

MTK 21.

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

Bagyinszki Gyula (Budapest)
Bitay Enikő (Kolozsvár/Marosvásárhely)
Csavdári Alexandra (Kolozsvár)
Csáky Imre (Debrecen)
Czigány Tibor (Budapest)
Dávid László (Marosvásárhely)
Dezső Gergely (Nyíregyháza)
Diószei Attila (Jönköping, Sweden)
Dobránszky János (Budapest)
Domokos József (Marosvásárhely)
Dulf Éva Henriett (Kolozsvár)
Dusza János (Kassa)
Egyed-Faluvégi Erzsébet (Marosvásárhely)
Erdei Timotei István (Debrecen)
Forgó Zoltán (Marosvásárhely)
Gobesz Ferdinánd-Zsongor (Kolozsvár)
Horváth Richárd (Budapest)
Kovács Tünde Anna (Budapest)
Máder Patrik Márk (Pécs)
Máté Márton (Marosvásárhely)
Pokorádi László (Budapest)
Popa-Müller Izolda (Marosvásárhely)
Réger Mihály (Budapest)
Réti Tamás (Budapest)
Roósz András (Budapest)
Sikolya László (Nyíregyháza)
Talpas János (Kolozsvár)
Tolvaly-Rosca Ferenc (Marosvásárhely)
Tóth László (Budapest)

ISSN 2393 – 1280

MŰSZAKI TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

21.

**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 utánnyomására, 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-2024.21

DOI: 10.33894/mtk-2024.21

TARTALOM

Aichaoui Nada El Yasmine, Kovács Tünde Anna*Hegesztő robotrendszerek optimalizálási és adaptív vezérlési stratégiái 1***Csavidári Alexandra Ana, Bogyor Andrea, Bitay Enikő***A összeszorkorbinsav-tartalom és az antioxidáns-aktivitás költséghatékony meghatározása. Élelmiszer-kémiai esettanulmány 7***Dezső Gergely***Robotika-tehetséggondozás a Nyíregyházi Egyetemen 16***Diós Szabolcs Sándor, Masuk Abdullah, Dinya Tamás, Szántó Attila, Pettendi Dávid, Balajti István***MPA-antennaforogató rendszer kiépítése interferometrikus in situ mérésekhez 21***Gáti József, Némethy Krisztina, Kuti János***Szárazoltó-berendezés száz éve 31***Imezs Mária, Ferencz János, Kelemen András***Vektoriálisan szabályozott PMSzM-hajtás szimulálása egyszerűsített modellezési struktúrákkal 36***Máté Márton, Szőcs Krisztina***Az evolvens fogaskerékpár csúszásának egzakt modellezése 48***Ahmad Buhairi Minhalina Binti, Pinke Péter, Tóth László, Kovács Tünde Anna***Titánötvözetek hőkezelése 56***Nagy Balázs Ákos, Gáti József, Kovács Tünde Anna***A kézi lézeres hegesztés biztonsági kérdései 61***Nagy Örs, Sánduly Annabella, Gobesz F.-Zsongor***Beroppanási tönkremenetel numerikus modellezése realisztikus szélső támasznál 67***Németh Bíborka***Légsebesség mérése a műszaki kar irodáiban 73***Portik Szilveszter, Gergely Attila***Műanyag fogaskerek koptatására alkalmas berendezés 80*

Rappert Balázs, Egyed-Faluvégi Erzsébet	
<i>Malomcsiszolós módszer hatékonyságának vizsgálata öntött fém alkatrészek esetén</i>	84
Rezes Gábor, Szigeti Ferenc, Dezső Gergely	
<i>Liftajtó-fóliázó berendezés tervezése</i>	89
Vásárhelyi József, Batók Roland, Drótos Dániel	
<i>Beágyazott rendszerek adaptív alkalmazásának vizsgálata</i>	97
SZERZŐK JEGYZÉKE	107

CONTENT

AICHAOUI Nada El Yasmine, Tünde Anna KOVÁCS

Optimisation and Adaptive Control Strategies for Welding Robot Systems 1

Alexandra Ana CSAVDÁRI, Andrea BOGYOR, Enikő BITAY

Cost-Effective Determination of Total Ascorbic Acid Content and Antioxidant Activity. A Food Chemistry Case Study 7

Gergely DEZSŐ

Robotics Talent Management at University of Nyíregyháza 16

Szabolcs Sándor DIÓS, Abdullah MASUK, Tamás DINYA, Attila SZÁNTÓ, Dávid PETTENDI, István BALAJTI

Construction of MPA Antenna Rotation System for Interfero-Metric “In-Situ” Measurements 21

József GÁTI, Krisztina NÉMETHY, János KUTI

One Hundred Years of Dry Fire Extinguisher Equipment 31

Mária IMECS, János FERENCZ, András KELEMEN

Simulation of the Vector Controlled Pmsym Drive Based on Simplified Modeling Structures 36

Márton MÁTÉ, Krisztina SZŐCS

Non Approximative Modelling of Involute Gear Pair Sliding 48

Binti Ahmad Buhairi MINHALINA, Péter PINKE, László TÓTH, Tünde Anna KOVÁCS

Heat-Treating Processes of the Titanium Alloys 56

Balázs Ákos NAGY, József GÁTI, Tünde Anna KOVÁCS

Safety Questions Concerning Manual Laser Welding 61

Örs NAGY, Annabella SÁNDULY, F.-Zsongor GOBESZ

Numerical Modelling of Web Crippling Under Realistic End Support Conditions 67

Bíborka NÉMETH

Air Velocity Measurements in the Offices of the Faculty of Engineering 73

Szilveszter PORTIK, Attila GERGELY

A Wear Device for Plastic Gears 80

Balázs RAPPERT, Erzsébet EGYED-FALUVÉGI	
<i>An Examination of the Effectiveness of Tumbling on Sand-Cast Parts</i>	84
Gábor REZES, Ferenc SZIGETI, Gergely DEZSŐ	
<i>Design of Elevator Door Foiling Machine</i>	89
József VÁSÁRHELYI, Roland BATÓK, Dániel DRÓTOS	
<i>Examination of Embedded System Adaptive Configurability</i>	97
LIST OF AUTHORS	107



HEGESZTŐ ROBOTRENDSZEREK OPTIMALIZÁLÁSI ÉS ADAPTÍV VEZÉRLÉSI STRATÉGIÁI

OPTIMISATION AND ADAPTIVE CONTROL STRATEGIES FOR WELDING ROBOT SYSTEMS

Aichaoui Nada El Yasmine,¹ Kovács Tünde Anna²

¹ Óbudai Egyetem, Biztonságtudományi Doktori Iskola. Budapest, Magyarország, jasminnada77@gmail.com

² Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar. Budapest, Magyarország, kovacs.tunde@bgk.uni-obuda.hu

Abstract

This paper delves into the evolving landscape of welding robotics, particularly the integration of adaptive control strategies for optimising human-robot interaction. Collaborative robotics (cobotics) underscores the significance of adaptive control for secure effective and safe cooperation between humans and robots in welding tasks. Past research highlights optimisation techniques such as model-based optimization and genetic algorithms, alongside adaptive control strategies that dynamically adjust parameters based on real-time feedback. These advancements promise enhanced safety, efficiency, and competitiveness in industrial welding automation.

Keywords: *welding robotics, adaptive control, human-robot interaction, optimization techniques.*

Összefoglalás

Ez a tanulmány a hegesztőrobotika fejlődő területét vizsgálja, különös tekintettel az ember-robot interakció optimalizálását célzó adaptív vezérlési stratégiák integrálására. A kollaboratív robotika (kobotika) kiemeli az adaptív vezérlés jelentőségét az ember és a robotok közötti hatékony és biztonságos együttműködés biztosítása érdekében a hegesztési feladatokban. A korábbi kutatások olyan optimalizálási technikákat emelnek ki, mint a modellalapú optimalizálás és a genetikai algoritmusok, valamint olyan adaptív vezérlési stratégiákat, amelyek dinamikus, valós idejű visszajelzések alapján állítják be a paramétereket. Ezek a fejlesztések fokozott biztonságot, hatékonyságot és versenyképességet ígérnek az ipari hegesztés automatizálásában.

Kulcsszavak: *hegesztőrobot, adaptív vezérlés, ember-robot interakció, optimalizálási technikák.*

1. Bevezetés

A robotika a tudományos szférában található társaihoz képest viszonylag új keletű tudományág. A robotok alapvetően olyan technológiák, mint a motorok, érzékelők és számítástechnikai rendszerek komplex rendszeréből állnak. A robottechnika akkor született meg, amikor ezek az egyes technológiák elérték azt az érettségi szintet, hogy harmonikusan integrálhatók legyenek. A robotika megkülönböztető szempontja, hogy az újszerű alkalmazások kidolgozása és feltárása érdekében nem függ a technológiai fejlesztéstől.

Ez az eredendő függés izgalmas elemet ad a területnek, mivel a technológiai fejlődéssel párhuzamosan folyamatosan fejlődik [1]. Kétségtelen, hogy a robotika elért egy bizonyos szintű érettséget a különböző környezetekben végzett speciális feladatokhoz, és ezt az aspektust az iparág széles körben kihasználja a termelékenység fokozása érdekében.

A robotika előtt álló egyik legnagyobb kihívás az olyan forgatókönyvekben rejlik, amelyekben a robotok fizikailag érintkeznek az emberekkel, ami egy ígéretes terület. Míg a robotokat általá-

ban ipari környezetben alkalmazzák, alkalmazásuk gyakran azzal jár, hogy a dolgozók biztonsága érdekében elszigetelik őket a cellákon belül. Ennek ellenére számos feladat továbbra is érett az automatizálásra, ami olyan operátorokat igényel, akik képesek olyan összetett helyzetekben eligazodni, amelyeket a robotok nem tudnak teljes mértékben kezelni [1]. Erre válaszul jelent meg a kobotika, amely megkönnyíti az emberek és a robotok közötti együttműködést. A jelentős lehetőségek ellenére a kobotika még mindig gyerekcipőben jár, és az ember-robot interakciókkal kapcsolatos biztonsági aggályok állnak előtérben [2].

Érdekes módon az ilyen ember-robot interakcióban rejlő alapvető kérdés már a robotika kezdete előtt felmerült, és a kibernetika területéről származik. A kibernetika a II. világháború idején alakult ki, és olyan rendszerek kidolgozására törekedett, amelyek képesek megjósolni és elfogadni az emberi reakciókat a robotok cselekedeteire. Norbert Wiener volt e terület úttörője a „prediktor” nevű automata pilótarendszer megalkotásával, amelyet arra terveztek, hogy előre jelezze a pilóta kitérési pályáját a légvédelmi lövedékek ellen. Wiener „Cybernetics or Control and Communication in Animals and the Machine” (Kibernetika vagy irányítás és kommunikáció az állatokban és a gépekben) című alapvető műve a biológiai szervezetekre és a gépekre egyaránt alkalmazható irányítási és kommunikációs elmélet bemutatásával segítette e kutatási terület előkészítését [3]. Ebben a keretben gyökerezik az emberekkel kölcsönhatásban lévő robotika kutatása.

Összességében az ipari robotokat különösen az különbözteti meg a hagyományosabb termelési és összeszerelő berendezésektől, hogy számos különböző feladat elvégzésére képesek. E különböző feladatok elvégzéséhez az ipari robotnak gyakran program vagy szerszámcserét kell végrehajtania, vagy akár mozgásokat kell végeznie, miközben figyelembe kell vennie a pillanatnyi állapotot és a gyártás előzményeit. Ez még inkább igaz egy dinamikus ütemezési környezetben, ahol esetleg meg kell változtatni egy döntést, vagy meg kell szakítani az aktuális feladatokat. Egy reális és pontos ütemezési modellnek figyelembe kell vennie ezeket az állapotváltoztatási műveleteket és az elvégzett különböző feladatok sajátosságait (időtartam, foglalt kapacitás stb.) [4].

A hegesztőrobot, az egyik legvégső kobotikai területre lépve, olyan vezérlőrendszerekkel rendelkezik, amelyek a fejlett automatizálás és a precizitás irányába történő jelentős fejlődést tükrözik. A hagyományos vezérlőrendszerek

nagymértékben támaszkodtak előre meghatározott pályákra és rögzített paraméterekre, ami korlátozta a hegesztési körülmények és a munkadarab geometriájának változásaihoz való alkalmazkodóképességüket. A legújabb fejlesztések azonban forradalmasították ezt a tájat. A modern hegesztőrobot-vezérlőrendszerek olyan kifinomult érzékelőtechnológiákat tartalmaznak, mint a látórendszerek, lézerszkennerek és erő- és nyomtérképezők, amelyek lehetővé teszik a valós idejű visszajelzést és az adaptív vezérlést. Ezek a rendszerek fejlett algoritmusokat használnak, beleértve a gépi tanulást és a mesterséges intelligenciát, a hegesztési paraméterek és pályák dinamikus optimalizálására. Továbbá kiemelkedő trendként jelentek meg a fejlett biztonsági funkciókkal rendelkező együttműködő robotok (cobotok), amelyek lehetővé teszik az ember-robot együttműködést a hegesztési feladatokban [5]. A felhőalapú számítástechnikával és az adatelemzéssel való integráció megkönnyíti a távfelügyeletet, a prediktív karbantartást és a hegesztési folyamatok folyamatos fejlesztését. Összességében a hegesztőrobot-vezérlőrendszerek jelenlegi korszerűsége a rugalmasságot, a hatékonyságot és a minőséget hangsúlyozza, megnyitva az utat a termelékenység és a versenyképesség növelése előtt a hegesztési technológiára támaszkodó iparágakban [6].

A hegesztőrobot-rendszerek hagyományos vezérlési módszerei számos olyan kihívással szembesülnek, amelyek akadályozzák hatékonyságukat a modern gyártási környezet követelményeinek teljesítésében [5]. Az egyik jelentős kihívás a hegesztési körülmények változásaihoz való korlátozott alkalmazkodóképességük, például az anyagtulajdonságok, a kötésgeometria vagy az olyan környezeti tényezők, mint a hőmérséklet és a páratartalom változásai. A hagyományos vezérlők gyakran előre meghatározott pályákra és rögzített paraméterekre támaszkodnak, így alkalmatlanok a valós hegesztési alkalmazásokban előforduló dinamikus helyzetek kezelésére. Ez a merevség olyan problémákhoz vezethet, mint a gyenge hegesztési minőség, az inkonzisztens gyöngyprofilok, valamint a megnövekedett utómunka- vagy selejtarány. A hagyományos vezérlők ráadásul nem tudnak valós időben reagálni a hegesztési folyamat során fellépő zavarokra vagy anomáliákra, ami a termelékenység és a hatékonyság csökkenéséhez vezet. Ezen túlmenően ezek a vezérlési módszerek nehezen tudják optimalizálni a hegesztési paramétereket a különböző anyagok vagy hegesztési technikák esetében, ami

nem optimális teljesítményhez és megnövekedett üzemeltetési költségekhez vezet. Összefoglalva, a hagyományos vezérlési módszerek előtt álló kihívások rávilágítanak arra, hogy a modern gyártási követelmények komplexitásának hatékony kezelése érdekében a hegesztőrobotok vezérléséhez adaptívabb, intelligensebb és rugalmasabb megközelítésekre van szükség [7].

1.1. A technika jelenlegi állása

A hegesztés területén az optimalizálásra és az adaptív vezérlésre összpontosító korábbi tanulmányok és kutatások jelentős előrelépést értek el a hegesztési műveletek teljesítményének, hatékonyságának és általános minőségének javításában. Kiterjedt vizsgálatokat végeztek az optimalizálási módszerekkel kapcsolatban, amelyek a hegesztési folyamatok különböző aspektusait célozták meg, a pályatervezéstől és a paraméterek beállításától kezdve az erőforrások elosztásáig. Matematikai optimalizálási keretrendszerek, például genetikai algoritmusok, részecske-raj-optimalizálás és szimulált lágyítás segítségével a kutatók arra törekedtek, hogy finomhangolják a hegesztési paramétereket, például a feszültséget, az áramot, a haladási sebességet és a huzalelőtolási sebességet [8]. Ezeknek az optimalizálási törekvéseknek az elsődleges célja a gyakori hegesztési hibák, köztük a porozitás, az alulvágás és a fröccsenés mérséklése, miközben egyidejűleg maximalizálják a termelékenységet és a hegesztés integritását [9].

Az adaptív szabályozási stratégiák szintén a kutatások középpontjában állnak, amelyek célja a szabályozási paraméterek dinamikus beállítása az érzékelők és a környezeti feltételek valós idejű visszajelzései alapján [8]. Az adaptív szabályozási technikák, mint például a modelljósó szabályozás, a fuzzy logikai szabályozás és a neurális hálózatok lehetővé teszik a hegesztőrobotok számára, hogy alkalmazkodjanak a munkadarab geometriájának, az anyagjellemzőknek és a hegesztési körülményeknek a változásaihoz. A kulcsfontosságú folyamatváltozók, például az ívfeszültség, a hegesztési áram és a fáklya irányultságának folyamatos figyelemmel kíséréseivel az adaptív vezérlőrendszerek kompenzálhatják a zavarokat, optimalizálhatják a hegesztési gyöngy geometriáját, és javíthatják a folyamat általános stabilitását és robusztusságát [9].

A kutatási erőfeszítések, továbbá a fejlett érzékelési technológiák, például látórendszerek, lézerszenzorok és hőkamerák integrációját is vizsgálták, hogy átfogó visszajelzést biztosítsanak

az adaptív vezérlő algoritmusok számára. Ezek az érzékelési technológiák lehetővé teszik a hegesztőrobotok számára, hogy pontosan érzékeljék az illesztési hibákat, a varratkövetési hibákat és a felületi szabálytalanságokat, megkönnyítve a pontos vezérlést és korrekciót a hegesztési folyamat során [5]. Összességében a hegesztés optimalizálásával és adaptív vezérlésével kapcsolatos korábbi kutatások bebizonyították, hogy a hegesztési folyamatok teljesítményének és hatékonyságának jelentős növelésére van lehetőség, ami megnyitotta az utat a korszerűbb és intelligensebb hegesztőrobot-rendszerek kifejlesztése előtt, amelyek képesek megfelelni a modern fel dolgozóipar követelményeinek [8].

A kutatás középpontjában a hegesztés automatizálására szolgáló intelligens vezérlési technikák fejlesztése áll. A kutatási terület magában foglalja annak vizsgálatát, hogy hogyan lehet a hegesztési útvonalat és a hegesztési medence geometriáját valós időben szabályozni. A kutatás céljai három kategóriába sorolhatók: probléma megfogalmazása, optimalizálás és adaptív vezérlés. Először egy fizikai folyamat és matematikai modell kerül vizsgálatra és kidolgozásra a hegesztési folyamat dinamikus viselkedésének leírására. Ezután egy sor optimalizálási és adaptív szabályozási technikát tanulmányozunk és fejlesztünk ki a hegesztési folyamat hatékony és eredményes vezérlése érdekében. Az intelligens vezérlési stratégiák kifejlesztése után kísérleti validálásra kerül sor a javasolt vezérlési technikák helyességének és hatékonyságának ellenőrzése érdekében. A kutatás eredménye várhatóan szisztematikus eljárást biztosít majd az adaptív vezérlés és optimalizálás fejlesztéséhez. Ezt a hegesztésautomatizálási feladatokat széles körben lehetne hasznosítani, mint például a hegesztőrobotok intelligens vezérlési sémáinak kifejlesztése, az automatizált hegesztési folyamat valós idejű felügyeleti és vezérlési rendszerének kifejlesztése, valamint a legkorszerűbb képzési lehetőségek biztosítása a hegesztés területén stb. Ezenkívül a kutatásból származó tudományos eredmények az alapvető megértést és a műszaki képességeket is javítanák a vezérlés és az automatizálás területén.

Ennél is fontosabb, hogy megteremtse az alapokat a különböző folyamatban lévő és jövőbeli interdiszciplináris kutatási tevékenységek előmozdításához, amelyek mind az oktatáshoz, mind az ipari tanácsadáshoz kapcsolódnak, mint például a helyi ipar számára a modern hegesztési stratégiákkal és automatizálással kapcsolatos vállalati képzési programok, új hegesztési eljárások,

például a TIG- és lézerhegesztés automatizálása, valamint az egyedi, kutatóorientált berendezések fejlesztése a kapcsolódó tudományos és ipari felhasználásra.

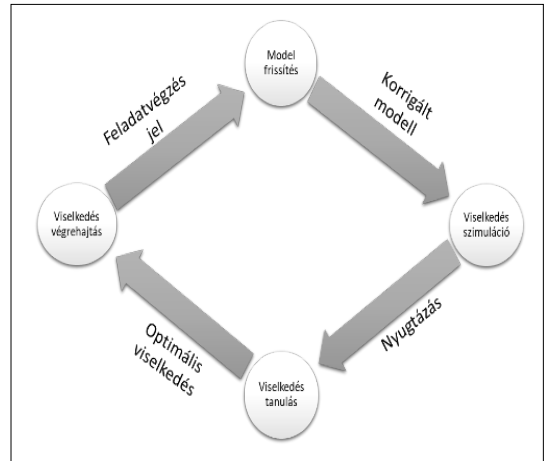
1.2. Az optimalizálási technikák háttere a hegesztésben

1.2.1. Modellalapú optimalizálás

A modellalapú optimalizálás a hegesztés során matematikai modelleket használ a hegesztési folyamatok szimulálására és finomítására, olyan egyenletek beépítésével, amelyek a hegesztés során jelen lévő fizikai jelenségeket, például a hőátadást, a folyadékáramlást és a metallurgiai változásokat reprezentálják. Ezeket a számítási modelleket úgy hozzák létre, hogy különböző körülmények között emulálják a hegesztési viselkedést, előrejelzik a különböző paraméter-kombinációk eredményeit a kívánt hegesztési tulajdonságok optimális konfigurációinak meghatározása érdekében. Ez a módszer elősegíti a hegesztési paraméterek és a hegesztés minőségére gyakorolt hatások összetett kölcsönhatásának szisztematikus megértését, lehetővé téve a különböző folyamatváltozók és forgatókönyvek alapos vizsgálatát kiterjedt kísérletezés nélkül. Ennek ellenére a pontos és számítási szempontból hatékony modellek megalkotása kihívást jelent, ami a hegesztés fizikájának mélyreható megértését és bonyolult numerikus algoritmusokat igényel. Továbbá a szimulációs eredmények és a valós világ eredményei között eltérések keletkezhetnek, mivel a tényleges hegesztési folyamatok bonyolultságát nem lehet teljes mértékben leképezni [10].

A modellalapú és a gépi tanulás más formái közötti elsődleges különbség abban rejlik, hogy a tanulási folyamat az ágens és környezete közötti kölcsönhatásokra támaszkodik. Következésképpen az ágens közvetlenül a környezetéből, külső utasítás nélkül sajátítja el a feladat-specifikus tudást. Az ágens és a környezet közötti elhatárolás azonban nem mindig egyszerű, és az alkalmazástól függ [11]. Például az olyan feladatokban, mint a kétlábú járás és az UAV-irányítás, a környezet feltételezhetően magában foglalja a robot motorjait.

A modellalapú módszerekben az átmenet dinamikájának modelljét használják a jutalmak és az optimális cselekvések levezetésére, a politikákat a modellben optimalizálják, majd ezt követően alkalmazzák a fizikai rendszerre. Az 1. ábra a modellalapú megerősítéssel tanulás csővezetékét szemlélteti.



1. ábra. Modellalapú tanulás folyamata

1.2.2. Genetikus algoritmusok (GA)

A GA-k a természetes szelekció és evolúció által inspirált optimalizálási technikát képviselik, ahol a potenciális megoldások populációja egymást követő generációkon keresztül fejlődik olyan folyamatok révén, mint a szelekció, a keresztezés és a mutáció, és a legmegfelelőbb egyedek kerülnek kiválasztásra a további szaporodáshoz. A hegesztés során a GA-kat a hegesztési paraméterek optimalizálására alkalmazzák, egy populáción belül kromoszómaként kódolva azokat.

Az algoritmus iteratív generációkon keresztül értékeli az egyes megoldások alkalmasságát előre meghatározott objektív függvények, például hegesztési minőségi metrikák alapján, és kiválasztja a legjobban teljesítő egyedeket a következő generációkhoz. A GA-k olyan robusztus megközelítést kínálnak, amely képes összetett, nem lineáris optimalizálási problémák kezelésére, több célkitűzéssel és korlátozással, nagy megoldási terek hatékony feltárására és a közel optimális megoldások viszonylag rövid idő alatt történő azonosítására. A GA-k hatékony alkalmazása azonban gondos paraméter-hangolást és a megfelelő genetikai operátorok kiválasztását igényli az értelmes megoldásokhoz való konvergencia biztosítása érdekében, míg a számítási komplexitás a nagy dimenziójú optimalizálási problémák vagy számításgényes hegesztési modellek esetében megfizethetetlen lehet [12].

1.2.3. Részecskeraj-optimalizálás (PSO)

A PSO koncepciója az olyan organizmusok kollektív viselkedéséből származik, mint a madárraj vagy a halrajok, és egy populációalapú, sztochasztikus

tikus optimalizálási technikaként szolgál. A PSO-ban a potenciális megoldások egy csoportja, amelyet részecskékként ábrázolnak, folyamatosan módosítja pozícióját a keresési térben az egyéni tapasztalatok és a rajon belüli megosztott tudás alapján. Minden egyes részecske egy hegesztési paraméterekből álló potenciális megoldást testesít meg, és mozgását a személyes, legjobb, ismert pozíciója, valamint a raj által felfedezett kollektív, legjobb, ismert pozíció irányítja. Ezen az iteratív folyamaton keresztül a raj fokozatosan konvergál a megoldási tér ígéretes területei felé, így a PSO különösen előnyös a folytonos megoldási térrel és sima célfüggvényekkel jellemezhető feladatok esetében. Viszonylag könnyű megvalósíthatósága és számítási hatékonysága ellenére a PSO hatékonyságát befolyásolhatja a vezérlési paraméterek gondos megválasztása, és bonyolult, multimodális optimalizálási forgatókönyvekben nehézségekbe ütközhet a lokális optimumok elhagyása [13].

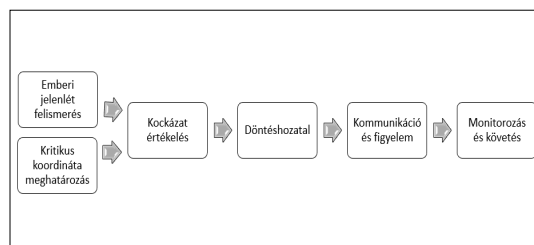
1.3. Adaptív vezérlés a hegesztésben

A hegesztés adaptív vezérlési stratégiái a hegesztési folyamatok optimalizálásának dinamikus megközelítést jelentik a vezérlési paraméterek folyamatos beállításával, az érzékelők és a környezeti feltételek valós idejű visszajelzéseire reagálva. Ezeket a stratégiákat úgy tervezték, hogy a hegesztőrobotok gyorsan alkalmazkodjanak a munkadarab geometriájának, az anyagtulajdonságoknak és a hegesztési folyamatot befolyásoló egyéb tényezőknek a változásaihoz, ezáltal növelve a folyamat általános stabilitását és robusztuságát.

A kritikus folyamatváltozók, például az ívfeszültség, a hegesztési áram és a fáklya irányultságának folyamatos figyelemmel kísérése révén az adaptív vezérlőrendszerek hatékonyan kompenzálják a hegesztési műveletek során fellépő zavarokat és változásokat [9]. Ez az alkalmazkodóképesség biztosítja, hogy a hegesztési paraméterek az adott körülményekhez optimalizáltak maradjanak, ami a hegesztés minőségének és termelékenységének javulásához vezet. Továbbá a gépi tanulási módszerek és a fejlett érzékelési technológiák, például a látórendszerek és a hőkamerák integrálása tovább fokozza az adaptív vezérlőrendszerek alkalmazkodóképességét és pontosságát azáltal, hogy átfogó visszajelzést ad a hegesztési környezetről. Összességében az adaptív vezérlési stratégiák döntő előrelépést jelentenek a hegesztéstechnológiában, mivel lehetőséget nyújtanak a következetesen jó minőségű hegesztési varratok

létrehozására, miközben maximalizálják a hatékonyságot, és minimalizálják a hibákat a különböző üzemi körülmények között [8].

Ezenkívül kulcsfontosságú az ember és a hegesztőrobotok közötti interakció optimalizálásában, különösen az együttműködő robotika vagy a kobotika forgatókönyveiben. Az ilyen felállásokban, ahol emberek és robotok közös terekben dolgoznak együtt, az adaptív vezérlési stratégiák elengedhetetlenek a biztonságos és hatékony együttműködés biztosításához. Ezek a stratégiák magukban foglalják a robot viselkedésének dinamikus beállítását az emberi kezelő mozgását, mozgását és biztonságát figyelő érzékelők valós idejű visszajelzése alapján. Az adaptív vezérlőrendszerek például az ütközések vagy balesetek megelőzése érdekében módosíthatják a robot sebességét, pályáját és erő kifejtését, így biztosítva az emberi kezelő biztonságát. Az adaptív vezérlés lehetővé teszi továbbá, hogy a robot az emberi kezelő cselekedeteinek, preferenciáinak és képességeinek változásaihoz igazítsa viselkedését, javítva ezzel az együttműködés általános élményét [8]. Az ember és a hegesztőrobot közötti interakció folyamatos figyelemmel kíséréssel és elemzésével az adaptív vezérlőrendszerek optimalizálhatják a feladat végrehajtását, minimalizálhatják a hibákat és maximalizálhatják a termelékenységet. Emellett az adaptív vezérlés lehetővé teszi a zökkenőmentes váltást az autonóm robotműködés és az együttműködő üzemmódok között, rugalmasságot és sokoldalúságot biztosítva a különböző hegesztési alkalmazásokban [9]. Összességében az adaptív vezérlés alkalmazása az ember-robot interakció optimalizálásában, hegesztési környezetben, nemcsak a biztonságot és a hatékonyságot növeli, hanem elősegíti az ember és a robotok közötti intuitívabb és harmonikusabb munkakapcsolatot is. A 2. ábra a hegesztőrobot vezérlésének lépéseit szemlélteti, hogy ne csak az emberi biztonságot, hanem a gyártás minőségét is biztosítsa.



2. ábra. Biztonsági és minőségbiztosítási lépések a hegesztőrobotok vezérlésében

2. Következtetések

A hegesztéstechnológia jelenlegi állapotából hiányzik a paraméterek optimalizálására és a hibák azonosítására szolgáló fejlett algoritmusok széles körű integrálása, ami a korlátozottan hozzáférhető információkból is kitéunik. A legújabb fejlesztések azonban ígéretes előrelépést mutattak a neurális hálózatok felhasználása terén ezen folyamatok automatizálására, bár még korai stádiumban [5].

A gépi tanulás hegesztésben való alkalmazása jelentős fejlődési potenciált mutat, bár az ipari alkalmazás előtt további kutatásra és fejlesztésre van szükség. A gépi tanulás integrálása a hegesztési rendszerekbe értékes lehetőséget jelent a fejlődésre, mivel a neurális hálózatok és más kifinomult algoritmusok alkalmazásával jobb paraméter-optimalizálást és nagyobb pontosságú és hatékonyabb hibafelismerést kínál. Ez az automatizálási lehetőség növelheti a termelékenységet és a hegesztés minőségét, és csökkentheti a kézi beállításoktól és az emberi ellenőrzéstől való függőséget. Mindazonáltal a fejlett algoritmusok ipari hegesztésbe való beépítése jelentős időt és erőforrásokat igényel, és a megbízható megvalósításhoz olyan kihívásokat kell megoldani, mint az adatok elérhetősége, az algoritmus robusztussága és a számítási követelmények.

A jövőre nézve az intelligens hegesztési rendszerek jövője a gépi tanulási módszerek folyamatos fejlesztésétől és továbbfejlesztésétől függ. A további kutatásokkal a kifejezetten a hegesztési folyamatokra szabott algoritmusokat lehet kifejleszteni, amelyek nemcsak az automatikus paraméter-optimalizálást és a hibaelhárítást teszik lehetővé, hanem a valós idejű döntéshozatalt, az adaptív vezérlést és a meglévő hegesztési infrastruktúrába való zökkenőmentes integrációt is.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Bibby L., Dehe B.: *Defining and Assessing Industry 4.0 Maturity Levels-Case of the Defence Sector*. Production Planning & Control, 29/12. (2018) 1030–1043.
- [2] Barcellini F., Béarée R., Bencheikroun T. H., Bounouar M., Buchmann W., Dubey G., Siadat

A.: *Promises of Industry 4.0 under the Magnifying Glass of Interdisciplinarity: Revealing Operators and Managers Work and Challenging Collaborative Robot Design*. Cognition, Technology & Work, (2023) 1–21.

- [3] Wiener N.: *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MIT Press. (2019).
- [4] Hajji A., Pellerin R.: *Ordonnancement dynamique et contrôle intelligent d'un robot industriel*, (2023).
- [5] Wang B., Hu S. J., Sun L., Freiheit T.: *Intelligent Welding System Technologies: State-of-the-Art Review and Perspectives*. Journal of Manufacturing Systems, 56. (2020) 373–391.
- [6] Rout A., Deepak B. B. V. L., Biswal B. B.: *Advances in Weld Seam Tracking Techniques for Robotic Welding: A Review*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 56. (2019) 12–37.
- [7] Pires J. N., Loureiro A., Bölmsjö G.: *Welding Robots: Technology, System Issues and Application*. Springer Science & Business Media (2006).
- [8] Doumanidis C. C., Hardt D. E.: *Multivariable Adaptive Control of Thermal Properties during Welding* (1991).
- [9] Aldalur E., Suárez A., Curiel D., Veiga F., Villanueva P.: *Intelligent and Adaptive System for Welding Process Automation in T-Shaped Joints*. Metals, 13/9. (2023) 1532.
- [10] Chen F. F., Xiang J., Thomas D. G., Murphy A. B.: *Model-Based Parameter Optimization for Arc Welding Process Simulation*. Applied Mathematical Modelling, 81. (2020) 386–400.
- [11] Tabar R. S., Wärmefjord K., Söderberg R.: *A New Surrogate Model-Based Method for Individualized Spot Welding Sequence Optimization Concerning Geometrical Quality*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 106. (2020) 2333–2346.
- [12] Nagesh D. S., Datta G. L.: *Genetic Algorithm for Optimization of Welding Variables for Height to Width Ratio and Application of ANN for Prediction of Bead Geometry for TIG Welding Process*. Applied Soft Computing, 10/3. (2010) 897–907.
- [13] Tafarroj M. M., Moghaddam M. A., Dalir H., Kolahan F.: *Using Hybrid Artificial Neural Network and Particle Swarm Optimization Algorithm for Modeling and Optimization of Welding Process*. Journal of Advanced Manufacturing Systems, 20/04. (2021) 783–799.



AZ ÖSSZASZKORBINSAV-TARTALOM ÉS AZ ANTIOXIDÁNS-AKTIVITÁS KÖLTSÉGHATÉKONY MEGHATÁROZÁSA. ÉLELMISZER-KÉMIAI ESETTANULMÁNY

COST-EFFECTIVE DETERMINATION OF TOTAL ASCORBIC ACID CONTENT AND ANTIOXIDANT ACTIVITY. A FOOD CHEMISTRY CASE STUDY

Csavidári Alexandra Ana,^{1,2} Bogyor Andrea,^{1,2} Bitay Enikő^{3,4}

¹ Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Kémia és Vegésmérnöki Kar, Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár, Románia, alexandra.csavidari@ubbcluj.ro

² Erdélyi Múzeum Egyesület Kutatóintézete, Kolozsvár, Románia

³ Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Műszaki és Humántudományi Kar, Marosvásárhely, Románia

⁴ Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország

Abstract

This study investigates the cost-effective and reliable determination of total ascorbic acid (AA) content, as well as antioxidant activity, from a range of 32 alcoholic and non-alcoholic beverages. 5 cold-pressed oil samples and 2 types of honey were also considered. Among the iodometric methods, the back-titration of unreacted iodine with thiosulfate yielded the best results for AA content. The method proved simple, fast, reliable, and accurate, with a recovery rate of ascorbic acid exceeding 99% in 2 standardized commercial pharmaceutical products. Total antioxidant activity determination was based on the reaction of antioxidant species with ABTS, followed by a photometric assessment of the reaction's extent. Results, expressed in terms of AA content, were good and reliable, yet in some cases less precise and accurate. Most beverages exhibited higher antioxidant activity than their respective AA content, likely influenced by other antioxidant compounds such as flavonoids and anthocyanins present in fruit-based drinks. Both methods proved useful in demonstrating the nutritional value of various easy to consume beverages, oils and honey.

Keywords: *total ascorbic acid content, antioxidant activity, food samples, iodometry, photometry.*

Összefoglalás

A tanulmány célja az aszkorbinsav-tartalom (AS), valamint az összantioxidáns-aktivitás költséghatékony és megbízható meghatározása 32 alkoholos és alkoholmentes italból, 5 hidegen sajtolt olajmintából és kétféle mézből. A jodometriás módszerek közül az el nem reagált jódtioszulfáttal történő visszatitrálása generálta a legjobb eredményeket az AS-tartalom meghatározásában. A módszer egyszerűnek, gyorsnak, megbízhatónak és pontosnak bizonyult: az aszkorbinsav visszanyerési aránya meghaladta a 99%-ot 2 szabványos kereskedelmi gyógyszerkészítmény esetében. Az összantioxidáns-aktivitás meghatározása az antioxidánsfajok ABTS-sel való reakcióján és ennek fotometriás értékelésén alapult. Az AS-tartalomban kifejezett eredmények megbízhatónak, viszont néhány esetben kevésbé pontosnak bizonyultak. A legtöbb ital magasabb antioxidáns-aktivitást mutatott, mint a megfelelő AS-tartalma, amely valószínűleg más antioxidáns vegyületek, például a gyümölcsalapú italokban található flavonoidoknak és antocianinoknak köszönhető. Mindkét módszer hasznosnak bizonyult a különféle, könnyen fogyasztható italok, olajok és mézek tápértékének kimutatásában.

Kulcsszavak: *aszkorbinsav-tartalom, antioxidáns-aktivitás, élelmiszerminták, jodometria, fotometria.*

1. Bevezetés

1.1. A C-vitamin fontossága az emberi szervezetben

A C-vitamin (L-aszkorbinsav) nélkülözhetetlen tápanyag az emberi szervezet számára. Fontosságát Szent-Györgyi Albert magyar tudós ismerte fel. Általános nevén mint aszkorbinsav (AS) ismert, és az emberi szervezet egészséges élettani működésében betöltött kulcsszerepének köszönhetően folyamatos kutatások tárgyát képezi [1, 2]. A C-vitamin kulcsfontosságú az immunrendszer (született vagy adaptív) számára, de számos légúti és szisztémás fertőzés megelőzésében és kezelésében is [3].

Segít fenntartani a vérnyomást, és összefüggésbe hozható a rák és a szív- és érrendszeri betegségek megelőzésével [1, 4]. Pozitív hatással van a cukorbetegség, a közönséges megfázás, a szélütés és a vérszegénység gyógyítására is [5]. A legújabb kutatások feltárták szerepét a géntranszkripció és a sejtjelátviteli útvonalak szabályozásában [3].

Az emberi szervezet nem képes előállítani a minimálisan szükséges napi 110 mg-os mennyiséget férfiaknál, illetve 78 mg C-vitamint nőknél [1]. Ezért a bevitelét külső forrásból kell biztosítani, például megfelelő táplálékkal vagy étrend-kiegészítőkkel. Ellenkező esetben, hiánya skorbuthoz vagy más súlyos, akár halálos betegséghez is vezethet [3]. A C-vitamin-hiány gyakori probléma a világ bizonyos területein, különösen az alacsony és közepes jövedelmű országokban, de nem ritka a magas jövedelmű régiókban sem [6]. Mivel a C-vitamin felszívódása az emésztőrendszerben körülbelül 80%-os egy napi például 100 mg-os bevitel mellett, a C-vitaminban gazdag étrend kiemelten fontos még akkor is, ha az emberi szervezet nem tud 2,5 g-nál többet felvenni/raktározni (a részleges oxidációja miatt két metabolitát: az aktív dehidro-aszkorbinsavvá és az inaktív oxálsavvá) [4, 7].

A C-vitamin fő természetes forrásai a gyümölcsök (például bogyók, papaja, kivi, citrusfélék, őszibarack, alma vagy körte), zöldségek (például kelbimbó, karfiol, káposzta vagy édes paprika), egyes fűszernövények (például petrezselyem vagy sóska) és a leveik. Mindez beépíthető egy gyors ütemű életmódba [1, 4].

Egyes környezeti tényezők, mint például a levegőnek, fénynek vagy hőnek való kitettség, nem megfelelő tárolási körülmények vagy különféle élelmiszer-feldolgozási eljárások csökkenthetik e termékek AS-tartalmát [5, 8]. Ezért a piac ma-

napság számos C-vitaminnal dúsított gyümölcsitalokat és/vagy kiegészítőket kínál [9, 10]. Az aszkorbinsavat az élelmiszer-kémia E300 élelmiszer-adalékanyagként azonosítja, és gyakran használják tartósítószerként és/vagy antioxidánsként is.

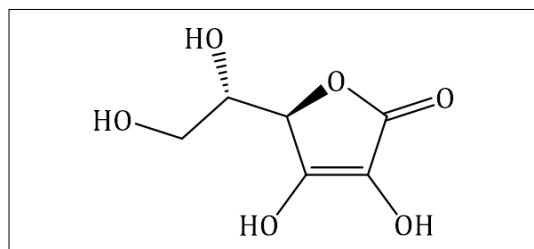
Emiatt ezeknek az aszkorbinsavforrásoknak a tápanyag- és bioaktív tartalmáról való pontos információ elengedhetetlen az egészségügyi előnyök megértéséhez. Ennek eredményeként bőséges tudományos irodalom áll rendelkezésre, amely részletes információkat tartalmaz a természetes és szintetikus C-vitamin-források teljes AS-tartalmának kimutatására és értékelésére szolgáló módszerekről.

1.2. Az aszkorbinsav-tartalom meghatározásának módszerei

A C-vitamin, az aszkorbinsav biológiailag aktív L-enantiomerjének szerkezeti képlete az 1. ábrán látható. Tartalmát különböző mintákban általában mint összeszkorbinsav-koncentrációt fejezik ki. Ez az L és D enantiomerek racém keverékének felel meg.

Számos módszert javasoltak a teljes AS-tartalom mennyiségi meghatározására. A klasszikus és olcsó megközelítés az oxidáló oldatokkal történő titráción alapul. Más technikák közé tartoznak a színreakciók (például 2,6-diklór-fenol-indofenollal), az UV-VIS spektrofotometria, a nagy teljesítményű folyadékkromatográfia, a kapilláris elektroforézis, a kemilumineszcencia, a fluorimetria, amperometria és különböző enzimatiszus módszerek, mindegyik a maga előnyeivel és hátrányaival [1, 11, 12, 13].

A titrimetriás módszerek egyszerűségük, költséghatékonyságuk és gyorsaságuk miatt előnyösek nagyszámú minta elemzésére. Színes minták esetén azonban a végpontérzékelés nehézkes lehet. A nagy teljesítményű folyadékkromatográfia a legpontosabb módszer az aszkorbinsav mennyiségi meghatározására, de magasan képzett laboratóriumi szakértelmet és költséges beren-



1. ábra. A C-vitamin szerkezeti képlete

dezéseket igényel. Az elektroforézis és a kemilumineszcencia viszonylag olcsóbb alternatívák, de érzékenységük kisebb. A fluorimetria és voltammetria gyors eredményeket ad, ugyanakkor speciális műszerezést és precíz kalibrálást igényel [1, 14].

A felsorolt eljárások közül a legegyszerűbb és legköltséghatékonyabb a titrálás. Egyszerre precíz és pontos, mivel olyan eredményeket hoz létre, amelyek összehasonlíthatók a kifinomultabb spektrofotometriai és kromatográfiás módszerekkel. Ha automatikusan és/vagy friss mintákon hajtjuk végre, a mintákban lévő aszkorbinsav levegő által indukált oxidációja elkerülhető, vagy legalábbis minimalizálható [10].

Az AS-tartalom gyakran összefügg egy bizonyos élelmiszermenta antioxidáns-kapacitásával. Mivel az AS redukálószer, reagálhat mindenféle oxidáló anyaggal vagy szabadgyökökkel [15]. Az élelmiszeriparban a 2,2'-azino-bis(3-etil-benzotiazolin-6-szulfonsavat) – rövidítve ABTS – használják a leggyakrabban a különböző termékek antioxidáns-kapacitásának felmérésére.

A jelen dolgozat egyik célja a romániai piacon jelen lévő különféle italok összeszkorbinsav-tartalmának meghatározása volt. Ezek a következő kategóriákba tartoztak: hidegen sajtolt és cukorral tartósított szirupok, frissen facsart gyümölcslevek, szénsavas üdítőitalok, pasztőrözött gyümölcslevek, alkoholos italok. Néhány méz- és olajmintát is figyelembe vettünk.

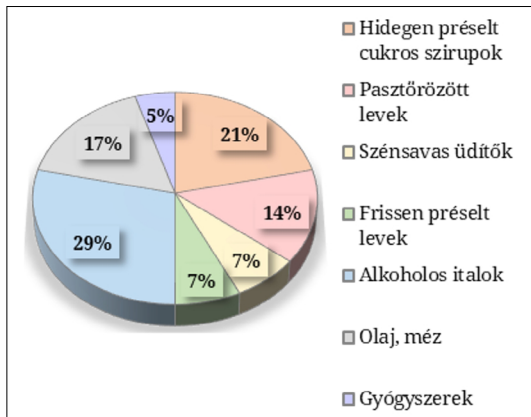
További célunk volt ezen termékek összantioxidáns-tartalmának kifejezése, valamint az AS-koncentrációjukkal való összefüggés meghatározása.

2. Kísérleti eljárások leírása

2.1. Vegyszerek, berendezések és minták

Kereskedelmi forrásból (Merck KGaA, Darmstadt, Németország) származó analitikai tisztaságú vegyszereket használtunk. Ionmentesített vízzel (HydroPure 300, MultiLab, Bukarest, Románia) a következő oldatokat állítottuk elő: 10^{-3} mol/L ABTS, 10^{-2} mol/L $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, 10^{-2} mol/L KI, 1.05×10^{-2} mol/L KIO_3 , 0.5 mol/L HCl, 4.73×10^{-3} mol/L I_2/KI , illetve 2%-os keményítőt. Minden egyes kísérletsorozat előtt frissen készítettük a különböző koncentrációjú aszkorbinsav, valamint a nátrium-tioszulfát oldatokat.

A kísérletek során szabványos laboratóriumi üvegedényeket és eszközöket (Labbox, Labware, Bukarest, Románia) használtunk: poharakat, lombikokat, Schelbach-vonalas bürettákat, illetve állítható térfogatú mikropipettákat. Egy KERN



2. ábra. A vizsgált élelmiszerminták csoportjai

laboratóriumi mérleget (SC. Driatheli Group SRL, Kern, Győröd, Románia hivatalos partnere) és egy VIS V-1100, egycsatornás spektrofotométert (DLAB, AMEX-lab, Bukarest, Románia) is alkalmaztunk. Ez utóbbit egy dedikált szoftverrel (M.Wave Professional) működtettük. A fotometriai méréseket egy 1 cm-es optikai üvegküvetében végeztük. A kapott adatok statisztikai feldolgozása a Microsoft Office Excel dedikált eszközeivel történt.

Összesen 41 élelmiszermintát vizsgáltunk meg. Ezek 5 kategóriába sorolhatók, ahogyan azt a 2. ábra is szemlélteti. A minták a román piacról, kereskedelmi és egyéni termelőktől kerültek begyűjtésre. 9 db hidegen sajtolt gyümölcszörp (tartósításhoz hozzáadott cukorral), 6 db pasztőrözött zöldség- vagy gyümölcslé, 3 db szénsavas üdítő, 3 db frissen facsart gyümölcslé, 11 db alkoholos ital, 5 db hidegen sajtolt olaj, ill. kétféle méz minta lett elemezve.

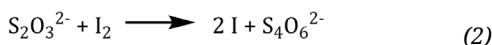
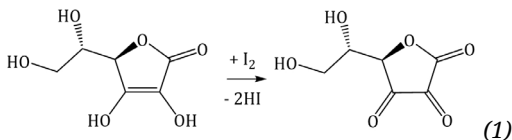
Az alkalmazott módszerek validálására két, standardizált és ismert aszkorbinsav-tartalmú, kereskedelmi forgalomban kapható gyógyszerkészítményt használtunk: Aspirin Plus C (240 mg AS-tartalom) és Redoxon (1000 mg AS-tartalom) pezsgőtablettát, mindkettőt a Bayer Bitterfeld GmbH-tól (Greppin, Németország).

2.2. Kísérleti módszerek

Az összeszkorbinsav-tartalom meghatározása titrimetriás módszerrel történt. Ezek az aszkorbinsav jóddal dehidroaszkorbinsavvá történő oxidációján alapulnak – lásd az (1)-es reakciót. A jóddal (I_2) közvetlenül hozzáadható a mintákhoz – „1. Jodometria” vagy in situ előállítható savas közegben, a jodid/jodát (I^-/IO_3^-) redoxpár segítségével –, lásd a (3)-as reakciót, a „2. Jodometria” esetén.

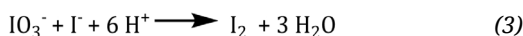
Az összantioxidáns-aktivitás meghatározása azon alapul, hogy a mintában lévő antioxidánsok képesek-e reagálni a zöldeskék ABTS-sel (szinteleníteni a vizsgált mintát). Ennek a folyamatnak a mértéke fotometriásan lett követve, 735 nm hullámhosszon.

2.2.1. Az aszszaskorbinsav-tartalom titrimetriás meghatározása



1. Jodometria: Az eljárás a folyékony mintához jódfelesleg hozzáadásával kezdődik. Az I_2 -felesleg miatt a minta megőrzi a jód jellegzetes barnás színét. A mintában jelenlévő aszskorbinsav a jódot jodiddá redukálja. A maradék jódot nátrium-tioszulfáttal (vissza)titráljuk keményítő jelenlétében – lásd a (2)-es reakciót [14, 15]. A titrálás során a minta halványásárgává, majd néhány csepp keményítő hozzáadásával kékes-indigóvá válik. A végpontot akkor érjük el, amikor a minta visszanyeri eredeti színét, vagy szintelenné válik (például szintetikus AS szintelen oldatok esetén). Ennek a módszernek az az előnye, hogy a minta teljes aszskorbinsav-mennyiségét a kívánt módon (jóddal) sikerül oxidálni, nem pedig más reakcióutakon (például a levegőből a folyékony mintába oldott oxigén által). Ráadásul a módszer rendkívül egyszerű és költséghatékony.

2. Jodometria: Egy másik titrimetriás módszer in situ jódtermelést foglal magában. A folyékony mintához kálium-jodidot (KI), sósavat (HCl) és keményítőt adunk. Továbbá kálium-jodáttal (KIO_3) titráljuk. Ez a (3)-as reakciónak megfelelően jódot (I_2) hoz létre, amely azonnal reagál a mintában lévő AS-val – lásd az (1)-es reakciót. Amíg az AS jelen van, a minta színe változatlan marad. A végpontot akkor érjük el, amikor az összes AS elfogy, a I_2 felhalmozódik, és ezáltal megváltozik a minta színe (például szintelenről sötétkékre). Mivel a titrálás előrehaladása során jód keletkezik, az (1)-es reakció az AS oldott oxigén oxidációjával versenghet. Ez befolyásolhatja az eredményeket [7, 14].



A különféle italokat és az olajokat 5 és 50 ml közötti térfogatú mintákban elemeztük. A méz

esetében 2 g-ot 10 ml vízben oldottunk fel, és a kapott oldatot vetettük alá vizsgálásnak. A gyógyszer-pezsőtablettákat 250 ml-es mérőlombikban vízben oldottuk, és a kapott oldatot titráltuk. Minden titrálást hármas ismétlésben végeztünk el.

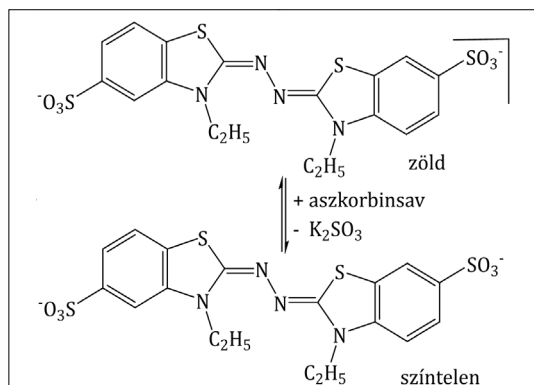
Az eredményszámítás a minta és a titráló térfogatát, valamint a használt oldatok koncentrációját vette figyelembe. Az eredményeket mg/L aszskorbinsavban fejeztük ki, kivéve a mézet, ahol mg/100g termékben adtuk meg.

2.2.2. Az összantioxidáns-aktivitás fotometriai meghatározása

A 2,2'-azino-bisz (3-etil-benzotiazolin-6-szulfon-sav), röviden ABTS, egy vízben jól oldódó vegyület [16]. Zöldeskék színű, és az abszorbancia maximuma 735 nm-nél mutatkozik (lásd a 8. ábrát). A mintához adva egy része reakcióba lép ennek redukáló anyagaival ([17, 18]), és a minta színintenzitásának értéke (abszorbanciája) csökkenni fog. Az abszorbanciák különbsége egy kalibrációs egyenlet segítségével korrelálható az összantioxidáns-aktivitással. Az itt bemutatott esetben a kalibrálást úgy végeztük el, hogy azonos mennyiségű ABTS-t reagáltatunk különböző mennyiségű AS-val, a 3. ábrán bemutatott reakcióséma szerint.

A módszer frissen készített/hígított aszskorbinsav-oldatokat, valamint az alkalmazott folyékony élelmiszerminták többszörös és akár 5000-szeres hígítását igényelte.

A kalibrálást és a minták elemzését hármas ismétlésben végeztünk. Az eredmények számítása figyelembe vette a minta térfogatát, a hígítási együtthatókat, valamint a 735 nm-es abszorbanciakülönbségeket az aszskorbinsav-koncentráció függvényében. Az eredményeket mg/L ekvivalens aszskorbinsav-tartalomban adtuk meg.



3. ábra. Az ABTS-gyök és az aszskorbinsav közötti reakció vázlata [19]

3. Az eredmények kiértékelése

3.1. Az ekvivalenciapont meghatározása a titrimetriás módszereknél

Mindkét alkalmazott jodometriás módszerben a végpont (ekvivalenciapont) meghatározása színváltozásokon alapul. Ha szintelen mintát vagy szintetikus AS-oldatot használunk, az „1. Jodometria” esetében az indigókékéről a szintelenre való átállás figyelhető meg. A 4. ábra szemlélteti a színváltozások sorrendjét egy vizes jóddal (A) tioszulfáttal végzett klasszikus titrálás során. Először sárgává válik (B); néhány csepp keményítő hozzáadása után a szín mélykékre változik (C); majd a titrálás befejeztével szintelenné válik (D).

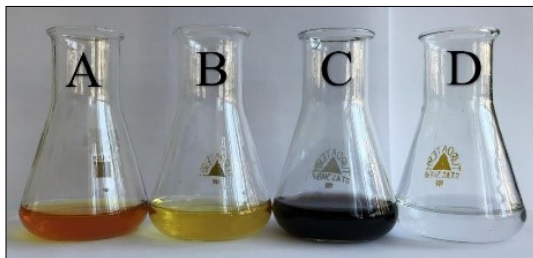
Másrészt, a színes folyékony állagú élelmiszer-minták (például gyümölcslevek) elemzése a végpont helyes kimutatásához színösszehasonlítást igényel a minta eredeti színével. Az 5. ábra a 4. ábrához hasonló sorozatot mutat be, de egy vöröses céklalé esetében (B). Jóddal (A) és keményítővel keverve, intenzív sötét színeket hoz létre, mint a (C) és (D) lombikokban. A titrálás végpontját (E) akkor érjük el, amikor a céklalé eredeti színét (B) megkapjuk.

A „2. Jodometria” esetében a szintetikus AS-oldat szintelenről mélykékre változik, amikor a KIO_3 -titrálásnál a végpontot elérjük. A módszer jól működik szintelen vagy világos színű minták esetén. Viszont a vörös, kék vagy intenzív színű élelmiszer-minták esetében a végpontfelismerés nehéznek bizonyul, mivel semmi vagy csak csekély színváltozás észlelhető.

A 6. ábra egy házi készítésű vörösbortitrálására vonatkozó kísérletet szemlélteti. Nyilvánvaló, hogy maga a minta (baloldalt) majdnem ugyanolyan színű, mint a titrálás végpontjánál kapott szín (jobbaldalt). A módszer másik hátránya, hogy bár ezeket a titrálásokat savas közegben végeztük, a megfelelő kémiai reakciók meglehetősen lassúak, ezért a színfejlődés szobahőmérsékleten néha akár 8 percig is tart.

Ennek eredményeként az „1. Jodometria” megbízhatóbb és reprodukálhatóbb eredményeket szolgál. Mindazonáltal mindkét megközelítést két, ismert AS-tartalmú kereskedelmi gyógyszerészeti termékkel teszteltük. Az eredményeket az 1. táblázat foglalja össze.

Az eltérések kis értékei azt igazolják, hogy mindkét titrimetriás módszer precíz adatokat generál, de a „2. Jodometria” és a Redoxon tabletta esetében nem feltétlenül pontosakat (valószínűleg a Redoxon intenzív narancssárga színe okozta a hibás végpontdetektálást).



4. ábra. Végpontérzékelés. Színváltoztatási sorrend a jódtioszulfáttal való titrálásánál – „1. Jodometria”



5. ábra. Végpontérzékelés. Színváltoztatási sorrend jódtioszulfáttal történő visszatitrálásához vöröses színű céklalében – „1. Jodometria”



6. ábra. Végpontérzékelés. A házi készítésű eredeti vörösbormintának (baloldalt) és a titrált megfelelőjének (jobbaldalt) hasonló színeinek bemutatása – „2. Jodometria”

1. táblázat. Az alkalmazott kísérleti módszerek validálása során kapott értékek.

Módszer	Redoxon	Aspirin Plus C
	Visszakapott (%)	
1. Jodometria	99.99 ± 0.73	99.43 ± 3.53
2. Jodometria	74.71 ± 0.33	99.00 ± 0.00
Fotometria	113.97 ± 32.56	96.69 ± 14.11

Az Aspirin Plus C tabletta szintelen vizes oldatot hoz létre, így a helyes végpont kimutatásának nincs akadálya.

Ezzel szemben az „1. Jodometria” mindkét vizsgált terméknel nagyon jó értékeket mutatott, pontosnak és precíznek bizonyult. Emiatt választottuk az összasszorbinsav-tartalom meghatározására mindegyik figyelembe vett minta esetén.

3.2. A vizsgált minták összeszorbinsav-tartalma

A 2.1. pontban bemutatott 41 élelmiszer minta összeszorbinsav-tartalmát a 2.2.1. pontban leírt „1. Jodometria” módszer segítségével határoztuk meg. Az eredményeket a **7. ábra** mutatja be mg/L-ben kifejezve (C_{AA} -értékek). Minden szín a minták egy bizonyos osztályának felel meg.

A frissen facsart gyümölcslevek (IV) a legmagasabb aszorbinsav-tartalommal rendelkeznek, körülbelül 500 mg/L-rel. Ez összhangban van az irodalmi adatokkal, amelyek szerint a narancslé a tárolás során megőrzi bioaktív vegyületeit. A friss narancslé C-vitamin-tartalma a megfelelő, modern ipari feldolgozási technikáknak köszönhetően a kereskedelmi forgalomban lévőkéhez hasonlítható [8].

A hidegen sajtolt, cukorral tartósított szirupok közül (I. osztály) a málna tartalmazza a legtöbb AS-t. Ezt követi a fenyőbimbó, a fekete ribizli és a homoktövis. A pasztőrözött gyümölcslevek kategórián belül (II) a cékla és az almale bizonyult a legjobbnak. Ezzel szemben a szőlő- és káposztalé kevesebb AS-t mutat, de még mindig hasonló az I. mintakategóriával.

A szénsavas üdítőitalokban (III) található AS-t általában a gyártási folyamat során adják hozzá. Például a bodza-citrommal ízesített „Biborfeni” ital címkéjén 200 mg/L AS szerepel. Ennek ellenére a vizsgálat folyamán visszanyert érték ennek körülbelül csak a 65%-a.

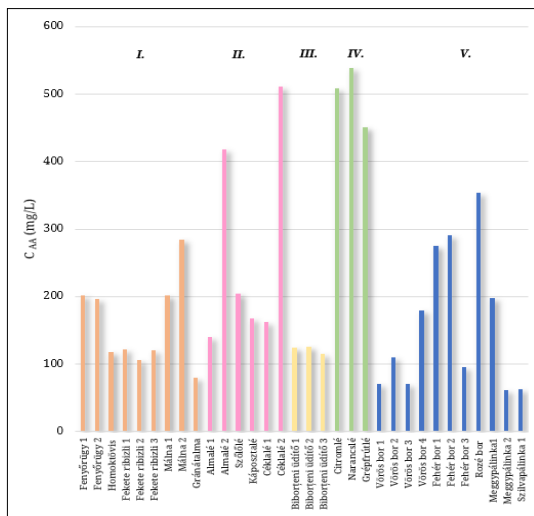
Egyes alkoholos italok (V) AS-ban gazdagabbnak bizonyulnak, mint az I. osztályú gyümölcslevek (például néhány bor, különösen a rozé). Az egyik cseresznyepálinka is magas AS-tartalommal rendelkezik, valószínűleg azért, mert nagyon érett gyümölcsből, hideg alkoholos extrakció által készült. Ezzel szemben a szilvapálinka elkészítése lepárlást igényel; ezért a gyümölcsökben lévő aszorbinsav lebomlik hőkezelés közben.

Hangsúlyozni kell, hogy **7. ábra** adatai pont ezt a mintakészletet jellemzik. Így a C_{AA} -értékek ingadozása, valamint a fordított sorrend is lehetséges, a gyümölcsök és zöldségek fajtájától, betakarítási évszaktól és helyétől függően. Az adatok azonban azt bizonyítják, hogy a frissen facsart gyümölcslevek mellett, a pasztőrözött termékek és a hidegen sajtolt szirupok is értékes C-vitamin-forrást jelentenek a modern emberi táplálkozásban.

Az AS-tartalom meghatározásnak alávetett élelmiszer minták között 5 db hidegsajtoltással nyert olaj is szerepelt. Ezeknél is a „1. Jodometria”-módszer alkalmaztuk a szokásos módon. Emiatt az

eredményeket másként kell értelmezni. Az olajok nem keverednek a vizes reagens oldatokkal. Mégis, mivel az aszorbinsav vízben oldódik, bizonyos mértékig az olajosból a vizes fázisba extrahálódik (a keverékeket 10 percig ultrahanggal is kevertettük). Ennélfogva a **2. táblázat**ban szereplő eredmények az egyes olajminták AS-tartalmának csak részértékeit mutatják be. Mégis, azt bizonyítják, hogy a hidegsajtoltással nyert olajok jó C-vitamin források a táplálkozásban (az értékek hasonlóak vagy magasabbak, mint a **7. ábrán** szereplő legjobb adatok).

A **3. táblázat** kétféle mérre mutatja be az eredményeket: az egyik a hosszabb tárolás miatt már kikristályosodott, a másik friss és folyékony. Vizes oldataikat az „1. Jodometriá”-nak vetettük alá, és a kapott C_{AA} -értékek nem mutattak szignifikáns eltérést. Így a méz még egyéves tárolás alatt is érintetlenül megőrzi C-vitamin tartalmát.



7. ábra. Összeszorbinsav-tartalom: I. hidegen sajtolt cukorral tartósított szirupok; II. pasztőrözött gyümölcslevek; III. szénsavas üdítőitalok; IV. frissen facsart gyümölcslevek; V. alkoholtartalmú italok

2. táblázat. Hidegen sajtolt olajok részleges aszorbinsav-tartalma.

Minta	C_{AA} (mg/L)
Dióolaj	535,6
Mákolaj	667,7
Szőlőmagolaj	858,5
Szezám-magolaj	271,5
Tökmagolaj	584,2

3. táblázat. A mézminták aszkorbinsav-tartalma

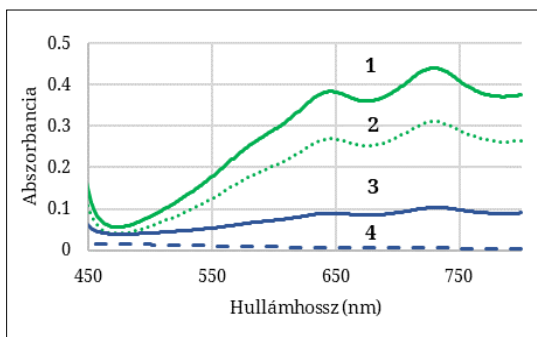
Minta	C _{AA} (mg/100g)
Méz 1 (szilárd, kikristályosodott a hosszú tárolás során)	42,9±18,0
Méz 2 (friss, folyékony)	65,3±11,8

A fenti adatok egybevágnak a helyi gyártmányra vonatkozó egyéb megállapításokkal: a romániai akácméz AS-értéke 77–99 mg/100g [20], az erdélyi vegyes virágméz pedig körülbelül 61 mg/100g AS-t tartalmaz [21]. Egy másik tanulmány megemlíti, hogy a méz aszkorbinsav-tartalma általában $0,34 \pm 0,00$ és $75,8 \pm 0,41$ mg/100 g között van [22]. Így a **3. táblázatban** bemutatott eredmények reálisak, összhangban állnak más közölt adatokkal, és ismét igazolják, hogy a kiválasztott módszer hatékony a különböző élelmiszerminták aszkorbinsav-tartalmának meghatározásában, amennyiben azok vizes oldatban vagy folyékony állagban kivizsgálhatóak.

3.3. A vizsgált minták összantioxidáns-aktivitása

A **8. ábra** szemlélteti az ABTS molekuláris abszorpciaspektrumát vizes oldatban – lásd az 1. görbét. 735 nm-en mutat maximumot. Ezen a hullámhosszon a kísérleti Lambert–Beer-egyenest merekségéből határoztuk meg a 7484 ± 753 L/mol·cm moláris abszortív együtthatót (5 ABTS-koncentráció, hármas ismétlés; korrelációs együttható 0,9945).

$$\Delta A_{735} = (1,57 \pm 1,48) \cdot 10^{-2} + (29642 \pm 2754,18) \cdot [AA] \quad (4)$$



8. ábra. Moláris abszorpciaspektrumok az alábbiakhoz: 1. $5 \cdot 10^{-5}$ mol/L ABTS vizes oldat; 2. az 1. oldat, amely $3 \cdot 10^{-6}$ mol/L AS-t tartalmaz; 3. egy 500-szoros hígítású feketeribizli-szirup, amely $5 \cdot 10^{-5}$ mol/L ABTS-t tartalmaz; 4. egy 500-szorosra hígított feketeribizli-szirup

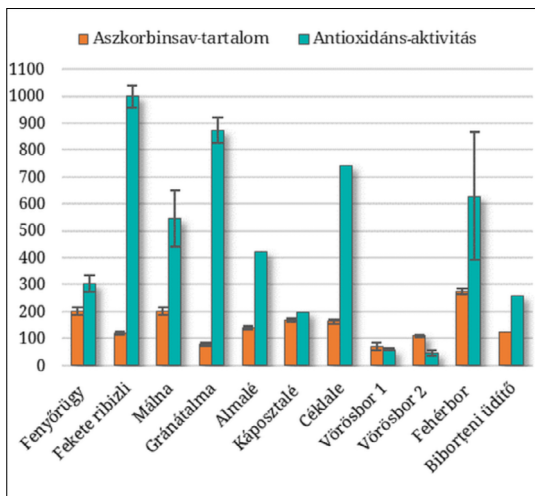
Az 1. görbe $5 \cdot 10^{-5}$ mol/L ABTS-koncentrációnak felel meg, míg a 2. görbe azonos mennyiségű ABTS-t de $3 \cdot 10^{-6}$ mol/L AS-t is tartalmaz. A **3. ábrán** bemutatott reakció miatt sztöchiometrikus mennyiségű ABTS fogy el, és a keverék abszorbanciája csökken. Ezért különböző AS-tartalmak ($7,5 \cdot 10^{-6}$ mol/L-ig) felhasználásával a (4) kalibrációs egyenest olyan eltérésekből kaptuk, mint az 1. és 2. görbe közötti különbség. Ez az összantioxidáns-aktivitást mint egy aszkorbinsav-tartalmat fejezi ki, és mint ilyen, magasabbnak kell lennie, mint a megfelelő minták tiszta AS-tartalma.

A (4) kalibrációs egyenlet korrelációs együtthatója 0,9834, és 7 különböző AS moláris koncentrációval, de állandó $5 \cdot 10^{-5}$ mol/L ABTS-sel, hármas ismétlésű mérési sorozaton alapul.

Folyékony élelmiszerminták esetén ugyanannyi ABTS-t adunk hozzá, és a 735 nm-es abszorbanciaértéket összehasonlítjuk az 1. görbe értékével. A mintákat úgy kell hígítani, hogy spektrumaik az 1. görbe spektruma alatt legyenek. A **8. ábrán** a 3. görbe ennek az eljárásnak a példáját mutatja, 500-szoros hígítású feketeribizli-szirupra. Az antioxidáns-kapacitást ezután az 1. és 3. görbe közötti abszorbancia-különbségekből (ΔA_{735}) fejezzük ki a (4) egyenlet segítségével. A feketeribizli-szirup azonos hígítása bizonyítottan elhanyagolható abszorbanciaértékekkel rendelkezik – lásd a 4. görbét. Így a 3. görbe, hasonlóan a 2. görbéhez, csak az el nem reagált ABTS-tartalomnak köszönhető.

Ezt a módszert a Redoxon és Aspirin Plus C tabletták vizes oldatainál is alkalmaztuk. Az eredményeket az **1. táblázat** utolsó sorában mutatjuk be. Az AS jó visszanyerési értéke az Aspirin Plus C esetében összhangban van azzal a ténnyel, hogy egyetlen antioxidáns-fajtája az aszkorbinsav. Ezel szemben a Redoxon tabletták esetében a visszanyerések meghaladták a 100%-ot. Ez a megállapítás összhangban van az irodalmi adatokkal [23], és valószínűleg annak köszönhető, hogy a készítményben más antioxidánsfajok is jelen vannak.

A **9. ábra** zöldeskék színnel szemlélteti az ilyen meghatározások eredményeit, mg/L AS-ban kifejezve, a 2.1. szakaszban leírt minták közül 11 véletlenszerűen kiválasztott italra. Megfigyelhető, hogy a feltételezéseknek megfelelően az összantioxidáns-aktivitás általában magasabb, mint a narancssárga színnel ábrázolt aszkorbinsav-tartalom. Tehát nem egyszerűen az AS-nek köszönhető, ami tovább bizonyítja, hogy az ilyen italok értékes tápanyagforrások lehetnek. A gyümölcsök és zöldségek, amelyekből készülnek, különféle flavonoidokat és antocianinokat tartalmaznak,



9. ábra. Összehasonlítás az összeszkorbinsav-tartalom és az antioxidáns-aktivitás között. Mindkettőt mg/L AS-ban fejeztük ki

amelyek a kívánt antioxidáns-tulajdonságokkal rendelkeznek.

A 9. ábrán látható eredmények a megfelelő hibasávokkal együtt láthatók. Nyilvánvaló, hogy az alkalmazott titrimetriás módszer precíz, pontos és reprodukálható, mivel a három különböző mérésen alapuló relatív szórás- (RSD) értékek 0,66% és 9,89% között mozognak. Ezzel szemben az antioxidáns-aktivitási RSD-értékek gyengébbek, 10,51% és 37,88% között mozognak. Ez az alacsonyabb pontosság vagy a több egymást követő, de szükséges hígítási lépés során bekövetkező hiba terjedésének, vagy egyes minták színének köszönhető. Az utóbbi nullától eltérő abszorbanciát jelent 735 nm hullámhosszon.

4. Következtetések

A modern élet gyors ütemében a könnyű és élvezhető C-vitamin-bevitel nagy jelentőséggel bír az emberi táplálkozás szempontjából. Ezért a gyors, megbízható és költséghatékony meghatározása mindenféle élelmiszermintából folyamatos kihívást jelent.

A jelen dolgozatban összesen 41 élelmiszermin-tán, főként könnyen fogyasztható italokon végez-tünk összeszkorbinsav-tartalom meghatározást. Két egyszerű és költséghatékony titrimetriás módszert alkalmaztunk, mindkettő az AS jóddal történő oxidációján alapult. A kezelt minta I₂-feleslegének visszatitrálását alkalmazó módszer bizonyult megbízhatónak és reprodukálhatónak, könnyű ekvivalenciapont felismeréssel. Az eredmények megegyeztek más jelentésekkel, például

a frissen facsart narancslére vagy a mézre vonatkozókkal. A különböző hidegen sajtolt olajoknál csak részleges eredményeket lehetett elérni, de ezek magas tápértéke még így is bebizonyosodott.

Egyes italok esetében az aszkorbinsav-tartalom-ban kifejezett összantioxidáns-aktivitást egyszerű fotometriás módszerrel határoztuk meg. Ha nem is olyan precízen, mint a fent említett titrimetriás technika, az eljárás jó eredményeket mutatott, és ismét igazolta egyes elemzett termékek tápértékét.

Mindkét kísérleti technikát 2, kereskedelmi for-galomban kapható, ismert aszkorbinsav-koncent-rációjú gyógyszerkészítmény jó AS-visszanyerési arányával igazoltuk.

Köszönetnyilvánítás

Jelen munka az Erdélyi Múzeum-Egyesület (Kolozs-vár, Románia) anyagi támogatásával valósult meg, a 433.6/2021 számú külső kutatási projekt keretében.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] López-Pastor J. A., Martínez-Sánchez A., Aznar-Poveda J., García-Sánchez A.-J., García-Haro J., Aguayo E.: *Quick and Cost-Effective Estimation of Vitamin C in Multifruit Juices Using Voltammetric Methods*. Sensors, 20. (2020) 676. <https://doi.org/10.3390/nano12040645>.
- [2] Lovander M. D., Lyon J. D., Parr D. L., Wang J., Parke B., Leddy J.: *Review—Electrochemical Properties of 13 Vitamins: A Critical Review and Assessment*. Journal of The Electrochemical Society, 165. (2018) (2) G18-G49. <https://doi.org/10.1149/2.1441704jes>
- [3] Carr A. C., Maggini S.: *Vitamin C and Immune Function*. Nutrients, 9. (2017) 1211. <https://doi.org/10.3390/nu9111211>
- [4] EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies): *Scientific Opinion on Dietary Reference Values for vitamin C*. EFSA Journal, 11. (2013) 3418. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2013.3418>
- [5] Feszterová M., Mišiakova M., Kowalska M.: *Bioactive Vitamin C Content from Natural Selected Fruit Juices*. Applied Sciences, 13. (2023) 3624. <https://doi.org/10.3390/app13063624>
- [6] Rowe S., Car A. C.: *Global Vitamin C Status and Prevalence of Deficiency: A Cause for Concern?* Nutrients, 12. (2020) 2008. <https://doi.org/10.3390/nu12072008>
- [7] Trifunski S.; Zugravu C. A.; Munteanu M. F.; Borcan F.; Pogurschi E. N.: *Determination of the Ascorbic Acid Content and the Antioxidant Activity of Different Varieties of Vegetables Consumed in Romania, from Farmers and Supermarkets*. Sustainability, 14. (2022) 13749. <https://doi.org/10.3390/su142113749>

- [8] Salara F. J., Sánchez-Bravo P., Menac P., Cámara M., García-Viguera C.: *Comparison of Vitamin C and Flavanones between Freshly Squeezed Orange Juices and Commercial 100% Orange Juices from Four European Countries*. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 75. (2024) 255–263.
<https://doi.org/10.1080/09637486.2024.2303034>
- [9] Cendrowski A., Królak M., Kalisz S.: *Polyphe-nols, L-Ascorbic Acid, and Antioxidant Activity in Wines from Rose Fruits (Rosa Rugosa)*. Molecules, 26. (2021) 25–61.
<https://doi.org/10.3390/molecules26092561>
- [10] Tantray A.K., Dar S.A., Ahmad S., Bhat S.A.: *Spectrophotometric and Titrimetric Analysis of Phytoascorbate*. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 6. (2017) 27–31.
- [11] Balogh T., Szarka A.: *A Comparative Study: Methods for the Determination of Ascorbic Acid in Small and Middle Sized Food Analytic Laboratories*. Acta Alimentaria, 45. (2016) 354–362.
<https://doi.org/10.1556/aalim.2015.0017>
- [12] Xu H., Cai Q., Nie Q., Qiao Z., Liu S., Li Z.: *Ultra-sensitive Determination of Ascorbic Acid by Using Cobalt Oxyhydroxide Nanosheets to Enhance the Chemiluminescence of the Luminol-H₂O₂ System*. Royal Society of Chemistry Advances, 8. (2018) 23720–23726.
<https://doi.org/10.1039/C8RA03528H>
- [13] Skrovankova S., Mlcek J., Sochor J., Baron M., Kynicky J., Jurikova T.: *Determination of Ascorbic Acid by Electrochemical Techniques and Other Methods*. International Journal of Electrochemical Science, 10. (2015) 2421–2431.
[https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)04857-5](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)04857-5)
- [14] Sharaa I. E., Mussa S. B.: *Determination of Vitamin C (Ascorbic Acid) Contents in Vegetable Samples by UV-Spectrophotometry and Redox Titration Methods and Estimation the Effect of Time, Cooking and Frozen on Ascorbic Acid Contents*. International Journal of Progressive Sciences and Technologies, 15. (2019) 281–293.
<https://doi.org/10.52155/ijpsat.v15.2.1144>
- [15] Griffiths H. R.: *Antioxidants: Characterization and Analysis, Encyclopedia of Food and Health*. Elsevier, Amsterdam, 2016. 221–226.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00037-4>
- [16] Alija D., Ziberi E., Xhabiri G., Idrizi X., Durmishii N., Ferati I.: *Control of Vitamin C (Ascorbic Acid) in Non-Alcoholic and Fresh Drinks*. In: UBT International Conference, Lambert Academic Publishing, Mauritius, 2017. 157.
<https://doi.org/10.33107/ubt-ic.2017.157>
- [17] Oroian M., Escriche I.: *Antioxidants: Characterization, Natural Sources, Extraction and Analysis*. Food Research International, 74. (2015) 10–36.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.04.018>
- [18] Dong J.-W., Cai L., Xing Y., Yu J., Ding Z.-T., *Re-Evaluation of ABTS•+ Assay for Total Antioxidant Capacity of Natural Products*. Natural Product Communications, 10. (2015) 2169–2172.
<https://doi.org/10.1177/1934578X1501001239>
- [19] Kumar S., Krishna Chaitanya R., Preedy V. R.: *Assessment of Antioxidant Potential of Dietary Components*. In: HIV/AIDS: Oxidative Stress and Dietary Antioxidants (Szerk.: Preedy V. R., Watson R. R.). Elsevier, London, 2017. 239–225.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809853-0.00020-1>
- [20] Al-Mosa A., Brima E. I., Fawy K. F., Ghrama H. A. A., Mohammed M. E. A.: *Antioxidant Vitamins in Honey Samples from Different Floral Origins and Altitudes in Asir Region at the South-Western Part of Saudi Arabia*. Current Nutrition & Food Science, 15. (2019) 296–304.
<https://doi.org/10.2174/1573401314666180606085841>
- [21] Dobrinás S., Matei N., Soceanu A., Birghila S., Popescu V.: *Estimation of Vitamin C and Cd, Cu, Pb Content in Honey and Propolis*. Scientific Study & Research, 7. (2006) 729–734.
- [22] Combarros-Fuertes P., Estevinho L. M., Dias L. G., Castro J. M., Tomás-Barberán F. A., Tornadijo M. E., Fresno-Baro J. M.: *Bioactive Components and Antioxidant and Antibacterial Activities of Different Varieties of Honey: A Screening Prior to Clinical Application*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 67. (2019) 688–698.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b05436>
- [23] Szoke A., Zsebe Z., Turdean G. L., Muresan L. M.: *Composite Electrode Material Based on Electrochemically Reduced Graphene Oxide and Gold Nanoparticles for Electrocatalytic Detection of Ascorbic Acid*. Electrocatalysis, 10. (2019) 573–583.
<https://doi.org/10.1007/s12678-019-00543-4>



ROBOTIKA-TEHETSÉGGONDOZÁS A NYÍREGYHÁZI EGYETEMEN

ROBOTICS TALENT MANAGEMENT AT UNIVERSITY OF NYÍREGYHÁZA

Dezső Gergely

Nyíregyházi Egyetem, Műszaki és Agrártudományi Intézet, Műszaki Alapozó, Fizika és Gépjárműtechnológia Tanszék, Nyíregyháza, Magyarország, dezsو.gergely@nye.hu

Abstract

Both in the economy and in research and development, there is worldwide growing demand for a competent workforce in the field of artificial intelligence and robotics applications. The educational system is developing answers to this need, this development, and the collection and evaluation of the experiences of the applications is a lively field of research. The target groups of the developed educational programs and methods range from kindergarten to university.

This paper presents the opportunities offered by the Hungarian competitions qualifying for the robotics competitions of the international RoboCup Community for primary and secondary school students, and how this is realized at the University of Nyíregyháza. The leagues of the competition and the experiences gained so far are demonstrated.

Keywords: talent management, robotics, RoboCup Junior, STEMIE, A-STEM.

Összefoglalás

A gazdaságban és a kutatásfejlesztésben egyaránt világszerte növekvő igény mutatkozik a mesterséges intelligencia és a robotikai alkalmazások területén kompetens munkaerő iránt. Erre az igényre az oktatási rendszer válaszokat dolgoz ki, amelyek fejlesztése és az alkalmazások tapasztalatainak gyűjtése, rendszerezése intenzív kutatási területet képeznek. A kifejlesztett oktatási programok és módszerek célcsoportjai az óvodáskortól az egyetemig terjednek.

Ez a dolgozat azt mutatja be, hogy milyen lehetőséget kínálnak a nemzetközi RoboCup Közösség robotikaversenyeire minősítő magyarországi megmérettetések az általános és középiskolás tanulók számára, és hogyan valósul meg ez a Nyíregyházi Egyetemen. Szó esik a versenyszámokról és az eddig szerzett tapasztalatokról.

Kulcsszavak: tehetség gondozás, robotika, RoboCup Junior, STEMIE, A-STEM.

1. Bevezetés

A 21. század társadalmában és gazdaságában egyre nagyobb igény mutatkozik a mesterséges intelligencia felhasználásához kapcsolódó kompetenciákkal rendelkező, tehetséges munkaerő iránt. Ezzel együtt a számítógép-programozás és a mesterséges intelligencia-alkalmazások használata gyakran összekapcsolódik a robotikával. Ez az oktatásban is egyre inkább jellemző.

Ez a dolgozat beszámol a Nyíregyházi Egyetemen immár 17 éve megvalósuló robotikaverse-

nyekről, amelyek a résztvevőknek lehetőséget kínálnak arra, hogy a nemzetközi RoboCup közösség versenyein és kiállításain részt vegyenek. Az általános és középiskolás gyerekek csapatai a RoboCup Junior programjába kapcsolódhatnak be.

2. A robotika és az oktatás kapcsolata

A szerző egy korábbi munkájában [1] áttekintést adott a robotika és az oktatás kétféle kapcsolódásáról. Az egyik módja a kapcsolódásnak az, ha a robotika az oktatás tárgya, témája, azaz a tanulók

robotikát tanulnak. A másik kapcsolódás, amikor a robotika az oktatás eszközévé válik. Ebben a tanulmányban az első megközelítésről esik szó.

A szakirodalom külön foglalkozik a korai gyermekkorban levő (óvodáskor) és a K12 (az általános és középiskolás) korosztályhoz tartozó gyermekek oktatásának lehetőségeivel, eredményeivel és kihívásaival.

E. Pollarolo és munkatársai [2] a programozható játékoknak a korai gyermekkorban történő fejlesztésben való alkalmazásáról készítettek összefoglalót. A feldolgozott források alapján kimutatták, hogy az óvodában alkalmazott, programozható játékok nemcsak a számítógépes felhasználói készségeket fejlesztik, hanem a problémamegoldó és kommunikációs készségeket is. Kiemelték, hogy a pedagógusok szaktudása mellett a módszertani felkészültségüknek is igen nagy szerepe van abban, hogy a programozható játékokkal való foglalkozás optimálisan támogassa a gyerekek személyiségének és képességeinek fejlődését. J. Su és Y. Zhong a kisgyermekek számára készített tanterveket vizsgálták [3] a célkitűzések, a tartalom, a módszerek és a pedagógiai értékelés szempontjából. Többek között megemlítik az A14K12 szervezet által javasolt öt nagy témakört, melyek az értékelés, reprezentáció és következtetés, a tanulás, a természeteshez hasonló kapcsolattartás, a társadalmi hatás. Hangsúlyozzák, hogy az oktatási módszerek közül a projektalapú módszert tartják a legalkalmasabbnak a mesterséges intelligencia oktatásához, amelyhez a legtöbb esetben robotokat használnak.

F. Martin és munkatársai [4] azt vizsgálták, hogy a K12 korosztály oktatásában hogy jelenik meg a mesterséges intelligencia. Az alkalmazások a legkülönbözőbb területekre terjednek ki, mint például a tanulói előrehaladás elemzésére és előrejelzésére, a mesterséges intelligencia oktatására szolgáló tananyagok fejlesztésére és bizonyos tantárgyak oktatásának támogatására. A tanulmány rámutat, hogy az oktatásban egyre nagyobb teret kapnak a robotikai alkalmazások is. S. J. Lee és munkatársai [5] szerint a számítógéptudomány oktatására növekvő igény mutatkozik, és ebben alapvető szerepet játszanak a robotok. Az oktatási módszerei és eszközei között említik az elméleti megalapozást, bemutatják az oktatás általános menetét, a valódi és virtuális eszközök szerepét, a számítógéppel és anélkül végzett tevékenységeket, a grafikus és szöveges programozás terén szerzett oktatási tapasztalatokat. S. T. Chu és munkatársai [6] mesterségesintelligencia-alapú robotok alkalmazását vizsgálták az oktatásban.

Kiemelik, hogy a robotoknak lehet tanító szerepe az oktatási folyamatban, vagy megjelenhetnek a tanulók által használt eszközként.

Y. W. Cheng és szerzőtársai [7] a robotokkal szemben az oktatás területén támasztott elvárásokat vizsgálta a szakirodalom-kutatás, szakértőkkel készített interjúk és az oktatóktól kapott beszámolók elemzésének módszereivel. Az alkalmazások és ezekhez kapcsolódó elvárások tizennégy területét azonosították, melyek között a nyelvoktatás, az oktatási robotok és a robotpedagógiai asszisztens voltak a legnépszerűbbek. Azt, hogy milyen az összetettsége, mélysége az alkalmazott mesterséges intelligencián alapuló megoldásoknak, öt szintre osztották. Az első szint az érzékelést, szavak felismerését és egyenes vonalú mozgásokat jelenti. A második szinten megjelenik a problémamegoldás, tervezés, kifejezések értelmezése és a síkmozgások. A harmadik szint esetén alkalmazzák a navigációt, manőverezést, mondatok értelmezését, a testrészek mozgását. A negyedik szint a tanulás, felfedezés, párbeszéd, finommozgások programozását foglalja magába. Az ötödik szinten megvalósul az önértékelés, a beszéd jelentésének felismerése, és a mikromozgások.

G. Nugent és szerzőtársai [8] egy olyan robotikaoktatási program hatékonyságát vizsgálta az Egyesült Államokon belül különböző környezetekben, amelyet a Nebraska–Lincoln Egyetem fejlesztett ki a 9–14 éves korosztály számára. Azt kutatták 5000 diák és 400 pedagógus bevonásával, hogy milyen eredményeket sikerült elérni az oktatási programmal táborokban, klubokban és versenyeken. Kiderült, hogy a műszaki tudást és a programozási készségeket jól fejlesztette a program, a matematikai készségeket viszont lényegében nem erősítette. Lényegesen javultak a tanulók problémamegoldó és hibakereső készségei az ötletszerű próbálgatás szintjétől a szisztematikus, tervszerű tevékenységek irányába. A tanulóknak nem csupán a tudása és készségei javultak, hanem az érdeklődésük is növekedett a műszaki életpálya iránt.

T. Oksanen finnországi kutatócsoportja egy robotverseny tapasztalatait mutatja be 5 éves időszakra vonatkozóan [9].

Megállapítható, hogy a robotika fontos szerepet játszik az oktatásban számos szempontból, melyek közül a legfontosabbak a következők: a kreatív gondolkodás és problémamegoldás fejlesztése, technológiai készségek fejlesztése, együttműködés és a csapatmunka készségeinek fejlesztése, valós életbeli alkalmazások megértése, a motivá-

ció és érdeklődés növelése, a kritikai gondolkodás fejlesztése. A robotika izgalmas és interaktív tevékenység, amely felkelti a diákok érdeklődését a STEM- (Science, Technology, Engineering, Mathematics) területek iránt, és motiválja őket a tanulásra.

Összességében a robotika bevezetése az oktatásba segíthet a diákok széles körű fejlesztésében, felkészítve őket a jövő kihívásaira és lehetőségeire.

3. A RoboCup közösség

A nemzetközi RoboCup Szövetség története 1992-ig nyúlik vissza, amikor Alan Mackworth professzor felvetette a futballozó robotok gondolatát egy közleményében. Ugyanebben az évben tőle függetlenül japán kutatók egy workshopen a mesterséges intelligencia nagy kihívásairól tanácskozva szintén eljutottak a futballjátékhoz. A gondolat továbbfejlesztéséhez egyre több vezető kutató- és fejlesztővállalat csatlakozott. Az 1996-ban egy konferencián megrendezett pre-RoboCup után 1997-ben megvalósult az első hivatalos RoboCup verseny 40 csapat és 5000 néző részvételével Oszakában, Japánban [10]. Ez az esemény nemcsak verseny, hanem nemzetközi tudományos konferencia, kiállítás és tudomány-népszerűsítő esemény, amelyen a világ legjobb fejlesztő csapatai vesznek részt egyetemekről és vállalatoktól. Nem sok idő kellett ahhoz, hogy felvetődjön a fiataloknak meghirdetett RoboCup Junior esemény gondolata, amely első alkalommal 1998-ban, Párizsban valósult meg. A fiatalok és a felnőttek nemzetközi verssenyét azonos időben és helyszínen rendezik meg, így a tanulónak lehetőségük van arra, hogy személyesen találkozzanak a robotika vezető kutatóival, és megtekinthessék az általuk készített megoldásokat.

4. A RoboCup Junior

Amy Eguchi, a RoboCup Szövetség társelnöke, a RoboCup Junior képviselője bemutatja [11] a Ro-

boCup Junior céljait és egy, a versenyzők körében végzett felmérés eredményeit. A RoboCup Junior sajátosságai közül itt hármat emelünk ki. Az első az évről évre megújuló, de azonos célokat tartalmazó versenyfeladat az egyes ligákon belül, ami segíti a tanulókat abban, hogy tudásuk egy jól felépített környezetben fejlődhesen. A második jellemző az oktatás-központúság, ami azt jelenti, hogy a ligák technikai bizottságai intenzív háttérmunkával határozzák meg azt, hogy pontosan miben térjen el egy-egy versenyfeladat az előző évitől. A harmadik az életszerűség, ami a tanulók érdeklődésének és motivációjának erősítését célozza.

A Robocup Junior három fő témája: a menekítés, a futball és a színház. Ezekben belül több úgynevezett liga kerül kiírásra kissé eltérő, különböző kihívást jelentő feltételekkel.

5. Robotikaversenyek a Nyíregyházi Egyetemen

A Nyíregyházi Egyetemen 2006-ban rendeztük meg az első RoboCup Junior versenyt. Abban az évben a magyar csapatok már képviselték Magyarországot a nemzetközi versenyen is, úgy, hogy díjakat is sikerült hazahozniuk. A versenyek kezdeményezője és a magyarországi RoboCup Község kapcsolattartója Simon Béláné dr. Balogh Ágnes főiskolai tanár.

Ezt követően minden évben megrendezésre kerül a Magyar Ifjúsági Robot Kupa, amely a nemzetközi RoboCup Junior versenyek minősítő versenye. Az a csapat jelentkezhetsz a világversenyre, aki a hazai megmérettetésen sikeresen minősítette magát.

Az idő múlásával szükségessé vált az, hogy két részletben rendezzük meg a versenyt. Jelenleg a menekítő ligák külön eseményen zajlanak, a többi liga pedig egy másik rendezvényen.

Az 1. ábra a 2024. évi Magyar Ifjúsági Robot Kupa Nyíregyházi Egyetemen megrendezett versenyének résztvevőit mutatja.



1. ábra. A Magyar Ifjúsági Robot Kupa 2024. évi nyíregyházi versenyének résztvevői

A **2. ábrán** a szimulációs ligák egyikének pillanatképe látható. Itt egy előre adott keretszoftverben futó saját programot kell írni, amelynek segítségével a szimulált robot feladatokat valósít meg.

A **3. ábra** az egyik fociliga mérkőzését mutatja. A Rapidly Manufactured Robot Competition (RMRC) (**4. ábra**) robotjainak egy nehéz terepet utánzó pályán kell végighaladni eközben képzelismerési és manipulációs feladatokat végrehajtani.

A színházligákban (**5. ábra**) a csapatoknak egy olyan színpadi koreográfiát kell bemutatni,

amelyben a robotok a főszereplők, de a bemutató értékét növeli, ha emberekkel is együttműködnek. Itt a díszlet és a művészi megvalósítás is pontot ér.

A menekítő ligák két fő típusának egyike a vonalkövetés feladatára épül (**6. ábra**), a másik típus pályáján nincs vezető vonal, hanem inkább labirintusra hasonlít (**7. ábra**).

Mindegyik ligára érvényes, hogy autonóm robottal kell versenyezni. A versenyszabály megegyezik a nemzetközi szabályokkal a magyarországi versenyen is. A csapatoknak képesnek kell lenni



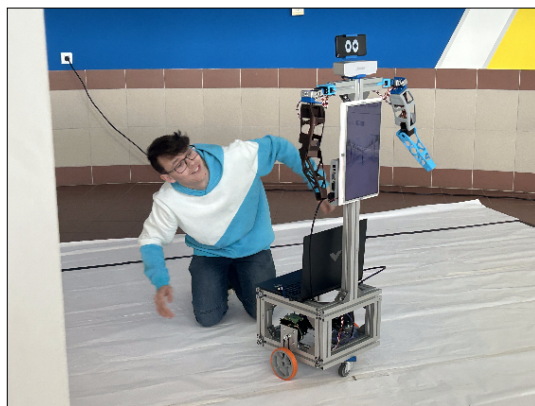
2. ábra. Szimulációs menekítő liga: itt saját programot kell megírni, amely egy keretszoftverben belül fut, adott szabályok alapján, de előre nem ismert pályán kell feladatokat teljesíteni



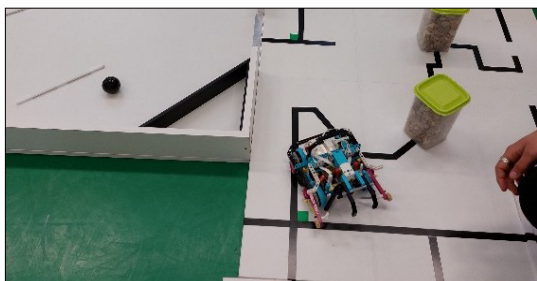
3. ábra. Robotfoci



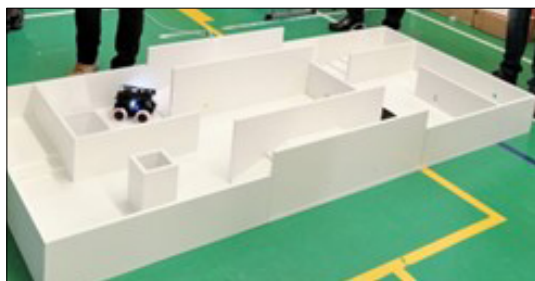
4. ábra. RMRC-liga



5. ábra. Színházliga



6. ábra. Menekítő liga, vonalkövető feladat



7. ábra. Menekítő liga, labirintusfeladat

arra, hogy angol nyelvű prezentációval bemutassák felkészülésük menetét, szakmai tartalmát.

Minden liga szabályzata tartalmazza a kulcsfontosságú mondatot: „Nem az a fontos, hogy milyen helyezést érsz el, hanem az, hogy mennyit tanulsz.”

6. Összefoglalás

A robotikának és mesterséges intelligenciának az oktatásban betöltött többoldalú szerepe napról napra változó és élénken kutatott terület.

A nemzetközi RoboCup Szövetség társszervezete a RoboCup Junior, amely pedagógiai szempontból jól megalapozott, évről évre szisztematikusan változó kihívások elé állítja a fiatalokat.

A Magyar Ifjúsági Robot Kupa a RoboCup Junior nemzetközi események minősítő versenye, amelyet 2006 óta a Nyíregyházi Egyetemen rendezünk meg; jelenleg két helyszínen zajlik az esemény.

Ezen a rendezvényen minden évben lehetőséget kapnak a résztvevők arra, hogy megismerjék a nemzetközi RoboCup Junior kihívásait, és kijutassanak a világversenyre.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunkát a Nyíregyházi Egyetem Tudományos Tanácsa támogatta.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Dezső G.: *Integration of Robotics into Education*. Acta Academiae Nyiregyhaziensis, 7. (2022) 250–255.
- [2] Pollarolo E., Papavaslopoulou S., Granone F., Reikerås E.: *Play with Coding Toys in Early Childhood Education and Care Teachers. Pedagogical Strategies, Views and Impact on Children's Development. A Systematic Literature Review*. Entertainment Computing, 50. (04) 100637. <https://doi.org/10.1016/j.entcom.2024.100637>
- [3] Su J., Zhong Y.: *Artificial Intelligence (AI) in Early Childhood Education: Curriculum Design and Future Directions*. Computers and Education: Artificial Intelligence, 3. (2022) 100072 <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.100072>
- [4] Martin F., Zhuang M., Schaefer D.: *Systematic Review of Research on Artificial Intelligence in K-12 Education (2017–2022)*. Computers and Education: Artificial Intelligence, 6. (2024) 100195. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2023.100195>
- [5] Lee S. J., Francom G. M., Nuatomue J.: *Computer Science Education and K-12 Students' Computational Thinking: A Systematic Review*. International Journal of Educational Research, 114. (2022) 102008. <https://doi.org/10.1016/j.ijer.2022.102008>
- [6] Chu S.-T., Hwang G.-J., TuY.-F.: *Artificial Intelligence-Based Robots in Education: A systematic Review of Selected SSCI publications*. Computers and Education: Artificial Intelligence, 3. (2022) 100091. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.100091>
- [7] Cheng Y.-W., Sun P.-C., Chen N.-S.: *The Essential Applications of Educational Robot: Requirement Analysis from the Perspectives of Experts, Researchers and Instructors*. Computers & Education, 126. (2018) 399–416. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.07.020>
- [8] Nugent G., Barker B., Grandgenett N., Welch G.: *Robotics Camps, Clubs, and Competitions: Results from a US Robotics project*. Robotics and Autonomous Systems, vol. 75. (2016) 686–691. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2015.07.011>
- [9] Oksanen T., Kostamo J., Tamminen P., Tiusanen J.: *Robot Competition as a Teaching and Learning Platform*. IFAC Proceedings Volumes, 44/1. (2011) Art. no. 1. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.03324>
- [10] A Brief History of RoboCup. [Online]. Available: https://www.robocup.org/a_brief_history_of_robocup
- [11] Eguchi A.: *RoboCupJunior for Promoting STEM Education, 21st Century Skills, and Technological Advancement through Robotics Competition*. Robotics and Autonomous Systems, 75. (2016) 692–699. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2015.05.013>



MPA-ANTENNAFORGATÓ RENDSZER KIÉPÍTÉSE INTERFEROMETRIKUS IN SITU MÉRÉSEKHEZ

CONSTRUCTION OF MPA ANTENNA ROTATION SYSTEM FOR INTERFERO-METRIC “IN-SITU” MEASUREMENTS

Diós Szabolcs Sándor,¹ Masuk Abdullah,² Dinya Tamás,³ Szántó Attila,⁴ Pettendi Dávid,⁵
Balajti István⁶

¹ Debreceni Egyetem, Mechatronika Tanszék, Debrecen, Magyarország, dios.szabolcs@eng.unideb.hu

² Debreceni Egyetem, Járműmérnöki Tanszék, Debrecen, Magyarország, masuk@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 Debreceni Egyetem, Gépészmérnöki Tanszék, Debrecen, Magyarország, pettendid4@gmail.com

⁶ Debreceni Egyetem, Mechatronika Tanszék, Debrecen, Magyarország, balajti.istvan@eng.unideb.hu

Abstract

The primary objectives of the project are to build a complex antenna rotation facility that will enable the structure to perform in situ interferometric measurements. The objectives include the construction of a stable frame to support and protect the control electronics, the design and fabrication of a 2.4GHz DTMPA (Dual Triangular Microstrip Patch antenna), and the support of the control electronics with the appropriate software background. The finished structure is capable of tracking the orbit of a satellite of your choice, up to NAP orbit depending on the configuration. The implementation can be divided into four steps. First of all, a sufficiently solid frame was designed and built. From the point of view of the use of materials, LEGO construction toys are the right choice, both in terms of weight and strength. The second step is to design and build the DTMPA. This is followed by the selection and implementation of the appropriate control electronics. The stepper motor must have adequate torque to ensure proper rotational motion, and the motor and microcontroller must provide clear instructions to the motors. Finally, the code responsible for controlling the motors must be written and implemented in the microcontroller so that the structure can be controlled by the appropriate external computer.

Keywords: *Interferometry, DTMPA, antenna performance measurement, microcontroller.*

Összefoglalás

A project elsődleges célja egy olyan komplex antenنافorgató berendezés építése, amely lehetővé teszi a szerkezet in situ interferometrikus mérések elvégzését. A célok közé tartozik egy stabil keret/váz megépítése a vezérlőelektronika védelmére, egy 2,4 GHz-es DTMPA (Dual Triangular Microstrip Patch antenna) tervezése és gyártása, valamint az elektronika szoftveres háttérének kialakítása. A kész szerkezet képes a választott műhold pályájának követésére elvi szinten, vagy a konfigurációtól függően akár NAP-pálya is megadható. A megvalósítás négy lépésre osztható. Először is, egy kellően szilárd váz tervezése és építése. Anyaghasználat tekintetében a LEGO építőelemek a megfelelő választás, mind súly, mind szilárdság szempontjából. A második lépés a DTMPA megtervezése és megépítése. Ezt követi a megfelelő vezérlőelektronika kiválasztása és megvalósítása. A léptetőmotoroknak megfelelő nyomtatékkal kell rendelkeznie a forgómozgás biztosításához, ehhez a motorok vezérléséért felelős kódot is meg kell írni és implementálni a mikrokontrollerbe, hogy a szerkezetet a megfelelő külső számítógép vezérelhesse.

Kulcsszavak: *interferometria, DTMPA, antennateljesítmény-mérés, mikrokontroller.*

1. Bevezetés

A Műszaki Karon a következő években kulcsfontosságúak lesznek a fejlesztések a járművek területén. Kari szinten ilyen irányú kutatások is megkezdődtek az elmúlt években [1–3]. A mesterséges intelligencia területén is történtek előrelépések az edukációs alkalmazásban [4, 5]. A kialakított kiberfizikai rendszerek laboratóriuma biztosított eszközöket a tervezés során, ezzel segítve más kutatások gyorsabb előrehaladását is [6, 7]. A megszabott kutatási iránynak megfelelően készült el ez a dolgozat a járművek radarszenzorainak témakörében.

A kitűzött célok elérése érdekében az eszköz működéséhez, megtervezésére és legyártásra fog kerülni a

DTMPA, valamint számos, az antenna működéséhez elengedhetetlen validációs mérés is végrehajtásra kerül. Az eszköz pozícióváltásáért felelős hardver- és szoftverelemek integrálása, valamint az eszköz összeszerelése után a berendezés képes egy előre kiválasztott műhold vagy a Nap mozgásának követésére elvi szinten.

2. Radarrendszerek

A soron következő projekt komplexitása a mechatronika témakörét is erőteljesen érinti, amelyet az 1960-as évek óta ismernek. Ez a tudományág ötvözi a mechanikát, az elektronikát és a számítástechnikát, lehetővé téve olyan összetett rendszerek létrehozását, mint a robotok, motorok és elektromos járművek [8, 9]. A téma interferometrikus in situ méréseken alapul. Az interferometria azon az elven alapul, hogy szűkebb körben elektromágneses hullámokat

(1. ábra) használnak, majd az általuk létrehozott interferencia jelensége alapján információt nyernek. Az interferometria olyan feladatok elvégzéséhez használt technika, amelyek nagyon nagy mérési pontosságot igényelnek a különböző hullámok, rezgések, hangok, elektromágnesesség vagy a gravitáció tulajdonságának mérésére. Az interferometria leggyakoribb alkalmazási területei a csillagászat, a kvantumfizika, a meteorológia és az oceanográfia [10]. Az iparban elsősorban kis elmozdulások és egyenetlenségek mérésére használják.

3. Követelmények és szempontok

A projekt céljainak elérése érdekében több összehangolt területen is feladatokat kell elvégezni. Kiemelt prioritású a kellően stabil alappal rendelkező váz, amely összetartja az alkatrészeket, és mechanikai védelmet biztosít. Lényeges a megfelelő jellemzőkkel rendelkező DTMPA, valamint az antenna forgását biztosító léptetőmotor és a megfelelő vezérlőelektronika és szoftveres háttér megtervezése és megépítése.

A DTMPA megtervezése előtt irodalomkutatás került elvégzésre.

Az antenna olyan átalakító, amely az elektromágneses hullámokat elektromos energiává alakítja át, és ugyanígy fordítva. Képes adó- és vevőantennaként működni. 1888-ban Heinrich Hertz német fizikus megépítette az első antennákat [12]. James Clerk Maxwell elektromágneses elmélete pedig megerősítést kapott, ami szintén fontos mérőföldkőnek tekinthető [13].

Az elektromágneses mező összetevőinek megértéséhez szükségesek az alábbi képletek (1), (2), (3), és (4) a későbbi alkalmazásukhoz kiemelten fontos a függvényének felírása [14].

$$E(r, \theta, \varphi) = E_1(r_1, \theta, \varphi) + E_2(r_2, \theta, \varphi) + E_3(r_3, \theta, \varphi) + E_4(r_4, \theta, \varphi) \quad (1)$$

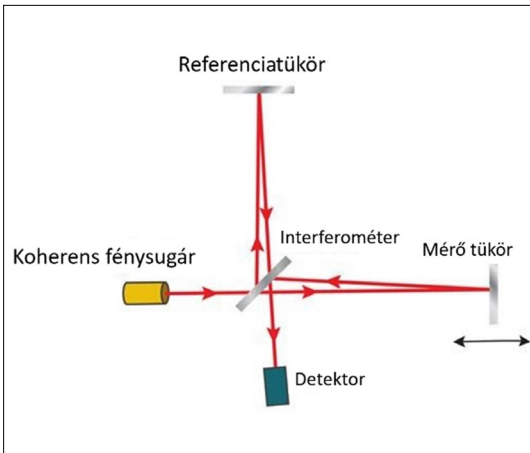
A távoli mezőben a normalizált skalármező egyenlete a következő:

$$E(r, \theta, \varphi) = f(\theta, \varphi) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} - f(\theta, \varphi) \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} + f(\theta, \varphi) \frac{e^{-jkr_3}}{r_3} - f(\theta, \varphi) \frac{e^{-jkr_4}}{r_4} \quad (2)$$

$$E(r, \theta, \varphi) = [e^{+jk\cos\psi_1} - e^{+jk\cos\psi_2} + e^{+jk\cos\psi_3} - e^{+jk\cos\psi_4}] f(\theta, \varphi) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (3),$$

ahol

$$\frac{E}{E_0} = AF(\theta, \varphi) = 2[\cos(ks \sin\theta \cos\varphi) - \cos(ks \sin\theta \sin\varphi)]$$



1. ábra. Az interferometria alapelve [11]

Az „azimutális” panel ($\theta = \pi/2$), valamint a teljes „reflektorrendszer” tömbtényezője a következőképpen redukálódik:

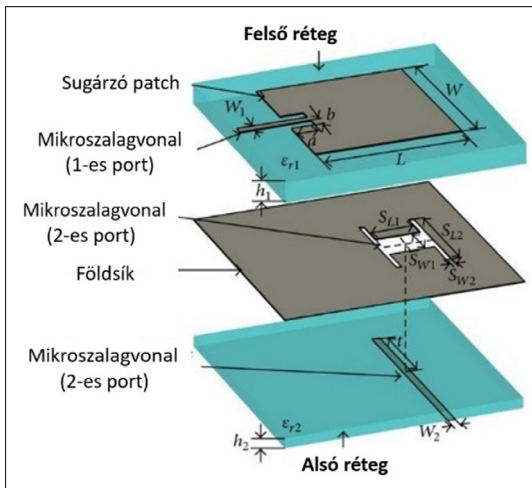
$$\frac{E}{E_0} = AF\left(\theta = \frac{\pi}{2}, \phi\right) = 2[\cos(ks \sin\theta \cos\phi) - \cos(ks \sin\theta \sin\phi)] \quad (5)$$

Az „erősítés” kifejezés egy olyan paraméterre utal, amely azt jelzi, hogy egy antenna sugárzási mintázata mennyire irányított látszólag. Egy kevésbé erősített antenna széles területre sugároz, míg egy nagyobb, részben erősített antenna az elektromágneses hullámok kibocsátása során a teljesítményének nagy részét egy adott irányba irányítja. Zéró hullámszámnál ($k = 0$) és az azimutális szögénél ($\theta = 90^\circ$), az antennák fázisos tömbjének normalizált teljesítményerősítése (G) a következő:

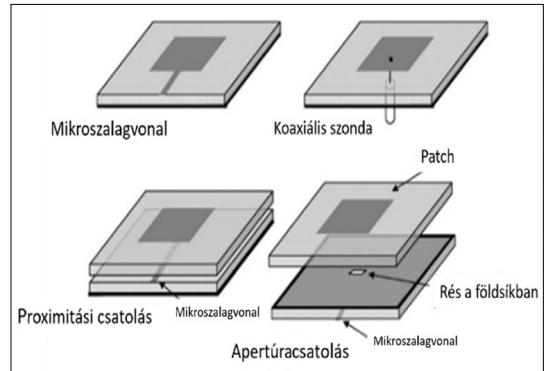
$$G(\theta) = \left| \frac{\sin\left(\frac{Nkd}{2}\right) \cos\theta}{N \sin\left(\frac{kd}{2}\right) \cos\theta} \right|^2 \quad (6)$$

A nagyobb erősítésű antenna nagyobb hatótávolsággal és jobb jelminőséggel rendelkezik, de azt a különböző antennarendszereknek megfelelően kell kialakítani, karbantartani és telepíteni (2. ábra).

A megfelelő antenna kiválasztása után meg kell határozni a projektcéloknak megfelelően az úgynevezett táplálási módszert is. Az MPA-antennák legelterjedtebb típusai a műszaki paramétereik és gyártási költségeik miatt a „monopólus”-, a „dipólus”- és a „hurok”-antennák [16]. A négy legelterjedtebb ilyen táplálási módszer a „mikro-szalagvezeték”, a „koaxiális probe”, a „proximity feed” és az „apertúra-kapcsolt feed” (3. ábra).



2. ábra. A microstrip patch antenna [15]



3. ábra. MPA-táplálási módszerek

Röviden, a „microstrip feed” a leggyorsabb és legegyszerűbb, a „aperture coupling” a legnehezebben gyártható, a „proximity coupling” pedig a legnagyobb sáv szélességgel rendelkezik.

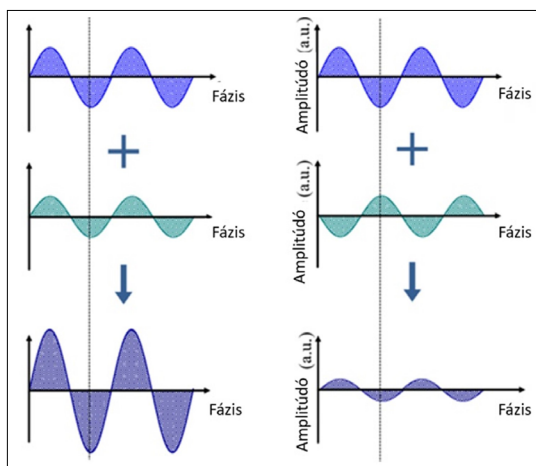
Az irodalmi áttekintés során meg kell ismerni az interferencia jelenségét. A méréseket zavaró interferencia jelenségről akkor beszélhetünk, amikor az antenna által adott sáv szélességben vett jelek más zavaró jelekkel keverednek, pl. zaj, modulált vagy más elektromágneses sugárzásforrás által befolyásolt vagy torzított jelek keverednek [17]. Az interferencia többféleképpen is előfordulhat. Okozhatják közeli antennák, egymással kölcsönhatásban lévő fémtárgyak vagy elektronikus eszközök. Ugyanakkor a természetben előforduló villámok és más, közeli épületek és sziklafalak is okozhatnak visszaverődést. Az interferencia gyakori oka az azonos frekvenciatarományban működő más antennák jelenléte és közelsége. A különböző jelforrásokról vagy rólunk, de a környezetünkben lévő tárgyakról visszavert jelek az első fejezetben leírtak szerint zavarják egymást. Ennek következtében az általunk várt jelerősség csökken, torzul és a jel-zaj interferenciaarány teljes elvesztéshez vezethet. Ezt gyakran elektronikus eszközök, például rádió-televízió adótornyok, elektronikus vezetékek vagy más kommunikációs berendezések és egyéb elektronikus zajforrások okozhatják (4. ábra).

A megfelelő alkatrészek mozgatásához léptetőmotorokra van szükség [18]. Ez a motortípus kefe nélküli kialakítású, más néven BLDC (brushless DC), amely a forgómozgást elektromos impulzusok sorozatával okozza. Működésüket tekintve két részre oszthatók, egy álló (álló rész) és egy forgó (rotor) részre [19]. Kialakítását tekintve lehet állandó mágneses, ahol a forgó rész egy állandó mágnes, valamint változó reluktanciájú, ahol a forgó rész egy lemezelváltó vas, amelyet elektro-

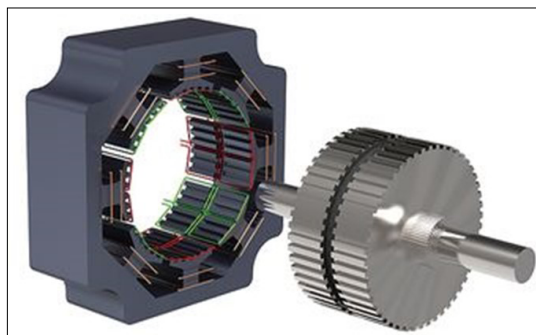
mos áram mágnesez. A hibrid motor e két kialakítás kombinációja [20, 21]. Működési elve a mágneses vonzáson alapul. Mind az álló, mind a forgó részen vannak fogak és hornyok, amelyeken ellentétes mágneses polaritás kialakulása esetén a fog a térben hozzá legközelebb eső, ellentétes polaritású felé mozog, ha a köztük lévő távolság elég kicsi. Ezt nevezzük lépésnek (step), innen a léptetőmotor kifejezés. Ez a meglépés lehet teljes, felfelé ható vagy micro. A hibrid léptetőmotor (5. ábra) esetében a forgórész maga a tengely, két reluktanciátípusú, egymáshoz képest fele-fele fáziseltolású ferromágnessel és egy közöttük lévő, axiális mágnesezesű állandó mágnessel. A forgórész szegmensei ellentétes mágneses pólusokat képviselnek.

4. Elemek

A projekt kész, működő berendezéseinek összeállítását alapos kutatómunka előzte meg. A 6. ábra a berendezés felépítését szemlélteti.



4. ábra. Konstruktív és destruktív interferencia

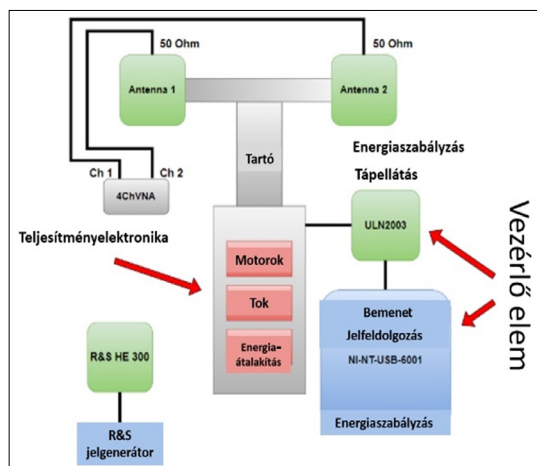


5. ábra. Hibrid léptetőmotor [22]

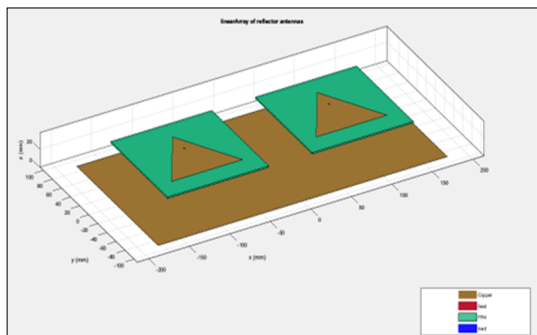
Az antennaoszlop vezérli a további antennákat, és az általa fogadott jeleket a 4ChVNA-készülékbe küldi, ahol az amplitúdó és a fázis helyes mintavételezése, majd feldolgozása történik. Az R&S jelgenerátor feladata a működtető üzemmódban a kívánt jelstruktúrák és szekvenciák előállítása, majd 50 ohmos kábelén keresztül az antennákhoz való továbbítása.

4.1. A DTMPA-antenna

A projekt fontos eleme a kamera tetején található DTMPA. Ennek az antennának a megépítését több tervezési folyamat előzte meg. Ezek közül a legfontosabb az antenna tervezése a MATLAB szimulációs környezetben. A tervezési folyamat során a szoftverbe épített „antenna array designer” segítségével és a kívánt 2,4 GHz-es frekvencia megadásával a szoftver szimulálta a leendő antenna előzetes vázlatát. Ez a vázlat (7. ábra) a megfelelő működés érdekében számos kézi korrekciót igényelt. (pl. anyaghasználat, szubsztrátvastagság).



6. ábra. Antennaforgató rendszer – blokkdiagram



7. ábra. DTMPA-antennavázlat

4.2. A biztosított antennaelemek

A célkitűzések között szerepelt a tervezési folyamatok végeztével, és az eredmények validációját követően az antennaforgató rendszer legyártása bevont ipari partner segítségével. Költséghatékonysági indokok és a fejlesztési ciklus lerövidítése érdekében ez később készül el. Viszont fontos kiemelni, hogy a tanszék több meglévő antennával is rendelkezett, amelyek közül több is megfelelt a projekt céljainak. Ezért saját rendszerünk kivitelezésénél ezen meglévő antennákat használtuk fel. A következőkben ezek dokumentációját és mérési eredményeit az alábbiakban részletezzük.

A felhasznált két antenna fizikai paraméterei megegyeznek. Mindkettő FR4-hordozót használ, amelyen maga a „slot” található. Ezt követi egy légszubsztrátréteg, majd ez alá kerül egy réz alaplemez. A két lemez közötti távolság, azaz a $\lambda/4$ érték mindkét antenna esetében 5,4 cm. Ennek a kétszerese, azaz a $\lambda/2$ érték lesz az a távolság, amelynek a két antenna táplálási pontjai között kell lennie ahhoz, hogy „tömb”-kialakításban lehessen használni. Mindkét antenna az antenna alján található szabványos koaxiális csatlakozón keresztül kapja a tápellátást. A 8. és 9. ábra az „L” sávú antenna néhány mért értékét mutatja, az 1. táblázat pedig az „L” sávú antenna teljesítményének méréseit mutatja különböző frekvenciákon.

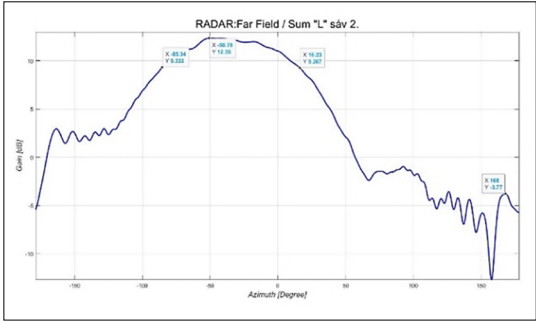
5. Antennateljesítmény-mérés

A projektben használt antennát méréseknek kellett alávetni annak érdekében, hogy bizonyosságot szerezzünk arról, hogy az alkalmas a téma céljainak elérésére. Ebből a célból két mérés történt. Egy egyszerű antennateljesítmény-mérés, valamint egy összetettebb, közeli mezőben végzett antennamérés. A meglévő részonátoros antenna jellemzőit két egymástól független méréssel határoztuk meg. Az első mérést rögzített antenna esetén több különböző pozícióban végeztük a 10. ábra szerinti összeállításban. A méréshez több, különböző mérőeszközt használtunk. Az antennát ellátó ROHDE & SCHWARZ SMB 100B jelgenerátor szolgáltatja a szükséges jeleket, először 1,3 majd 2,4 GHz frekvencián. Mindkét beállításnál 4 dBm-es „szint”-érték került beállításra.

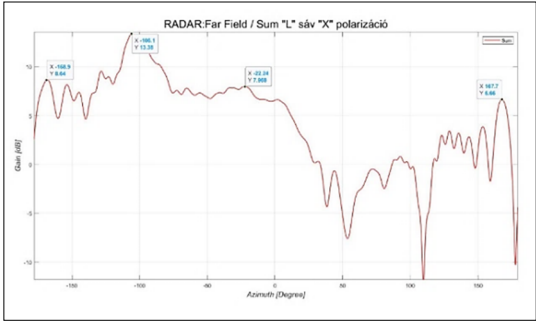
A 11. ábrán látható mérés során egy 360 fokban elforgatható mérőpadot használtunk (12. ábra) az antenna 360 fokos karakterisztikájának meghatározása érdekében. „Adó”-antennaként egy 4ChVNA jelgenerátorhoz csatlakoztatott R&S HE

1. táblázat. „L” sávú-antennateljesítmény-mérések különböző frekvenciákon

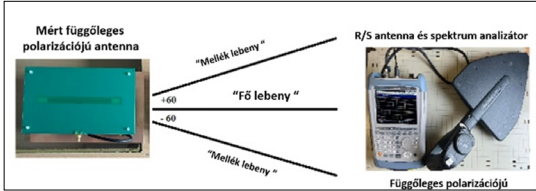
„L” sávú antenna		
Frekvencia	1.3 GHz	2.4 GHz
Back radiation	-46.6dB	-43.6dB
Turned 60° to the right from the main beam	-39.5dB	-37.5dB
Turned 60° to the left from the main beam	-37.6dB	-36.2dB
Main beam maximum (horizontal polarization)	-25.6dB	-24.6dB
Cross polarization value	-58.6dB	-58.2dB
Main beam maximum (vertical polarization)	-25.8dB	-22.6dB



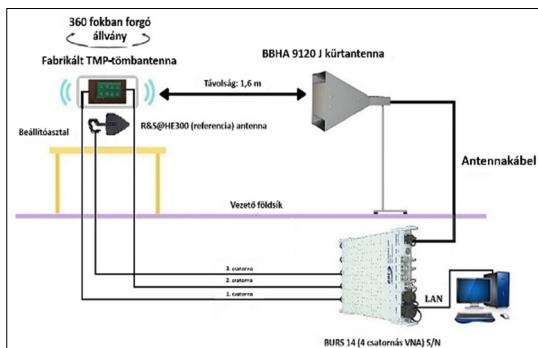
8. ábra. A mért „L” sávú antenna sugárzási mintázata



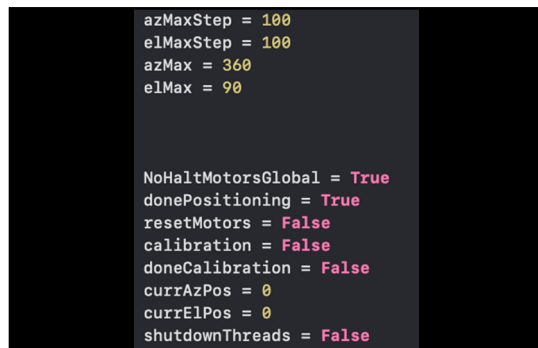
9. ábra. Az „L” sávú antenna mért sugárzási mintázata x-polarizációval



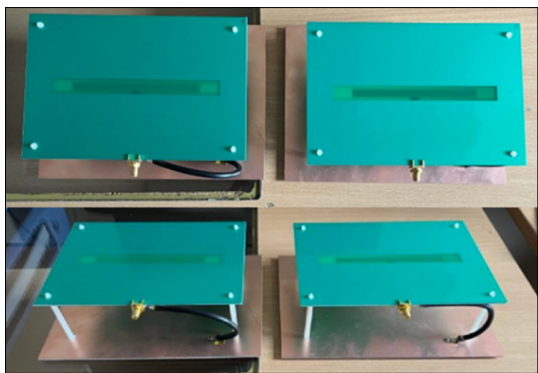
10. ábra. Egyszerűsített antenna jellemző mérése



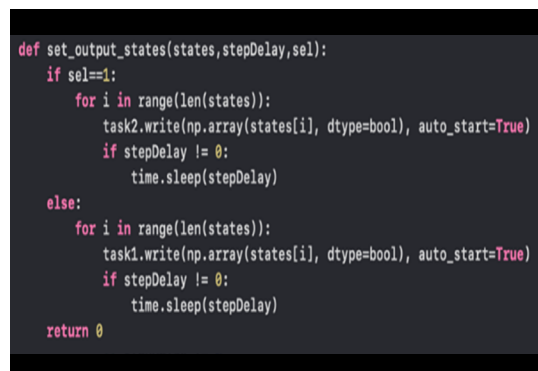
11. ábra. A mérési környezet diagramja



13. ábra. A léptetőmotorok lépésszáma



12. ábra. „L” antennák a forgatható mérőpadon



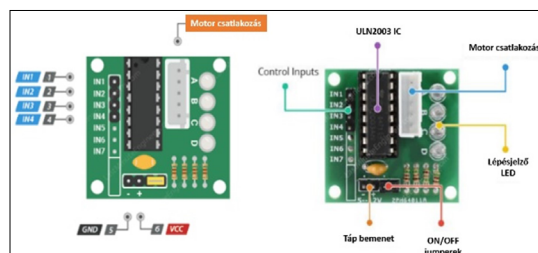
14. ábra. Programrész a motorok mozgatásához

300 antennát használtunk. Az adatokat a jelgenerátorhoz csatlakoztatott számítógépen értékeltük ki. A „vevő”- és az „adó”-antenna közötti távolság 2,6 m volt. A mérés során a forgatható mérőpadot többször lassan megfordítottuk, majd ugyanezt a mozdulatsort az ellenkező irányban is elvégeztük.

5.1. Léptetőmotoros alrendszer

A keretet két mini-léptetőmotor mozgatja. Mozgásukat tekintve vízszintes és függőleges körkörös mozgás. Az alsó motor biztosítja a keret tengely körüli forgását, míg a felső az antennatartó panelt függőlegesen a kívánt szögben forgatja. A 13. ábra mutatja a megadott pozíciószög és oldalszög maximális lépésszámát, valamint a deklarált változókat, amelyeket a főszál ír a motorok működtetéseért felelős szál utasítására.

A két, használt SM-28BYJ-48-5V motor [23] négyfázisú, egyipólusú. Nyomatéka a fent említett súlyproblémát figyelembe véve megfelelő, így képes biztosítani a megfelelő forgómozgást. A szerkezet tetején elhelyezett motor közvetlenül az antenna függőleges forgásáért, míg az alsó a teljes keret vízszintes forgásáért felelős. A 14. ábra mutatja azt a kódrészletet, amely a motorok óramutató já-



15. ábra. ULN2003 motorvezérlő

rásával megegyező és ellentétes irányú mozgását okozó funkcióért felelős.

A motor két motorvezérlővel, névlegesen egy ULN2003-mal vezérelhető (15. ábra). Fizikai megjelenése az alábbi képen látható:

5.2. Léptetőmotor programozása

A projekt egy NI USB 6001-es adatgyűjtő kártyát használ, amelyet egy számítógéphez csatlakoztatunk, amely vezérlőparancsokkal látta el. Ezen a számítógépen egy Python programozási nyelven írt alkalmazás fut. Az NI DAQMX könyvtárat importáltuk az említett Python-kódba, amely az adatgyűjtő kártya vezérléséhez szükséges funkci-

ókat tartalmazza. A hamLib könyvtár által a TCP/IP alkalmazási rétegben használt kommunikációs protokollt ugyanebben a kódban implementálták.

A motorvezérlés alapjául a gpredict nyílt forráskódú szoftver került kiválasztásra.

A gpredict egy valós idejű műholdkövető és -előrejelző alkalmazás. Figyeli és megjeleníti a műholdak pozícióit és adatait listákon, táblázatokon, térképeken és poláris ábrákon keresztül. Előrejelzi a jövőbeli műholdátvonulásokat, és egyedülálló módon a műholdakat testre szabható modulokba csoportosíthatja a személyre szabott megjelenés és funkcionalitás érdekében. Ráadásul a Gpredict több megfigyelőhelyről is képes egyidejűleg követni a műholdakat, de a legfontosabb előnye, hogy képes kezelni az antennaforgatókat és a hamLib-protokollt támogató rádiókat.

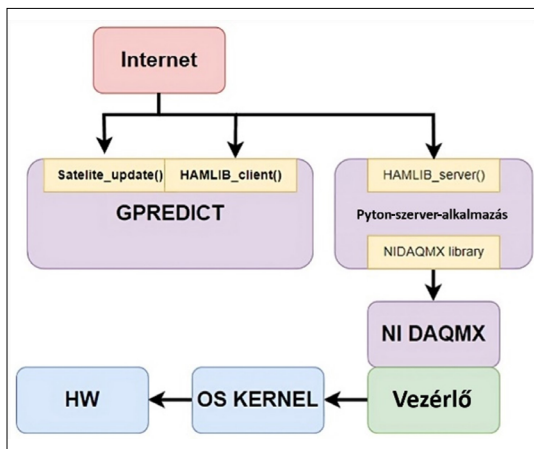
A gpredict tehát követi a kiválasztott műholdat, kiszámítja a saját helyzetünknek megfelelően az azimutális és magassági szögeket a forgó részhez, és TCP/IP-n keresztül továbbítja, a hamLib-protokollt használva az alkalmazási rétegben.

Egy Python nyelven írt program, amely szervertként a hamLib-protokollon keresztül fogadja a parancsokat, és egy NI USB 6001 eszközön keresztül vezérli és felügyeli a léptetőmotorokat. Első lépésben a program inicializálja és betölti a megfelelő könyvtárakat az NI USB 6001 vezérléséhez, majd betölti a konfigurációs fájlt, amely meghatározza, hogy hány lépést tud tenni a két tengelyen, és a végső állapotokban a szögeket, amelyeknek a lépések a hamLib szerint megfelelnek.

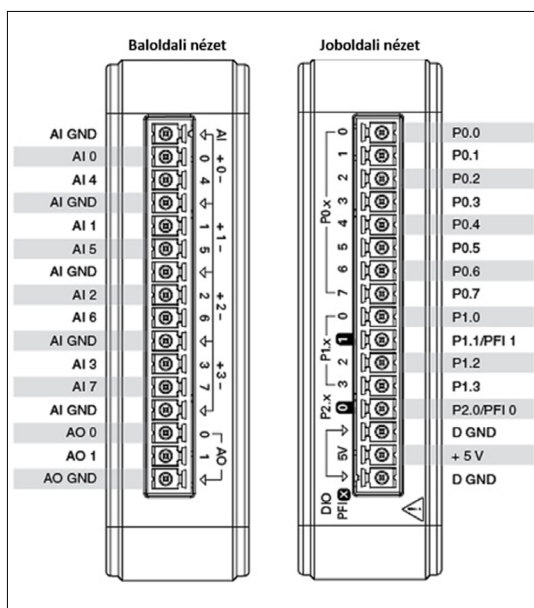
Kalibrációs üzemmódban a tengelyek egymástól függetlenül mozgathatók; ha az egyik tengelyen eléri a végállást, a számláló lenullázódik; ha az ellenkező irányba mozgatja, a számláló minden egyes lépésutasítást számol.

Ha úgy gondoljuk, hogy elértük a maximálisan lehetséges lépést egy adott tengelyen, vagy a végállást ismét megnyomjuk, akkor a maximálisan lehetséges lépéseket egy konfigurációs fájlba menthetjük el.

Normál üzemmódban a konfigurációs fájl betöltése után elindul egy TCP/IP szervert, amely dekódolja a hamLib-parancsokat, és megkapja a szöghelyzeteket. Ezeket a szögeket a konfigurációs fájlban megfelelően lépésszámokká alakítja át. Innentől kezdve a vezérlés úgy működik, mint egy CNC-gép; a program pontosan tudja, hogy a motor hány lépést tesz a végálláshoz képest, „szabályozza” azt, hogy a beállított lépéseket ne lépje túl, és tudja, hogy az új pozícióhoz képest hány lépést kell tenni egyik vagy másik irányba. A 16. ábra a szoftver topológiáját mutatja.



16. ábra. Szoftvertopológia



17. ábra. NI-NT-USB-6001

5.3. Mérési adatgyűjtő kártya

A léptetőmotorokat egy mikrokontroller vezérli, amely ütemezi és ellátja a motorokat a megfelelő utasításokkal. A választás egy NI-NT-USB-6001-es eszközre esett. Lásd a 17. ábrát, az NI-NT-USB-6001 egy sokoldalú eszköz, amely számos alkalmazáshoz alkalmas, beleértve a laboratóriumi kísérleteket, a kutatást és fejlesztést, valamint az ipari automatizálást. Kis mérete, hordozhatósága és könnyű kezelhetősége miatt ideális megoldást kínál számos mérési és vezérlési feladatra, például az interferometerállvány antennarend-

szerének mozgatására. Az NI-NT-USB-6001 a National Instruments (NI) által tervezett és gyártott többfunkciós adatgyűjtő eszköz. Az eszköz egy kis méretű, hordozható USB-alapú adatgyűjtő modul, amely analóg és digitális bemeneteket és kimeneteket, valamint számláló-/időzítőfunkciót biztosít. Az NI-NT-USB-6001 8 analóg bemeneti csatornával rendelkezik, 14 bites felbontással és 48 kS/s mintavételi sebességgel. Rendelkezik 2 analóg kimeneti csatornával, 16 bites felbontással és 2 kS/s maximális frissítési sebességgel [24].

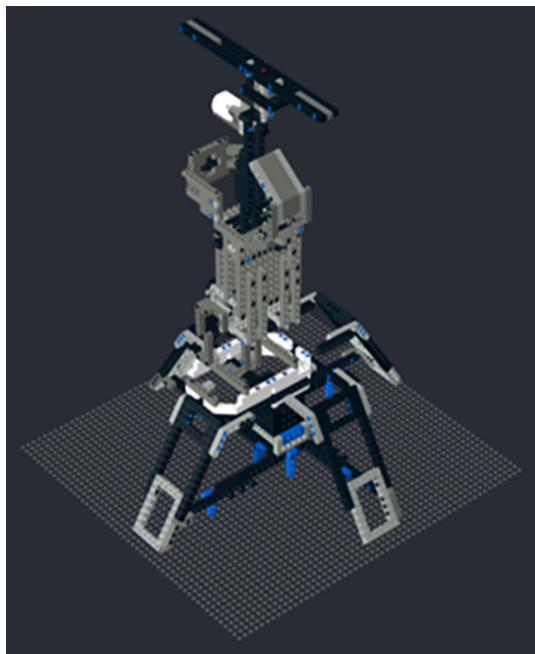
5.4. Megépített területi egység

A különböző elektronikus alkatrészek összerakásához, valamint az antenna rögzítéséhez egy kellően stabil keretre van szükség. Ahhoz, hogy a megfelelő elemek rögzíthetők legyenek, egy olyan összetett keretet kellett létrehozni, amely több szempontnak is megfelel. Először is gondoskodni kellett a két léptetőmotor megértéséről, hiszen ezeknek köszönhetően valósul meg a forgó mozgás. Ezenkívül a mikrokontroller és a szerelőpanel megfelelő rögzítése is kulcsfontosságú. A keret egyik legkritikusabb jellemzője a súlya. A léptetőmotorok maximális terhelhetőséggel rendelkeznek. Ezt túllépve, a rendszer nem képes megfelelően működni, ami a forgó mozgást illeti. Bár a fémház a legtartósabb és legstabilabb, a súlyhatár miatt a LEGO nevű műanyag építőeszközre esett a döntés.

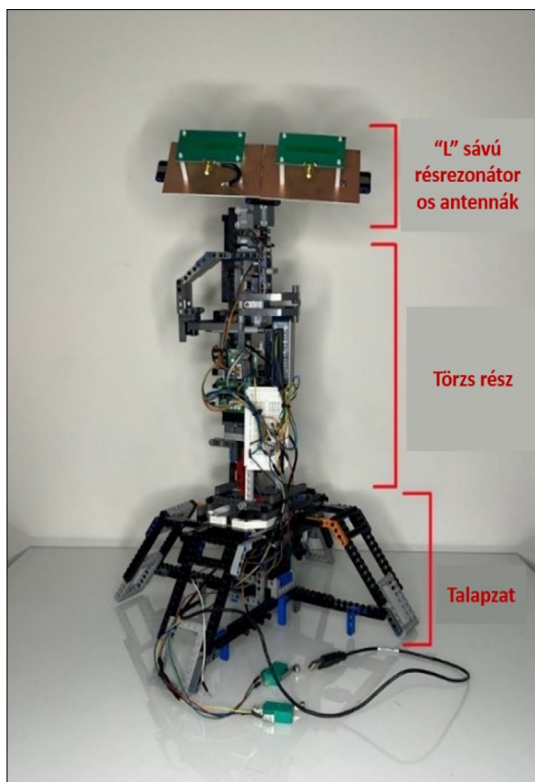
Fontos azonban megjegyezni, hogy a LEGO ABS-ből, egy ipari műanyagból készül. Az antennakeret megépítése előtt 3D-modellezés ment végbe. Ez megkönnyíti az újratervezést és a megépítendő keret virtuális keretben való megjelenítését. Elkészíthetjük a szükséges alkatrészlistát is. A modellezéshez az ingyenes BrickLink studio [26] került használatra, amely lehetővé teszi az egyedi alkatrészek tervezését, a modellek importálását és exportálását, valamint építési útmutatók készítését.

Miután a terv elkészült, rendelkezésre állt a megépítéshez szükséges elemek listája. A fizikai antennaforgatót minimális mértékben kellett módosítani (lásd a 19. ábrát).

A projekt megépítése és tesztelése után megállapítható, hogy az megfelel-e az elvárt és meghatározott követelményeknek. A motorok megfelelően képesek forgatni a keretet, a Python alkalmazás megfelelően kezeli és továbbítja a jeleket, és az antenna mért jellemzői is megfelelnek a célkitűzéseknek.



18. ábra. Az antennakeret 3D-s kialakítása



19. ábra. Antennaforgató rendszer

6. Konklúzió

A projekt során több irányban is felmerültek továbbfejlesztési lehetőségek. Ezek közül talán a legfontosabb egy még tartósabb fémváz kialakítása, de ez jelentősen megnöveli mind az anyag-, mind pedig – ami még fontosabb – a szállíthatóságot befolyásoló súlytényezőt.

A léptetőmotoroknak meghatározott nyomatéka van, amelyet a konstrukció során szem előtt kellett tartani. Ez a probléma erősebb motorokkal kiküszöbölhető, de ez egyben a súly növekedésével is jár, ezért fontos a megfelelő egyensúly megtalálása. Meg kell említeni, hogy ha egy kódot építenek be a rendszerbe, akkor még pontosabb motorpozicionálás érhető el.

További fejlesztési lehetőség egy másik irányba, egy teljesen vízálló külső burkolat, amelynek köszönhetően a szerkezet időjárástól függetlenül kültéri működésre válik alkalmassá. További fejlesztési lehetőség egy nagyobb nyereségű, irányított fázisvezérlésű antennarendszer előerősítővel, amely pontosabb méréseket tesz lehetővé.

Ez a kutatás segítséget jelenthet olyan járműtémában, amelyet korábban az egyetemen végeztünk, mint például a könnyű repülőgépek és antennák tervezése [27, 28].

Köszönetnyilvánítás

Külön köszönet a támogatásért, a Debreceni Egyetem, Műszaki Karnak.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] 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) 57.
https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v7i1.528
- [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] T. I. Erdei, Z. Molnár, G. Husi: *Selecting Equipment and Supplies for Self-Replicating 3D Printer*. ACTA Tech. CORVINIENSIS - Bull. Eng., 2016, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/296696614_Selecting_Equipment_and_Supplies_for_Self-Replicating_3D_Printer
- [4] 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>
- [5] 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>
- [6] 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>
- [7] 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/IRSS4158.2022.9905051>
- [8] D. A. Bradley, N. C. Burd, D. Dawson, A. J. Loader: *Mechatronics Electronics in Products and Processes*. 1st ed. London, Routledge, 2018.
<https://doi.org/10.1201/9780203747735>
- [9] U. S. Dixit, M. Hazarika, J. P. Davim: *History of Mechatronics*. In: *A Brief History of Mechanical Engineering*. Springer, 2017. 147–164.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-42916-8_7
- [10] P. Hariharan, K. Creath: *Basics of Interferometry*. Phys. Today, 46/1. (1993) 75–75.
<https://doi.org/10.1063/1.2808787>
- [11] “How Do Interferometric Systems Work,” Renishaw. [Online]. Available: <https://www.renishaw.com/en/how-do-interferometric-systems-work-38612>
- [12] M. M. Wang, J. Zhang: *Machine-Type Communication for Maritime Internet-of-Things*. Springer International Publishing, 2021.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-77908-5>
- [13] D. L. Sengupta, T. K. Sarkar: *Maxwell, Hertz, the Maxwellians, and the Early History of Electromagnetic Waves*. IEEE Antennas Propag. Mag., 45/2. (2003) 13–19.
<https://doi.org/10.1109/MAP.2003.1203114>
- [14] B. A. Kemp: *Resolution of the Abraham-Minkowski Debate: Implications for the Electromagnetic Wave Theory of Light in Matter*. J. Appl. Phys., 109/11. (2011) 111101.
<https://doi.org/10.1063/1.3582151>
- [15] Y. Liu, H. Yang, S. Mao, J. Zhu: *A Multibeam Dual-Band Orthogonal Linearly Polarized Antenna Array for Satellite Communication on the Move*. Int. J. Antennas Propag., 2015. 1–8.
<https://doi.org/10.1155/2015/102959>
- [16] D. F. Sievenpiper et al.: *Experimental Validation of Performance Limits and Design Guidelines for Small Antennas*. IEEE Trans. Antennas Propag., 60/1. (2012) 8–19.
<https://doi.org/10.1109/TAP.2011.2167938>
- [17] N. I. Miridakis, D. D. Vergados: *A Survey on the Successive Interference Cancellation Performance for Single-Antenna and Multiple-Antenna OFDM Systems*. IEEE Commun. Surv. Tutorials, 15/1. (2013) 312–335.
<https://doi.org/10.1109/SURV.2012.030512.00103>

- [18] A. Szántó, S. Hajdu, G. Á. Sziki: *Dynamic Simulation of a Prototype Race Car Driven by Series Wound DC Motor in Matlab- Simulink*. Acta Polytechnica Hungarica, 17/4. (2020) 103–122. <https://doi.org/10.12700/APH.17.4.2020.4.6>.
- [19] C. Pollock, J. D. Wale: *Hybrid Stepping Motors and Drives*, Power Eng. J., 5/1. (2001). 5–12. <https://doi.org/10.1049/pe:20010101>.
- [20] 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*. Appl. Sci., 12/19. (2022) 10095. <https://doi.org/10.3390/app121910095>.
- [21] 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>
- [22] I. Don Labriola P.E. President, QuickSilver Controls, “The Hybrid Servomotor: Stepping up to Closed Loop,” Motion Control Tips. [Online]. <https://www.motioncontroltips.com/the-hybrid-servomotor-stepping-up-to-closed-loop/>
- [23] “28BYJ-48-64 64:1 Stepper Gearmotor,” Solarbotics. [Online]. <https://www.solarbotics.com/product/22310/>
- [24] “NI USB-6002 Low-Cost DAQ USB Device,” NI. [Online]. <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usb-6002-specs/resource/374371a.pdf>
- [25] T. Istvan Erdei, R. Krako, 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>
- [26] “LEGO® Digital Designer,” BrickLink Studio. [Online]. Available: <https://www.bricklink.com/v3/studio/download.page>
- [27] A. Masuk, H. Géza: *Aero Graphene in Modern Aircraft & UAV*. Recent Innovations in Mechatronics, 9/1. (2022). <https://doi.org/10.17667/riim.2022.1/4>.
- [28] A. Masuk, H. Géza: *Uses of Aero Graphene and CNT in Modern Aircraft*. AIP Conf. Proc., 2941. (2023) 020029. <https://doi.org/10.1063/5.0181354>.



A SZÁRAZOLTÓ-BERENDEZÉS SZÁZ ÉVE

ONE HUNDRED YEARS OF DRY FIRE EXTINGUISHER EQUIPMENT

Gáti József,¹ Némethy Krisztina,² Kuti János³

¹ Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Gépészeti és Technológiai Intézet, Anyagtechnológiai Intézeti Tanszék, Budapest, Magyarország, gati@uni-obuda.hu

² IBS, Budapest, Magyarország, knemethy@ibs-b.hu

³ Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Gépészeti és Technológiai Intézet, Anyagtechnológiai Intézeti Tanszék, Budapest, Magyarország, kuti@uni-obuda.hu

Abstract

In the early 19th century, the level of Hungarian industry lagged behind that of developed states. As a result of rapid development, by the end of the 19th century and the first decades of the 20th century, the domestic technical and natural sciences showcased significant successes through the outstanding activities of the defining industrialists and engineers of the era.

The rapid urbanization posed new challenges in the operation of large cities, ensuring security, and fire protection. Responses to these challenges could only be provided by professionals who were excellently prepared with both technical and firefighting knowledge, such as Kornél Szilvay, who dedicated his entire life to improving the efficiency of firefighting.

Keywords: *Kornél Szilvay, dry extinguishing, water damage-free extinguishing of fire.*

Összefoglalás

A XIX. század elején a magyar ipar színvonala elmaradt a fejlett államokhoz viszonyítva. A gyors fejlődés eredményeként a XIX. század végére, illetve a XX. század első évtizedeire a hazai műszaki és természettudomány jelentős sikereket mutatott fel a korszak meghatározó iparosai és mérnökei kiemelkedő tevékenysége révén.

Az urbanizáció rohamos fejlődése új kihívásokat jelentett a nagyvárosok üzemeltetésében, a biztonság garantálásában, a tűzvédelemben is. A kihívásokkal szembeni válaszokat csak kiválóan felkészült, műszaki és tűzoltási ismeretekkel egyaránt rendelkező szakemberek adhatták meg, mint Szilvay Kornél, aki egész életét a tűzoltás hatékonysága javításának szentelte.

Kulcsszavak: *Szilvay Kornél, szárazoltás, szárazoltó-berendezés.*

1. Egy tűzoltópálya kezdete

Szilvay Kornél 1890. július 25-én született Budapesten, Szilvay Antal és Greff Anna gyermekeként. A négy elemi elvégzését követően érdeklődése a technika felé irányult, Budapesten, a mai Óbudai Egyetem jogelődjében, a Budapesti Magyar Királyi Állami Felső Ipariskolában folytatta tanulmányait, ahol az előkészítő osztály sikeres elvégzését követően a gépészeti szakosztályon három év alatt szerezte meg vég bizonyítványát.

Tanulmányi ideje alatt a Felső Ipariskola igazgatója, Hegedűs Károly m. kir. udvari tanácsos kezdeményezte a fenntartónál a tanulók tűzoltási ismereteinek bővítését: „tűzoltószaktanfolyam” rendezését, melyet „nevezett miniszter úr önagysága 1908. évi 105.684./IV. B. sz. a. kelt magas rendeletével engedélyezte is”. [1]

A szaktanfolyam elvégzésével Szilvay Kornél egy életre elkötelezte magát a tűzoltás, a tűzvédelem ügye mellett. A tanulmányait követően a budapesti Schlick-gyárban kezdte pályáját, ahol édesapja

is dolgozott. Gyári tűzoltó lett, majd még abban az évben belépett a Budapesti Önkéntes Tűzoltó Egyesületbe, ahol 1912-től szakaszparancsnok, 1913-tól segédtiszt és a szertárosi feladatokat is ellátott. Felismerte, hogy a tűzoltó személyes felkészültsége és bátorsága mellett meghatározó szerep hárul a megbízhatóan működő tűzoltó-felszerelésekre, valamint az eljárásokra, ezért tudatosan kezdett foglalkozni azok korszerűsítésével, a tűzoltás hatékonyságának növelésével. Budapest főváros szolgálatába 1914. február 1-jén lépett, hivatásos tűzoltó lett.

2. A szárazoltó-berendezés szabadalmaztatása

Szilvay figyelmének középpontjába az 1920-as évek elején a víz alkalmazására épülő oltási technika kiváltása került, mellyel a vízkár csökkenthető vagy elkerülhető. Éppen száz évvel ezelőtt, 1923. december 29-ei bejelentési dátummal szabadalmaztatta – a szárazoltással összefüggő kísérletei eredményeképpen – a gázzal és porral oltó tűzoltó-berendezés elvét. A szabadalmi leírás az újítás lényegét a következőkben foglalta össze: „A találmány szerinti eljárás lényege tehát abban áll, hogy valamely robbanó motor kipuffogó gázait először lehűtjük, azután compresszor segélyével kellő nyomásra sűrítjük és az így comprimált gázokkal a portartályból ismert módon kiszállított port az eloltandó tűz helyére fúvatjuk”. [2]

A működés elvét a leírás a következőképpen rögzíti (1. ábra): „A csatolt rajzon példaképpen egy ezen eljárás szerint dolgozó tűzoltó készülék vázlatosan van feltüntetve. (1) jelzi a portartályt, melyből az oltó port egy (2) szállító csiga a (3) fúvókához szállítja, (4) egy robbanó motort jelöl, melynek kipuffogó gázai az (5) csövön át távoznak el. Az (5) cső (6)-nál egy (7) csöves hűtőbe torkol, melyen áthaladva a kipuffogó gázok lehűtetnek, úgy hogy ezen gázok a hűtő a (8) csövön át lehűtve hagyják el. A (8) cső egy (9) forgó kompresszorba torkol,

melyet a (4) motor (10) tengely segélyével meghajt; ugyanezen tengelyről a (11) szíjhajtás segélyével a (2) szállító csiga is hajtatik. A (9) kompresszor a (8) csőből felszívott gázokat kellő nyomásra felkomprimálja és a (12) tokon át a (3) fúvókához szállítja, ahol az odaszállított oltóport a nyomás alatt levő gáz a (13) csőtoldatba fújja, melyhez az oltáshoz szükséges tömlőt ismert módon kapcsolhatjuk.” [2]

1926-ban kezdődött meg a kísérleti berendezés gyártása. Az első szárazoltó gépjármű 60 LE-s belsőégésű motorral, 5 t teherbírású alvárra, 6 m³/min oltógáz továbbítására képes kompresszorral készült, 2 m³-es fa portartállyal készült a MÁVAG Mozdony- és Gépgyárban. A fából készült portartály nem vált be, ezért a továbbiakban acél tárolóedénnyel folytatták a kísérleteket (2. ábra).

A mintapéldány elkészítésében konstruktörként közreműködött nagybányai vitéz Horthy István, a MÁVAG egyik korábbi tervezési osztályának vezetője. Az első szárazoltó átadása a bemutató keretében 1927. december 27-én került sor a fővárosi tűzoltóság laktanyájában (3. ábra).

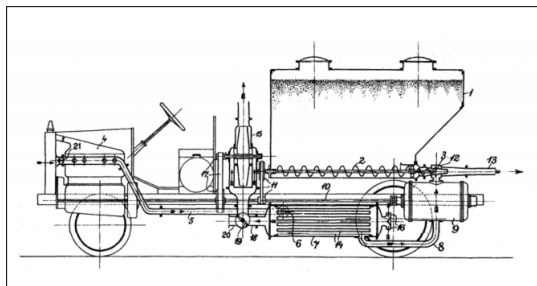
1928. január 22-én gróf Bethlen István miniszterelnök is megtekintette Szilvay újonnan alkal-



2. ábra. A kísérleti szárazoltó-berendezés gyártása [3]



3. ábra. Bemutató a fekvőhengeres szárazoltóval a Kun utcai laktanyában [4]



1. ábra. A szárazoltó-berendezés elvi vázlata a szabadalmi leírás rajz mellékletéből [2]



4. ábra. Fővárosi, hivatásos tűzoltó tisztek csoportja, Szilvay jobbról a második, fedetlen fővel [5]

mazásba vett poroltógépét tűzoltás közben. Néhány napra rá dr. Ripka Ferenc, a székesfőváros főpolgármestere gyakorlat közben nézte meg az üzemelő berendezést, mely mindkét alkalommal kitűnően működött.

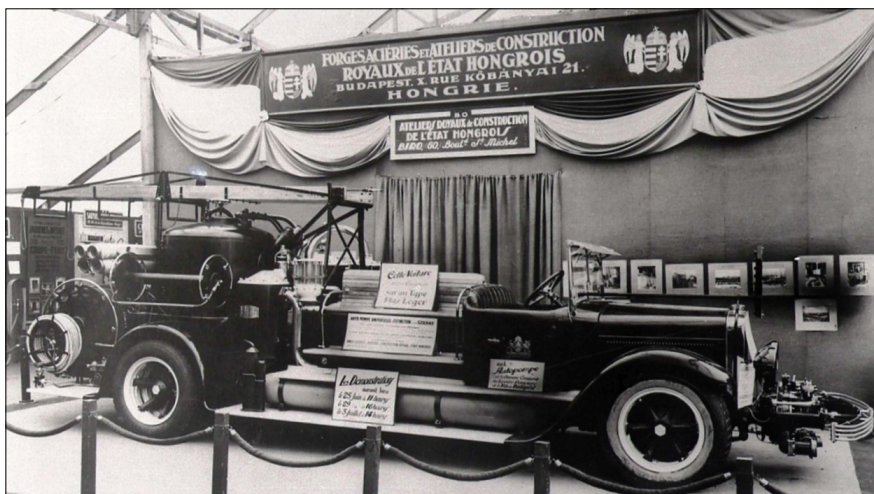
A szárazoltógép első gyakorlati bevetésére 1928. március 1-én került sor Budapesten, ahol Mihalovits Miklós festőművész műterménél keletkezett

a tűz. Az Esti Kurir híradása szerint „... Szilvay fő-tiszt elhatározta, hogy a tűz oltását nem vízzel kísérli meg, ami a mennyeztetet átáztatná és elpusztítaná a képeket, hanem egy újfajta oltókészülékkel, amely saját találmánya. Ez az oltókészülék porral és gázkeverékkel oltja a tüzet. A fő-tiszt maga helyezte üzembe ezt a készüléket, amelynek ez volt az első szereplése. Az eredmény tökéletesen igazolja a készülékhez fűzött reményeket, mert husz perc alatt sikerült a nagykiterjedésű tüzet lokalizálni, anélkül, hogy a felhalmozott művészi tárgyaknak valami baja is esett volna”. [6]

A legnagyobb határon túli elismerést a párizsi nemzetközi tűzoltó-kiállítás jelentette, ahol a korabeli tudósítás szerint „nagy feltűnést keltett Szilvay Kornél budapesti tűzoltófő-tiszt találmánya, a szárazoltógép (5. ábra). A kiállítás megnyitásán bemutatták a magyar találmányt Tardieu francia belügyminiszternek”. [7]

A kiállításon a Mávag–Mercedes-Benz-alvázon bemutatott szárazoltógép egyaránt tudott oltani semleges gázzal, oltóporral, vízzel és vízpermettel, szénsavhóval és -habbal, illetve por, gáz és vízpermet kombinált oltásra is alkalmas volt. A szakmai körökben „egyetemes oltógépnek” nevezett berendezést állóhengeres portartállyal szerelték fel a korábbi fekvő helyett.

Július elején Paul Doumer francia köztársasági elnök is látogatást tett a tökéletesített szárazoltógépet bemutató párizsi tűzoltó-kiállítás magyar osztályán, ahol „kérdőzködésére vitéz nagybányai Horthy István főmérnök részletes felvilágosítással szolgált”. A párizsi tűzoltóság ezredese megkeresésére tűzoltási bemutatóra is sor került, „a kiállítás próbaházában magas- és alacsonyfe-



5. ábra. Szilvay-féle szárazoltó a párizsi nemzetközi tűzoltó-kiállításon [8]

szültségű árammal telített kábelhuzalokat fektettek le, amelyeket aztán meggyújtottak. Horthy István mérnök és a rendelkezésére bocsátott párisi tűzoltókatonaikkal hozzákezdett a tűz eloltásához. ...a lehető legrövidebb idő alatt elfojtották az égő telefonkábelek tüzeit. A párisi tűzoltótisztek, s a külföldi tűzoltók, akik az oltás munkáját végignézték, egytől-egyig a legnagyobb elismerés hangján nyilatkoztak...” – adta hírül a Magyarország 1931. július 14-ei száma. [9] Az új berendezés a francia és az osztrák szakemberek mellett az amerikai és a kanadai tűzoltók érdeklődését is felkeltette.

1929-ben a szárazoltóval 20 esetben hajtottak végre jelentős vízkártól mentesült tűzoltást Budapesten. A tapasztalat azt mutatta, hogy a szárazoltás a zárt térben kialakult tüzek oltására bizonyult legsikeresebbnek (20 tüzeset közül 14 üzlet- vagy raktártűz volt). Gyakran előfordult, hogy a zárt helyiségbe való behatolás – pl. az üzlet redőnyének megbontása – során friss levegő tödült be, melynek eredményeképpen a tűz erőre kapott, lángba borítva a környezetet. Ezt felismerve Szilvay olyan, kis méretű nyílásokat alkalmazott az oltóanyag bevezetésére a nyílászáró megbontása nélkül, melyek lehetővé tették az oltógáz bevezetését a nyílászáró tönkretétele, friss levegő beáramlása nélkül.

Az elektromosság széles körű elterjedésével egyre többször fordultak elő villamos berendezéseket, elosztókat érintő tüzesetek, melyek esetén a hagyományos vízzel oltás nem volt alkalmazható. Az 1932. június 16-án a Magyar Dunántúli Villamossági Rt. budapesti Kárpát utcai telepén egy 20.000 KVA teljesítményű, olajhűtésű transzformátor gyulladt ki. A „szabadtéri transzformátor tüzeit sikerült porsugárral eloltani úgy, hogy a mellette lévő két transzformátor áramtalanítása nem vált szükségessé”. [10]



6. ábra. Állótartályos szárazoltó szerelése a Mávagban 1939–1940 között [11]

Szilvay az eljárást továbbfejlesztette zárt téri transzformátorok tüzeinek oltására is. A tárgykörben megjelent szabadalmi részletesen tárgyalta azokat a bevezető nyílásokat, melyek alkalmazásával a zárt helyiségek, a bennük levő transzformátorok, kapcsolóberendezések tüzeit hatásosan lehetett oltani. A feltaláló zárt helyiségekben keletkezett tüzek hatékony oltását szolgáló szabadalmi az alábbiak:

- Eljárás és berendezés tűznek száraz úton való oltására (1932. 01. 24.),
- Berendezés helyiségekben keletkezett tűz oltására (1934. 11. 29.),
- Szárazoltó-berendezés (1934. 12. 04.),
- Szárazoltó nagy helyiségekben keletkező tüzek oltására és eljárás a szárazoltó üzemben tartására (1941. 01. 15.),
- Berendezés zárt helyiségekben keletkező tűz oltására (1942. 05. 09.).

A tapasztalatok azt mutatták, hogy a „járműmotor gyakran nem ad elegendő mennyiségű és jóminőségű, tehát széndioxidmentes gázt, mert a motor nincsen kellően megterhelve; emellett a nagy tüzek elfojtásához szükséges gázmennyiséget a használatos motorok még akkor sem tudják előállítani, ha teljes terheléssel járnak. Ezeknek a hátrányoknak a kiküszöbölésére a találmány értelmében a motorral sűrítőt hajtunk, amely a tiszta levegőt sűríti és olajelégetőbe nyomja, amelyből kiáramló égéstermékek felhasználhatók az oltásra...” – írta a feltaláló az 1934. december 4-ei dátummal bejegyzett „Szárazoltó-berendezés” címmel bejegyzett szabadalmában. [12]

A szárazoltórendszer folyamatos korszerűsítése ellenére a nagy méretű helyiségekben keletkező tüzek oltására az akkori belsőégésű motorok kipufogógázainak mennyisége kevésnek bizonyult.

Szilvay további fejlesztései arra irányultak, hogy növelje a percenkénti kibocsátható gázmennyiséget. A 100 m³ oltógázt termelő berendezés kialakítására a Ganz és Társa a Villamossági Gép-, Vagon- és Hajógyár Rt.-ben nyílt lehetőség, Jendrasik-féle gázturbina alkalmazásával. 1951-ben készült el a gépi berendezés, 1953-ban a felépítmény is, majd megkezdtek a próbaüzemet. A folyamat azonban Szilvay 1957. szeptember 8-ai halála miatt megszakadt.

3. Az utódok emlékezete

Szilvay Kornél pályafutása során fontosnak tartotta, hogy mindvégig tevékenyen részt vállaljon a tüzek oltásában, 35 éven át vonult tüzesetekhez, szolgálati ideje minden 17. órájára eset egy-egy



7. ábra. Az MNB Szilvay Kornél-emlékérmé [14]

tűzeset. Szolgálatában során magas fokú hivatástudattal, önfeláldozóan látta el tűzoltói, illetve újítói feladatát.

Tarján Rezső gépészmérnök, ny. tűzoltó alezredes 1982-ben megjelent cikkében így méltatta szerepét: „Mint tűzoltó tiszt saját becslése szerint mintegy tizenhatezer tűzesetnél vezette az oltást. Ő irányította például 1947. június 20-án a Bazilika kupolatüzeének oltását. Előrelátóan gondoskodott a nagy értékű freskók védelméről, s dacára az oltás során felhasznált nagy mennyiségű víznek, beázás, azaz vízkár nem keletkezett. Egy 400 l/p-es kismotorfecskendővel a kupola pilléreinek mélyedéseiből az összegyűlt vizet kiszívatta, a sugarakkal pedig megvédte a Bazilika ép részeit a leégéstől”. [13]

1955. február 1-jén jelentette be utolsó szabadalmát, „Szárzoltó eljárás” címmel, 39 szabadalmi oltalom birtokosa volt, melyek többsége közvetlenül az tűzoltás hatékonyságának javítására irányult.

Életútja, szakmai pályafutása elismeréséül Göncz Árpád köztársasági elnök 1993-ban posztumusz vezérőrnaggyá léptette elő. 1994 májusában emléktáblát avattak Szilvay Kornél tűzoltó-feltaláló tiszteletére a fővárosi parancsnokság épületében. A Gépipari Tudományos Egyesület Központi Tűzvédelmi Szakosztálya 1995-ben Szilvay Kornél-emlékérmét alapított.

2015-ben, születésének 125. évfordulója alkalmából a Magyar Nemzeti Bank „Szilvay Kornél” megnevezéssel 2000 Ft címletű színesfém emlékérmét bocsátott ki (7. ábra).

Az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar a jogelőd intézménye kiváló tanulója emlékezve 2022-ben Szilvay

Kornél tűzvédelmi konferencia sorozatot indított el a Magyar Tudomány Ünnepe rendezvénysorozat részeként. [15]

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Hegedűs Károly: *Értéstitő a Budapesti M. K. Állami Felső Ipariskola harmincadik tanévéreől, 1908–1909.*, Budapest, PÁTRIA Irodalmi Vállalat és Nyomdai Résztvény-Társ. Nyomása, 1909.
- [2] Eljárás és készülék tűz oltására, Szilvay Kornél tűzoltófőtiszt, Budapest, Szabadalom, 1923. 12. 29. 88979. szám.
- [3] Katasztrófavédelem Központi Múzeuma archívuma, 063. kép.
- [4] Katasztrófavédelem Központi Múzeuma archívuma, Szilvay_fekvohengeres_oltogep.
- [5] Katasztrófavédelem Központi Múzeuma archívuma, Szilvay Kornél, 3875. kép.
- [6] Esti Kurir, 6/50. (1928) 11.
- [7] Képes Pesti Hirlap, 50/186. (1928).
- [8] Katasztrófavédelem Központi Múzeuma archívuma, Szilvay_oltogep_Parizs.
- [9] Magyarság, 12/157 (1931).
- [10] Magyar Tűzoltó, 13/8 (1961).
- [11] Katasztrófavédelem Központi Múzeuma archívuma, 341. kép.
- [12] Szárzoltó-berendezés, Szilvay Kornél tűzoltó főtit, Szabadalom, Magyar Királyi Szabadalmi Bíróság, Budapest, 11275/1934.
- [13] Tarján Rezső: *A tűzoltás vízkára.* Műszaki Élet, 25. 1982.
- [14] A 2015. évi Szilvay Kornél-emlékérmé. <https://penzvero.hu/termek/2015-evi-szilvay-kornel-szinesfem-emlekerme-pp/>
- [15] Szilvay Kornél tűzvédelmi konferencia, Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, 2022. november 15. <https://bgk.uni-obuda.hu/tuzvedelmi-konferencia-2022/q>



VEKTORIÁLISAN SZABÁLYOZOTT PMSZM-HAJTÁS SZIMULÁLÁSA EGYSZERŰSÍTETT MODELLEZÉSI STRUKTÚRÁKKAL

SIMULATION OF THE VECTOR CONTROLLED PMSYM DRIVE BASED ON SIMPLIFIED MODELING STRUCTURES

Imecs Mária,¹ Ferencz János,² Kelemen András³

¹ Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamosmérnöki Kar, Villamos Gépek és Hajtások Tanszék, Kolozsvár, Románia, maria.imecs@emd.utcluj.ro

² Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamosmérnöki Kar, Doktori Iskola, Kolozsvár, Románia, janos.ferencz.phd.project@gmail.com

³ Sapientia EMTE, Kolozsvár, Marosvásárhelyi Kar, Villamosmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia, kandras@ms.sapientia.ro

Abstract

The paper presents the simulation results of the simplified static (St) and dynamic (Dy) simulation structures (SimS), with voltage (U) and frequency (f) input, all of them based on a simplified mathematical model (MaMo) of the PM synchronous machine (SyM) corresponding to the operation mode with stator current vector perpendicular to the PM flux (CVpPMF). These results are compared with those simulated with vectorial speed controlled (VC) SimS-s where the longitudinal armature reaction is cancelled by means of two-phase current controllers in two different conditions: when the motor is fed by sine-wave voltages, and when it is connected to a PWM-inverter. By means of simulation of the St- and Dy_SimS-s the motor parameter identification calculations are verified, while the compatibility of the MATLAB/Simulink® motor block with the applied MaMo, required for the implementation of the vector control, is also verified using the VC-Sim-s.

Keywords: PM synchronous motor, vector control, mathematical modelling, simulation structures.

Összefoglalás

A dolgozat bemutatja a szimulálási eredményeit azoknak az egyszerűsített permanens mágneses szinkron gép (PMSzG) matematikai modelljén (MaMo) alapuló statikus (St) és dinamikus (Dy) szimulálási struktúráknak (SimS), feszültség (U), illetve frekvenciabemenettel (f), amelyek szabályozók nélkül megfelelnek a permanens mágnes (PM) fluxusra merőleges áramvektoros üzemmódnak. Ezeket az eredményeket összehasonlítjuk olyan vektoriális sebesség-szabályozási (VC-) struktúrákéval, melyeknél a PM fluxusára merőleges áramvektort a hosszanti armatúra visszahatás nullára szabályozásával valósítjuk meg ideálisan szinuszos (Szin), illetve szaggatott (ISzM) feszültség-betáplálással. A St_SimS-ek és Dy_SimS-ek szimulálásával ellenőrizhetjük a motor megmért és azonosított adatainak a számítási helyességét és a VC_SimS-ekkel meg lehet állapítani a MATLAB/Simulink® könyvtári motormodell kompatibilitását az általunk alkalmazott MaMo-val, ami szükséges feltétel a szabályozási struktúra implementáláshoz.

Kulcsszavak: PM szinkron motor, vektoriális szabályozás, matematikai modellezés, szimulációs struktúrák.

1. Bevezetés

Az állandó/permanens mágneses (PM) forgórészű szinkrontípusú gépek a legelterjedtebb villamos gépek közé tartoznak az aszinkron motorok (SzM) mellett. Ezek lehetnek szinuszos vagy trapézos mágneses mező-eloszlásúak (MME) a légrésben. Az előzőek a szinkrongépek (SzG) kategóriájába tartoznak, míg az utóbbiak szinkron- típusúak. Az utóbbiakhoz sorolhatjuk a kefe nélküli egyenáramú motorokat („BLDC – *Brushless Direct Current*”), illetve a konvencionális PM léptető- vagy 1-től különböző pólusszám-arányos (4/3, 3/4, 5/2, 5/3, stb.) motorokat, melyeknél az állórész (ÁR) és forgórész (FR) pólusainak a száma különbözik.

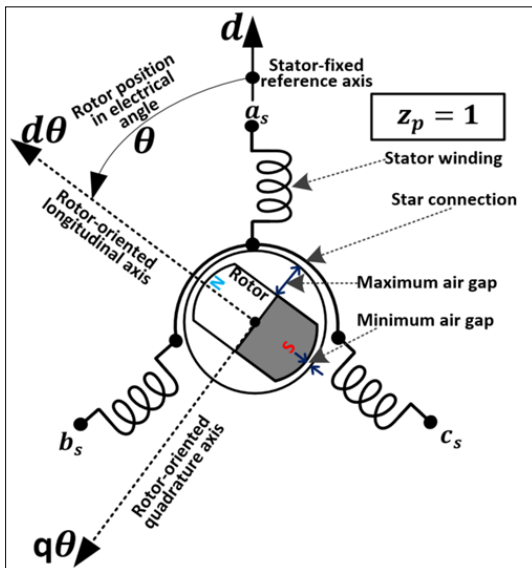
A PMSzG-ket széles körben alkalmazzák mind a hajtástechnikában motorként, mind energiatermelésre a szélturbinákban generátorként.

A dolgozat a szinuszos MME PM szinkrongépekkel foglalkozik, melyekre érvényes a Park-féle matematikai modell (MaMo).

2. Permanens mágneses szinkron gépek matematikai modellje

Az 1. ábrán egy PMSzG egy-póluspárú ($z_p = 1$) helyettesítő szerkezeti vázlatát láthatjuk.

Az ábrán θ a rotor / FR elfordulási pozíciója villamos szögben, az armatúra- / sztátor- / ÁR-orientált rögzített / fix d (valós) referenciategelyhez viszonyítva, mely az a_s ÁR-fázis mágnesezési tengelyének felel meg.



1. ábra. PM forgórészű $z_p = 1$ póluspárú szinkron motor elvi szerkezeti vázlata.

Az általános Park-modell alapján a szinuszos MME szinkrongépek matematikai modelljét az FR-hez kötött, azaz FR-orientált (FRO) $d\theta$ - $q\theta$ koordináta-rendszerben (KooR) adják meg, az FR szimmetriatengelyeinek megfelelően [1, 2]. Ezt tulajdonképpen permanens mágneses mezőorientációnak (MMO) is lehet nevezni.

2.1. PM szinkron gépek általános dinamikus matematikai modellje

A csillapító rudak nélküli PMSzG általános egyenletei az eredeti Park modellből úgy vezethetők le, hogy a FR áramköröit mellőzzük és a gerjesztő áram által létrehozott fluxust a PM fluxussal helyettesítjük [3].

Az armatúra/ÁR feszültség-egyenlete felírható térfázoros formában is

$$\underline{u}_{s\theta} = R_s \underline{i}_{s\theta} + \frac{d\Psi_{s\theta}}{dt} + j\omega \Psi_{s\theta}, \quad (1)$$

ahol $\underline{u}_{s\theta} \cdot \underline{i}_{s\theta}$, és $\Psi_{s\theta}$ az armatúra feszültség, áram, illetve a fluxus-térfázora FRO-KooR-ben, R_s az ÁR fázisellenállása, ω az FR villamos szögsebessége

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}, \quad (2)$$

valamint θ az FR elfordulási pozíciója villamos szögben, ami az 1. ábrán is látható.

Az armatúra eredő fluxusa:

$$\Psi_{s\theta} = \Psi_{PM} + \Psi_{ss\theta}, \quad (3)$$

ahol Ψ_{PM} a PM fluxusa, mely a FRO-KooR-ben a $d\theta$ valós tengely irányába mutat, és $\Psi_{ss\theta}$ az armatúra-visszahatás (AVH), melyet az áram kétfázisú összetevőivel (KF-ÖT) az alábbi formában lehet felírni:

$$\Psi_{ss\theta} = L_{sd} i_{sd\theta} + jL_{sq} i_{sq\theta}, \quad (4)$$

ahol L_{sd} és L_{sq} a hosszanti, illetve a keresztirányú 3-fázisú induktivitások.

A dinamikai nyomaték a mozgásegyenletben:

$$J_{Eq} \frac{d\omega_m}{dt} = m_e - m_L, \quad (5)$$

ahol J_{Eq} az eredő tehetetlenségi nyomaték, ω_m a mechanikai szögsebesség, m_e az elektromágneses nyomaték (EMNy) és m_L a terhelő nyomaték. A mechanikai szögsebesség és az f_s frekvencia arányosak az n fordulatszámmal, mely gyakorlati mértékegységben fordulat per percben (RPM „*revolution per minute*”) adott, így a paraméter-azonosítási számítások során alkalmazott összefüggések az alábbiak:

$$\omega_m = \frac{\omega}{z_p} = \frac{\pi n}{30}; \quad (6)$$

$$f_s = z_p \frac{n}{60}, \quad (7)$$

ahol z_p a póluspárok száma.

Az elektromágneses nyomaték a KF-ÖT-vel kifejezve [1–3]:

$$m_e = K_{M1} z_p (\Psi_{sd\theta} i_{sq\theta} - \Psi_{sq\theta} i_{sd\theta}). \quad (8.1)$$

Ha kifejezzük a fluxus-ÖT-eket az áram-ÖT-ekkel, szétválaszthatjuk a PM-nek, illetve a változó reluktanciának köszönhetően létrejövő kéttípusú szinkron nyomatékokat:

$$m_e = K_{M1} z_p (\Psi_{PM} i_{sq\theta} + 2\Delta L i_{sd\theta} i_{sq\theta}), \quad (8.2)$$

ahol a *nyomaték-koefficiens* $K_{M1} = 3/2$, ha a változónak a pillanatértékeivel (amplitúdóival) számolunk. A $2\Delta L = L_{sd} - L_{sq}$ különbség a változó reluktancia hatását fejezi ki. Ez általában pozitív értékű, viszont számos újabban gyártott motornál negatív, ami negatív reluktancia-nyomatékokat hoz létre és gyengíti a PM által létrehozott főnyomatékokat.

2.2. PM szinkron gépek matematikai modellje állandósult állapotban

Az elektromágneses állandósult állapotban (ÁÁ), amikor az áram és a fluxusok állandóak, az (1)-ből kiiktatjuk a fluxus deriváltját, így a fe-szültség-egyenlet leegyszerűsödik, viszont a flu-xusegyenletek nem változnak. KF-ÖT-vel felírva az alábbiak adódnak:

– az armatúrafeszültség

$$\begin{cases} u_{sd\theta} = R_s i_{sd\theta} - \omega \Psi_{sq\theta}; \\ u_{sq\theta} = R_s i_{sq\theta} + \omega \Psi_{sd\theta}; \end{cases} \quad (9)$$

– az armatúra eredő fluxusa

$$\begin{cases} \Psi_{sd\theta} = \Psi_{ssd\theta} + \Psi_{PM}; \\ \Psi_{sq\theta} = \Psi_{ssq\theta}; \end{cases} \quad (10)$$

– az armatúra-visszahatás

$$\begin{cases} \Psi_{ssd\theta} = L_{sd} i_{sd\theta}; \\ \Psi_{ssq\theta} = L_{sq} i_{sq\theta}. \end{cases} \quad (11)$$

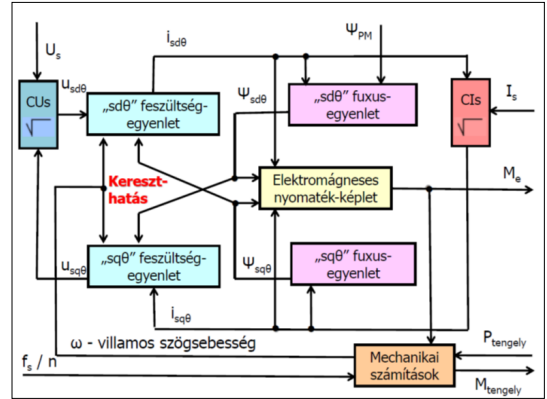
Ha elektromechanikai ÁÁ-ról van szó, azaz a sebesség is állandó, akkor az (5) mozgásegyenletben a szögsebesség deriváltja nulla lesz, következésképpen az alábbi összefüggést kapjuk:

– nyomatékegyenlet:

$$m_e = m_L, \quad (12)$$

ahol érvényesek a (8.1) és a (8.2) EMNy kifejezések.

A 2. ábrán látható a (6)–(12) egyenletek alapján megszerkesztett általános statikus szimulálási



2. ábra. Általános statikus szimulálási struktúra a PMSzM állandósult állapotban.

struktúra egyik változata. Ezt a változatot feszültség-, frekvencia- és árambemenettel a névleges munkapont (NMP) ellenőrzésére szerkesztettük meg. Többféle változat is alkotható, ha az adott célnak megfelelően felcserélünk egymás közt egy vagy több bemenetet kimenettel.

Mivel az ÁÁ-t a szinuszos működésre értelmezzük, általában a változók effektív (rms – „Root Mean Square”) értékével számolunk (az amplitúdó és az effektív érték aránya $\sqrt{2}$, ezért a (8.1) és (8.2)-ben a nyomaték koefficiense $K_{M1} = 3$. [1, 3].

3. A PM szinkron motor adatai

A motor típusa SIMOTICS S-1FL6/ Siemens AG (DE-97616 Bad Neustadt) [7].

A motor adatlapjáról a következő névleges adatokat olvashatjuk le:

- tengelynyomaték $M_{tN} = 0,64 \text{ Nm}$;
- tengelyteljesítmény $P_{tN} = 200 \text{ W}$;
- fordulatszám $n_N = 3000 \text{ ford./perc}$;
- effektív vonaláram $I_{vN}^{ef} = I_{sN}^{ef} = 1,4 \text{ A}$ (egyenlő a fázisárammal);

Kiegészítő adatok a katalógusból:

- effektív vonalfeszültség $U_{vN}^{ef} = \sqrt{3} U_{sN}^{ef} = 111 \text{ V}$, ahonnan a fázisfeszültség $U_{sN}^{ef} = 64 \text{ V}$;
- a FR tehetetlenségi nyomatéka $J_r = 0,214 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^2$;
- a terhelés tehetetlenségi nyomatéka maximum 30-szorosa lehet a J_r -nek. [7];

A mért paraméterek:

- armatúra-ellenállás $R_s = 5,33 \Omega$;
- hosszanti induktivitás $L_{sd} = 10,19 \text{ mH}$;
- keresztirányú induktivitás $L_{sq} = 11,17 \text{ mH}$;
- a póluspárok száma $z_p = 4$.

A számított névleges adatok:

- $f_{SN} = 200$ Hz, betáplálási frekvencia;
- $M_{eN} = 0,731$ Nm, elektromágneses nyomaték;
- $\cos\varphi_N = 0,95$ teljesítménytényező;
- hatásfok $\eta_N = 77,5\%$;
- $\psi_{PM}^{Max} = 0,0615$ Wb, az identifikált PM-fluxus amplitúdója.

A motor megmért paramétereit és kiszámított adatait le lehet ellenőrizni a **2. ábrán** bemutatott St_SimS-vel az NMP-nek megfelelő bemeneti (feszültség-, áram- és frekvencia-) adatokkal.

4. A PM-fluxusra merőleges áram szabályozási elve

A szinuszos MME PM szinkron motoroknak négy alapvető konvencionális szabályozási elvről lehet szó [4–6].

A legismertebb és a legalkalmazottabb szabályozási elv szerint az armatúraáram térfázorát merőlegesre szabályozzák a rotor hosszanti mágneses tengelyére. A PM fluxusára merőleges áram esetén az áram KF-ÖT-i sajátos értékűek: a direkt ÖT nulla lesz és a kvadratúra ÖT pedig megegyezik az áram modulusával:

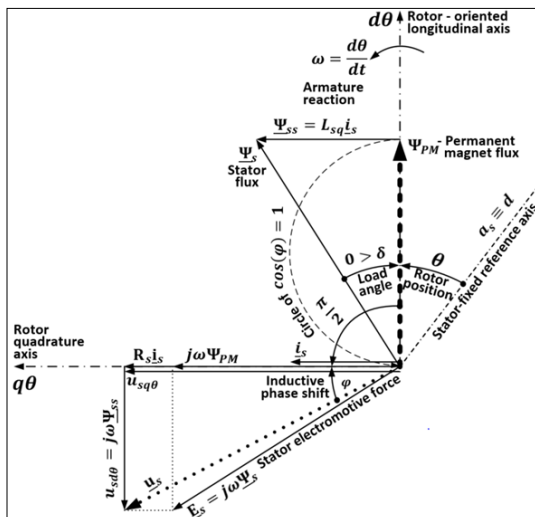
$$\begin{cases} i_{sd\theta} = 0; \\ i_{sq\theta} = i_s. \end{cases} \quad (13)$$

A fentiek alapján a hosszanti armatúra visszahatás (HAVH) fluxusa $\Psi_{ss\theta}$ ugyancsak nulla. Ebben az esetben az eredő fluxust nem lehet állandó értékre szabályozni, mert a $\Psi_{ss\theta}$ keresztirányú AVH függ az áramtól, amit a mechanikai terhelés határoz meg. Egy másik hátrány, hogy az áram induktív jellegű lesz, viszont előnyként meg lehet említeni, hogy az EMNy minimális árammal jön létre. Ezenkívül azoknál a jelenleg gyártott változó reluctancejájú (VR) PMSzM-eknél, melyeknél $L_{sd} < L_{sq}$ (a tárgyalt Siemens-motor esetében is) – a HAVH hiányában – a PM nyomatékokat csökkentő negatív reluctance-nyomaték nullává válik.

4.1. Fázordiagram ÁÁ-ban a PM fluxusra merőleges áramvektorral

A PM-re merőleges árammal működő SzM fázor-diagramja az (9)–(11) alapján megszerkeszthető, mely a **3. ábrán** látható.

A **3. ábra** fázordiagramja általánosan érvényes mind térfázorokra, mind időfázorokra. Ugyancsak érvényesnek tekinthető változó sebesség esetén is, elektromágneses ÁÁ-ban, ha a fluxus és az áramerősség effektív értéke nem változik, ugyanis a fázordiagram nem függ a rotor sebességváltozástól gyorsulás, illetve fékezés esetén.



3. ábra. Fázordiagram EM-ÁÁ-ban a PM-re merőlegesre szabályozott áramvektorral $d\theta - q\theta$ FRO szinkron forgó KooR-ben.

4.2. PM fluxusára mérőleges áramvektoros matematikai modellek

Ideális esetben, ha az áram-térfázort változatlanul mérőlegesen lehet tartani a PM fluxus-vektorra, mind dinamikus, mind ÁÁ-ban, akkor a (13) feltételt figyelembe véve, felírhatjuk az egyszerűsített MaMo-kat. Ezek alapján meg lehet szerkeszteni a vektoriálisan szabályozott PMSzS egyszerűsített szimulálási struktúráit.

4.2.1. Egyszerűsített matematikai modell állandósult állapotban

Figyelembe véve a (13)-t, a (8)–(11) ÁÁ egyenletek alapján, az egyszerűsített feszültség-, fluxus- és EMNy-összefüggések az alábbiak lesznek:

$$\begin{cases} \Psi_{ssd\theta} = 0; \\ \Psi_{ssq\theta} = \Psi_{ss} = L_{sq}i_s; \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \Psi_{sd\theta} = \Psi_{PM}; \\ \Psi_{sq\theta} = \Psi_{ssq\theta}; \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} u_{sd\theta} = -\omega L_{sq} i_s; \\ u_{sq\theta} = R_s i_s + \omega \Psi_{PM}; \end{cases} \quad (16)$$

$$m_e = K_{M1} z_p \Psi_{PM} i_s, \quad (17)$$

melvekhez hozzáadódik a (12) is.

4.2.2. Egyszerűsített dinamikus matematikai modell

Alkalmazva a (13)-at az (1)-(8) általános dinamikus egyenletekre, KF-ÖT-vel az egyszerűsített dinamikus modell az alábbiak szerint alakul:

$$\begin{cases} u_{sd\theta} = -\omega\psi_{ss} = -\omega L_{sq} i_s; & (18) \\ u_{sq\theta} = R_s i_s + \omega\psi_{PM} + L_{sq} \frac{di_s}{dt}, \end{cases}$$

A (18) mellett még érvényes az (5) mozgás-egyenlet, a (17) EMNy képlete, valamint a (14) és (15) fluxus-összefüggések. Ezekben az ω -t tartalmazó tagok a forgási elektromotoros feszültség (EMF) KF-ÖT-i, az áramderiváltat tartalmazó tag pedig az önindukciós feszültség.

5. A PMSzM szabályozási struktúrái

Az előbbieken bemutatott MaMo-k alapján megszerkesztettük a PMSzM-os hajtás SimS-eit.

Az (5) és (12) alapján a terhelő nyomaték magába foglalja a FR és a terhelés közötti súrlódási nyomatékok összességét is.

5.1. Egyszerűsített szimulálási struktúrák szabályozók nélkül

Mivel a motor, illetve a szabályozási struktúra modellezésében több hibalehetőség adódhat, első lépésben a SimS-eket ajánlatos ideális esetben az egyszerűsített MaMo-k alapján megszerkeszteni szabályozók nélkül, feltételezve az áramvektor merőlegességét a PM fluxusára a 4.2 alfejezetben bemutatott ÁÁ-beli és dinamikus MaMo-k alapján.

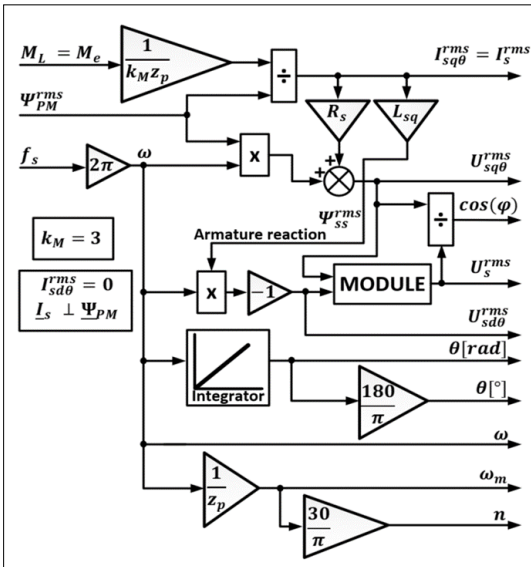
5.1.1. Egyszerűsített statikus szimulálási struktúrák (St_SimS) ÁÁ-ban

A 4.2.1. pont egyenletei alapján kétféle St_SimS is megszerkeszthető, attól függően, hogy a terhelő nyomaték mellett a feszültséget vagy a frekvenciát választjuk bemenetnek. Ezeket a struktúrákat a 4. és az 5. ábrán mutatjuk be.

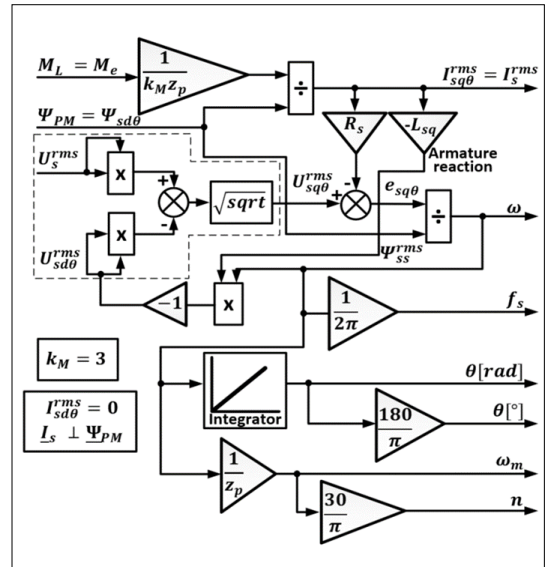
A frekvencia bemenetű struktúra (St_SimS_f) a 4. ábrán látható, melynél a feszültség a kimeneten van. Az 5. ábrán a feszültség-bemenetű struktúrában (St_SimS_U) a frekvencia lesz a kimeneten. Ami közös a 4. és 5. ábrán, az a terhelő nyomaték, mely bemenet, és egyenlő az EMNyvel, illetve az ezzel arányos armatúra áram, mely kimenet mindkét struktúrában, hasonlóképpen a motorban végbemenő fizikai jelenségekhez. Az ÁÁ-nak megfelelő St_SimS-ekben a változók effektív értékeivel szokásos számolni, ezért az EMNy koefficiense $K_M = 3$, mint ahogyan a 4. és 5. ábrákon is szerepel.

5.1.2. Egyszerűsített dinamikus szimulálási struktúrák (Dy_SimS)

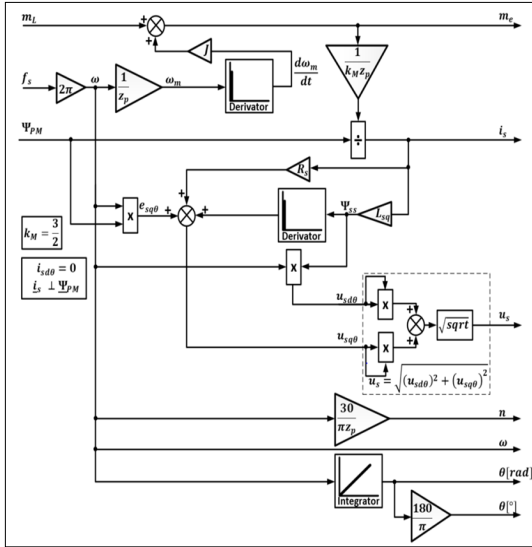
A 4.2.2. pont egyenletei alapján, hasonlóképpen a St_SimS-ekhez, kétféle dinamikus SimS szerkeszthető meg, attól függően, hogy a feszültség vagy a frekvencia van a bemeneten, melyek a 6., illetve a 7. ábrán láthatók. Ezek a struktúrák csak két deriváltat tartalmaznak: a sebességét és az



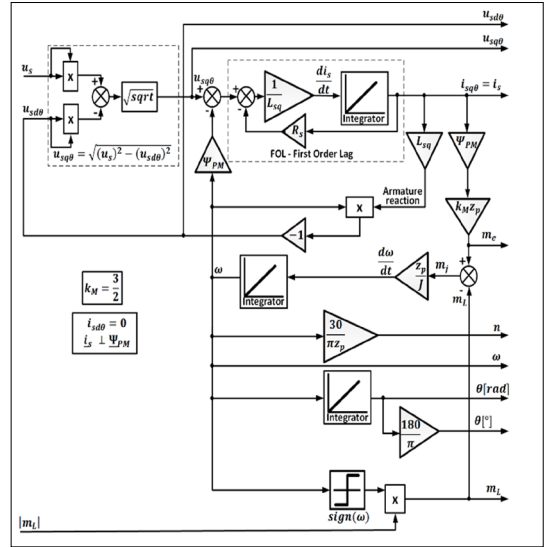
4. ábra. Statikus szimulálási struktúra tömbvázlata (St_SimS_f) a PM fluxusra merőleges árammal frekvencia és nyomaték bemenettel, illetve feszültség és áram kimenettel [8].



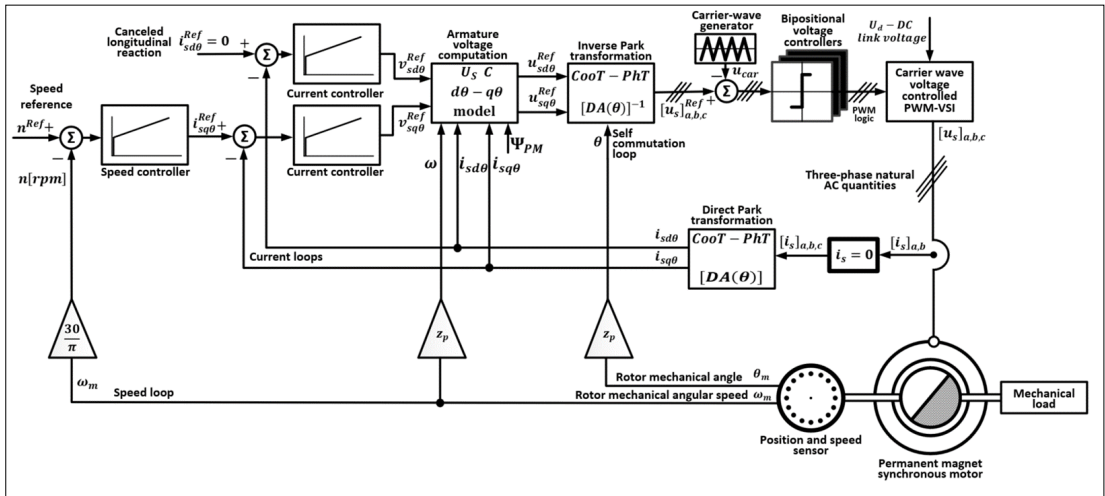
5. ábra. Statikus szimulálási struktúra tömbvázlata (St_SimS_U) a PM fluxusra merőleges árammal feszültség- és nyomaték-bemenettel, illetve frekvencia és áram kimenettel.



6. ábra. Dinamikus szimulációs struktúra tömbvázlata (*Dy_SimS_f*) a PM fluxusára merőleges árammal frekvencia és terhelőnyomaték-bemenettel, illetve feszültség és áram kimenettel.



7. ábra. Dinamikus szimulációs struktúra tömbvázlata (*Dy_SimS_U*) a PM fluxusára merőleges árammal feszültség és nyomaték bemenettel, illetve frekvencia és áram kimenettel [8].



8. ábra. Hordozóhullámú ISZM-vel vezérelt feszültség-inverterrel táplált, a PM fluxusára merőleges árammal működő szinkron motoros hajtás vektoriális szabályozási struktúrája (*VC_SimS_PWM*).

armatúra áramét, ami egyenlő a nyomatékképző (aktív) áram-ÖT-vel.

Míg a *Dy_SimS_U* struktúrában a feszültség bemeneti változó és ezért általában integrálunk, ahogyan a motortípusú MaMo-kban szokás, addig a *Dy_SimS_f* struktúrában deriválás szerepel, hasonlóképpen a generátortípusú MaMo-khoz és a feszültség a kimenő változó.

A *Dy_SimS*-ben a változók pillanatértékeinek az amplitúdójával, illetve annak megfelelő térfázo-

rok modulusával számolunk, ahogyan a klasszikus Park-féle modellekben szokásos és az EMNy koefficiense $K_M = 3/2$, mint ahogyan a **6.** és **7. ábrán** is szerepel.

5.2. Szimulációs struktúra szabályozókkal

Az implementálásra megfelelő vektoriális szabályozási struktúra a **8. ábrán** látható, ahol az áram merőlegességét a PM-fluxusra úgy biztosítjuk, hogy a (13) szerint az AVH hosszanti i_{sd0} ÖT-t

nullára szabályozzuk. Ezenkívül kaszkádban szabályozzuk a sebességet és az aktív áramot, azaz az $i_{sq\theta}$ keresztirányú ÖT-t, mely ÁÁ-ban megegyezik az armatúra-áram i_s modulusával.

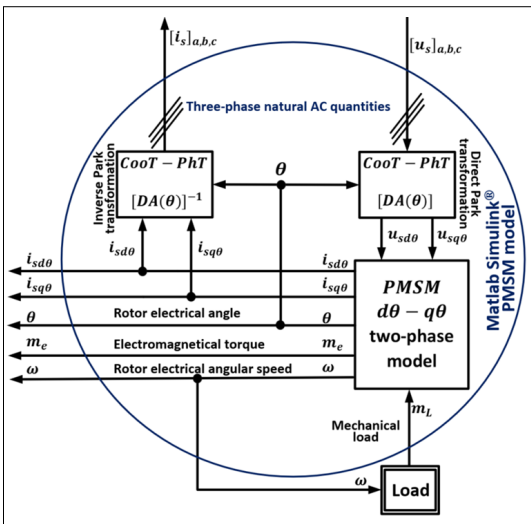
A beavatkozó eszköz egy hordozóhullámú (HH) impulzus-szélesség modulációval (ISZM) vezérelt feszültség-forrás jellegű váltóirányító (FF-VI), mely gyakorlatilag egy háromfázisú hídkapcsolású IGBT-inverter. A PM fluxusára merőleges áramvektor KF-ÖT-inek az alapjeleit előírjuk, illetve az aktív ÖT-t a sebességszabályozóval generáljuk. Mivel az inverter ISZM eljárása feszültség-modulációsjelet igényel, ezért szükség van a feszültség-alapjelek kiszámítására, amelyet az USC blokkal végzünk el, a PMSzM MaMo-ja alapján, az alábbiak szerint:

$$\begin{cases} u_{sd\theta}^{Ref} = v_{sd\theta}^{Ref} - \omega L_{sq} i_{sq\theta}; \\ u_{sq\theta}^{Ref} = v_{sq\theta}^{Ref} + \omega L_{sd} i_{sd\theta} + \omega \Psi_{PM}, \end{cases} \quad (19)$$

ahol az ω szögsebességet és az áram KF-ÖT-eket a visszacsatolásból nyerjük. A két áramszabályozó által generált alapjelet az (1)-ből származó skalár-isen egyenletek adják az alábbiak szerint

$$\begin{cases} v_{sd\theta}^{Ref} = R_s i_{sq\theta} + L_{sd} \frac{di_{sd\theta}}{dt}; \\ v_{sq\theta}^{Ref} = R_s i_{sq\theta} + L_{sq} \frac{di_{sq\theta}}{dt}. \end{cases} \quad (20)$$

A vektoriális szabályozási struktúrában a PMSzM-t a MATLAB-Simulink® könyvtári háromfázisú motormodellel szimuláltuk, melynek a tömbvázlata a 9. ábrán látható.



9. ábra. MATLAB-Simulink® könyvtári háromfázisú motormodellel tömbvázlata.

A belső PMSzM blokkot az (1)–(8) általános egyenletek alapján FRO, azaz PM fluxus/mezőorientált KF-ÖT-ekkel alkották, melynek a külső háromfázisú rendszerhez (az inverterhez és az ISZM vezérlő egységéhez) való csatlakoztatása direkt és inverz Park-féle (CooT-PhT) transzformációs blokkokkal történik. A Park-féle transzformáció két elemi transzformációból: a „3/2”-nek is nevezett Clarke-féle fázis- (PhT – „Phase”) és a konvencionális koordináta- (CooT – „Coordinate Transformation”) transzformációkból áll. Ennek a kettőnek az összevont mátrix-operátorja felel meg a Park-transzformációnak:

$$[DA(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Ezzel a direkt Park-transzformáció általánosan az alábbiak szerint írható fel:

$$\begin{bmatrix} g_{sd\theta} \\ g_{sq\theta} \\ g_{s0} \end{bmatrix} = [DA(\theta)] \begin{bmatrix} g_{sa} \\ g_{sb} \\ g_{sc} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

ahol a g változó lehet áram (i), feszültség (u , v , e , Δu), fluxus (Ψ) stb [1–3].

Az inverz transzformáció mátrix-operátorja

$$[DA(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

mellyel az inverz transzformáció általánosan

$$\begin{bmatrix} g_{sa} \\ g_{sb} \\ g_{sc} \end{bmatrix} = [DA(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} g_{sd\theta} \\ g_{sq\theta} \\ g_{s0} \end{bmatrix}. \quad (24)$$

Az inverz Park-transzformációt a 9. ábrán a motorblokkban a kimeneten áramra, a 8. ábrán a vezérlési ágba feszültségre alkalmaztuk, ahol gyakorlatilag megfelel egy vektoriális háromfázisú szinuszel-generátornak.

A direkt Park-transzformációt a 8. ábrán a szabályozási struktúrában, a visszacsatolásban az áramra, a 9. ábrán a motorblokkban, a bemeneten feszültségre alkalmaztuk.

Mivel a motorblokk MaMo-jában az áram KF-ÖT-i állapotváltozók, közvetlenül innen csatlakozhatjuk

vissza az UsC-blokk bemenetéléhez, így a szimulációban nem lesz szükség a **8. ábra** struktúrájában szereplő direkt Park-transzformációra csak implementálás alkalmával, viszont szükség van a feszültségmodulációs alapjelek generálására, mely inverz Park-transzformációval történik.

Ahhoz hogy a **8. ábrán** bemutatott vektoriális szabályozási struktúra szimulálási eredményei kompatibilisabbak legyenek a motorszámításokkal és az egyszerűsített struktúrák szimulálási eredményeivel, melyek szinuszos működésre vonatkoznak, a struktúrát először szinuszos változókkal fogjuk szimulálni, eltekintve az inverter szaggatásától, kiiktatva az ISzM-vezérlést.

6. Szimulálási eredmények

A szimulálásokat fokozatosan végeztük el, kezdve a legegyszerűbb statikus struktúrákkal, összehasonlítva a dinamikusakkal, melyekben az áram merőlegességét a PM fluxusára szabályozó nélkül valósítottuk meg. Így lehet ellenőrizni a motor megmért paramétereit és kiszámított adatait az NMP-ben. Csak ezek után szimuláljuk a hajtásrendszert a **8. ábrán** bemutatott SimS-sel. A szimulált szabályozási struktúráknál az eredő tehetetlenségi nyomaték értéke $J_{Eq} = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$, hasonlóképpen a Dy_SimS-ek szimulálásával. Ez az érték nem lépi túl a katalógusban megengedett határértéket, mely ebben az esetben $J_{Eq}^{Max} = 6,634 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$.

6.1. Egyszerűsített szimulálási struktúrák feszültség-bemenettel

A feszültség és nyomaték bemenetű statikus (St_SimS_U) és dinamikus (Dy_SimS_U) struktúra szimulálási eredményei a **10–12. ábrákon** láthatók.

A **10. ábrán** követhető, hogy a feszültséget az

$$U_{s0} = \Delta u_R = R_s I_{SN}^f = 5.33 \Omega \cdot 1.4 \text{ A} = 7.462 \text{ V}$$

„boost”/küszöbértékről, a nyomatékot a nullából 1 s alatt lineárisan növeltük a névleges értékig, majd 1 s-ig megtartottuk ezeken az értékeken, miközben a rendszer ÁÁ-ba került és az áram valamint a sebesség is elérte a névleges értékét. Ezután ugyancsak 1 s alatt a névleges nyomatékot megtartva terhelés alatt csökkentettük a feszültséget az U_{s0} küszöbértékre, amely nulla sebességnél és névleges terhelésnél megfelel az ÁÁ-nak.

A **10. ábra** a fent leírt ciklusnak megfelelően leírt pályát mutatja be a statikus és dinamikus modellek alkalmazása esetén.

Jól látható a két mechanikai jelleggörbének (MJG) az összemetsződése a két ÁÁ-ban a névleges nyomatékon és a névleges sebességen (ez az NMP), illetve a nulla sebességen.

A **11. és 12. ábrákon** az idődiagramokon az 1–2 s és 3–4 s intervallumokban látható, hogy ÁÁ-ban a megfelelő változók egyenlők lesznek, azaz a statikus és a dinamikus görbék egymásra tevődnek.

Az áram és a vele arányos EMNy tranziensei a feszültség szabályozás hiányának tulajdoníthatók, annak ellenére, hogy nem lépcsőben, hanem lineárisan változó rámpa függvénnyel változtattuk a bemeneteken a nyomatékot és a feszültséget, mind induláskor, mind fékezéskor.

Egészen más eredményt kapunk a frekvenciabemenet esetén, ahol a feszültség kiszámítása megfelelne egy ideális szabályozásnak.

6.2. Egyszerűsített szimulálási struktúrák frekvenciabemenettel

A frekvencia- és a nyomatékbemenetű statikus (St_SimS_f) és dinamikus (Dy_SimS_f) struktúra szimulálási eredményei a **13–15. ábrákon** láthatók, ahol a frekvencia helyett a vele arányos fordulatszámot ($n = 60 f_s / z_p$) ábrázoltuk.

Indításkor a gyorsulás és a fékezés állandó dinamikai nyomaték hatása alatt történik, amikor a lineárisan növekvő terhelés alatt, az áram is lineárisan nő.

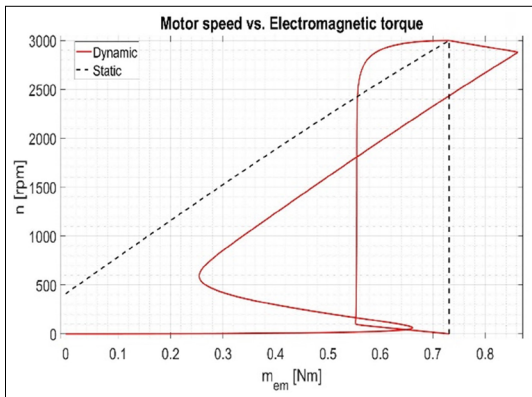
A Dy_SimS_f struktúrában a deriválás okozta tüskéket a lementett eredményekben az „ischange” („in_array”, „MaxNumChanges”, „maxChanges” paraméterekkel) MATLAB®-függvénnyel detektáltuk és szűrtük ki.

Összehasonlítva az előző alfejezet eredményeivel, ahol a feszültség bemenetű struktúrájánál lecsengő tranziensek jelentek meg, melyek az egytárolós tagnak (FOL – „First Order Lag”) tulajdoníthatók, addig a frekvenciabemenetű struktúrájánál ezek a tranziensek pillanatszerűen tűnnek el.

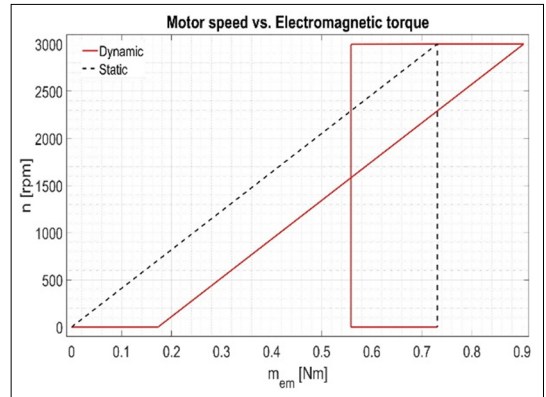
6.3. ISzM nélküli szabályozási struktúra szinuszos változókkal

A vektoriálisan szabályozott szimulálási struktúra (VC_SimS_Sin) ideális szinuszos működését úgy oldjuk meg, hogy a **8. ábrán** eltekintünk a szaggatástól, azaz kiiktatjuk az ISzM-invertert és a **9. ábra** motormodell háromfázisú betáplálását a három $[u_s]_{a,b,c}^{Ref}$ modulációs alapjellel szimuláljuk. A VC_SimS_Sin szimulálási eredményei a **16–18. ábrákon** és a **22. ábrán** láthatók.

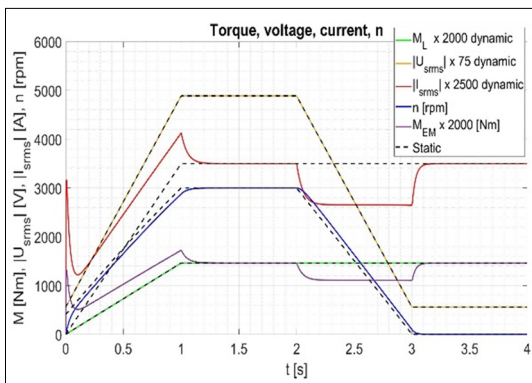
A szimulációt ugyanolyan körülmények között végeztük el, mint az egyszerűsített SimS-eknél,



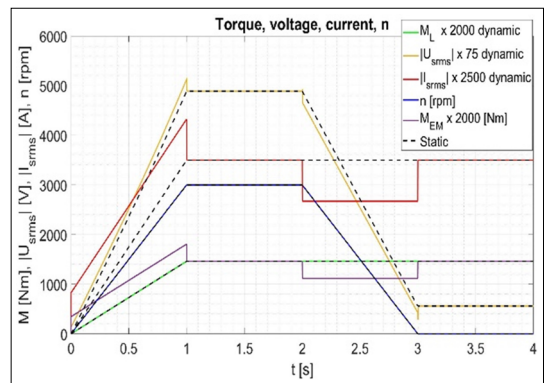
10. ábra. Statikus (fekete szaggatott) és a Dy_SimS_U struktúrával szimulált (piros) mechanikai jelleggörbék a feszültség-bemenetű struktúráknál.



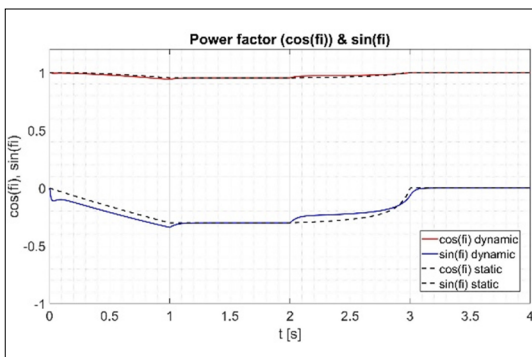
13. ábra. Statikus (fekete szaggatott) és a Dy_SimS_f struktúrával szimulált (piros) mechanikai jelleggörbék a frekvencia-bemenetű struktúráknál.



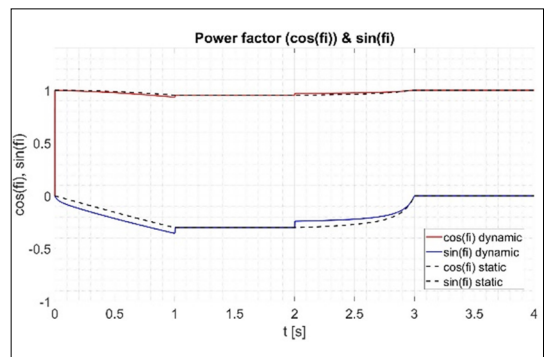
11. ábra. Statikus (fekete szaggatott) és a Dy_SimS_U struktúrával (színes) szimulált görbék: a bemeneti feszültség (sárga) és a terhelő nyomaték (zöld), valamint a kimeneti EMNy (lila), az áram (piros) és a sebesség (kék) időbeli változása.



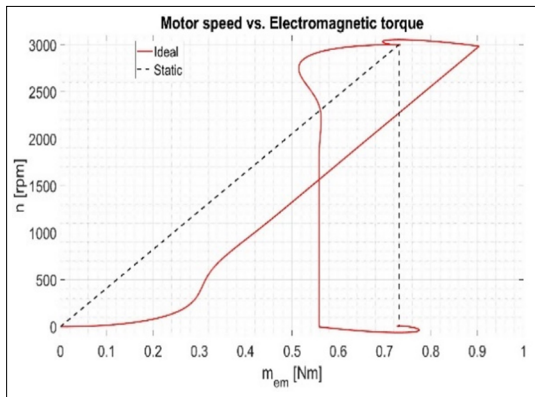
14. ábra. Statikus (fekete szaggatott) és a Dy_SimS_f struktúrával (színes) szimulált görbék: a bemeneti sebesség (kék) és a terhelő nyomaték (zöld) valamint a kimeneti EMNy (lila), az áram (piros) és a feszültség (sárga) időbeli változása.



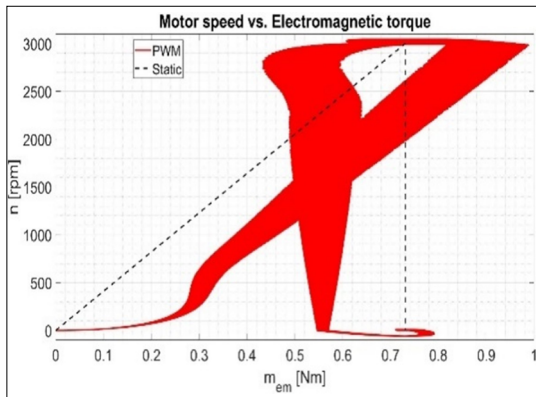
12. ábra. Statikus (fekete szaggatott) és a feszültség-bemenetű Dy_SimS_f struktúrával (színes) szimulált $\cos\varphi$ teljesítmény-tényező (piros) és a φ fáziseltolás szinusza (kék).



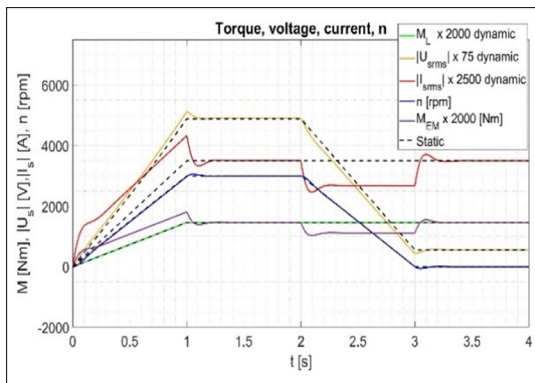
15. ábra. Statikus (fekete szaggatott) és a frekvencia-bemenetű Dy_SimS_f struktúrával (színes) szimulált $\cos\varphi$ teljesítmény-tényező (piros) és a φ fáziseltolás szinusza (kék).



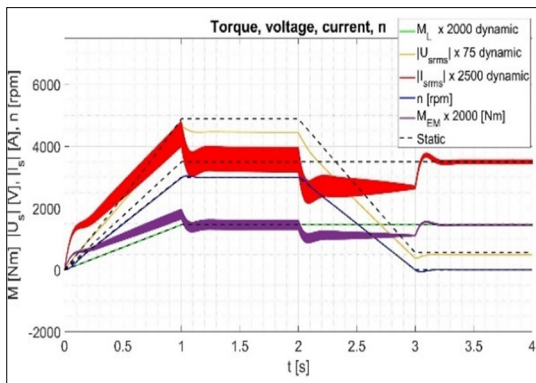
16. ábra. Statikus (fekete szaggatott) és a Simulink® motor-blokkos VC_SimS_Sin vektoriális szabályozási struktúrával szimulált dinamikus (piros) mechanikai jelleggörbék.



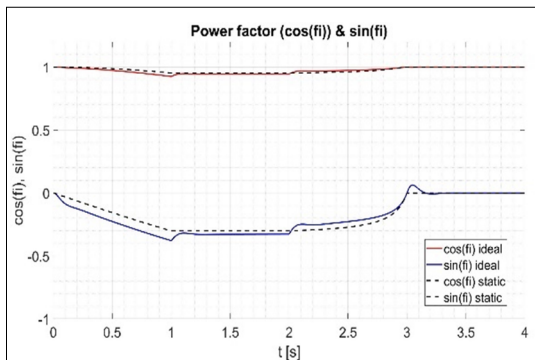
19. ábra. Statikus (fekete szaggatott) és a Simulink® motor-blokkos vektoriális szabályozási VC_SimS_PWM struktúrával szimulált dinamikus (piros) mechanikai jelleggörbék.



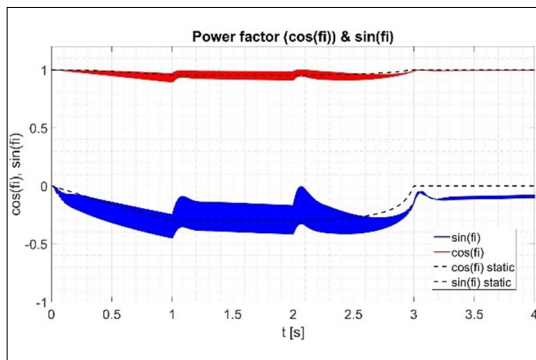
17. ábra. Statikus (fekete szaggatott) és vektoriális szabályozási VC_SimS_Sin struktúrával szimulált görbék: a bemeneti terhelő nyomaték (zöld), a kimeneti EMNy (lila), a sebesség (kék), az áram (piros) és a feszültség (sárga) időbeli változása.



20. ábra. Statikus (fekete szaggatott) és vektoriális szabályozási VC_SimS_PWM struktúrával szimulált görbék: a bemeneti terhelő nyomaték (zöld), a kimeneti EMNy (lila), a sebesség (kék), az áram (piros) és a feszültség (sárga) időbeli változása.



18. ábra. Statikus (fekete szaggatott) és vektoriális szabályozási VC_SimS_Sin struktúrával szimulált $\cos\varphi$ teljesítménytényező (piros) és a φ fáziseltolás szinusz (kék).



21. ábra. Statikus (fekete szaggatott) és vektoriális szabályozási VC_SimS_PWM struktúrával szimulált $\cos\varphi$ teljesítménytényező (piros) és a φ fáziseltolás szinusz (kék).

ugyanazon terhelési ciklus szerint, valamint a sebesség alapjelét is a St_SimS_f-nek megfelelő rámpa függvényével növeltük indításkor és csökkentettük fékezéskor.

A VC_SimS_Sin struktúra szimulálásával ellenőrizni lehet a Simulink® motortömb paraméterezésének a helyességét, ha összevetjük a már előzőleg szimulált egyszerűsített SimS-ekkel, ugyanis ÁÁ-ban ugyanazokat az eredményeket kell kapnunk, függetlenül, hogy melyik SimS-ről van szó.

6.4. ISZM-feszültséggel táplált PMSzM szabályozási struktúrája

A 8. ábrán bemutatott vektoriálisan szabályozott hajtásrendszert szimuláltuk a 9. ábra háromfázisú motormodelljével (a VC_SimS_PWM-nek nevezett struktúrával) ugyanolyan körülmények között, mint az előző struktúrákat, azzal a különbséggel, hogy beiktattunk egy ISZM-vezérlésű ideális szaggató inverter-modellt, mely kétpontszabályozáson alapszik.

A motorblokkot az ideális inverter kimenetével a „Controlled Voltage Source” Simulink® könyvtári blokk kapcsolja össze.

A hordozóhullám $f_s^{HH} = 5$ kHz-es frekvenciájával történő szaggatás szimulációs eredményei a 19–21. ábrákon és a 23. ábrán láthatók. Az egyenáramú közbenső kör feszültsége 220 V.

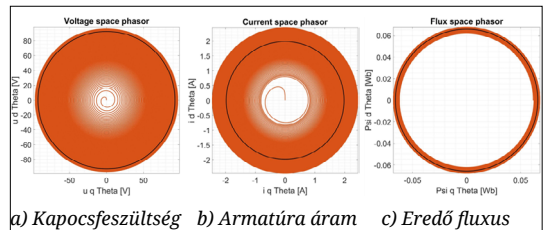
A szimulációban az „ode23t(mod.Stiff/Trapezoidal)” algoritmust alkalmaztuk, ahol az integrálási lépés felső korlátja 5 μ s volt.

Összehasonlítva a 6.3. alfejezet eredményeivel, jól látható az ISZM-vezérlés hatása az áram és az EMNy lüktetésében.

Az ISZM-vezérlés hatása az áram ÖT-k szabályozóinak a bemeneti hibáiban is jelentkezik, míg a sebesség-hibában már nem vehető észre, ugyanis a hajtásrendszer a tehetetlenségi nyomatóknak köszönhetően természetes úton kiszűri.

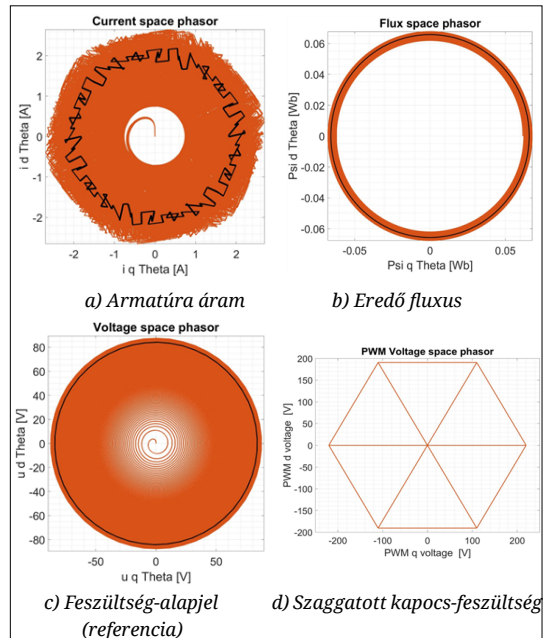
A hordozóhullám ajánlott minimális frekvenciája legalább 20-szorosa kell, hogy legyen a maximális működési frekvenciának, ami a névleges 200 Hz-nél $f_{Min}^{HH} = 4$ kHz lenne, tehát a szimulációban alkalmazott szaggatási frekvencia megfelel ennek a feltételnek.

Észrevehető, hogy az indításnál a frekvencia növekedésével az áram és az EMNy lüktetése egyre nő. Ez azzal magyarázható, hogy alacsonyabb sebességeken, ahol a betáplálási frekvencia is alacsonyabb, egy periódus alatt nagyobb a szaggatások száma, mint a névleges sebességen.



a) Kapocsfeszültség b) Armatúra áram c) Eredő fluxus

22. ábra. A VC_SimS_Sin struktúra szimulált változóinak a térfázor-pályája indításkor (narancs) 1,5 s-ig, illetve az NMP-n (fekete) tíz periódus alatt 1,45–1,5 s intervallumban.



23. ábra. A VC_SimS_PWM szimulált struktúra változóinak a térfázor-pályája indításkor (narancs) 1,5 s-ig, illetve az NMP-n (fekete) tíz periódus alatt 1,45–1,5 s intervallumban.

7. Következtetések

A kétféle (U és f) bemenetű egyszerűsített statikus SimS struktúrák szimulációs eredményei megegyeznek. A dinamikus SimS-ek ÁÁ-ban megegyeznek viszont a tranziensei különböznek.

A dolgozatban bemutatott eljárás alapján le lehet ellenőrizni egy adott PMSzM kísérletileg meghatározott paramétereit és kiszámított adatait, valamint az adatapon megadott névleges értékek alapján a szimulációkban alkalmazott MaMo-k paraméterezésének a helyességét, mely végül szükséges a szabályozási struktúra implementálásához.

Az elkövetkezőkben a motor betáplálását a „Universal Bridge” Simulink® könyvtári IGBT-s inverter modellel fogjuk szimulálni, mely még jobban megközelíti a gyakorlati megoldást.

A bemutatott szimulációs eredmények a motor adatainak a helyes azonosítását és a szabályozási struktúra működőképességét igazolják.

Az elkövetkezőkben a vektoriális szabályozási struktúrában a hordozóhullámos ISzM-vezérlést fel lehet cserélni a térfázoros ISzM-vel (SVM – „Space Vector Modulation”), melynél optimalizálni lehet az inverter működését az úgynevezett lapostetős kétfázisú szaggatással („Flat-top two-phase modulation”) redukálva a kommutációs veszteségeket akár 30%-kal is.

A kutatás a hajtásrendszer szabályozásának az implementálásával folytatódik a Sapia EMTE Marosvásárhelyi Karának az erősáramú laboratóriumában felépített próbapadon.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Kelemen A., Imecs M.: *Sisteme de reglare cu orientare după cîmp ale mașinilor de curent alternativ*. Editura Academiei Române, București, 1989.
- [2] Kelemen Á., Imecs M.: *Vector Control of AC Drives*. Vol. 2: *Vector Control of Synchronous Machine Drives*. Écriture Kiadó, Budapest, 1993.
- [3] Imecs M., Szabó Cs.: *Permanens-mágneses-forgórészű szinkronmotor. Terminológia, Magyar nyelvű szakelőadások a 2002–2003-as tanévben*. Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság – EMT, Kolozsvár, 2004, 56–64.
- [4] Imecs M., Birou I., Jánky P., Kelemen Á.: *High performance control of PM-synchronous servomotors using the MS320C5x processor*. Intelligent Motion, International Conference on Power Electronics and Intelligent Motion – PCIM'97, Nürnberg, Germany, 1997, 157–166.
- [5] Imecs M.; Birou, I.; Szabó, Cs.: *Control strategies for synchronous motors with permanent magnet or constant exciting current*. Proceedings of Power Electronics and Intelligent Motion International Conference – PCIM'99, Nurnberg, Germany, June 22–24, 1999, 339–344.
- [6] Imecs M., Birou I., Szabó Cs.: *Modelling and simulation of vector-control strategies for PM-synchronous motors*. Proceedings of the IEEE-TTTC International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics Q&A-R 2000, Tome 2, Cluj-Napoca, 2000, 151–156.
- [7] *** Product Details - Industry Mall - Siemens China, SIMOTICS S-1FL6 SERVO MOTOR Manual (add-furnace.com)
<https://www.add-furnace.com/product-catalog/siemens/simotics-s-1fl6-servo-motor-manual.pdf>
- [8] Imecs M., Ferencz J., Kelemen A.: *Vektoriálisan szabályozott permanens mágneses szinkron gépek hajtás egyszerűsített modellezése és szimulálása*. ENELKO 2023 – XXIV. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, Kolozsvár, 2023. okt. 12–15, EMT, Kolozsvár, 2023.10.11, 7–13.
<https://ojs.emt.ro/enelko-szamokt/issue/view/59>
<https://ojs.emt.ro/enelko-szamokt/article/view/1340/1350>
- [9] IEC/EN 60034-30-1, International Efficiency Classes, Standard on Efficiency Classes for Low Voltage AC Motors.
<https://webstore.iec.ch/publication/136>



AZ EVOLVENS FOGASKERÉKPÁR CSÚSZÁSÁNAK EGZAKT MODELLEZÉSE

NON APPROXIMATIVE MODELLING OF INVOLUTE GEAR PAIR SLIDING

Máté Márton,¹ Szócs Krisztina²

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

² Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi kar, Gépészmérnöki Tanszék.
Marosvásárhely, Románia, szocs.krisztina@student.ms.sapientia.ro

Abstract

One of the main problems with the operation of involute tooth gears is that during engagement, the tooth profiles slide. The point of contact is the only point where pure rolling occurs among the engaging tooth profiles. The sliding, coupled with abrupt changes in load, collectively contribute to the failure and various malfunctions of the gears. In this research, I study the behavior of gears theoretically during sliding. I examine existing mathematical models for describing sliding and analyze their results. Then, I present a precise mathematical model that I have developed. In creating the model, my aim was to avoid any geometric approximations and only consider the profile points where actual engagement between the gears could occur. Therefore, I interpret the contact points within the real engagement zone. My goal is to create a mathematical solution that is equally applicable to simple and general involute tooth gear drives and provides an accurate, realistic description of the relative sliding of gears.

Keywords: gear, sliding, exact method, gear engagement.

Összefoglalás

Az evolvens fogazatú fogaskerekek működésének egyik fő problémája az, hogy a kapcsolódás során a fogprofilok csúszva gördülnek. A csúszás a terhelés ugrásszerű változásával közösen okozza a fogaskerekek tönkremenetelét és különböző meghibásodásait. Dolgozatomban a fogaskerekek viselkedését elméleti síkon tanulmányozom, csúszás során. A csúszás leírására szolgáló, létező matematikai modelleket és azoknak az eredményeit vizsgálom, majd egy általam létrehozott, egzakt matematikai modellt vezetek fel. Az általam javasolt modell létrehozása során szempontjaim között szerepelt, hogy kerüljek bármely geometriai közelítést, és csak azokat a profilpontokat vizsgáljam, ahol ténylegesen létrejöhet a kapcsolódás a fogaskerekek között. Tehát, a kapcsolódási pontokat a valós kapcsolódási szakaszon belül értelmezem. Célom, hogy egy olyan matematikai megoldást hozzak létre, amely egyformán alkalmazható elemi és általános fogazatú evolvens fogaskerékhajtásokra, és pontos, valósághű eredménnyel szolgál a fogaskerekek relatív csúszásának a leírására.

Kulcsszavak: fogaskerék, csúszás, egzakt módszer, fogaskerekek kapcsolódása.

1. Bevezetés

A fogaskerékhajtások esetén, a ciklois hajtás kivételével, a fogak nem tisztán gördülnek le egymáson, csúszás lép fel. Ez a fogak rohamos kopásához vezethet. A fogak gyakori meghibásodásai közé tartoznak a fogfelületi sérülések, mint

a progresszív kopás, a pitting és a berágódás. A fogfelületek közti csúszás kopást okoz, főképp az összeszerelést követő „bejáródási” szakaszban, amikor a fogfelületek kiemelkedő mikrogeomet-

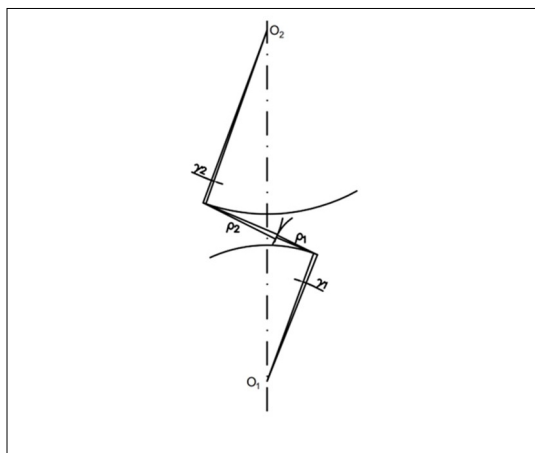
riai egyenetlenségei az ellenkerékkel való csúszás következtében lekopnak. Ez a fajta kopás idővel csökken, majd megszűnik. Nem tekinthető hibának, mert a fogaskerekék érintkezési felületének növekedéséhez vezet, amelynek következtében a hajtás várható élettartama megnő. A problémát a progresszív kopás jelenti, amely abban az esetben lép fel, ha a kopás a bejáratási szakasz után fokozódik. Ennek okai közé sorolhatjuk a következőket: hiányos vagy elégtelen kenés, nem megfelelő kenőanyag, illetve az abba került szennyeződés vagy a fogfelületek elégtelen keménysége. A pitting a fogfelület és a gördülőfelület metszészvonala tájékán mutatkozik. A megjelenésének oka, hogy a felületi nyomófeszültség és a fogfelületek egymáson való csúszása által ébresztett nyírófeszültség meghalad egy, a ciklusszámhoz kapcsolódó határértéket. Először apró hajszálrepedések jelennek meg a gördülőfelületi fogirányvonal tájékán, a felületek alatt, ahol az összetett igénybevétel a legnagyobb értékű. Ahogy ezek a hajszálrepedések eljutnak a felületig, anyagdarabkák töredeznek ki, helyükön gödröcskéket képezve, amelyeknek a szélei érdesek. A pitting oka főképp az anyag felületi kifáradása nem megfelelő méretezés vagy egyenlőtlen felületi terhelésselosztás miatt, valamint a fogfelületek nem megfelelő keménysége. A karcok a fogfelületen a fogprofilok csúszásának irányába mutató rövid, egyenes, nagyon kis mélységű hornyok, amelyeket a kenőolajba került porszemcsék vagy egyéb apró szennyeződések okoznak. A barázdák a karcoknál mélyebbek, és csoportosan lépnek fel. Nem megfelelő kenés végett fémes érintkezés jön létre a fogfelületek között, és azok pillanatnyilag összehegednek. Viszont a fogfelületek relatív csúszása végett az összehegedt részecskék az egyik fogfelületből kiszakadnak. Az így kiszakadt részecskék a kenőolajat szennyezik, és ezáltal további sérüléseket okozhatnak a fogfelületen. Ez a jelenség a berágódás. A XX. században számos tanulmány témája volt a fogaskerekék terhelhetőségének és élettartamának növelése. Áthatóan tanulmányozták a fogfelületek között fellépő csúszást, illetve a csúszási sebességet. Vidéki [1] rálátott az élettartam és a csúszási sebesség közötti szoros kapcsolatra. Megállapította, hogy a csúszási sebesség csökken, ha a tengelytávolságot növeljük, amennyire a fogazat biztosította lehetőségek megengedik. Diker [2], Szeniczai [3] és Bolotovszkij [4] a fogaskerék-hajtások méretezésénél a relatív csúszást vették alapul. Szeniczai elkészítette a relatív csúszást leíró modellt evolvens profilú fogaskerék-hajtásokra. Ez a modell közelítésen alapszik, hiszen az evolvens-

ívhossz helyett a simulókör ívhosszával számolt, ahol a simulókörnek a sugara a görbületi sugárral egyenlő. Számításai szerint, a körívek hosszát a görbületi sugár, jelölés szerint ρ és a fogaskerék szögelfordulásának, jelölés szerint γ , szorzataként kaphatjuk meg, amely az előzőek alapján az egyik fogaskeréken $\rho_1 \cdot \gamma_1$, a másik fogaskeréken $\rho_2 \cdot \gamma_2$. A relatív csúszást az ily módon kiszámított körívek hosszának különbségének a kisebb körív-hosszhoz való viszonyításából kapjuk.

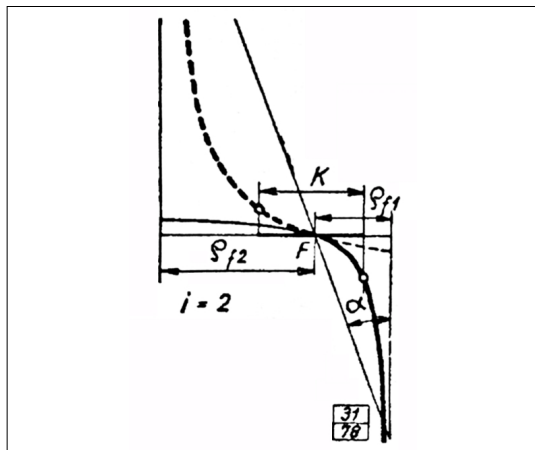
Tehát, az **1. ábra** alapján a relatív csúszás értéke:

$$\chi = \frac{\rho_1 \cdot \gamma_1 - \rho_2 \cdot \gamma_2}{\rho_1 \cdot \gamma_1} \quad (1)$$

A relatív csúszást a modell alapján egy hiperbolafüggvény írja le, amely mutatja, hogy a relatív csúszás a fõponton zérus, és onnan távolodva folyamatosan növekszik (2. ábra).



1. ábra. A fogaskerek a kapcsolódás pillanatában



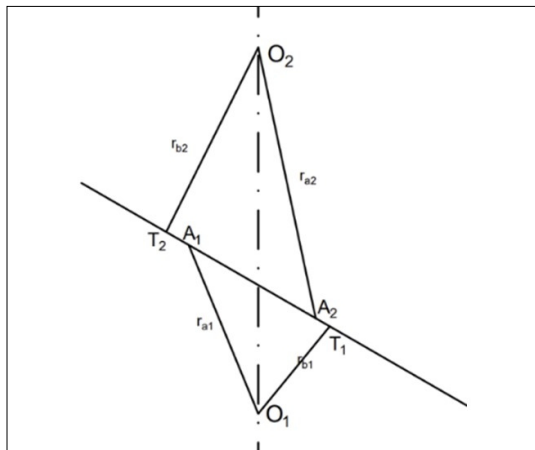
2. ábra. A relatív csúszásgörbe [3]

A modell ugyanakkor azt is mutatja, hogy a kapcsolódás főpontjában a relatív csúszás értéke zérus. Ez azt vonná maga után, hogy abban a pontban nincs kopás. Ennek az állításnak Gavrilenko [5] kísérletei ellentmondtak. Kísérletei által új módszert hozott létre a fogaskerek méretezésére. A csúszásgyorsulásokat használta fel a fogfelületkopások helyének és nagyságának a meghatározásához. A fogfelületek tönkremenetelét a relatív csúszás hely szerinti deriváltjának a kapcsolóvonal menti változásával írta le. A Ganz-Botka-féle evolvens fogazatrendszer alapját szintén a relatív csúszás adja. Botka [6] a fogaskerek tervezésekor a relatív csúszás kiegyenlítésére törekedett. Bizonyította, hogy ha a kapcsolódási határpontokban a relatív csúszás értékei ki vannak egyenlítve, akkor az maga után vonja a fogfelületek pillanatnyi hőmérséklet-emelkedésének és Hertz-féle feszültség és a csúszási sebessége szorzatainak a kiegyenlítését és minimalizálását.

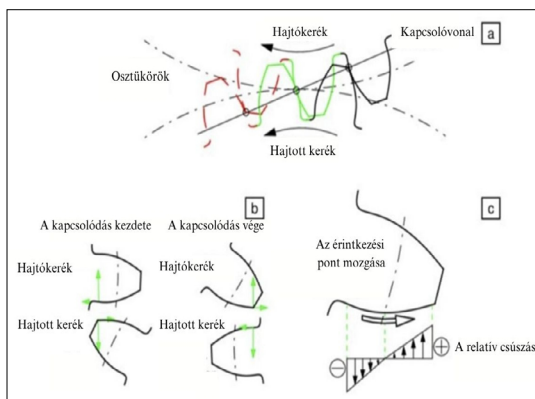
Napjainkban is folynak a kutatások a fogaskerék-hajtások méretezéséről, amelyekben a relatív csúszást, illetve a csúszásgyorsulásokat használják fel [7]. Számos tanulmány alapja, amely a relatív csúszáshoz kapcsolódik, megegyezik a Szeniczai által javasolt modellel, amely csak közelíti a valós geometriai viszonyokat. Dolgozatomban ezt a modellt kívántam újragondolni, úgy, hogy elkerüljem a geometriai közelítéseket. Kutatásom célja ezáltal, hogy egy pontosabb, valóságot tükröző értéket kapjak a relatív csúszásra. Feltételezésem szerint ez a jövőben hozzásegíthet növelt élettartamú fogaskerék-hajtások tervezéséhez.

2. A javasolt matematikai modell

A kutatásom alapját az képezte, hogy elkerüljek bármelyfajta geometriai közelítést a relatív csúszás felírása során. Azokat a pontokat kívántam vizsgálni, ahol a fogfelületek közötti kapcsolódás ténylegesen létrejöhet, így a kapcsolódási pontokat a valós kapcsolódási szakaszon belül értelmeztem. Ennek elérése érdekében az Erney-féle vonalas ábrát vettem alapul, amely a fogaskerék-hajtás lényeges geometriai elemeit tartalmazza a körök felrajzolása nélkül [8]. Az ábra szerint a kapcsolóvonalat az alapkörök közös érintője képezi. A tulajdonképpeni kapcsolódás az A_1A_2 szakaszon jön létre, amelyet a kapcsolóvonal és a fejkörök A_1 , illetve A_2 metszéspontjai határoznak meg (3. ábra). Az elméleti kapcsolószakaszt az alapkörök kapcsolóvonalat érintő T_1 és T_2 pontjai határozzák meg.



3. ábra. Az Erney-féle vonalas ábra egyszerűsített modellje



4. ábra. A fogaskerék-hajtások csúszása, [9]
a) A fogak kapcsolódása hajtás során;
b) A fogak pozíciója a kapcsolódás elején és végén; c) A fogakon fellépő relatív csúszás

Az 4.a. ábrán láthatjuk a kapcsolóvonal és a fogak helyzete közötti kapcsolatot. Látható, hogy a kapcsolódási pontok bármely esetben a kapcsolóvonalra helyezkednek el. Az 4. c. ábra üzenete ekvivalens a 2. ábrán látottakkal: a főpontban a relatív csúszás értéke zérus, onnan távolodva folyamatosan növekszik.

A következőkben ellenőriztem a fogaskerék-hajtás optimális méretezését. Megvizsgáltam, hova esik a talpkörök által kimetszett pont a kapcsolóvonalra. Ez abból a szempontból jelentős, hogy amennyiben az elhelyezkedésük nem megfelelő, a hajtópár újraméretezését követelné a feladat, hiszen ezeken a körökön belül a helyes kapcsolódást biztosító evolvens profil helyett a foglábgorbe származtatott hurkolt evolvens

vagy epicikloisa található, és az evolvens profilnak nem szabad a foglábgörbével kapcsolódnia. Kijelenthetjük, tehát, hogy a kapcsolódás akkor megfelelő, amennyiben az ellenkerék fejköre a kapcsolószakaszt az adott kerék talpköri és alapköri pontja által meghatározott szakaszon kívül metszi.

Első lépésként felvesszük az alapkörök kapcsolóegyenest érintő, T_1 és T_2 pontjait. A továbbiakban felvesszük a fejkörök és a kapcsolóvonal A_1 és A_2 metszéspontjait. A **3. ábra** alapján felírhatók a következő összefüggések:

$$T_1 A_1 = \sqrt{r_{a1}^2 - r_{b1}^2} \quad (2)$$

$$T_2 A_2 = \sqrt{r_{a2}^2 - r_{b2}^2} \quad (3)$$

$$T_1 T_2 = a_w \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

$$T_1 A_2 = T_1 T_2 - T_2 A_2 \quad (5)$$

$$T_2 A_1 = T_1 T_2 - T_1 A_1 \quad (6)$$

$$A_1 A_2 = T_1 T_2 - T_1 A_2 - T_2 A_1 \quad (7)$$

Felvesszük a P pontot, amely a kapcsolóvonal és a gördülőkör harmas metszéspontja, majd a **5. ábrát** megfigyelve, felírhatjuk az alábbi egyenleteket:

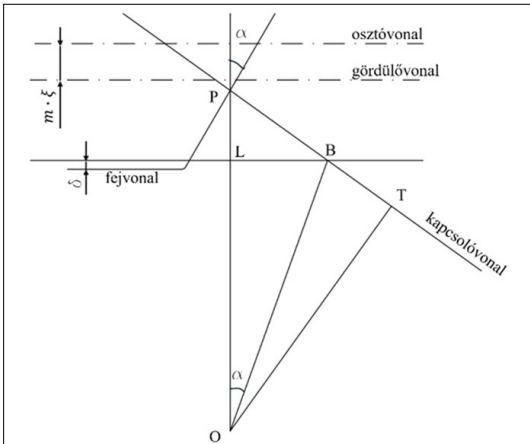
$$OT = \frac{m \cdot z}{2} \cdot \cos \alpha \quad (8)$$

$$LP = (h_0 - \xi + c_0 - \delta) \cdot m \quad (9)$$

$$PB = \frac{LP}{\sin \alpha} \quad (10)$$

$$BT = PT - PB = OT \cdot \tan \alpha - PB \quad (11)$$

$$r_t = \sqrt{BT^2 + OT^2} \quad (12)$$



5. ábra. A talpkörök sugarainak kiszámítása

A fentiekből következik, hogy a távolság a talpkörök és a fejkörök által a kapcsolóvonalon ki-metszett pontok és az alapkörök érintési pontjai között:

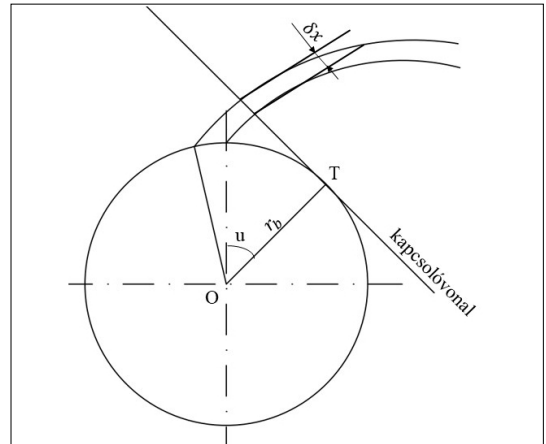
$$B_1 T_1 = \sqrt{r_{t1}^2 - r_{b1}^2} \quad (13)$$

$$B_2 T_2 = \sqrt{r_{t2}^2 - r_{b2}^2} \quad (14)$$

Az alapkörök érintési pontjai, valamint a talpkörök és a fejkörök metszéspontjai jelölik ki a valóságosan működő kapcsolószakaszt. A kapcsolódás akkor jó, ha az ellenkerék fejköre a kapcsolószakaszt az adott kerék talpköri és alapköri pontja által meghatározott szakaszon kívül metszi, azaz

$$T_1 A_2 \geq T_1 B_1 \text{ és } T_2 A_1 \geq T_2 B_2 \quad (15)$$

Az új modell felírásához a csúszást két, egymástól véges távolságra lévő kapcsolódási pont távolságának megfelelő Δl_1 és Δl_2 evolvensív-hosszak különbségeként definiáltam. Az evolvensék ívhosszainak kiszámításához az (16) és (17) összefüggéseket használtam fel. Az evolvensív-hosszak felírásához az evolvenst generáló egyenes alapkörön való legördülésének megfelelő központi szöget kell felhasználnunk, vagyis egy u paramétert. Az u szögelfordulás alatt a generáló egyenes által érintett körív hossza megegyezik az r_b sugarú alapkör és az u szögelfordulás szorzatával. Az evolvenst generáló egyenes az alapkörhöz képest síkmozgást végez, amelynek pillanatnyi pólusa az érintési pont, vagyis egy adott lefejtési helyzetben az evolvens görbületi sugarát pontosan az $r_b u$ hosszúságú szakasz adja meg, így az evolvensgörbe elemi ívhossza $dl = r_b u du$. Ezzel kifejezhető két, véges u szögelfordulás-értéknek megfelelő lefejtett evolvensív-hossz (**6. ábra**):



6. ábra. Az evolvensív-hossz kiszámítása

$$\Delta \ell_1 = \int_{u_1}^{u_2} r_{b1} \cdot u \cdot du = \frac{r_{b1} \cdot (u_2^2 - u_1^2)}{2} \quad (16)$$

$$\Delta \ell_2 = - \int_{u_1}^{u_2} r_{b2} \cdot u \cdot du = \frac{r_{b2} \cdot (u_1^2 - u_2^2)}{2} \quad (17)$$

A relatív csúszás értékét megkaphatjuk, ha az evolvensív hosszak különbségét a kisebbik evolvensív hosszhoz viszonyítjuk, amely esetünkben a hajtókerékhez tartozik.

$$\chi = \frac{\Delta \ell_1 - \Delta \ell_2}{\Delta \ell_1} \quad (18)$$

A véges legördüléseknek megfelelő evolvensív hosszak számítási függvényét az alábbi pseudo-kód szerint írtam fel:

```

<N> = 100           a kapcsolóvonalon felvett pontok
                     száma
< δx > =  $\frac{A_1 A_2}{N - 1}$    a kapcsolóvonalon haladó kapcsoló-
                     dási pont által megtett szakaszhossz
ciklus <i> = <0>-től <N-2>-ig   ciklusváltozó defi-
                               niálása
< u1 > =  $\frac{T_1 A_2 + \text{változó1} \cdot \delta x}{r_{h1}}$    hajtókerék alsó
                               paramétere
< u2 > =  $\frac{T_1 A_2 + \text{változó1} \cdot \delta x + \delta x}{r_{h1}}$    hajtókerék felső
                               paramétere
< u'1 > =  $\frac{T_1 T_1 - (T_1 A_2 + \text{változó1} \cdot \delta x)}{r_{h2}}$    hajtott kerék alsó
                               paramétere
< u'2 > =  $\frac{T_1 T_1 - (T_1 A_2 + \text{változó1} \cdot \delta x + \delta x)}{r_{h2}}$    hajtott kerék felső
                               paramétere
< dl1 > =  $\frac{r_{b1} \cdot (u_2^2 - u_1^2)}{2}$    hajtó keréken érint-
                               kezett ív hossza
< dl2 > =  $\frac{r_{b2} \cdot (u_1^2 - u_2^2)}{2}$    hajtott keréken
                               érintkezett ív
                               hossza
< χ > =  $\frac{dl_1 - dl_2}{dl_1}$    relatív csúszás
                               értéke
ai0 = i · δx   kimenet első oszlopa, a kapcsolóvona-
                     lon megtett szakasz hossza
ai1 = χ       kimenet második oszlopa, a relatív
                     csúszás értéke

ciklus vége
térítsd vissza a-t

```

A kód szerint megkaptam a relatív csúszás modelljét elemi fogazatra. Ezt követően meg akartam vizsgálni a modell felhasználását általános fogazatu evolvens fogaskerék hajtásokra. Ennek érdekében kiszámítottam a lehető legnagyobb és legkisebb profileltolás értékét általánosan, a szakirodalomban ismert módon, majd azt az általunk választott fogszámokra vonatkoztattuk. A ma-

ximális profileltolást az evolvens trigonometria második alaptörvényéből számítottam ki, a minimális profileltolást a léccel való fogazás ismert geometriai modelljéből, [3].

2.1. Számszerű kiértékelések

A tanulmány következő részét a modellek numerikus kiértékelése adja. A matematikai modelleket MathCad környezetbe helyezve, egy meghatározott fogaskerék hajtásra alkalmaztam azokat, amelynek a paraméterei az **1. táblázat**ban láthatók. Azért választottam a MathCad környezetet, mert az lehetővé tette a számítások egyszerű ellenőrzését, illetve a grafikonok megalkotását.

Először, a (2)–(14) összefüggéseket alkalmazva kiszámítottam a talpkörök sugarának a hosszát, az **1. táblázat**ban meghatározott értékeket figyelembe véve, illetve a B₁, B₂ pontok helyzetét. Esetünkben, mivel az egyszerűsítésre törekszünk, nem számolunk profileltolással, tehát a fajlagos fogfejhézag $h_0 = 1$ mm, a fajlagos foglábhézag $c_0 = 0,25$ mm, fajlagos profileltolás $\xi = 0$ mm és a fogtőgörbe magassága $\delta = 0,15$ mm. Az egyenleteket alkalmazva a hajtó- és hajtott kerekre, kapjuk, hogy a hajtókerék talpkörének a sugara $r_{t1} = 31,97$ mm, és a hajtott kerék talpkörének a sugara $r_{t2} = 64,73$ mm.

Tehát, mivel az $A_1 T_2 = 14,31$ mm, $A_1 T_1 = 1,23$ mm, illetve $A_3 T_1 = 1,70$ mm, $B_2 T_2 = 10,39$ mm, ebből következik, hogy a talpkörök által kimetszett pontok a fejkörök és az alapkörök által kimetszett pontok

1. táblázat. A fogaskerek paraméterei

Megnevezés	Jelölés	Érték
Modul [-]	m	4
Kapcsolószög [rad]	a	$\pi/9$
Hajtókerék fogszáma [-]	z_1	17
Hajtott kerék fogszáma [-]	z_2	34
Hajtókerék osztókörsugara [mm]	r_{w1}	34
Hajtott kerék osztókörsugara [mm]	r_{w2}	68
Hajtókerék lábkörsugara [mm]	r_{f1}	29
Hajtott kerék lábsugara [mm]	r_{f2}	163
Hajtókerék fejkörsugara [mm]	r_{a1}	38
Hajtott kerék fejkörsugara [mm]	r_{a2}	72
Hajtókerék alapkörsugara [mm]	r_{a1}	31.94
Hajtott kerék alapkörsugara [mm]	r_{a2}	63.89
Fogmagasság [mm]	h	9
Lábhézag [mm]	c	1
Tengelytáv [mm]	a_w	102

közé esnek, vagyis B_1 pont a T_1 és A_2 , illetve a B_2 pont a T_2 és A_1 között helyezkedik el. Következésképpen azt mondhatjuk, hogy a vizsgált hajtás helyesen kapcsolódik, tehát nem igényel újraméretezést.

A következőkben a Szeniczai-féle matematikai megoldást vittem át a MathCad környezetébe, annak érdekében, hogy a következőkben könnyebben összehasonlíthassam az általam javasolt modellel a kapott eredményeket. Ezt követően a saját matematikai modellel felhasználva számoltam ki a relatív csúszást a fogak között. Megvizsgáltam a választott fogaskerék-hajtás minimális és maximális profileltolásának értékét (2. táblázat) annak érdekében, hogy megvizsgáljam, általános fogazatra hogyan viselkednek a modellek.

Látható, hogy a hajtott keréken negatív és pozitív irányú profileltolás is megengedett, amíg a hajtókeréken csak pozitív. A megengedett tartományokból két-két értéket választottam profileltolásként, így négy esetet állítottam fel általános fogazásra vonatkozólag (3. táblázat), amelyekre vizsgáltam a modell viselkedését. A profileltolás szerint újraszámoltam a fogaskerék-hajtás paramétereit, illetve a relatív csúszást mind a Szeniczai-féle modell által, mind az általam generált modell alapján.

3. A kutatási eredmények tárgyalása

Az 7. ábra szemlélteti a kapott eredményeket elemi fogazat esetén. A kapott függvények hiperbolák, ahogy azt vártuk. A két relatív csúszásfüggvény által kirajzolt hiperbola között azonban világosan látható különbségek vannak. Bár mindkettő azt mutatja, hogy ahogy haladunk előre a kapcsolóvonalon, a fogaskerek közötti relatív csúszás rohamosan csökken, a kezdőpontjuk és a pillanat, amikor eléri a zéruspontot, jelentősen eltér. A Szeniczai-féle megoldás szerint a relatív csúszás kezdeti értéke meglehetősen nagyobb, szinte duplájának mondható, mint az általam felállított modellben, illetve a zéruspontot is a kapcsolóvonal egy távolabbi pontjában éri el. Az értékek közötti különbségek, bár lehet, nem tűnnek jelentősnek, mégis számottevőek lehetnek a fogfelületek meghibásodásánál, ahol, ne felejtjük el, a pár mikrométer nagyságú szennyeződések is, főképp hosszú távon, problémát tudnak okozni.

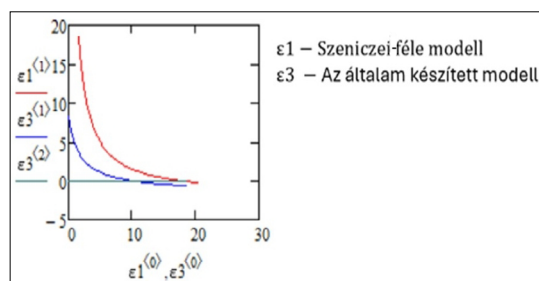
Amennyiben profileltolást alkalmazunk a hajtott keréken, szemmel láthatóan a görbék elalaposodnak, főképp a pozitív profileltolás esetén (8. ábra). A két modellt ábrázoló görbe hasonlóan viselkedik, amennyiben az elemi fogazatnál kapott eredményhez hasonlítjuk őket. A negatív

2. táblázat. A profileltolások határai a választott fogszámokra

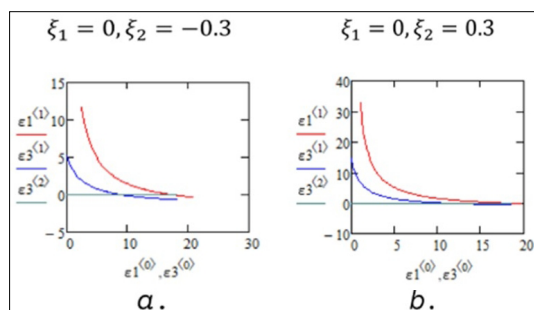
Fogszám	Minimális profileltolás	Maximális profileltolás
17	0	0,83
34	-0,98	1,71

3. táblázat. A vizsgált profileltolások

ξ_1	ξ_2
0	-0,3
0	0,3
0,3	0
0,5	0



7. ábra. A relatív csúszást leíró modellek elemi fogazat esetén



8. ábra. Relatív csúszást leíró modellek, hajtott keréken végzett profileltolással a.) negatív profileltolás b.) pozitív profileltolás

profileltolás esetén mindkét görbénél csökkent a kezdeti relatív csúszás értéke, viszont a zéruspontot közel ugyanabban a pontban éri el. A pozitív profileltolásnál mindkét görbe magasabb relatív csúszásértékről indul, bár a Szeniczai-féle megoldást szemléltető hiperbolánál az elemi értékhez viszonyítva sokkal jobban megnőtt ez az érték, és hamarabb éri el a zéruspontot, mint az előzőekben. A lényegi különbség a két görbe között még mindig fennáll: az általam készített modell sze-

rint a relatív csúszás értéke, főképp a kezdeti pillanatban, jelentősen kisebb, és a kapcsolóvonalon hamarabb eléri a nulla csúszás pillanatát.

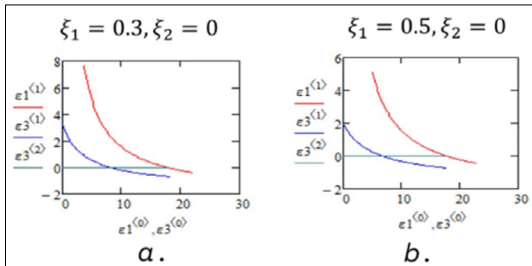
A hajtókeréken végzett profileltolás esetén, mindkét esetben, csökken a relatív csúszás az elemi fogazathoz viszonyítva, bár a Szeniczai-féle modell esetében közel kétszer annyit csökken, mint az általam felállított modell esetén (9. ábra). A Szeniczai-féle modellt megfigyelve, továbbá, nem tűnik úgy, hogy a zéruspillanat elérésénél történne változás az elemi fogazathoz viszonyítva, amíg az általam felállított megoldás esetében a nulla csúszás pillanata a hajtókerék pozitív irányú profileltolásával hamarabb elérhető.

A 10. ábra szemlélteti az általam javasolt modellt különböző profileltolások esetén, amely rávilágít arra, hogy a relatív csúszás miképpen változik a profileltolások függvényében. Látható, hogy a profileltolások növelésével a hiperbola egyre jobban ellaposodik. A modell szerint a relatív csúszás értékét jelentősen lecsökkenthetjük, amennyiben mindkét fogaskeréken profilel-

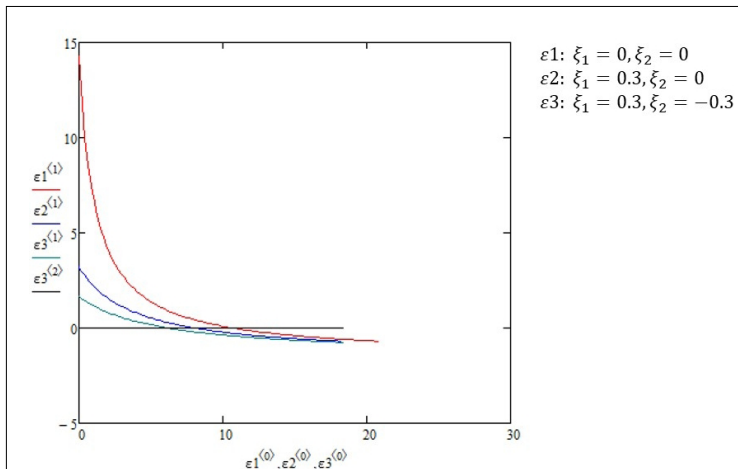
tolást végzünk. Az ábra szerint ekkor a relatív csúszás értéke kevesebb mint egyharmada az elemi fogazathoz viszonyítva, bár a Szeniczai-féle modell esetében jelen lévő relatív csúszásnak. A zéruspontot szintén hamarabb elérjük a nagyobb profileltolás esetén. Ugyanakkor, megfigyelhető, hogy a görbék a zéruspont elérése után nem egy újabb hiperbolát követnek, csaknem összeérnek. Ez arra enged következtetni, hogy a javasolt modell további, aprólékosabb, sajátos esetek vizsgálatát is igénybe vevő matematikai elemzést kíván.

4. Következtetések

Az eredmények kiértékelése alapján elmondhatjuk, hogy az egzakt modell szerint a relatív csúszás értéke kisebb, mint azt az eddig ismert modell alapján tudtuk, illetve a nulla csúszás pillanatát is hamarabb elérjük. Továbbá, észrevehetjük, hogy a modellek hasonlóan viselkednek elemi, illetve általános fogazathoz viszonyítva, különböző profileltolásoknál, így azt mondhatjuk, hogy a evolvens fogaskerékpár csúszásának pontos modellje mind elemi, mind általános fogazathoz fogaskerékhajtásokra is fennáll. A Szeniczai-féle modell és az általam javasolt modell között az a lényeges matematikai különbség, hogy a klasszikus (Szeniczai)-féle matematikai modellben a γ_1 , illetve γ_2 szögelfordulások az áttételi arányt kielégítik, azaz $i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1}$, így a csúszást pillanatnyi határértékként is lehet értelmezni, azaz $\chi = \frac{\rho_1 - i_{12} \rho_2}{\rho_1} = 1 - i_{12} \frac{\rho_2}{\rho_1}$, ahol már csak az áttételi arány és a pillanatnyi érintkezésnek megfelelő profil-görbületi sugarak befolyásolják a csúszást,



9. ábra. A relatív csúszást leíró modellek, hajtókeréken végzett profileltolás esetén a.) A profileltolás 0.3 mm b.) A profileltolás 0.5 mm



10. ábra. A javasolt relatív csúszást leíró modell különböző profileltolásokra

az általam javasolt modell a kapcsolódási pont útját követi végig a valós kapcsolószakaszon, és diszkrét időintervallumoknak megfelelő, relatív egymást érintő szakaszok közötti különbségek arányát adja vissza. Figyelembe véve, hogy a felületek mikrogeometriai, tehát valós érintkezésének módja inkább a véges, mint elemi elmozdulásokra értelmezhető, vélem, hogy az általam levezetett modell megfogalmazása megfelelő. Úgy gondolom, hogy a továbbiakban fontos lenne megvizsgálni, hogy amennyiben az új eredményeket felhasználjuk a fogaskerékhajtások méretezésénél, milyen eredményeket kapunk azok működésével és élettartamával kapcsolatban, amely gépelemek tárgyú kísérletsorozatot igényel. A módszer további kiterjeszhetőségének látom a lehetőségét, amennyiben a fogaskerekek közötti relatív csúszást pontosan felírhatnánk nemcsak evolvens profilokra, hanem egyéb fogprofilokra is, mint például a koszinusz- vagy a szinoidprofilú fogaskerekek esetén.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Vidéki E.: *Fogaskerekek*. „Patria” Irodalmi Vállalat és Nyomdaipari Rt. nyomása, Budapest, 1912.
- [2] Diker J. I.: *Evolventnije zaceplenyije sz uprjamimi zubcami*. Organmetal, Moszkva, 1935.
- [3] Szeniczai L. *Az általános fogazás*. Királyi Magyar Egyetemi Nyomda, Budapest, 1941.
- [4] Bolotovskiy I. A., Bolotovskaya T. P., Bocharov G. S., Guryev V. I., Kurlov B. A., Merkurjev I. A., Smirnov V. E.: *Spravochnik po geometricheskomu raschotuevolventnih zubchatih i chervyachnih peredach*. Mashinostroyenie, Moszkva, 1963.
- [5] Gavrilenko V. A.: *Osnovi teoriji evolventnoj zub-satoj peredaci*. Masinosztroyenie, Moszkva, 1966.
- [6] Botka I.: *Fogaskerék-méretezés kiegyenlített kontakt-hőmérsékletre*. Gép, 4/11. (1964) 425–430.
- [7] Tomori Z.: *A relatív csúszást leíró modellek, hajtó keréken végzett profileltolás esetén*. PhD-értekezés, 2019. (letöltve: 2024. 03. 28.)
<http://midra.uni-miskolc.hu/document/32638/29328.pdf>
- [8] Erney Gy.: *Fogaskerekek*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest. 1983.
- [9] Alfredsson B.: *A Study on Contact Fatigue Mechanisms*. Doctoral Thesis no. 44. Department of Solid Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2000. (letöltve: 2024. 04. 02.)
https://www.researchgate.net/publication/265867484_A_Study_on_Contact_Fatigue_Mechanisms



TITÁNÖTVÖZETEK HŐKEZELÉSE

HEAT-TREATING PROCESSES OF THE TITANIUM ALLOYS

Ahmad Buhairi Minhalina Binti,¹ Pinke Péter,² Tóth László,² Kovács Tünde Anna²

¹ Óbudai Egyetem, Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Budapest, Magyarország,

² Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország,
kovacs.tunde@bgtk.uni-obuda.hu

Abstract

Titanium is a metal with a short history and is the ninth most abundant element in the Earth's crust. It is expensive to produce but is increasingly used for its many useful properties. The application of titanium alloys has been increasing in recent decades because titanium is a low-density, high-strength, highly corrosion-resistant and biocompatible material. Its different alloys exhibit different mechanical properties. Heat treatments can be applied to achieve the required mechanical properties. These typical heat treatments achieve the desired properties by phase transformation of the microstructure or reduction of stress. In this summary study, the authors aim to present the typical heat treatments of titanium and its alloys.

Keywords: titanium alloy, heat treatment, precipitation hardening, annealing.

Összefoglalás

A titán egy rövid múlttal rendelkező fém, amely a földkéregben a kilencedik leggyakoribb elem. Előállítása költséges, de számos hasznos tulajdonsága miatt egyre inkább alkalmazzák. A titánötvözetek alkalmazása az utóbbi évtizedekben egyre inkább terjed, mivel a titán kis sűrűségű, nagy szilárdságú, nagy korrózióállóságú és biokompatibilis anyag. Különböző ötvözetek eltérő mechanikai tulajdonságot mutatnak. A mechanikai tulajdonságok elérése érdekében hőkezeléseket lehet alkalmazni. Ezek a jellemző hőkezelések a szövetszerkezet megváltoztatásával vagy feszültségcsökkentéssel érik el a kívánt tulajdonságokat. A szerzők ebben az összefoglaló tanulmányban a titán és ötvözeiteinek jellemző hőkezeléseit kívánták bemutatni.

Kulcsszavak: titánötvözet, hőkezelés, kiválasztott keményítés, lágyítás.

1. Bevezetés

A hőkezelés az anyagok mechanikai, technológiai és/vagy kémiai jellemzőinek módosítására alkalmazott technológiai folyamat.

A hőkezelési technológia az anyag előre meghatározott hőmérsékletre történő hevítéséből, hűtéséből, majd hűtéséből álló folyamat annak érdekében, hogy elérjék a kívánt tulajdonságokat, tulajdonságkombinációkat, pl. az anyag keménységnövekedését, lágyulását vagy egy megfelelő szilárdság/szívósságarányt [1].

A hőkezelés lehet a kémiai összetétel megváltoztatásával vagy anélkül végrehajtott folyamat. A kémiai összetétel megváltoztatása során általában valamilyen kémiai elemet diffundáltatnak az

anyag felületébe, pl. cementálás során karbont, nitridálás során nitrogént, ezzel segítve a kívánt mechanikai tulajdonságok mint a keménység, kopásállóság elérését. A kémiai tulajdonságok megváltoztatása nélkül elvégzett hőkezelések jelentősége a hőkezelések területén irányadó, ebben az esetben a teljes térfogatra kiterjedő szövetszerkezet-változtatással lehet a mechanikai és egyéb tulajdonságok változását elérni.

A titán egy „új” fém, amelyet 1795-ben Martin Heinrich Klaproth német vegyész fedezett fel, és a mitológiai titánokról nevezett el (amelyek az erő és a szívósság szimbólumai voltak). 1932-ben Wilhelm Kroll dolgozott ki egy eljárást titán kinyerésére, majd az 1940-es évektől, ezt az eljárást

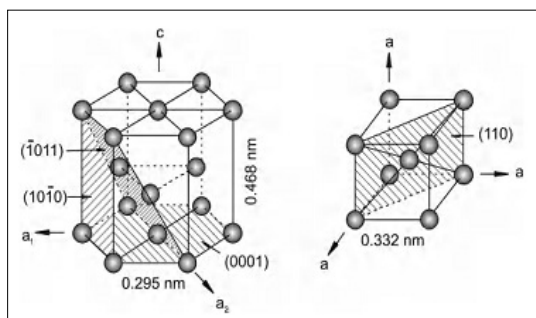
alapul véve, ipari mennyiségben is elkezdtek előállítani a kereskedelmi tisztaságú titánt [2].

A Kroll-eljárás során a tiszta titánt érceiből (rutil (TiO_2), ilmenitből (FeTiO_3)) állítják elő. Első lépésként kémiai vagy metallurgiai úton tiszta titán-dioxidot állítanak elő, majd ezt szénnel és klórral együtt hevítik, és titán-tetra-kloridot (TiCl_4) hoznak létre, amelyet magnéziumolvadékkal redukálnak 900°C -on [2]. A redukció eredményeként por alakú vagy szivacszerű titán képződik. A titánszivacsot vagy port a magnéziummaradványoktól vizes mosással és híg sósavas kezeléssel, esetleg vákuumos desztillálással tisztítják meg. A kapott titán 99,4–99,9% tisztaságú melyet további feldolgozás követ. A nagy tisztaságú titánport porkohászati úton egyesítik tömbökké, majd semleges védőgázban vagy vákuumban történő átolvasztásos technológiával dolgozzák fel.

A titán a földkéreg kilencedik leggyakoribb eleme, de előállítási költsége miatt felhasználása nem terjedt el széles körben. Legfontosabb tulajdonságai: kis sűrűség ($\rho = 4500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), jó szilárdság (pl. ASTM Grade 4 esetében $R_m = 550 \text{ MPa}$), nagy fokú korrózióállóság, - biokompatibilitás [2, 3, 4].

Titán és titánötvözeteket napjainkban széles körben alkalmaznak a repülés, az energetika, a vegyipar és az autóipar számos területén. Több titánötvözet, biokompatibilitása folytán, kitűnően alkalmazható sebészeti protézisek, orvostechikai eszközök anyagaként. Az additív technológiák megjelenésével még inkább elterjedt, főként a fogászati implantátumok területén.

A titánból és titánötvözetekből készült termékek hőkezelési technológiája jelentősen fejlődött az elmúlt évtizedekben [5, 6]. Ebben a tanulmányban a gyakorlatban alkalmazott főbb hőkezelési technológiákat kívánták a szerzők összegyűjteni és rendszerezni.



1. ábra. A tiszta titán kristályszerkezete aTi (szoros illeszkedésű, hexagonális kristályrács) és βTi (térben középpontos köbös kristályrács) [7]

2. Titán és ötvözetei

A titán allotróp fém, hőmérséklettől függően αTi (szoros illeszkedésű hexagonális) és βTi (térben középpontos köbös) módosulatai alkotják (1. ábra) [7]. A fázisátalakulás hőmérséklete 900°C [1].

A különböző ötvözők megváltoztatják a kialakuló fázisok átalakulási vagy kiválási hőmérsékletét az ötvöző típusának és mennyiségének függvényében. Az ötvöző elemeket hatásuk alapján három kategóriába sorolhatjuk [2]: α fázist stabilizáló elemek, például Al, O, N és C; $-\beta$ fázist stabilizáló elemek, például Mo, V, Ta, Nb (izomorf elemek), Fe, Mn, Cr, Co, Ni, Cu, Si, H (eutektoidképező elemek) és semleges elemek, például Sn, Zr és Hf. Az O, N, C és H elemek interstíciós szilárd oldatot hoznak létre a titánnal. Az összes többi elem szubsztitúciós szilárdoldatot hoz létre a titánnal. Az α fázist stabilizáló elemek tágítják az α fázis tartományát, a β fázist képező elemek pedig a β fázis tartományát, és egyúttal szűkítik az α fázis-mezőt. A semleges elemek csak csekély mértékben befolyásolják a β hőmérsékletet. Az ötvözőelemek hatását a titánötvözetek fázisdiagramjaira az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat. Titánötvözet-típusok [7, 8]

Típus	Ötvözők	Jellemző egyensúlyi diagram
Ötvözetlen titán	-	
α szilárd oldatot képező	Al, O, N, C	
β stabilizáló	Mo, V, Ta, Nb	
Eutektoidot képező	Fe, Mn, Cr, Co, Ni, Cu, Si, H	

2.1. α Titánötvözetek

Egyfázisú ötvözet, amely α -fázisú szilárdoldatból áll. Akár szobahőmérsékleten, vagy magasabb gyakorlati alkalmazási hőmérsékleten, α -fázisú, stabil szerkezetű, nagyobb kopásállóságú, stabilabb, mint a tiszta titán, és erős korróziós ellenállással rendelkezik. 500 °C ~ 600 °C hőmérsékleten még mindig megőrzi a szilárdságát és kúszásállóságát, de nem lehet hőkezeléssel növelni a szilárdságát. Az α fázisú ötvözetek egy jelentős csoportját a közelítően α titánötvözetek (near α alloys) alkotják, amelyek kis mennyiségben β fázist képző ötvözőket is tartalmaznak, amelyek esetében szilárdságnövelő hőkezelés már alkalmazható.

A közelítően α ötvözetekre jellemző példák a Ti-8Al-1Mo-1V- és a Ti-6Al-5Zr-0,5Mo-0,2Si-ötvözetek [9].

2.2. (α + β) Titánötvözet fázisai

Ez egy kétfázisú ötvözet, jó szerkezeti stabilitással, jó szívóssággal, jó képlékenységgel és magas hőmérsékletű, képlékeny tulajdonságokkal, amely megalakítással feldolgozható, és öregítéssel az ötvözet szilárdsága növelhető. A hőkezelés utáni szilárdság körülbelül 50-100%-kal magasabb, mint lágyított állapotban.

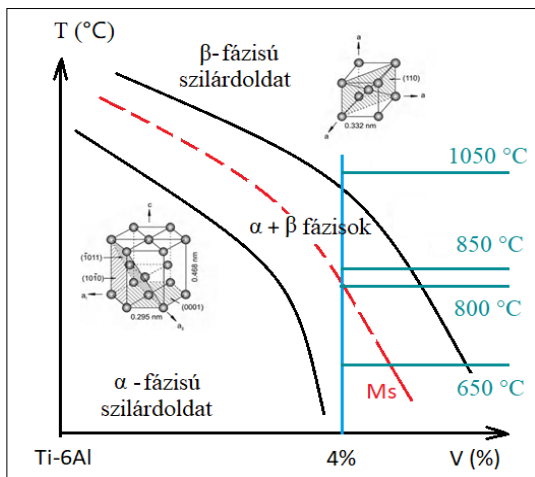
Ez az ötvözet magas hőmérsékleten is megtartja szilárdságát, így hosszú ideig 400 °C és 500 °C közötti hőmérsékleten is képes dolgozni [10, 11].

Az α fázist az Al stabilizálja, a fő β stabilizátorok a V, Mo, Nb és Cr, az ötvözetek gyakran tartalmaznak semleges elemeket is, pl. Zr-t és Sn-t. A jelentősebb kétfázisú (α + β) ötvözetek közé tartoznak a Ti-6Al-4V, Ti-6Al-6V-2Sn és a Ti-6Al-4Zr-2Sn-1Mo [9].

A Ti6Al4V-ötvözet egy tipikus (α + β) fázisú ötvözet. A sematikus fázisdiagram (2. ábra) mutatja a fázisokat az ötvöző tartalom függvényében.

2.3. β titánötvözet-fázis

A metastabil β titánötvözetek, amelyek jellemzően β -fázisú szilárd oldatból állnak, már hőkezelés előtt nagy szilárdsággal rendelkeznek. Oldó izzítás és az azt követő öregítés (kiválasztás keményítés) után az ötvözet szilárdsága tovább növelhető, és szobahőmérsékleten mért szilárdságuk elérheti az 1400 MPa értéket is. A leggyakoribb β fázisképző ötvözők a V, Mo, Nb, Cr és Si, az α fázisképzők közül 3% Al-t és a semleges ötvözők közül Sn-t és Zr-t is tartalmazhatnak. A széles körben alkalmazott β titánötvözetek közé sorolhatók: Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo (Beta C), Ti15Mo-3Nb-3Al-0,2Si (Timetal 21S) és a Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al [5]. A 2. ábra a Ti6Al4V-ötvözet β -fázisú szilárd oldatának területét mutatja. Ebben az ötvözetben a β stabilizátor a vanádium.



2. ábra. A Ti6Al4V-ötvözet sematikus fázisdiagramja

3. Titánötvözetek hőkezelése

3.1. Feszültségcsökkentés

A feszültségcsökkentő hőkezelés fontos a titánötvözeteknél, főként az α szilárdoldatos ötvözetek esetében. A gyártási lépésekből származó feszültségek csökkenthetők ezzel a hőkezeléssel. A feszültségmentesítő hőkezelés 500 °C-os semleges atmoszférán történő izzításból, majd lassú hűtésből áll. Az (α + β) ötvözetek feszültségcsökkentő izzítási hőmérséklete 500 °C ~ 700 °C közötti, a metastabil β ötvözeteké magasabb, 700 °C ~ 800 °C [12].

3.2. Lágyító izzítás

Az izzítás növeli a törési szívósságot, a képlékenységet, a méret- és hőstabilitást, valamint a kúszásállóságot. A lágyítás olyan hőkezelési folyamat, amelyben a fémötvözetet az oldó izzítás hőmérsékletéhez közeli, valamivel magasabb hőmérsékleten hevítik, majd hagyják, hogy nagyon lassan lehűljön. A lágyítási folyamat fő célja a képlékenység növelése és a feszültségek eltávolítása az anyagból [12].

Jellemző lágyító izzítások:

1. Újrakristályosító lágyítás: az ötvözetet a felső α - β tartományba hevítik, ott tartják, és lassan lehűtik.
2. Duplex lágyítás: javítja a kúszásállóságot vagy a törési szívósságot. Jellemzően T_{β} hőmérséklet alatti oldó izzításból és azt követő 320 °C ~ 500 °C közötti öregítésből áll.
3. Béta lágyítás: a törési szívósság javítása érdekében végrehajtott hőkezelés, T_{β} hőmérséklet

feletti hőn tartás és azt követő lassú lehűtés jellemzi [13].

3.3. Oldó izzítás

Az oldó izzítás olyan eljárás, amelynek során az ötvözetet megfelelő hőmérsékleten, meghatározott ideig hevítik, hogy a kívánt összetevő szilárdoldatba kerüljön, majd gyors lehűlés következik [5].

Az oldó izzítás három lépése a következő:

a) az anyag magas hőmérsékletre történő hevítése, hogy az ötvözőelemek a β -fázisban oldatba kerüljenek,

b) ezen a hőmérsékleten tartás a homogenizáció elérése érdekében,

c) gyors lehűtés szobahőmérsékletre.

A β titánötvözetek esetében az oldó izzítás hőmérséklete T_β hőfok feletti általában, ($\alpha + \beta$) ötvözetek esetében szokványosan T_β hőmérséklet alatti.

3.4. Öregítés

Az öregítési hőkezelést kiválósos hőkezelésnek is nevezik. Ez egy olyan hőkezelési eljárás, amelyet a titánötvözetek folyáshatárának növelésére használnak. Az öregítés során az ötvözőkben túltelített β fázis bomlásával egy fáziskiválási folyamat megy végbe. A β mátrixban finomszemcsésen elszórt α fázis kiválási mechanizmusán keresztül az ötvözet szilárdsága.

Az öregedésnek alapvetően három típusa van:

- nagy hőmérsékleten történő öregítés,
- kis hőmérsékleten történő öregedés,
- duplex öregítés [9].

3.4.1. Nagy hőmérsékleten történő öregítés

A szemcsehatárok a β -fázis bomlása során viszonylag magas öregedési hőmérsékleten (500 °C felett) történő folyamata.

3.4.2. Kis hőmérsékleten történő öregedés

A β -Ti-ötvözetek viszonylag alacsony (~320 °C) öregítési hőmérsékleten történő öregítése során köztes bomlástermékek (ω vagy β' fázisok) keletkeznek. Ha az öregítési hőmérséklet különösen alacsony, az átalakulás befejezése hosszú időbe telik; a csak α és β fázisokból álló egyensúlyi mikroszerkezetté váló átalakulás nem feltétlenül valósul meg. Az ω fázis (hexagonális rács) az ötvözet súlyos ridegségét okozza. Az összefüggő ω -részekké az alakváltozás során nyíródnak, ami intenzív csúszáslokalizációt és törést okoz, kevés vagy igen kis alakíthatóság mellett.

3.4.3. Duplex öregedés

Az oldó izzítás (~840 °C) utáni gyors hűtést (víz) követően, a kezelés hosszú ideig tartó, alacsony hőmérsékletű öregítésből (~320 °C), majd rövid ideig tartó magas hőmérsékletű (~500 °C) öregítésből áll. Az oldó izzításhoz, valamint a két lépéshez választott tényleges hőmérsékletet és időt a speciális ötvözet összetételére kell optimalizálni. A hőkezelés eredménye nagyobb szilárdság és szívósság.

3.5. Kriogén hűtéses lágyítás

A kriogén hőkezelés a homogenizáló izzítás hőmérsékletéről történő gyors hűtés -196 °C hőmérsékletre nitrogéngőz segítségével (a nitrogén forráspontja légköri nyomáson -195,8°C) [14]. Ez a hőkezelés a Ti6Al4V-ötvözetek esetében jelentősen megnöveli a képlékeny alakváltozó képességet (5,3%-ról 8,3%-ra), miközben a folyáshatár kismértékben csökken (2%-kal) [15]. A hosszú ideig és alacsony hőmérsékleten végzett kriogén kezelés stabilizálja a Ti6Al4V-ötvözetet azáltal, hogy csökkenti a belső feszültség hatását, az instabil fázisokat stabil fázisokká alakítja át, és javítja az anyag mechanikai tulajdonságait és alakíthatóságát [16].

4. Következtetések

A titánötvözetek alkalmazása egyre szélesebb körben terjed annak ellenére, hogy előállításuk költséges. A titán és ötvözei számos előnyös tulajdonsággal rendelkeznek. A megfelelő mechanikai, korrózióállósági és kopásállósági tulajdonságok elérésének érdekében egyre újabb ötvözeteket fejlesztenek és tesztelnek. A kémiai összetétel beállítása azonban nem elegendő, mivel szükséges a megfelelő mikroszerkezet létrehozása is, melyet hőkezeléssel lehet elérni. A titán esetében az ötvözőktől függő mikroszerkezet jön létre egyensúlyi körülmények között, ahogyan azt az 1. táblázatban bemutattuk. A titán allotróp fém, ezért a hőmérséklet változásának hatására egyensúlyi hűlés esetén is bekövetkezhetnek fázisátalakulások. A megfelelő hőkezeléssel azonban stabil szerkezet hozható létre, amely az adott alkalmazási hőmérsékleten megbízhatóan biztosítja a mechanikai, korrózióállósági és kopásállósági tulajdonságokat.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] W. D. Callister, Jr., D.G. Rethwisch: *Materials Science and Engineering. An Introduction*. 10th edition, Wiley, 2018.
- [2] Leyens C., Peters M.: *Titanium and Titanium Al-*

- loys: *Fundamentals and Applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co: Weinheim, Germany, 2003.
- [3] Seward G. G. E., Celotto S., Prior D. J., Wheeler J., & Pond R. C.: *In Situ SEM-EBSD Observations of the Hcp to Bcc Phase Transformation in Commercially Pure Titanium*. *Acta Materialia*, 52/4. (2004) 821–832.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2003.10.049>
- [4] Tarin P. et al.: *Caracterización de las transformaciones $\alpha \leftrightarrow \beta$ de la aleación Ti–6Al–4V y de las características mecánicas y microestructurales obtenidas*. *Cerámica y Vidrio*.
- [5] Dipankar Banerjee, J. C. Williams: *Perspectives on Titanium Science and Technology*. *Acta Materialia*, 61. (2013) 844–879,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2012.10.043>
- [6] Nihal Yumak, K. Aslantas: *A Review on Heat Treatment Efficiency in Metastable β Titanium Alloys: the Role of Treatment Process and Parameters*. *Journal of Materials Research and Technology*, 9/6. (2020) 15360–15380.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.10.088>
- [7] The Crystal Structure of Titanium. V., 43 [2] 267–272 (2004). (letöltve: 2024. október 10.).
<http://www.metalspiping.com/the-crystal-structure-of-titanium.html>
- [8] Semiatin S. L.: *An Overview of the Thermomechanical Processing of α/β Titanium Alloys: Current Status and Future Research Opportunities*. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, 51A. (2020) 2020–2593.
<https://doi.org/10.1007/s11661-020-05625-3>
- [9] Pallavi Pushp, S.M. Dasharath, C. Arati: *Classification and Applications of Titanium and Its Alloys*. *Materials Today: Proceedings*, 54. (2022) 537–542.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.008>
- [10] Basic Titanium Metallurgy. (letöltve: 2024. október 10.).
<https://usa-titanium.com/basic-titanium-metallurgy/>
- [11] Types of Titanium Alloys and Their Uses
<https://www.refractorymetal.org/types-of-titanium-alloys-uses/> (letöltve: 2024. október 10.).
- [12] M. J. Donachie (ed.): *Titanium a Technical Guide*, 2nd edition, ASM International, 2000.
- [13] Heat Treating of Titanium and Titanium Alloys
<https://www.totalmateria.com/en-us/articles/heat-treating-titanium-and-titanium-alloys/> (letöltve: 2024. október 10.).
- [14] Tushar Sonar, Sachin Lomte, Chandrashekhar Gogte: *Cryogenic Treatment of Metal – A Review*. *Materials Today: Proceedings*, 5/11. Part 3, (2018) 25219–25228.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.324>
- [15] M. Vijayakumar, A.M. Shanawaz, N. Prabhu, K. Arunprasath, C. Ramesh, Midhun Mohan: *The Influence of Cryogenic Treatment on Titanium Alloys Mechanical Properties*. *Materials Today: Proceedings*, 66/3. (2022) 883–888.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.513>
- [16] Shiteng Zhao et al.: *Cryoforged Nanotwinned Titanium with Ultrahigh Strength and Ductility*. *Science* 373. (2021) 1363–1368.
<https://doi.org/10.1126/science.abe7252>



A KÉZI LÉZERES HEGESZTÉS BIZTONSÁGI KÉRDÉSEI

SAFETY QUESTIONS CONCERNING MANUAL LASER WELDING

Nagy Balázs Ákos,¹ Gáti József,² Kovács Tünde Anna³

¹ ÓE-BGK GTI Anyagtechnológiai Tanszék, Budapest, Magyarország, nagy.balazs@bgk.uni-obuda.hu

² ÓE-BGK GTI Anyagtechnológiai Tanszék, Budapest, Magyarország, gati.jozsef@uni-obuda.hu

³ ÓE-BGK GTI Anyagtechnológiai Tanszék, Budapest, Magyarország, kovacs.tunde@bgk.uni-obuda.hu

Abstract

Manual laser welding equipment is increasingly used in industry. Unfortunately, the safety regulation of this equipment is not yet fully developed, and in this paper, the authors have attempted to provide a summary study of the safety classes and current standards for laser welding equipment. The harmful effects of laser radiation on the human body (skin, eyes) and the environment are described. The authors also provide protection recommendations on the need to signal the dangers and how to avoid them and summarise the most important rules in ten points.

Keywords: *laser welding, laser safety, diffuse radiation, normal optical hazard distance (NOHD).*

Összefoglalás

Egyre nagyobb számban alkalmaznak az iparban kézi lézeres hegesztőberendezéseket. Sajnos, a biztonsági szabályozása ezeknek a berendezéseknek még nem kiforrott, ezért ebben a munkában a szerzők igyekeztek egy összefoglaló tanulmányt készíteni a lézerberendezések biztonsági osztályairól és jelenleg érvényes szabványairól. Bemutatásra kerülnek a lézersugárzás emberi szervezetre (bőr, szem), valamint a környezetre gyakorolt káros hatásai. A veszélyek jelzésének szükségességére, valamint elkerülésére védelmi ajánlásokat is tesznek a szerzők, eredményként pedig tíz pontban a legfontosabb szabályokat foglalják össze.

Kulcsszavak: *lézeres hegesztés, lézerbiztonság, szórt sugárzás, normál veszélyességi távolság (NOHD).*

1. Bevezetés

Napjainkban több lézeres technológia létezik, rengeteg feladatra optimalizálva. Egyes esetekben elhanyagolhatjuk a sugárzás káros hatásait (1-es és 2-es osztályú lézerek), viszont ipari környezetben, ahol nagy teljesítménysűrűséget alkalmazunk, figyelembe kell venni a megmunkálás területén létrejövő indirekt sugárzást (reflexió) [1–5]. A sugárzásokat osztályokba sorolták, biztonsági előírásokat írtak elő, melyeket szabványok rögzítenek (EU: IEC 60825-1; USA: ANSI Z136), az előírások betartását pedig törvény írja elő [6]. A lézerek sugárzásbiztonsági előírásait több szabványban is megtaláljuk, és csak e szabványok előírásait alkalmazhatjuk [4, 7, 8].

Az első lézer (Theodore Maiman, Hughes Kutatóintézet, Kalifornia, 1960) szilárdtestlézer volt,

mely a rubinban a korundot szennyező krómionokat gerjesztette fotonokkal. Két évre rá született meg az első gázlézer (William R. Bennett, Don Herriott és Alfonso Arons Hughes Kutatóintézet, Kalifornia, 1961), amelyben He-Ne-gázkeverék volt a lézerközeg, amelyet elektromos kisüléssel emeltek magasabb energiaszintre [9, 10].

Az első lézerek megjelenése után hamar felmerült az igény a különböző lézerközegek és típusok hullámhosszának és tulajdonságainak tanulmányozására. Az említett He-Ne-lézerek a látható vörös fény tartományban működnek, viszonylag egyszerűen vizsgálhatók voltak (optikai prizma segítségével), viszont komoly spektroszkópai ismeretek kellettek az egyes lézerek hullámhosszának detektálására. 1976-ra az USA-ban ezen ismeretek alapján kategóriákba sorolták a lézereket (ANSI Z136.1: Safe Use of Lasers): négy főosztályt

határoztak meg. Ezen amerikai szabvány kellően megengedő volt, így válaszként 1994-ben megalkották az IEC 60825-1 szabványt, mely ugyanazon osztályozást vette alapul.

2. A biztonsági osztályok

2.1. Szabvány szerinti osztályozás

Az IEC 60825-1 szabvány a lézeres eszközök osztályozásakor az alábbi tényezőket veszi figyelembe: sugárzási teljesítmény (W, mW), hullámhossz (nm, μm), expozíciós idő (s), sugárzás típusa (folyamatos üzemű, impulzusos üzemű). A négy fő osztályon kívül külön betűvel (M) alosztályokat is megkülönböztettek.

Az 1. osztályba sorolt lézeres eszközök közé tartoznak azok a berendezések, melyek hullámhossztartománya nem veszélyes az emberi szervezetre, sőt, ezek a készülékek általában zárt rendszerűek (pl.: CD-olvasó).

Az 1M osztályba tartoznak a 302,5-től 400 nm-ig terjedő lézeres eszközök, melyek optikai erősítés nélkül nem veszélyesek az emberi szervezetre (pl.: lézeres mutató).

A 2. osztályba tartoznak a 400–700 nm közötti hullámhosszú, kis teljesítményű (1 mW) lézerberendezések. Optikai erősítés nélkül nem igényel védőeszközt, hisz az emberi szem automatikus pislogási reflexe (0.25 s) kellő védelmet biztosít (pl.: lézermutató), az 1. osztály előírásai érvényesek.

A 2M osztályra igazak a 2. osztály irányelvei, viszont optikai eszköz közbeiktatásával veszélyessé válik az emberi szemre (pl.: jelölőlézerek).

A 3R (3A) osztály lézerberendezései 1–5 mW közötti teljesítménnyel működnek a látható fény hullámhosszán (400–700 nm). Rövid idejű besugárzás (< 0,25 s) folyamán nem veszélyeztet az emberi szemet, viszont hosszabb ideig fenntartva a kölcsönhatást, képes a szem gyújtólencsén keresztül károsítani azt. Ilyen berendezéseken vagy alkalmazott környezetében figyelmeztető táblákat, matricákat kell elhelyezni, védőszemüveg használata ajánlott (pl.: közepes teljesítményű lézeres vágógépek).

A 3B osztályba soroltak már kifejezetten károsak a szemre még szórt sugárzás esetén is. Ezekre a készülékekre igazak, hogy folyamatos üzeműek, 5 mW és 500 mW közötti teljesítményen üzemelnek (pl.: ipari/orvosi lézerberendezések). Védőszemüveg használata kötelező!

A 4-es osztályú lézergyártmányok szem- és bőrkárosodást okoznak, sőt, potenciális tűzveszélyt jelentenek. Az előző osztály határértékeit meg-

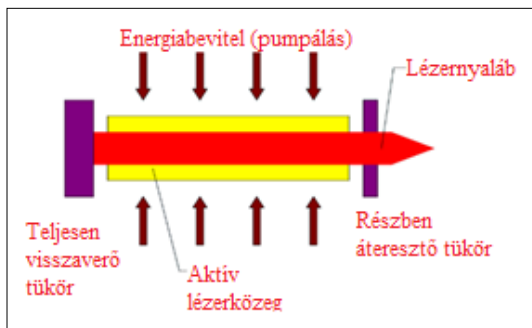
haladó készülékek tartoznak ide, védőeszközök használata kötelező (pl.: ipari anyagmegmunkáló lézerek) [4, 7, 8, 11].

Biztonságos üzemeltetés érdekében meg kell ismerkednünk a különböző lézerközeggel képzett nyaláb tulajdonságaival. Két fő csoportot emelünk ki az ipari alkalmazások terén: szilárdtestlézerek (esetünkben szállézerek) és gázlézerek (általában CO_2 -lézerek). A lézernyaláb kialakulását sematikusán az 1. ábra mutatja be.

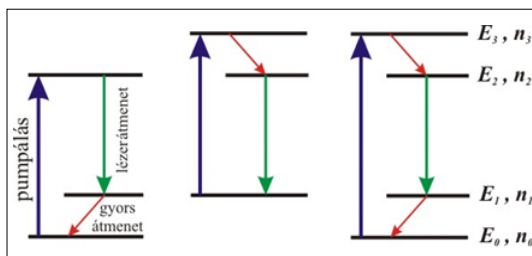
2.2 Hullámhossz szerinti osztályozás

2.2.1. Szilárdtestlézerek

Ez a lézertípus rudat, korongot vagy üvegszálat használ lézerközegként, amelyek kiváló törésmutatójú kristályok ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ /YAG: ittrium-alumínium-gránát, YVO_4 : ittrium-ortovanadát), dőpolva vannak olyan alkotókkal (neodímium, erbium, itterbium stb.), melyeket magasabb energiaszintre lehet kényszeríteni külső gerjesztéssel (villanólámpákkal vagy diódlézerekkel). A populációinverzió kialakulásához nem elegendő két energianívó, hiszen a gerjesztett részecske azonnal nyugalmi állapotra törekszik, így a gyakorlatban 3 és 4 energianívós rendszerek jellemzőek (2. ábra). Mai napig igaz, hogy általában Nd:YAG kristályal szerelik az ilyen típusú lézereket, melyekben



1. ábra. A lézernyaláb kialakulásának vázlata



2. ábra. Három és négy energianívós rendszerek vázlata [12]

808 nm-en sugárzó diódlézerekkel gerjesztik a rendszer legmagasabb energiaszintjére a neodimiumionokat (Nd^{+3}). Ezt követi egy sugárzásmentes átmenet, amely energianívó alatt a kristályrács rezgésének energiája jóval kisebb, mint a rendszer energiája, tipikusan 1064 nm-es hullámhosszúságú fotonok kibocsátását eredményezve. Ahhoz, hogy körfolyamatként fent tudjuk tartani a lézersugárzást, a kisugárzás alsó energiaszintjéről el kell juttatni a neodimiumionokat ún. hegemón állapotba, hogy újra a rendszer legnagyobb energiaszintjére lehessen juttatni az aktív lézerek közegét [1, 5, 10].

2.2.2. CO_2 -lézerek

Ipari megmunkálás folyamán alkalmazhatunk légnemű lézereközeg, nagy teljesítménysűrűségi igény esetén általában szén-dioxidot (CO_2). A gázközeg kvarcüveg csőben található, gerjesztését villamos tér segítségével oldjuk meg (egyenáramú, nagyfrekvenciás gerjesztéssel). A CO_2 -lézer a szén-dioxid-molekula vibrációs szintjei között működik. Ez a legnagyobb teljesítményű gázlézer, amelynek határfoka is a legnagyobb (15–20%). A lézereközeg CO_2 -, N_2 -, He- vagy H_2O -gőz körülbelül 1:1:8 arányú keveréke. Négy energianívós rendszer: gázszüléssel a nagyszámú N_2 -molekula gerjesztődik, hosszú élettartamú, metastabil állapotban feldúsul, majd ütközéssel átadja energiáját a szén-dioxid-molekuláknak. Lézerátmenet a két rezgési állapotok között jön létre, jellemzően 10600 nm-es hullámhosszúságú sugárzás csatolható ki. A He vagy a vízgőz segíti az alsó lézernívók kiürítését az energiaátadás során (ütközéses energiaátadás) [1, 10].

A gerjesztés hatására, a lézereközeg függvényében más-más hullámhosszúságú elektromágneses sugárzás indukálódik, amelyek az emberi szervezetre veszélyt rejthetnek, ha a gépkezelő a munkatérben belül tartózkodik. A továbbiakban csak a szórt sugárzás elleni védelemmel foglalkozunk.

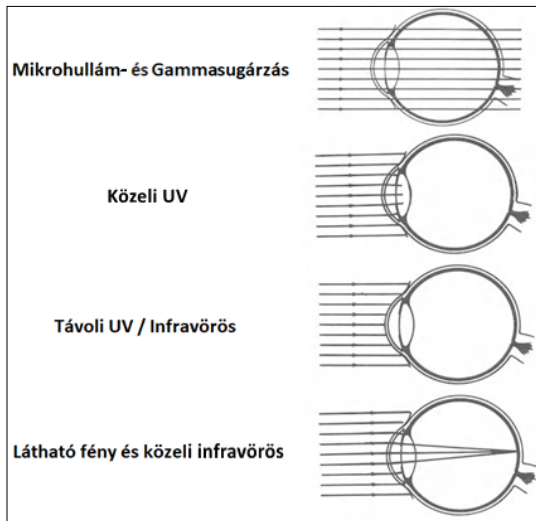
3. Veszélyeztetett területek

3.1. Szem

Az emberi test legérzékenyebb szerve sugárzás szempontjából a szem, elsősorban ennek védőeszközeit kell biztosítani munkavégzés során. A 3. ábrán látható, ahogy szemünk viselkedik egyes sugárzásokra.

Általános eset:

$$NOHD = \sqrt{\frac{4 \cdot P \cdot \alpha}{\pi \cdot MPE \cdot \omega_0^2}} = (m) \quad (1)$$



3. ábra. Emberi szem viselkedése egyes sugárzásokkal szemben, sematikus ábra

Multimódusú fényvezető szál (fiber) esetén:

$$NOHD = \sqrt{\frac{1,79}{NA}} \cdot \sqrt{\frac{P}{\pi \cdot MPE}} = (m) \quad (2)$$

ahol:

- P a lézer teljesítménye (W),
- α a nyaláb divergenciája (rad),
- ω_0 a nyaláb kezdeti sugara (m),
- MPE a maximálisan megengedett expozíció (W/m^2),
- NA a numerikus apertúra.

A szem védelmére szemüvegeket alkottak különböző törésmutatójú lencsékkel annak függvényében, milyen hullámhosszoknak álljon ellent. A legelterjedtebb szabvány ilyen termékekre az MSZ EN 207:2020, de létezik amerikai megfelelője (AISI Z136.3), viszont ez a szabvány a szemüvegekkel szemben csak az optikai sűrűséget határozza meg, az európai jóval szigorúbb. Elmondható, hogy nincs olyan termék a piacon, amely minden hullámhosszon biztonságosan alkalmazható, így az adott lézergéphez kell kiválasztani a védőeszközt. Azért, hogy biztosítani tudjuk a védelmet, meg kell tudnunk határozni a szemüveg biztonsági osztályát.

Az ilyen eszközöket tesztelik piacra kerülés előtt, melyből képesek meghatározni a legfontosabb mérőszámot, az optikai sűrűséget, amely a sugárzással szembeni hatékonyságot jelöli. Érvényes az, hogy minél nagyobb ez az érték, annál hatásosabban véd az adott sugárzással szemben, viszont érdemes meghatározni a minimum

biztonsági szintet, mivel a költségek is nőnek az optikai sűrűséggel. Ismernünk kell, hogy milyen hullámhosszon, mekkora teljesítménnyel, mekkora nyálábátmérővel és milyen üzemmódban üzemel a készülékünk. Ezeknek tudatában a MSZ EN 207:2020 szabványban található táblázatból kiolvashatjuk a minimális biztonsági fokozatot, amelyet teljesítenünk kell biztonságos üzemeltetés folyamán. A védőszemüvegek dokumentációjában található egy diagram, amely az egyes hullámhosszokon az áteresztőképességet és az optikai sűrűséget mutatja, ennek megfelelően válasszunk védőeszközt. Érdeemes meghatározni a normál veszélyességi távolságot (NOHD), melyet tudatni és betartatni kell a gépkelzővel (1), (2) [2, 7].

3.2. Bőr

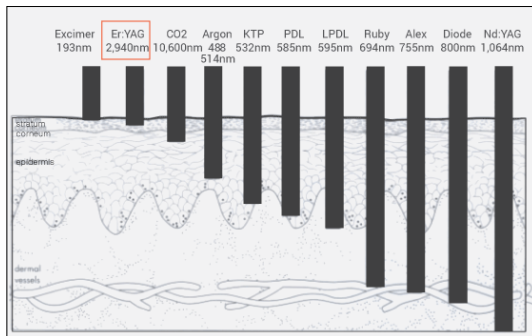
Az emberi bőr véd minket a környezet veszélyeitől, viszont e mesterséges besugárzás ellen kevésbé hatékony. Különböző hullámhosszokon a sugárzás képes mélyebbre hatolni az emberi bőrben, ezeknek lesz is egy rájuk jellemző károsodási mechanizmusuk. Az 4. ábrán látható, hogy két esetben nagy az eltérés: a CO₂-lézer hullámhossza az hámrétegig hatol, bőrünk hővezetés útján károsodik, túlmelegedhet, esetleg koaguláció (irreverzibilis) léphet fel.

A szilárdtestlézerek kicsi hullámhosszú sugárzása eljut bőrünk legmélyebb rétegeibe, ahol a bőrünkben levő vizet elpárologtatja. A hajszálerekben a víz mellett van vas is a vérünkben, mely szívesen elnyeli ezt a hullámhosszt (5. ábra). A túlhevített vasatomok felrobbannak, és a véráramban a „salak” majdan hajszálereket tömíthet el (a szemben vannak a legvékonyabb erek).

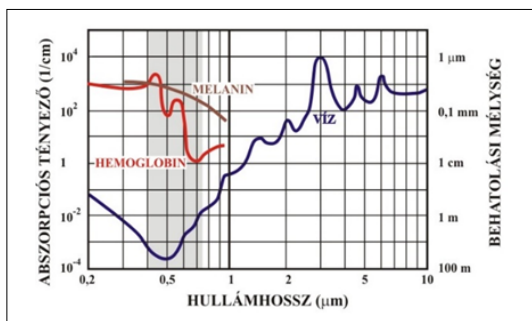
E veszélyek elkerülése érdekében a test minden részét le kell fedni, a védőruházat anyagának el kell nyelnie a jelen levő sugárzást károsodás nélkül. A CO₂-lézerfény nagy hullámhossza miatt a hagyományos hegesztőruházat (marhabőr) elegendő védelmet ad, míg a szilárdtestlézer sugárzása ellen más speciális anyagokat (kompozitokat) kell alkalmazni. Mindig győződjünk meg, hogy a védőeszközaink képesek ellátni funkciójukat [3].

3.3. Környezet

Tudatában a lézerfény károsító hatásainak, a munkaterületet el kell szigetelni a külvilágtól, erre alkalmas anyagokat kell választani a sugárzás hullámhossza függvényében. A célunk, hogy ne jusson ki sugárzás: vagy a sugárzás visszaverése, vagy az elnyelése lehet a megoldás alapelve. Utóbbit választva, hisz bent használják a készüléket, CO₂-lézer működésénél védelmet nyújt a plexi (PMMA), viszont a közeli infravörös hul-



4. ábra. Az emberi bőrbe különböző lézersugárzások behatolási mélysége [14]



5. ábra. Az emberi testben (bőrben) található folyadékok viselkedése különböző lézersugárzások esetén [15]

lámoknak átlátszó. Erre a hullámhosszra alkalmazhatunk speciális burkolóelemeket, speciális szendvicspaneleket (Al-lemezek között grafit), költséghatékony megoldásként reflektáló építőelemeket belülről abszorbeáló réteggel bevonva (festés, bevonatolás, más anyagú panel rögzítése). Különös tekintettel kell lennünk azon terület sugárzásának elnyelésében, mely felé a fényforrás áll (vastagabb fényelnyelő réteg). Érdeemes olyan ajtó kialakítást választani, hogy biztonsági kapcsolót tudjon üzemeltetni, mert csak zárt térben csatlakozhatunk ki lézerfényt. Biztonságtechnikai okokból a munkaterületre azon kívül tartózkodónak be kell tudnia nézni, ha esetleges komplikáció lépne fel a lézerforrás üzemeltetése közben. Erre a szemüvegekhez hasonló módon alkotott ablakok állnak rendelkezésre, melyre igazak a szemüveg lencséjének választásának vezérelve. A környezetben létrejövő légnyomú fém elszívását biztosítani kell. Anyagmozgatás okán érdemes a LEAN-elveket követni mechanikai sérülések elkerülése érdekében, a veszélyjelzéseket és kötelezettségeket (pl.: védőruházat viselete) fel kell tüntetni (6. ábra) [6].

4. Védelmi ajánlás a közeli infravörös sugárzási tartományban

Az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kara tervezi a CLOOS Magyarország Crown International Kft. támogatásával telepíteni egy kézi lézeres hegesztőgépet, mely szállézeres hegesztőberendezés. Legfontosabb ismértve, hogy a lézerközeg szilárd test, növelt fajlagos felületű (vékony szál), maximális teljesítménye 2000 W és a közeli infravörös (1080nm, gépkönyv szerint 1070 ± 20 nm) tartományú hullámhosszon üzemel. Ezen hullámhossztartomány veszélyes lehet a gépkezelőre nézve, hiszen a sugárzás 17%-a képes az emberi bőr legmélyebb rétegébe eljutni (hipodermis), ami az előzőekben taglalt károsodásokat okozhatja. Ami még tetézi a problémát, hogy e sugárzás az emberi szem látóidegeit képes „kiégetni”, ezzel vakfoltokat generálni a gépet üzemeltetőnek (irreverzibilis folyamat). E veszélyek miatt az egyéni és környezeti biztonságot biztosítani kell. Megoldásként szemüveggént meghatározott biztonsági faktorút választunk specialistáktól, nem érdemes ezen spórolni, mert a szemünk fénye foroghat kockán: pl. Laservision, UVEX és NoIR [16, 17]. Ruházat terén olyan szövetet kell választani, mely fémszálakat tartalmaz (rozsdamentes acél, ezüst), nem mellesleg ergonomikus. Kabát és nadrág terén ajánlhatók az ISA Technology termékei, melyek sugárzás és hőhatás ellen is védenek [18]. Kesztyűként elterjedtek a fehér pigmentált termékek a titán-dioxid (TiO_2) visszaverő-képessége miatt [2, 7]. Guide 70 nevű terméket használnak a legtöbben, akik kézi lézerverhegésztesel foglalkoznak [20]. Lábviselet terén munkavédelmi cipők alkalmazhatók. A környezet az előbb említett költséghatékony mó-

don képzelhető el, tolóajtót alkalmazva a biztonsági retesz működtetése érdekében. A közeli infravörös tartományban üzemelő lézereknél jellemző a fémgőzök felszabadulása; ezen a téren az elszívást és levegő tisztítását az ipari elszívók kielégítik.

5. Következtetések

A manapság egyre népszerűbb kézi lézeres berendezések veszélyt hordoznak a gépkezelőre nézve, hiszen egy légtérben tartózkodnak. Az ipari lézereknek is a munkatere el van burkolva, hogy megvédje a kezelőt. Kézi egység alkalmazásakor a munkaterületen belül levőket a biztonsági öltözetek, a területen kívülieket a hermetikusan záró burkolóelemek védik.

Az ilyen készülékek „olcsók” és könnyen beszerezhetők, többféle feladatot is végezhetnek (tisztító lézer), viszont téves az a hiedelem, miszerint veszélymentes. Meg kell ismerkednünk és kockázatelemzést kell végrehajtani a veszélyforrásokkal, hogy nagy szakértelemmel meg tudjuk alkotni a biztonságos lézergép-üzemeltetést.

Végezetül a 7. ábrán látható szabályok betartására kell minden intézkedést megtenni.



6. ábra. Kötelezettségeket és veszélyeket ábrázoló piktogramok

1. Soha ne nézzon közvetlenül a lézer-sugárba.
2. Soha ne irányítsa a sugarat más emberre.
3. Ne nézzon 3R osztályú vagy nagyobb teljesítményű lézerbe optikai eszközökkel.
4. A lézereket csak a használatukra kijelölt helyen működtesse.
5. A sugárnyaláb útját jóval a szem-magasság fölé/alá helyezze álló vagy ülő helyzetbe.
6. Mindig szétszóróan visszaverő sugárvédőket használjon.
7. Távolítson el minden fényvisszaverő tárgyat, például ékszereket vagy szerszámokat a sugárútból.
8. A 3B és 4 osztályú lézerterületre csak arra felhatalmazott személyzet léphet be.
9. Mindig viseljen lézerszemüveget, ha 4 osztályú láthatatlan sugárnak van kitéve.
10. Mindig biztonságos beállításokat tegyen.

7. ábra. Vezérelvek sérülésmentes lézerműködtetése érdekében [21]

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Christopher Dawes: *Laser Welding*. Abington Publishing, Cambridge, 1992.
- [2] David Sliney, Myron Wolbarsht: *Safety with Lasers and Other Optical Sources*. Springer Science+Business Media, New York, 1980.
- [3] Halász G.: *Kézi lézeres berendezések biztonságos használata*. Hegesztéstechnika, 35/1. (2024), 41–47.
- [4] Bagyinszki Gy.: *Lézerek alkalmazásának technológiai és biztonságtechnikai szempontjai*. XI. Nemzeti és IV. GTE-MHtE-DVS hegesztési Konferencia, Budapest, 2004, 14–30.
- [5] Bitay E.: *Lézeres felületkezelés és modellezés*. Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2007.
<https://doi.org/10.36242/mtf-04>
- [6] 2012. évi I. törvény a munka törvénykönyvéről: 51. § és 86. §
- [7] Ken Barat: *Laser Safety: Tools and Training*. Second Edition, Taylor & Francis LTD, Broken Sound Parkway, 2017.
- [8] Bagyinszki Gy., Bitay E.: *Lézeres anyagmegmunkálás veszélyessége*. Műszaki Tudományos Füzetek - FMTÜ, 18. (2013) 51-56.
<https://doi.org/10.36243/fmtu-2013.05>
- [9] Kovács Z.: *A lézerek működési alapjainak és a lézersugárzás alkalmazásainak tanítása*. Doktori értekezés, József Attila Tudományegyetem, Szeged, 1995.
- [10] Buza G.: *Lézersugaras technológiák I.*, Edutus Főiskola. Budapest, 2012.
- [11] California Institute of Technology: *Laser Safety Manual*. Caltech Environmental Health and Safety Office, California, 2023.
- [12] Online tananyag: *Lézerek az Orvostudományban, Szegedi Tudományegyetem*.
[https://titan.physx.u-szeged.hu/tamop411c/public_html/Lézerek az orvostudományban/23_a_polulciinverzi_s_energiaszint_smk.html](https://titan.physx.u-szeged.hu/tamop411c/public_html/Lézerek%20az%20orvostudományban/23_a_polulciinverzi_s_energiaszint_smk.html) (2024)
- [13] Seiji Katayama: *Handbook of Laser Welding Technologies*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2013.
- [14] <https://wtlaser-en.com/144> (2024)
- [15] Buza G.: *Lézersugaras technológiák tegnap, ma, holnap*. Nagy energiasűrűségű ankét, Magyar Hegesztési Egyesület, Kecskemét, 2023. október 26., előadás-prezentáció.
https://maheg.hu/wp-content/uploads/2023/11/Buza_Nagy_energiasurusegu.pdf
- [16] <https://www.uvex-laservision.de/> (2024)
- [17] <https://www.noirinsight.com/> (2024)
- [18] Meszlényi Gy., Bitay E.: *The Role of Focus Position in Single Pulse Laser Drilling of Highly Reflecting Materials*. Acta Materialia Transylvanica, 2/1. (2019) 61–68.
<https://doi.org/10.33924/amt-2019-01-10>
- [19] <https://www.isatechnologies.com/> (2024)
- [20] <https://guidegloves.com/> (2024)
- [21] Tóth László: *A kézi lézeres hegesztőgépek biztonságtechnikája*. Nagy energiasűrűségű ankét, Magyar Hegesztési Egyesület, Kecskemét, 2023. október 26. előadás-prezentáció.
https://maheg.hu/wp-content/uploads/2023/11/Lezervedelem_PPT_MDTL-231026-Nagy_energiasurusegu_Anket.pdf



BEROPPANÁSI TÖNKREMENTEL NUMERIKUS MODLLEZÉSE REALISZTIKUS SZÉLSŐ TÁMASZNÁL

NUMERICAL MODELLING OF WEB CRIPPLING UNDER REALISTIC END SUPPORT CONDITIONS

Nagy Örs,¹ Sánduly Annabella,² Gobesz F.-Zsongor³

¹ Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Doktori Iskola, Kolozsvár, Románia, rsnagy8@gmail.com

² Lodzi Műszaki Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Szilárdságtan Tanszék, Lodz, Lengyelország, annaberlla.sanduly@gordias.ro

³ Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék, Kolozsvár, Románia, gob@mecon.utcluj.ro

Abstract

Determination of web crippling resistance of thin-walled steel sections can be achieved by two different methods: by laboratory experiments or with numerical models, dividing the geometry into finite elements. Trapezoidal sheeting is particularly sensitive to concentrated loading. The support conformation has a significant influence on the resistance of the profile. Understanding the influential support parameters and taking into account in calculations is essential, since it can have a major influence on the bearing resistance and failure mode. The American and the European standards differ in their approach regarding the boundary conditions. The Eurocode does not consider the fixing of the sheets to the roof purlins or beams, which is generally applied in the construction industry. The present study investigates the web crippling resistance of trapezoidal cross-sections with numerical finite element models for several support configurations, considering also the influence of bottom flange fixing.

Keywords: cold-formed steel, trapezoidal sheeting, web crippling resistance, Eurocode, finite element model.

Összefoglalás

A vékonyfalú acélidomok beroppanási ellenállásának meghatározása kétféleképpen történhet: kísérleti vagy numerikus úton, a geometriát végelemekre osztva. A trapézlemezek különösképpen érzékenyek a koncentrált terhekre. A támasz kialakítása jelentősen hozzájárul az idomok teherbírásának a mértékéhez. A valós támasz karakterisztikáinak ismerete és helyes számszerűsítése kiemelten fontos, nagyban befolyásolja a szelvény rezisztenciáját és tönkremeneteli módját. Az amerikai és az európai tervezési szabványok különböző megközelítéseket alkalmaznak a peremfeltételeket tekintve. Az Eurokód nem számol a lemezek szelemenhez vagy gerendához való rögzítésével, amelyet az építkezési gyakorlatban rendszerint alkalmaznak. A jelen tanulmány numerikus számítógépes modellekkel vizsgálja a trapézlemezek beroppanási ellenállását változó támaszkialakításokra, figyelembe véve az alsó öv lerögzítésének hatását.

Kulcsszavak: hidegen hajlított acél, trapézlemez, beroppanási ellenállás, Eurokód, végeselemes modell.

1. Bevezetés

1.1. Többgerincű szelvények beroppanási ellenállása

A vékonyfalú acélidomok egyik tönkremeneteli módja a gerinc beroppanása, amely koncentrált

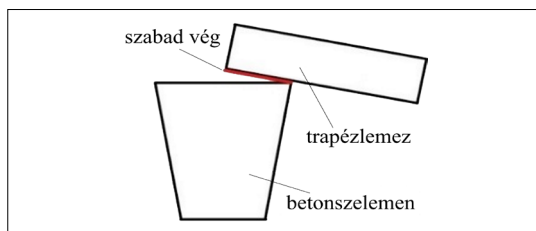
nyíróerő hatására következik be. A magasbordás trapézlemezek különösképpen érzékenyek a vizsgált tönkremeneteli módra, mivel a nyírásnak kitett vékony (0.3–1 mm), de ugyanakkor magas (akár 150 mm) gerinclemez teherbírása sokszor alacsonyabb a teljes idom hajlítási teherbírásánál.

Tetőlemezeknél, illetve a kompozitfödémek zsaluzatként alkalmazott lemezeinél jellemzően a támaszoknál koncentrálnak a legnagyobb nyíróerő. Méretezőskor kiemelten fontos a támasz valós paramétereinek használata. A kontaktfelület hossza, valamint a támaszon túlnyúló szabad vég hossza jelentősen befolyásolja a lemez beroppanási ellenállását. Megfelelő támaszkialakítással a legtöbb esetben elérhető, hogy ne a beroppanási tönkremenetel legyen a méretező.

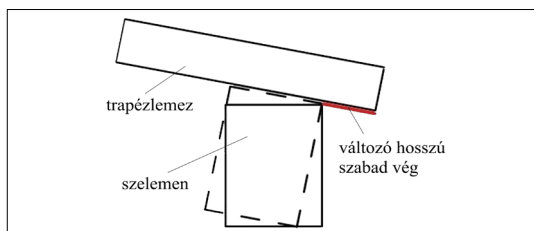
1.2. Szélsőtámasz-kialakítások

A gyakorlatban a magasbordás elemekkel leggyakrabban nagy nyílásokat áthidaló tetőburkolatként találkozunk. A támasz paraméterei széles skálán mozognak, az elsődleges szerkezet anyagának és a tervezési részletek függvényében. A betonszelemen felső síkja rendszerint nem követi a tető dőlésszögét, ezért a szelemen-lemez kontakt egy elméleti vonalon koncentrálnak. A gerincen fekvő támasznál a trapézidom ezért minden esetben rendelkezik egy konzolban álló szabad véggel (1. ábra).

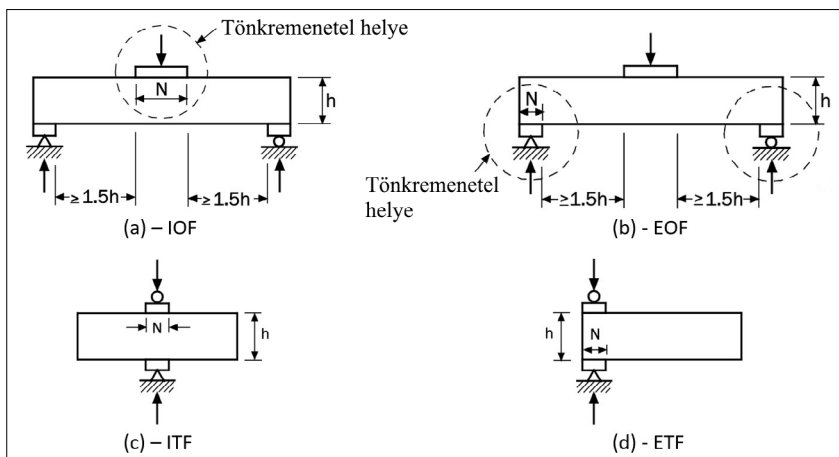
Az acéltetőknél a támasz felső síkja sokszor követi a tetőszögét, de gyakori a szelemenek vízszintes elhelyezése is.



1. ábra. Tipikus támasz a tetőgerincnél betonszelemenek esetén



2. ábra. Lehetséges támaszok az eresznél beton- vagy acélszelemen esetén



3. ábra. Megkülönböztetett teheresetek (forrás – AISI S909-17 [3])

Az eresztámaszoknál a konzolban lévő lemezszakasz hossza változó (2. ábra). Sok esetben a tervező nem ad erre vonatkozó utasítást.

A szélső támaszok kialakítása két paramétert tekintve változhat. Az egyik a támaszkodási felület hossza, amely lehet a főelem felső síkjának a szélessége, vagy tetősíkot nem követő támasznál egy keskeny él. A másik paraméter a konzolban álló szabad vég hossza. A jelenlegi tanulmány nem vizsgálja a beroppanási ellenállást a köztes támaszoknál.

2. Analitikus számolás sajátosságai

2.1. AISI szabvány

Az acélidomok beroppanási ellenállásának a kutatása az 1940-es években kezdődött a Cornell egyetemen Winter és Pian kísérletével [1], amelyben 2 egymásnak háttal fordított, hidegen hajlított C idomot teszteltek 4 különböző teheresetre: IOF – egy mezőben terhelt öv, EOF – egy szélen terhelt öv, ITF – mezőben terhelt mindkét öv, ETF – szélen terhelt mindkét öv (3. ábra).

A laborkísérleteket később LaBoube és Schuster standardizálta [2], amely bekerült az amerikai AISI S909-17 [3] szabványba.

A gerinc koncentrált nyírásra való ellenállása meghatározásának a mai napig népszerű módja a fizikai kísérletek elvégzése, ugyanis a vékonyfalú idomok tönkremenetelét több, egyszerre fellépő tényező okozza [4]. Különböző keresztmetszeteken végzett kísérletsorozatok alapján az AISI S100-16 [5] szabványban empirikus képlet (1) lett kidolgozva [6]. A szabvány a beroppanási ellenállást a következő paraméterek alapján határozza meg: lemezvastagság (t), folyáshatár (F_y), gerinc dőlésszöge (θ), belső hajlítási sugár (R), teherhordó szakasz - lemez-támasz közötti kontaktfelület hossza (N), gerincmagasság (h).

$$P_n = Ct^2 F_y \sin \theta \left(1 - C_R \sqrt{\frac{R}{t}} \right) \left(1 + C_N \sqrt{\frac{N}{t}} \right) \left(1 - C_h \sqrt{\frac{h}{t}} \right) \quad (1)$$

2.2. Eurokód

Az Eurokód 3-1-3 [7] szerinti számolás is az AISI standardra épül [8], de külön kezeli az egy, kettő vagy többgerincű idomokat. A több gerinccel rendelkező trapézlemezek beroppanási ellenállását a (2) összefüggéssel számolja, amelyben a változók hasonlóak az amerikai szabványhoz: lemezvastagság (t), folyáshatár (f_{yb}), rugalmassági modulus (E), hajlítási sugár (r), effektív támaszkodási felület hossza (l_a), gerinc dőlésszöge (ϕ).

$$R_w = \frac{\alpha \cdot t^2 \sqrt{f_{yb} \cdot E}}{\gamma_{M1}} \cdot \left(1 - 0.1 \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} \right) \left(0.5 + \sqrt{0.02 \cdot \frac{l_a}{t}} \right) \left(2.4 + \left(\frac{\phi}{90} \right)^2 \right) \quad (2)$$

2.3. Szabványok összehasonlítása

Mindkét összefüggés figyelembe veszi a támasz kialakítás sajátosságait. Az AISI szabvány konstansokat ad (C , CR , CN , Ch), amelyek függenek a keresztmetszet típusától (C , Z , Ω , trapézlemez), a lemezek esetleges rögzítésétől, valamint az alkalmazott terhelés pozíciójától (IOF , EOF , ITF , ETF).

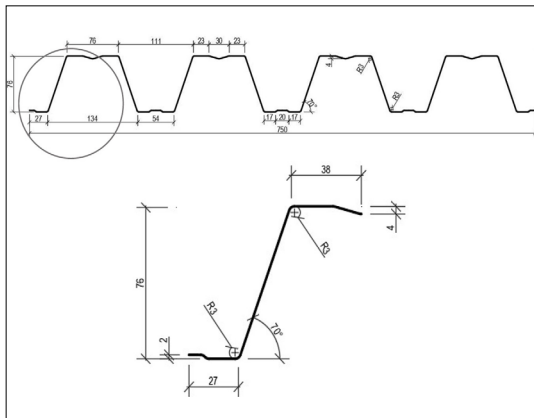
Az Eurokód többgerincű acélidomokra vonatkozó összefüggése az (α) és (l_a) paraméterek segítségével különbözteti meg a támaszkonfigurációkat. Az (α) tényező függ a teherkategóriától, azaz a teher alkalmazási pontjától. Az effektív támaszkodási felület (l_a) függ a teherkategóriától, valamint a támasz szélességétől.

A legszembetűnőbb eltérés a szabványok között az, hogy az Eurokód nem tér ki a lemezek támaszhoz való rögzítésének hatására, míg az AISI eltérő konstansokat ír elő a csavarral rögzített kialakításokra. A jelen tanulmány a következő fejezetekben a beroppanási ellenállást vizsgálja szélső támaszoknál, rögzített, illetve szabadon felfekvő végek esetén.

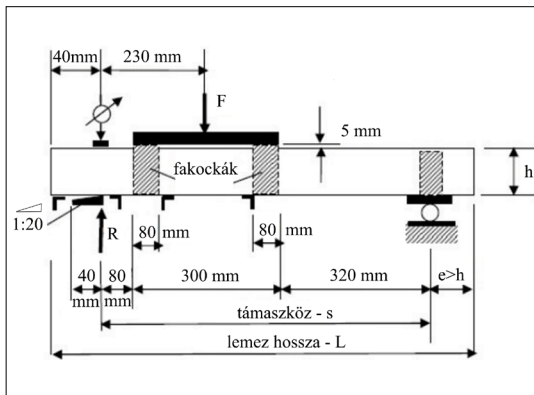
3. Végeelemes modellezés

3.1. Vizsgált geometria

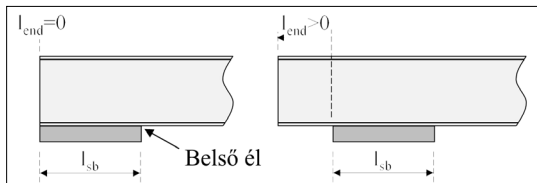
A kutatás során a GRISPE projektben tesztelt [9, 10] PCB80 egyenes gerincű trapézlemez volt a referencia-alany. Egyéb keresztmetszetek is vizsgálatra kerültek, de a parametrikus tanulmány során a 0.75 mm vastag BACACIER PCB80 profil használtuk. A támasz szélessége (l_{sb}) a kísérletek során használt 40 mm volt (4. ábra és 5. ábra).



4. ábra. A referenciaprofil geometriája



5. ábra. A laborkísérlet felépítése (forrás – GRISPE-dokumentum [10])



6. ábra. A konzolban álló vég reprezentálása

A numerikusan vizsgált szélső támaszoknál a konzolban álló szabad vég hossza (l_{end}) változó volt. Öt kialakítást elemeztünk rögzített, valamint rögzítetlen végekkel, ahol $l_{end} = 0/20/40/80/160$ mm és $l_{sb} = 40$ mm (6. ábra).

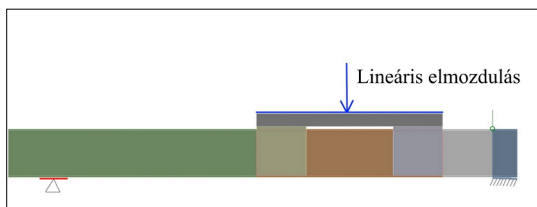
3.2. Numerikus modell

A szerzők több végeleemes modellt építettek fel [11, 12] Ansys Workbench 2020 R2, valamint Ansys Mechanical 2019 szoftver segítségével. Az analízisek során a geometriai és az anyagi nemlinearitást egyaránt figyelembe vettük.

A gyakorlatban a trapézlemezeket a hosszirányú átfedéseknél fűzőcsavarokkal rögzítik, ami megakadályozza az oldalirányú elmozdulást, ezért a tönkremeneteli mód gerincenként azonosnak tekinthető. A számítási idő csökkentése végett csak egy fél borda került bemodellezésre, és a hosszanti éleken szimmetria-peremfeltételt határoztunk meg. Az alkalmazott teherhez közelebb eső részen a lemez egy enyhén megdől acéllemezen támaszkodik, az ellentétes végen pedig csukló található. A terhelés az alsó övre irányított függőleges elmozdulásként lett alkalmazva, melynek a mértéke inkrementumonként növekszik (7. ábra).

A háló kialakítása követi a várható deformációk eloszlását. A lemezt három szakaszra bontottuk. A támasz körül a háló 3 mm-es, a terhelés alatt 6 mm-es, és a tehertől távolabb eső részen 10 mm-es. A végelemek dominánsan négyoldalú, másodfokú SHELL281 típusú elemek. A hajlított éleken a háló úgy lett kialakítva, hogy az ívet minimum 4 szakaszra ossza.

A folyáshatár a kísérletnek megfelelően 362.8 MPa. A numerikus modellezés során bilineáris anyaggyörbét használtunk, az első szakaszon



7. ábra. Peremfeltételek

$E = 210$ GPa, a második szakaszon $E = 2.1$ GPa rugalmassági modulusssal. A $t = 0.75$ mm helyett a $t_{real} = 0.684$ mm mért lemezvastagság került bevezetésre. (8. ábra)

A végeleemes modell a GRISPE projekt kísérletei [9, 10] alapján lett validálva. A numerikus modellel kapott beroppanási ellenállás 0.23%-kal tért el a kísérletitől, a posztelasztikus zónában található második teherbírás-maximum pedig 13.34%-kal lett kisebb a kísérletinél [11]. A numerikusan kapott deformált alak és tönkremeneteli mód hasonló a valóságban megfigyelttel.

4. Eredmények

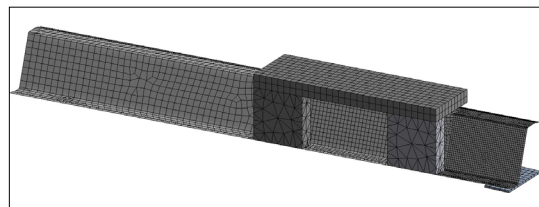
Az utóbbi években elvégzett európai laborkísérletek alatt [10, 13] a trapézlemezek nem voltak a támaszhoz rögzítve, az építkezési gyakorlatban viszont a lemez mindig össze van kapcsolva a támaszként szolgáló szelemennel vagy gerendával. A jelen fejezet a szélső támaszhoz csavározott és a nem rögzített lemezek beroppanási ellenállását hasonlítja össze, változó szabad véghosszakra. A köztes támaszoknál kevésbé releváns a rögzítés hatásának a vizsgálata, mivel általában nem jelentkezik olyan teherfeltétel, amely hatására az alsó öv eltávolodna a támasztól.

A csavar és az alátét merevsége nagyobb, mint a lefogott lemezé. Húzás hatására jelentős deformációk csak a vékonyfalú idom alsó övében jelentkeznek. A számolási idő csökkentése miatt az Ansys-modellekben a rögzítési felületen a merev csavarnak csak a hatása került bevezetésre. Az alsó öv és a támasz összefogása az alátét peremének a vonalán történt.

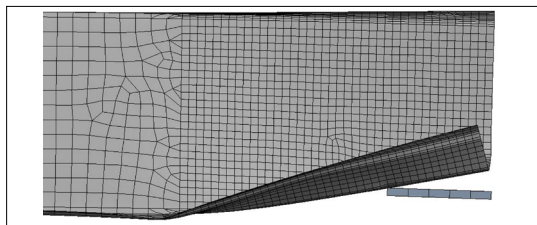
4.1. Rövid konzolok

Rögzítetlen rövid végeknél mind a kísérletek, mind a végeleemes modellek igazolják, hogy a trapézlemez szélső szakasza a teher növekedésével megemelkedik. A feszültségek a trapézlemez gerincének és a támasz élének a kontaktpontjánál koncentrálnak.

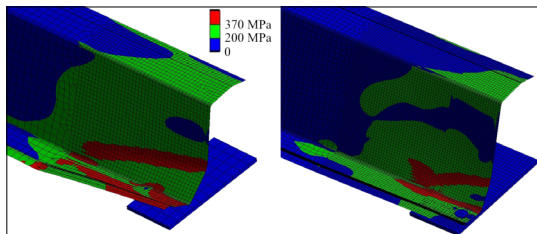
A támaszokhoz való rögzítés megakadályozza a végek felemelkedését. A feszültségek már nem egy pontban, hanem az alsó, hajlított gerinc-él



8. ábra. Hálózás



9. ábra. Rövid konzolokra jellemző deformáció, rögzítés nélkül



10. ábra. Feszültségeloszlás a rövid végeknél, rögzítés nélkül (balra) és rögzítéssel (jobbra)

mentén koncentrálnak. A 9. ábrán a következő konfiguráció deformált alakja, a 10. ábrán pedig a feszültségeloszlása látható: támaszszélesség (l_{sb}) 40 mm, konzol hossza (l_{end}) 0 mm.

4.2. Hosszú konzolok

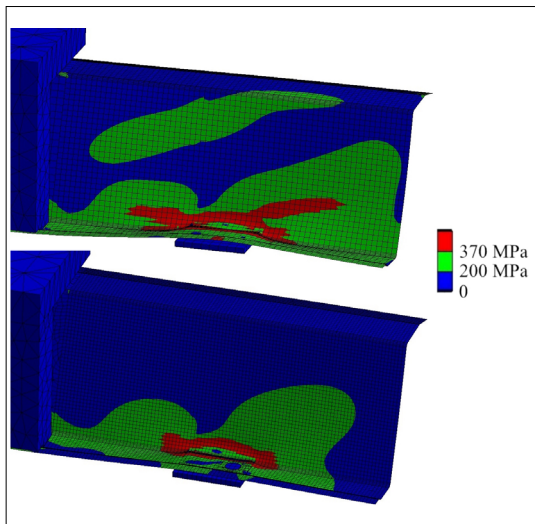
Hosszú szabad végeknél a szélső támasz által átadott koncentrált teher hatása lokálissá válik. A szelvény vége nem deformálódik, a lemez hasonlóan viselkedik, mint a mezőben alkalmazott tehernél.

A 11. ábra a 80 mm hosszú konzollal rendelkező PCB80 idom deformációit és feszültségeloszlásait mutatja csavarral és csavar nélkül. A lemez viselkedése a két esetben hasonló. Észrevehető, hogy a rögzített esetben a feszültségeloszlás szimmetrikusabb a támaszra nézve.

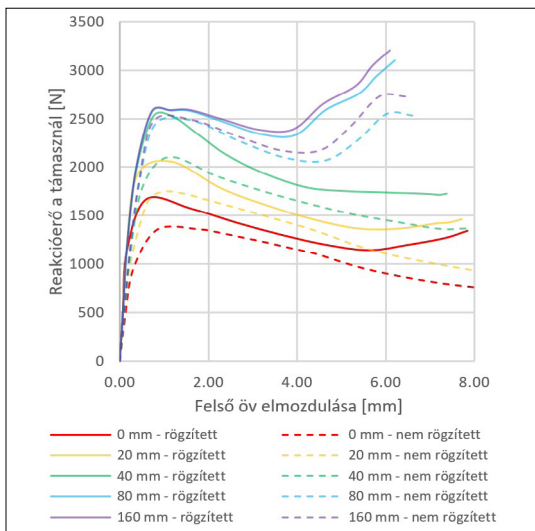
4.3. Rögzítés hatása a beroppanási ellenállásra

Összehasonlítottuk a numerikus úton kapott erő-elmozdulás görbéket rögzített és szabadon fekvő végeknél, különböző konzolhosszakra. A rövid végeknél a rögzítés jelentősen befolyásolja a koncentrált erőkre való teherbírást. A hosszú konzoloknál a rögzítés hatása elhanyagolható.

Számszerűsítve az eredményeket (12. ábra), a rövid konzoloknál (AISI – EOF, EN – kategória 1) a lemez csavaros rögzítése 20–23%-kal növelte a beroppanási ellenállást, ami megfelel az AISI S100-16 szerinti különbségnek. A hosszú végeknél (AISI – IOF, EN – kategória 2), az amerikai szabványnak megfelelően, a rögzítésnek nincs számottevő hatása. (1. táblázat)



11. ábra. Feszültségeloszlás a hosszú, szabad végeknél, rögzítés nélkül (fent), rögzítéssel (lent)



12. ábra. Numerikusan kapott erő-elmozdulás görbék növekvő konzolhosszakra rögzítve és rögzítés nélkül

1. táblázat. Beroppanási ellenállás változása a rögzítés hatására változó konzolhosszakra

l_{end}	$R_{w,Rd}$ rögzítés nélkül [N]	$R_{w,Rd}$ rögzített végél [N]	Rögzítés hatása [%]
0	1360	1672.7	22.99
20	1747.9	2104.7	20.41
40	2105.6	2528.5	20.08
80	2479.3	2580.6	4.09
160	2489.6	2592.5	4.13

5. Következtetések

A trapézlemezek beroppanási ellenállásának pontos meghatározásához elengedhetetlen a valós támasz-paraméterek ismerete. A validált végesselemes modellek alapján a rövid szabad végekkel kialakított szélső támaszoknál a rögzítés jelentős mértékben befolyásolja a profil kapacitását, amit az amerikai szabvány figyelembe is vesz.

Az Eurokód nem tárgyalja a tanulmány során vizsgált paramétert, ezzel sok esetben alábecsülve a lemezek koncentrált erőhatás alatti teherbírást. A szerzők fontosnak tartják, hogy az európai tervezőmérnökök tisztában legyenek a megfelelő támaszok kialakításának a fontosságával.

A jövőben javasolni fogjuk az Eurokód szabvány vonatkozó fejezetének a felülvizsgálatát, figyelembe véve a rögzítés hatását a vékonyfalú, többgerincű acélidomok beroppanási ellenállására.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a Sapientia Hungariae Alapítvány Collegium Talentum ösztöndíjprogramja és az Eötvös Loránd Tudományegyetem Márton Áron Szakkollégium Műszaki Műhelyének támogatásával készült, amiért a szerzők köszönetet mondanak.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Winter G., Pian R. H. J.: *Crushing Strength of Thin Steel Webs*. Engineering Experiment Station Bulletin, 35/1. (1946) New York, USA.
- [2] LaBoube R., Schuster R.: *Standard Test Method for Determining the Web Crippling Strength of Cold-Formed Steel Members*. Research Report RP02-6, American Iron Steel Institute, USA, 2002.
- [3] AISI S909-17: Test Standard for Determining the Web Crippling Strength of Cold-formed Steel Flexural Members, 2017.
- [4] Macdonald M., Heiyantuduwa M. A., Harrison D. K., Bailey R., Rhodes J.: *Literature Review of Web Crippling Behavior*. Proceedings of the 2nd Scottish Conference for Postgraduate Researchers of the Built and Natural Environment (PROBE), 2005, Rotterdam, Netherlands, 473–482.
- [5] AISI S100-16: North American Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2016.
- [6] Dwivedi R., Vyavahare A.Y.: *Review: Web Crippling Behavior of Cold-Formed Beam Sections*. Structures, 33. (2021) 4629–4641. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.042>
- [7] EN 1993 1-3: Design of Steel Structures – Part 1-3: General Rules – Supplementary Rules for Cold-Formed Members and Sheeting, 2006.
- [8] Misiek T., Belica A.: *Calibration of European Web-Crippling Equations for Cold-Formed C-and Z-Sections*. Steel Construction, Design and Research, 12/1. (2019) 31–43. <https://doi.org/10.1002/stco.201800006>
- [9] GRISPE WP1: Background Guidance for EN-1993-1-3 to Design of Sheeting with Embossments and Indentations, 2015.
- [10] GRISPE: Test Report of Steel Trapezoidal Sheeting with and without Embossments and Outward Stiffeners, Annex, 2015.
- [11] Nagy Ö.: *Influence of End Support Configuration on Web Crippling Resistance of Trapezoidal Profiles*. MS thesis, Technical University of Cluj-Napoca, 2021, Cluj-Napoca, Romania.
- [12] Sánduly A.: *Web Crippling in Deep Trapezoidal Sheeting*. MS thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2020, Barcelona, Spain.
- [13] Ádány S., Kachichian M., Kövesdi B., Dunai L.: *Experimental Studies on Deep Trapezoidal Sheeting with Perforated Webs*. Journal of Structural Engineering, 139/5. (2013) 729–739. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000593](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000593)



LÉGSEBESSÉG MÉRÉSE A MŰSZAKI KAR IRODÁIBAN

AIR VELOCITY MEASUREMENTS IN THE OFFICES OF THE FACULTY OF ENGINEERING

Németh Bíborka

Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Épületgépészeti és Létesítménymérnöki Tanszék, Debrecen, Magyarország
bibike.nemeth@gmail.com

Abstract

During renovations in various areas of the Engineering Faculty, fan coil and split air conditioning units have been installed. These devices have significantly improved the indoor environment quality during the summer season. However, if the indoor units are not properly positioned, they can exert several negative effects on the comfort of occupants and the quality of the indoor environment. Furthermore, improperly selected indoor units can increase installation and operational costs.

As a conclusion we can say that a correctly positioned and selected air conditioning unit can help maintain optimal indoor environmental conditions, while improperly chosen or positioned equipment can adversely affect occupants' comfort and increase operational costs.

Keywords: *air velocity measurement, Testo 400, comfort.*

Összefoglalás

A Műszaki Kar különböző rendeltetésű helyiségeiben végzett felújítások során fan coil és split klímaberendezéseket építettek be. Ezek a berendezések jelentősen javították a belső környezet minőségét a nyári időszakban. Ugyanakkor, ha a belső egységek nem megfelelően vannak elhelyezve, számos negatív hatást gyakorolhatnak a bent tartózkodók kényelmére és a belső környezet minőségére. Emellett a nem megfelelően kiválasztott beltéri egységek növelhetik a bekerülési és üzemeltetési költségeket is.

Összefoglalva, a helyesen elhelyezett és kiválasztott klímaegységek segítenek fenntartani az optimális belső környezeti feltételeket, míg a rosszul megválasztott vagy elhelyezett berendezések hátrányosan befolyásolhatják a helyiségben tartózkodók komfortérzetét, és növelhetik az üzemeltetési költségeket.

Kulcsszavak: *légsebességmérés, testo 400, komfort.*

1. Bevezetés

Mivel az emberek életük 80-90%-át zárt térben töltik (munkahely, utazás, szabadidő, otthon), ezért fontosak mindazon kutatások, amelyek az épületek komforttereiére irányulnak. Azonban az ember egyre több üvegfelületet igényel, hogy kapcsolatot teremtsen a külvilággal, ami nyáron növeli a hőterhelést, ennek következtében drasztikusan növeli a hűtési igényt. [1] Az üveg természetes fényt enged be, lehetőséget nyújt a természettel való kapcsolatteremtésre, csökkenti a szerkezeti terhelést, és javítja az épületek esztétikai megjelenését. Bár számos előnnyel jár az

üvegezés az épületben tartózkodók és a tervezők számára, ezzel szemben problémákat okoz, ha nem megfelelően választják ki. Az épületburkolat és az üvegezett nyílászárók jelentős forrását képezik a napsugaraknak és a hőterhelésnek. Ennek eredményeként teljes mértékben mechanikus eszközökre kell támaszkodni a beltéri hőmérséklet manipulálásához, és végül a hőkomfort eléréséhez, nagy energiafogyasztás mellett [2]. Magyarországnak kontinentális éghajlata van, forró nyarakkal, alacsony átlagos páratartalommal, de gyakori záporokkal és enyhe hideg, havas téli időszakokkal. Az átlagos éves hőmérséklet 9,7 °C. A hőmérséklet szélsőségei körülbelül 42 °C nyá-

ron és -29°C télen. Mivel július a legmelegebb nyári hónap Magyarországon, elemeztem az épület különböző helyiségeiben az egyes napokon belüli hőmérséklet-ingadozást ebben a hónapban. [1] Az épületek belső hőmérséklete változik a nap folyamán a külső hőmérséklettől, a homlokzatok tájolásától, az üvegezett területtől és az opálos épületelemek termofizikai tulajdonságaitól függően. [3] A természetes szellőzés segít hűteni az épület szerkezetét, ezáltal nagymértékben csökkenti az épület túlmelegedésének kockázatát a nyári időszakban. Nyáron a természetes szellőzés ablakokon keresztül történik, ami nagyban függ az uralkodó szelektől és a napfény által okozott hőmérsékleti különbségtől az épület különböző részein, így nem tudjuk szabályozni a beáramló levegő mennyiségét. [4] A Műszaki Kar régi, keleti tájolású homlokzatának egy részét felújították, és az évek során az épületegyüttesen több bővítést is elvégeztek. Lehetőségem volt a nyári időszakban különböző helységekből a belső levegő sebességét rögzíteni.



1. ábra. Műszaki Kar, műholdas kép (Google-térkép)



2. ábra. A Műszaki Kar keleti tájolású szárnya

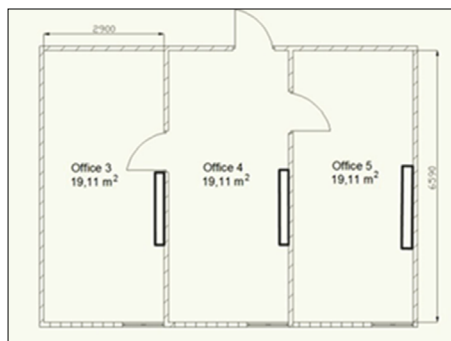
2. Az épület bemutatása

A Debreceni Egyetem Műszaki Karának épülete az Ótemető utca 2–4. szám alatt található. (1. ábra, 2. ábra) Az épületkomplexum magában foglalja az oktatási részt, a műhelyeket, a laboratóriumokat és a 270 lakóhellyel rendelkező kollégiumot. Az oktatási részben található a kar étterme, amelyet egy 500 főt ellátó konyha szolgál ki. Az oktatási épület összesen öt emeletről áll (földszint + 4 emelet), de a harmadik és a negyedik szint alapterülete eltér a többi szinttől. [1]

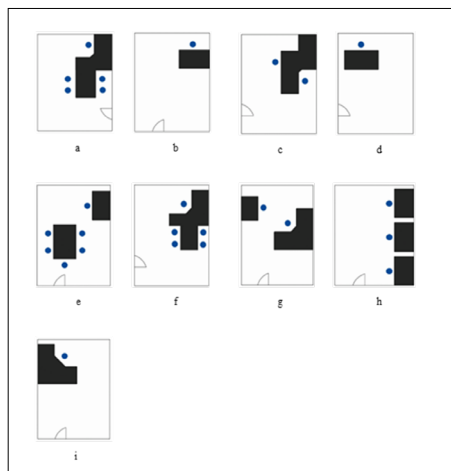
A harmadik emeleti irodák alaprajza és az épületgépészeti felújítás után beszerelésre került split klímák. (3. ábra)

A harmadik emeleten, a régi szárnyban 9 különböző elrendezésű iroda található meg, melyeknek berendezési módjait a 4. ábra mutatja.

A nyári időszakban Dr. Csáky Imre és Dr. Kalmár Ferenc az Indoor Temperature Monitoring in East Orientation Offices című cikkükben hőkamerás felvételt készítettek, amelyen a látható felületi



3. ábra. Irodaalaprajz split klímákkal [1]



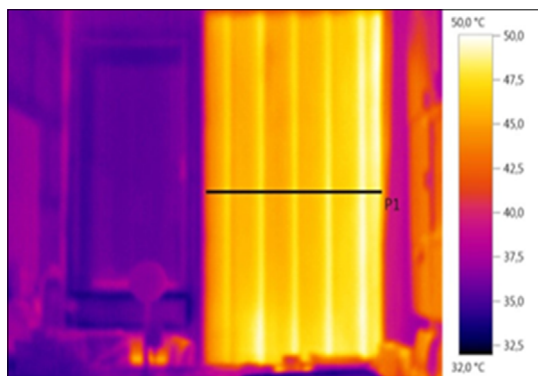
4. ábra. Irodaelrendezések a Műszaki Karon

hőmérséklet (akár 49,3 °C) okozza az irodákban a magas léghőmérsékletet. (5. ábra, 6. ábra) [5]

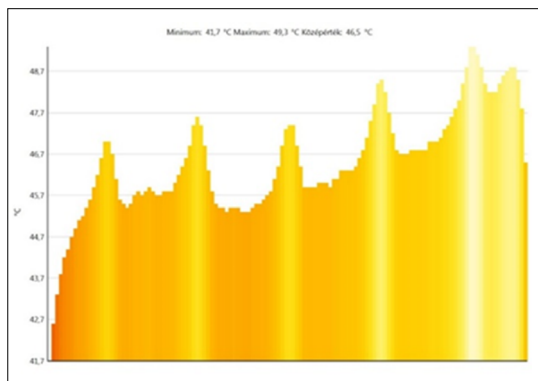
Az irodai léghőmérséklet 10–11 óra között volt a legmagasabb, elérte a 37 °C-ot is. (31–37°C volt mérhető egy nyári nap folyamán.) [5]

Azokban a nagy terű irodákban, ahol nincs lehetőség mesterséges szellőzésre, használati időszakban más alternatívákhoz kell fordulni. Ezért az épületüzemeltetés a következő intézkedéseket hozta: a régi szárny helyiségeibe split klímákat szereltek fel. A felújított szárnyba pedig fan coilok kerültek beépítésre. Azokban a helyiségekben, ahová se split klímák, se fan coilok nem kerültek beépítésre, ott asztali és toronyventilátorokat használnak a nyári időszakban a helyiségben tartózkodók.

Az MSZ CR 1752:2000 szabvány szerint a nagy terű irodákban az A komfort kategóriában a szabvány 0,18 m/s, B komfort kategória esetében 0,22 m/s és C komfort kategória esetében pedig 0,25 m/s az átlagos légsebesség a tartózkodási zónában. [6]



5. ábra. Hőkamerás felvétel [5]

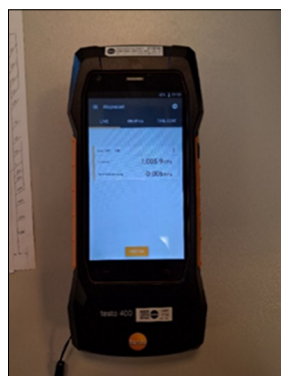


6. ábra. Hőfokeloszlás [5]

3. Mérőműszer bemutatása

Méréseim során testo 400-as klíma- és légtechnikai mérőműszert és testo turbulenciafok-szondákat használtam. (7. ábra, 8. ábra) A beltérben tapasztalható légsebesség a termikus közérzetre van hatással. A turbulenciafok a helyiségben uralkodó átlagos légsebességből, és a levegő hőmérsékletéből számított, százalékban kifejezett adat. A turbulenciafok kifejezi az adott belső térben létrejött hőmérséklet-ingadozást és a légáramlás intenzitását. A levegő hőmérséklete és a mért turbulenciafok között közvetlen összefüggés áll fenn. [7] A klíma- és légtechnikai mérőműszer a beépített mérési asszisztenssel optimális támogatást nyújt a légsebesség- és komfortérzetmérések szabvány szerinti elvégzésében, valamint a szellőző- és légkondicionáló rendszerek vizsgálatában és beállításában. [8]

A testo turbulenciafok-szonda irányfüggetlenül tud mérni, és egyidejűleg kiszámítja a turbulenciafokot és a huzatkockázatot az EN ISO 7730 / ASHRAE szabvány szerint. A pontos mérési eredmé-



7. ábra. Testo 400



8. ábra. Testo turbulenciafok-szonda

nyek biztosítása érdekében a levegősűrűséget a beépített abszolútnyomás-méréssel kompenzálja. A huzat korlátozza a komfortérzetet, és a beltéri levegővel kapcsolatos panaszok leggyakoribb oka. A szonda ideálisan alkalmas a munkahelyeken jellemző turbulenciafok és huzatkockázat megállapítására. A turbulenciafok a légsebesség időbeni ingadozása mértékének felel meg. Szükség van rá a huzatkockázat meghatározásához. [9] A klíma- és légtechnikai mérőműszer a beépített mérési asszisztenssel optimális támogatást nyújt a légsebesség- és komfortérzetmérések szabvány szerinti elvégzésében, valamint a szellőző- és légkondicionáló rendszerek vizsgálatában és beállításában. Nagy pontosságú, helytől független, beépített differenciálynomás-érzékelővel rendelkezik. Minden IAQ-paraméter mérésére képes: légsebesség, hőmérséklet, páratartalom, nyomás, megvilágítás, sugárzó hő, turbulenciafok, CO₂, és CO. [10] Ezek közül én a légsebességet, hőmérsékletet, turbulenciafokot és huzatarányt vizsgáltam méréseim során.

4. Mérés

Méréseimet két helyszínen végeztem, valós irodákban és laboratóriumban. A split klímákkal és fan coilokkal az irodákban végeztem el a méréseimet. A ventilátorokkal a Klíma és Légtechnika laboratóriumban végeztem a méréseimet, irodai helyiséget szimulálva. Azért volt szükség a laboratóriumi mérésekre, mert a laboratórium fala feketére van festve, hogy a ventilátor füstölése jól látható legyen. A füstölésre azért volt szükség, mert így jól látható, hogy a kiáramló levegő hogyan érkezik a vizsgált pont felé. (14. ábra, 16. ábra)

4.1. Mérések split klímával

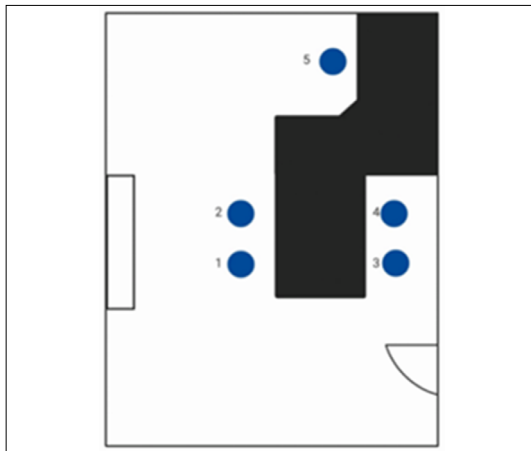
Méréseimet a 9. ábrán látható iroda (4/a. ábra, nagyított) 5 pontján végeztem el, két kitüntetett magasságban. 1,7 m és 1,1 m magasságban mértem: ez az álló ember fejmagassága és az ülő ember tarkójának magassága. Kitüntetett helynek az 5-ös pontot választottam, mivel ott van az irodában az asztali gép is, és ott tölti a legtöbb idejét a bent tartózkodó.

A 2-es pozíciót jelöltem ki a legkedvezőtlenebb helynek, mivel ott a legmagasabb a légsebesség, és még a gyenge fokozaton is több mint kétszerese a komfort kritériumhatárainak. A mért eredményeket táblázatba rendeztem, ahol jól látható, hogy a komfortkategóriáknak a légsebesség nem felel meg. (1. táblázat)

Az irodák Midea split típusú légkondicionálókkal vannak ellátva, melynek hűtőteljesítménye 4982 W és fűtő teljesítménye 5275 W. Legnagyobb üzemi nyomásszívás esetén 1.5 MPa nyomás esetén 4.2 MPa. Névleges teljes felvétele pedig 2200 W. (10. ábra)

1. táblázat. A 302-es iroda mérési eredményei

Pozíció	Magasság (m)	Légsebességek különböző fokozaton (m/s)		
		Erős	Közepes	Gyenge
1.	1,7	0,58	0,24	0,11
	1,1	0,31	0,17	0,08
2.	1,7	0,61	0,46	0,45
	1,1	0,5	0,4	0,39
3.	1,7	0,3	0,1	0,08
	1,1	0,17	0,11	0,03
4.	1,7	0,32	0,24	0,07
	1,1	0,31	0,19	0,04
5.	1,7	0,08	0,04	0,03
	1,1	0,09	0,06	0,03



9. ábra. Műszaki Kar, 302-es iroda



10. ábra. Midea split klíma

4.2. Mérések toronyventilátorral

Méréseimet a klíma- és légtechnika-laboratóriumban végeztem, ahol az irodai elrendezést szimulálva rendeztem be a helyiséget. Az irodák egy részegységét vizsgáltam, ahol egy asztalnál 1 ember helyezkedik el, és a ventilátort saját igényeire állítja be. (4. ábra /b, d, g)

A 11. ábrán szemléltettem, hogy helyezkedik el a személyhez képest a berendezés. Komfortméréseknél szabvány szerint 4 magasságban kell mérni: 1,7 m az álló ember magassága; 1,1 m az ülő ember tarkója; 0,6 m az ülő ember dereka; 0,1 m a boka magassága. A 0,6 m és 0,1 m magasságban mért eredményeimet nem tüntettem fel, hiszen a munkafelület alatt helyezkednek el, ezért a ventilátor által okozott légsebességek nincsenek rá

hatással. A ventilátor fix pozícióban volt, és méréseimet 3 erősségfokozaton végeztem (12. ábra, 13. ábra).

A mérési eredményeimet egy táblázatban rögzítettem. (2. táblázat) A komfortkritériumot meghaladó légsebességeket (v) pedig piros színnel kiemeltem. Ebből jól látható, hogy már 1-es fokozaton is sokszorosa a megengedett légsebességnek a kitüntetett ponton. Továbbá mértem turbulenciafokot (Tu), huzatarányt (DR) és hőmérsékletet (t).

4.3. Mérések asztali ventilátorral

A mérés menete és elrendezése pontosan ugyanaz volt, mint a toronyventilátorral végzett mérések során. A mérési elrendezés a 14. ábrán látható, és a füstölt állapot pedig a 15. ábrán.



11. ábra. Ventilátor és a személy elhelyezkedése

2. táblázat. Toronyventilátor – mérési eredmények

Fokozat	h (m)	Tu (%)	DR (%)	v (m/s)	t (°C)
1.	1,7	63	0	0,04	23,7
	1,1	7	84	1,26	22,3
2.	1,7	51	0	0,04	23,4
	1,1	7	100	1,57	21,9
3.	1,7	56	0	0,05	23,1
	1,1	7	100	1,78	26,1



12. ábra. Toronyventilátor-mérés



14. ábra. Asztali ventilátor



13. ábra. Toronyventilátor füstölése



15. ábra. Asztali ventilátor füstölése

A mérési eredmények is a toronyventilátorhoz hasonlóan alakultak. A komfortnak nem megfelelő eredmények a táblázatban pirossal kiemelve láthatóak. (3. táblázat)

Nyári időszakban azokban a helyiségekben, ahol nincs split klíma vagy fan coil, és a léghőmérséklet meghaladja a 28 °C-ot, a magasabb légsebesség jölesik az embereknek és javítja a komfortérzetet. Ezeket az irodákat, melyben csak a ventilátorok vannak elhelyezve, nyári időszakban csak rövid távon használják. Hosszú távon a fan coilal vagy split klímákkal ellátott helyiségeket veszik igénybe. Minden személy saját igényeire szabva tudja használni az asztali ventilátorokat, ezzel javítva a saját közérzetét. A ventilátor pozíciója és fejeinek helyzete állítható, ezért minden opciót nem tudtam vizsgálni. A ventilátor fokozatának növelése a belső légsebességtől függ.

4.4. Mérések fan coilal

Méréseimet a SABIANA CARISMA fan coil segítségével végeztem. Hűtési teljesítménye 2,87 kW, a fűtési 3,56 kW. [11] (16. ábra)

A fan coilal való mérések során 3 pontban mértem. 1-es, közvetlenül a fan coil felett (legkedvezőtlenebb hely), 2-es, amikor az irodai asztalnál

3. táblázat. Asztali ventilátor – mérési eredmények

Fokozat	h (m)	Tu (%)	DR (%)	v (m/s)	t (°C)
1.	1,7	51	0	0,05	23,7
	1,1	12	100	1,36	22,7
2.	1,7	57	3	0,06	23,7
	1,1	19	100	1,47	22,7
3.	1,7	66	6	0,08	23,6
	1,1	27	100	1,72	22,8



16. ábra. Fan coil

egy személy ül, a 3-as (kitüntetett pont), amikor két személy ül az asztalnál, és itt a fan coilhoz közelebb tartózkodó személy helyzetét vettem figyelembe a méréseim során. (17. ábra)

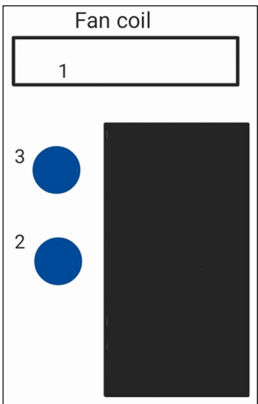
A legkedvezőtlenebb hely a fan coil közvetlen közelében található: itt magas légsebességek alakultak ki. A kitüntetett ponton pedig a légsebesség már meghaladta a komfortkritériumot a kettes pozícióval szemben. (4. táblázat)

5. Következtetések

Komplex méréseket végeztem nyári időszakban, hogy bemutassam a helyiségek légsebességeit azon a helyeken, ahol az irodákban leginkább tartózkodnak az emberek, a kitüntetett magasságokon. Az eredmények azt mutatják, hogy oda kell figyelni a munkaállomások megfelelő elhelyezésére. Megvizsgáltam és laboratóriumi mérésekkel igazoltam a berendezések alkalmazási lehetőségeit különböző elrendezésű irodákban. A kutatási módszertan ismertetése után méréseket végeztem az irodákban. A Műszaki Kar irodáiban rendelkezésemre álltak a méréseimhez fan coilok, ventilátorok és klímaberendezések. A méréseim során kalibrált testo-műszereket alkalmaztam, hogy mérjem a belső légsebességet,

4. táblázat. Fan coil – mérési eredmények

Pozíció	h (m)	Tu (%)	DR (%)	v (m/s)	t (°C)
1.	1,7	31	100	0,76	20,8
	1,1	10	100	1,24	20,8
2.	1,7	46	7	0,08	21,3
	1,1	71	0	0,04	21,2
3.	1,7	44	25	0,21	22
	1,1	32	7	0,11	21,6



17. ábra. Szimulált iroda

turbulenciafokot, huzatarányt és a hőmérsékletet. A jövőben célom a nyári időszakban megvizsgálni a természetes szellőzés lehetőségét, hogy milyen légsebességek alakulnak ki a tartózkodási zónában.

Köszönetnyilvánítás

A Kulturális és Innovációs minisztérium ÚNKP-23-1 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság programjának a nemzeti

Kutatási, fejlesztési és innovációs alpból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

„A TKP2021-NKTA-34 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium nemzeti kutatási fejlesztési és innovációs alpból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NKTA pályázati program finanszírozásában valósult meg.”

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Csáki E.: *Influence of Transparent Surfaces on Summer Thermal Comfort in Buildings*. Proceedings of 16th Building Services, Mechanical and Building Industry Days, Debrecen, Hungary, 2010.)
- [2] Nedhal A., Sharifah F., Adel A.: *The Effect of Orientation and Glazed Area to the Indoor Air Temperature in Unventilated Building Sin Hot-Humid Climate*. The 3rd International Conference on Built Environment in Developing Countries, University Sains Malaysia, 424–433.
- [3] Kalmár F., Csiha A.: *Interrelation between Glazed Surfaces, Building Structure and Thermal Comfort*. The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006.
- [4] Recknagel, Sprenger, Schramek: *Fűtés és klíma technika 2000*. Dialóg-Campus kiadó, Budapest–Pécs 2000.
- [5] Csáky I., Kalmár F.: *Indoor Temperature Monitoring in East Orientation Offices*. In: Proceedings of Denzero International Conference: Sustainable energy by optimal integration of renewable energy sources, Debrecen, 2014. 155–164.
- [6] MSZ CR 1752:2000; *Épületek szellőztetése. Épületek belső környezetének tervezési alapjai*; Magyar Szabványügyi Testület
- [7] https://www.testo.com/hu-HU/komforter-zet-meres/turbulencia-fok/c/applications_building_construction_comfort_level_turbulence_degree (2023.08.23.)
- [8] <https://www.testo.com/hu-HU/testo-400/p/0560-0400> (2023.09.27.)
- [9] <https://www.testo.com/hu-HU/turbulencia-fok-szonda/p/0628-0152> (2023.09.27.)
- [10] <https://www.testo.com/hu-HU/testo-400/p/0560-0400> (2023.10.01.)
- [11] <https://climamarket.com/products/fan-coil-sabiana-carisma-crc-mv-33-kw-2-92-2-39> (2024.02.17.)



MŰANYAG FOGASKEREK KOPTATÁSÁRA ALKALMAS BERENDEZÉS

A WEAR DEVICE FOR PLASTIC GEARS

Portik Szilveszter,¹ Gergely Attila²

¹ Sapiientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, gépészmérnöki szak, IV. év, Marosvásárhely, Románia, szilviportik@gmail.com

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

Abstract

Our goal was to design and build a device that allows the investigation of wear for plastic spur gears. In the initial phase of the design process, cost-effectiveness was at the forefront. The device is part of a license project for the Faculty of Mechanical Engineering at Sapiientia Hungarian University of Transylvania and it will be used for research purposes in the Polymer Technologies Laboratory of the university. The designed test equipment allows the investigation of plastic spur gear wear properties at different loading and rotational speeds.

Keywords: *spur gears, wear, plastic, design.*

Összefoglalás

A kutatás célja egy műanyag fogaskerekek koptatására alkalmas berendezés tervezése, amely segítségével mérni tudjuk a kopás mértékét a terhelés függvényében. További célunk vizsgálni a fogaskerekek élettartamát a fordulatszám függvényében adott terhelés mellett. A tervezés fontos szempontja volt a költséghatékonyság. Ez a berendezés az államvizsga-dolgozatot keretén belül készül el, a Sapiientia EMTE Marosvásárhelyi Karának Gépészmérnöki Tanszékéhez tartozó polimertechnológia-laboratórium számára, kutatási és oktatási célokra. A tervezett berendezés lehetővé teszi a fogaskerék-hajtás tengelytáv-változtatását, továbbá a fordulatszám és a fékezőnyomaték is változtatható.

Kulcsszavak: *fogaskerék, kopás, műanyag, tervezés.*

1. Bevezetés

A fogaskerék egy kör keresztmetszetű hajtáselem, amelynek a felületén fogak vannak. Feladata, hogy egy másik fogaskerékhez kapcsolódva forgatónyomatékot vigyen át két tengely közt. Olyan esetekben, ahol a hajtó és hajtott tengely mozgásának szigorúan összerendeltnek kell lennie, például órákban, műszerekben, szerszámgépekben, a fogaskerekeknek alig van versenytársuk.

Az iparban számos helyen alkalmazhatóak a fogaskerekek, mint például a mezőgazdasági gépek, az autók kapcsoló szekrényében és különböző hajtások működtetéséhez. Nagy terhelhetőségük a felhasználhatóságukat szélesíti. A fogaskerék-

hajtások előnyei között említhetjük a nagy pontosságot, a nagyobb terhelhetőséget és a viszonylag magas fordulatszámon való működést.

A fogaskerekek alapanyagaként leggyakrabban az acélt választják. Fém alapanyag esetén a fogaskerekek igénybevételét és felhasználását figyelembe véve a következő négy alapanyag típus közül választhatunk: ötvözetlen vagy gyengén ötvöztetett acél, nemes acél, betétben edzhető acél és nitridálható acél. Mindegyik alapanyagnak megvannak az előnyei, mint például az edzett acél teherbíróbb, a nitridálható acél segítségével a beragadási teherbírás növelhető, de a legnagyobb teherbírás a betétedzett acéllal érhető el.

A fogaskerek gyártása pontosság és termelékenység függvényében történhet profilozó eljárással, vagyis tárcsamaróval vagy ujjmaróval, illetve lefejtő forgácsolási módszerrel is. A lefejtő fogaskerékgyártásnál megemlíthetjük a fésűs-késnek csigamaróval és metszőkerékkel történő megmunkálását. Ezen eljárások, habár széles körben elterjedtek az ipari közegben, és nagy a termelékenységük, nagy méretű és költséges berendezéseket igényelnek. Ebből kifolyólag egyre több alkalmazásban váltják ki a fémből készült fogaskereket a műanyagból készült fogaskerek.

A polimer fogaskerek egyedülálló előnyökkel rendelkeznek a fém fogaskerekkel szemben. Megemlíthetjük a magas hatásfokot, a csendes működést, a külső kenés nélküli működést, valamint az alacsonyabb előállítási költségüket. Viszont az egyik legfontosabb következménye a használatuknak a jelentős tömegcsökkenés [1]. Ennek köszönhetően, például az autóiiparban és a repülőiparban, de a háztartási és különféle berendezésekben is előszeretettel használják.

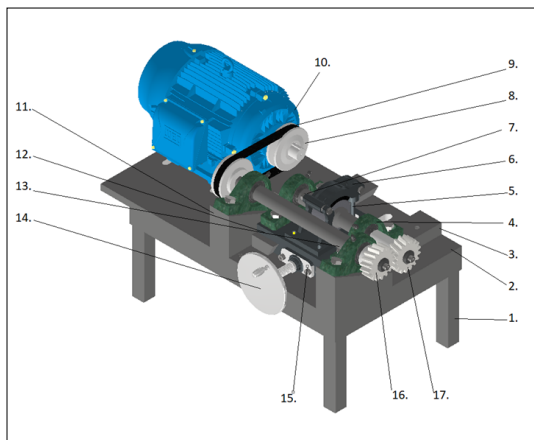
A műanyagból készült fogaskerek gyártására több technológia is létezik. Alacsony darabszám esetén a forgácsolási eljárások is használatosak, viszont a fröccsöntés gazdaságos gyártást biztosít nagy darabszámok esetén. Az elmúlt 10-15 évben azonban a 3D nyomtatási technológia egyre népszerűbb a polimer alkatrészek gyártásában. A 3D-nyomtatás a műanyag fröccsöntéssel szemben akkor költséghatékony, ha a gyártási mennyiség 1000 egység alatt van. A technológiát számos iparágban alkalmazták.

A műanyagból készült fogaskerek hátrányai között megemlíthetjük az alacsonyabb terhelhetőséget, továbbá a fogaskerék-hajtás működése során megjelenő súrlódás hatására felmelegednek, így gyorsabban kopnak el. A szakirodalom alapján a fröccsöntött fogaskerek és a 3D-nyomtatott fogaskerek között nagy különbség alakul ki a kopást illetően. 5 Nm terhelésnél a fröccsöntött fogaskerek akár 2,4 millió ciklust is kibírnak. Ezzel szemben a 3D-nyomtatott fogaskerek már 0.018 millió ciklust után tönkremennek. A kopás három különálló fázisra osztható, egy bejáratási időszakra, egy lineáris kopási periódusra és egy végső, gyors kopási időszakra. A tönkremenetelt minden esetben a magas hőmérséklet okozta [2, 3].

2. Fogaskerek koptatására alkalmas berendezés

2.1. A koptatóberendezés működése és 3D-modellje

A tervezett fogaskerék-koptató berendezés 3D-modellje az 1. ábrán látható. A vizsgált fogaskereket (16) és (17) a hajtott tengelyre (7), illetve a hajtótengelyekre (13) kell felhelyezni. A fogaskerek a tengelyre a nyomtató reteszkötések segítségével továbbítják. A hajtótengely (13) forgó mozgását egy monofázisú motor (10) biztosítja. A fordulatszám-szabályzást egy inverter használata segíti elő. A tengelytávot 50 és 125 mm közti intervallumban változtathatjuk egy orsóra rögzített hajtókarral (14) és a mozgatható asztalra (12) rögzített anya (15) segítségével. A tengelyek golyóscsapággal (4) vannak rögzítve. A minimális tengelytáv elérése érdekében a hajtótengely csapágait meg kellett emelni és dönteni a hajtott tengely csapágaihoz képest, mivel a lefogócsavarok akadályozták volna a tengelyek forgását. Ezért döntött tartószerkezetet (11) alakítottunk ki, amelyet az alaplapra rögzítettünk. A hajtott tengelyen (7) egy féktárcsa (6) található, amelyhez egy fékbetét kapcsolódik, így létrehozva a fékező hatást. A fékezőnyomaték különböző tömegek alkalmazásával jön létre. A megoldás biztosítja, hogy az üzemi hőmérséklet elérése után a nyomaték állandó marad.



1. ábra. A fogaskerek koptatására alkalmas berendezés 3D-modellje: 1 – vázszerkezet, 2 – alaplap, 3 – fecskefarok-vezeték, 4 – csapágyak, 5 – súlytartó rúd, 6 – fékrendszer, 7 – hajtott tengely, 8 – szíjtárcsa, 9 – szíj, 10 – motor, 11 – tartószerkezet, 12 – csúszóasztal, 13 – hajtótengely, 14 – hajtókar, 15 – mozgató anya, 16, 17 – tesztelendő fogaskerek

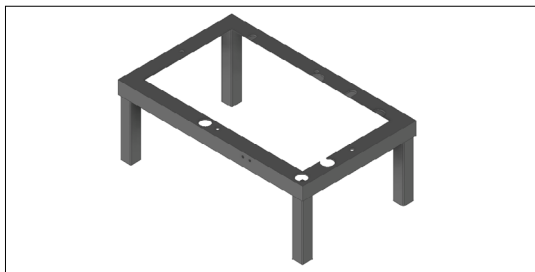
2.2. A koptatóberendezés felépítése

2.2.1. Vázszerkezet

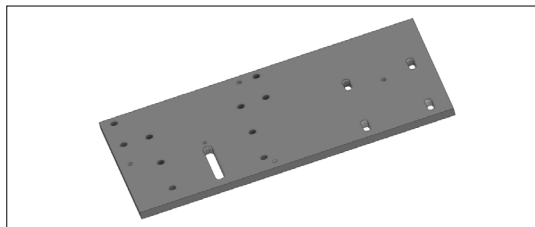
A tervezett berendezés alapját egy vázszerkezet alkotja, amely a **2. ábrán** látható. A szerkezet lábai $25 \times 25 \times 2.5$ mm-es zártszelvényből és a felső része $30 \times 30 \times 3$ mm-es szögacélból készült el hegesztéssel. A vázszerkezet magassága 160 mm, hossza 430 mm, és szélessége 265 mm. A tartószerkezet felső részén található furatok a csavarfejek helyét biztosítják, amelyek az alaplaphoz rögzített tartozékok csavarkötéséből jelennek meg. A vázszerkezetet az alaplappal 4 darab M8-as csavarral tudjuk a helyére csavarozni, amelyeket méretre vágunk.

2.2.2. Alaplap

A berendezés alapja egy 12 mm vastag fémlemez, amelynek a méretei: 490 mm hosszú és 265 mm széles. Az alaplap a vázszerkezethez van rögzítve. Az alaplapon helyezkednek el a berendezés további elemei, melyeket M8 $\times$ 25 csavarkötéssel rögzítettünk az ISO 4762 szabvány szerinti belső kulcsnyílású csavarral. Ez az illesztés lehetővé teszi, hogy utólagosan pozicionálni lehessen az alkatrészeket. Továbbá látható az alaplapon egy kanális, amelynek szélessége 14 mm és hosszúsága 80 mm. Ennek szerepe a súlytartó rúd szabad elmozgását biztosítja a tengelytáv változtatásakor. Továbbá, található rajta négy rövid kanális, amely a motor és a hajtótengely közti szíj feszítésére használható. Az alaplap 3D-modellje a **3. ábrán** látható.



2. ábra. A vázszerkezet 3D-modellje



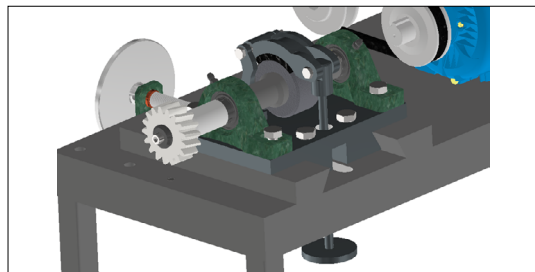
3. ábra. Az alaplap 3D-modellje

2.2.3. A mozgatható asztal

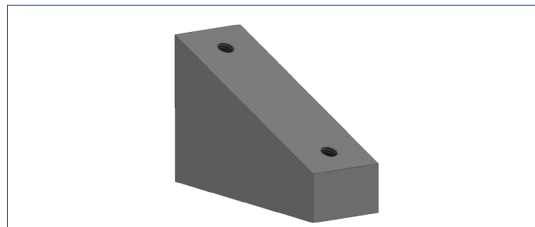
A hajtott tengely egy mozgatható asztalra van rögzítve, és egy orsó segítségével beállíthatjuk a kívánt tengelytávot. A szerkezet minden része fémből készült és a megmunkálás marógéppel történt. A mozgást egy M14 $\times$ 110 orsó hozza létre, amely az asztalra rögzített anyában fordul el. Ezáltal létre hozza a lineáris elmozdulást. Az asztal három részből tevődik össze. Az alaplappal párhuzamosan, a két állószerkezet között 270 mm távolságra, két 220 mm hosszú, 45 mm széles és 21 mm magas párhuzamos fecskefarok található, amelyek három-három csavarkötéssel vannak rögzítve. Hosszanti irányba, belülről az alsó rész irányába egy 30° levágást végeztünk. Az asztal erre a két fecskefarokra fekszik fel. A mozgó asztal alatt továbbá két rövidebb fecskefarok található, a következő méretekkel: 130 mm hosszú, 45 mm széles és 20 mm magas. Ennek a módszernek köszönhetően az asztal csak a hosszanti tengely irányába tud elmozdulni. Az asztal két szélére kerül felszerelésre a hajtott tengely csapágyházai. A mozgó asztal 3D-modellje a **4. ábrán** látható.

2.2.4. Tartószerkezet

A hajtott tengely pozicionálása a minimális tengelytáv elérése érdekében szükséges. A pozicionálást az **5. ábrán** látható két tartóelem biztosítja. Az elemek 40 mm vastag lemezből készültek. A munkadarabok alapanyaga fémhulladék, ami csökkenti az előállítási költséget. Emellett a megmunkálást is én végeztem el egy marógépen.



4. ábra. A mozgatható asztal 3D-modellje



5. ábra. A tartószerkezet 3D-modellje

A tartószerkezet felső síkja 23° szögeltéréssel helyezkedik az alaphoz képest, így gátolva meg a tengelyek és a csapágyházak ütközését a minimális tengelytáv beállítása esetén. Ezt az alaphoz két M10x30-as csavarkötés segítségével lehet rögzíteni. A felső részén is van két M8x30-as furat, melyek segítségével a csapágyházat rögzítjük.

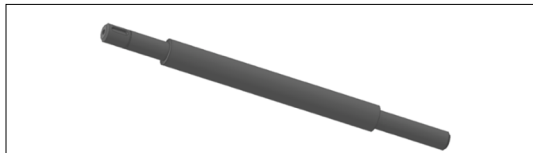
2.2.5. Tengelyek

A berendezéshez két tengely tartozik. A tengelytáv minimalizálása érdekében a hajtótengely csapágyait a hajtott tengely csapágyai közé helyeztük el. Mindkét tengely C45-ös anyagból készült esztergálással. A tengelyek hossza 331 mm. A hajtótengely szíjhajtás segítségével kapcsolódik a motorhoz. A fogaskerek reteszkötés által továbbítják a fogatónyomatékot a tengelyekre, továbbá M6x20 csavarkötés biztosítja az állandó pozicionálást axiális irányba. A csapágyháztól mérve a fogaskerék 10 mm távolságra helyezkedik el. A két csapágyház közti távolság 201,5 mm. A hajtótengelyen a fogaskerék 42,7 mm-re helyezkedik el a csapágytól. Ennek a tengelynek az ellenkező végén található egy központosító furat. A hajtótengely 3D-modellje a **6. ábrán** látható.

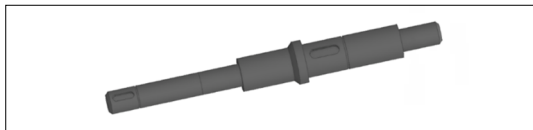
A hajtott tengely esetében egy rövidebb hosszát (249,75 mm) adtunk meg. A két tengelyre rögzített fogaskereknek ugyanabban a síkban kell elhelyezkedniük. A fogaskerék rögzítésére szintén reteszkötéses és rögzítőcsavart alkalmaztunk. A csapágy a tengely végétől 69,75 mm-re helyezkedik el. A két csapágy közti rész 120 mm, amelynek a közepén egy 30 mm széles fékezőtárcsa fog elhelyezkedni. A féktárcsát szintén egy reteszkötéssel biztosítjuk. A tengely másik vége a csapágy felfogatására alkalmas. Ezen a tengelyvégen szintén egy központosító furat található. A hajtott tengely 3D-modellje a **7. ábrán** látható.

2.2.6. Fékezett mechanizmus

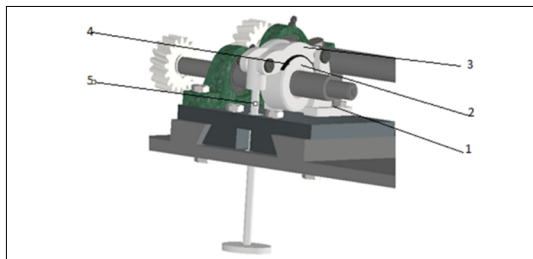
A fékezőmechanizmus öt részből áll: egy állványból (1), amely a féktárcsa (2) két oldalánál 57 mm magaságban feltámasztja a fékbetétet tartó elemet (3), amelyre egy fékbetét (4) van rögzítve. A nagyobb felület megteremtése érdekében a fékpofa 100° -ban követi a tárcsa ívét. A fékezőnyomatékot a fékezőrúdra (5) helyezett terhelő tömegek segítségével lehet biztosítani. Azért esett a választás erre a módszerre, mert ez bizonyult a legegyszerűbb olyan módszernek, amelynek segítségével állandó fékezőnyomatékot tudunk biztosítani egy bizonyos hőmérséklet után. A fékezőmechanizmus a **8. ábrán** látható.



6. ábra. A hajtótengely 3D-modellje



7. ábra. A hajtott tengely 3D-modellje



8. ábra. A fékezőmechanizmus 3D-modellje

3. Következtetések

Sikeresen megtervezünk egy, a műanyag fogaskerek koptatására alkalmas berendezést. A 3D-modellezés segítségével sikerült azonosítani a tervezési hibákat. Ezeket a hibákat már a tervezési fázisban ki is tudtuk javítani, amellyel el tudtuk kerülni a hibás vagy nem megfelelő alkatrészek gyártását. A gyártást teljes egészében el végeztem el saját műhelyben. A legtöbb esetben a megmunkáláshoz marógépet és esztergát használtam. Ez kiváló lehetőség volt arra, hogy betekintést nyerhessek egy komplex feladat kivitelezésébe. A gyártás során is voltak apró módosítások, amelyekkel jobb eredményt értem el.

Szakirodalom

- [1] Mao K., Li W., Hooke C. J., Walton D.: *Friction and Wear Behaviour of Acetal and Nylon Gears*. Wear, 267/1. (2008) 639-645.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.10.005>
- [2] Ye Z., Chris P., Ken M., Simon L.: *A Physical Investigation of Wear and Thermal Characteristics of 3D Printed Nylon Spur Gears*. Tribology International, 141. (2020) 105953.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105953>.
- [3] Ye Z., Ken M., Simon L., Akeel S., Guotao M.: *A Parametric Study of 3D Printed Polymer Gears*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 107. (2020) 4481-4492.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-020-05270-5>



MALOMCSISZOLÁSOS MÓDSZER HATÉKONYSÁGÁNAK VIZSGÁLATA ÖNTÖTT FÉM ALKATRÉSZEK ESETÉN

AN EXAMINATION OF THE EFFECTIVENESS OF TUMBLING ON SAND-CAST PARTS

Rappert Balázs,¹ Egyed-Faluvégi Erzsébet²

¹ Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, gépészmérnöki szak, IV. év, Marosvásárhely, Románia, rappertbalazs@gmail.com

² Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia, faluvegi.erzsebet@gmail.com

Abstract

The purpose of this study is to examine the effectiveness of the tumbling method on sand-cast metal parts. The first phase of the research was to design and construct a laboratory-scale tumbling mill, make samples for the measuring instruments available and to construct a coal-powered furnace that can be used in the making of the metal samples. After the design and construction of the necessary hardware, we conducted the experiment, took the necessary measurements and processed our data: this consisted of measuring the surface roughness of the metal samples before, during and after a complete tumbling cycle, then processing the resulting data. The experiment allows us to determine the optimal tumbling parameters such as the ideal tumbling medial size, the optimal speed of revolution of the tumbling drum and the smallest surface roughness achievable via the tumbling method. The experiment also allows us to find a correlation between the tumbling time and the change in surface roughness, which makes it possible to determine the optimal time frame in which the method is the most effective.

Keywords: surface roughness, tumbling mill, sand-cast parts, tumbling, sand casting, tumbling media.

Összefoglalás

A dolgozat célja a malmozási csiszoló módszer hatékonyságának vizsgálata öntött alkatrészek esetén. A kutatási kísérlet elvégzésére egy saját tervezésű csiszológymalmot és öntött próbatesteket használunk, így a kutatási projekt első fázisa a malom, a fém próbatestek, illetve a homoköntéssel készült próbatestek öntéséhez szükséges szénfűtéses kohó kivitelezése. A saját tervezésű berendezések kivitelezését a mérési és adatfeldolgozási fázis követi, amelyben mérjük a próbatestek felületi érdességét malmozás előtt és után, majd a kapott eredményeket feldolgozzuk. A sikeres kutatási kísérlet elvégzése lehetővé teszi, hogy meghatározzuk az optimális malmozási paramétereket, mint az őrlőanyag szemcsemérete, a malomdob optimális fordulatszáma és a legkisebb, praktikus elérhető felületi érdesség. A kísérlet továbbá lehetőséget ad az őrlési idő és a felületi érdesség változása közötti összefüggés megállapítására, aminek segítségével meghatározhatjuk azt az időkeretet, amelyen belül a módszerrel a legnagyobb változást tudjuk elérni a munkadarab felületi érdességében.

Kulcsszavak: felületi érdesség, csiszológymalom, öntött alkatrész, csiszolás, homoköntés, csiszolóanyag.

1. Bevezetés

1.1. Felületi érdesség

A tőrésztan a tőrésztartományok osztályozásával, meghatározásával és tanulmányozásával foglalkozó

tudományág. A tőrések többfélék lehetnek: alak- és helyzettőrések, más néven geometriai tőrések (párhuzamosság, körköröség, merőlegesség) vagy mérettőrések. Az alkatrész emellett más előírásoknak is meg kell, hogy feleljen: szerkezeti

(keménység, rugalmasság, kristályrács sűrűsége/szabályossága), optikai (átlátszóság, fényvisszaverő képesség) stb. A felületi érdesség is ide tartozik.

A Machinery's Handbook 27. kiadása így határozza meg a felületi érdességet: „Az érdesség a felület kisméretű szabálytalanságait jelenti, amelyek általában az előállítási folyamat következtében jönnek létre. Ezek lehetnek keresztirányú eltolásnyomok vagy más szabálytalanságok a mért szakasz mentén.” [1] A felületi érdességtűrés meghatározza, hogy mekkora lehet egy munkadarab felületén mért felületi érdesség (vagy milyen intervallumban kell elhelyezkednie ennek az értéknek).

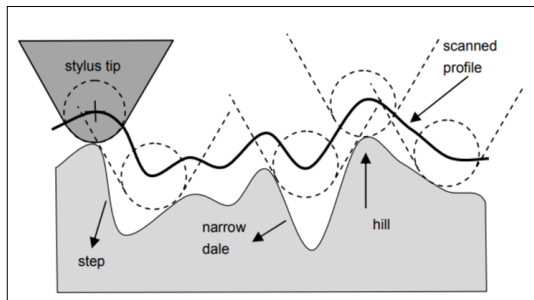
Az egyik legelterjedtebb és leggyakrabban alkalmazott mutató az átlagos felületi érdességi mutató, melyet az ISO 21920-2:2021 szabvány értelmez. E szerint az átlagos felületi érdesség értéke egy folytonos profilon mért csúcsok és völgyek ordinátáinak számtani középátlánya.

1.2. A felületi érdesség mérése

Ahhoz, hogy meg tudjuk állapítani, hogy egy adott alkatrész érdessége megfelel-e az előírt feltételeknek, mérési módszereket kell használnunk. Ezek a mérési módszerek lehetnek érintés általi és érintés nélküli módszerek is. [1]

A leggyakoribbak az érintés általi mérőműszerek, hiszen a relatíve egyszerű felépítésüknek köszönhetően széleskörűen elérhetők, megbízhatók és könnyebben használhatók, mint a pontosabb, de komplexebb optikai műszerek. A XX. század elején a felületek topológiáját főleg szemmel vagy körömmel ellenőrizték, ám mivel az emberi szem felbontása nagyjából 100 µm nagyságú, ezért pontosabb mérőműszerek kifejlesztésére volt szükség. [2]

Az első, érintés által működő hegyprofilométer („contact type stylus profilometer”, a továbbiakban „SP”) G. Schmaltz találta fel 1929-ben. [9] A hordozható SP-k működési elvének lényege, hogy egy gyémánt- vagy rubintűt húznak végig a felületen egy elektromos motor által meghajtott mechanizmus segítségével. Az így kapott profilgörbe (analóg berendezések esetén) vagy pontfelhő (digitális műszerek esetén) pontossága általában 0,1 és 4 µm között mozog (Ra). A tű hegyének a sugara általában 5 µm, és a mért szakasz hossza 5–8 mm közt mozog. [2] Értelemszerűen a tű hegyének a sugara korlátozza a mérés pontosságát, hisz a sugárnál szűkebb árkokat nem tudja érzékelni a műszer (1. ábra).



1. ábra. A tűhegy által leírt profil [1]

1.3. A csiszolómalmok működési elve

A csiszolómalom működése egyszerű, három fő elemből áll: a forgódob, az őrlő-csiszoló anyag és a dobot forgató hajtás.

A dob általában egy hengeres vagy sokszög keresztmetszetű cső, amely a malom felépítésétől és méretétől függően lehet zárt, egyik oldalán nyitott vagy mindkét oldalán nyitott. Az őrlő-csiszoló anyag a dobban található, és csiszolási felhasználásban általában alacsony szemcseméretű, kemény anyag (homok, kerámiaszemcsék, kemény kompozitok vagy fémek). Porok őrléséhez nagyobb fém- vagy kerámiatesteket használnak. A csiszolóhatás abból adódik, hogy a szemcsék és a munkadarab felülete közti folyamatos ütközések és súrlódás következtében a munkadarabból abrazív módon apró darabok válnak le.

Bizonyított, hogy az őrlőszemcsék formája befolyásolja az őrlőanyag viselkedését és hatékonyságát, mind porfinomítás, mind felületi megmunkálás esetén. Shi (2004) kutatási eredményei azt mutatják, hogy a „cylpeb” (kúpos henger lekerekített végekkel) formájú őrlőtestek hatékonyabban, mint az ugyanolyan tömegű gömb formájú őrlőtestek, hisz nagyobb felülettel rendelkeznek. [3] Nanda P. és társai háromszög alapú hasáb és gúla alakú őrlőtesteket használtak annak érdekében, hogy a munkadarab minden felülete nagyobb eséllyel érintkezzen az őrlőtestekkel. [4, 5] A gömb és henger vagy ezekből az idomokból származtatott formájú őrlőtestek a görbe felületük miatt kisebb eséllyel érintkeznek a munkadarab belső sarkjaival, míg a gúlák csúcsa és a hasábok élei sokkal nagyobb eséllyel érintkeznek.

2. Módszertan

2.1. A mérőműszer és a méréshez használt próbatestek

A kutatás célja a malomcsiszolás hatékonyságának vizsgálatára alkalmas rendszer építése és

az eljárás által elérhető felületi érdesség mérése. A kutatás első fázisában egy kis méretű csiszolómalmot terveztünk és valósítottunk meg, továbbá az Insize ISR-C002-típusú érdességmérőhöz egy befogólapot és próbatesteket is készítettünk. A befogólap célja, hogy meggátolja az érdességmérő elmozdulását a befogott próbatesthez képest, ezáltal biztosítva, hogy minden mérés ugyanazon egyenes mentén történik. Mivel az öntött felületek felületi érdessége nemcsak magas, hanem egyenetlen is, ez a lépés elengedhetetlen volt, hogy vizsgálni tudjuk a profilgörbe változását a malmozási ciklusok között, hiszen a mért egyenestől pár milliméternyi eltérés esetén már drasztikusan változhat a munkadarab érdességi profilgörbéje. Mivel az érdességmérő rubintűjének a sugara nagyon kicsi, és a rendelkezésünkre álló technológiával nem tudunk akkora pontosságot elérni, minden mérést többször végzünk el, és ezek számtani átlagával dolgozunk.

A próbatesteket homokformás öntéssel készítettük el, finom szemcséjű öntőhomokot használva. A próbatestek modellje 3D-nyomtatással készült, egy Creality K1C műanyag szálal nyomtató használatával, a műszaki rajzuk a 2. ábrán látható:

A próbatest CAD-modelljéből egy kilencágú öntőfát generáltunk, ami lehetővé teszi több próbatest egyszerre történő kiöntését. Két fémből gyártottunk próbatesteket, ólomból és alumíniumból. Mindkét fémből hat próbatestet öntöttünk.

2.2. A malom tervezése és kivitelezése

A kísérlet második fázisa a csiszoláshoz szükséges malom elkészítése volt. A malom tervezésénél több szempontot is figyelembe kellett vennünk: kis méret, alacsony költség, megbízható működés

és könnyű szerelhetőség. A malom szerkezetét a 3. ábra szemlélteti.

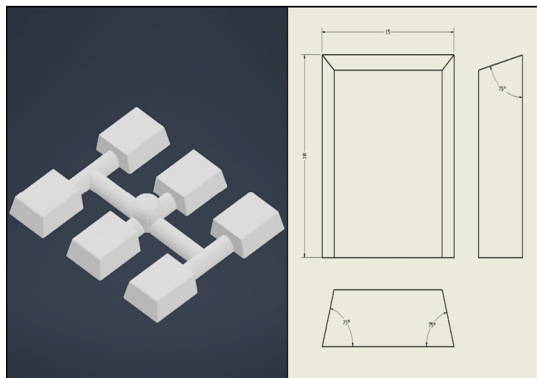
A malom kinetikai lánc a dörzshajtással forgatott malomdob meghajtásáért felel. Ahhoz, hogy meghatározzuk a szíjtárcsák átmérőjét, ki kellett számolnunk a dob optimális fordulatszámát.

A *Ball Milling Theory and Practice for the Amateur Pyrotechnician* című könyvében Sponenburgh L. E. megfogalmazza, hogy miért fontos az optimális fordulatszám meghatározása. Egy bizonyos fordulatszám alatt a dob belső fala és az azzal érintkező őrlőtestek között nem elég nagy a súrlódási erő ahhoz, hogy a forgó dob fal „magával ragadja” az őrlőtesteket, így az őrlőanyag a dob alján csúszik, miközben a dob körülötte forog, az őrlőtestek közti relatív elmozdulás értéke pedig nulla. Az ún. kritikus fordulatszám meghaladásával az őrlőtestek akkora sebességgel mozognak a dob fala mentén, hogy a rajtuk keletkező centrifugális tehetetlenségi erő nekinyomja őket a dob falának. Így az őrlőanyag ismét homogén anyagként viselkedik, tehát a szemcsék közt nincs relatív elmozdulás. A kritikus sebesség az a legkisebb fordulatszám, amely fölött ez a jelenség fellép. [6]

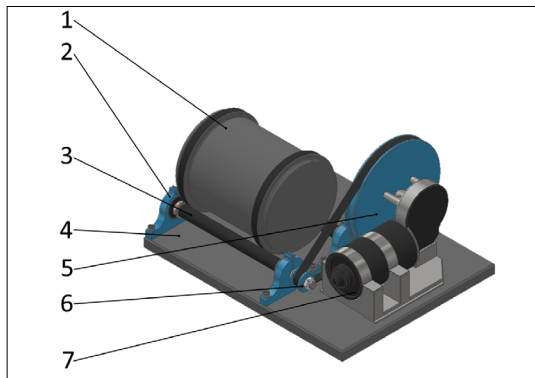
Ismerve, hogy a dob belső átmérője $D_{\text{dob belső}} = 110 \text{ mm}$, és hogy az őrlőtestek átmérője 3–5 mm közt változik. Ennek ismeretében meghatározzuk a malomdob kritikus fordulatszámát [6] az alábbi képlet segítségével,

$$N_{\text{krit}} \left[\frac{\text{ford}}{\text{perc}} \right] = \frac{423}{\sqrt{D_{\text{dob belső}} - d_{\text{örlőtest}}}} = \frac{423}{\sqrt{110 - 4}} \\ = 41,08 \frac{\text{ford}}{\text{perc}}$$

ahol a $d_{\text{örlőtest}}$ -érték az őrlőtestek átlagátmérőjét mutatja (gömb formájú őrlőtesteket feltételez-



2. ábra. A próbatest CAD-modellje és műszaki rajza



3. ábra. A malom CAD-modellje (1 – dob; 2 – csapágyazás; 3 – hajtott görgő; 4 – alaplap; 5 – ØD90 mm szíjtárcsa; 6 – ØD16 mm szíjtárcsa; 7 – motor)

ve). Az optimális fordulatszám a kritikus fordulatszám 80%-a [6], vagyis ebben az esetben 32,86 ford./perc. Ezt a fordulatszámot a szíjtárcsák átmérőinek arányával alakítottuk ki.

2.3. Kísérleti paraméterek

A kísérlet célja meghatározni a malmozási idő hatását a felületi érdességre. Feltételeztük, hogy a malmozás során mindenképp elérünk egy bizonyos változást a felületi érdességen, és vizsgáltuk, hogy ez a változás milyen mértékben következik be adott idő alatt.

Csiszolóanyagként 3–5 mm szemcseméretű bentonit-agyag szemcséket használtunk. Ahhoz, hogy a méréseknek legyen egy viszonyítási alapjuk, ismernünk kellett a próbatestek kezdeti felületi érdességét nyers, megmunkálatlan öntvény formájában (Ra-önt). Minden próbatesten három mérést végeztünk, majd ezeknek az értékeit átlagoltuk. A mérések számának növelésével növelhető az eredmény pontossága, ám mivel puhafém próbatestekkel dolgozunk, és az érdességmérő rubintűje kemény anyag, túl sok mérés esetén fennáll a veszélye, hogy a túl elsímítja a felületen található mikroasperitásokat.

Az egy munkadarabra eső csiszolási idő 4,5 óra. A négy és félórás csiszolási idő alatt a próbatesteken egyenkénti időintervallumokban végeztünk méréseket, hogy folyamatosan nyomon tudjuk követni a felületi érdesség változását, így a csiszolási időt ciklusokra osztottuk fel. Harmáncperces ciklusidőt szabtuk meg: ez elegendő ahhoz, hogy mérhető változás lépjen fel a felületi érdességben, és 10 teljes méréssel megfelelő méretű adathalmazzal eredményez.

A próbatesteket 1-től 6-ig megszámoztuk, hogy nyomon tudjuk követni, hogyan változik a felületi érdességük.

3. Mérési eredmények

Az adatok feldolgozásához Microsoft Excel környezetet használtunk, és a számításokat (pl.: számtani átlag) az Excel beépített függvényei segítségével számítottuk ki.

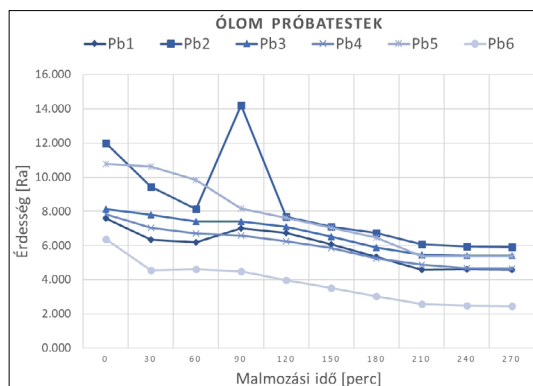
A próbatesteket fémtípusuknak és számuknak megfelelően jelöltük, így az ólom próbatestek Pb1, Pb2, ..., Pb6 jelölést kaptak, az alumínium próbatestek pedig Alu1, Alu2, ..., Alu6 jelölést. A továbbiakban a próbatestekre a jelölésükkel utalunk. Minden mérésakor rögzítettük az érdességmérőt és a munkadarabot is a befogókészülékben, hogy a mérések ugyanazon a profil mentén történjenek, ám a rendszer pontossága és az érdességmé-

rő tűhegyének pontossága közti különbség miatt így is kaptunk kiugró mérési eredményeket.

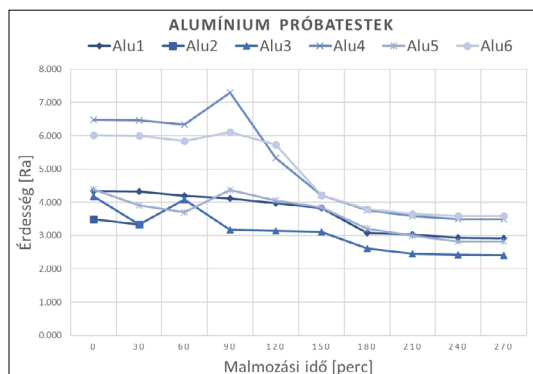
Az átlagos kezdeti felületi érdesség $Ra(Pb_atlag1) = 8,785 \mu m$ volt az ólom próbatestek esetében, és $Ra(Alu_atlag1) = 4,816 \mu m$ az alumínium próbatestek esetében. Ezek az értékek az összes, egyazon fémből készült próbatest érdességeinek az átlagát mutatja, ugyanis az egyéni próbatestek érdessége változó (pl.: $Ra(Pb2) = 12,003 \mu m$, $Ra(Pb6) = 6,37 \mu m$; $Ra(Alu4) = 6,482 \mu m$ és $Ra(Alu2) = 3,49 \mu m$).

Az eredmények ábrázolásához koordinátapontokkal ellátott vonalgrafikonokat használtunk, és összeállítottuk mind az átlagos érdességváltozás, mind a próbatestenkénti érdességváltozás grafikonjait. A próbatestekre lebontott eredményeket ábrázoló grafikonokat a 4. és 5. ábrák szemléltetik.

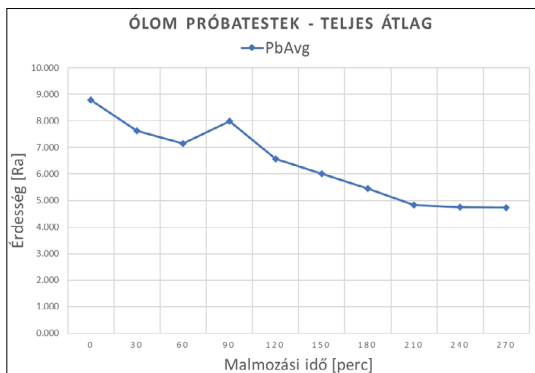
Észrevesszük, hogy a Pb2 és az Alu4 próbatestek esetében is a 90. perckor vett mérés esetében egy meredek eltérés jelentkezik a görbék formájához képest. Feltételezzük, hogy ez mérési vagy befogá-



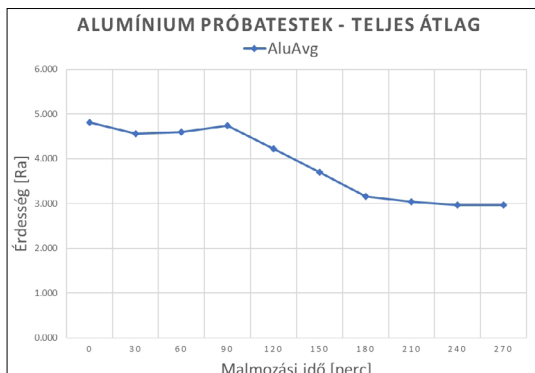
4. ábra. Ólom próbatestek érdességének változása



5. ábra. Alumínium próbatestek érdességének változása



6. ábra. Ólom próbatetek érdességének változása



7. ábra. Alumínium próbatetek érdességének változása

si hibából származik, ugyanis, ha a munkadarab felülete sérült volna csiszolás vagy mozgatás közben, azt a többi mérés is tükrözné.

Mivel a kutatás célja nem a próbatetek, hanem a módszer hatékonyságának vizsgálata, a következtetések levonásához célszerűbb az összetett érdességváltozási görbék tanulmányozása, amely átlagolja az összes, ugyanazon fémről készült próbatest változásait. Ezt a 6. és 7. ábrák szemléltetik.

Az elért végső felületi érdesség az ólom próbatetekeken $Ra(Pb_{végső}) = 4,725 \mu m$, míg az alumínium próbatetekeken $Ra(Alu_{végső}) = 2,962 \mu m$. A kezdeti és végső érdességek különbségeiből meg tudjuk határozni a teljes átlagos érdességváltozást, a ΔRa értéket, ami az ólom próbatetek esetében $4,059 \mu m$, és az alumínium próbatetek esetében $1,853 \mu m$.

4. Következtetések

A görbék megfigyelésekor észrevevesszük, hogy a meredekségük nemcsak hasonló (anyagtól és kezdeti felületi érdességtől függetlenül), de mindkét görbe meredeksége csökken egy bizonyos pont után, majd az utolsó értékek körül szinte teljesen kilaposodik.

Ez arra enged következtetni, hogy a csiszolási módszer csak egy bizonyos felületi érdességváltozás (ΔRa) elérésére alkalmas, egy adott ponton túl nem lehet jelentős változást elérni. Ez azzal magyarázható, hogy a kezdeti fázisban az érdességi profilcsúcsok hegyesek, így az elnyírásukhoz sokkal kisebb erőre van szükség, mint a későbbi fázisokban, amikor a hegyes csúcsok már lecsiszolódtak. Egy adott ponton túl a csiszolóanyag nem tud akkora erővel hatni a csúcsokra, hogy jelentős anyagmennyiséget távolítson el, így a felületi érdesség csökkenése lelassul vagy akár stagnál.

Ennek a jelenségnek a paraméterei több tényezőtől is függenek, mint a munkadarab és a csiszolóanyag keménységének különbsége és a csiszolóanyag szemcsemérete (a nagy szemcsék nem tudnak behatolni a mély és szűk árkokba).

Emellett az is észrevehető, hogy a bekövetkező érdességváltozás (ugyanazon csiszolóanyag használatával) összefüggésben van a munkadarab anyagának keménységével: a puhább ólom próbatetekeken sokkal nagyobb változást ($\Delta Ra(Pb) = 4,059 \mu m$) értünk el, mint a keményebb alumínium próbatetekeken ($\Delta Ra(Alu) = 1,853 \mu m$).

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Erik O., Franklin D., Holbrook L., Henry H. R.: *Machinery Handbook*. 27. kiad., Industrial Press Inc, New York, 2004.
- [2] Demircioglu P.: *Topological Evaluation of Surfaces in Relation to Surface Finish*. Adnan Menderes University, Aydın, Turkey, 2017.
- [3] Shi F.: *Comparison of Grinding Media—Cylpebs Versus Balls*, Minerals Engineering, 17. 2004.
- [4] Alban J. L., Chester A. R.: *The History of Grinding*. Society of Mining, Metallurgy and Exploration, Colorado, 2009.
- [5] Nanda P., Hassim, M. H., Idris M. H., Muhammad, H. J., Arafat, A.: *Effect of Mechanical Tumbling Parameters on Surface Roughness and Edge Radius of Medical Grade Cobalt Chromium Alloy*. International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology, 9/1. 2019.
- [6] Sponenburgh L. E.: *Ball Milling Theory and Practice for the Amateur Pyrotechnician*. Bridge City Enterprises, 1995;
- [7] ISO 21920-2:2021 Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface Texture: Profile — Part 2: Terms, Definitions and Surface Texture Parameters, 2021;

LIFTAJTÓ-FÓLIÁZÓ BERENDEZÉS TERVEZÉSE

DESIGN OF ELEVATOR DOOR FOILING MACHINE

Rezes Gábor,¹ Szigeti Ferenc,² Dezső Gergely³

¹ Nyíregyházi Egyetem, Műszaki és Agrártudományi Intézet, Műszaki Alapozó, Fizika és Gépgyártástechnológia Tanszék. Nyíregyháza, Magyarország, rgaborezes@gmail.com

² Nyíregyházi Egyetem, Műszaki és Agrártudományi Intézet, Műszaki Alapozó, Fizika és Gépgyártástechnológia Tanszék. Nyíregyháza, Magyarország, szigeti.ferenc@nye.hu

³ Nyíregyházi Egyetem, Műszaki és Agrártudományi Intézet, Műszaki Alapozó, Fizika és Gépgyártástechnológia Tanszék. Nyíregyháza, Magyarország, dezso.gergely@nye.hu

Abstract

The topic of this article is the design of a foiling machine for covering elevator doors and their components with protective film. The thesis presents the design process, from the initial parameters and material selection through structural design to strength dimensioning and verification, and the selection of the necessary drive motor and worm gear based on the results of the calculations is further explained. The compliance of the elements of the equipment with the strength requirements is verified by finite element testing, taking into account door panels of different sizes and numbers. A detailed flow analysis of the air smoothing of the foiling operation is presented with the help of the Ansys application.

Keywords: elevator, foiling machine, machine design, finite element method, automation.

Összefoglalás

A cikk témája a liftajtók és alkatrészeinek védőfóliával való burkolását biztosító fóliázógép tervezése. A dolgozatban bemutatásra kerül a tervezési folyamat a kiindulási paraméterek felvételétől és az anyagválasztástól a konstrukciós tervezésen keresztül a szilárdsági méretezésig és ellenőrzésig, továbbá ismertetésre kerül a számítások eredményei alapján szükséges hajtómotor, csigahajtómű választása. A berendezés elemei szilárdsági követelményeknek való megfelelésének ellenőrzése végelem-vizsgálattal történik, különböző méretű és számú ajtópanelek figyelembevételével. A fóliázási művelet levegős simításáról egy részletes áramlástani vizsgálat kerül bemutatásra az Ansys alkalmazás segítségével.

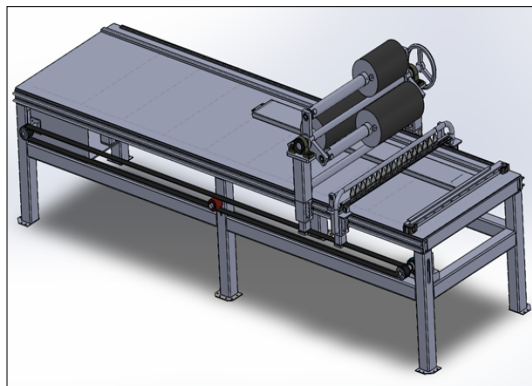
Kulcsszavak: felvonó, fóliázógép, géptervezés, végelem-módszer, automatizálás.

1. A fóliázógép konstrukciója

Kiindulási adatként a vállalatnál gyártott legmagasabb és legszélesebb ajtót vettem alapul. Ennek az ajtónak a magassága 3020 mm, szélessége pedig 930 mm. Ezért a gyártandó fóliázógépnek (1.ábra) [1] a méreteit valamivel nagyobbra vettem, hogy a védőfóliával való burkolás minden méretre gond nélkül megvalósítható legyen.

1.1. Az asztal tervezése és igénybevételei

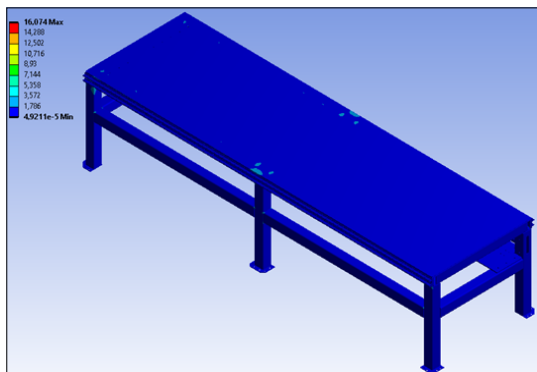
Az asztalt végelem-módszerrel ellenőriztem először álló helyzetben, terhelés nélkül, majd később több liftajtó terhelése esetén és egyéb terhelések esetén [1].



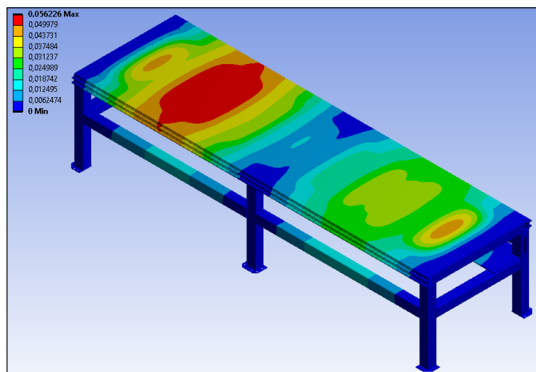
1. ábra. Fóliázógép

A vizsgálat ezen részében a később bemutatásra kerülő szerelvényt nem jelenítettem meg az egyszerűbb számítás érdekében. Az ellenőrzés során a szerelvény súlyából adódó terhelést végig számításba vettem, mint megoszló terhelés (2. ábra) [1].

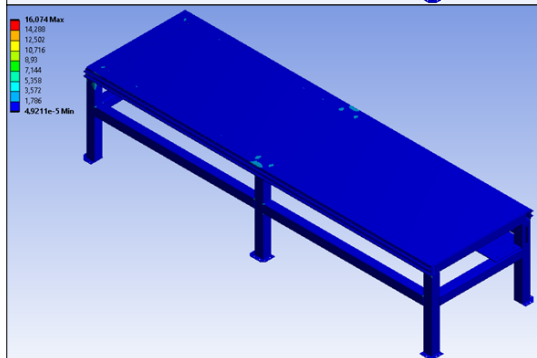
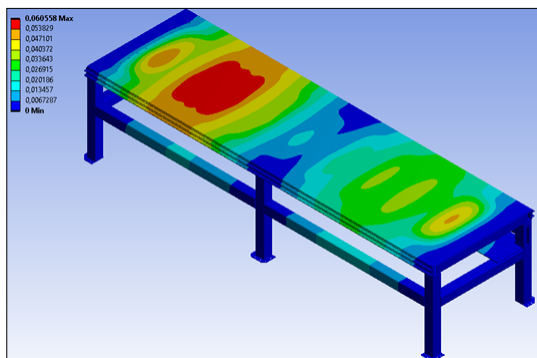
Látható, hogy az állványt nem terheli meg az üresjárat még akkor sem, ha a szerelvény az állvány tartólábai között helyezkedik el, ezzel a maximális feszültség: $15,4 \text{ N/mm}^2$. Ahogy a 3. ábrán [2] is látható, a szerkezet lehajlása a $0,06 \text{ mm}$ -es értéket is alig éri el.



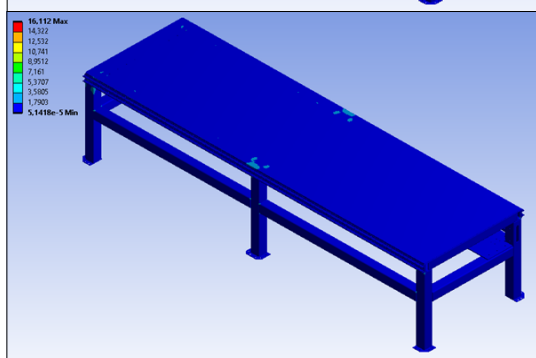
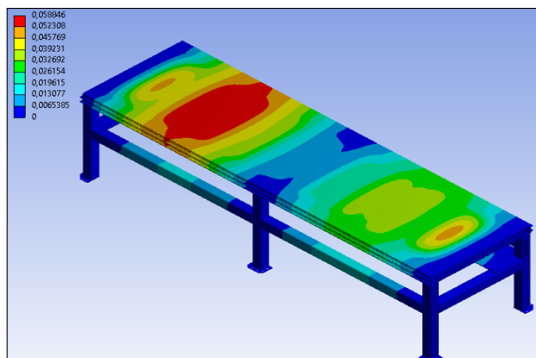
2. ábra. Asztalterhelés üresjáratban



3. ábra. Asztal lehajlása üresjáratban



4. ábra. Nyomófeszültség és lehajlás átlagos liftajtó terhelése esetén



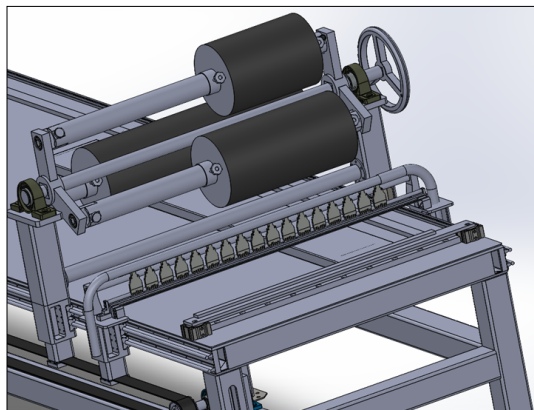
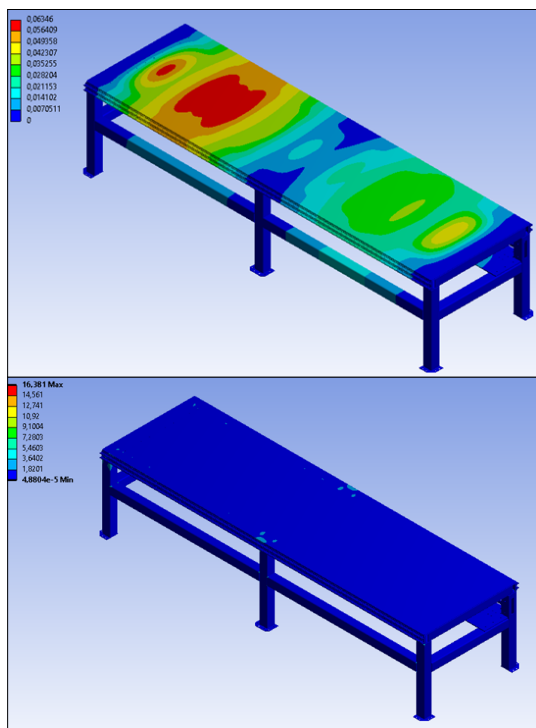
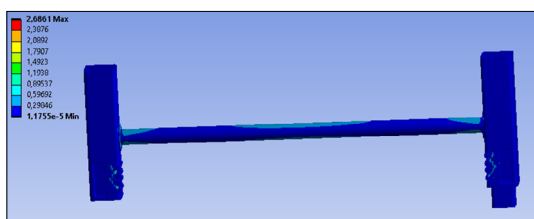
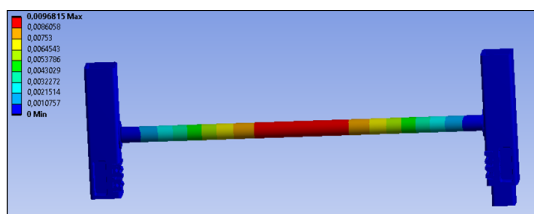
5. ábra. Nyomófeszültség és lehajlás legnagyobb liftajtó terhelése esetén

Az eredmények vizsgálata során (1. táblázat) szembetűnő lehet, hogy egy átlagos liftajtó (4. ábra) [2] szinte ugyanakkora maximális nyomófeszültséget képes létrehozni, mint a legnagyobb panel (5. ábra) [2]. Ez azért lehetséges, mert a nagyobb panel nagyobb felületen fekszik fel, és annak súlya nagyobb területen tud eloszlni, és több merevítőbordát is érint, ami csökkenti az egyes elemekre jutó terhelést.

Az egyéb terhelés alatt egy olyan esetet vettem, amikor négy 80 kilogrammos személy ül (6. ábra)

1. táblázat. Az asztal igénybevételei különböző terhelések esetén

	Átlagos liftajtó	Legnagyobb liftajtó esetén
Nyomófeszültség	16,0 N/mm ²	16,1 N/mm ²
Elmozdulás / lehajlás	0,06 mm	0,058 mm
	Terhelés üres-járatban	Egyéb terhelés
Nyomófeszültség	15,4 N/mm ²	20,8 N/mm ²
Elmozdulás / lehajlás	0,05 mm	0,14 mm

**7. ábra.** Szerelvény**6. ábra.** Nyomófeszültség és lehajlás egyéb terhelések esetén**8. ábra.** A szerelvény nyomófeszültségi ábrája**9. ábra.** A szerelvény lehajlási ábrája

[2] a szerkezeten, és amint az az adatokból kivehető, a szerkezetet ez sem terheli meg kritikusan.

1.2. A szerelvény tervezése és terhelései

A szerelvény két egységből áll. Van egy a fólia tartásáért, megvezetéséért és tájolásáért felelős egység, valamint egy simításért, továbbításért és vágásért felelős egység. Először a fóliatartó részt mutatom be. (7. ábra) [1].

A szerelvényre ható terhelések közé tartozik a saját súlyából adódó erő, a tekercstartó tengelyek

és annak csapágypai, valamint a fóliatekerics súlya, annak lehúzásával járó erő és az egyéb gépelem és alkatrészek súlya (24. ábra). A második egységről nem készítek külön vizsgálatot, mert a lineáris kocsit terhelő erők ebben az esetben lényegesen kisebbek, mint az első egységnél.

A fólia lehúzásához 15 N erő szükséges, ezt az értéket egy rugós erőmérő segítségével állapítottam meg, több lehúzási szöget is kipróbálva. A maximális erő 20 N volt, ezért a terheléseknél ezt vettem figyelembe.

A szerelvényt terhelő legnagyobb feszültség 2,7 N/mm² volt (8. ábra).

A szerelvény vizsgálatakor nem számoltam egyéb terhelésekkel. A legnagyobb lehajlás közepén látható, ez a szerelvény hossza miatt is lényeges, de a lehajlás mértéke nem éri el a 0,01 mm értéket sem (9. ábra).

1.3. A szerelvény működése

A dolgozó kiválasztja és elhelyezi a megfelelő szélességű fóliát a fóliázandó elem szélessége alapján, majd felhelyezi a burkolni kívánt elemet az asztalra. Ezután a gépet alaphelyzetbe állítja, hogy megtörténjen a fóliának a befűzése. A fóliát átvezetve a simítógörgő alatt, a dolgozó átfűzi azt a görgőpárba, majd átfűzi a pneumatikus pófák között. Ezt követően az operátor elindítja a gépet, amely rázár a fóliára, megkezdve ezzel a fóliázást. A simítást végző egység ekkor a szerelvényvel együtt halad, és a nagynyomású levegő segítségével lesimítja a fóliát. A burkolás végeztével a szerelvények megállnak, és ezután egy forró dróttal megtörténik a vágás. A vágás végeztével a fóliafogó pófák kioldanak, hogy a dolgozó kényelmesen el tudja távolítani az elemet, és betenni a következőt. Majd a műveletek végeztével a szerelvények alaphelyzetbe állnak, és megtörténik a befűzés.

A tekercsek cseréjét egy kiforgatható tengellyel oldottam meg (10. ábra). Ennek a tengelynek az egyik vége egy csuklóval van ellátva, amelyet könnyen ki lehet hajtani, és el lehet végezni a te-

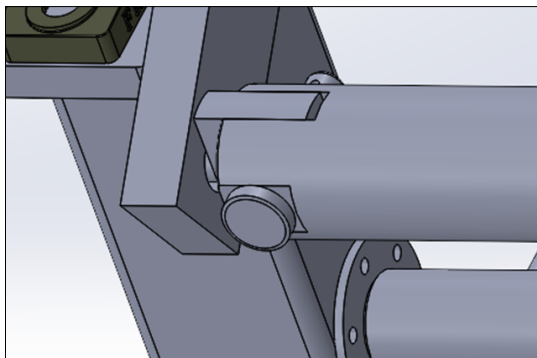
kercsek cseréjét. A tengely másik vége egy könnyen oldható rögzítő tuskéval van ellátva.

A fóliák megfelelő helyzetéről szorítógyűrűk gondoskodnak, amelyek meghatározzák mindkét oldalról a fólia helyzetét (11. ábra). Mindkét gyűrű állítható, ezért, ha esetleg egy nagyobb széria következik, ebben az esetben ezzel is csökkenteni lehet a műveleti időt, ha egyszerre több karon is ugyanaz a beállított fólia helyezkedik el.

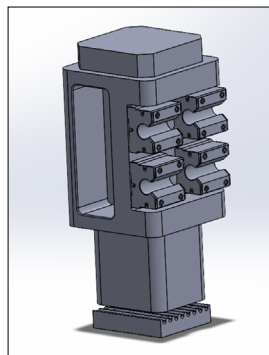
1.4. Szerelvénybetétek

A szerelvénybetétekre azért van szükség, hogy megkönnyítsem a lineáris kocsi kapcsolódását a szerelvényvel. Ugyanis, ha csak zárt szerelvényből állna a szerelvény, akkor csak a zárt szerelvény falvastagságán tudna felfeküdni a kocsi, ami nem tenné lehetővé a kocsi biztonságos és stabil mozgását.

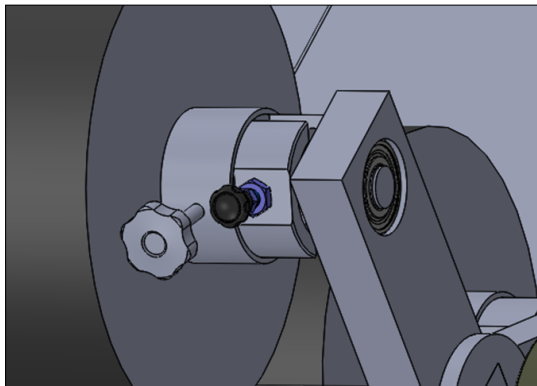
A szerelvénybetét 01 (12. ábra) jelű alkatrésze tartalmazza majd a fogasszíjjal való összekapcsoláshoz szükséges felületeket. Ez az alkatrész fog kapcsolódni a fogasszíjhoz, ez fogja átvinni a szükséges mozgást a fóliázáshoz. A szerelvénybetét 02 (13. ábra) jelű alkatrésze az ellentétes oldali megvezetésben segít.



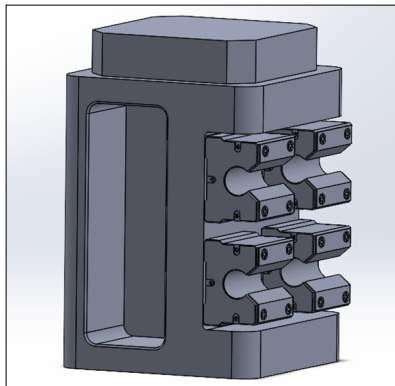
10. ábra. Csuklós tengely



12. ábra. Szerelvénybetét 01



11. ábra. Rögzítőgyűrű és rögzítőtüske



13. ábra. Szerelvénybetét 02

2. Lineáris vezeték és lineáris kocsi méretezése

A lineáris vezeték a szerelvény súlya terheli üresjáratban, de a fóliázás közben a fólia lehúzó-ja is kifejt némi erőt a vezetékre (14. ábra) [1].

Lineáris kocsi maximális terhelése:

$$C_{max} = C_{lcs} \cdot z = 774 \text{ N} \cdot 8 = 6192 \text{ N}$$

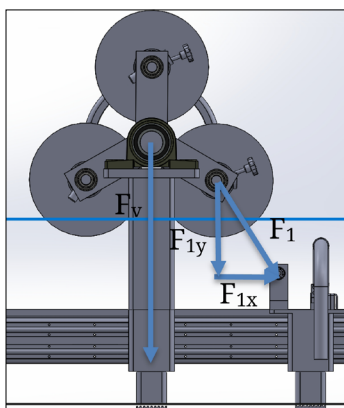
$$F_{1y} = F_1 \cdot \sin \alpha = 20 \text{ N} \cdot \sin 20^\circ = 6,84 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} C &= (m_{szerelvény} + m_{fólia} + m_{egyéb}) \cdot g \cdot F_{1y} = \\ &= (52,5 \text{ kg} + 13,5 \text{ kg} + 12,5 \text{ kg}) \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 + \\ &+ 6,84 \text{ N} = 776,925 \text{ N} \end{aligned}$$

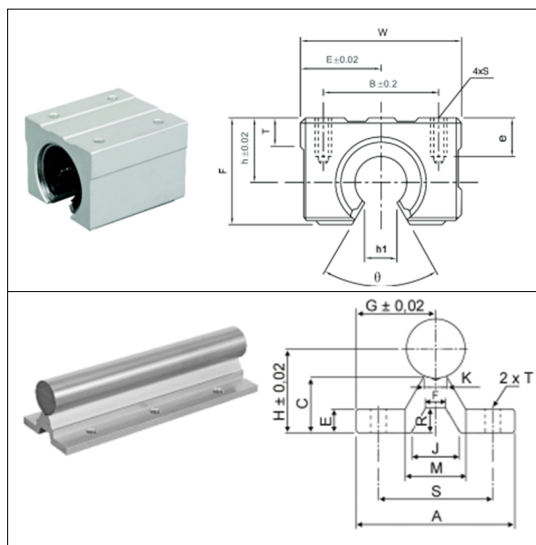
ahol:

C_{lcs} : lineáris kocsi terhelhetősége

C_{max} : lineáris kocsi maximális terhelhetősége



14. ábra. Lineáris vezeték terhelése



15. ábra. Lineáris vezeték és lineáris kocsi [3, 4]

C: terhelés

z: lineáris kocsik száma

F_1 : fólia lehúzásához szükséges erő

α : fólia lehúzási szöge

$m_{szerelvény}$: szerelvény tömege

$m_{fólia}$: fóliatekeres tömege

$m_{egyéb}$: gépelemek és a simítóhenger tömege

g: nehézségi gyorsulás

$$C < C_{max} = 3096 \text{ N}$$

Tehát a választott lineáris kocsi megfelel.

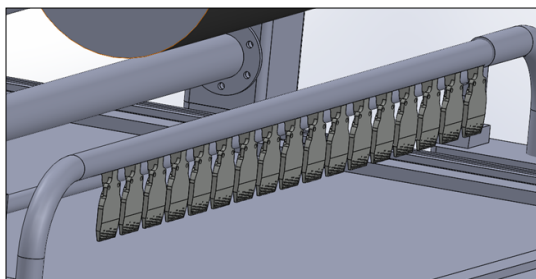
3. A fólia simítása

A fólia simítását sűrített levegővel oldottam meg, ezzel elérve azt, hogy bonyolultabb kontúrral rendelkező elemeket is le tudjunk fóliázni a későbbi fejlesztéseket követően. A lefúvóberendezés 4 bar nyomással dolgozik, és 17 darab többcsatornás lapossugár-fúvókát [5] használ. Ezek a fúvókák energiatakarékosak, és zajszintjük kisebb, mint más hasonló teljesítményű társaiké (16. ábra).

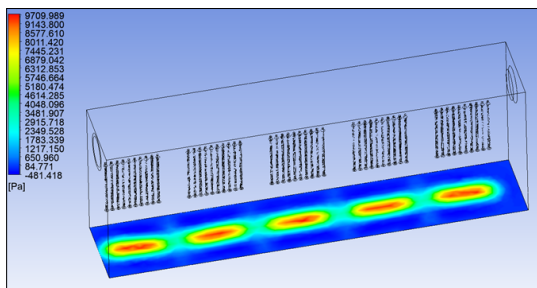
A fejezet további részében ennek az egységnek mutatom be az áramlástan szimulációját.

A áramlástan szimulációnak azért láttam szükségét, mert maga a szerelvény elég hosszú, és szerettem volna látni, hogy ugyanaz a nyomás, vagy legalább egy bizonyos határon belüli eltéréssel ugyanannak kell lennie az egész vezetékben. Erre azért van szükség, mert a fóliázás többségét a tápellátással ellentétes oldalon végzik, és csak a legnagyobb panelek eleje kapja meg a legnagyobb nyomást.

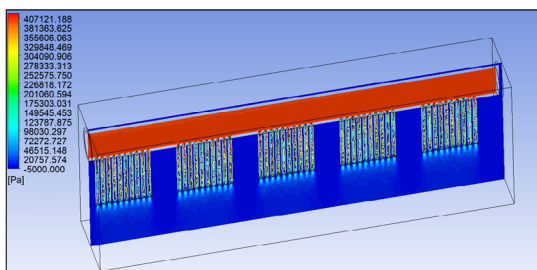
Ahogy a 17. ábrán látható, a felületen ébredő maximális nyomások közel azonos értékeket vesznek fel a fúvókanyílások alatt. Ezekről eltávolodva láthatjuk, hogy a nyomás elég hamar felére csökken. Ez nem okoz problémát a fóliázás során, mivel ez a levegősugár végig fog haladni az egész felületen, így elvégezve egy elő- és egy utósimítást is a felületen. A fúvókák közötti távolság (holttér) viszonylag kicsi, ezért ez nem okoz problémát a fólia simításában.



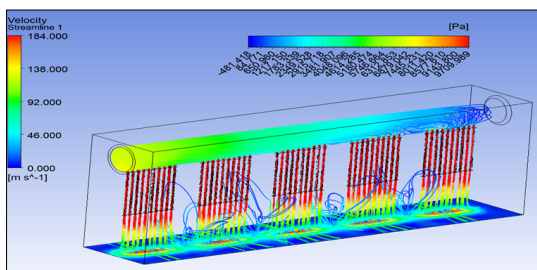
16. ábra. Fóliasimító egység



17. ábra. A fóliázandó terület nyomáseloszlása



18. ábra. Teljes nyomástérkép a részegység keresztmetszetében



19. ábra. Sebesség és nyomáseloszlás bemutatása

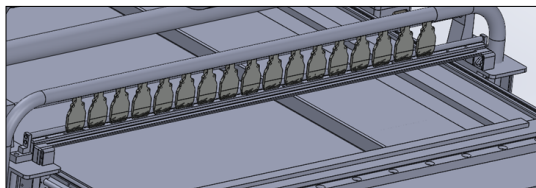
A 18. ábrán látható a teljes nyomáseloszlás a csőben és a fúvókákban. A csőben fellépő 4 bar nyomás, amikor kijön a levegő a fúvókákból, már csak nagyjából 1 bar nyomást tesz ki, viszont a kiáramló levegő sebessége többszöröse a csőben áramló sűrített levegő sebességének.

A 19. ábrán látható a levegő áramlásának útvonala. Ezen az ábrán 200 áramlási pályát látunk, és az áramlás által létrehozott felületi nyomást is feltüntettük, amelynek értékeit a 17. ábráról olvashatjuk le.

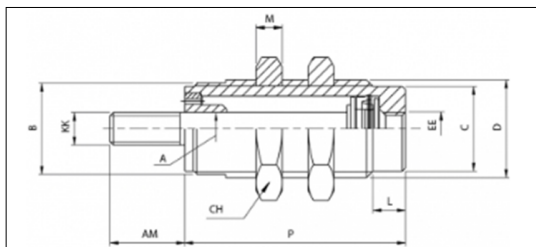
A szimuláció alapján megállapítható, hogy a tervezett többszörös fúvóka megfelelő lesz a feladat kivitelezésére.

4. A fólia vágása

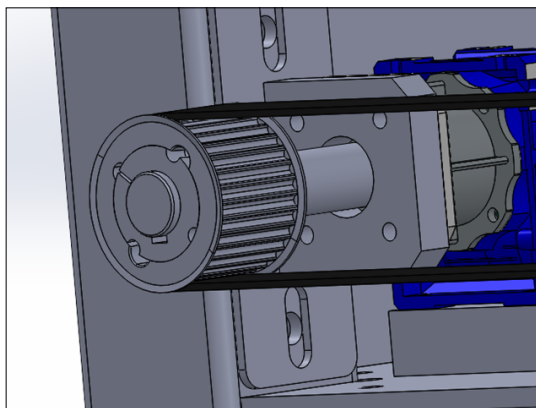
A fólia vágásáról egy forró drót gondoskodik, amelyet megfelelő nagyságú áram átvezetésével melegítünk fel. A drót egyik végén egy himba ta-



20. ábra. Fóliavágó egység



21. ábra. Fóliavágó egység pneumatikus hengere [6]



22. ábra. Fogasszíjhajtás

lálható, amelyhez egy rugó van csatlakoztatva, és a himba folyamatosan megfeszítve tartja a rugót (20. ábra).

A drót másik végéhez pedig egy CAF6/10-típusú mini-pneumatikus dugattyú van csatlakoztatva, ezzel valósítjuk meg a vágási folyamatot (21. ábra).

5. Motor és hajtás választása

A motor kiválasztásához először ismernünk kell a terhelőerőt. Ebben az esetben a terhelőerőt a szerelvény súlyából adódó súrlódási erő és a fólia lehúzásához szükséges erő összege határozza meg. Ezután a fentiek alapján összegzett erő figyelembevételével meghatározom a forgatónyomatot, és ez alapján választok motort. Típusa: háromfázisú aszinkronmotor, valamint egy csigahajtómű.

Hajtás típusa: Fogasszíjhajtás (22. ábra)

5.1. A motort terhelő erők és nyomaték meghatározása

A 23. ábrán mutatom be a motor terhelését, majd meghatározom a terhelőnyomatékok.

$$M_{motor} = (P \cdot 60) / (2 \cdot n_1 \cdot \pi) = (250W \cdot 60) / (2 \cdot 31,66 \text{ 1/min} \cdot \pi) = 75,4 \text{ Nm}$$

$$F_g = (m_{szerveny} + m_{folia1} + m_{folia2} + m_{folia3} + m_{egyeb}) \cdot g = (52,5 \text{ kg} + 5 \text{ kg} + 8,5 \text{ kg} + 12,5 \text{ kg}) \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 770,085 \text{ N}$$

$$F_{1x} = F_1 \cdot \cos \alpha = 20 \text{ N} \cdot \cos 20 = 18,79 \text{ N}$$

$$F_s = F_g \cdot \mu = 770,085 \text{ N} \cdot 0,2 = 154,017 \text{ N}$$

$$F_t = F_s + F_{1x} = 154,017 \text{ N} + 18,79 \text{ N} = 172,807 \text{ N}$$

$$M_{terhelő} = d/2 \cdot F_t = (0,08 \text{ m})/2 \cdot 172,807 \text{ N} = 6,91 \text{ Nm}$$

$$M_{terhelő} \leq M_{motor}$$

ahol:

F_g : vontatott elemek súlyából adódó erő

F_s : súrlódási erő

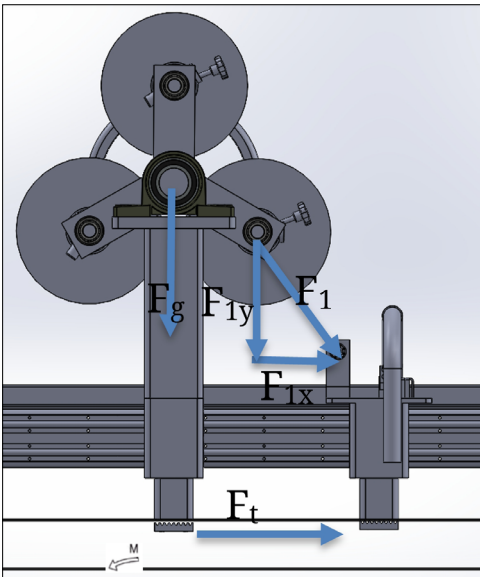
μ : csúszási súrlódási együttható

F_t : terhelő erő

A motort még terheli a fólia simításáért és vágásáért felelős egység is, de ennek terhelése sokkal kisebb, mint a fóliatartó egysége. Ezért választottam a hajtáshoz egy háromfázisú aszinkronmotort (24. ábra) és csigahajtóművet (25. ábra).

$$n_1 = n_2/i = (850 \text{ 1/min})/30 = 31,66 \text{ 1/min}$$

$$v_k = (d_1 \cdot n_1 \cdot \pi) / 60 = (0,08 \text{ m} \cdot 31,66 \text{ 1/min} \cdot \pi) / 60 = 0,133 \text{ m/s}$$



23. ábra. A motor terhelései

ahol:

n_1 : fogasszíjtárcsa [7] fordulatszáma

n_2 : motor fordulatszáma

i : csigahajtómű áttéte

v_k : kerületi sebesség

d_1 : fogasszíjtárcsa átmérője

Fóliázási sebesség meghatározása:

$$v_{fóliázás} = d_1 \cdot \pi \cdot n_1 = 0,08 \text{ m} \cdot \pi \cdot 31,66 \text{ 1/min} = 7,957 \text{ m/min}$$

Szükséges fóliázási sebesség 3 átlagos elem/perc, azaz 20 s idő elemenként. Egy átlagos panel magassága 2200 mm.

$$s_{teljes} = s_{panel} \cdot 3 = 2200 \text{ mm} \cdot 3 = 6600 \text{ mm}$$

Egy perc alatt szükséges táv megtétele 6600 mm. A biztosított táv 7957 mm. Tehát a motor biztosítja a szükséges fóliázási sebességet.

6. Következtetések

A konstrukció ellenőrzése során, a végeselem-módszer kiértékelése után rájöttem, hogy a szerkezet meglehetősen túl van biztosítva, azonban a szerkezet merevsége miatt ez a túlméretezés statikailag mégis indokolt.

A különböző gépelemek, például a lineáris vezeték vagy az azon futó lineáris kocsi méretezése és kiválasztása után kiderült, hogy ezeket a gépelemeket nagyon kicsi kihasználtsággal tudom működtetni, mivel a rájuk ható terhelések is alacsony értékeket vesznek fel.



24. ábra. Háromfázisú aszinkron motor [8]



25. ábra. VI. típusú csigahajtómű [9]

További tervezési feladatként merül fel a részegységek alkatrészeinek megfelelő megválasztása, és ezek energiaszükségletének biztosítása. Emellett a munkabiztonság növelésére is nagyobb figyelmet kell fordítani, ezért fénykapukkal érintésvédelmet, elakadásvédelmet, túlterhelés eseti védelmet kell biztosítani.

Fejlesztési irányként kijelöltük a teljes automatizálást, ami azt jelenti, hogy a fóliatekereszt csak cserélni kellene, és csak egyszer kell befűzni a tekercs megkezdésekor. Valamint egy új típusú automata levágórendszer fejlesztése szükséges annak érdekében, hogy a dolgozónak csak anyagmozgatást kelljen végeznie. A fólia vágására azért is van szükség, mert nem minden liftajtó ugyan olyan széles, azonban a fólia szélessége meghatározott, ezért a hulladék elkerülése érdekében még egy vágási rendszert és pályát kell tervezni és programozni. Ez a fejlesztés akár még a termelékenységet is növelheti, hiszen amennyiben a fólia szélessége legalább kétszerese a fóliázandó elemeknek, akkor egy munkautem alatt két elemet tudna fóliázni a gép. Ennek támogatására egy könnyen kezelhető, érintőképernyővel ellátott, programozott PLC-t szeretnénk bevezetni. Ezzel a PLC-vel szeretnénk elérni, hogy a dolgozó néhány adat megadásával a lehető legjobb anyagkihozzalattal tudjon dolgozni, a lehető legrövidebb idő alatt.

További fejlesztési cél, hogy ne csak liftajtókat és annak dekoratív elemeit, hanem oszlopok burkolását is lehetővé tegyünk. Ehhez külön mozgatószegmenseket kell tervezni a különböző magasságú elemek miatt.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunkát a Nyíregyházi Egyetem Tudományos Tanácsa támogatta.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Solidworks
- [2] Ansys
- [3] https://www.powerbelt.hu/uploads/source/catalogs/4460_sme_kbe.pdf
- [4] [https://www.powerbelt.hu/uploads/source/catalogs/4457_sa_ftsn_gw_%C3%BAj%20\(1\).pdf](https://www.powerbelt.hu/uploads/source/catalogs/4457_sa_ftsn_gw_%C3%BAj%20(1).pdf)
- [5] https://www.hennlich.hu/fileadmin/user_upload/KATEGORIEN/Luftduesen/Mehrkanalduesen/Dokumente/hu_Druckluftduesen_600.130.56.pdf
- [6] https://www.hafnerpneumatika.com/caf/caf_6-10
- [7] https://www.powerbelt.hu/uploads/source/couplings_pulleys_joints/sit/Timing-pulleys-taperbush-HTD.pdf
- [8] https://www.powerbelt.hu/uploads/source/catalogs/ta_motor_type_catalogue.pdf
- [9] https://www.powerbelt.hu/uploads/source/catalogs/vi_gearbox_catalogue.pdf



BEÁGYAZOTT RENDSZEREK ADAPTÍV ALKALMAZÁSÁNAK VIZSGÁLATA

EXAMINATION OF EMBEDDED SYSTEM ADAPTIVE CONFIGURABILITY

Vásárhelyi József,¹ Batók Roland,² Drótos Dániel³

¹ Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Automatizálási és Infokommunikációs Intézet. Miskolc, Magyarország, jozsef.vasarhelyi@uni-miskolc.hu

² Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Automatizálási és Infokommunikációs Intézet. Miskolc, Magyarország, roland.bartok@uni-miskolc.hu,

³ Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Automatizálási és Infokommunikációs Intézet. Miskolc, Magyarország, daniel.drotos@uni-miskolc.hu

Abstract

Field Programmable Gate Arrays or FPGA circuits have been the focus of applied research since their appearance. Following the introduction of these circuits in 1980, their year-by-year development and the expansion of application areas have opened up new areas of research. With the appearance of system-on-chip, SOC (System on Chip) solutions and adaptive processing units, they occupy an important role in industrial applications. The question is: when, why and what hardware is to change dynamically during system operation? Whether it is necessary to expand computing resources by expanding new circuit blocks or by inserting soft-core processor(s), this can be determined by examining the computing load of the embedded system during operation. This article presents the tests that were performed on the processors of the embedded systems, in order to determine the computational load of the processor and how the interrupt handling can be accelerated. The article also presents the examination of fuzzy interpolation.

Keywords: *embedded systems, dynamic function exchange, FPGA, robot control, fuzzy interpolation.*

Összefoglalás

A programozható, logikai kapcsolómátrixok vagy FPGA- (Field Programmable Gate Array) áramkörök a megjelenésük óta az alkalmazott kutatások középpontjába kerültek. Az áramkörök 1980-as bevezetése óta évről évre történő fejlődésük és az alkalmazási területek bővülése új kutatási területeket nyitott meg. A *rendszer a lapkán* (SOC = System on Chip) megoldások és az adaptív feldolgozóegységek megjelenésével a hardver adaptív módosítása már ipari alkalmazásokban is megjelenik. Kérdés, hogy működés közben mikor kell, mikor szükséges, mikor érdemes módosítani a számítási algoritmust megvalósító áramkört? Kell-e bővíteni számítási erőforrásokat újabb áramkörti tömbök bővítésével, vagy lágy magos processzor(ok) beillesztésével? Ezt a számítási terhelés működés közbeni vizsgálatával lehet megállapítani. Jelen cikk bemutatja azokat a vizsgálatokat, amelyeket a beágyazott rendszerek processzorain végeztünk el, annak érdekében, hogy megállapítható legyen a processzor számítási terhelése, a megszakításkezelés gyorsítása. A cikkben bemutatásra kerül a fuzzy interpoláció vizsgálata is, annak érdekében, hogy eldönthető legyen, milyen hardvert kell alkalmazni, amikor a robot irányítását fuzzy interpolációval valósítjuk meg.

Kulcsszavak: *beágyazott rendszerek, dinamikus függvény csere, FPGA, robotirányítás, fuzzy interpoláció.*

1. Bevezetés

A programozható, logikai kapcsolómátrixok vagy FPGA- (Field Programmable Gate Array) áramkörök az alkalmazott kutatások középpontjába kerültek már megjelenésük pillanatában. Az alkalmazási területek, amelyek annak idején még a kétszintű logikai hálózatok megvalósítására korlátozódtak, mára a digitalizáció korszakában a telekommunikáció, valós idejű beágyazott rendszerek, mesterséges intelligencia, képfeldolgozás és -működés közben megvalósuló, módosítható hardver (adaptív működés) területeken alkalmazhatók.

A beágyazott rendszerek egyik fontos paramétere a disszipált teljesítmény. Ezen tervezési paraméter csökkentése több módszerrel is lehetséges, például a mikrovezérlő frekvenciájának csökkentésével, viszont ez csökkenti a számítási sebességet is. A legjobb megoldás, amikor vizsgáljuk a processzor terheltségét, és ennek alapján végezzük el a szükséges módosításokat. A megoldások között lehetséges a megszakítási mechanizmus újfajta megközelítése vagy az irányító algoritmus vizsgálata és hardveres implementációja. Ez pedig a következő kérdéseket veti fel: kell-e bővíteni számítási erőforrásokat újabb áramköri tömbök bővítésével vagy lágy magos processzor(ok) beillesztésével?

Jelen cikk az FMTÜ 2024 konferencián elhangzott plenáris előadás bővített változata. Bemutatja a beágyazott rendszerekben használt processzor számítási terhelésének vizsgálatát, majd két példa bemutatásával – megszakításkezelés és fuzzy interpoláció állapotgép-megvalósítással – szemlélteti az adaptív működés lehetséges alkalmazását.

2. Irodalom

2.1. Processzor terhelés-vizsgálatok

A Neumann János által 1945-ben megjelentett, "The First Draft of the Report on the Edvac" [1], megfogalmazott számítógépes modellnek az évek során rengeteg cikk fogalmazta meg minden előnyét és hátrányát. A legnagyobb gondot az okozta, hogy a processzorgyártók elhagyták a Neumann által meghatározott modellben az adatok tárolásánál használt plusz jelzőbitet, amelynek az lett volna a feladata, hogy jelezze a tárolt adat programkódját vagy információját (adat). A Neumann-elvek a következők [2]:

- teljesen elektronikus felépítésű számítógép,
- kettes számrendszer alkalmazása,

- aritmetikai egység (univerzális Turing-gép),
- központi vezérlőegység,
- belső program- és adattárolás [2].

A Neumann-modell működése akkor a leghatékonyabb, amikor egy processzor egyetlen feladatot hajt végre [3]. Ez a megközelítés általában a beágyazott rendszerekre igaz. Egy beágyazott rendszerben a processzornak jól meghatározott feladata van, főleg, amikor a működéséhez nem használ operációs rendszert. A modellel akkor jelentkeznek a gondok, amikor a feladatok (taskok) száma különbözik a gépben jelen lévő processzorok számától. Sajnos, a szoftverfejlesztők még mindig ragaszkodnak a klasszikus Neumann-modellhez, ezért az operációs rendszer elrejtí a hardverre teget a felhasználó elől, ezért úgy tűnik, mintha a processzor rendelkezésre állna minden task számára [4].

Az FPGA-technológia megjelenése óta kétfajta processzortípusról beszélünk: lágy magos és kemény magos. Az előbbi leírása hardver leíró nyelven történik (VHDL vagy Verilog), és beillesztik az FPGA-tervbe, míg az utóbbit integrálják a félévezető lapkára.

A beágyazott rendszerek számára, amelyeket kis erőforrással rendelkező FPGA-áramkörökkel valósítanak meg, különösen fontos a processzor vagy mikrovezérlő terhelésének vizsgálata az alkalmazói program végrehajtása során.

Programozható logikai mezők (FPGA) alkalmazása esetén különböző módszerekkel illeszthetünk be egy lágy magos processzort. A leggyakoribb az előregyártott (IP) alapú beillesztés, de használható a regisztertranszfertszint- (RTL-) módszer is. Az RTL-lágymagosprocesszorhasználat azért előnyös, mivel ily módon a központi egység (CPU) belső jelei hozzáférhetők, és a processzor terhelés-vizsgálat megvalósítható. Ezzel ellentétben az IP-alapú tervezés esetén a processzor belső jelei nem elérhetők, így a számítási terhelésvizsgálat nem lehetséges.

A processzor számítási teljesítményének növekedése FPGA-alapú rendszerek esetében egyéb kiegészítő, gyorsító áramkörök, társprocesszorok használatával lehetséges. Ezen áramkörök működés közbeni beillesztése a dinamikus függvénycserével lehetséges, ily módon a processzor számítási terhelése csökkenthető.

A processzor működés közbeni terhelésvizsgálata a rendszer jeleinek vizsgálatán alapul. Az összes jel figyelésével megállapíthatók a hardverhibák [5]. A módszer teszteli a hardverműveleteket, és következtetéseket von le a gép hibás működésére vonatkozóan.

Egy másik vizsgálati módszert [6] a tervezési fázisban használtak, annak érdekében, hogy meghatározzák a szükséges hardverforrásokat, amelyek a szoftver optimális működéséhez szükségesek egy beágyazott rendszerben [7]

Zhao és társai egy szoftvereszköz segítségével határozták meg a futó program hibáit. Ehhez egy célrendszert terveztek [4].

A rendszertervezés és terhelésvizsgálat során a következő szempontokat kell figyelembe venni [8]:

- a mérési módszer független a szoftver működésétől, amelyet a beágyazott processzor végrehajt;
- a mérési módszer megvalósítása nem módosíthatja a mikroprocesszor architektúráját;
- a mérésnek valós idejű adatokat kell szolgáltatnia, azaz azonnal kell érzékelnie a rendszerben (processzorban) történő változásokat.

A fenti szempontok alapján megállapítható, hogy a processzor számítási terhelésének mérése független kell, hogy legyen a rendszer hardvertől.

2.2. Processzormegszakítás végrehajtásának folyamata

Amint említettük, a Neumann-modell akkor működik jól, ha csakis egyetlen feladatot lát el a mikroprocesszor. A beágyazott rendszerekben a processzornak egyszerre több feladatot is el kell végeznie. Ezt pedig csak úgy tudja, ha a feladatok között megosztja a processzoridőt. Ez pedig csak megszakításkezeléssel lehetséges [9].

A megszakítás kiszolgálása (Interrupt Service Routine – ISR) mint plusz feladat jelenik meg a főprogram mellett. A processzornak pedig ezt a feladatot is el kell végeznie [10].

Az ISR-t a processzor nem tudja azonnal végrehajtani, mivel a megszakításelfogadásban van egy lappangási idő, amely a megszakításkérés és a megszakítás kiszolgálása között eltelik. Ennek több oka is van:

- a processzor kritikus kódrészletet hajt végre – megszakításkérés letiltása;
- a processzor egy elsőbbséggel rendelkező task-ot (feladatot) hajt végre;
- a processzor egy hosszú utasítást hajt végre, amelyet nem lehet megszakítani.

A megszakítás elfogadásának időtartama is változhat. Ennek egyik oka, hogy az utasításátlapolós processzoroknál ki kell üríteni a pipeline tartalmát. Ennek időtartama a pipeline utasításainak típusától függ. A másik ok az, hogy az ISR (megszakítás kezelő program) után helyre kell állítani

az előző program állapotát. A mentés időtartama attól függ, hogy az ISR hány regisztert használ. A megszakítás elfogadásának időtartama tehát nem állandó, a késés ingadozik.

Amikor egy processzor megszakítási jelet kap, és ha a megszakítás engedélyezett, akkor a processzor felfüggeszti a futási folyamatot, és megkezdí a kivétel kiszolgálását. A megszakítási kezelő rutin (ISR) végrehajtása után a processzor visszatér a felfüggesztett feladathoz.

ARM-processzorok esetében az ISR kivételes eseményként kezelendő, és az ARM-dokumentumok a megszakítást kivételnek írják le [11]. Ezt az alábbiakban ismertetjük röviden:

- Ha ISR-esemény következik be, és a kivételkezelést engedélyeztük, a processzor felfüggeszti az aktuálisan végrehajtott utasítást (az úgynevezett hosszú utasításokat eldobja, és visszatérés után újraindítja a végrehajtásukat),
- majd a kontextusregisztereket (8 regiszter, mindegyik 32 bites) menti a veremmutató által megadott veremtárba (ARM MSP – Main Stack Pointer vagy PSP – Process Stack Pointer esetén). A mentett regiszterek a következők: xPSR (Program Status Register), PC (Program Counter – tartalmazza a visszatérési címet, LR (Link Register R14) és regiszterek: R12, R3, R2, R1, R0.
- Ezt követően a processzor handler üzemmódba kapcsol.
- Ezután a programszámlálóba (PC) kerül az ISR-kezdőcím, és az LR betölti a visszatérési címet.
- A következő lépésben az ISR száma betöltődik az IPSR-be (Interrupt Program Status Register).
- Végül megkezdődik a megszakításkezelő rutin végrehajtása.

A fentiekben leírt folyamat felemészti a processzoridőt. Fontos figyelembe venni az ISR-kérésről a kivételkezelés elindulásáig eltelt időt. Ha a megszakítás ciklikusan ismétlődik, akkor az ISR válaszideje megnövekszik a megszakításkezelés elkezdésének lappangási idejével. A megszakításkezelés kiszolgálásának ideje szempontjából kritikus külső események késleltethetik a kiszolgáló rutin indulását.

Mennyi idő szükséges a regiszterek mentésének elvégzéséhez („rezsiköltséghez”), és a program PUSH/POP utasításai végrehajtásához? Ilyenkor a processzor a regisztermentés/-visszaállítás címével foglalkozik (veremtárműveletek). Ha a veremtár külső memóriában van, akkor ez a „rezsiiidő” hosszabb lesz (külsőmemória-műveletek végrehajtása).

Kiszámítható, egy adott processzorra, az adott órajel frekvenciával, mekkora lehet a megszakítások maximális ismétlési gyakorisága:

$$F_{MaxInt} = F_{CPU} / (C_{ISR} + C_{Overhead}), \quad (1)$$

ahol az F_{MaxInt} a megszakítás maximális ismétlési gyakorisága, az F_{CPU} a vezérlő órajel frekvenciája, a C_{ISR} a megszakításkezelő rutin (ISR) elvégzéséhez szükséges órajel ciklusainak száma, a $C_{Overhead}$ pedig a regiszterek mentésére és visszaállítására (azaz a programállapot mentésére és visszaállítására) fordított órajelciklusok száma.

Gyakori megszakításkérés teljesítésével, a processzor az ISR futtatását végzi. Ezért kevesebb időt fordít a fő program végrehajtására. Az ISR teljes végrehajtásához szükséges idő (U_i):

$$U_i = (F_i (C_{ISR} + C_{Overhead})) / F_{CPU}, \quad (2)$$

ahol F_i a megszakítások gyakorisága.

A fentiekből pedig az következik, hogy a fő program végrehajtása látszólag sokkal alacsonyabb órajel-frekvenciával történik:

$$F_{main} = (1 - U_i) * F_{CPU}, \quad (3)$$

ahol F_{main} a fő program végrehajtásának látszólagos gyakorisága.

3. Processzor terhelésének vizsgálata

A processzor működése során megkülönböztetünk két állapotot: amikor a processzor futtatja a programokat – ezt nevezzük terhelt állapotnak; míg lehetségesek olyan állapotok, amikor a processzornak nem kell aktívnak lennie – ezt nevezzük terheletlen állapotnak. A terheletlen állapotnál megkülönböztetjük:

- az alvó üzemmódot (sleep state), amikor a processzor nem végez számítási műveletet, és úgy tűnik mintha ki lenne kapcsolva – a processzor disszipált teljesítménye nagyon kicsi;
- a tétlen állapot (idle state), amikor a processzor a program végrehajtása közben várakozik valamilyen eseményre.

A processzor aktív állapotában, a szoftveraktivitástól függően „a rendszer különböző részei nagyobb mértékben aktívak, mint a processzor egyéb részei, például az aritmetikai egység – amikor matematikai számításokat végez, vagy a memóriaillesztő egység a ki-be meneti műveletek elvégzése során. Ennek alapján a következő processzorműködési kategóriákat különböztetjük meg:

- alap (terheletlen állapot);
- számításintenzív,
- ki-be műveletvégzés.

Ezt a fajta osztályozást a processzor különböző részeinek tényleges terhelésének mérésével végeztük. A mérések segítségével azonosítottuk az intenzívebben használt processzorrészeket.

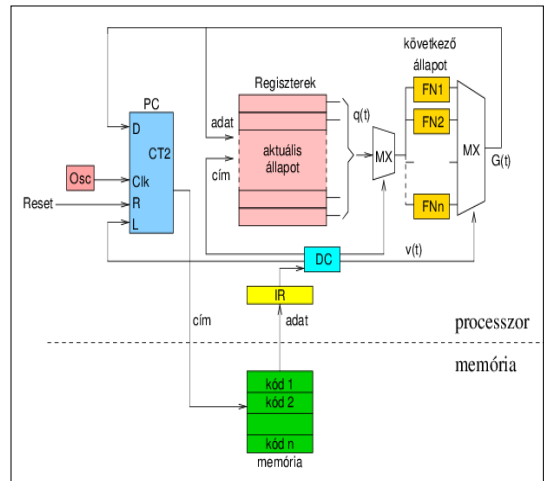
3.1. Mérési módszer

A mérési módszert az alkalmazott processzor belső felépítése segíti (1. ábra). A processzor egy olyan állapotgép, amelyben a tárolóelemek (az ábrán: Regiszterek) biztosítják a rendszer aktuális állapotának megőrzését. Az aktuális állapot (q) az órajel ütemében változik. Az új állapot értékét az úgynevezett gerjesztőhálózat (az ábrán FN1, FN2, stb.) állítja elő, az aktuális állapot és az esetleges külső jelek (v) függvényében. A v , G , q értékei az idő t függvényei (ebben az esetben az állapotot szabályozó órajel változik). Mivel a tárolt érték a gerjesztési értéké válik egy órajel-késleltetés után [8], ezért:

$$q(t) = G(t-1) \quad (4)$$

A külső jelek befolyásolják a G függvény értékeit, így nem szükséges közvetlenül tesztelni őket. A G értékek egy órajel-késleltetéssel kerülnek át a q (következő állapot – next state) értékekre, így a mérés akár a G , akár a q jelek vizsgálatával elvégezhető.

A CPU egyes összetevőinek működését a hozzájuk tartozó memória értékének változása jelzi. Tehát a vizsgálat szempontjából releváns q jelek mérhető jellemzője, a q jelek változási gyakorisága, vagyis a jel frekvenciája. Az osztályozás azonban nem a jelfrekvenciák pillanatnyi értékein alapul, hanem a frekvencia időbeli változásán, a frekvencia időfüggvényén: $fr(t)$.



1. ábra. A processzor felépítésének tömbvázlata

3.2. A teszrendszer ismertetése

Az alkalmazás, amelyen a processzorterhelés mérését elvégeztük, egy olyan FPGA-áramkörön megvalósított beágyazott rendszer, amely egy, a Nap mozgását követő eszközt vezérel.

Az alkalmazás egy napelemrendszer (2. ábra), amely a Nap mozgásának függvényében mindig az optimális működést állítja be, azaz a maximális felületet mutatja a Nap felé, amely merőleges a napsugarakra.

A vezérlőszoftver az idő és a földrajzi koordináták függvényében kiszámítja a napsugarak pillanatnyi tájolását (vízszintes és északi szögét). A kiszámított koordináták alapján beállítja a napelempanelt, hogy merőleges legyen a napsugarakra, azaz a motorok vezérlésével mozgatja a panelt. A számítás eredményétől függő mozgatás (panelek beállása) során a szoftver nagyon sok I/O-műveletet végez, ugyanez a helyzet a kezelőfelület kijelzőjének a frissítése során is.

3.3. Mérési eredmények

A továbbiakban a mérési eredményeket a [8] cikk alapján ismertetjük.

A rendszer modellezését FPGA-n megvalósított beágyazott rendszerrel végeztük, RTL-alapú ARM M0+ processzorral. A vizsgálat során a rendszermodellt hardverszimulátor segítségével futtatjuk, amely az áramköri elemek ki- és bemenetein megjelenő jelek értékeit elmenti egy úgynevezett „dump”-állományba, amelynek a tartalmát megfelelő szoftverekkel vizsgáltuk.

Az $f(t)$ frekvenciajel időbeli változását egy dedikált szoftver állítja elő, amely feldolgozza a szimulációs eredmények kimeneti állományát. A feldolgozó szoftverbe épített algoritmus megfelel a frekvenciaméréshez használt digitális áram-

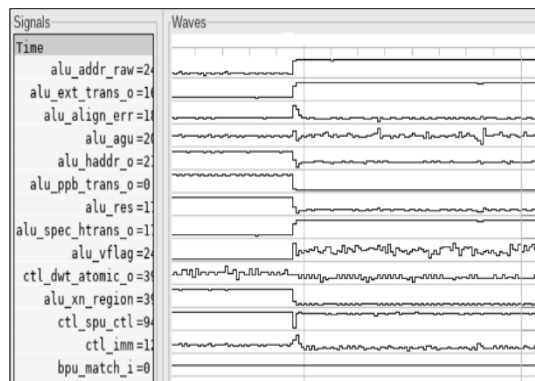
kör működésének. A hardverszimuláció során nagy adatmennyiség keletkezik, ezért a feldolgozószoftverbe beépítettünk egy szűrő algoritmust, amely a vizsgálat szempontjából nem releváns adatokat el tudja távolítani. A modell leírási módja miatt például több jel duplikálta valamely másik jelnek, így az értékeik azonosak. Ezeknek a jeleknek az eltávolításával a feldolgozandó adatmennyiség csökkenthető. Az eredmények grafikus ábrázolásával ellenőrizhető, hogy mely frekvenciajel-változások mutatnak érzékelhető eltérést valamilyen jellemzőben abban az időpontban, amikor az alkalmazásszoftver megváltoztatja a processzor számítási állapotát (terhelését), azaz amikor a számítási algoritmus elindul vagy leáll. A 3. ábra néhány mért jel változását mutatja be az alkalmazói program számítási részének elindulása pillanatában. A 3. ábrán látható jelváltozást vizsgálva például az *alu_ext_trans_o* jel esetében észrevehető, hogy jelentős amplitúdóváltozást mutat, ami azt jelenti, hogy a processzor elkezdte a számítását.

A modellezés és szimulációs eredmények alapján kiválaszthatók azok a jelek, amelyek alkalmassak a központi egység számítási terhelésének mérésére. A modell esetében ismert, hogy mikor végez az alkalmazói szoftver olyan számítás, amely a CPU terhelését okozza. Az $f(t)$ függvények statisztikai jellemzőinek vizsgálatával megállapítható, hogy melyik jel mutat nagyobb mértékű korrelációt a detektálandó processzorviselkedéssel.

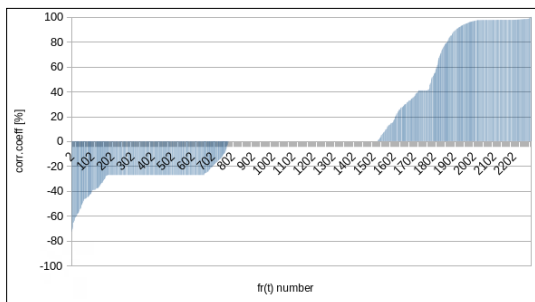
A 4. ábra mutatja a vizsgált processzorjeleknek a számítási üzemmóddal való korrelációjának eloszlását. Látható, hogy a jelek egy része jól korrelál az üzemmóddal, így alkalmas lehet a számítási időszakok jelzésére.



2. ábra. A teszt rendszerképe



3. ábra. Processzorterheltség-vizsgálat jeleinek változását mutató grafikus ábrázolás



4. ábra. A CPU jeleinek korrelációja a számítási üzemmóddal

Ezek közül a jelek közül azt célszerű a méréshez felhasználni, amelynek a változását a mérést végző áramkör a legkönnyebben tudja detektálni.

A beágyazott rendszer struktúrájának módosítása után a kiválasztott jeleket kiveztettük a processzorból. Ezen jeleket pedig a mérőrendszer segítségével elemeztük. A jelek frekvenciamérése után egy amplitúdóváltozást figyelő modul segítségével megállapítható a jelváltozás amplitúdója. Az amplitúdóváltozásokból pedig következtethető a processzor számítási terhelése.

4. Megszakításkezelés gyorsítása

A megszakításkezelés kiszolgálására összeállítottuk az 5. ábra szerinti kísérleti rendszert. A kísérletben ARM-lágymagos- (ARM M0) processzorokat) implementáltunk az FPGA-áramkörben. A kísérletben a processzoroknak a következő feladatot kell megoldani: az időzítő periféria megszakítást generál egy adott frekvencián (10 kHz a kísérleti rendszerben), a kivételkezelő program számolja a megszakítások számát, azaz növeli egy számláló értékét (szoftveróra). A fő program megjeleníti a számláló értékét egy kijelzőn.

A P3 processzor hagyományos módon működik. Kezeli a megszakítást, azaz időzített feladatot hajt végre, majd a számláló értékét kiküldi a kijelzőre. A P3 processzoron futó hagyományos megoldás futási paramétereit hasonlítjuk össze egy, a feladatot párhuzamosan (P1 és P2) végrehajtó rend-

szerral. A P1 processzor a fő programot futtatja, míg a P2 processzor a megszakításkezelést hajtja végre. Amikor a kivételkezelés megtörtént, a P2 processzor „sleep”-, azaz alvó állapotba kerül.

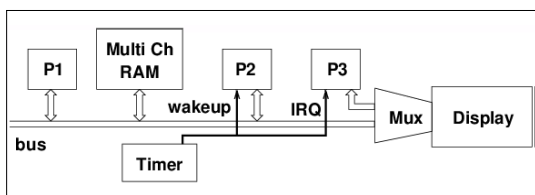
A megszakításjel hatására a P2 processzor éled és végrehajtja a kivételkezelő programot.

Ennek a processzornak a működését úgy terveztük meg, hogy elkerülje a szokásos megszakításkezelési folyamat végrehajtása során felmerülő problémákat, például a kiszolgálás elindulásához szükséges idő ingadozását. Ezért az időzítő periféria jelét nem az ISR-jel-megszakítási kérelem bemenetére csatlakoztattuk. A processzor felfüggesztett állapotban van (alvó üzemmódban). Az időzítő által generált periféria jel csatlakozik a processzor „ébresztését” indító (WakeUp) bemenetre. Amikor a jel indítja a processzort, akkor megtörténik az ISR kiszolgálása, amely ezúttal a P2 fő programjaként szerepel. Mivel az ébredés az ISR-jel felfutó élére történik (a processzor felfüggesztése a program elején van), azonnal megkezdődik az „ISR” kiszolgálása. Nincs szükség a megszakításelfogadás folyamatára. Nincs szükség a fő program állapotának mentésére, mert a processzornak az ISR a fő programja. Ezért a $C_{\text{Overhead}} = 0$ az (1) és (2)-es egyenletekben.

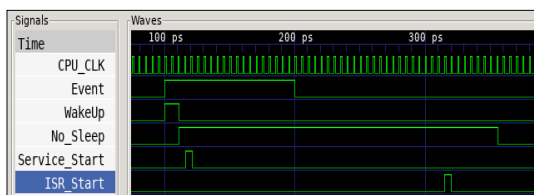
Az „ISR”-kiszolgálás végén a program visszaugrik a program elejére, ahol egy utasítás felfüggeszti a processzort, így az alvó üzemmódban várja a következő ISR-jelét. A periféria megszakításjelét a processzormegszakítás kezelő áramköre tárolja a szolgáltatás megkezdéséig.

A párhuzamos megoldás szimulációjának eredményét, összehasonlítva a hagyományos megoldással, a 6. ábra mutatja. Az esemény- (Event-) jel a periféria megszakítási kérését jelzi, ez az impulzus az időzítő perifériáról érkezik 10 kHz-es frekvenciával.

A WakeUp jel ébreszti a P2 processzort. A No_sleep jelet a processzor generálja, és jelzi, hogy folytatja a programvégrehajtást. A Service_Start jelet a P2 processzor az „ISR-kiszolgálás” első utasításával generálja, amely jelzi, hogy a szolgáltatás elindult.



5. ábra. Megszakításkezelés párhuzamosításának tömbvázlata



6. ábra. Megszakításkezelés párhuzamosításának idődiagramja

Az *Event* jel hagyományos módon megszakítja a P3-processzor-programot. A P3 processzor ISR-funkciójának első utasítása generálja az *ISR_Start* jelet. Ezen indikátorjel segítségével összehasonlíthatjuk a két ISR kezdőpontját, az egyiket, amelyet a P2-n hajt végre, és a másikat, amelyet a P3-on hajt végre. Látható, hogy a kivételkezelési folyamat miatt (regiszterek mentése stb.) a P3 processzor később kezdi meg az ISR-folyamatot, mint a P2 processzor.

5. Fuzzy interpoláció

A valós környezetben mozgó robotnak különféle helyzetekben kell döntést hoznia, az egyes helyzetekre megfelelően kell reagálnia. A viselkedésalapú irányítás esetén a szakértő által megadott viselkedések érvényesek adott helyzetek esetén. A helyzeteket a robot az érzékelői által szolgáltatott adatok és a belső állapota alapján ismeri fel. Minden meghatározó körülményhez tartozik egy-egy viselkedés, amelyet a robot végrehajt [12], [13] és [14].

Abban esetben, amikor a viselkedésmodellek fuzzy logikával kerülnek megvalósításra, a fuzzy állapotgépnek köszönhetően az összes lehetséges viselkedés részt vesz a robot irányításában, de különböző mértékben. Azok a viselkedések lesznek a legnagyobb hatással a robot mozgására, reakcióira, amelyek az adott megfigyeléshalmazba legjobban illeszkednek [12–14].

Mivel a valós környezetben mozgó robotot nagyon sokfajta hatás érheti, előfordulhat, hogy egy-egy megfigyeléshalmazhoz nem tartozik viselkedés. Ebben az esetben a robot döntésképtelenné válhat. Újabb fuzzy szabályok hozzáadásával ez javítható, de túl sok szabály számítása nagy számítási erőforrást igényel. Erre az esetre ad megoldást a fuzzy-szabály-interpoláció [12–14].

Az interpolációs eljárásnak köszönhetően elég a szakértőnek a legmeghatározóbb szabályokat megadni, és a köztes esetekben az interpolációs eljárás fogja a kimeneti értékeket szolgáltatni [12–14].

A szakértői tudásbázis használatával a rendszer akkor is közel megfelelően viselkedik, amikor nincs az adott helyzetre viselkedésszabálya. A fuzzy állapotgép a FIVE (Fuzzy Interpolation in Vague Environment) fuzzy interpolációs eljárást alkalmazza [12–14].

A viselkedésalapú irányítás egyik alkalmazási példája az etorobotika, ahol a robot valamilyen élőlény viselkedését utánozza.

5.1. A FIVE-módszer

Az autonóm robotok döntéshozatali folyamata többféle érzékelőből származó információ és a belső állapot alapján történik. Ezek a bemeneti adatok képezik a fuzzy szabályok megfigyeléseit, más néven antecedenseit, míg a fuzzy szabályok kimeneteit konzekvenseknek nevezzük. Egy fuzzy szabály, „HA ... AKKOR ...”-formájú implikáció formájában írható fel. Az azonos kimenetet befolyásoló fuzzy szabályok összességét fuzzy szabálybázisnak nevezzük [13][15][16].

A klasszikus fuzzy rendszerekben a stabilitás érdekében a szabályokat úgy kell kialakítani, hogy minden lehetséges bemeneti kombinációhoz tartozzon egy szabály. Ez biztosítja, hogy a szabályok teljesen lefedjék az állapotteret. Azonban a megoldandó feladat méretének növekedésével a szabályok száma exponenciálisan nőhet, ami jelentős számítási igényt eredményez. Továbbá, a nagyszámú szabály előállítása gyakran problematikus, mivel a szakértők nem mindig tudják teljes mértékben lefedni a problémát a matematikai bonyolultság vagy információhiány miatt. Ennek következtében a teljesen lefedő szabályrendszer helyett gyakran ritka szabálybázissal dolgozunk, amelyben előfordulhat, hogy egyes megfigyelésekhez nem tartozik szabály, így a rendszer kimenete bizonytalan lesz.

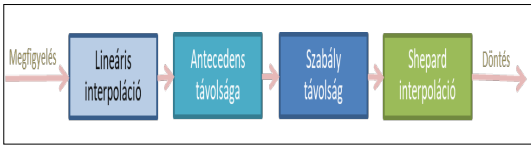
A ritka szabályrendszerek gyakoribbak, mint a teljes lefedést biztosító szabályrendszerek.

A fuzzy interpolációs módszerek megoldást kínálnak a ritka szabályrendszerek problémájára. Ezek a módszerek a hiányzó szabályokhoz tartozó döntéseket a meglévő szabályok alapján számítják ki. Ennek köszönhetően a szakértőnek elegendő csak a legfontosabb szabályokat megadnia, csökkentve ezzel a szabályok számát és a rendszer bonyolultságát, valamint az interpolációs módszertől függően a számítási igényt is.

A FIVE- (Fuzzy Interpolation in a Vague Environment) módszer a szabályokat egy homályos térben helyezi el, ahol értelmezhető a szabályok közötti euklideszi távolság. A szabályok közötti távolság alapján különböztethetők meg egymástól: nagyobb távolság nagyobb különbséget, míg kisebb távolság hasonlóbb szabályokat jelent.

A szabálytávolsággal súlyozott konzekvenseket felhasználva, a Shepard-interpoláció inverz távolságokkal számítva hozza létre a szabálybázis döntését. A FIVE-módszer számítási lépéseit az alábbiakban ismertetjük (lásd 7. ábra):

– A megfigyelés a környezetből vagy a belső állapotból származó információ.



7. ábra. A FIVE hardveres gyorsító számítási lépései

- Lineáris interpoláció segítségével rendeli hozzá a megfigyeléshez azt az értéket, amely megadja, hogy az adott fuzzy halmaznak milyen mértékben tagja a megfigyelés értéke (μ).
- A szabályhoz tartozó antecedens és a megfigyelés μ értékének különbsége adja meg az antecedentstávolságot.
- A szabálytávolság az antecedentstávolságok euklideszi távolsága.
- A Shepard-interpoláció a szabálytávolságokat használja fel a döntés, azaz a konzekvens előállításához.

5.2. A FIVE-hardver felépítése

A hardveres megvalósítással szembeni legfontosabb követelmény a működés közbeni hangolhatóság és paraméterezhetőség. Ez azt jelenti, hogy az áramkör működése közben annak leállítása nélkül módosíthatók a FIVE paraméterei, beleértve az antecedens- és konzekvensértékeket.

Ennek érdekében a paramétereket regiszterekben tárolják, amelyekhez olyan felület készült, amely lehetővé teszi, hogy egy órajelciklus alatt megváltoztatható legyen az egyes modulok belső adata.

Az áramkör egyszerű csatlakoztatása a külvilághoz változtatható bitszélességű kimeneti és bemeneti buszokon keresztül történik. Ez a buszrendszer lehetővé teszi az AXI-interfészsel való kompatibilitást is, ami különösen hasznos a FIVE-hardver integrálásában a processzoros rendszerhez.

A skálázható felbontás moduláris felépítéssel és paraméterezhető bitszélességgel valósult meg. Az egyes modulok száma a szabályok által igényelt mennyiség szerint változtatható, így rugalmasan alkalmazkodik a rendszer követelményeihez.

Fontos szempont a kód hordozhatósága az FPGA-platformok között, így a Verilog nyelven írt kódban nem kerültek felhasználásra gyártó, specifikus elemek. Ez biztosítja, hogy a kód különböző platformokon is alkalmazható legyen.

Az áramkör generálható az FBDL- [17] (Fuzzy Behavior Description Language) nyelvből. A modulok kapcsolódása és paraméterei az FBDL-nyel-

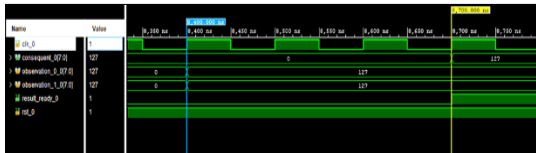
ven leírt szabálybázisokból nyerhetők ki, ami egyszerűsíti a rendszer tervezését és implementációját.

A FIVE-módszer négy számítási lépésen keresztül képes az eredmények előállítására, amelyek két interpolációs számításból és két távolságszámításból állnak. Az adatfolyam feldolgozását a 7. ábra szemlélteti, amely egy szabálybázis számítási lépéseit tartalmazza. Az ábrán látható, hogy a Shepard interpolációs modul kivételével az egyes modulok száma a szabálybázisban található szabályok, antecedensek és megfigyelések számától függ. A lineáris interpolációk számát a megfigyelések száma határozza meg, míg az antecedentstávolság-számítások száma az egyes szabályok antecedenseinek számától függ. Minden szabályhoz egy szabálytávolság-számító modul tartozik, és a Shepard-interpoláció számítása egyetlen modulal valósul meg szabálybázisonként.

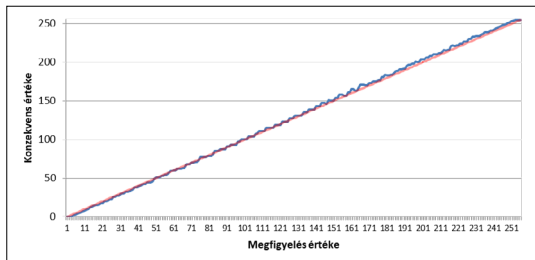
A lineáris interpoláció számítása a végső megvalósításban "Universe" néven szerepel. A kísérleti megvalósítás Vivado High Level Synthesis eszközzel is elkészült, az alap- μ FRI-könyvtár [18] módosítás nélküli és optimalizált változatainak felhasználásával.

A FIVE FPGA megvalósítása egy szinkron számítási láncot képez. Az áramkör minden egysége a bemenő adatok megváltozására reagálva állítja elő a kimeneti értéket. A hardver változtatható bitszélességgel működik, alapértelmezés szerint 8 bites előjel nélküli, egész számokat használ a bemenetein és kimenetein. A Verilog paraméterezési lehetőségei révén a bitszélesség változtatható, és a paraméterek alapján az érintett sínrendszerek szélessége átszámítható. A számításához szükséges adatok szintén paraméterben adhatók meg. A Verilog kód az FBDL (Function Block Diagram Language) alapján készült, és a paraméterek segítségével az értékek megváltoztatása újragenerálás nélkül lehetséges.

Az egyes számítási egységek és a befoglaló egység is állandó és változó részekből épül fel. Azok a részek, amelyek száma a szabályok és szabálybázisok tulajdonságai alapján változik (szabályok száma, megfigyelések száma, antecedensek száma stb.), a kódban kiemelve, az FBDL-ből előállítható formában kerültek a Verilog kódba. A számítási egységek szerinti felosztás biztosítja a pipeline működést. Az egyes egységek tartalmaznak egy belső bemeneti és egy kimeneti tárolóregisztert, ahol a beérkező adat és az eredmény tárolható. A jelenlegi terv szerint minden egység egy órajelen belül ad eredményt, kivéve a Universe-egységet, amely két lépésben állítja elő az eredményt.



8. ábra. A FIVE hardveres gyorsító késleltetése



9. ábra. A FIVE hardveres gyorsító hibája

5.3. Eredmények

A rendszer szimulációs eredményei a Xilinx Vivado 2018.1 verzióval kerültek előállításra. A teljes számítási lánc késleltetése 4 órajel, ahogy az a 8. ábrán látható. A rendszer előjel nélküli egész számokkal képes működni, és maximális működési frekvenciája 4 MHz. A FIVE-gyorsító pipeline-működésre képes, linearitási hibáját a 9. ábra szemlélteti. A szimuláció alapján a legnagyobb abszolút eltérés a várt értéktől 6, ami a 8 bites tartományon 2,34%-nak felel meg.

A FIVE-módszer FPGA-n történő alkalmazásához egy Verilog hardver leíró nyelven készült váz is elkészült, amely alkalmas arra, hogy az FBDL (Fuzzy Behavior Description Language) alapján generálható hardverelemként gyorsítsa a FIVE-módszer számítását. Ez az elem alkalmazható önállóan vagy CPU-val társítva, gyorsító segédáramkörként. A FRI_FIVE-modulok összekapcsolásával összetett viselkedést megvalósító fuzzy viselkedésautomaták hozhatók létre.

A FIVE IP struktúrája lehetővé teszi a Xilinx Adaptive Platformon történő implementálását is, mint szoftveres környezetben működő hardveres gyorsítóegységet. Ebben az esetben a számítási egységek FIVE IP AXI-n keresztül csatlakoznak a processzoros rendszerhez, ahol az irányító rendszer szoftveres modulja végzi az adatgyűjtési és irányítási feladatokat. A rendszerről részletes leírást a [19] cikk tartalmaz.

Szakirodalmi hivatkozások

[1] J. Neumann., *First Draft of a Report on the EDVAC*. Moore School of Electrical Engineering, University of Pennsylvania, 1945.

- [2] W Aspray: *John von Neumann and the Origins of Modern Computing*. MIT Press, Cambridge, 1990, p. 34-48.
- [3] Drótos D., Vásárhelyi J.: *Interrupt Driven Parallel Processing*. In: 20th International Carpathian Control Conference (ICCC), Krakow-Wieliczka, Poland, 2019, 1-4.
<https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2019.8765909>
- [4] G. Zhao, S. Hassan, Y. Zou, D. Truong, T. Corbin: *Predicting Performance Anomalies in Software Systems at Run-Time*. ACM Transactions. Software. Engineering. Methodology. 30/3. Article 33 (July 2021).
<https://doi.org/10.1145/3440757>
- [5] H. Sayadi, N. Patel, S. Manoj P.D., A. Sasan, S. Rafatirad, H. Homayoun: *Ensemble Learning for Effective Run-Time Hardware-Based Mal Ware Detection: A Comprehensive Analysis and Classification*, 55th ACM/ESDA/IEEE Design Automation Conference (DAC), 2018, pp. 1-6,
<https://doi.org/10.1109/DAC.2018.8465828>
- [6] J. Muskens, M. Chaudron: *Prediction of Run-Time Resource Consumption in Multi-Task Component-Based Software Systems*. In: Crnkovic I., Stafford J.A., Schmidt H.W., Wallnau K. (eds) *Component-Based Software Engineering*. CBSE 2004. Lecture Notes in Computer Science, vol. 3054. Springer, Berlin, Heidelberg 2004.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-24774-6_16
- [7] B. H. Fletcher: *FPGA Embedded Processors*. In: *Embedded Training Program Embedded Systems Conference* San Francisco 2005 ETP-367, 2005, 37.
- [8] D. Drótos, J. Vásárhelyi: *Microprocessor Load Measurement in an Embedded System*. 24th International Carpathian Control Conference (ICCC), Miskolc-Szilvásvárad, Hungary, 2023. 110-113.
<https://doi.org/10.1109/ICCC57093.2023.10178929>
- [9] G. M. Amdahl, *Validity of the Single Processor Approach to Achieving Large-Scale Computing Capabilities*. In: *AFIPS Conference, Proceedings*, Vol. 30. 483-485.
<https://doi.org/10.1145/1465482.1465560>
- [10] U. Vishkin: *Is Multicore Hardware for General-Purpose Parallel Processing Broken?* Comm. ACM, 57, p. 35 (2014) *The Future of Computing Performance: Game Over or Next Level?*, <https://www.nap.edu/read/12980/chapter/1>, 31/08/2017. utoljára látogatott: 2024. 06. 06.
- [11] A. N. Sloss, D. Symes, C. Wright: *ARM System Developer's Guide Designing and Optimizing System Software*. Elsevier, Morgan Kaufmann Publishers, ISBN: 1-55860-874-5, 2004, 702.
- [12] Kovács S., Kóczy L.: *Application of the Approximate Fuzzy Reasoning Based on Interpolation in the Vague Environment of the Fuzzy Rulebase in the Fuzzy Logic Controlled Path Tracking Strategy of Differential Steered AGVs*. In: *International Conference on Computational Intelligence*, 1997. 456-467.

- [13] Kovács S.: *Extending the Fuzzy Rule Interpolation FIVE by Fuzzy Observation*. In: Computational Intelligence, Theory and Applications, Springer, 2006. 485–497.
- [14] S. Kovács, M. Gácsi, D. Vincze, P. Korondi, Á. Miklósi: *A Novel, Ethologically Inspired HRI Model Implementation: Simulating Dog-Human Attachment*. In: 2nd International Conference on Cognitive Infocommunications, 2011. 1–4.
- [15] T. Tompa, S. Kovács: *Applying Expert Heuristic as an A Priori Knowledge for FRIQ-Learning*. Acta Polytechnica Hungarica, 17. (2020) 27–45.
- [16] T. Tompa, S. Kovács, D. Vincze, Mihoko Niitsuma: *Demonstration of Expert Knowledge Injection in Fuzzy Rule Interpolation Based Q-Learning*. In: IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), 2021. 843–844.
- [17] I. Piller, D. Vincze, S. Kovács: *Declarative Language for Behaviour Description*. In: Emergent Trends in Robotics and Intelligent Systems. Springer, 2015. 103–112.
- [18] R. Bartók, J. Vásárhelyi: *Two Methods for Autonomous Robot Obstacle Sensing and Application Programming Interface for Fuzzy Rule Interpolation*. 18th International Carpathian Control Conference (ICCC). IEEE, 2017.
- [19] R. Bartók, J. Vásárhelyi: *Design of a FPGA Accelerator for the FIVE Fuzzy Interpolation Method*. International Journal of Computer Applications in Technology, 68/4. (2022) 321–331.

SZERZŐK JEGYZÉKE

LIST OF AUTHORS

A

AHMAD BUHAIRI MINHALINA BINTI 56
AICHAOUI NADA EL YASMINE 1

B

BALAJTI ISTVÁN 21
BATÓK ROLAND 97
BITAY ENIKŐ 7
BOGYOR ANDREA 7

C–D

CSAVDÁRI ALEXANDRA ANA 7
DEZSŐ GERGELY 16, 89
DIÓS SZABOLCS SÁNDOR 21
DINYA TAMÁS 21
DRÓTOS DÁNIEL 97

E–F

EGYED-FALUVÉGI ERZSÉBET 84
FERENCZ JÁNOS 36

G–I

GÁTI JÓZSEF 31, 61
GERGELY ATTILA 80
GOBESZ F.-ZSONGOR 67
IMECS MÁRIA 36

K

KELEMEN ANDRÁS 36
KOVÁCS TÜNDE ANNA 1, 56, 61
KUTI JÁNOS 31

M

MASUK ABDULLAH 21
MÁTÉ MÁRTON 48

N

NAGY BALÁZS ÁKOS 61
NAGY ÖRS 67
NÉMETH BÍBORKA 73
NÉMETHY KRISZTINA 31

P

PETTENDI DÁVID 21
PINKE PÉTER 56
PORTIK SZILVESZTER 80

R

RAPPERT BALÁZS 84
REZES GÁBOR 89
RUBINT PÉTER 97

S–SZ

SÁNDULY ANNABELLA 67
SZÁNTÓ ATTILA 21
SZIGETI FERENC 89
SZŐCS KRISZTINA 48

T–V

TÓTH LÁSZLÓ 56
VÁSÁRHELYI JÓZSEF 97

