. J., Goodeenough J. B.: *Li_xCoO₂ (0 < x < -1): A New Cathode Material for Batteries of High Energy Density*. *Materials Research Bulletin*, 15/6. (1980) 783–789. [https://doi.org/10.1016/0025-5408\(80\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0025-5408(80)90012-4)
- [10] Zaghbi K., Shim J., Guerfi A., Charest P., Striebel K. A.: *Effect of Carbon Source as Additives in LiFePO₄ as Positive Electrode for Lithium-Ion Bat-*

- teries. *Electrochemical and Solid State Letters* 84. (2005) A207–A210.
<https://doi.org/10.1149/1.1865652>
- [11] Thackeray M., David W., Bruce P., Goodenough J. B.: *Lithium Insertion into Manganese Spinel. Materials Research Bulletin*, 18/4. (1983) 461–472.
[https://doi.org/10.1016/0025-5408\(83\)90138-1](https://doi.org/10.1016/0025-5408(83)90138-1)
- [12] Whittingham M. S.: Chalcogenide Battery. U.S. Patent No. 4,009,052, 22 February 1977.
- [13] Blum A. F., Long R. T. Jr.: *Fire Hazard Assessment of Lithium-Ion Battery Energy Storage Systems*. Springer, New York, NY, USA, 2016.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6556-4>
- [14] Whittingham M. S.: *Electrical Energy Storage and Intercalation Chemistry*. Science, 192. (1976) 1126–1127.
<https://doi.org/10.1126/science.192.4244.1126>
- [15] Yamahira T., Kato H., Anzai M.: *Nonaqueous Electrolyte Secondary Battery*. U.S. Patent No. 5,053,297, 1 October 1991.
- [16] Blum A., Long R. T.: *Full-scale Fire Tests of Electric Drive Vehicle Batteries*. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, 2015. 8(2).
- [17] Maloney T.: *Extinguishment of Lithium-Ion and Lithium-Metal Battery Fires*, US Department of Transportation, Federal Aviation Administration. 2014. 46–51.
- [18] Wang, Qingsong, Ban, Xinyan, Huang, Peifeng, et al.: *The Fire Hazard Classification of Lithium-Ion Battery*. China Fire Science and Technology Association Annual Conference, 2015. 226–232.
- [19] Rao H., Huang Z., Zhang H., et al.: *Study of Fire Tests and Fire Safety Measures on Lithium-Ion Battery Used on Ships*. International Conference on Transportation Information and Safety, 2015. 46–51.
- [20] Egelhaaf M., Kress D., Wolpert D., et al.: *Fire Fighting of Li-Ion Traction Batteries*. SAE International Journal of Alternative Powertrains, p.2(2013-01-0213): 37–48.
- [21] Li, Yi, Yu, Dongxing, Zhang, Shaoyu, et al.: *A Typical Lithium-Ion Battery Fire Extinguishing Test*. Journal of safety and environment, 15/6. (2015) 120–125.
- [22] Wang Q., Shao G., Duan Q., et al.: *The Efficiency of Heptafluoropropane Fire Extinguishing Agent on Suppressing the Lithium Titanate Battery Fire*. Fire Technology, 2015. 1–10.
- [23] Lisbon D., Snee T.: *A Review of Hazards Associated with Primary Lithium and Lithium-Ion Batteries*. Process Safety & Environmental Protection, 89/6. (2011) 434–442.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2011.06.022>
- [24] Padeanu A.: *Volkswagen Sued Twice as Felicity Ace Cargo Ship Fire Might Have Started From A Porsche*.
- [25] Tarascon J.-M., Armand M.: *Issues and Challenges Facing Rechargeable Lithium Batteries*. Nature, 414. (2001) 359–367.

SZERZŐK JEGYZÉKE**LIST OF AUTHORS****A–CS**

ANDRÁS JÓZSEF 7
BAKAI NÁNDOR 42, 69
BÁRSONY ISTVÁN 1
CSEGEDI FERENC-JÓZSEF 59

D–F

DÓSA JÁNOS 7
DINYA TAMÁS 36
DIÓS SZABOLCS SÁNDOR 36
EGYED-FALUVÉGI ERZSÉBET 14
FARMOS RUDOLF-LÁSZLÓ 14
FEKETE ALBERT-ZSOMBOR 78
FORGÓ ZOLTÁN 78

G–H

GÁL KÁROLY ISTVÁN 14, 48
GÁL ZSOLT 65
GERGELY ATTILA LEVENTE 14, 30
GOBESZ FERDINÁND-ZSONGOR 19
HODGYAI NORBERT 24
HUSI GÉZA 36

K

KÁNTOR JÓZSEF 14
KERESZTES KRISTÓF 30
KOVÁCS JÓZSEF 7
KOVÁCS TÜNDE ANNA 83

M

MASUK ABDULLAH 36
MÁDER PATRIK 42
MÁRTON BOTOND 59
MÁTÉ MÁRTON 24, 48
MÁTHÉ ALIZ ÉVA 19
MOTASEM ALTAMIMI 69

P–R

PALÁNKAI EMESE 54
PÁSZTOR JUDIT 59
POPA-MÜLLER IZOLDA 65
RÁK OLIVÉR 42, 69

S–SZ

SARVAJ CZ KORNÉL 54
SZABÓ LÓRÁNT 74
SZÁNTÓ ATTILA 36
SZŐCS KRISZTINA 59

T–Z

TOLVALY-ROŞCA FERENC 78
TRABELSI OMAR 83
MIRCEA VIOREL-DRĂGOI 24
WELTSCH ZOLTÁN 74